

BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

SITZUNGSBERICHTE

JAHRGANG

1977

MÜNCHEN 1978

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Sitzung vom 9. Dezember 1977

Herr Ludwig Biermann

Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik
München
berichtet

Über die Richtungsverteilung der Geschwindigkeiten
in der „Oort“-schen Wolke
(der das Sonnensystem umgebenden Kometenkerne)

(eingereicht am 12. 8. 1977)

Zusammenfassung

Es wird gezeigt, daß die Abhängigkeit der (aufsummierten) Anzahl „neuer“ Kometen – im Sinne der Oortschen Theorie – von ihrer Periheldistanz q für die etwa 80 Objekte, die in dem soeben von Marsden vorgelegten Beobachtungsmaterial enthalten sind, innerhalb der statistisch bedingten Fehler diejenige ist, die sich auf einfache Art aus den Prämissen der Oortschen Theorie von 1950 ergibt. Damit ist die von Oort angenommene Isotropie der Geschwindigkeitsverteilung im Innern der die Sonne im Abstand von einigen 10^4 astronomischen Einheiten umgebenden „Wolke“ von Kometenkernen – deren Existenz hinsichtlich der räumlichen Verteilung von Marsden aufs neue bestätigt wurde – gerade für den Teil des Geschwindigkeitsraums verifiziert, der durch die Störungen beim Durchgang durch das Planetensystem ständig entleert wird (um durch Begegnungen mit nahen Sternen und gelegentlich mit dichten interstellaren Wolken wieder aufgefüllt zu werden).

Im Jahre 1950 gab OORT der Vorstellung, daß die Kometen ein riesiges das Sonnensystem umgebendes Gebiet erfüllen, eine tragfähige Begründung durch eine Analyse der Verteilung der

reziproken Halbachsen gut bestimmter Bahnen langperiodischer Kometen, indem er zeigte, daß etwa 10–15 % von ihnen aus Entfernungen von der Ordnung mehrerer 10000 a. E. kommend, sich der Sonne zum ersten Mal nähern („neue“ Kometen). Kürzlich hat Marsden (1977) diesen Schluß durch eine verbesserte Berechnung der Bahnen einer noch größeren Zahl solcher Kometen bestätigt. Während Oort auch in seinem Bericht von 1963 nur etwa 30 „neue“ Kometen bezeichnen konnte, finden sich in dem neuen Material von Marsden etwa 80 Objekte, deren große Halbachsen vor der Annäherung an die Sonne von der Größenordnung einiger 10000 a. E. war; die Annäherung an die Bahnen von Saturn und vor allem Jupiter hat im Mittel, für „neue“ Kometen mit einer Periheldistanz ≤ 1 a. E., etwa eine Verzehnfachung des Betrages der potentiellen Energie zur Folge, so daß eine Unterscheidung der wirklich „neuen“ Kometen von den übrigen im allgemeinen nicht schwierig ist. Dabei bezieht sich der Ausdruck „neue“ Kometen, wie hier nicht begründet werden soll, nur auf die Herkunft, nicht aber das Alter dieser Objekte, die höchstwahrscheinlich auch schon vor etwa 5 Milliarden Jahren entstanden sind.*

Für den physikalischen Inhalt und die mathematische Formulierung der Theorie der hierdurch charakterisierten „Wolke“ – aus $\gtrsim 10^{11}$ (zumeist schon wegen der Entfernung und mangels jeder Gasproduktion nicht sichtbaren) Kometen bestehend – spielt die Verteilung im Geschwindigkeitsraum natürlich eine ebenso wichtige Rolle wie die im Ortsraum. Oort nimmt eine Verteilung im Geschwindigkeits- und Ortsraum an, die das Theorem von Liouville erfüllt, mit Gleichverteilung im Geschwindigkeitsraum bis zu einer ortsabhängigen oberen Grenze, die noch vom Abstand vom äußeren Rand der Wolke abhängt; in derjenigen Entfernung von der Sonne, die dem halben Radius der „Wolke“ entspricht, ist sie gleich der Kreisbahngeschwindigkeit an dieser Stelle (z. B. 0,19 km/sec, falls der Radius der Wolke zu 50000 a. E. angenommen wird, cf. Marsden 1977).

