

Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

Band 8: Kometen



Kometen und Oortsche Kometenwolke

M.Scholz

Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

Band 8: Kometen

Kometen und Oortsche Kometenwolke

E-Book-Ausgabe 2009

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig.

Bildnachweis: Wikipedia Commons, Autor

M.Scholz

Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

Band 8

Kometen

Kometen und Oortsche Kometenwolke

Ausgabe 2009

mathias.scholz@t-online.de

INHALTSVERZEICHNIS

KOMETEN	2
Was ist ein Komet?	6
Kometenbahnen und Statistik	7
Kurzperiodische Kometen	8
Langperiodische Kometen	8
Kometengruppen	10
Aufbau eines Kometen	12
Der Kometenkern	13
Die Koma	25
Der Schweif	32
Ionenschweif (Typ I)	32
Staubschweif (Typ II)	33
Wechselwirkung mit dem Sonnenwind	37
Halleyscher Komet	40
Bahn	42
Kometenkern	42
OORTSCHE KOMETENWOLKE	44

Vorwort

Das Ziel dieser mehrbändigen Lehrbuchreihe ist es, grundlegende Erkenntnisse über die Welt außerhalb unserer Erde in systematischer Weise auf einem Niveau, den man im amerikanischen als „undergraduate“ bezeichnen würde, dem Leser näher zu bringen. Dabei wurde sowohl eine gewisse Ausführlichkeit als auch Aktualität (hier etwa 2007) – soweit das bei den einzelnen Themenkomplexen überhaupt möglich ist – angestrebt. Gerade in der Astronomie und Astrophysik beobachtet man gegenwärtig innerhalb kürzester Zeiträume einen enormen Wissenszuwachs, wie man es bei anderen Wissenschaften in diesem Umfang her nur begrenzt kennt. Allein während der Arbeit an dieser Buchreihe erforschte die Raumsonde „Galilei“ das Jupitersystem, erreichte „Cassini“ den Saturn mit seinem komplexen Ringsystem und „Huygens“ die Oberfläche des Saturnmondes Titan; eine ganze Anzahl von „Transplutos“ mit „Eris“ an der Spitze wurden entdeckt, was u.a. dazu führte, daß der neue Begriff „Zwergplanet“ in die astronomische Terminologie eingeführt wurde und die bekannten Merksätze für die Planeten unseres Sonnensystems nur noch bedingt gültig waren und umformuliert werden mußten ...

Während es vor 30 Jahren nicht sonderlich schwierig war, die Anzahl und die Namen der Satelliten der Planeten unseres Sonnensystems aufzusagen, ist das heute längst nicht mehr möglich. Man hat sogar den Eindruck, daß es zunehmend schwieriger wird, für die neuentdeckten Objekte überhaupt Namen zu finden, wie die vielen noch vorläufigen Bezeichnungen der neuentdeckten Jupiter- und Saturnmonde zeigen. Und schließlich soll in diesem Zusammenhang nur noch auf den inflationären Zuwachs an Entdeckungen von Exoplaneten allein im letzten Jahrzehnt hingewiesen werden, die uns viele neue Einsichten in die Struktur und Entstehung von Planeten und Planetensystemen gewährt haben. Gerade an Planeten um weit entfernte Sterne entzündet sich unsere Phantasie, wie die vielen künstlerischen Darstellungen beweisen, die man bei der Recherche im Internet leicht auffinden kann.

Ziel dieser „Einführung“ in die Astronomie und Astrophysik ist es Leser anzusprechen, die einen nicht zu kompakten Einstieg in diese Wissenschaft in deutscher Sprache wünschen und auch daran interessiert sind, an die im Internet oder über Zeitschriften zugängliche Fachliteratur herangeführt zu werden. Angesprochen sind in erster Linie Schüler der Abiturstufe unserer Gymnasien, ihre Lehrer, Studenten der ersten Studienjahre sowie selbstverständlich auch die wachsende Zahl an Liebhaberastronomen (so wie der Autor), die mehr wissen wollen über die Objekte, die sie in ihren „Backyard“- Observatorien oder an Volks- und Schulsternwarten beobachten.

Auf Zitierungen wurde im Text – dem Charakter eines Lehrbuches entsprechend – weitgehend verzichtet. Fachaufsätze lassen sich mittlerweile leicht über Google Scholar oder über das Astrophysics Data System (ADS) recherchieren.

Zum Schluß möchte ich mich noch bei meinem Freunden, Bekannten und Kollegen bedanken, die mich mittelbar und unmittelbar während der Zeit der Erarbeitung dieser Buchreihe unterstützt haben.

M.Scholz

Herbst 2007

Kometen

Auf unserer Erde bedeutet es aus unerfindlichen Gründen etwas, prominent, berühmt und bekannt zu sein, auch wenn nicht immer persönliche Leistung dahintersteckt. Auf alle Menschen bezogen gibt es nicht viele, welche die dazu notwendigen (aber nicht hinreichenden) Bedingungen erfüllen wie Schönheit, Reichtum und manchmal auch überragende Leistungen auf wissenschaftlichen, kulturellen und sportlichen Gebiet – es sei denn, irgend ein Amt hebt einen automatisch in diese Position. Im Jahre 1995 gelang es zwei Liebhaberastronomen in diesen erlauchten Klub einzutreten, ohne die oben angegebenen Bedingungen in all ihrer Strenge erfüllen zu müssen: ALAN HALE und THOMAS BOPP. Selbst in den entferntesten Winkeln Australiens oder Asiens wurde die erstaunte Frage, was denn das für ein prachtvolles Objekt sei, welches am abendlichen Himmel im Frühjahr des Jahres 1997 majestätisch über dem Horizont steht, mit der Floskel „das ist Hale-Bopp“ kurz und bündig beantwortet.

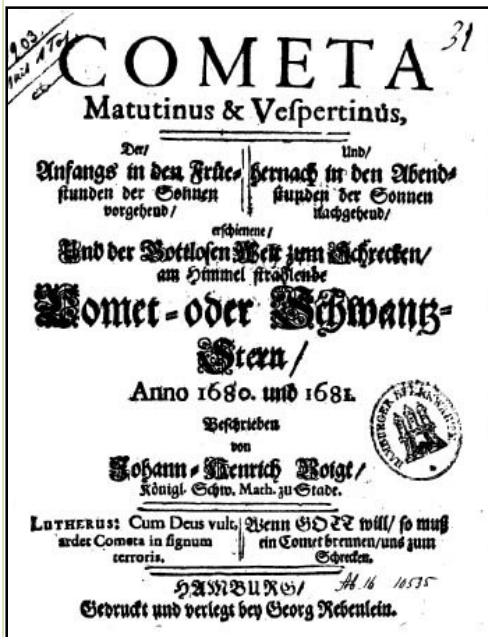
Kometen gehören seit je zu den spektakulärsten Himmelserscheinungen, die zu allen Zeiten mit großer Aufmerksamkeit beobachtet wurden. „Gaststerne“, wie man sie auch nannte, galten im Mittelalter und frühen Neuzeit jedoch hauptsächlich als Unglücksbringer, die für mancherlei Übel auf der Welt verantwortlich gemacht wurden.



Einer der eindrucksvollsten Kometen aller Zeiten war der Komet Donati von 1858

Bekannt sind die sogenannten Kometenflugblätter aus jener Zeit, die noch in manchen Archiven und Bibliotheken schlummern. Dort wird von „erschrecklichen Zornruten Gottes“ und „Pestilenz bringenden Haarsternen“ berichtet. Es scheint, daß man in jener Zeit alle Übel der Welt, die einen Menschen widerfahren können, durch „Haarsterne“, was Komet übersetzt bedeutet, verursacht dachte.

In diesem Gedicht, das angeblich aus der Zeit des dreißigjährigen Krieges stammen soll und dessen genaue Herkunft nicht recherchiert werden konnte, wird das in eindringliche Worte gefaßt:



*Es zeugen uns alle Cometen zwar
Sehr viel Unglücks, Trübsal und Gefahr,
Und hat niemals eines Cometen Schein
Pflegen ohne böse Bedeutung zu sein.
Achterley Unglück insgemein entsteht,
Wann in der Luft brennet ein Comet:*

- 1) Viel Fieber, Krankheit, Pestilenz und Todt,
- 2) Schwere Zeit, Mangel und große Hungersnoth,
- 3) Große Hitze, dürre Zeit und Unfruchtbarkeit,
- 4) Krieg, Raub, Brand, Mord, Aufruhr, Neid, Haß und Streit,
- 5) Frost, Kälte, Sturmwind, böse Wetter, Wassersnoth,
- 6) Viel hoher Leute Untergang und Todt,
- 7) Feuersnoth und Erdbeben an manchem End,
- 8) Große Veränderung der Regiment.

*So wir aber Buße thun von Herten,
So wendet Gott auch alles Unglück und Schmerzen.*

Hier erkennt man schon, das zu jener Zeit immer noch die alte ARISTOTELES'sche Deutung der Kometen als Erscheinung der Meteorologie und nicht der Astronomie zur Erklärung herangezogen wurde: Kometen sind Ausdünstungen der Erde, die sich in den oberen Luftschichten entzündet haben.

Im Jahre 1577 konnte der berühmte Astronom TYCHO BRAHE (1546-1601) auf seiner Sternwarte Uranienburg mit speziellen Peilgeräten (das Fernrohr war zu jener Zeit noch nicht erfunden) einen sehr hellen Kometen über mehr als zwei Monate verfolgen. Aus dem Fehlen einer meßbaren Parallaxe schlußfolgerte er richtigerweise, daß Kometen außerhalb der Erde - und offensichtlich sogar weit hinter dem Mond - ihre Bahn ziehen. Eine qualitative Erklärung des Phänomens blieb ihm aber trotzdem verwehrt.

Erst über 100 Jahre später - zwischenzeitlich hatte JOHANNES KEPLER (1571-1630) seine Planetengesetze entdeckt und ISAAK NEWTON (1643-1727) das von ihm gefundene Gravitationsgesetz zur Erklärung der Bewegung der Himmelskörper herangezogen - konnte EDMOND HALLEY (1656-1742) durch die Entdeckung, das Kometen periodische, d.h. wiederkehrende Erscheinungen sind, die Kometenforschung wieder ein großes Stück voranbringen. Sein Forschungsobjekt, der große Komet von 1682, wird heute ihm zu Ehren „Halley'scher Komet“ genannt und ist fast ebenso bekannt wie Hale-Bopp.

Zuvor hatte GEORG SAMUEL DÖRFFEL aus Plauen (1643-1688, zuletzt Superintendent in Waida) anhand seiner Beobachtungen des großen Kometen von 1680 nachweisen können, daß sich dieser Komet auf einer Parabelbahn mit dem Brennpunkt Sonne bewegt. Damit konnte er zeigen, daß die beiden Kometen von 1680 und 1681 ein und derselbe war und zwar einmal vor und einmal nach dem Periheldurchgang. Seine Schrift „Dissertatio de Cometa“ hat diesen sonst heute wohl vergessenen Liebhaber der Astronomie in den Kreisen der Kometenforscher weltberühmt gemacht.



Titelblatt von Dörffels Abhandlung über den großen Kometen von 1680/1681

Es gibt also danach offensichtlich Kometen, die auf langgestreckten Ellipsenbahnen oder parabelnahen Bahnen (die Ellipsenbahnen mit einer Exzentrizität nahe 1 entsprechen) um die Sonne laufen. Die

Einführung

Suche nach neuen Kometen – insbesondere periodischer – entwickelte sich in der Folgezeit zu einer Lieblingsbeschäftigung mancher Astronomen, die bei Erfolg in Fachkreisen zu Hochachtung und Anerkennung führte. Dem Franzosen CHARLES MESSIER (1730-1817) gelangen zum Beispiel im Laufe seines Lebens 19 Kometenentdeckungen. Aber nicht diese Kometenentdeckungen haben seinen Namen in die Gegenwart gerettet. Richtig berühmt hat ihn eigentlich ein Nebenprodukt seiner Beobachtungstätigkeit gemacht, sein weithin bekannter Katalog der Nebelflecken (1784), der noch heute jeden Astronomen geläufig ist. Und noch ein Beispiel: ERNST WILHELM LEBERECHT TEMPEL (1821-1889) aus Niedercunnersdorf in der Oberlausitz. Er gilt als Entdecker von 21 Kometen. Darunter so Prominente wie 55/Temple-Tuttle, der Ursprungskomet des Leonidenmeteorstroms und 9P/Tempel-1, der 2005 von der NASA-Sonde „Deep Impact“ besucht (und beschossen) wurde.

Von den mehr theoretisch bewanderten Astronomen wurden neue und schnelle Berechnungsmethoden (zu jener Zeit war die Logarithmentafel und der Kopf der Computer des kleinen Mannes) insbesondere auch für Parabelbahnen entwickelt. Hier ist in diesem Zusammenhang besonders der Bremer Arzt und Liebhaberastronom WILHELM OLBERS. (1758-1840, er entdeckte selbst 6 Kometen) zu nennen, dessen Schrift „Abhandlung über die leichteste und bequemste Methode, die Bahn eines Kometen aus einigen Beobachtungen zu berechnen“ (1797) die Berechnung der Bahnen von Kometen und ihrer Ephemeriden wesentlich vereinfachte.

Während man die Bahneigenschaften der Kometen immer besser verstand, wurden wesentliche Fortschritte über ihre physische Natur erst im 20. Jahrhundert erzielt. Alle Deutungsversuche davor waren eher vage. So führte z.B. die Entdeckung, daß viele kurzperiodische Kometen ihr Aphel in der Nähe der Jupiterbahn haben („Jupiterfamilie“), zu der Hypothese, daß Kometen Himmelskörper sind, die ab und an von Jupiter ausgestoßen werden ohne jedoch genau zu erklären, wie das eigentlich funktionieren soll. Als Höhepunkte der Kometenforschung des 19. Jahrhunderts kann man die Erklärung der Kometenschweife durch austretenden Staub unter Einwirkung einer von der Sonne ausgehenden repulsiven Kraft durch FRIEDRICH WILHELM BESSEL (1784-1846) (1836) und der Nachweis, das Kometen mit Meteorströmen verbunden sind, durch GIOVANNI SCHIAPARELLI (1835-1910) (1866), ansehen.

Die Staubtheorie BESSELS hatte sehr lange Bestand, da sie in einigen wesentlichen Punkten der Wahrheit recht nahe kam. Im Jahre 1900 zeigte SVANTE ARRHENIUS (1859-1927), daß für BESSELS repulsive Kraft der Strahlungsdruck des Sonnenlichts in Frage kommt. Diese Idee wurde z.B. von KARL SCHWARZSCHILD (1873-1916) aufgegriffen und später von ARTHUR EDDINGTON (1882-1944) weiterentwickelt, der 1910 (das war übrigens das Jahr, wo der Halleysche Komet wieder einmal zu sehen war) eine Theorie entwickelte, die erklärt, wie Staubpartikel in Sonnennähe einen Kometen verlassen können..

1868 beobachteten GIOVANNI DONATI (1826-1873) und WILLIAM HUGGINS (1824-1910) zum ersten Mal einen Kometen durch ein Spektroskop und fanden, daß sich ihr Licht doch wesentlich von gewöhnlichem reflektiertem Sonnenlicht unterscheidet. Die in den Kometenspektren vorherrschenden molekularen Banden konnten erst über ein halbes Jahrhundert später mit Hilfe der Quantentheorie erklärt werden.

Von 1950 stammt das berühmte Modell des „schmutzigen Schneeballs“ für einen Kometenkern (FRED WHIPPLE (1906-2004), 1950/51) und die Theorie der Kometenwolke, welche das Sonnensystem als sphärische Schale von außen her umschließt (JAN OORT (1900-1992), 1950). Und als weitere große Entdeckung soll die Erklärung der Plasmaschweife von Kometen als Ergebnis der Wechselwirkung der Kometengase mit einer von der Sonne permanent ausgehende Partikelstrahlung (die heute als Sonnenwind bezeichnet wird) durch den deutschen Astronomen LUDWIG BIERMANN (1907-1986) (1951) nicht unerwähnt bleiben.

1986 trat dann ein Ereignis ein, welches die Kometenforschung wahrhaft beflügelte – die Wiederkehr des Kometen Halley. Wenn sich seine Erscheinung am Himmel auch in Grenzen hielt, war er doch ein Medienereignis und das Ziel einer ganzen Armada von interplanetaren Raumsonden, von denen hier nur „Giotto“ erwähnt werden soll. Die Ergebnisse dieser Raumfahrtmissionen haben das heutige Bild der Kometen ganz wesentlich mitgeprägt. Darüber soll in den folgenden Abschnitten berichtet werden.

Was ist ein Komet?

Ein Komet ist ein verdreckter Eisklumpen aus der Urzeit unseres Sonnensystems, der, wenn er sich in die Nähe der Sonne verirrt, eine Gashülle (Koma) und einen Schweif ausbildet und dabei manchmal zu einer ganz spektakulären Himmelserscheinung werden kann – siehe Hale-Bopp (1997) oder McNaught (2007).

Das ist die Definition, die zur Allgemeinbildung gehört. Oder wie es DAVID LEVY (der zusammen mit EUGENE SHOEMAKER (1928-1997) den Kometen entdeckt hat, dessen Bruchstücke auf den Jupiter geknallt sind, einmal ausgedrückt hat: *"Comets are like cats. They have tails, and they do precisely what they want"*. Doch was sind nun Kometen im Unterschied zu z.B. Planetoiden?

Kometen unterscheiden sich von klassischen Planetoiden in erster Linie dadurch, daß sie in Sonnennähe (Abstand von der Sonne < 10 AU) eine typische Atmosphäre – die Koma – ausbilden, aus der sich bei weiterer Annäherung an die Sonne ein z.T. mehrere Millionen Kilometer langer Schweif entwickeln kann, der immer entgegengesetzt zur Richtung der Sonne zeigt. Dieser Schweif besteht aus feinen Staubteilchen (Staubschweif) und aus ionisierten Gasen (Plasmaschweif). Bei manchen Kometen (z.B. Hale-Bopp) lassen sich die beiden Schweiftypen klar auseinanderhalten, da sich der aufgrund der Lichtstreuung gelblich leuchtende Staubschweif meist etwas vom bläulich leuchtenden Plasmaschweif absetzt.

Der Ausgangspunkt für alle Prozesse, die letztendlich den Phänotyp eines Kometen bestimmen, ist dessen Kern. Wir wissen heute, daß er zu einem überwiegenden Teil aus volatilen Stoffen besteht, die bei Erwärmung abdampfen und dadurch die Koma ausbilden. In großen Entfernungen von der Sonne – z.B. hinter der Uranus-Bahn – wo die Sonnenenergie dafür nicht mehr ausreicht, sind sie wahrscheinlich von den Kuiper-Objekten nicht mehr zu unterscheiden. Andererseits verlieren periodische Kometen in Sonnennähe sehr schnell (innerhalb weniger 100000 bis einige Millionen Jahre) ihren gesamten Gasinhalt und übrig bleibt das, was man einen entgasten Kometenkern oder besser, einen zusammengebackenen Geröllhaufen nennen kann (auch der kann zerfallen und übrig bleibt ein kometarer Meteorstrom wie z.B. die Leoniden). In diesem Fall sind sie dann von klassischen

Was ist ein Komet?

Planetoiden durch erdgebundene Beobachtungen nicht mehr zu unterscheiden. Ein sicherlich wesentlicher Teil der NEO-Population dürfte deshalb zu dieser Objektklasse gehören.



Der Komet McNaught war Ende Januar 2007 eine der eindrucksvollsten Kometen der letzten Jahrzehnte, dessen volle Pracht aber leider nur auf der Südhalbkugel der Erde zu beobachten war. Immerhin erreichte er eine Helligkeit (-5.5 mag), mit der er selbst am Tageshimmel sichtbar wurde.

Übrigens, stellen wir uns einmal vor, Pluto würde durch irgendetwas in das innere Sonnensystem katapultiert. Was für einen grandiosen Kometen würde er wohl abgeben? Hale-Bopp könnte dann nur noch vor Neid erblassen...

Kometenbahnen und Statistik

Kometenbahnen unterscheiden sich im Mittel deutlich von den Bahnen der Planetoiden innerhalb der Jupiterbahn. Während sich die Bahnen der Planetoiden im Bereich der ekliptikalen Ebene häufen, zeigen zumindest die langperiodischen Kometen eine gleichmäßige statistische Verteilung der Bahnneigung i . Oder genauer ausgedrückt, ihre Verteilung ist der Größe $\sin i$ proportional.

Die Unterscheidung zwischen kurzperiodischen und langperiodischen Kometen erscheint auf dem ersten Blick als etwas willkürlich. Bei näherer Betrachtung ergeben sich aber doch einige interessante Gesetzmäßigkeiten, die mit dem Ursprung der Kometen zu tun haben.

Kurzperiodische Kometen

Darunter versteht man alle Kometen, deren Umlaufperiode um die Sonne kleiner als 200 Jahre ist. Das impliziert nach dem dritten Keplerschen Gesetz, daß ihre großen Bahnhalbachsen a kleiner als 34 AU sein müssen, d.h. ihre Apheldistanz kann maximal bis zur Neptun- bzw. Plutobahn reichen. Ihre Bahnen haben – statistisch gesehen - die Tendenz sich der Ekliptik anzunähern. Ihre Bahnneigungen i liegen (zumindest bei der Jupiter-Familie) meist unter 35° und zeigen nicht die sinusförmige Verteilungsfunktion der langperiodischen Kometen.

Man kann deutlich zwei Populationen von kurzperiodischen Kometen unterscheiden: Kometen, deren Aphel in der Region der Jupiterbahn angesiedelt sind, bilden die relativ große Gruppe der Jupiter-Familie. Kometen mit einem Aphel weit außerhalb der Jupiterbahn sowie mit Bahnneigungen, die so gut wie keine Tendenz zur Ekliptik zeigen, bilden (benannt nach ihrem Prototyp) die Halley-Familie.

Langperiodische Kometen

Kometen, deren Umlaufzeit um die Sonne die Marke von 200 Jahren übersteigt, werden als langperiodische Kometen bezeichnet. Die Periodendauer von 200 Jahren ist dabei nur eine Untergrenze. In der Regel besitzen sie parabelnahe Bahnen großer Exzentrizität, die sie nur alle paar Millionen Jahre einmal in das innere Sonnensystem führen. Nur wenige Kometen haben fast parabolische bis leicht hyperbolische Bahnen, die nicht regulär sind sondern durch Störungen einer langgestreckten Ellipsenbahn (z.B. durch nahe Vorübergänge an den großen Planeten oder durch die Repulsivwirkungen von in Sonnennähe explosionsartig austretender Gase) entstanden sind. Fast alle aufsehenerregenden Kometenerscheinungen der Menschheitsgeschichte gehören zu den langperiodischen Kometen.

