

Die rätselhafte Oortsche Wolke

Einführung. Seit nunmehr 52 Jahren „schwebt“ die Oortsche Wolke durch die astronomische Welt. Postuliert von dem niederländischen Astronomen Jan OORT (1950), fasziniert ihr schattenhaftes Dasein nach wie vor, sind doch die Kometen, aus deren Kerne die Wolke bestehen soll, wegen der großen Entfernungen und der Kleinheit der Objekte in keinerlei Weise *direkt* nachweisbar.

Kometen sind bekannt als „Schweifsterne“ (Abb. 1) am Himmel. Ursache für die teilweise über mehrere Millionen Kilometer große Erscheinung am Nachthimmel ist ein winziger Eiskern von wenigen Kilometern Größe. Erst bei Annäherung an die Sonne wird durch deren Hitze ein Sublimationsprozeß am Kometenkern in Gang gesetzt, bei dem auch eingelagerte Staubteilchen mitgerissen werden. Die freigesetzte Materie wird dem Sonnenwind ausgesetzt und zu dem bekannten Kometenschweif geformt, der im reflektierten Sonnenlicht sichtbar wird. Wie eine Windfahne ist er immer von der Sonne weg gerichtet.

Auslöser für das Postulat der Oortschen Wolke durch Jan OORT war seinerzeit die Häufigkeit der kurzperiodischen Kometen. Aufgrund des hohen Massenverlusts dieser Kometen (1-3% pro Umlauf) sind sie nicht nur kurzperiodisch, sondern ebenso kurzlebig, mit einer Lebensdauer von bis zu 100 Sonnenumläufe, je nach Dauer eines Umlaufs zwischen 50.000 und 500.000 Jahre. Ausgehend von einem wesentlich höheren Alter des Sonnensystems, müßte es – so OORT – eine Quelle von Kometenkernen geben, weit außerhalb der äußeren Planeten, um die Konstanz der Häufigkeit des Auftretens von Kometen im Sonnensystem über diese langen Zeiträume zu gewährleisten (Abb. 2).

Ein weiterer Hinweis für OORT war die Tatsache, daß viele Kometen sehr lange geschlossene Bahnen haben, es aber keine Kometen mit klaren hyperbolischen Bahnen gibt, was ein Hinweis auf einen Ursprung außerhalb des Sonnensystems wäre. Durch galaktische Gezeitenwirkung sowie durch Störungen von anderen Sternen und Molekülwolken würden regelmäßig neue Kometen den Weg ins Innere des Sonnensystems finden und beobachtbar werden. Das ursprüngliche Modell von OORT umfaßte ca. 200 Milliarden Kometen, die kugelsymmetrisch um das Sonnensystem verteilt sind mit einer als $r^{-3/2}$ abnehmende Dichte, wobei r der Abstand zur Sonne ist. Die Kometenwolke soll sich damit bis zu einigen Lichtjahren von der Sonne ausdehnen, das ist in etwa die halbe Strecke bis

zum nächsten Stern.

Kometenfamilien. Kometen werden in langperiodische (LP, Umlaufzeit > 200 Jahre) und kurzperiodische (SP, Umlaufzeit < 200 Jahre) unterteilt. Bei den kurzperiodischen Kometen unterscheidet man noch zwischen den „Halley-Type-Comets“ (HTCs, Umlaufzeit zwischen 20 und 200 Jahre) und den „Jupiter-Kometen“ (Umlaufzeit kürzer als 20 Jahre). Die Grenzen sind nicht willkürlich gewählt: Die Bahnen der LP-Kometen verteilen sich kugelsymmetrisch um das Sonnensystem, während sich die Jupiter-Kometen in der Ekliptikebene befinden (das ist die Ebene, in der sich die Planeten bewegen).