* Vgl. z. B. Vanýsek & Rahe 1977, The $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ Isotope Ratio in Comets and Interstellar Matter. Alle Bestimmungen des $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ -Verhältnisses für (bisher 4) Kometen deuten auf das angegebene Alter hin und sind unvereinbar mit einer Entstehung dieser Kometen während eines der letzten Durchgänge des Sonnensystems durch einen Spiralarm (vor $\sim 10^8$ Jahren).

Kometen mit Bahnen, die so genau zur Sonne hin zwei Worte gerichtet sind, daß sie die Jupiterbahn oder auch nur die inneren Teile der Saturnbahn durchschneiden, werden mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der „Wolke“ eliminiert, indem sie entweder in eine hyperbolische Bahn abgelenkt werden (und dann in den interstellaren Raum entweichen), oder aber in eine elliptische Bahn mit sehr viel kürzerer Umlaufzeit (10^5 – 10^6 a) gebracht werden, in der sie nach $\lesssim 10^8$ Jahren durch den jeweils in Sonnenhöhe erlittenen Verlust an verdampfbaren Bestandteilen erlöschen. Diese Teile des Geschwindigkeitsraums werden also ständig entleert – in einer Zeitskala der Ordnung der Umlaufzeit, also von einigen Millionen Jahren – und (gemäß der Oortschen Theorie) durch Begegnungen mit nahen Sternen neu bevölkert.

Im folgenden soll gezeigt werden, daß die von der Oortschen Theorie geforderte Gleichverteilung im Geschwindigkeitsraum zu einer linearen Beziehung zwischen der Anzahl der „neuen“ Kometen mit Periheldistanzen $\lesssim q$ und q selbst führt, die in dem Marsdenschen Material in der Tat zu erkennen ist.* Eine Unterteilung der Bahnen nach der Größenordnung der Fehler, d. h. unter anderem nach dem Einfluß der Rückstoßeffekte auf die Genauigkeit der Bahnen, deutet auf weitere kompliziertere Zusammenhänge, z. B. mit der chemischen Zusammensetzung, die aber hier nicht verfolgt werden sollen.

Hierzu betrachten wir einen Punkt in der Oortschen Wolke, der ungefähr der mittleren Entfernung der Kometenkerne von der Sonne entsprechen sollte. Wie schon oben bemerkt, erfüllen diejenigen Kometen, die sich etwa zur Sonne hin bewegen, im Geschwindigkeitsraum einen Winkel, den man auf folgende Art abschätzen kann. Die Komponente parallel zum Radiusvektor muß bis auf einen Zahlenfaktor, der für Kometen mit einem Aphel in den äußeren Teilen der „Wolke“ in der Nähe von 1 liegt, der Kreisbahngeschwindigkeit an der entsprechenden Stelle entsprechen, das sind für die oben angenommene Entfernung von 25000 a. E. = $(3,7 \times 10^{17} \text{ cm})$ 0,19 km/sec, während die Komponente senkrecht dazu gegeben ist durch die Flächengeschwin-

* Die Existenz dieser Beziehung war Oort 1950 nicht entgangen, sie war aber damals unverifizierbar. Herrn Oort bin ich für seine Bemerkungen zum Gegenstand dieser Note zu Dank verpflichtet.