Aus der Existenz und der Verteilung der Bahnelemente langperiodischer Kometen hat 1950 JAN OORT (1900-1992) auf die später nach ihm benannte Kometenwolke gefolgert, die um das äußere Sonnensystem einen sphärischen Bereich bildet und aus der ab und an Kometen in das innere Sonnensystem gelangen.

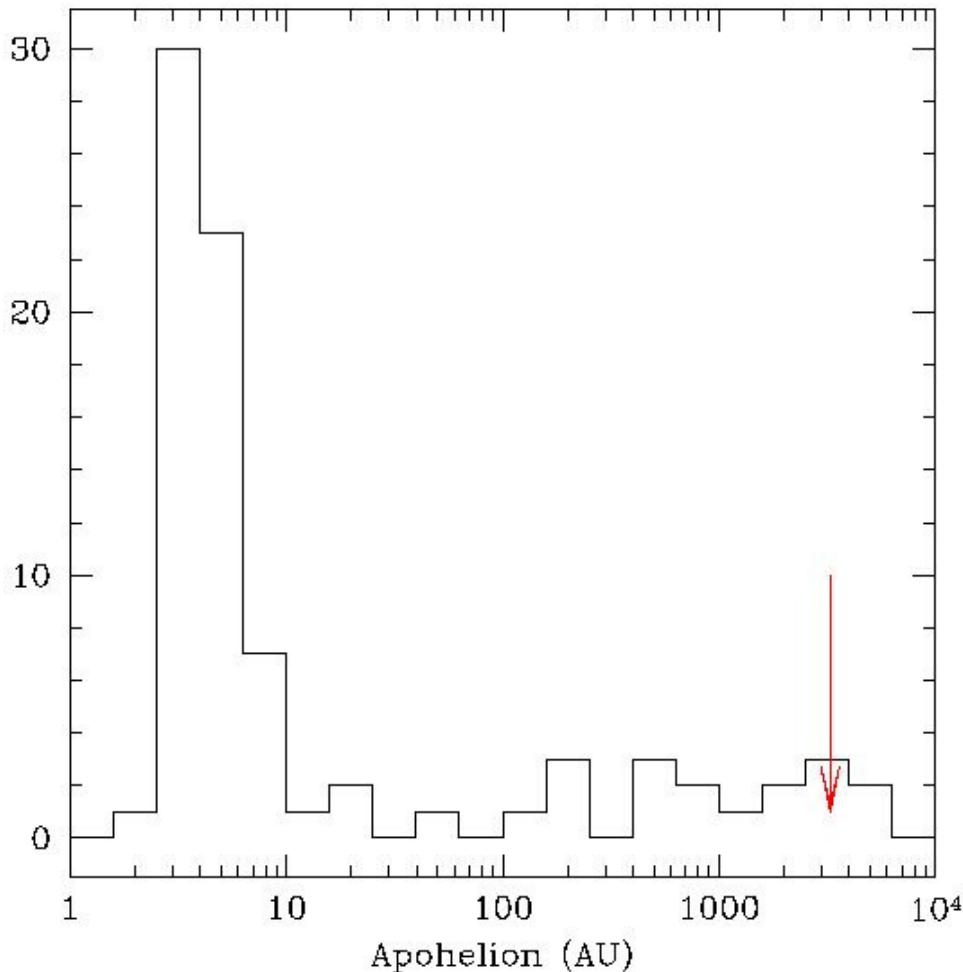
Bekannte kurzperiodische Kometen sind Encke ($T=3.29$ a), Giacobini-Zinner ($T=6.61$ a), Schwassmann-Wachmann I ($T=14.9$ a), Temple-Tuttle ($T=33,3$ a, Ursprungskomet des Leoniden-Meteorstroms) und Swift-Tuttle ($T=135$ a, Ursprungskomet des Perseiden-Meteorstroms).

Hale-Bopp (C/1995 OI) und Hyakutake (C/1996 B2) – die hellen Kometen kurz vor der Jahrtausendwende – sind langperiodisch. Auch Hale-Bopp ($e = 0.9951172$, $T \approx 2550$ a) ist ein Beispiel dafür. McNaught, der besonders den Beobachtern der Südhalbkugel unserer Erde zu Jahresbeginn 2007 ein wundervolles Schauspiel bot, hat sogar eine schwach hyperbolische Bahn, die ihn wohl für immer aus unserem Sonnensystem herausführen wird.

In den letzten Jahrzehnten hat sich eine einheitliche Benennung der Kometen durchgesetzt. Neuentdeckte Kometen werden von der Internationalen Astronomischen Union natürlich weiterhin nach ihrem Entdecker benannt, wobei auch Doppel- und Dreifachnamen möglich sind, wenn die Entdeckungsmeldungen etwa zeitgleich im Central Bureau for Astronomical Telegrams eintreffen.

Kometenbahnen und Statistik

Mittlerweile gelten übrigens nicht nur fleißige Astronomen (Profis als auch Liebhaber), die den Himmel regelmäßig mit Feldstechern absuchen oder mit Teleskopen fotografieren, als Entdecker – vorausgesetzt, sie haben Erfolg. Auch komplizierte Blechkapseln (ich meine natürlich Forschungssatelliten) mit entsprechenden Detektoren können Kometen entdecken. Nur ein Beispiel sei genannt: IRAS-Araki-Alcock (5/1983). IRAS war der erfolgreiche „Infrared Astronomical Satellite“, GEORGE ERIC DEACON ALCOCK (1912-2000) war ein bekannter Liebhaberastronom und Kometenjäger (er fand ihn mit einem Feldstecher durch die Scheiben seines Schlafzimmerfensters!) und GENICHI ARAKI ist ein bekannter japanischer Kometenbeobachter. (Die meisten Kometen werden übrigens von der Sonnensonde SOHO (und Amateuren, die deren Seiten im Internet abgrasen) entdeckt ...).



Verteilung der Apheldistanzen der bekannten Kometen. Das Maximum bei etwa 5 AU gehört zu den kurzperiodischen Kometen der Jupiterfamilie. Da sie zumeist in weniger als zwei Jahrzehnten die Sonne umrunden, sind sie leichter zu entdecken. Deshalb sind auch viele von ihnen mittlerweile aufgefunden worden. Der rote Pfeil gibt ungefähr die Entfernung der Mitte der Oortschen Wolke an (man beachte den logarithmischen Maßstab).

Neben den Namen des oder der Entdecker erhält ein Komet eine weitere Bezeichnung, die einen Kennbuchstaben und den (codierten) Entdeckungszeitraum enthält. „Hale-Bopp“ hat z.B. die offizielle Bezeichnung „C/1995 O1 Hale-Bopp“. Die zweite Buchstabengruppe – hier „O1“ – gibt den Halbmonat der Entdeckung („I“ und „Z“ werden nicht verwendet) und die Zahl die Reihenfolge der

Entdeckung an. „O1“ bedeutet also, das Hale-Bopp zwischen dem 16. und den 31. Juli als erster Komet in diesem Zeitraum entdeckt wurde (das genaue Datum war der 22. Juli 1995).

Der Buchstabe vor dem Entdeckungsjahr wird erst dann vergeben, wenn einigermaßen sichere Bahnelemente vorliegen. Es gelten folgende Festlegungen:

P	Periodischer Komet, Umlaufzeit bis 200 Jahre, mindestens zwei Perihelppassagen beobachtet
C	Umlaufzeit größer als 200 Jahre, "nichtperiodischer" Komet per Definition
X	Bahn des Kometen ist nicht bestimmbar
D	Periodischer Komet, der verlorengegangen oder nicht mehr existiert
A	Komet, der als Kleinplanet identifiziert wurde

Für neuentdeckte Kleinplaneten wird übrigens (bis auf das Präfix) zur vorläufigen Bezeichnung die gleiche Nomenklatur verwendet.

Kometengruppen

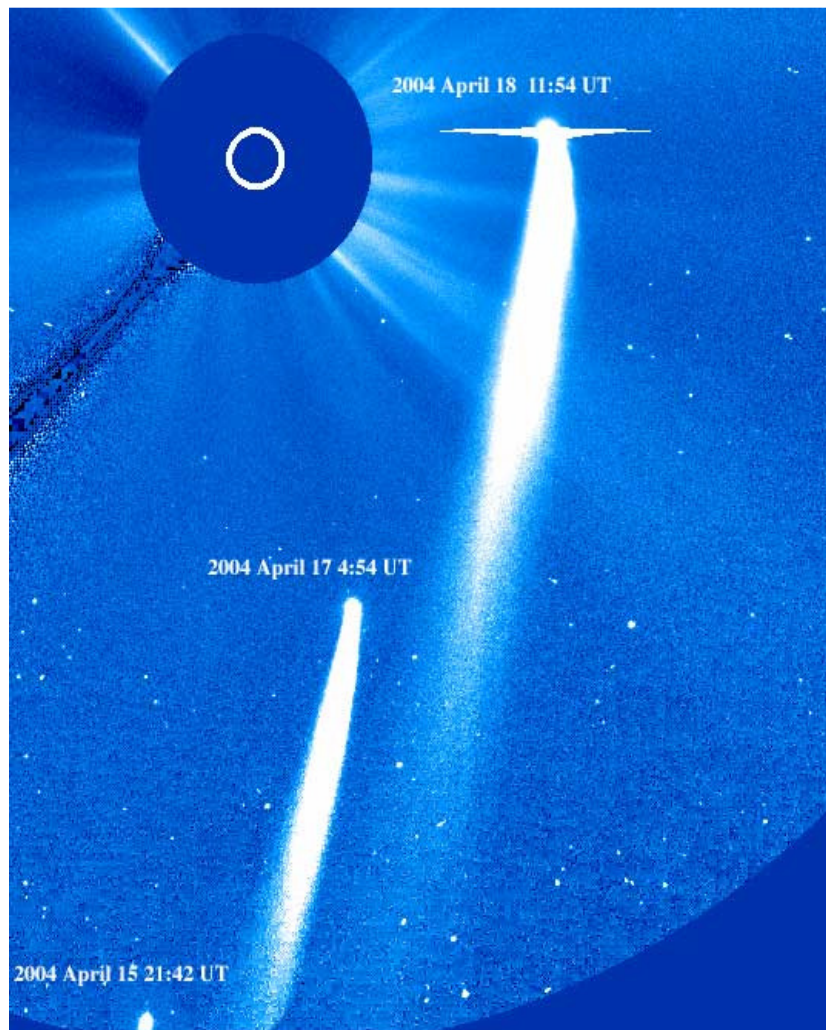
Es gibt Kometen, die der Sonne sehr nahe kommen („*Sungrazer*“) oder sie sogar „streifen“ („*Sunstrikers*“), was zu ihrer völligen Zerstörung führt. Einige besonders eindrucksvolle Kometen der Vergangenheit (z.B. der berühmte „Septemberkomet“ von 1882) waren solche „*Sungrazer*“. In der Regel handelt es sich dabei aber um Kometen, die sich von der Erde aus aufgrund ihrer Sonnennähe nur schwer entdecken und beobachten lassen, obwohl sie teilweise recht hell werden ($> 4^m$).

Seitdem die Sonnensonde SOHO („*Solar and Heliospheric Observatory*“, Start Dez. 1995) kontinuierlich den Raumbereich um die Sonne mit Hilfe eines Koronographen (LASCO) überwacht und die Aufnahmen für jeden Interessenten zugänglich ins Internet stellt, hat die Anzahl der in unmittelbarer Sonnennähe entdeckten Kometen rasant zugenommen. Ihre Zahl hat die 1000-Marke mittlerweile (2005) deutlich überschritten.

Die Bahnen von Kometen, die der Sonne recht nahe kommen, wurden ab 1888 von dem deutschen Astronomen HEINRICH KREUTZ (1854-1907) näher untersucht. Er entdeckte, daß es eine ganze Reihe von „Sungrazern“ gibt, welche ungefähr die gleichen Bahnelemente haben, aber eindeutig unterschiedliche Objekte sind. Zu erwähnen sind z.B. die „Großen Kometen“ von 1843 und von 1882, die nahezu die gleichen Bahnelemente besaßen, aber trotzdem eindeutig unterschiedliche Objekte waren. Auch der spektakuläre Komet von 1965 – Ikeya-Seki – ähnelt in dieser Beziehung den beiden genannten Kometen. Heute werden diese Kometen der sogenannten „Kreutz-Gruppe“ zugeordnet, deren Mitglieder bei genauer Betrachtung zwei Subfamilien bilden. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen in der Lage der Knotenlinie ihrer Bahnen, während die anderen Bahnparameter ziemlich identisch sind. Die Kreuzgruppe I und II umfaßt auch die meisten mit SOHO entdeckten Kometen. Bei ihnen handelt es sich größtenteils um sehr kleine Objekte, deren Kerndurchmesser in der Größenordnung von höchstens einigen 10 m liegen. Wenn sie in unmittelbare Sonnennähe gelangen, verdampfen sie sehr schnell, wodurch sie für SOHO`s Instrumente kurzzeitig sichtbar werden.

Kometengruppen

Schon kurz nach der Entdeckung dieser Kometengruppe wurde die Vermutung geäußert, daß es sich dabei um die entlang der gesamten Bahnellipse verteilten Trümmer eines ehemals recht großen „Mutterkometen“ handelt, der bei früheren Periheldurchgängen nach und nach zerplatzt ist. Entsprechende Bahnberechnungen unter der Berücksichtigung der Störungen der großen Planeten wurden durchgeführt, wobei deren Ergebnisse diese Hypothese erhärteten. Heute, wo Dank SOHO eine bessere statistische Ausgangsbasis vorliegt, erscheinen die Verhältnisse etwas komplizierter. Danach verteilen sich die Kometen in einzelne Schwärme oder bewegen sich auf nahezu parallelen Bahnen. Da sie in dieser Form kaum einen Periheldurchgang überstehen würden ist es auch unwahrscheinlich, daß sie während eines früheren Durchgangs entstanden sind. ZDENEK SEKANINA (2002) nimmt deshalb an, daß der Zerfallsprozeß eines Kometen nicht nur in Sonnennähe, sondern überall auf seiner Bahn stattfinden kann. Diese These wird durch eine Analyse der Abstände der Kometen gestützt. Die Kreutz-Gruppe ist seiner Meinung nach das Ergebnis des Zerfalls eines ungefähr 120 km großen Ausgangskörpers, der sich in ca. 200000 Bruchstücken zerlegt hat. Ihre Bahnen sind gewissermaßen Einbahnstraßen, da sie quasi im Bereich der Sonnenkorona enden wo die Kometenkerne schließlich verdampfen.

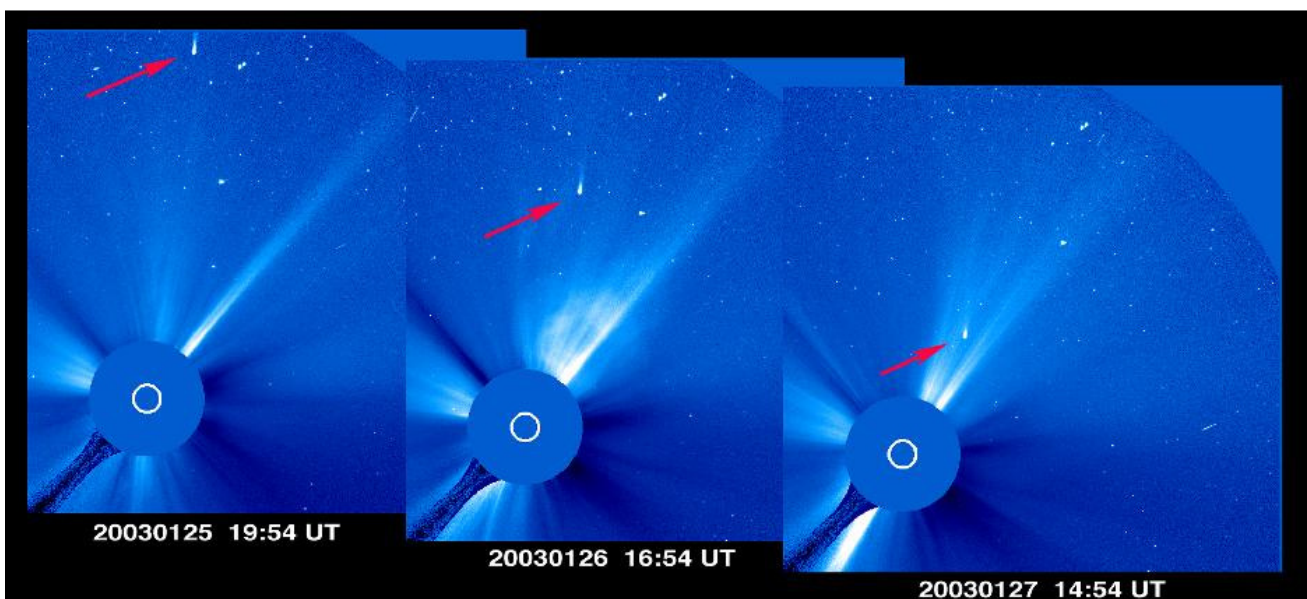


Diese Aufnahme mit dem SOHO-LASCO –Koronographen zeigt drei überlagerte Aufnahmen des Kometen Bradfield (C/2004 F4) in Sonnennähe. Der innere Kreis stellt die scheinbare Größe der Sonnenscheibe dar.

Während bis 1990 nur „Sungrazer“ der Kreutz-Gruppe bekannt waren, sind mittlerweile weitere Gruppen (z.T. von Amateurastronomen) entdeckt worden. Die folgende Tabelle gibt den Stand von Mitte 2007 wieder:

Gruppe	Anzahl
Kreutz	1084
Meyer	77
Marsden	30
Kracht	32

+ eventuell 3 weitere, noch nicht gesicherte Gruppen.



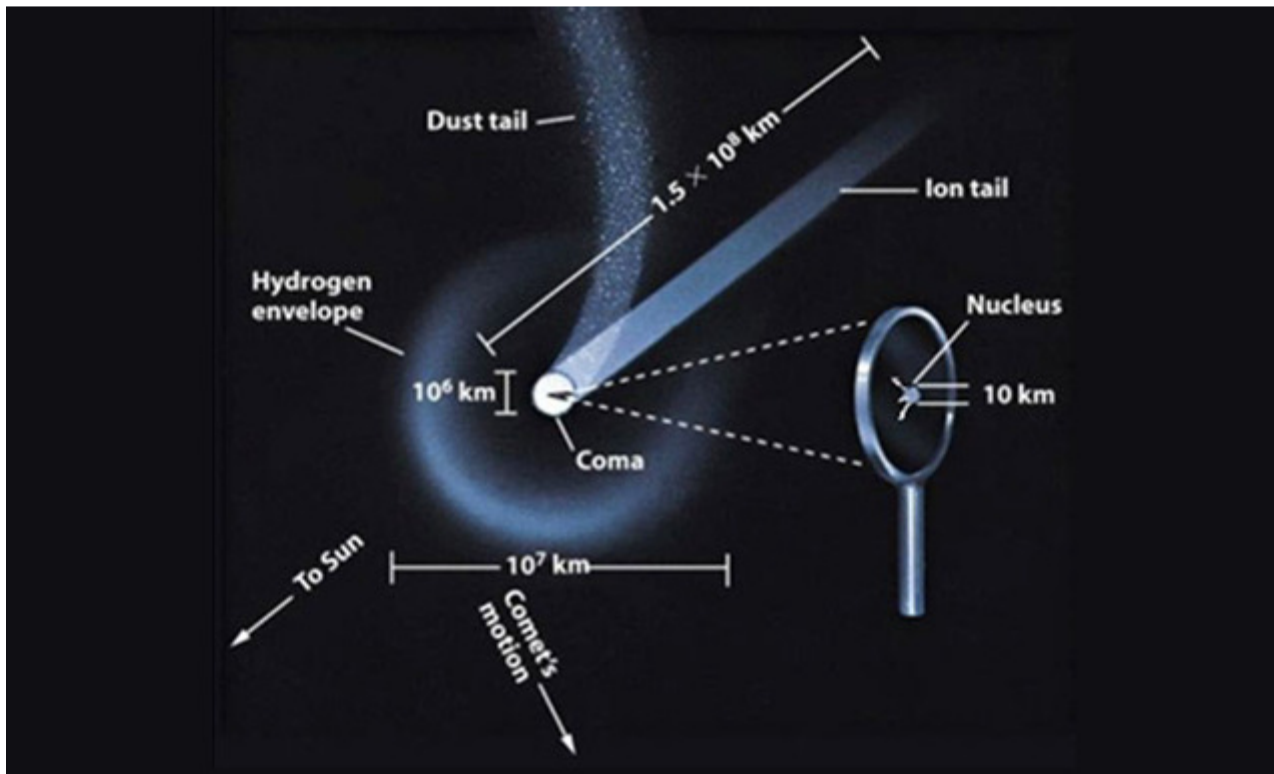
Komet (C/2002 X5) Kudo-Fujikawa in unmittelbarer Sonnennähe, aufgenommen von SOHO

Aufbau eines Kometen

Ein Komet in Sonnennähe besteht aus einem Kometenkern, einer Koma und einem Schweif. In Sonnenferne ist er nichts weiter als ein aus gefrorenen Gasen und Staubpartikeln sowie Gesteinsbrocken durchsetzter Eisbrocken. Aufgrund der geringen Größe der Kometenkerne (meist < 50 km) und ihres sehr geringen Albedo (Halley ~ 0.03) sind sie - solange sie keine Gaskoma ausbilden - praktisch unbeobachtbar. Auch der Mehrzahl der Kometen, die im inneren Sonnensystem ihr Perihel durchlaufen, sind meist schwach und nur mit Fernrohren oder – wenn sie der Sonne besonders nahe kommen – mit Koronographen (wie sie z.B. die Sonnensonde SOHO besitzt) - zu beobachten. Helle, mit dem freien Auge sichtbare und damit eindrucksvolle Kometen sind eher selten (man kann im Schnitt alle 10 bis 15 Jahre damit rechnen). In den letzten Jahrzehnten machten z.B. Kohoutek (1973, eher mickrig), West (1976, eindrucksvoll, aber wenig beachtet), Halley (1986, sehr beachtet, aber eher mickrig), Hyakutake (1996, außergewöhnlich), Hale-Bopp (1997, eine Pracht!) und Ikea-Zhang (2002,

Aufbau eines Kometen - Kern

durchaus eindrucksvoll) von sich reden (Einschätzungen vom Autor). Ein besonders schöner Komet – McNaught – blieb leider Anfang 2007 nur Beobachtern der Südhalbkugel vorbehalten.



Typische Bestandteile eines Kometen in Sonnennähe

Beginnend mit der lang erwarteten Wiederkehr des periodischen Kometen Halley hat die Kometenforschung in den letzten Jahrzehnten sehr große Fortschritte gemacht. Insbesondere auch deshalb, weil man in der Kometenmaterie den Stoff vermutet, aus dem vor mehr als 4.5 Milliarden Jahren unser Sonnensystem entstanden ist.