In Abb. 3 kann man die Kometenfamilien klar erkennen. Jeder Komet ist als ein schwarzer Punkt dargestellt. Die Abszisse zeigt $1/a$, wobei a die lange Halbachse der Bahn darstellt. Je kleiner $1/a$, um so länger ist also die Bahn. Die Ordinate zeigt den Kosinus der Bahnneigung. Dieser ist 1, wenn sich die Bahn in der Ekliptikebene befindet, und 0, wenn sie senkrecht darauf steht. Deutlich ist zu erkennen, daß LP-Kometen bei allen Bahnneigungen vorkommen, also kugelsymmetrisch im Raum verteilt sind, während sich die Jupiter-Kometen um die Ekliptikebene gruppieren. Auch fällt sofort auf, daß es erstaunlich wenig HTCs gibt. Darauf komme ich gleich noch zurück.

Die LP-Kometen haben bis auf wenige Ausnahmen sehr lange Bahnen (in Abb. 3 konzentrieren sie sich gegen $1/a = 0$), kommen also von sehr weit her und werden als „neu“ bezeichnet, weil man davon ausgeht, daß sie zum ersten Mal aus

Abb. 1: Komet Hale-Bopp. Vor einigen Jahren war dieser Komet mit bloßem Auge gut zu erkennen. (Foto: Peter STÄTTMAYER, Bayerische Volkssternwarte München)