digkeit. Die Letztere hängt nun direkt zusammen mit der Periheldistanz, denn für alle Kometen, die aus so großer Entfernung die Nähe der Sonne erreichen, ist die Geschwindigkeit im Perihel sehr nahe der parabolischen Geschwindigkeit, $42/\sqrt{q}$ km/sec, wenn die Periheldistanz q wieder in a. E. gemessen wird; die Flächengeschwindigkeit beträgt also $6,3 \times 10^{19} \times \sqrt{q}$ cm²/sec. Die Kometen, deren Periheldistanz gerade 1 a. E. ist, haben also in 25 000 a. E. Abstand von der Sonne eine Transversalkomponente der Geschwindigkeit von $1,7 \times 10^2$ cm/sec. Der räumliche Winkel, welchen die Kometen mit Periheldistanzen ≤ 1 a. E. erfüllen, beträgt also $\pi \left(\frac{1,7}{1,9} \right)^2 \cdot 10^{-4}$ sterad, und ist offensichtlich proportional zur 1. Potenz von q . Wenn also auch dieser Teil des Geschwindigkeitsraums gleichmäßig erfüllt ist, d. h. also im Sinne der Oortschen Theorie die Verluste durch die Ablenkungen im inneren Sonnensystem immer gedeckt werden durch die auf Begegnungen mit nahen Sternen* beruhenden ständigen Veränderungen der Impulsvektoren sämtlicher Kometenkerne, welche die Oortsche Wolke bilden, dann sollte man eine Proportionalität der Anzahlen von „neuen“ Kometen mit Periheldistanz $\leq q$ und der 1. Potenz von q selbst erwarten.

Hierzu betrachten wir als erstes diejenigen 99 Kometen, deren $1/a$ Werte vor der Annäherung an das Planetensystem mit einer Genauigkeit von wenigen Einheiten der 5. Dezimalstelle nach dem Komma (in reziproken a. E.) bestimmt werden konnten. Unter diesen 99 Objekten befinden sich etwa 60, die mit Sicherheit niemals zuvor dem Planetensystem nahe gekommen sind, weil sonst ihr $1/a$ Wert (a = halbe Achse der Bahn) um im Mittel mindestens eine Zehnerpotenz größer sein müßte als beobachtet. Das Diagramm von Marsden zeigt, daß etwa die Hälfte dieser Objekte $1/a$ Werte haben, die nur wenige Einheiten der 5. Dezimale betragen. Weiterhin gibt es einige, die negative $1/a$ Werte aufweisen, mit Beträgen, die im Extremfall 1–2 Einheiten der 4. Dezimale ausmachen; diese gehören aber mit Sicherheit nicht zu Kometen, die aus dem interstellaren Raum kommen, weil dann die Verteilung der $1/a$ Werte eine völlig andere sein müßte als dies

* Mit einer Frequenz von annähernd 1 : 1 Millionen Jahre für Begegnungen im Abstand 50000 a. E. von der Sonne, cf. Marsden und Sekania, 1973.

beobachtet wird – sie hätten nämlich um 3–4 Zehnerpotenzen größer sein müssen. Die gefundenen negativen $1/a$ Werte können also nur durch nichtgravitative Kräfte, wie sie der Rückstoß der von der Oberfläche abströmenden Gase hervorruft, zustande gekommen sein; bei einem Kometen, von dem nur Beobachtungen einer einzigen Erscheinung vorliegen, ist der Betrag dieser Kräfte im allgemeinen schwer genau zu bestimmen, da sie wegen der gerade bei solchen Kometen häufig auftretenden „Aktivität“ nicht in einfacher Weise mit dem Sonnenabstand zusammenhängen. Falls die Ausströmung von der Kometenoberfläche überwiegend in Richtung zur Sonne hin erfolgt, wird die Sonnenanziehung zu einem gewissen (kleinen) Bruchteil kompensiert, und der Komet scheint aus einer geringeren Entfernung zu kommen als dies tatsächlich der Fall ist, d. h. der aus der Bahn abgeleitete „ursprüngliche“ $1/a$ Wert wird etwas zu groß (und > 0) gefunden.* Es ist daher damit zu rechnen, daß die nichtgravitativen Kräfte gelegentlich auch einen $1/a$ Wert von einer oder zwei Einheiten der 4. Dezimale vortäuschen können, der aber (falls > 0) auch zustande gekommen sein könnte durch die Veränderung der Bahn, die der Komet bei einer vorangegangenen ersten Annäherung an die Sonne unter bestimmten speziellen Voraussetzungen (die im ganzen eine vergleichsweise geringe Veränderung der Bahnkonstanten zur Folge gehabt haben) erlitten hat. Die Zahl dieser Grenzfälle ist aber so gering, daß die im folgenden zu ziehenden Schlüsse davon nicht berührt werden.