Der Kometenkern

Von der Erde aus sind auch mit den besten Teleskopen die eigentlichen Kerne der Kometen nicht aufzulösen. Das liegt daran, daß sie zumeist nur wenige Kilometer groß sind und zusätzlich noch in Sonnennähe durch die innere Koma vollständig überstrahlt werden. Nur größere, langperiodische Kometen, die direkt aus der Oortschen Wolke in Sonnennähe gelangen, haben manchmal Durchmesser, welche die 50 km-Marke übersteigen. Eine genaue Untergrenze für den Durchmesser von Kometenkernen kann auch nicht angegeben werden. Kometen der sogenannten Kreutz-Gruppe, die der Sonne sehr nahe kommen und bei ihrem Verdampfen auf den Koronographenaufnahmen der Sonden SOHO für kurze Zeit sichtbar werden, besitzen wahrscheinlich Kerne von nur wenigen 10 m Durchmesser.

Über die Natur der Kometenkern wurde lange gerätselt. Erst der amerikanische Astronom FRED L. WHIPPLE (1906-2004) entwickelte 1950/51 in zwei Artikeln, die im *Astrophysical Journal*

veröffentlicht wurden, ein Kometenmodell, das in seinen wesentlichen Zügen bis heute Bestand hat. Es wird etwas prosaisch als das Modell des „schmutzigen Schneeballs“ bezeichnet.

Ausgangspunkt dafür waren u.a. folgende Beobachtungen:

- Die Bahnen kurzperiodischer Kometen werden offensichtlich unter der Einwirkung nichtgravitativer Kräfte verändert (Beispiel: Komet P/Encke). Diese Kräfte resultieren aus der Repulsivwirkung lokal abdampfenden Materials in Sonnennähe.
- Einige Kometen sind mit Meteoridenströmen assoziiert, die offensichtlich aus Zerfallsprodukten der Kometenkerne bestehen (Beispiel: P/Swift-Tuttle – Perseidenstrom).
- Kometenkerne können in Sonnennähe in mehrere Bruchstücke zerfallen was darauf hindeutet, daß sie aus keinem massiven silikatischen Material bestehen.
- Die Koma-Spektren verraten die Existenz von einer Vielzahl von Molekülen und Radikalen, die sich leicht als Abbauprodukte einiger volatiler Stoffe wie H_2O , CH_4 , NH_3 und CO_2 deuten lassen. Die Intensität der Molekülbanden weist außerdem darauf hin, daß diese volatilen Stoffe einen großen Prozentsatz der Kometenkernmaterie ausmachen müssen. Die Existenz von Staubschweiften erklärt sich dadurch, daß in den gefrorenen Gasen größere Mengen von Staub eingeschlossen sind.

Daß die Bahnen kurzperiodischer Kometen säkularen Änderungen unterliegen, die nicht durch gravitative Störungen der großen Planeten zu erklären sind, ist schon seit längerer Zeit bekannt. Erste Untersuchungen des Phänomens gehen auf FRIEDRICH WILHELM BESSEL (1784-1846) und JOHANN FRANZ ENCKE (1791-1865) zurück. Schon zu ihrer Zeit wurde vermutet und die Vermutung durch Beobachtungen des Halleyschen Kometen im Jahre 1835 bestärkt, daß die Entgasung eines Kometenkerns bei Annäherung an die Sonne nicht isotrop, sondern ungleichmäßig erfolgt. Nach dem Impulserhaltungssatz führt eine anisotrope Entgasung zu entgegengesetzten Repulsivkräften (ähnlich wie bei einer Rakete), die natürlich Einfluß auf die Bahn des Himmelskörpers haben. Anisotrope Entgasung bedeutet aber auch, daß es auf einem Kometenkern wenigstens eine aktive Region geben muß, dessen Emissionsrate die der Umgebung übersteigt. Schon visuelle Beobachtungen heller Kometen im 19. Jahrhundert zeigen als strukturelle Merkmale der inneren Koma Gasströmungen, die man als Jets bezeichnet. Aus der Krümmung dieser Jets hat man außerdem auf eine Eigenrotation von Kometenkernen geschlossen und ihre ungefähren Rotationsfrequenzen bestimmt. Bei dem sehr hellen Donati'schen Kometen von 1858 ergab z.B. eine Neubewertung der Beobachtungen eine Rotationsdauer von 4.14 Stunden. In der Regel sind die Rotationszeiten jedoch viel größer und man kann auch erwarten (und bei P/Halley wurde es bei der direkten Erkundung durch GIOTTO auch bestätigt), daß die zumeist unregelmäßig geformten Kometenkerne eine komplizierte Taumelbewegung ausführen. Die aus mehreren Komponenten zusammengesetzte resultierende Rotationsperiode des Kerns des Halleyschen Kometen beträgt z.B. ungefähr 2.84 Tage.

Die Rotationsdauer eines Kometenkerns kann natürlich nicht beliebig klein werden, da er ansonsten mechanisch instabil wird. Nimmt man eine sphärische Form an, dann wird die kritische Rotationsdauer T_{krit} durch die Bedingung festgelegt, daß an der Oberfläche die Entweichgeschwindigkeit als kritische Geschwindigkeit erreicht wird.

Aufbau eines Kometen - Kern

Ein Kometenkern besteht in Whipple's Modell zum überwiegenden Teil aus gefrorenen Gasen, in denen als weitere Komponenten Staub und vielleicht auch größere silikatische Beimengungen eingelagert sind. Wie man seit der Naherkundung des Halleyschen Kometen durch die Raumsonde GIOTTO weiß, ist dieses Material mit einer außergewöhnlich dunklen Oberflächenschicht überzogen. Diese Schicht reflektiert lediglich 3% des einfallenden Sonnenlichts und ist damit mindestens so Schwarz wie Steinkohle. Dieses geringe Reflektionsvermögen ist wahrscheinlich auch einer porösen Struktur dieser Kruste geschuldet, die sehr effektiv Licht absorbieren kann. Gelangt solch ein Kometenkern in Sonnennähe (~10 AU), dann steigt die Temperatur so weit an, dass es bei etwa 70 K bereits zu einer Ausgasung leichtflüchtiger Stoffe kommt und sich eine Koma ausbildet.

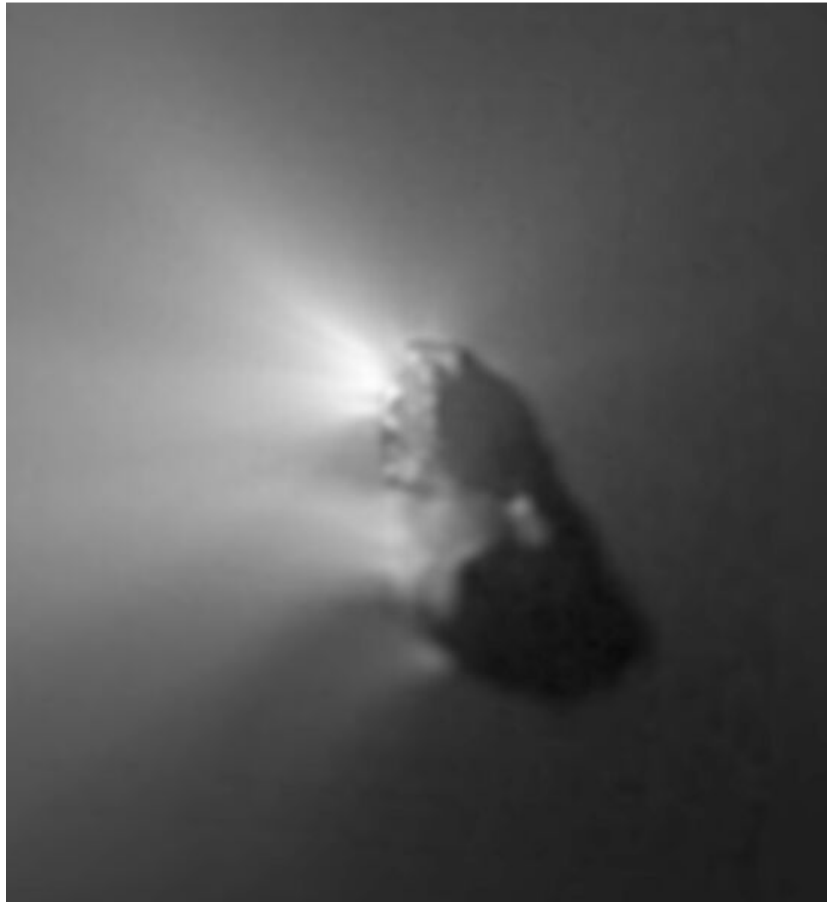
Die Frage ist, um was es sich dabei für Stoffe handelt, aus dem ein Kometenkern primär besteht. Neben theoretischen Erwägungen gibt die Zusammensetzung der Koma eine Antwort darauf. Die darin spektroskopisch nachgewiesenen Moleküle und Radikale lassen sich aus einer übersichtlichen Anzahl von „Muttermolekülen“ ableiten, die in fester Form das Kometenmaterial bilden und bei Erwärmung sublimieren. Der häufigste Bestandteil ist Wassereis (je nach Modell zwischen 80% und 90%), in dem zusätzlich Trockeneis (CO_2), Kohlenmonoxid (CO), Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3) sowie weitere organische Verbindungen eingelagert sind.

Die Sublimationsraten sind stark Stoff- und Temperaturabhängig. CO_2 und CH_4 beginnen bereits bei Temperaturen zwischen 55 und 120 K gasförmig zu werden. Das ist auch der Grund, warum manche Kometen weit außerhalb der Jupiterbahn ($a=5.2$ AU) eine Koma ausbilden. Nähert sich der Komet der Sonne weiter an, beginnt auch das Wassereis zu sublimieren. Für den Halleyschen Kometen wurden bei seinem letzten Periheldurchgang bei einer Sonnenentfernung von 1 AU eine Wassersublimationsrate von ca. 10^{22} Molekülen $m^{-2}s^{-1}$ gemessen. Die Austrittsgeschwindigkeiten der Moleküle orientieren sich dabei an der durch die Temperatur gegebenen wahrscheinlichsten Geschwindigkeit der Maxwell-Verteilung. Sie liegen in der Größenordnung von 10^2 bis 10^3 m/s.

GIOTTO konnte am 14. März 1986 einen flüchtigen Blick auf den Kern des Halleyschen Kometen werfen und bestätigen, daß die Ausgasung aus relativ wenigen aktiven Gebieten erfolgt, wie es auch schon die Beobachtungen von Jet-Strukturen nahegelegt haben. Diese aktiven Gebiete nahmen lediglich 10 bis 15% der Oberfläche des $15.3 \times 7.2 \times 7.2$ km großen Kerns ein, wobei ein „hot spot“ im Schnitt 10 km^2 groß war. Die dort austretenden Gase reisen kontinuierlich mikroskopische Staubteilchen bis hin zu kleinen Staubkonglomeraten (bei einer Entfernung < 1 AU bis zu 10 cm Größe) mit, die das Material für den Staubschweif liefern.

Das sehr geringe Albedo der Kometenkerne (Halley 0.03, Borelly 0.02, Wild 2 0.04, Tempel 1 0.04) wird durch die bereits erwähnte kohlenstoffhaltige Staubschicht, die wie eine sinterartige Kruste die Oberfläche bedeckt, hervorgerufen. Ihre Entstehung hat man sich etwa wie folgt vorzustellen: Bei der Entgasung werden durch den austretenden Gasstrom Staubteilchen bis hin zu größeren Staubbrocken mitgerissen. Erreicht dieses Material aufgrund seiner Masse nicht die Entweichgeschwindigkeit des Kometen, dann fällt es an einer anderen Stelle zwangsläufig auf die Oberfläche zurück. Es ist klar, daß die Grenzgröße der Teilchen, die den Kometen gerade noch verlassen können, von der Ausströmgeschwindigkeit und der Gasdichte, also der Sublimationsrate, abhängt, die wiederum eine Funktion der Oberflächentemperatur und damit der Entfernung des Kometen von der Sonne ist. Auf

diese Weise kann sich über mehrere Umläufe ein anfänglich poröser Mantel, der unter dem Einfluß der kosmischen Strahlung und der UV-Strahlung der Sonne nach und nach zusammengebacken wird, ausbilden. Im Labor hat man versucht, diese Ereignisabfolgen experimentell nachzustellen. Danach bestehen bis über die Hälfte des Mantelvolumens aus Leerraum, was übrigens recht gut das geringe Albedo der Kometenkerne erklärt.

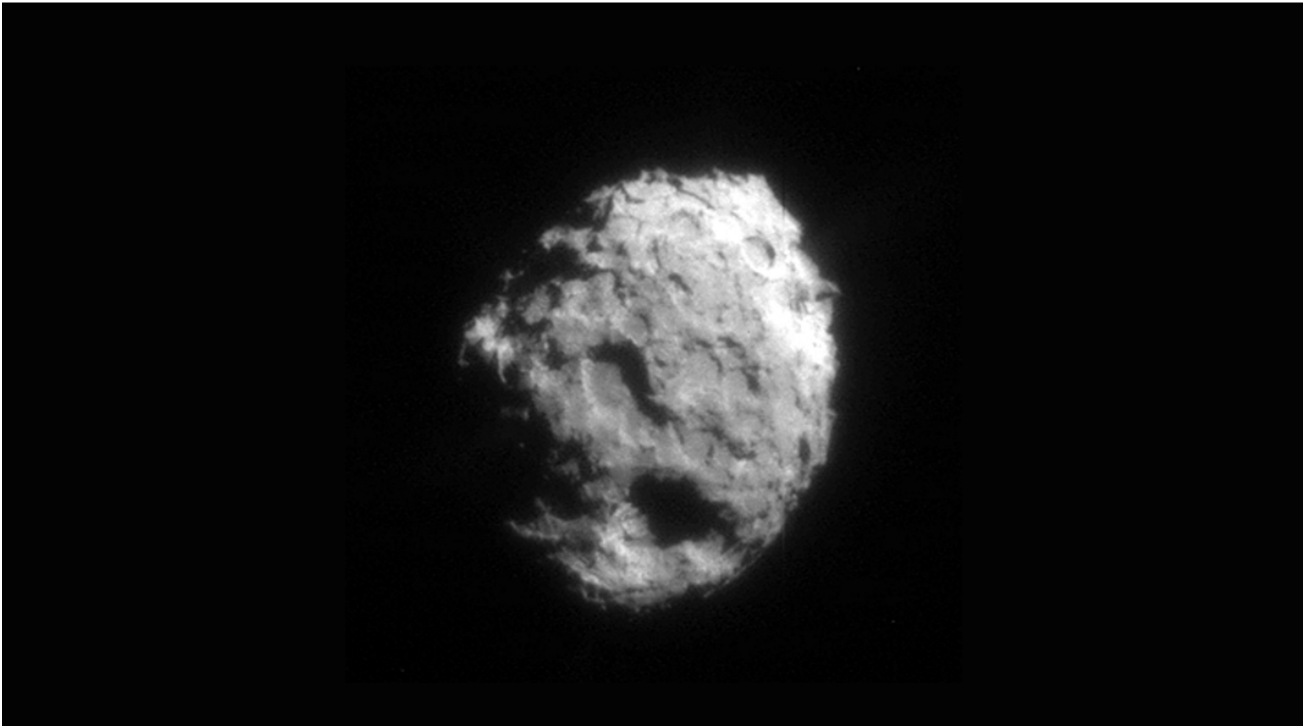


Computerbearbeitete Aufnahme des Kerns des Halleyschen Kometen durch die Kometensonde GIOTTO der ESA. Deutlich sind neben der unregelmäßigen Gestalt ein Krater und mehrere aktive Stellen, an denen Gas- und Staub austritt, zu sehen.

Andererseits führt auch noch ein weiterer Prozeß zur Ausbildung eines Staubmantels. Wenn man im Winter einen Schneehaufen am Straßenrand aufhäuft, dann wird er bei Tauwetter zusammensacken und auf seiner Oberfläche eine immer stärker werdende Dreckschicht ausbilden, je kleiner er wird. Dasselbe tritt natürlich auch bei einem Kometen auf, wenn das mit Staub und Gesteinen durchsetzte Eis langsam sublimiert. Unter der porösen Oberflächenschicht kann sich deshalb durchaus noch eine kompaktere, mit größeren Silikateilchen (bis hin zu Gesteinsbrocken) durchsetzte Schicht befinden („*rubble mantle*“). Da man aus der Gasproduktion (die sich aus den Beobachtungen abschätzen läßt) auf die „Abschmelzrate“ schließen kann (man erhält Werte von bis zu 30 m pro Bahnumlauf), läßt sich außerdem zeigen, daß für die Ausbildung eines „*rubber mantle*“ bereits ein Periheldurchgang ausreichen kann. Über die Manteldicke gibt es nur Vermutungen. Die Abschätzungen variieren von ein paar Millimetern bis zu 1.. 20 Metern, wobei das Auftreten starker Jets eher auf eine kompaktere Schicht hindeutet.

Aufbau eines Kometen - Kern

Bei Annäherung an die Sonne erwärmt sich aufgrund des großen Absorptionsvermögens der Mantel und es kommt wegen der sehr großen Temperaturunterschiede ($\Delta T > 100 \text{ K}$) in bezug auf das Kometeninnere zu thermischen Spannungen, die sich in Form von Rißbildungen ausgleichen. Da in diesen Rissen die Sonnenstrahlung das blanke Eis erreicht, nimmt dort die Sublimationsrate und damit die Gasproduktion bei steigender Temperatur immer mehr zu. Es entsteht eine wachsende, bauchige Vertiefung, deren größer werdende Oberfläche die Gasemission weiter begünstigt, wogegen die Rißöffnung wie eine Düse wirkt. Auf diese Weise entstehen die oft beobachteten Jet-Strukturen in der inneren Koma vieler Kometen. Im Fall von Hale-Bopp konnte man z.B. im Frühjahr 1997 die durch derartige Jets im Zusammenspiel mit der Kernrotation entstandenen Staubschalen in der inneren Koma bereits mit einem Amateurfernrohr sehr gut beobachten.

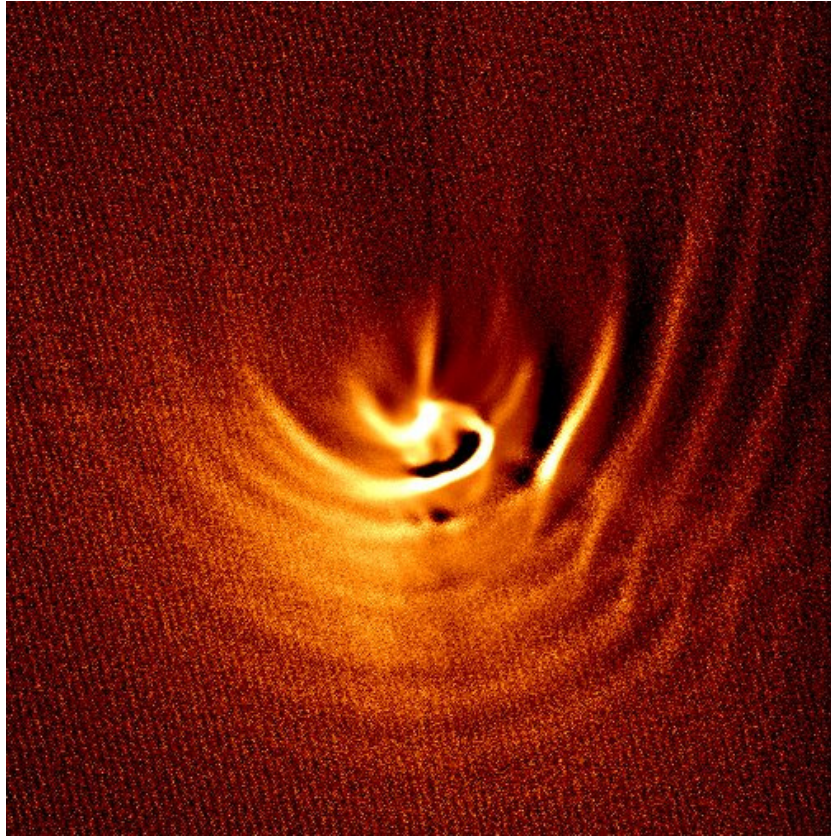


Kern des Kometen Wild 2, aufgenommen von der Sonde „Stardust“ Anfang 2004. Die kleinsten sichtbaren Details haben eine Größe von ca. 20 m.

Man erwartet, daß die Rißbildung in der Staubkruste bereits ab einer Entfernung von ca. 10 AU einsetzen kann. Da zuerst nur CO und CO_2 mit relativ geringen Sublimationsraten abschmilzt, wird an den Stellen erhöhter Sublimation das Terrain für eine aktive Zone vorbereitet, die ausbricht, sobald die Temperaturen für eine verstärkte Wasserdampfproduktion erreicht werden. Das ist bei etwa 137 K der Fall, wo bei einem Phasenübergang des amorphen Eises zusätzlich latente Wärme freigesetzt wird, was die weitere Verdampfung natürlich begünstigt.

Man vermutet, daß das Wassereis eines Kometen in Form von sogenannten „Wassercluster“, also in lockerer Verbindung mit anderen Stoffen (z.B. CO) vorkommt. Diese Clathrate verhindern, daß leichtflüchtige Stoffe nicht sofort beim Erreichen ihrer Sublimationstemperatur entweichen, sondern erst dann, wenn auch das Wassereis sublimiert.

Die Ausgasung führt dazu, daß die aktiven Zonen sich bei jedem Periheldurchgang immer weiter vertiefen, bis sie u.U. durch die einbrechende Kruste abgedeckt werden oder selbst eine Krustenschicht ausbilden – die aktive Zone wird inaktiv. Es kann aber auch passieren, das „Hangrutschungen“ frisches Material freilegen bzw. im Eis „Linsen“ aus z.B. CO_2 angeschnitten werden, was zu explosionsartigen Helligkeitsausbrüchen führen kann. Solche Helligkeitsausbrüche sind übrigens bei diversen Kometen (zuletzt z.B. bei C/2001 A2 LINEAR am 27.3.2001) beobachtet worden.