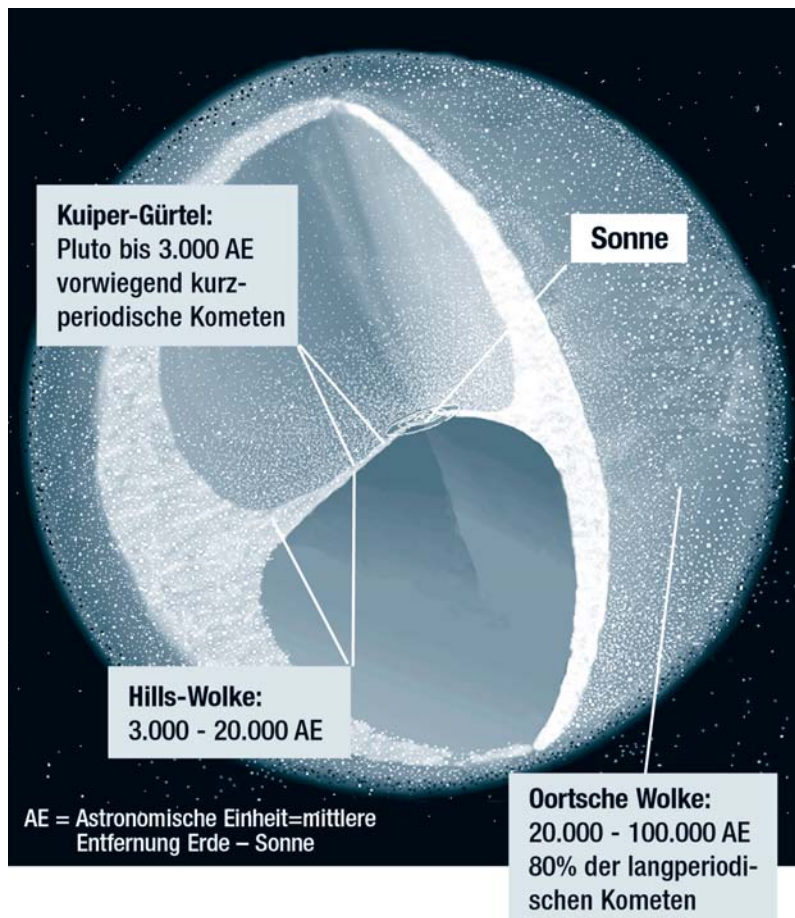


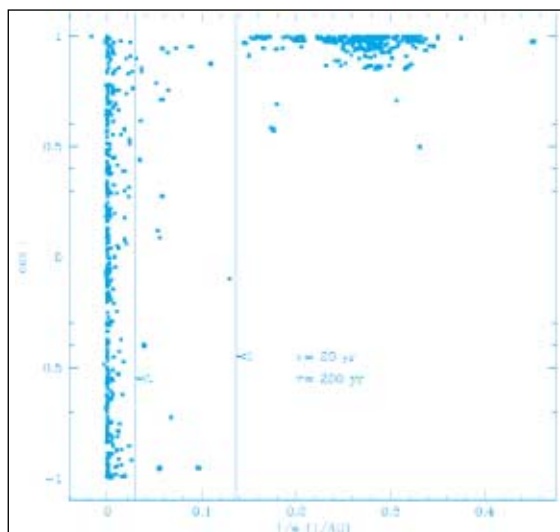
Abb. 2: Modellhafte Vorstellungen über Kometenreservoirs in Form des Kuiper-Gürtels, der Hills-Wolke und der Oortschen Wolke. Objekte, die zum Kuiper-Gürtel gehören könnten, wurden mittlerweile entdeckt, dagegen ist die Existenz der Oortschen Wolke hypothetisch.

der Oortschen Wolke ins Sonnensystem vordringen. Warum dies so ist, wird im Abschnitt über das Fadingproblem erläutert (s. u.). Es werden etwa 10-12 neue LP-Kometen pro Jahr beobachtet.

Theoretische Beschaffenheit der Oortschen Wolke.

Auch wenn die Oortsche Wolke nicht direkt sichtbar ist, erzeugen das dynamische Verhalten einer solchen Menge an Kometen und die Verteilung der beobachteten Kometen Auflagen

Abb. 3: Darstellung der Kometenfamilien. Der Kosinus der Bahnneigung i ist aufgetragen gegen $1/a$, wobei a die lange Halbachse der Bahn ist. Die langperiodischen Kometen befinden sich links von der Linie $t=200$ Jahre, die Jupiter-Kometen rechts von der Linie $t=20$ Jahre, die Halley Type Kometen dazwischen. Daten von MARSDEN et al. (1993), Bild von WIEGERT (1996).



für die physikalisch-dynamische Beschaffenheit der Oortschen Wolke. Immer genauere Modelle wurden im Laufe der letzten Jahrzehnte aufgestellt. Diese führten gelegentlich zur Modifikation und Verfeinerung des Modells der Oortschen Wolke, deren Existenz aber nicht angezweifelt wurde.

So haben neuere dynamische Modelle von BAILEY (1983) und DUNCAN et al. (1987) gezeigt, daß die Kometendichte nahe der Sonne deutlich höher sein müßte als ursprünglich von OORT angenommen, sodaß sich der größte Teil der Kometen zwischen 1.000 und 10.000 AE (1 AE = Abstand Sonne – Erde) verteilt.

Eine andere interessante Revidierung des Modells betrifft den Ursprung der Kometen. Dachte man zunächst, daß sie bei der Entstehung des Sonnensystems in großem Abstand von der Sonne kondensierten, so ist man heute der Meinung, daß alle Kometen aus dem Inneren (innerhalb des Bereichs der äußeren Planeten) des Sonnensystems kommen, aber schon früh in der Geschichte des Sonnensystems durch Wechselwirkung mit den großen Planeten in den Weltraum geschleudert wurden und nun nach und nach durch Gezeitenwirkung der Milchstraße wieder hineingesteuert werden (WIEGERT 1996). Den Ursprung der kurzperiodischen Kometen dagegen vermutet man heute im Kuiper-Gürtel (vgl. Abb. 2).

Das Fadingproblem. Die Störungen der großen Planeten sorgen dafür, daß die Bahnen von neuen LP-Kometen so stark verändert werden, daß die LP-Kometen nach dem ersten Durchgang entweder für immer aus dem Sonnensystem geschleudert oder auf wesentlich kürzere Bahnen gebracht werden, mit Umlaufzeiten zwischen 20 und 200 Jahren, und damit also zum HTC werden. Wenn nun seit Hunderttausenden von Jahren jährlich 10-12 neue LP-Kometen erscheinen, würde man also erwarten, daß es sehr viele HTCs gibt. Dynamische Berechnungen bestätigen diese Erwartung. Und genau hier liegt das größte Rätsel der Kometen: Warum gibt es nicht viel mehr HTCs, d.h. Kometen mit Perioden zwischen 20 und 200 Jahren? Dieses Problem ist in der Literatur als das „fading problem“ (Auslöschungsproblem) bekannt.