Nach einer bei uns durchgeführten Auswertung sollten etwa 60 der 99 Kometen mit erstklassig bestimmten Bahnen mit Sicherheit oder aber (in den wenigen genannten Grenzfällen) mit großer Wahrscheinlichkeit das Planetensystem zum ersten Mal durchlaufen haben. Davon haben 15 Periheldistanzen < 1 , 36 Periheldistanzen < 2 , und 46 solche ≤ 3 a. E. Man sieht also, daß innerhalb der statistischen Fehler die aufsummierte Anzahl $N(q)$ etwa durch den Ausdruck $17 \times q$ gegeben ist. Die Abweichungen sind in allen Fällen $< \sqrt{N}$. Erst bei $q = 3$ ($N = 46$) bleibt die Anzahl deutlich zurück.

* Tatsächlich liegen die Dinge komplizierter, cf. Marsden, B. G., Sekanina, Z. und Yeomans, D. K. 1973, *Astron. J.* **78**, 211.

Dies ist weiter nicht erstaunlich, weil in dieser Entfernung Auswahl-effekte und die Größenverteilung der Kometenkerne, deren scheinbare Helligkeit mit mindestens der (negativen) 4. Potenz der Sonnenentfernung geht, eine Rolle spielen müssen.

Wir betrachten weiterhin die 96 Objekte, deren Bahnen Marsden nur mit sehr viel geringerer Genauigkeit hat bestimmen können, zur Hauptsache wohl deswegen weil hier die nichtgravitativen Kräfte sehr viel größere Fehler verursacht haben. Diese Objekte unterscheiden sich von den erstgenannten einmal dadurch, daß der Bruchteil, der aller Wahrscheinlichkeit nach zum ersten Mal das Planetensystem berührt, viel geringer ist, nur 22*, d. h. knapp $\frac{1}{4}$ gegenüber 60% der 1. Gruppe. Ferner haben 20 von ihnen eine Periheldistanz unterhalb von $q = 1,4$. Bis $q = 1,4$ ist aber die aufsummierte Anzahl auch wieder proportional zu q , N beträgt etwa $13q$, wieder vollkommen innerhalb der statistischen Fehler. Würde man beide Gruppen zusammenziehen, so würde der Ausdruck $30q$ die Gesamtsumme wieder innerhalb der statistischen Fehler wiedergegeben. Auch wenn die Kometen der 2. Gruppe aus einem anderen Teil der Oortschen Wolke kommen sollten als die Kometen der ersten Gruppe, ist es zur Prüfung der Frage der Proportionalität zwischen $N(q)$, d. h. der Gleichverteilung im Geschwindigkeitsraum, offenbar erlaubt und sinnvoll, die beiden Klassen für $q \lesssim 1,4$ zusammenzufassen, schon um den insbesondere in der 1. Liste offenkundig vorliegenden statistischen Ungleichförmigkeiten der Verteilung nach den Periheldistanzen Rechnung zu tragen. Die folgende Tabelle gibt die beobachtete Anzahl als Funktion von q wieder.

Aufsummierte Anzahlen $N(q)$ der „neuen“ Kometen mit Periheldistanzen q a. E. (N_1 Bahnen hoher Genauigkeit)

q	0.6	1.0	1.4	2	3
N_1	10	15	25	36	46
$17q$	10.2	17	27.8	34	51

* Von 2 Kometen nahe $q = 1,2$ mit $1/a$ Werten um $120-160 \cdot 10^{-6}$ (a. E.)⁻¹ ist nur der Erstere als „neuer“ Komet mitgenommen worden.

q	0.6	1.0	1.4	2	3
N_2	6	13	20	[21	22]
$13q$	7.8	13	18.2	26	39
$N_1 + N_2$	16	28	45		
$30q$	18	30	42	60	90