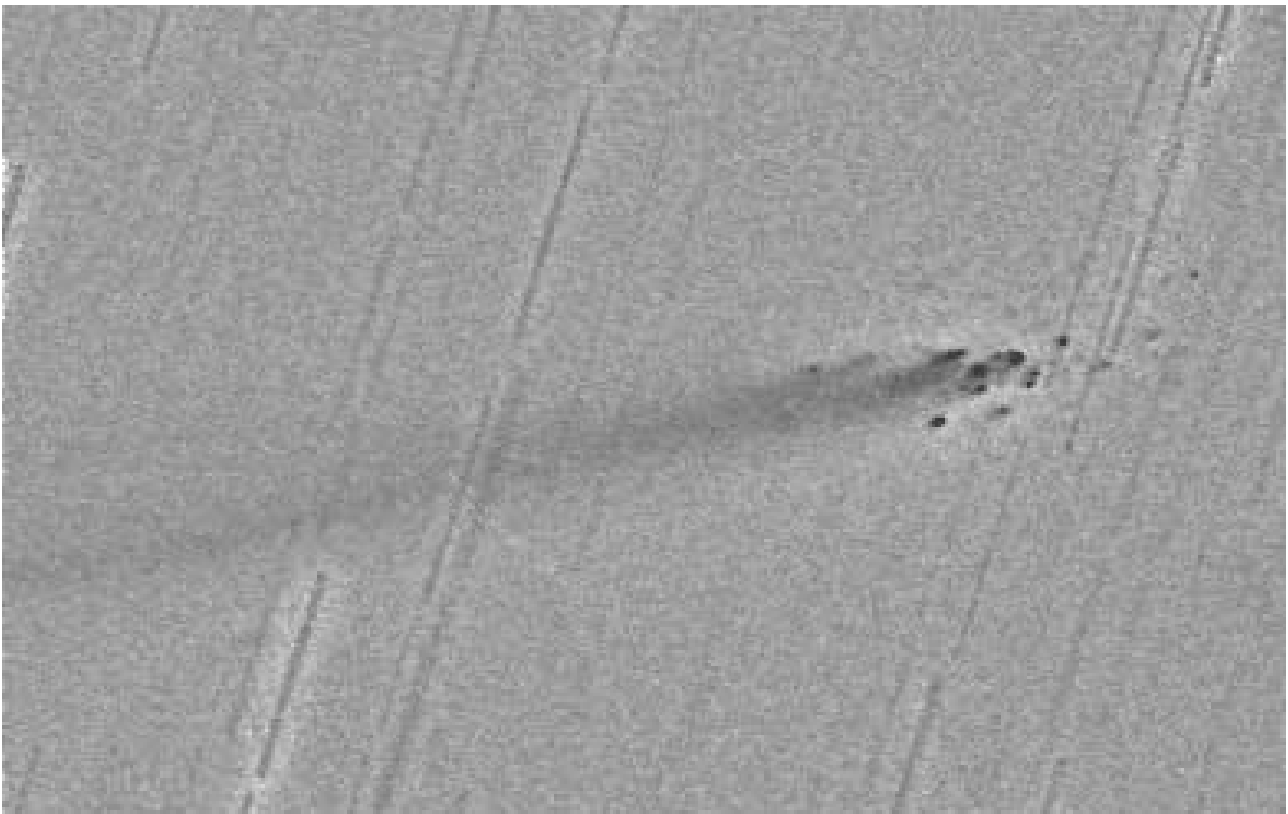
Durch die Rotation des Kerns von Hale-Bopp bilden die aus einem Jet austretenden Gase Spiralmuster, die sich als Ringstrukturen in der inneren Koma bemerkbar machen. Der Kern ist aufgrund seiner geringen Größe (~ 40 km Durchmesser) auf dieser mit einem 61 cm-Teleskop aufgenommenen Foto natürlich nicht sichtbar. © J.A.DeYoung

Die an den aktiven Zonen verstärkte Erosion kann einen ganzen Kometenkern mechanisch instabil machen so daß er regelrecht zerbricht. Dieser Effekt wird durch Gezeitenkräfte in Sonnennähe und durch eine Eigenrotation (Fliehkräfte) noch begünstigt. Kernfragmentationen in Sonnennähe sind deshalb bei langperiodischen Kometen gar nicht so selten. So konnte man z.B. im August des Jahres 2000 den Kernzerfall von 1999 S4 Linear direkt am Fernrohr beobachten. Weitere prominente Beispiele sind der Komet West von 1976, Hyakutake (1996) und natürlich Shoemaker-Levy 9, dessen Bruchstücke – aneinandergereiht wie auf einer Perlenkette – im Jahre 1994 auf den Jupiter krachten.

Untersucht man die einzelnen Bruchstücke spektroskopisch, dann sind keine Unterschiede auszumachen. Aus dieser Beobachtung muß man schlußfolgern, daß die Kometenkerne in ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung weitgehend homogen aufgebaut sind. Im Gegensatz zu vielen Planetoiden haben sie im Laufe ihrer Existenz offensichtlich keine

Aufbau eines Kometen - Kern

Differentiationsprozesse durchgemacht. Das erklärt auch, daß die Spektren junger Kometen (die eben mal dabei sind, aus der Oort'schen Wolke einen Trip zur Sonne zu unternehmen) und alter Kometen, die schon viele Tausend mal die Sonne umrunden haben (und ihre Kerne dabei immer kleiner wurden), keine wesentlichen Unterschiede aufweisen wie es zu erwarten wäre, wenn sich ihre zentrurnahen Bereiche signifikant von den oberflächennahen Regionen unterscheiden würden. Kometenmaterie ist offensichtlich konservierte Urmaterie des (äußeren) Sonnensystems, das sich seit seiner Bildung in der präsolaren Gas- und Staubwolke so gut wie nicht verändert hat. Man war deshalb gespannt, was die NASA-Mission „Deep Impact“ Anfang Juli 2005 über den Kern von 9P Tempel/1 herausbekommen wird. Bei dieser außerordentlich erfolgreich verlaufenden Mission wurde ein Penetrator aus Kupfer quasi in die Kometenoberfläche „hineingeschossen“, wobei er bei seinem Auftreffen auf die Kometenoberfläche einen fußballfeldgroßen Krater aufgeworfen hat. Dieses Ereignis wurde nicht nur von der Muttersonde, sondern auch mit dem Hubble-Teleskop, mit den Röntgensatelliten XMM Newton und Swift sowie mit den Instrumenten der europäischen Kometensonde Rosetta detailliert beobachtet. Das natürlich auch alle Großteleskope auf der Erde zu diesem Zeitpunkt zum Kometen Tempel gerichtet waren, braucht nicht weiter erwähnt zu werden.

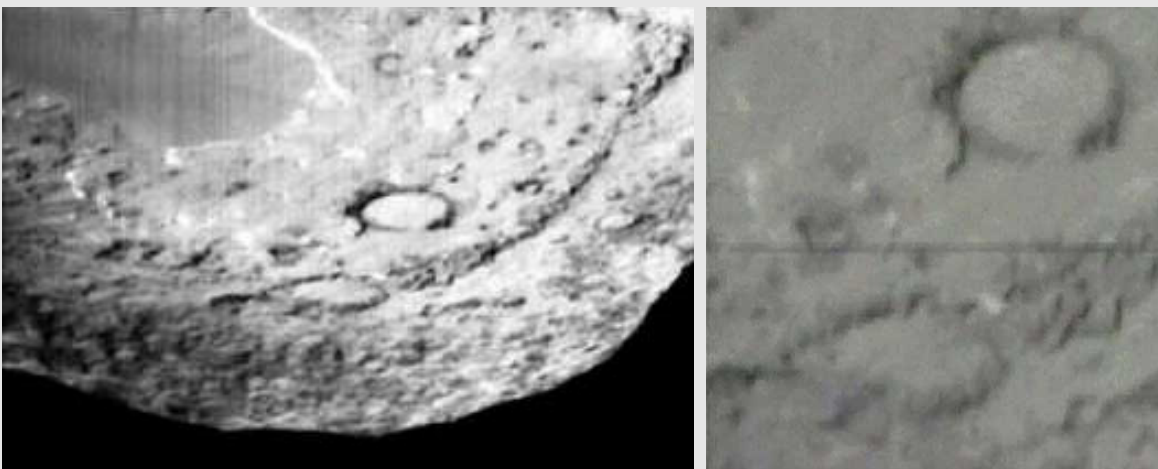


Bruchstücke des Kometen 1999 S4 LINEAR (Negativabbildung) . Aufnahme 6. August 2000. © ESO

Der Kern des Kometen 9P Tempel/1

Als am 4. Juli 2005 planmäßig der Komet 9P Tempel/1 von dem als Impactor bezeichneten 372 kg schweren Projektil der Sonde Deep Impact etwas dezentral getroffen wurde, schien es, als ob er nicht in einen porösen Kometenkern, sondern eher in eine offene Puderdose eingeschlagen ist. Die im Sonnenlicht hell aufleuchtende Wolke aus Kometenmaterial, die von der Muttersonde eine zeitlang fotografisch verfolgt wurde, war unerwartet dicht und gestattete zu keinem Zeitpunkt einen Blick in den beim Zusammenprall entstandenen, wahrscheinlich 250 m großen Krater. Dazu muß gesagt werden, daß die sich vom Kometen schnell entfernende Muttersonde nur 13 Minuten - gerechnet vom Moment des Einschlags - Zeit hatte, die Impaktregion auf dem Kometenkern zu beobachten. Eine erste Analyse der Meßwerte führte zu dem überraschenden Ergebnis, daß der beim Zusammenstoß freigesetzte Staub extrem feinkörnig war und mehr Talkum-Puder als z.B. Feinsand ähnelte. Wasserdampf (was man eigentlich erwartet hätte) war in der Wolke nur relativ wenig vorhanden. Das kometarische Material wurde zuerst mit einer Geschwindigkeit von ca. 5 km/s innerhalb eines konischen Bereichs vom Kometenkern weggeschleudert um sich dann mit immer geringer werdender Geschwindigkeit durch die Koma auszubreiten. Bereits nach wenigen Tagen war von der Erde aus im optischen und infraroten Spektralbereich so gut wie nichts mehr davon zu sehen und der Komet zeigte das gleiche Aktivitätsgeschehen wie in den Tagen vor dem Impakt. Die Frage, die sich nun stellt, ist die Frage nach der chemischen Beschaffenheit der Ejekta und die Frage, ob diese „pudrige“ Konsistenz genau dem Material entspricht, das den Kometenkern bedeckt oder ob es erst beim Einschlag bei der Zertrümmerung von viel größeren, mehr oder weniger stark zusammengekitteten Lockermaterial entstanden ist.

Aufschlußreich sind in diesem Zusammenhang auch die Beobachtungen, die mit irdischen Teleskopen, dem Weltraumteleskop Hubble und anderen Weltraumteleskopen gemacht wurden. Die Infrarotspektren der Ejekta-Wolke, die mit dem Gemini North-Teleskop aufgenommen wurden, enthalten z.B. Hinweise auf diverse Silikate. Dem Röntgensatellit XMM Newton gelang dagegen der Nachweis von Hydroxyl-Radikalen, die eindeutig aus der Dissoziation von Wassermolekülen stammen. Sehr genau wurde auch die Helligkeitsentwicklung im nahen Röntgenbereich mit den Instrumenten des Satelliten SWIFT untersucht. Man erhofft sich, daß man aus den Ergebnissen ziemlich genau die Menge des aus dem Kometen beim Impakt herausgeschleuderten Materials sowie die ungefähre Eindringtiefe des Impaktors bestimmen kann. Die gemessene Röntgenstrahlung ist natürlich nicht thermischer Natur. Sie entsteht vielmehr dann, wenn in den weniger dichten Bereichen der äußeren Koma die freigesetzten Gase mit dem Sonnenwind in Wechselwirkung treten.



Ansicht eines Teils des sehr dunklen Kometenkerns mit der Zielregion des Impakts, aufgenommen mit der Kamera des Impaktors während des Anfluges. Deutlich sind mehrere Impaktstrukturen zu erkennen sowie eine wahrscheinlich großflächige Depression in der Kernoberfläche. © NASA

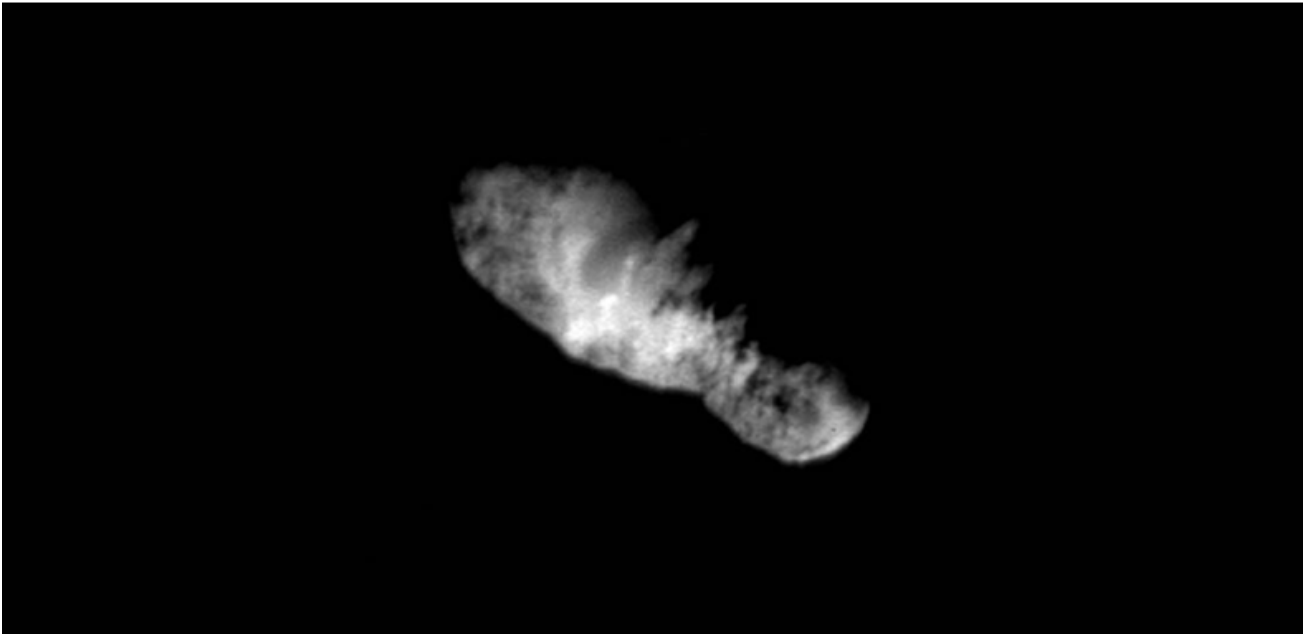
Aufbau eines Kometen - Kern



Die Sonde Deep Impact konnte den Einschlag des Impaktors aus sicherer Entfernung sehr gut beobachten © NASA

Nach all diesen Beobachtungen muß man sich wahrscheinlich (zumindest für diesen Kometen?) von der These verabschieden, daß die oberflächennahen Schichten eines Kometenkerns hauptsächlich aus mehr oder weniger fest gefrorenen Substanzen wie z.B. Wassereis bestehen. Der Kern von Tempel/1 scheint vielmehr - ähnlich wie manche Planetoiden - von einer dicken, jedoch sehr locker abgelagerten Staubschicht umgeben zu sein.

Der Kern des Halleyschen Kometen ist nicht der einzige Kometenkern, der bis jetzt (2003) von einer Raumsonde fotografiert werden konnte. Am 22. September 2001 näherte sich die NASA-Sonde „Deep Space 1“ dem Kometen Borelly bis auf 2200 km Abstand. Dabei konnten mehrere Schwarz-Weiß-Fotos zur Erde übermittelt werden, die z.T. in der Auflösung noch etwas besser waren als die klassischen Aufnahmen Halley`s von GIOTTO.



Kern des Kometen Borelly, aufgenommen von Deep Space 1 aus einer Entfernung von ca. 3400 km

Die auf der Aufnahme in der Mitte des Kometenkörpers liegenden helleren Bereiche sind aktive Entgasungszonen. Das Material, welches dort abdampft oder von dem Gasstrom mitgerissen wird, bildet zuerst die Koma und dann den Schweif.

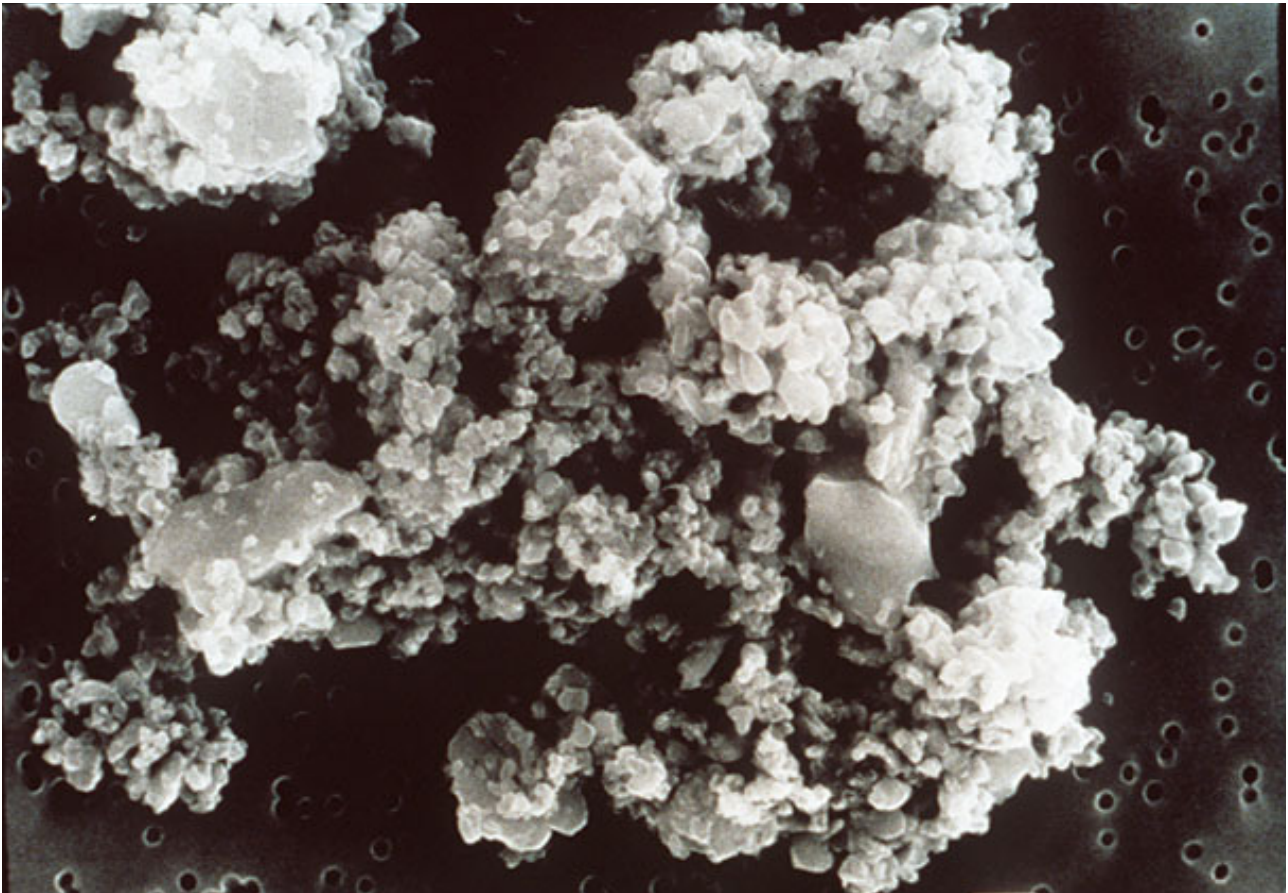
Der Kern des Kometen Borelly ist übrigens einer der dunkelsten Körper im Sonnensystem...

Das Eis, aus dem ein Kometenkern besteht, scheint eine sehr poröse Struktur zu besitzen. Die Dichte, welche aus den Giotto-Daten abgeleitet wurde, beträgt lediglich 100 kg/m^3 - also nur $1/10$ der Dichte von Wasser. Das bestätigt frühere Beobachtungen an eindeutig kometarischen Meteorströmen. Aus der Leuchterscheinung, die ein in die Erdatmosphäre eintretendes „Kometenteilchen“ verursacht („Sternschnuppe“) und der Bahnparameter dieses Teilchens kann man indirekt auf deren Dichte schließen. Danach haben 85% der kometarischen Meteore eine Dichte von ca. 100 kg/m^3 und 15% eine Dichte von 1400 kg/m^3 . Die eine Sorte scheint aus porösen Eis und die zweite Sorte aus chondritischen Material zu bestehen. Übrigens, von den kometarischen Staubpartikeln fallen pro Jahr ca. 73000 Tonnen auf die Erde. Einige wenige davon hat man mit hochfliegenden Flugzeugen einfangen und danach analysieren können. Sie werden als „*Brownlee particles*“ bezeichnet (nach D.E.BROWNLEE) und haben meist eine Größe um die $10 \text{ }\mu\text{m}$. Ihr lockerer Aufbau ist offensichtlich.

Die Staubteilchen, die den Staubschweif eines Kometen bilden, sind extrem fein und mit dem Material zu vergleichen (zumindest was die physikalischen Eigenschaften betrifft), aus dem z.B. die Gossamer-Ringe Jupiters bestehen. D.h. die Partikelgröße liegt im Bereich von wenigen Mikrometern (genauso

Aufbau eines Kometen - Kern

wie die Rußteilchen im Zigarettenrauch), was wiederum ihre optischen Eigenschaften und ihre Reaktion auf den Strahlungsdruck erklärt.



Zumindest ein Teil der interplanetaren Staubteilchen, die ständig auf die Erde herabregnen, scheint von Kometen zu stammen.

Da ein Komet bei einem Periheldurchgang einen durchaus wesentlichen Teil seiner volatilen Elemente verliert, bleibt die Frage, was übrigbleibt, sobald er vollständig entgast ist. Bei einem kompakten Kometenkern, der nicht durch Risse und gezeitenbedingte Spannungen im Bereich seiner Festigkeitsgrenze beansprucht wird, ist eine vollständige Entgasung sogar eher unwahrscheinlich. Eine im Laufe der Zeit immer massiver werdende Mantelschicht kann ab einem bestimmten Punkt die weitere Ausbildung von aktiven Zonen wirksam verhindern wodurch der Komet inaktiv wird und dann von dunklen Planetoiden vom C- und D-Typ nicht mehr zu unterscheiden ist. Dieses Schicksal wird insbesondere kurzperiodische Kometen der Jupiter- und Halley-Gruppe treffen, deren Ursprungsort wahrscheinlich in der Kuiper-Region liegt. Ein Beispiel ist der Komet P/Wilson-Harrington (1949 III), der 1992 mit dem Planetoiden (4015) 1979 VA identifiziert wurde.