Ein weiteres Rätsel, das mit dem Fadingproblem zusammenhängt, ist die Häufigkeit von prograden und retrograden Kometen. Prograde Kometen bewegen sich auf Bahnen im Uhrzeigersinn um die Sonne, retrograde Kometen gegen den Uhrzeigersinn. Das Verhältnis liegt bei den beobachteten LP-Kometen ziemlich genau bei 50:50. Dynamische Berechnungen zeigen nun, daß prograde Kometen eine wesentlich höhere Chance haben, durch die großen Planeten aus dem Sonnensystem geschleudert zu werden. Daher wird erwartet, daß es ungefähr doppelt so viele retrograde als prograde Kometen gibt (WIEGERT 1996) – entgegen der Beobachtung des 50:50-

Verhältnisses. Der Zusammenhang mit dem Fadingproblem ist einfach: Beide Phänomene deuten darauf hin, daß LP-Kometen viel kürzer im Sonnensystem sichtbar sind als aufgrund von dynamischen Berechnungen zu erwarten wäre. Solche Berechnungen zeigen, daß nur ca. 1% der erwarteten HTC's tatsächlich beobachtet wird. Wäre das Postulat der Oort'schen Wolke richtig, hieße dies, daß 99% der neuen LP-Kometen nach dem ersten Umlauf schlichtweg verschwunden sind.

Neueste Erkenntnisse über das Fadingproblem. In *Science* erschienen Anfang 2002 zwei Artikel über das Fadingproblem (LEVISON et al. 2002, BAILEY 2002).

Im ersten Artikel stellen LEVISON et al. (2002) neue dynamische Berechnungen und Vergleiche zu statistischen Auswertungen von Kometenbeobachtungen vor. Sie kommen zum Schluß, daß das Fadingproblem *nicht* auf Fehler oder Schwächen der dynamischen Modellierung zurückzuführen ist und daher physikalischen Ursprungs ist. Im Klartext: Es gibt unbekannte physikalische Prozesse, die dafür sorgen, daß 99% der neuen LP-Kometen nach dem ersten Umlauf nicht mehr für uns sichtbar sind. Typische Selektionseffekte sind dabei schon berücksichtigt. Beispiel: Kometen, die sich der Sonne nur bis 3 AE nähern, entwickeln kaum einen Schweif und entgehen daher leicht einer Beobachtung.

LEVISON wagt sich leider nicht an Erklärungsversuche für das Fadingproblem. Er stellt lediglich fest, „daß die meisten Kometen vor dem Wiedereindringen ins Innere des Sonnensystems zerstört werden“. Dies ist selbstverständlich keine Erklärung, sondern nur eine Aussage, die implizit besagt, daß die Annahme der Oort'schen Wolke trotz des Fehlens der erwarteten HTC's nicht in Frage gestellt wird.

Erklärungsversuche für das Fadingproblem. Im zweiten *Science*-Artikel übernimmt BAILEY (2002) die Aufgabe, Erklärungen für das Fadingproblem zu suchen. Bevor ich seine Ausführungen zusammenfasse, möchte ich nach WIEGERT (1996) einige ältere Erklärungen besprechen, sowie den Begriff Fadingfunktion einführen.