Es ergibt sich also, daß die auf Grund der Oortschen Theorie erwartete Proportionalität der aufsummierten Anzahl „neuer“ Kometen $N(q)$ mit der 1. Potenz von q in den Daten deutlich hervortritt. Die geringe Anzahl der Objekte der 2. Klasse mit $q > 1.4$ deutet aber auf einen (direkten oder indirekten) Einfluß der chemischen Zusammensetzung, welche wie in einer früheren Mitteilung auseinandergesetzt (W. Huebner 1965), die Abhängigkeit der Verdampfungsrate von der Sonnenentfernung stark beeinflußt. Die wirkliche Anzahl der Kometenkerne sollte aber, wenn die hier angegebene Interpretation zutrifft, auch für $q > 1.4$ etwa durch die Ausdrücke $13q$ bzw. $30q$ (für die Summe beider Gruppen) gegeben sein.

Anhang

In einem ganz anderen Zusammenhang – der Verteilung am Himmel der großen Achsen der langperiodischen Kometen und der Vorstellung, daß die Kometenkerne bei einem langsamen Durchgang des Sonnensystems durch eine dichte interstellare Wolke (mit 1 km/sec) von der Sonne eingefangen worden sind – hat Hasegawa (1976, Publ. Astron. Soc. Jap. **28**, 259) die Verteilung $N(q)$ auch für 32 „neue“ Kometen untersucht und auch schon eine Proportionalität bis $q \gtrsim 2$ gefunden. Nun ist aber die Wahrscheinlichkeit, daß das Sonnensystem in dem Zeitraum von $4\frac{1}{2}$ Milliarden Jahren seit seiner Entstehung eine dichte ($N_m > 10^4 \text{ cm}^{-3}$) interstellare Wolke mit so geringer Geschwindigkeit durchquert hat, anders als vielfach angenommen, gering (P. und L. Biermann, 1977, Astron. Astrophys. **55**, 63). Ein Vergleich der Oortschen Theorie über die Herkunft der „neuen“ Kometen mit ihren in der Literatur vorgeschlagenen Alternativen, der auch eine Diskussion des Verhältnisses der langperiodischen zu den als sichtbare Kometen zumeist kurzlebigen „neuen“ Kometen erfordern würde, ist aber hier nicht beabsichtigt.

Literatur

- Biermann, P. und Biermann, L. 1977, *Astron. Astrophys.* **55**, 63.
- Hasegawa, I. 1976, *Publ. Astron. Soc. Jap.* **28**, 259.
- Huebner, W. 1965, *Sitz.-Ber. Bayer. Akad. Wiss., Math.-Naturw. Kl.*, S. 147.
- Huebner, W. 1965, *Z. Astrophys.* **63**, 22.
- Marsden, B. G. und Sekanina, Z. 1973, *Astron. J.* **78**, 1118.
- Marsden, B. G., Sekanina, Z. und Yeomans, D. K. 1973, *Astron. J.* **78**, 211.
- Marsden, B. G. 1977, *Orbital Data on the Existence of Oort's Cloud of Comets* (preprint).
- Oort, J. H. 1950, *Bull. Astron. Inst. Neth.* **11**, 91.
- Oort, J. H. 1963, in *The Moon, Meteorites and Comets; The Solar System*, ed. by B. M. Middlehurst and G. P. Kuiper (U. Chicago Press, Chicago, vol. 4, p. 665).
- Vanýsek, V. und Rahe, J. 1977, *The $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ Isotope Ratio in Comets and Interstellar Matter*.

Zusatz bei der Korrektur (8. Dezember 1977)

Herrn Everhart (Denver, Colorado) verdankt der Verfasser den preprint einer weiteren Arbeit von Marsden, Sekanina und Everhart, die eine Liste der Daten für nunmehr 200 Kometen enthält. An den in der vorliegenden Note gezogenen Schlüssen ändert sich hierdurch nichts; für einige Einzelheiten sei auf den Nachtrag zum Bericht gleichen Titels (MPI-PAE-Astro 139) verwiesen.