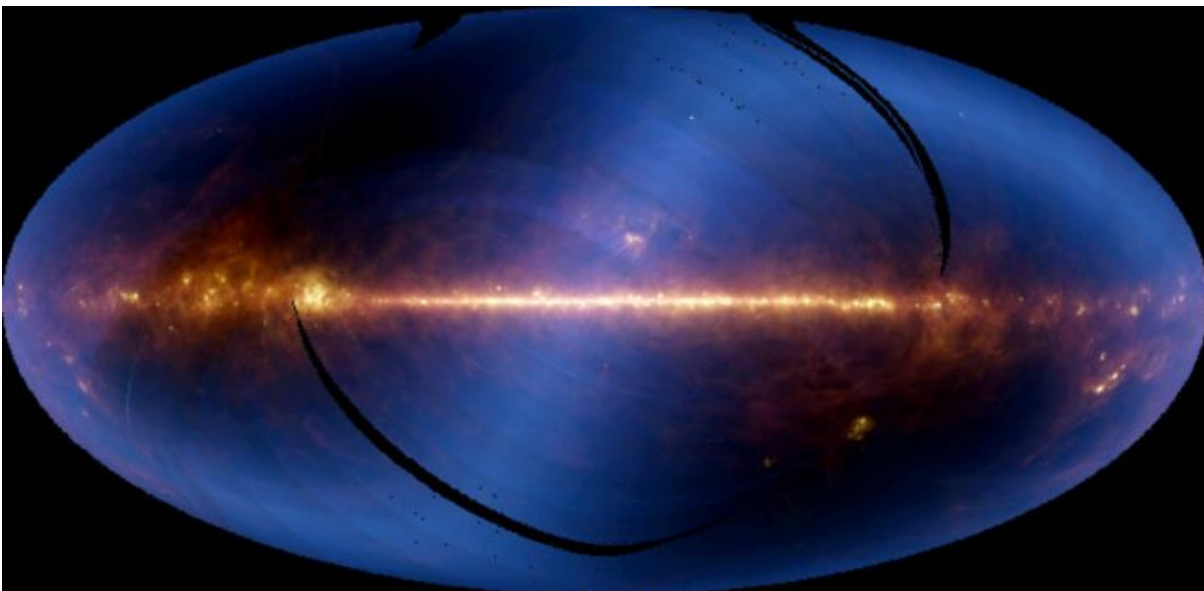
Etwas anders sieht es bei Kometen aus, die in viele kleine Bruchstücke zerbrechen. Das prominenteste Beispiel dafür ist der Komet Biela. Dieser kurzperiodische Komet ($T=6.75$ a) wurde 1826 von WILHELM VON BIELA (1792-1856) entdeckt und konnte auch 1832 als ein im Fernrohr durchaus ansehnliches Objekt beobachtet werden. Die Überraschung kam im Dezember 1845, als der Komet in zwei Teile zerbrach, die sich nach und nach als eigenständige Kometen voneinander entfernten. Einen Umlauf später – 1852 – konnten beide Bruchstücke wieder beobachtet werden. Sie hatten sich

mittlerweile um ca. 2.5 Millionen Kilometer voneinander entfernt. Eine genaue Analyse ihrer Bahnen erlaubte übrigens die erste Massenbestimmung eines Kometenkerns ($\approx 2.5 \cdot 10^{18}$ kg). Im Herbst 1852 wurden die beiden Bruchkometen das letzte Mal gesehen. Dafür trat am 27. November 1872 ein ergiebiger Sternschnuppenregen in Erscheinung, der sich am 27. November 1885 und am 23. November 1892 wiederholte. Die Bahnelemente der dazugehörigen Meteoride entsprechen dem des Kometen Biela, weshalb dieser Strom auch die „Bieliden“ (oder nach der Lage des Radianen die „November-Andromediden“) genannt wird.

Das Beispiel des Biela'schen Kometen zeigt, daß diese Himmelskörper am Ende ihrer Existenz in viele einzelne Bestandteile (Krümel und Staub) zerfallen können, die, wenn sie die Erdbahn kreuzen, die sogenannten kometaren Meteorströme bilden.

Beispiele für mit Kometen assoziierte Meteorströme

Komet	Strom	Maximum
1862 III	Perseiden	12. August
1866 I	Leoniden	18. November
1861 I	Lyriden	22. April
Biela	Andromediden	27. November
Halley	Eta-Aquariden	05. Mai
Halley	Orioniden	21. Oktober
1933 III	Draconiden	08. Oktober
Encke	Tauriden	05. November



Diese aus den Daten des überaus erfolgreichen Infrarotsatelliten IRAS zusammengesetzte Aufnahme des gesamten Himmels zeigt neben der thermischen Strahlung des in der galaktischen Ebene konzentrierten Staubes auch eine durch das Zentrum gehende s-förmige, hellblau erscheinende Emission, die vom interplanetaren Staub stammt

Aufbau eines Kometen - Koma

Sich auflösende Kometen liefern einen wesentlichen Teil der Staubkomponente der sogenannten interplanetaren Materie. Aufgrund des Poynting-Robertson-Effekts bewegt sich dieser Staub ($1 \mu\text{m} < r < 1\text{cm}$) auf die Sonne zu, d.h. er muß innerhalb von wenigen Hunderttausend bis einige Millionen Jahren kontinuierlich ersetzt werden.

Eine genaue Untersuchung der Kometengruppe der „*Sungrazer*“ deutet übrigens darauf hin, daß Zerfallsprozesse nicht nur in Perihelnnähe auftreten.

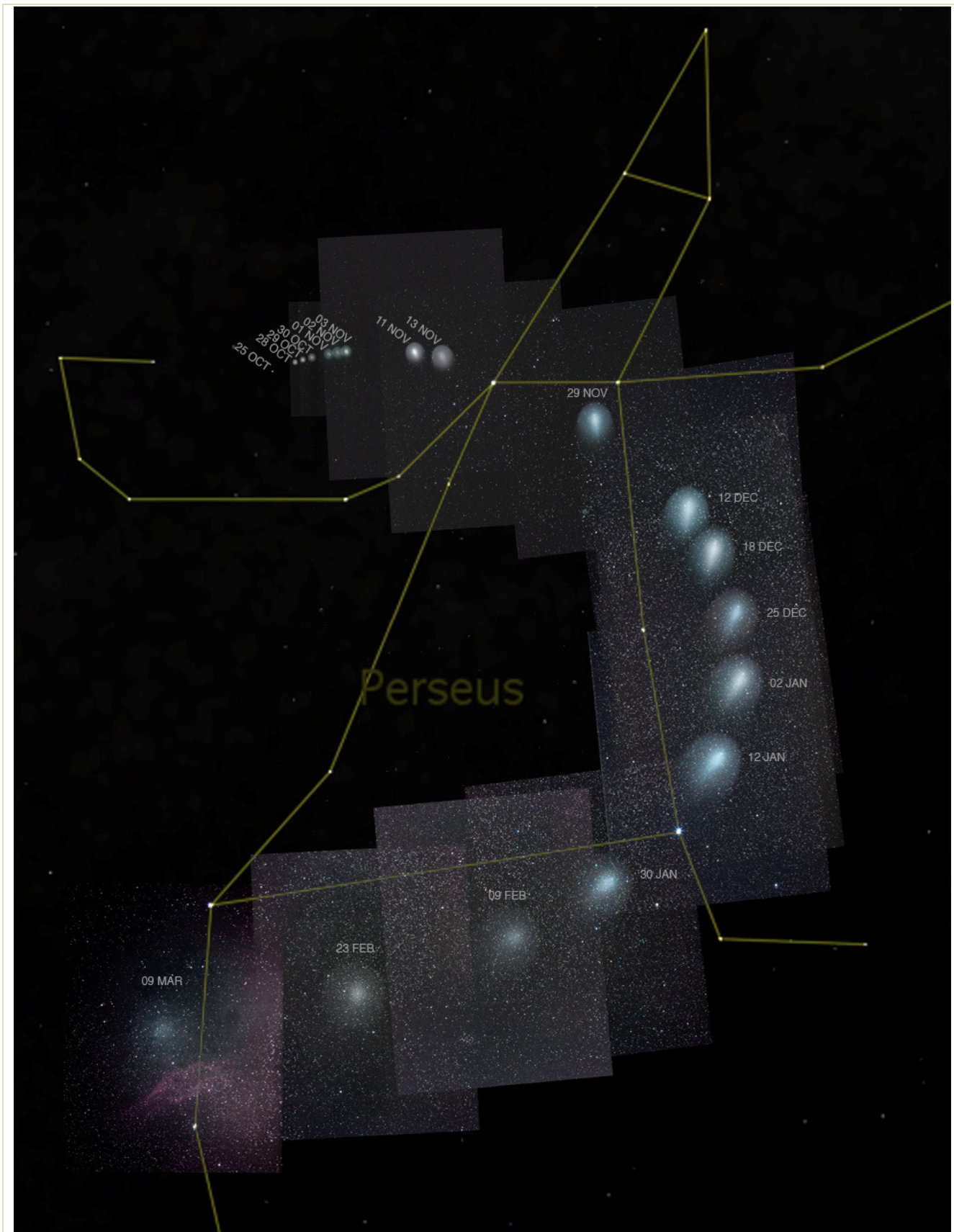
Die Koma

Die Koma eines Kometen ist quasi die Gasatmosphäre (richtiger, seine Exosphäre), die sich ausbildet, sobald die Temperaturen im Kernbereich soweit angestiegen sind, daß durch Sublimation eine genügende Menge Gas (und mit ihm Staub) freigesetzt wird. Für einen Astronomen auf der Erde wird ein Komet in diesem Moment eigentlich erst beobachtbar: Staub streut Sonnenlicht und das Gas tritt in Wechselwirkung mit der Sonnenstrahlung und dem Sonnenwind, wodurch es zur Fluoreszenz angeregt wird. Da man den eigentlichen Kometenkern aufgrund seiner geringen Größe in einem Teleskop normalerweise nicht auflösen kann, hat man in vergangenen Zeiten den innersten und oftmals hellsten Bereich der Koma als Kometenkern bezeichnet. Um Mißverständnissen vorzubeugen, soll dieser Bereich im Folgenden als „innere“ oder „kernnahe Koma“ bezeichnet werden.

Erste Anzeichen einer Koma machen sich bei langperiodischen Kometen ab einer Sonnenentfernung von ca. 10 AU bemerkbar. In dieser Entfernung beginnen bei Temperaturen zwischen 40 K und 60 K Stickstoff, Kohlenmonoxid und Methan zu sublimieren. Natürlich ist die Gasproduktion i.d.R. noch nicht besonders hoch. Deshalb werden Kometen in dieser großen Entfernung auch nur sehr selten entdeckt, es sei denn, es kommt zu einem der nicht sehr häufigen Helligkeitsausbrüche. Erst wenn ein Komet in das innere Sonnensystem gelangt ($R < 3 \text{ AU}$), erreichen die Temperaturen im Kernbereich Werte, wo auch das Wassereis mit z.T. erheblichen Produktionsraten sublimiert ($T > 200 \text{ K}$). Dabei kann sich die sichtbare Koma bis auf mehrere $10^5 - 10^6 \text{ km}$ aufblähen.

Die sichtbare Koma ist aber nur ein Teil der Kometenatmosphäre. Außerhalb der Koma befindet sich noch eine riesige Hülle extrem verdünnten Wasserstoffgases. Da sie im sichtbaren Bereich des Spektrums keine Strahlung aussendet, war sie lange Zeit verborgen geblieben. Erst 1970 gelang es bei Beobachtungen außerhalb der Erdatmosphäre die Lyman- α -Emission (bei $\lambda = 121.6 \text{ nm}$) bei den Kometen Bennet und Tago-Sato-Kosaka nachzuweisen. Detailuntersuchungen begannen ab 1978 mit Hilfe des „*International Ultraviolet Explorer*“ (IUE) und wurden bei den hellen Kometen der Jahrhundertwende mit dem Hubble-Raumteleskop fortgesetzt.

Die Wasserstoffhülle kann einen Durchmesser von einigen 10^7 km erreichen und ist damit bei manchen Kometen größer als selbst die Sonne. 1997 gelang es außerdem in der Wolke, die Hale-Bopp umgab, eine signifikante Menge von Sauerstoffatomen und etwas Kohlenstoff nachzuweisen. Der Sauerstoff stammt dabei offensichtlich genauso wie der Wasserstoff aus dem in der Sonnenstrahlung dissoziiertem Wasserdampf.

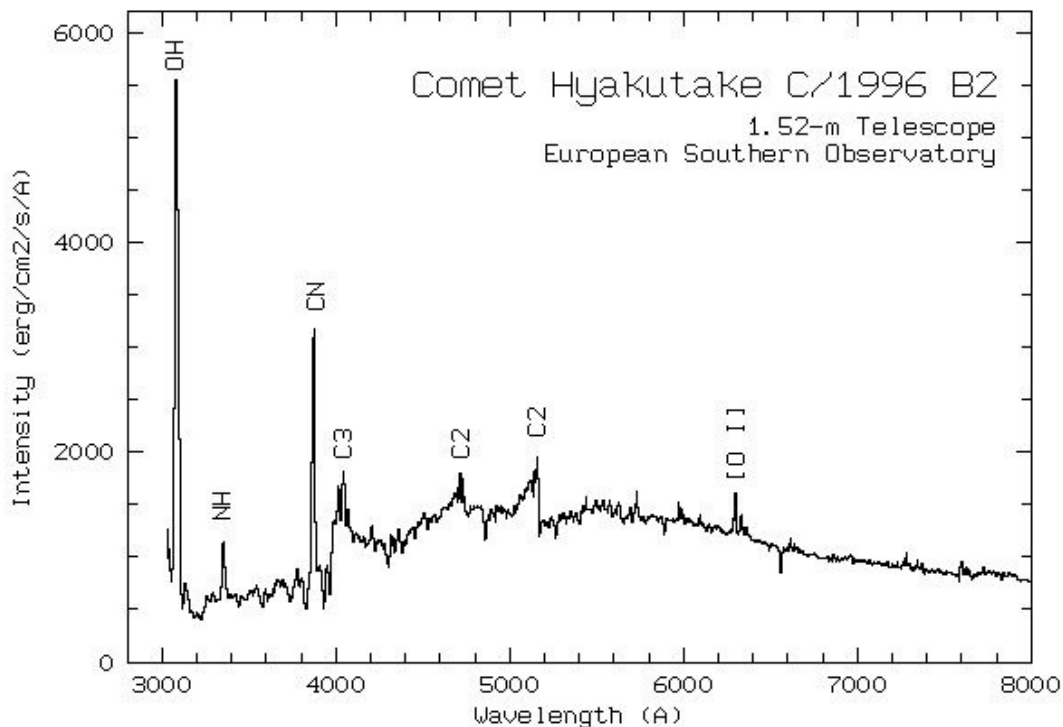


Entwicklung der Koma des außergewöhnlichen Kometen Holmes 2007/2008

Aufbau eines Kometen - Koma

Die Koma eines Kometen ist in mehrfacher Hinsicht interessant. Als Erstes wäre ihre chemische Zusammensetzung zu nennen, die maßgeblich von den vom Kometenkern abgegebenen Stoffen und deren Wechselwirkung mit der elektromagnetischen Strahlung und der Partikelstrahlung der Sonne abhängt. Informationen zu diesem Komplex erhält man aus spektroskopischen und radioastronomischen Untersuchungen (Mikrowellenbereich) sowie in Laborexperimenten, in denen die Bedingungen des Weltraums simuliert werden. Aus Strömungsstrukturen der inneren Korona im Bereich von Jets lassen sich manchmal sogar die Rotationsparameter (Dauer und räumliche Lage der Rotationsachse) des Kometenkerns bestimmen. Und nicht zuletzt ist die Koma der Ausgangspunkt des eigentlichen Hauptmerkmals eines Kometen, nämlich des Schweifes.

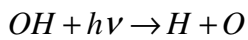
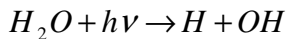
Ein typisches Kometenspektrum ist ein Bandenspektrum, dem ein kontinuierliches Spektrum unterlegt ist. Die Emissionslinien und Banden stammen von zumeist zwei bis dreiatomigen Molekülen wie C_2 , C_3 , CN, CH, NH, NH_2 und OH. Der kontinuierliche Untergrund ist nichts weiter als die an der Staubkomponente gestreute Sonnenstrahlung. Wenn das in der Koma konzentrierte Neutralgas in den Schweif abwandert, wird es zunehmend dissoziiert und ionisiert (Plasmaschweif).



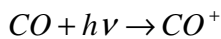
Spektrum des Kometen Hyakutake

Da nicht alle wesentlichen Moleküle im sichtbaren Spektralbereich emittieren, gibt ein optisches Spektrum nur einen kleinen Querschnitt der Chemie der Koma wieder. Insbesondere H_2O läßt sich von der Erde aus nur schwer nachweisen. Genaugenommen konnte dieses für die Kometenchemie außerordentlich wichtige Molekül erst bei Halley direkt – und zwar in Form einer charakteristischen Infrarotlinie bei $\lambda = 2.63 \mu\text{m}$ – mit Hilfe des Infrarotteleskops des „Kuiper Airborne Observatory“ – nachgewiesen werden. Neben H_2O zählt auch CO_2 und in geringerem Maße CH_4 zu den wichtigen

„Muttermolekülen“ der Kometenkoma. Wenn Wassermoleküle in den interplanetaren Raum gelangen und energiereicher Sonnenstrahlung ausgesetzt werden, dann erfolgt gemäß



eine Photodissoziation. Auf diese Weise entsteht die Wasserstoffhülle um den Kometen. Das OH-Radikal (ein sogenanntes „Tochtermolekül“) als Zwischenstufe zeigt sich z.B. als Emissionslinie im kurzwelligen Teil des optischen Spektrums. Wenn aus den Molekülen durch Strahlung Elektronen herausgeschlagen werden, dann spricht man von einer Photoionisation, z.B.



Ionisierte Moleküle reagieren – da sie eine elektrische Ladung tragen – sehr empfindlich auf Magnetfelder, d.h. sie werden durch die in Sonnenwinddomänen eingefrorenen Magnetfelder mitgerissen, wobei der typische und immer der Sonne entgegengesetzt gerichtete Plasmaschweif entsteht.

Für den Kometen Halley ließ sich während der Beobachtungskampagne 1986 die Neutralgaskomponente der Koma quantitativ bestimmen. Dabei wurde in etwa folgende prozentuale Zusammensetzung ermittelt:

Molekül	
H_2O	80 %
CO	10 %
CO_2	3,5 %
POM (H_2CO) _n	> 1%
CH_3OH	1 %

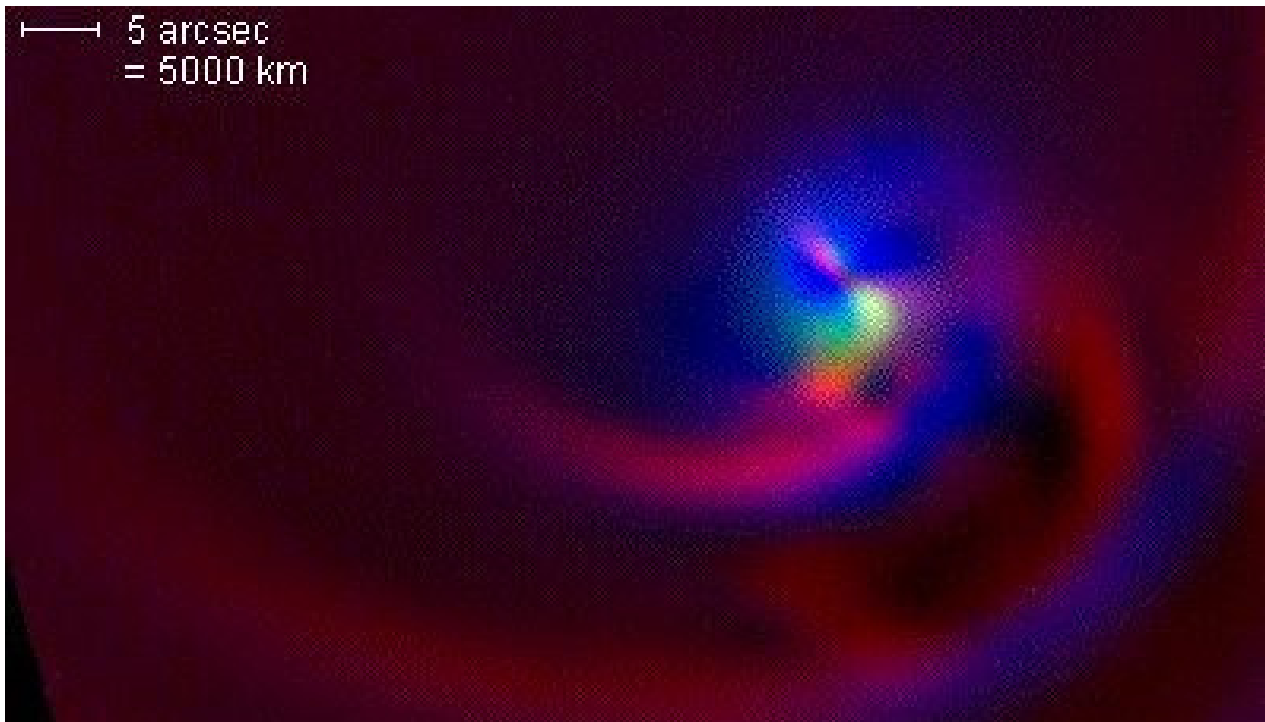
Bemerkenswert ist ein Kettenmolekül, welches in der obigen Tabelle mit POM abgekürzt ist. Es handelt sich dabei um Polyoxymethylen, also polymerisiertes Formaldehyd. Es zeigt an, daß es auf der kalten Oberfläche des Kometenkerns durchaus zur Entstehung komplexer organischer Moleküle kommen kann. Leider ist darüber noch nicht sehr viel bekannt. Zumindest rücken diese Beobachtungen Kometen in das Blickfeld der Astrobiologen – nicht etwa, um dort irgendwelche Mikroben aufzuspüren, sondern eher um die These zu überprüfen, nach der ein Großteil des Wassers auf dem Planeten Erde von Kometen stammt, die in der Frühzeit des Sonnensystems auf die Erde geplumpst sind und dabei die organischen Stoffe, die für die Entstehung des Lebens notwendig waren, gleich mit geliefert haben.

POM ist ein Elternmolekül von einer ganzen Anzahl von Verbindungen und Radikalen in der Kometenexosphäre. Beispiele dafür sind CO , CO_2 , $HCOOH$ (Ameisensäure), CH_4 , C_2H_6 und natürlich H_2CO .

Aufbau eines Kometen - Koma

Neben der Neutralgaskomponente findet man in der Koma – besonders in kernfernen Bereichen – eine Vielzahl von ionisierten Molekülen in Form von Radikal-Ionen. Unter Radikale versteht man dabei Molekülreste, die ein (selten mehrere) quasi einsames ungepaartes Elektron aufweisen. Auf der Erde finden solche Molekülreste sehr schnell einen Reaktionspartner, wodurch sich ihre Kurzlebigkeit (und auch ihre Reaktionsfreudigkeit) erklärt. In der extrem dünnen Gashülle eines Kometen sind Reaktionspartner eher selten, so daß freie Radikale über sehr lange Zeiten ihre chemische Identität beibehalten. Da sie positiv geladen sind, wird ihre Bewegung entscheidend vom Sonnenwindplasma (in dem Magnetfelder eingefroren sind) beeinflusst. Sie verbleiben deshalb nicht lange in der Koma sondern triftten in den Ionenschweif ab.

Für den kontinuierlichen Untergrund eines Koma-Spektrums sind die bei der Entgasung des Kerns mitgerissenen Staubteilchen, deren Durchmesser in der Größenordnung der Lichtwellenlänge und darüber liegen, verantwortlich, da sie das einfallende Sonnenlicht streuen. Diese Staubkomponente bildet die sogenannte Staubkoma, die besonders in Kernnähe in Erscheinung tritt.