Erklärung 1: Standardfading. Das Fadingproblem ist schon seit langem bekannt. Anfangs glaubte man, den Prozeß dafür verstanden zu haben: Wenn Kometen bei der Kondensierung des Sonnensystems entstanden wären, würden neue Kometen, die ja noch nie in die Nähe der Sonne gekommen sind, große Mengen an Gas (CO , CO_2) in Eisform mit sich führen. Dieses Gas würde beim ersten Umlauf um die Sonne vollständig „verpuffen“. Beim nächsten Umlauf gäbe es dann keinen Schweif mehr und der Komet bliebe unbeobachtet. Diese einfache Erklärung wird als Standardfading bezeichnet. Es gibt jedoch zwei Gründe, warum



dieses Standardfading nicht funktioniert. Der erste Grund ist, daß man heute annimmt, daß Kometen ursprünglich aus dem Inneren des Sonnensystems stammen. Die meisten Gase sind daher, so es sie schon gab, wegen der Nähe zur Sonne schon in der Entstehungsphase verpufft. Der zweite Grund ist, daß das Standardfading erwarten läßt, daß neue LP-Kometen während ihres ersten Umlaufs deutlich an Helligkeit verlieren würden. Dies ist jedoch nicht der Fall, wie ROETTGER et al. (1990) belegen.

Erklärung 2: Aufspaltung. Einige Kometen brechen auseinander. Man weiß zwar noch nicht genau warum, das ist hier aber nicht relevant. Wichtig ist, daß zur Erklärung des Fadingproblems etwa die Hälfte aller Kometen auseinanderbrechen müßten. Tatsächlich liegt aber die beobachtete Rate unter 10% (WEISSMAN 1980) und reicht damit als Erklärung für das Fadingproblem nicht aus.

Fadingfunktion. Manche Autoren führen eine Fadingfunktion ein. Es handelt sich dabei nicht um eine Erklärung des Fadingproblems, sondern um eine mathematische Beschreibung der Lücke zwischen Beobachtung und Erwartung. Ausgehend von einer solchen Fadingfunktion können dann neue Erklärungsversuche gemacht werden. Ein Beispiel dafür folgt hier in Erklärung 3.

Erklärung 3: Zwei Sorten von Kometen. WIEGERT (1996) beschreibt in seiner Doktorarbeit verschiedene Fadingfunktionen. Am meisten erfolgversprechend nennt er eine Fadingfunktion, die besagt, daß 95% aller neuen LP-Kometen innerhalb von 6 Umläufen auseinanderfallen, der Rest nie. WIEGERT führt dazu als mögliche Erklärung an, daß es 2 Sorten von Kometen gibt, mit niedriger Festigkeit und mit hoher Festigkeit. Allerdings kann auch diese Fadingfunktion mit der zugehörigen Erklärung das Fadingproblem nicht vollständig lösen, wie WIEGERT selbst in seiner Doktorarbeit betont.

Und nun zum zweiten Artikel in *Science* über das Fadingproblem. Darin schlägt BAILEY (2002) neben

Abb. 4: Künstlerische Darstellung der Rosetta-Landekapsel auf der Oberfläche des Kometen Wirtanen. (ESA; <http://sci.esa.int/img/32/34098.jpg>)

der besprochenen Aufspaltung (Erklärung 2) folgende alternative Erklärungen für das Fadingproblem vor:

Erklärung 4: Verkapseln von volatilen Elementen. Kometen werden „inert“, d.h. sie verlieren die Fähigkeit, ihre volatilen (flüchtigen) Elemente durch Erwärmung zu verlieren. Durch Sublimation von Wasser reichern sich silikatische Anteile an der Oberfläche an und sperren so die volatilen Komponenten ein. Die Kometen wären in diesem Fall nach wie vor da, blieben aber wegen ihrer geringen Größe und ihrer dunklen Oberfläche unsichtbar. Wir würden sie nicht mehr entdecken, es sei denn sie kämen der Erde sehr nah. Sie stellten damit gleichzeitig eine ernstzunehmende Bedrohung für die Erde dar.

„Das würde uns in die unbequeme Situation bringen, daß wir in einer besonderen Epoche leben.“

Erklärung 5: Kometen zerfallen zu Staub. Einige Kometen lösen sich einfach ohne klarem Grund in Staub und Wassereis auf. Dies ist noch nicht ganz verstanden, weil die Kometen beim Eintreten in das Sonnensystem lediglich dem Sonnenwind begegnen, der für diesen Zerfall bei weitem nicht kräftig genug ist. Diese Erklärung kommt Erklärung 3 sehr nahe, weil sie unterstellt, daß es Kometen gibt, die kaum Festigkeit besitzen. Falls dieses Los die meisten Kometen trifft, müßte es allerdings sehr viel Staub und Wasserdampf im Sonnensystem geben und dies müßte im infraroten Teil des elektromagnetischen Spektrums sichtbar sein.