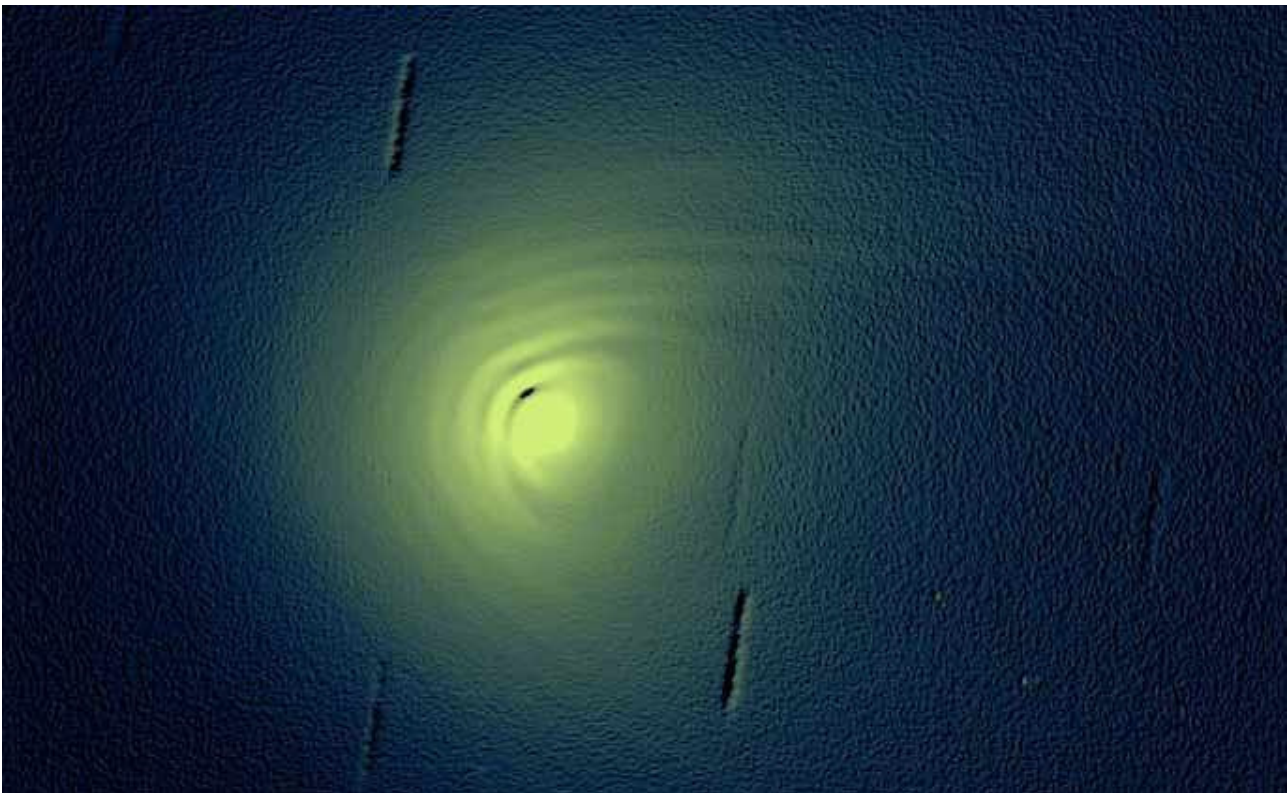
Falschfarbendarstellung der Staubbänder in der inneren Koma von Hale-Bopp (7. April 1997) auf einer Aufnahme des Purgathofer Observatoriums

Sobald nicht zu große Staubteilchen (Durchmesser einige μm) mit dem Gasstrom den Kometenkern verlassen, koppeln sie von dieser Strömung ab und beginnen sich im Gravitationsfeld der Sonne zu bewegen (die Eigengravitation des Kometenkerns ist i.d.R. zu gering, um ihre Bewegung wesentlich zu beeinflussen). Dabei hängt ihre Geschwindigkeit relativ zum Kometenkern von der Partikelgröße und natürlich von der Austrittsgeschwindigkeit der Gase ab, die sie mitgerissen haben. Staubteilchen und größere Staubkonglomerate (die bei großen Kometen eine Größe von einigen Dezimetern erreichen können), deren Geschwindigkeit die Entweichgeschwindigkeit des Kometenkerns nicht übersteigt, fallen auf den Kometenkern zurück und lagern sich als poröse Schicht auf der Oberfläche des Schmutzmantels ab.

Eine genaue Analyse der Staubbestandteile der Koma hat ergeben, daß Staubpartikel in zwei Formen auftreten, die sich in ihren chemischen Bestandteilen unterscheiden. Die eine Komponente – sie entspricht wahrscheinlich den schon erwähnten Brownlee-Partikeln – besteht hauptsächlich aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N), also – und das soll hier erwähnt werden – aus den Elementen, aus denen auch komplexe organische Moleküle aufgebaut sind. Sie wird deshalb auch als CHON-Komponente bezeichnet. Die andere Komponente besteht aus Silikaten, d.h. mineralischen Aggregaten, die als wesentlichen Bestandteil Silizium (Si) enthalten.

Bei fast allen größeren Kometen konnten Strukturen in der inneren Staubkoma beobachtet werden aus denen man auf eine ungleichmäßige Ausgasung des Kometenkerns, die in Form von Jets erfolgte, schließen konnte. Oftmals treten dabei schalenartige oder spiralförmig zusammengewickelte Staubbänder auf, aus denen man – „Rasensprenger-Effekt“ – auf die Rotationsparameter des ansonsten unsichtbaren Kometenkern schließen kann. Besonders eindrucksvoll und schon mit größeren Amateurinstrumenten beobachtbar waren die Staubbänder in der inneren Koma von Hale-Bopp.

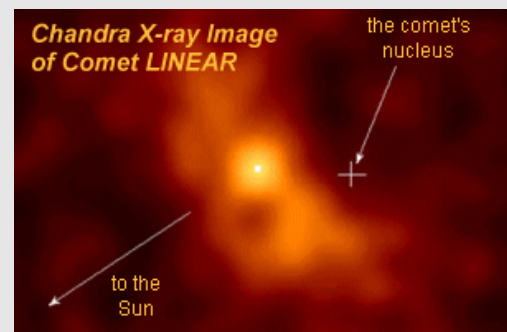
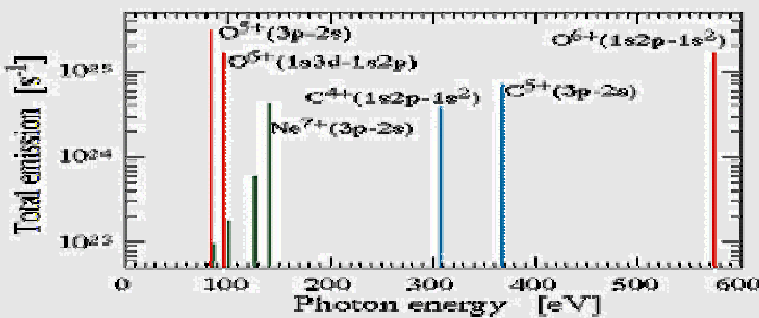
Der Gasausfluß in die Koma erfolgt in etwa mit Geschwindigkeiten zwischen 0.5 und 1 km/s. Die Gasdichte kann dabei in Kernnähe bei größeren Kometen bei etwa 10^{12} Teilchen / m^3 liegen. Sie nimmt schnell ab um im Schweif auf ca. 10^6 bis 10^7 Teilchen / m^3 zu sinken.



Diese bearbeitete Aufnahme der inneren Koma von Hale-Bopp zeigen bis zu zehn nach außen expandierende Staubschalen (29.3.1997). © Pic du Midi Observatory

Röntgenstrahlung von Kometen

Als man 1996 - mehr aus Neugierde als in der Erwartung, etwas Interessantes zu finden - den Kometen Hyakutake mit dem Röntgensatelliten ROSAT beobachtete, stellte man überraschend eine stark variable, sich auf der Vorderseite des Kometenkopfes konzentrierende Röntgenstrahlung fest. Wenn man diese Strahlung als thermische Strahlung interpretieren wollte, müßten auf der Vorderseite des eiskalten Kometenkern lokal Temperaturen von einigen 10^5 bis 10^6 K auftreten, was ja völlig unmöglich ist. Zwar hat man schon im Vorfeld der Beobachtungen vermutet, daß im dichteren Bereich des Kometenkopfes Röntgenstrahlung, die von der Sonne stammt, gestreut wird. Die gemessenen Intensitäten überstiegen den erwarteten Wert jedoch um mehr als das 100-fache. Vier Jahre später und mit verbesserten Equipment (ACIS („Advanced CCD Imaging Spectrometer“) auf CHANDRA) konnten die Beobachtungen von ROSAT am Komet LINEAR (C/1999 S4) wiederholt werden. Mit diesem Spektrometer ließ sich im Gegensatz zu ROSAT präzise bestimmen, welche Atome die beobachtete Röntgenstrahlung emittiert haben.



Das Spektrum zeigt, daß die meiste Röntgenstrahlung von 5- und 6-fach ionisierten Sauerstoff aber auch von anderen Atomen, welche den größten Teil ihrer Elektronen verloren haben, stammt. Diese Ionen sind zu ca. 1% in der expansiv abströmenden Sonnenkorona vorhanden, in der ja bekanntlich kinetische Temperaturen in der Größenordnung von 10^6 K auftreten. Der physikalische Vorgang, der zu der beobachteten Röntgenemission führt, ist als Ladungsaustauschreaktion bekannt. Wenn die Ionen, die ja alle oder den größten Teil ihrer Elektronen in der Korona verloren haben, am Kometen mit einer Geschwindigkeit zwischen 400 und 800 km/s vorbeiströmen, ziehen ihre starken positiven Ladungen schwach gebundene Elektronen der neutralen Atome und Moleküle der Koma an und übernehmen sie, bis das Ladungsgleichgewicht wieder hergestellt ist. Wenn diese Elektronen dann kaskadenartig von den höheren Energieniveaus zu den kernnahen Energieniveaus springen, wird die jeweilige Energiedifferenz als diskrete Röntgenstrahlung emittiert.

Die Beobachtung dieser Strahlung erlaubt damit etwas über die stoffliche Zusammensetzung des Sonnenwindes zu erfahren, in dem die Kometen gewissermaßen als „Sonden“ verwendet werden. Mittlerweile gehören deshalb hellere Kometen mit zu dem Beobachtungsprogramm der auf Satelliten stationierten Röntgenteleskope. Es wird sogar darüber diskutiert, ob man diesen Effekt nicht auch zum Nachweis von kometenähnlichen Körpern bei benachbarten Sternen einsetzen kann.

Der Schweif

Als Hale-Bopp in seiner ganzen Pracht am Himmel stand, fielen im Feldstecher besonders die unterschiedlichen Farben seiner beiden deutlich auseinandergehenden Schweife auf. Der eine, etwas schmalere, leuchtete deutlich bläulich, während der andere mehr zu einem blassen Gelb neigte. Dieser Farbeindruck, der visuell nur bei wirklich „großen“ Kometen auffällt, ist besonders gut auf Farbfotografien zu erkennen.

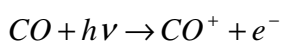


Ionen- und Staubschweif des Kometen Hale-Bopp

Wie die Aufnahme von Hale-Bopp zeigt, besitzen Kometen offensichtlich zwei verschiedenartige Schweiftypen: der Blau leuchtende wird als Ionen- oder Plasmaschweif bezeichnet, der andere als Staubschweif.

Ionenschweif (Typ I)

Das neutrale Gas, welches der Kometenkern an die Koma abgibt, wird unter dem Einfluß der solaren UV- und Partikelstrahlung dissoziieren (Photodissoziation). Dabei entstehen u.a. auch Kohlenmonoxid-Moleküle. Wenn aus dem Sauerstoffatom entsprechen der Reaktionsgleichung



ein Elektron herausgerissen wird, dann entsteht ein CO^+ -Radikal welches – da es geladen ist – vom Magnetfeld des Sonnenwindes mitgeführt wird. Das passiert natürlich auch mit allen anderen in der

Aufbau eines Kometen - Schweif

Koma gebildeten Ionen. In der Summe entsteht der immer genau der Sonne entgegengesetzt gerichtete Ionenschweif. Da CO^+ -Ionen blaues Licht bedeutend besser streuen als langwelligeres Licht, erscheint der Ionenschweif in blauer Farbe. Oder anders ausgedrückt, die typisch blaue Farbe des Ionenschweifs von Hale-Bopp (und natürlich auch der anderen Kometen) wird von den darin enthaltenen CO^+ -Ionen hervorgerufen. Da der Sonnenwind nicht gleichmäßig „bläst“, kann man im Ionenschweif oftmals zeitlich veränderliche Strukturen in Form von Verwirbelungen, Knoten und Strahlen beobachten.

Staubschweif (Typ II)

Bei der Entgasung des Kometenkerns gelangt sehr viel Staub in die Koma. Dieser Staub koppelt sich relativ schnell von der Gaskomponente ab und beginnt sich unter dem Einfluß des Gravitationsfeldes der Sonne und einer Repulsivkraft (dem Strahlungsdruck) frei im Raum zu bewegen. Die geringe Massenanziehung des Kometenkerns kann dabei vollständig vernachlässigt werden. Da die Staubteilchen mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsvektoren in die Koma „injiziert“ werden, gelangen sie auch unter dem Einfluß des Strahlungsdrucks (dessen Wirkung u.a. auch von der Teilchenquerschnittsfläche abhängt) auf unterschiedliche Bahnen. Das führt dazu, daß Staubschweife meist stärker divergieren als der längere und schmalere Ionenschweif, gekrümmt sind und auch nicht immer genau radial von der Sonne wegzeigen.

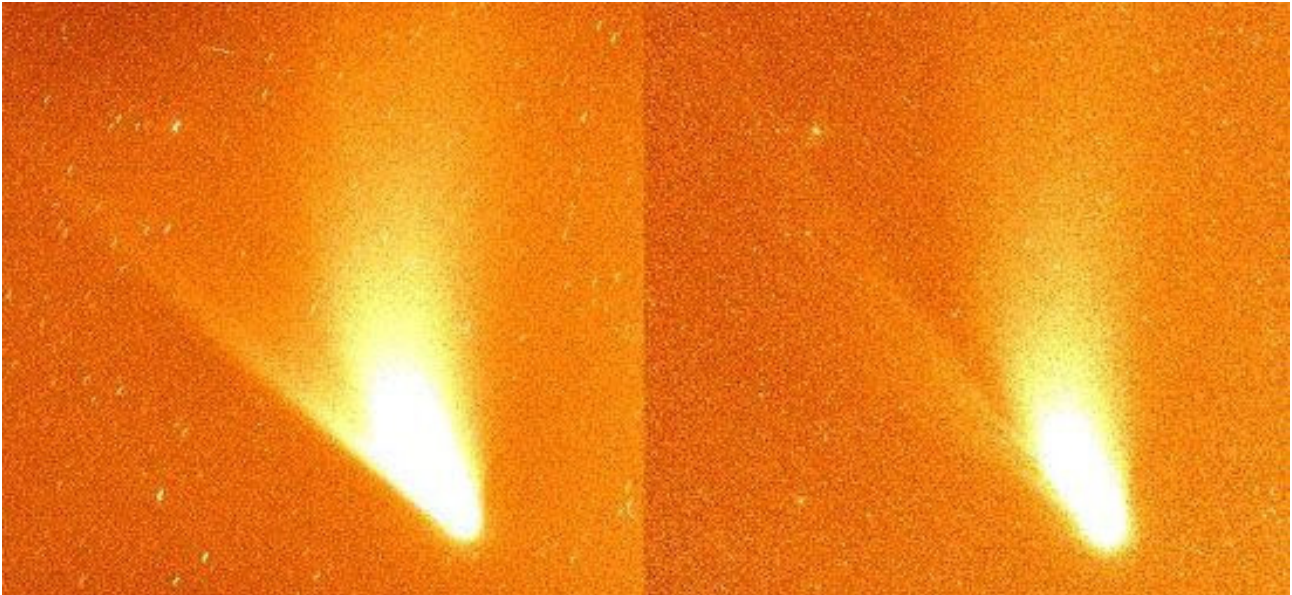
Staubschweife leuchten im reflektierten Sonnenlicht wobei aufgrund der überwiegenden Partikelgröße im μm -Bereich wellenlängenunabhängige Mie-Streuung überwiegt.

Im April 1997 wurde überraschenderweise eine weitere Form eines Kometenschweifs entdeckt. Aufnahmen mit dem 2.5 m Isaak-Newton-Teleskop auf La Palma, die mit Hilfe eines schmalbandigen Filters gewonnen wurden, der nur das Licht von Natriumatomen durchläßt, zeigen, daß Hale-Bopp zu diesem Zeitpunkt einen ca. 6° langen Natriumschweif besessen hat (GABRIELE CREMONESE, DON POLLACO, IAU-CIRCULAR 6634)).

Zwar war aus spektroskopischen Untersuchungen schon länger bekannt, daß in der Kometenkoma in geringem Maße Natrium-Atome vorhanden sind. Da diese neutralen Atome jedoch einen scharf begrenzten Schweif bilden, dessen Richtung ein klein wenig von der Richtung des Ionenschweifs abweicht, war doch überraschend. Über seinen Ursprung und über die physikalischen Prozesse, die zu seiner Ausbildung führen, wird z.Z. noch sehr intensiv diskutiert.

Während die Form und die Struktur des Ionenschweifs vom Sonnenwind abhängen, wird die Dynamik der Staubpartikel im Staubschweif durch das Newtonsche Gravitationsgesetz und dem Strahlungsdruck bestimmt. Da beide Kräfte radial zur Sonne wirken, aber entgegengesetzt gerichtet sind, kann man den Einfluß des Strahlungsdrucks als Modifikation des solaren Gravitationsfeldes auffassen. Das bedeutet, daß sich die Bewegungsgleichungen der Staubpartikel unter der Annahme eines „effektiven“ Gravitationspotentials integrieren lassen. Führt man diese Integrationen für eine größere Zahl von Staubpartikeln durch, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsvektoren den Kernbereich des Kometen verlassen, dann kann man auf diese Weise den Staubschweif simulieren.

Durch den Vergleich zwischen berechneten Staubschweif und realen Staubschweif lassen sich Informationen über die Partikelgröße und über das Material, aus dem die Staubteilchen bestehen, gewinnen.



Die linke Aufnahme des Kometen Hale-Bopp wurde durch ein Filter (589.2 ± 2.1 nm, D-Linie des Natriums) aufgenommen, welches nur die Strahlung von Natriumatomen hindurch läßt (16. April 1997). Der Natrium-Schweif ist die völlig gerade und schmale Struktur, die vom Kometenkopf ausgehend nach links oben zeigt. Die rechte Aufnahme zeigt den normalen Ionenschweif und den breiten, leicht gekrümmten Staubschweif. © Cremonese, Pollaco

Der Strahlungsdruck resultiert daraus, daß jedes Photon einen Impuls

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c}, \quad c = \text{Vakuumllichtgeschwindigkeit} \quad [1.1]$$

trägt. Der Energiefluß E in einen bestimmten Raumwinkelbereich ist deshalb einem bestimmten Fluß von Impuls P äquivalent, wobei gilt

$$P_R = \frac{E}{c} \quad [1.2]$$

Ein (als kugelförmig angenommenes) Staubteilchen hat die Querschnittsfläche $A_{dust} = \pi r^2$, es „spürt“ in einem Strahlungsfeld dann die Kraft

$$F_R = P_R A_{dust} = \frac{E A_{dust}}{c} \quad [1.3]$$

Nach (5.23) ist die Strahlungsleistung S der Sonne, die auf einen Quadratmeter in der Entfernung d entfällt, durch folgende Beziehung mit der Oberflächentemperatur der Sonne T_\odot verbunden:

$$S = \frac{L_\odot}{4\pi r} = \sigma T_\odot \left(\frac{R_\odot}{d} \right)^2 \quad [1.4]$$

Aufbau eines Kometen - Schweif

Für die Kraft F_R , die das Staubpartikel von der Sonne weg treibt, gilt dann nach (1.3) :

$$F_R = \frac{\sigma \pi R_\odot^2 T_\odot^4 r^2}{c d^2} \quad [1.5]$$

Die auf ein Staubteilchen wirkende effektive Gravitationskraft \tilde{F} ist dann die Gravitationskraft F_G minus der durch den Strahlungsdruck hervorgerufenen Repulsivkraft F_R . Oder anders ausgedrückt:

$$\tilde{F} = (1 - \beta) F_G \quad [1.6]$$

mit $\beta = F_R / F_G$.

Das Verhältnis von Gravitationskraft und Strahlungsdruck für ein Staubteilchen der Dichte ρ und dem Radius r ist demnach:

$$\beta = \frac{3 \sigma R_\odot^2 T_\odot^4}{4 c G M_\odot \rho r} \quad [1.7]$$

Ein Staubteilchen wird unter der Bedingung $\beta > 1$ durch den Strahlungsdruck aus dem Sonnensystem herausgeblasen. Teilchen, die der Bedingung $\beta < 1$ genügen, werden dagegen langfristig in Richtung Sonne beschleunigt, wo sie irgendwann einmal verdampfen (Poynting-Robertson-Effekt). Staub ist deshalb genaugenommen im Sonnensystem eine temporäre Erscheinung die nur dadurch Bestand hat, daß Staub permanent durch Kometen und kollidierende Planetoiden nachgeliefert wird.

Die Bewegung eines vom Kometenkern emittierten Staubpartikels läßt sich in einem mit dem Kometenkern mitgeführten Koordinatensystem als auch im normalen heliozentrischen System beschreiben.

Praktisch untersucht man, wie sich die Teilchen bewegen, nachdem sie den Einflußbereich des Kometenkerns und des Gasstroms, der sie mitgeführt hat, verlassen haben (d.h. nach ca. 20 Kernradien). Es zeigt sich, daß die Staubpartikel, deren Emissionsgeschwindigkeit je nach Größe zwischen 10 und 500 m/s liegt, in Bezug auf den Kometen einen aufgefächerten und vom Radiusvektor Sonne-Komet leicht weggekrümmten Schweif ausbilden. Damit sich überhaupt ein Staubschweif ausbilden kann, muß β Werte zwischen 0.1 und 2 annehmen (SAITO, ISOBE 1981).

Heliozentrisch gesehen handelt es sich bei den Bahnen der Staubteilchen vor dem Perihel zumeist um Ellipsen und danach um Hyperbeln.

Da der Parameter β (1.7) sowohl von der Teilchengröße r als auch der Dichte ρ (einer Materialeigenschaft) abhängt, lassen sich aus der Untersuchung eines Staubschweifes auch Informationen über dessen stoffliche Beschaffenheit gewinnen (wie eine exakte Durchrechnung der Problemstellung zeigt, gehen auch noch andere Materialeigenschaften wie z.B. der wellenlängenabhängige Brechungsindex n in die Berechnung von β ein). Man berechnet dazu unter der Annahme einer bestimmten Staubemissionsrate, einer bestimmten Größenverteilung der Staubpartikel und deren Emissionsgeschwindigkeiten eine Helligkeitsverteilung im Schweif und

versucht sie den gemessenen Isophoten (das sind Flächen gleicher Helligkeit) durch sinnvolle Variation der Parameter anzupassen.

Die Staubpartikel, die ein Komet in Sonnennähe streut, verteilen sich im Laufe der Zeit im Raum und bilden den interplanetaren Staub. Zusammen mit den Partikeln, die bei Planetoidenkollisionen entstehen, und den Partikeln, die bei der Auflösung ekliptikaler Kometen freigesetzt werden, sind sie ein wesentlicher Bestandteil der interplanetaren Materie.



Komet West (März 1976) entwickelte einen stark gefächerten und strukturierten Staubschweif

Wechselwirkung mit dem Sonnenwind

Es ist eine seit langem bekannte Tatsache, daß Kometenschweife immer in die der Sonne entgegengesetzte Richtung zeigen. So offensichtlich diese Beobachtung auch ist, hat man sich doch lange mit einer Erklärung dafür schwergetan. Während man die Staubschweife mit Hilfe des Strahlungsdruckes im Rahmen einer mechanischen Theorie recht gut erklären konnte, blieb die Erscheinung des Ionen- oder Plasmaschweifs weithin rätselhaft. 1943 konnte z.B. der Hamburger Astronom KARL WURM zeigen, daß der Strahlungsdruck des Sonnenlichts bei weitem nicht ausreicht um die hohen Geschwindigkeiten der Gasmoleküle im Ionenschweif (und insbesondere ihre Beschleunigung entlang der Schweifachse) zu erklären. Den entscheidenden Durchbruch schaffte im Jahr 1951 der deutsche Astrophysiker LUDWIG BIERMANN (1907-1986), in dem er einen kontinuierlichen, von der Sonne ausgehenden Partikelstrom postulierte. Der Gedanke war in einem gewissen Sinne naheliegend, da man bereits in einer Teilchenstrahlung der Sonne die Ursache für magnetische Stürme und der farbenprächtigen Nordlichter (OLIVER LODGE, KRISTIAN BIRKELAND (1867-1917), 1900) erkannt hatte. Das Neue war, das BIERMANN einen kontinuierlichen Strom von hochverdünnten Wasserstoffplasma vorhersagte, der – wie eine Windströmung – permanent durch das Sonnensystem „wehte“ weshalb er auch schlicht und einfach „Sonnenwind“ genannt wurde (E.N.PARKER, 1958). Dabei reißt er die geladenen Teilchen aus der Kometenkoma mit, so daß als Ergebnis der exakt radial ausgerichtete Ionenschweif entsteht. Die Geschwindigkeit der Ionen in diesem Schweif widerspiegelt in etwa die Strömungsgeschwindigkeit des Sonnenwindplasmas.

Die mehrere Millionen Grad heiße Sonnenkorona tendiert zu einer kontinuierlichen Expansion was dazu führt, daß permanent ein Strom geladener Teilchen in Form einer Überschallströmung die Sonne verläßt. In einer Entfernung von ca. 1 AU liegt die Strömungsgeschwindigkeit ungefähr bei 400 km/s und die Partikeldichte bei einigen 10^6 Protonen, α - Teilchen und Elektronen pro Kubikmeter. In das strömende Plasma sind aufgrund dessen guter Leitfähigkeit Magnetfelder eingefroren, deren Feldlinien in radialer Richtung zeigen und die aufgrund der Sonnenrotation leicht gekrümmt sind (um ca. 1.5°). Sie bilden – vom Pol der Ekliptik aus betrachtet – eine sektorierte archimedische Spirale wobei sich die Sektoren durch die Magnetfeldrichtung unterscheiden.

Auf diese Strömung trifft ein Komet, wenn er in das innere Sonnensystem gelangt und dort eine Koma ausbildet. Durch die Wechselwirkung des neutralen Komagases mit den Sonnenwindpartikeln kommt es zu dessen Ionisation (insbesondere CO^+ spielt dabei eine große Rolle) und es setzt ein Prozeß ein, den man als „Pick up“ bezeichnet. Das bedeutet, daß der Sonnenwind schwere Kometenionen aufnimmt und dabei an Masse gewinnt. Die einzelnen plasmaphysikalischen Prozesse sind dabei sehr komplex und im Einzelnen auch noch nicht völlig verstanden. Diese Massenakkretion führt effektiv zu einer Abbremsung des Sonnenwindes bis sich an der Grenzfläche, wo die Überschallströmung in eine Unterschallströmung übergeht, eine Stoßfront ausbildet. Ihr Abstand vom Kometenkern liegt in der Größenordnung von 10^7 – 10^9 m. Dahinter kommt es zu Turbulenzen und das Plasma des Sonnenwindes mischt sich mit dem Kometenplasma. Dort wo dieses Mischplasma auf das reine, hauptsächlich durch Photoionisation entstandene Kometenplasma trifft, bildet sich eine weitere Unstetigkeitsstelle aus, deren der Sonne zugewandte Punkt man i.d.R. als Staupunkt bezeichnet. Kurz davor stauen sich die Feldlinien der im Sonnenwindplasma eingefrorenen Magnetfelder und legen sich schlauchartig um die Koma herum, wobei sich eine „magnetische Barriere“ ausbildet, die den

Ionenschweif einschließt. Dabei können sich nach ALFVEN magnetische Flußröhren ausbilden, die mit den beobachteten „Schweifstrahlen“ im Zusammenhang stehen. Schweifstrahlen sind lange, gerade und i.d.R. nur schwach leuchtende Strukturen, die in Kernnähe aus der Koma austreten und symmetrisch zur Schweifachse den Ionenschweif durchsetzen.

Ähnlich wie beim Magnetfeld der Erde bildet sich aufgrund der Schlauchbildung im Bereich der Schweifachse eine neutrale Schicht aus, die zwei Plasmagebiete mit unterschiedlicher magnetischer Polarität trennt. Diese Neutralschicht konnte z.B. als die amerikanische Sonde „*International Cometary Explorer*“ den Schweif des Kometen Giacobini-Zinner 1985 durchquerte, bestätigt werden.



Auf dieser 30 Minuten lang belichteten Aufnahme des Kometen Hyakutake (März 1996) sind sehr gut die aus der Koma hervorbrechenden Schweifstrahlen zu sehen. © James Janusz

Das Magnetfeld im Plasmaschlauch erreicht eine Stärke von 50 bis 100 nT, was das 5 bis 10-fache des Magnetfeldes im ungestörten Sonnenwind entspricht. Das führt dazu, daß aufgrund der sogenannten Plasmadrift im Bereich der Neutralschicht Ströme von bis zu 10^8 A induziert werden, die als weitere Ionisationsquelle im Bereich der Koma fungieren können (IP, MENDIS, 1976).

Ein weiteres interessantes Phänomen, das mit dem Sonnenwind im Zusammenhang steht, sind die sogenannten Schweifabrisse. Darunter versteht man die von EDWARD EMERSON BARNARD (1857-1923) 1893 zuerst beschriebenen Vorgänge, bei denen ein Komet Teile seines Ionenschweifs verliert in

Aufbau eines Kometen - Schweif

dem sich der Schweif trennt und hinter der Trennstelle größere Plasmawolken in Richtung der Schweifachse abdriften. Es ist noch nicht sicher bewiesen, daß dieser Vorgang allein mit dem Durchfliegen einer Sektorgrenze des Sonnenwindes, wo sich die Richtung des Magnetfeldes um 180° dreht, zu tun hat. Modellrechnungen legen auch noch ein etwas anderes Szenario nahe. Die heliosphärische Stromschicht (das ist die dünne Schicht, die ungefähr in der Äquatorebene der Sonne verläuft und welche die Magnetfeldlinien unterschiedlicher Polarität voneinander trennt) trennt auch zwei Gebiete hoher Plasmageschwindigkeiten ($v \sim 750$ km/s), die ihre Ursache in den sogenannten koronalen Löchern haben. In der Stromschicht selbst wird dagegen nur eine Geschwindigkeit von $v \sim 400$ km/s erreicht. Dafür ist die Teilchendichte aber größer. Bewegt sich nun ein Komet durch diese Schicht, dann gelangt er zuerst in die Zone mit langsamen Plasmageschwindigkeiten, wobei sich beim Durchdringen die Polarität des Magnetfeldes ändert. Kurz darauf gelangt er wieder in die Zone hoher Plasmageschwindigkeit. Wie detaillierte Rechnungen zeigen, erhöht sich dabei der Betrag der Magnetfeldstärke um den Faktor 2 und die Strömungsrichtung um etwa 10° . Das führt u.U. zu einem Schweifabriß und zu einem Versatz des abgerissenen Schweifes, der dann wie ein „Knick“ aussieht (WEGEMANN, 1999).



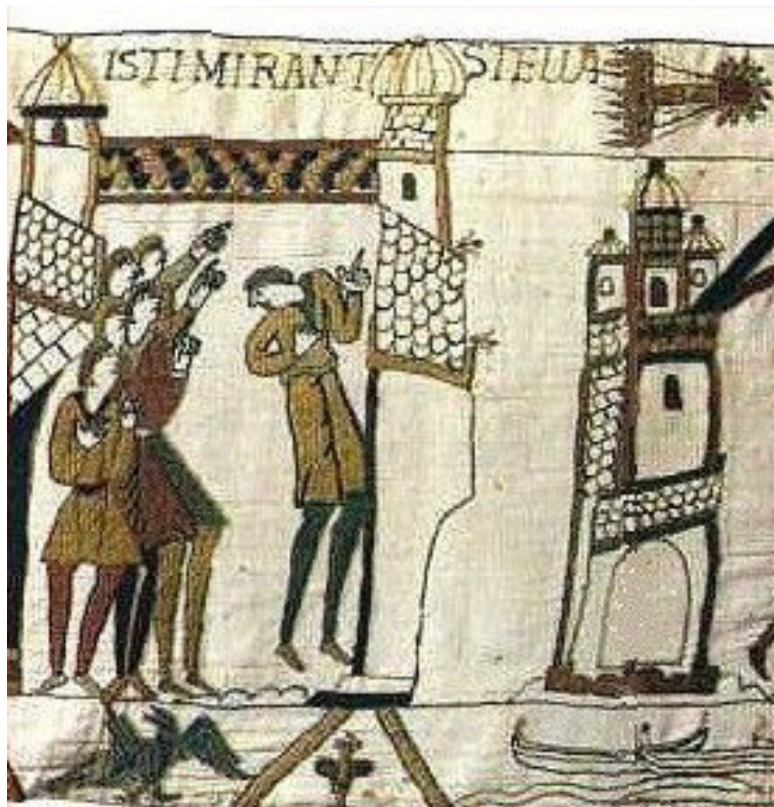
Hyakutake, 25. März 1996. Deutlich ist der Teilabriß des Ionenschweifs zu erkennen © J.Lodriguss

Schweifabrisse können auch durch Stoßwellen im Sonnenwind bewirkt werden, wie sei bei koronalen Masseauswürfen (CME – „*Coronal Mass Ejection*“) entstehen. Ein gut dokumentiertes Beispiel ist das „disconnection event“ des Kometen 1979 X Bradford. Kurz vor diesem Ereignis hatten die Satelliten Helios 2 und ISEE 3 den Durchgang einer interplanetaren Stoßfront registriert (LE BORGNE, 1980).

Die plasmaphysikalischen Vorgänge der Sonnenwind-Kometen-Wechselwirkung sind sehr komplex, was ihre Untersuchung und Modellierung erschwert. Andererseits kann die Beobachtung der Dynamik von Schweifstrukturen wichtige Hinweise über den Materieabfluß von der Sonne und über das Strömungsverhalten des Sonnenwindes liefern. Die „vor-Ort-Erkundung“ von Kometen, wie sie sehr erfolgreich mit der Halley-Kampagne 1986 angelaufen ist, wird in Zukunft mithelfen, die Geheimnisse der Schweifdynamik der Kometen weiter zu enträtseln.

Halleyscher Komet

Jedem, der sich etwas mit der Kunst des Mittelalters beschäftigt hat, ist der berühmte Teppich von Bayeux bekannt. Der knapp 70 Meter lange und einem halben Meter hohe bemalte „Wandteppich“ zeigt in Form einer Bildgeschichte die Ereignisse, die sich im Jahre 1066 anlässlich der Eroberung Britanniens durch den normannischen Herzog WILHELM DEN EROBERER (1027/28 – 1087) zugetragen haben. In unserem Zusammenhang ist nur interessant, daß er die erste zeichnerische Darstellung eines Kometen enthält, der sich als der „Halley’sche“ identifizieren läßt.



Inwieweit diese Kometenerscheinung jedoch Einfluß auf das Kriegsglück des „Eroberers“ genommen hat, ist jedenfalls heute, nachdem fast 1000 Jahren vergangen sind, nicht mehr abschließend zu klären. Auf jedem Fall muß dieser Komet damals eine auffällige Erscheinung gewesen sein.

Woher weiß man aber überhaupt, daß der auf dem Wandteppich abgebildete Komet wirklich der Halley’sche ist? Seinen Name konnten die Künstler seinerzeit selbstverständlich noch nicht vermerken. Halley’s Komet wurde ja erst nach dem berühmten Astronomen EDMOND HALLEY (1656-1742) benannt, da er der Erste war, dem es auf der Grundlage der Newton’schen Himmelsmechanik gelang,

Halleyscher Komet

dessen Bahn um die Sonne zu berechnen. Er selbst hatte in jungen Jahren noch den Kometen von 1682 beobachten können. Später, nach der Durchsicht alter Beschreibungen von Kometenerscheinungen, reifte in ihm die Idee, daß Kometen periodische Erscheinungen sind. Insbesondere die Kometen von 1301, 1378, 1456, 1531, 1607 und 1682 schienen alle in ein Schema zu passen wenn man annahm, daß es sich um ein und demselben Kometen handelt, der ca. alle 77 Jahre wiederkehrt. In dem er die ihm vorliegenden Positionsbestimmungen der Kometen von 1531, 1607 und 1682 genau analysierte, konnte er die Bahn berechnen und zeigen, daß das Aphel dieses Kometen weit außerhalb der Saturnbahn (Uranus und Neptun waren noch nicht entdeckt) liegen muß. 1705 veröffentlichte er seine Erkenntnisse und wagte die Vorhersage, daß um 1758/59 wieder mit einer Kometenerscheinung zu rechnen ist. Als sich der Zeitpunkt der Wiederkehr näherte (Halley war bereits verstorben), versuchten viele Astronomen in Europa das Objekt aufzufinden. Glück hatte der sächsische „Landwirt“ und Liebhaberastronom JOHANN GEORG PALITZSCH (1723-1788) aus Prohlis bei Dresden, der am 25. Dezember 1758 als erster den Kometen in seinem Fernrohr erblickte.

Originalnachricht von Palitzsch über die Kometenentdeckung in den „Dresden’schen gelehrten Anzeigen“

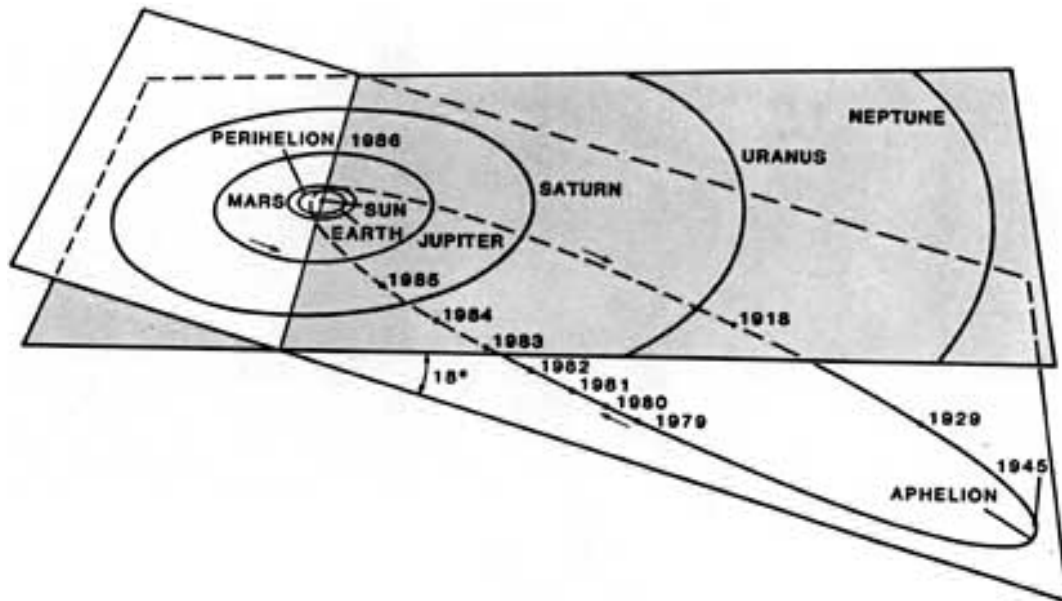
Als ich nach meiner mühsamen Gewohnheit alles, was in der Physik vorfällt, so viel wie möglich zu beobachten, und gegen die Himmelsgegebenheiten aufmerksam zu sein, am 25. jetzigen December-Monats Abends um 6 Uhr mit meinem 8-füssigen Tubo die Fixsterne durchging, um zu sehen, wie sich sowohl der jetzt sichtbare Stern des Wallfisches darstellte, als auch, ob sich nicht etwa der seit langer Zeit verkündigte und sehnlich erwünschte Komet näherte und zeige, so wurde mir das unbeschreibliche Vergnügen zu Theil, nicht weit von diesem erwähnten wunderbaren Wallfischstern im Sternbild der Fische einen sonst noch niemalen dort wahrgenommenen neblichten Stern zu entdecken. Die am 26. und 27. Wiederholte Beschauung desselben bestätigte die Vermuthung, daß es ein Komet wäre. Denn er war seit dem 25. bis zum 27. Von dem Stern O bis zu N wirklich fortgerückt.

Diese Entdeckung machte nicht nur Palitzsch berühmt. Auch Halley wurde posthum geehrt, in dem man den von Palitzsch zu Weihnachten 1758 entdeckten Kometen nun endgültig als den „Halley’schen Kometen“ bezeichnete.

In der Folgezeit hat die Beobachtung gerade dieses Kometen viele neue Erkenntnisse über Kometen gebracht. Besonders ertragreich waren dabei die Periheldurchgänge von 1910 und von 1986. Während man 1910 noch rein teleskopisch beobachtete (Fotografie), konnte man 1986 bereits Raumsonden zur Naherkundung einsetzen und dabei zum ersten Mal einen direkten Blick auf einen Kometenkern werfen. Für den normalen Menschen auf der Erde war das Ereignis von 1986 jedoch eine Enttäuschung. Man brauchte schon ein Fernglas, um ihn bei seiner größten Annäherung an die Erde einigermaßen gut sehen zu können.

Bahn

Der Halley'sche Komet bewegt sich auf einer um $162,262^\circ$ zur Ekliptik elliptischen Bahn (Exzentrizität = 0.967) in z.Z. 76 Jahren einmal um die Sonne. Im Perihel nähert er sich der Sonne bis auf 0.586 AU, was zwischen der Venus- und Merkurbahn liegt. Das Aphel reicht mit ca. 35 AU weit über die Neptunbahn hinaus. Durch die Störungen der großen Planeten sind die Bahnelemente jedoch nicht konstant so daß sich z.B. die siderische Umlaufszeit über die Jahrhunderte hinweg verändern kann. Der nächste Periheldurchgang wird 2061 erwartet.



Bahnlage des Halley'schen Kometen im Sonnensystem

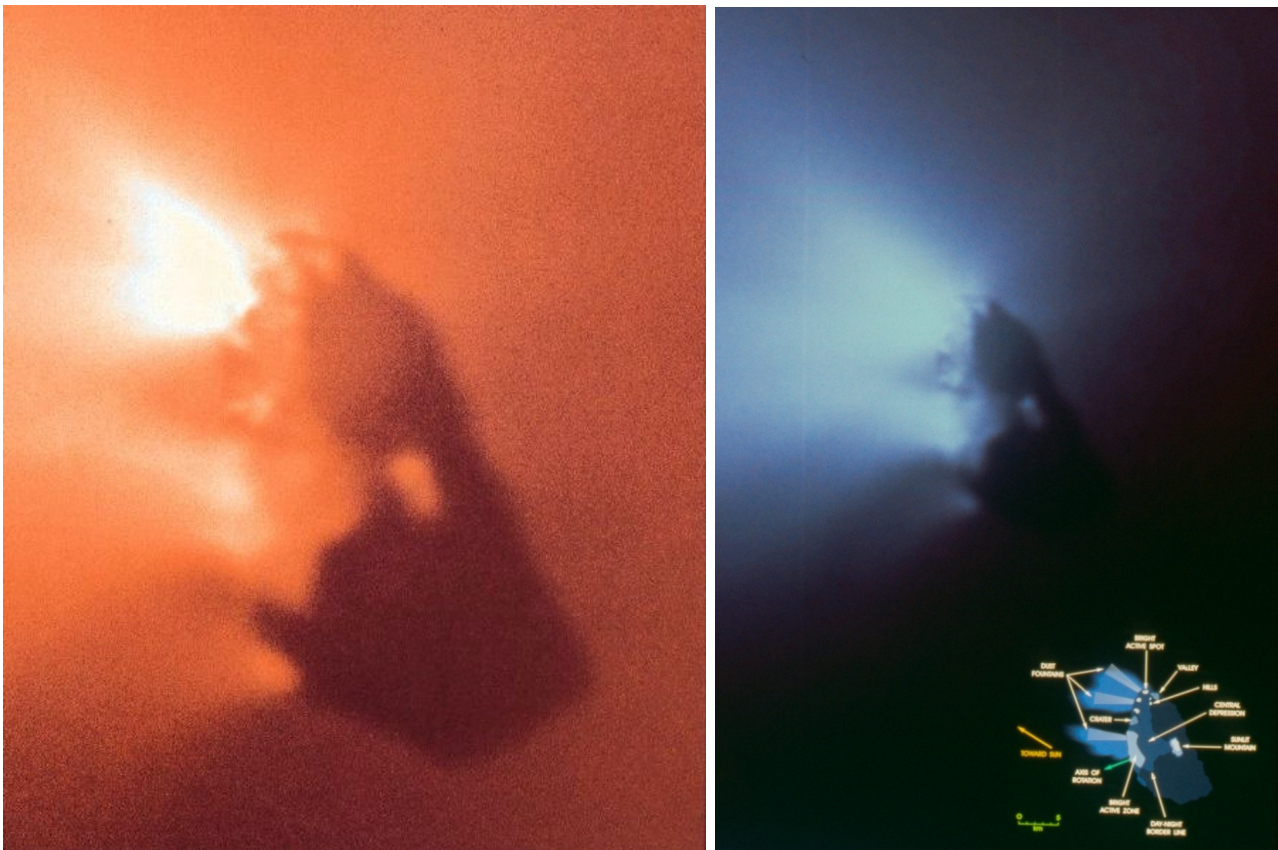
Da der Komet bei jedem Periheldurchgang Material verliert, wird sein Erscheinungsbild auch in Zukunft immer schwächer werden. Aber das ist das Schicksal jedes kurzperiodischen Kometen.