Erklärung 6: Die Annahme des konstanten Kometenzuflusses ist falsch. Schließlich bricht BAILEY dann doch das Tabu: Die Konstanz des Zuflusses von Kometen in das Sonnensystem wird angezweifelt. Alle Erklärungsversuche erscheinen wenig überzeugend und könnten, wenn sie überhaupt zutreffen, höchstens einen Teil des Fadingproblems lösen. Was wäre also, wenn gerade in den letzten Tausend Jahren viele neue Kometen erschienen sind, dies aber nicht immer der Fall war? Es gäbe dann gar kein Fadingproblem. Für Astronomen ist dies eine unangenehme Möglichkeit, wie BAILEY schreibt: „This would put us in the uncomfortable position of living within a special epoch.“

Ausblick. Wir können gespannt sein, wie es weiter geht. Es ist zu erwarten, daß in den kommenden Jahren die Kometen weitere Rätsel aufgeben und daß die Oortsche Wolke immer mehr ins Schußfeld der Kritik gerät. Die Konstanz des Kometenzu-

flusses war ja die implizite Unterstellung für das Postulat der Oortschen Wolke schlechthin. Die Konsequenz des Fadingproblems könnte daher letztendlich sein, die Existenz der Oortschen Wolke anzuzweifeln und völlig andere Kometenmodelle zu suchen. Dafür ist es notwendig, die physikalische Beschaffenheit der Kometen besser zu verstehen. Die Dynamik der Bahnen alleine reicht wohl nicht aus.

Der für Januar 2003 vorgesehene Start der Kometensonde Rosetta (Abb. 4) wird deshalb mit Spannung erwartet. Sie soll sich in neun Jahren zum Kometen Wirtanen in die Tiefen des Planetenraumes vorarbeiten und sich in Jupiterentfernung dem Kometen nähern. In rund 450 Millionen Kilometern Entfernung soll dann erstmals ein Kometenlandegerät abgesetzt werden, das Untersuchungen vor Ort durchführt. Währenddessen begleitet Rosetta den Kometen auf seinem Weg ins Innere des Sonnensystems und wird alle Phasen seiner Aktivität verfolgen. Wenn auch Kometen zu den kleinsten Objekten im Weltraum gehören, so zählen sie doch zu dessen größten Geheimnisträgern!

Peter Korevaar

Literatur

- BAILEY ME (1983) The structure and evolution of the Solar System comet cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 204, 603.
- BAILEY ME (2002) Where Have All the Comets Gone? *Science* 296, 2151.
- DUNCAN M, QUINN T & TREMAINE S (1987) The formation and extent of the Solar System comet cloud. *Astron. J.* 94, 1330.
- LEVISON HF, MORBIDELLI A, DONES L, JEDICKE R, WIEGERT PA & BOTTKE Jr WF (2002) The Mass Disruption of Oort Cloud Comets. *Science* 296, 2212.
- MARSDEN BG & WILLIAMS GV (1993) *Catalogue of Cometary Orbits*, Cambridge, Massachusetts: IAU Central Bureau for Astronomical Telegrams – Minor Planet Center, 8th edition.
- OORT JH (1950) The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System, and a hypothesis concerning its origin. *Bull. Astron. Inst. Neth.* 11, 91.
- ROETTGER EE, FELDMAN PD, A'HEARN MF & FESTAU MC (1990) Comparison of water production rates from UV spectroscopy and visual magnitudes of some recent comets. *Icarus* 86, 100.
- WEISSMAN PR (1980) Physical loss of long-period comets. *Astron. Astrophys.* 85, 191.
- WIEGERT PA (1996) The evolution of long-period comets. Doktorarbeit, Univ. Toronto.