Kometenkern

Als man 1984 und 1985 die Raumsonden Vega 1 / 2 und Giotto auf ihren Trip zu Halley startete, hatte man durchaus gewisse Vorstellungen darüber, wie ein Kometenkern aufgebaut ist. Am populärsten und auch am Plausibelsten war das Modell des „Schmutzigen Schneeballs“, wie es ursprünglich von FRED WHIPPLE (1906-2004) in den Fünfziger und Sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts entwickelt wurde. Man war also gespannt, wie sich wohl der Kern des Halley'schen Kometen den Meßinstrumenten der Sonden präsentieren wird. Während die Vega-Sonden aufgrund ihrer großen Entfernung den Kern durch die Koma hindurch kaum auflösen konnten, gelangen der ESA-Sonde Giotto doch einige spektakuläre Bilder. Sie zeigen, daß der Kometenkern ein völlig schwarzer (Albedo = 0.05) erdnußförmiger Körper mit den Maßen $15.3 \times 7.2 \times 7.2$ km ist, der eine taumelnde Rotation mit einer Periode von 53.5 Stunden ausführt und der aufgrund seiner geringen Dichte (ca. 550 kg/m^3) hauptsächlich aus volatilen Stoffen aufgebaut sein muß.

Halleyscher Komet

Von der Farbe her ähnelt die dunkle Oberfläche denen von Typ P –Planetoiden, d.h. sie erscheint leicht rötlich. Diese spektralen Eigenheiten findet man übrigens auch bei einer Vielzahl von Kuiper-Objekten. Außerdem erkennt man auf dem Foto einige unscharfe Bruchstrukturen, aus denen mit hoher Geschwindigkeit jet-artig Gas abdampft. Dieses Gas besteht zu rund 80% aus Wasserdampf und zu 10 % aus Kohlenmonoxid. Außerdem konnte neben einigen Kohlenwasserstoffen (z.B. Methan) auch Ammoniakmoleküle nachgewiesen werden. Der durch dieses Abdampfen verursachte Massenverlust liegt in Perihelnähe bei mehr als 50000 kg/s was einem Gesamtmasseverlust von ca. $5 \cdot 10^{11}$ kg allein beim letzten Periheldurchgang entspricht (ca. 0.25% der Gesamtmasse). Kosmisch betrachtet leben periodische Kometen nicht sehr lange. Aber das wissen wir ja schon.



Kern des Kometen Halley, aufgenommen mit dem Kamerasystem der ESA-Raumsonde während der dichten Annäherung am 14.März 1986 © ESA

Oortsche Kometenwolke

Nemesis ist die Göttin der strafenden Gerechtigkeit, nach HESIOD eine Tochter der Nyx (d.h. der Nacht). Für kurze Zeit hat sie auch in der Kometenphysik eine Rolle gespielt und zwar im Rahmen der sogenannten „Nemesis-Hypothese“. Ausgangspunkt war die Beobachtung, das anscheinend alle 30 Millionen Jahre auf der Erde ein sogenannter „Faunenschnitt“ – oder dramatischer ausgedrückt, ein globales Massenaussterben, stattgefunden hat (was so nicht ganz stimmt). Da die Dinosaurier zu ihrem Nachteil davon betroffen waren und sie auch deshalb in jüngeren Bevölkerungsschichten eine gewisse Popularität genossen haben, nahm man an, daß auch die anderen Faunenschnitte „kosmische“ Ursachen hatten und zwar in der hier erwähnten Hypothese in Form von Kometen, die in großer Zahl vom Himmel herab rieselten und die jeweiligen Tier- und Pflanzenarten erschlugen... Grund dafür sollte ein kleiner Begleitstern (Brauner Zwerg?) der Sonne sein, der in einer Entfernung von ca. 1.4 Lichtjahren seine stark exzentrische Bahn um das innere Sonnensystem zieht, wobei er für einen Umlauf um den gemeinsamen Schwerpunkt gerade einmal die genannten 30 Millionen Jahre benötigt. Nur aufgrund seiner geringen Leuchtkraft konnte er nach Meinung der Autoren (WHITMIRE, MATESE, 1985) bis heute noch von keinem Menschen gesehen werden. Bei diesem Umlauf sollte dieser Stern alle 30 Millionen Jahre einmal in einen Raumbereich gelangen, in dem es Abermilliarden Kometenkerne gibt, die wiederum eine sphärische Wolke um das Sonnensystem bilden. Diese Wolke ist die berühmte Oortsche Kometenwolke. Wenn also „Nemesis“, wie dieser hypothetische Zwergstern genannt wurde, in diese Wolke eintaucht, dann lenkt ihre gravitative Wirkung einen Teil der Kometenkerne so in das innere Sonnensystem um, daß sie einige 10000 Jahre später ihr zerstörerisches Werk auf der Erde vollbringen können...

Spaß beiseite. Für derartige Hypothesen hat der berühmte mittelalterliche Gelehrte WILHELM VON OCCAM (1284-1347) sein berühmtes Rasiermesser vorgesehen: Man erfinde niemals zusätzliche Hypothesen, wenn Ereignisse und Prozesse auch durch einen minimalen Satz einfacher Annahmen genauso gut erklärt werden können. Ritsch – Ratsch. Die Oortsche Wolke bleibt übrig. Die armen Dinosaurier sind tot und die Ursache dafür war nicht ein Schwarm von Kometen sondern ein kleiner Planetoid, der – wie wir heute wissen - den Chicxulub-Krater geschlagen hat...

Trotzdem sollte die kürzliche Entdeckung (TEEGARDEN ET. AL., 2003) eines schwachen Zwergsterns in der näheren Umgebung unserer Sonne (in ca. 7.8 Lichtjahre Entfernung) ein klein wenig zu denken geben. Es scheinen doch noch nicht alle Nachbarn der Sonne aufgefunden worden zu sein. Das Sternchen heißt übrigens SO25300.5+165258, ein Name, den man sich merken sollte.

Zurück zur Kometenwolke. Als sie 1950 der holländische Astronom JAN HENDRIK OORT (1900-1992) postulierte, wollte er damit die Beobachtung erklären, daß die Bahnebenen langperiodischer Kometen mit parabelnahen Bahnen keine Tendenz zur Ekliptik zeigen. D.h., diese Kometen gelangen aus allen möglichen Richtungen in das innere Sonnensystem. Er entwickelte zur Erklärung dieser Beobachtung die Theorie, nach der die Sonne in einem Abstand zwischen 20000 und 100000 AU von einer kugelschalenförmigen Wolke aus Kometenkernen umgeben ist. Mittlerweile hat sich die statistische Grundlage dieser Theorie soweit verbessert, daß die meisten Astronomen keinen Zweifel an der Existenz der Oortschen Kometenwolke mehr hegen obwohl sie direkt mit allen heute zur Verfügung stehenden Mittel nicht zu beobachten ist.

Ernstzunehmende Abschätzungen gehen davon aus, daß es in diesem Bereich mehrere Hundert Milliarden bis hin zu einigen Billionen Eisklumpen gibt, die alle potentiellen Kometen darstellen. Ihre große Anzahl relativiert sich etwas, wenn man den riesigen Raumbereich betrachtet, den sie bevölkern. Auch ihre Gesamtmasse ist nicht sonderlich beeindruckend. Sie dürfte kaum größer als maximal 40 Erdmassen sein.

Die Oortsche Wolke ist aufgrund der großen Entfernung von der Sonne nur noch schwach an deren Gravitationsfeld gebunden. Deshalb reichen vergleichsweise kleine Störungen aus, um die Bahnen von einzelnen Kometenkernen soweit zu verändern, daß sie in das innere Sonnensystem gelangen können. Ihre sphärische Form verdankt sie weitgehend äußeren Störeinflüssen, da das Material, aus dem sie besteht, ursprünglich aus der protoplanetaren Scheibe stammt. Als externe Störungsursachen werden folgende Möglichkeiten diskutiert:

1. Gravitationseinfluß benachbarter Sterne

Berechnungen auf der Grundlage der Hipparcos-Daten sonnennaher Sterne zeigen, daß sich ca. alle 35 bis 40 Millionen Jahre ein Stern sich der Sonne bis auf 10000 AU annähert. Alle 400 Millionen Jahre ist sogar der Vorbeigang in einer Entfernung von nur 3000 AU statistisch möglich. In beiden Fällen kommt es zu einer Überlappung der Oortschen Wolken des Sterns und der Sonne sowie zu einer massiven gravitativen Beeinflussung der darin enthaltenen Kometenkerne. Als Ergebnis erwartet man, daß vermehrt Kometen in das innere Sonnensystem gelangen. In ca. 1.4 Millionen Jahren ist wieder mit einer verstärkten Kometentätigkeit zu rechnen, da dann der Rote Zwergstern „Gliese 710“ in ungefähr 70000 AU an der Sonne vorbeiwandert (GARCIA-SANCHEZ, PRESTON).

Man hofft übrigens durch Untersuchung von Tiefseesedimenten auf der Erde den verstärkten Einfall von interplanetarem Staub nachzuweisen, den solch ein Ereignis mit sich bringt. Erste Ergebnisse liegen vor, die zumindest mit dieser Hypothese vereinbar sind.

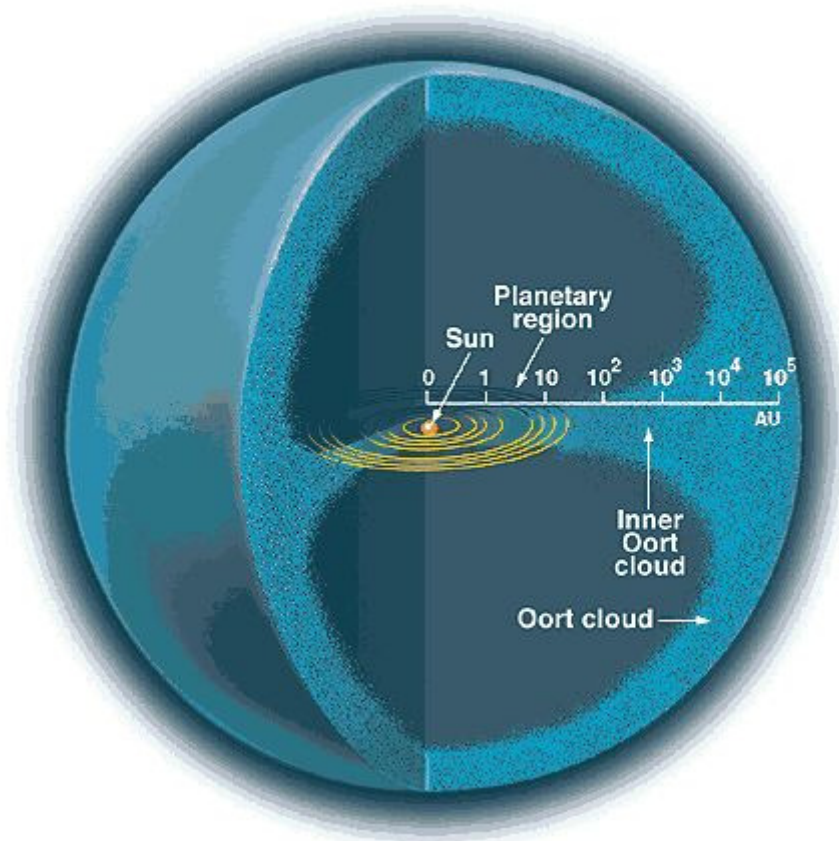
2. Gezeitenwirkungen der galaktischen Scheibe

Ähnlich wie im Erde-Mond-System treten in der Oortschen Wolke Gezeitenkräfte auf. Die innerhalb der Sonnenbahn in der galaktischen Ebene liegenden Sterne üben auf die Körper in der Wolke Gravitationskräfte aus, was im Zusammenspiel mit der Bewegung der Sonne um das galaktische Zentrum zu einer periodischen Deformationsbewegung der gesamten Wolke führt, was langfristig zu einer Änderung der Bahnelemente der Kometenkerne führen kann.

3. Gravitative Wirkung von interstellaren Gas- und Staubwolken

Galaktische Gas- und Staubwolken können trotz ihrer geringen Dichte aufgrund ihrer Ausdehnung einige 100000 bis zu mehreren Millionen Sonnenmassen an gravitativ wirksamer Substanz besitzen. Wenn die Sonne mit dem Sonnensystem und der ihr umgebenden Oortschen Wolke an solch einem Komplex vorbeiwandert (was ca. alle 300 bis 500 Millionen Jahre geschehen sollte) oder sogar durchquert, dann kann deren gravitative Wirkung die Objekte innerhalb der Wolke stark stören. Auch hier sollte es zu einem verstärkten Auftreten von Kometen im inneren Sonnensystem kommen.

Alle diese Störeinflüsse bewirken letztendlich, daß die Kometenkörper, deren ursprüngliches Entstehungsgebiet im Bereich der Uranus- und Neptunbahn bis hin zum Kuiper-Gürtel lag, weiter nach außen gedrängt wurden und sich zu einem sphärischen System – eben der Oortschen Wolke – entwickelten.



Nach heutigen Vorstellungen gibt es demnach zwei Kometenreservoirs im Sonnensystem: der Kuiper-Gürtel (periodische Kometen, deren Bahnen der ekliptikalen Ebene angenähert sind) und die Oortsche Wolke (langperiodische Kometen mit zufällig verteilten Bahnneigungen). Es sind noch keine sicheren Kandidaten von Kometen bekanntgeworden, die zweifelsfrei aus dem interstellaren Raum stammen. Zwar gibt es einige Objekte mit eindeutig hyperbelförmigen Bahnen. Doch lassen sich diese Bahnformen auf Störeinflüsse innerhalb des Sonnensystems zurückführen. Sie zeigen aber, daß Kometenkerne kontinuierlich aus dem Sonnensystem heraus diffundieren.

Wie bereits erwähnt, können die Kometenkerne im Bereich der heutigen Oortschen Wolke nicht gebildet worden sein. In den letzten Jahrzehnten sind – auch Dank der immer mehr wachsenden Rechenleistung moderner Computersysteme – die Bedingungen und Prozesse, die zur Entstehung der Sonne und der Herausbildung von Planeten aus einer abgeflachten und rotierenden Gas- und Staubscheibe geführt haben, immer detailreicher untersucht worden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werfen auch einen Blick auf den Ursprung der Kometen.

Man vermutet mit Recht, daß sich die Kometenmaterie in ihrem ursprünglichen Zustand (d.h. nachdem sie in der protoplanetaren Scheibe auskondensiert war) bis heute erhalten hat. Im Bereich der Oortschen Wolke war die Gasdichte in dieser Scheibe jedoch zu keiner Zeit so groß, daß sich dort in

merklicher Anzahl feste Aggregate gebildet haben können. Vielmehr zeigen Modellrechnungen, daß man die Entstehung der Kometenkerne im Bereich der Großplaneten und des Kuipergürtels ansiedeln muß. Durch Störungen – sowohl der inneren großen Planeten von Jupiter bis Neptun, als auch aus der stellaren Umgebung heraus (s.o.) – sind diese Kerne nach und nach in stark elliptische Bahnen gezwungen worden, die sie mehr und mehr in die äußeren Bereiche des Sonnensystems hat driften lassen. Und dort befinden sie sich noch heute in großer Zahl – obwohl sie noch niemand gesehen hat...

Ähnliche Überlegungen bezüglich der größeren Kuiper-Objekte wie Pluto, Eris oder Sedna haben zu der Hypothese geführt, daß es sehr wahrscheinlich ist, daß das äußere Sonnensystem im Zeitpunkt seiner Entstehung durch den nahen Vorübergang eines Sterns gravitativ beeinflusst wurde. Dabei sorgten Störungen im äußeren Bereich der protoplanetaren Scheibe zu lokalen Verklumpungen, aus denen sich dann später die Zwergplaneten des Kuipergürtels entwickelt haben. Ohne derartige Störungen reicht nach neueren Modellrechnungen die Zeitdauer der Existenz der protoplanetaren Scheibe einfach nicht aus, um im Bereich außerhalb der Großplaneten planetare Körper in Anzahl und Größe der Kuiperobjekte zu bilden. Computersimulationen, die an der Universität Bonn ausgeführt wurden, sprechen für dieses Modell, welches von CHRISTIAN THEIS, PAVEL KROUPA und INGO THIES vorgeschlagen wurde.

Literatur zum Thema

- K. Lindner: **Taschenbuch der Astronomie**, Fachbuchverlag Leipzig, 1997
- H. Bernhard, K.Lindner, M.Schukowski: **Wissensspeicher Astronomie**, Volk und Wissen 1995
- A.Unsöld, B.Baschek: **Der neue Kosmos**, Springer-Verlag 2004
- A.Weigert, H.J. Wendker: **Astronomie und Astrophysik**. Ein Grundkurs, Wiley-VCH 2004
- H. Karttunen et.al.: **Fundamental Astronomy**, Springer-Verlag 2000
- B.W. Jones: **Discovering the Solar System**, Wiley 2000
- McBride, **Gilmour: Introduction to the Solar System**, Cambridge University Press 2004
- McNab, Younger: **Die Planeten**, RM Buch- und Medienvertrieb 1999
- C. Gritzner, **Kometen und Asteroiden**, Aviatic-Verlag 1999
- J.C. Brandt, R.D. Chapman, **Die Erforschung der Kometen**, Insel-Verlag 1997
- M. Achternbosch et. al., **Kometen beobachten**, Sterne und Weltraum-Verlag 2002
- D. Möhlmann, **Kometen**, Beck'sche Reihe C.H.Beck 1997



Index

A

Alcock, George Eric Deacon 9
Alfven, H.O.G. 38
Araki, Genichi 9
Aristoteles 3
Arrhenius, Svanthe 5

B

Banden, molekulare 5
Barnard, Edward Emerson 38
Bennet, Komet 25
Bessel, Friedrich Wilhelm 5, 14
Biela, Komet 24
Biela, Wilhelm Freiherr von 23
Biermann, Ludwig 6, 37
Birkeland, Kristian O.B. 37
Bopp, Thomas 2
Borelly, Komet 15, 22
Brahe, Tycho 3
Brownlee particles 22
Brownlee, D.E. 22

C

C/2001 A2 LINEAR, Komet 18
Cassini 5
Clathrate 17
CME 39
Cremonese, Gabriele 33

D

Deep Impact, Kometensonde 5, 20
Dinosaurier 44
Donati, Giovanni 5
Donati'scher Komet 1858 14
Dörffel, Georg Samuel 4

E

Eddington, Arthur Stanley 5
Encke, Komet 8, 14
Encke, Johann Franz 14
Eris 47

F

Flußröhren, magnetische 38

G

Garcia-Sanchez 45
Geröllhaufen (rubble pile) 6
Giacobini-Zinner, Komet 8, 38
GIOTTO, Sonde 6, 14, 15, 22, 42

H

Haarsterne 3
Hale, Alan 2
Hale-Bopp, Komet 6, 7, 8, 9, 12, 17, 25, 30, 33
Halley, Edmond 3, 40
Halley-Familie 8, 23
Halleysche Komet, Bahn 42
Halleyscher Komet 3, 5, 6, 14, 15, 27, 28, 40
Halleyscher Komet, Kern 42
Hesiod 44
Holmes, Komet 26
Huggins, William 5
Hyakutake, Komet 8, 12, 18

I

Ikea-Zhang, Komet 12
Ikeya-Seki, Komet 10
International Cometary Explorer 38
Ionenschweif 32, 33, 37, 38
IRAS-Araki-Alcock, Komet 9
IUE 25

J

Jets 14, 16
Jupiter-Familie 5, 8, 23

K

Kepler, Johannes 3
Kernzerfall 18
Koma 6, 13, 15, 25, 30, 33
Kometen, Benennung 8
Kometen, kurzperiodische 8
Kometenbahnen 7
Kometenflugblätter 3
Kometengruppen 10
Kometenkern 13
Kometenspektrum 27
Kometenwolke, Oortsche 6, 8, 13, 44, 46
Kreutz, Heinrich 10

Kreutz-Gruppe 10, 11, 13
Kroupa, Pavel 47
Kuiper-Objekte 6, 47

L

Le Borgne 39
Leoniden, Meteorstrom 5, 6, 8
Levy, David 6
Lodge, Oliver 37

M

Matese 44
McNaught, Komet 6, 8
Messier, Charles 5
Meteore, kometarische 22
Meteorstrom 5, 6
Meteorströme, kometarische 24
Mie-Streuung 33

N

Natriumschweif 33
Nemesis-Hypothese 44
NEO 7
Neutralschicht 38
Newton, Isaak 3
November-Andromediden, Meteorstrom 24

O

Occam, Wilhelm von 44
Olbers, Wilhelm 5
Oort, Jan 6, 8
Oort, Jan Hendrik 44

P

P/Wilson-Harrington, Komet 23
Palitzsch, Johann Georg 41
Parker, E.N. 37
Perseiden, Meteorstrom 14
Photodissoziation 28, 32
Photoionisation 37
Planetoiden 6
Plasmaschweif 6, 27
Pluto 7, 47

Pollaco, Don 33
POM 28
Poynting-Robertson-Effekt 25, 35
Preston 45

R

Radikale 29, 32
Rasensprenger-Effekt 30
Röntgenstrahlung 31
Rotation, Kometenkern 14

S

Schiaparelli, Giovanni 5
Schwarzschild, Karl 5
Schwassmann-Wachmann I, Komet 8
Schweif 32
Schweifabrisse 39
Schweifstrahlen 38
Sedna 47
Sekanina, Zdenek 11
Shoemaker, Eugene 6
Shoemaker-Levy 9, Komet 18
SOHO 9, 10, 13
Sonnenkorona 37
Sonnenwind 6, 33, 37
Staubkoma 29
Staubschweif 6, 33, 35, 37
Staupunkt 37
Stoßfront 37
Strahlungsdruck 23, 33, 34
Sungrazer 10, 25
Sunstrikers 10
Swift-Tuttle, Komet 8, 14

T

Tago-Sato-Kosaka, Komet 25
Teegarden 44
Tempel 1, Komet 15
Tempel, E. Wilhelm Leberecht 5
Temple-Tuttle, Komet 8
Teppich von Bayeux 40
Theis, Christian 47
Thies, Ingo 47

V

Vega 1 / 2, Sonde 42

W

Wasserstoffhülle, Koma 25, 28

Wegemann 39

Whipple, Fred 6, 13, 42

Whipple`s Modell, Kometenkern 15

Whitmire 44

Wild, Komet 15

Wilhelm den Eroberer 40

Wurm, Karl 37

Z

Zonen, aktive 18