

BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

3760

SITZUNGSBERICHTE

JAHRGANG

1963

MÜNCHEN 1964

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Über chemische Reaktionen in Kometenatmosphären

Von Ludwig Biermann und Eleonore Treffitz in München

Mit zwei Abbildungen

Vorgelegt am 1. Februar 1963

Chemische Reaktionen auf Kometen sind bisher meist diskutiert worden im Hinblick auf die „Aktivität“ der Kometen selbst, d. h. Schwankungen der Gasproduktion, die nicht auf solare Einflüsse zurückgeführt werden können. Der Ausgangspunkt dieser Arbeiten (von Urey und anderen) war die Vermutung, daß möglicherweise ein Teil der Materie in der Form von chemischen Radikalen aus C, N, O und H im Kern des Kometen als Eis vorliegt.

Wie im vergangenen Sommer bereits berichtet, gibt es jetzt starke Gründe für die Annahme, daß die gesamte Gasproduktion der Kometenkerne sehr viel höher ist, als dies aufgrund der Intensitäten der Banden von CN, C₂ und CO⁺ den Anschein hat. Der gegenwärtige Anlaß, die Frage chemischer Reaktionen in den Atmosphären der Kometen neu zu prüfen, besteht aber in den neuen Messungen der ionisierenden Sonnenstrahlung und der solaren Korpuskularstrahlung, die zunächst auf Schwierigkeiten in der Interpretation der beobachteten Zeitskala für die Entstehung von Plasmastrukturen führen. Das Ergebnis der hier mitgeteilten Rechnungen wird sein, daß bis zu den Abständen von 10000 oder einigen 10000 km vom Kern mittelgroßer Kometen chemische Reaktionen zwischen ionisierten und nichtionisierten Molekülen häufig sein sollten und daß man auf diese Art vielleicht eine Interpretation der beobachteten kurzen Zeitskala gewinnt.

Nach den letzten Messungen mittels Raketen beträgt die Intensität der ionisierenden Sonnenstrahlung unter normalen Bedingungen etwa $6 \cdot 10^{10}$ Quanten mit mehr als 12 eV pro cm² sec. Dies bedeutet für die häufigsten Moleküle aus C, N, O und H Ionisationsraten von 10^{-6} sec⁻¹ oder etwas darunter. In einer Entfer-

nung der Ordnung 10000 km vom Kern sollte daher größenordnungsmäßig 1% der Moleküle ionisiert sein. Aufgrund der Beobachtungen der verbotenen Sauerstofflinien auf Kometen und aufgrund älterer von Whipple entwickelter theoretischer Vorstellungen wird für mittelhelle Kometen eine gesamte Gasproduktion der Ordnung 10^{31} mol/sec angenommen. Unter diesen Umständen würde man in einer Entfernung von 10000 km vom Kern Dichten der Ordnung 10^7 pro cm^3 und Ionendichten zwischen 10^4 und 10^5 pro cm^3 haben. Aus der Reaktionskinetik ist bekannt, daß exotherme binäre Reaktionen zwischen ionisierten und nichtionisierten Molekülen oft sehr hohe Reaktionsraten haben, zwischen etwa 10^{-9} und 10^{-8} $\text{cm}^3 \text{ sec}^{-1}$. Dies bedeutet für die ionisierten Partner Zeitskalen der Ordnung $\alpha \cdot 10^{-2}$ und $\alpha \cdot 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$, wobei α den Volumenanteil des reagierenden nichtionisierten Partners bedeutet. Man erkennt hieraus, daß Reaktionen der vorgenannten Art bis in Entfernungen der Ordnung 10000–100000 km durchaus ablaufen sollten.

Das Interesse an dieser Möglichkeit beruht unter anderem darauf, daß sie auf eine Erklärung der relativ kurzen Zeitskalen von der Ordnung einer oder einiger Stunden führen könnten, in denen Ionenstrukturen entstehen. Seit man weiß, daß die Entstehungsraten der Ionen durch Photoionisation oder Umladung im Teilchenstrom der solaren Partikelstrahlung nur auf Zeitskalen der Ordnung 10^6 sec führen, ist es klar, daß die Erklärung der beschriebenen Erscheinung in anderer Richtung gesucht werden muß. Nun nutzt eine diskontinuierliche Entstehung der Ausgangssubstanz der Ionen, die durch Photoeffekt ionisiert werden, nichts im Hinblick auf die erwähnte Zeitskala. Die Lage ist aber anders, wenn das beobachtete CO^+ überwiegend Produkt einer nachfolgenden chemischen Reaktion ist, die wegen des Dichteabfalls nur bis zu einer gewissen Entfernung vom Kern rascher als die konkurrierenden Mechanismen – Dissoziation, Umladung, Ionisation etc. – abläuft. In diesem Fall ergibt sich tatsächlich eine Begrenzung der Zeitskala bei diskontinuierlicher Entstehung der Ausgangssubstanz.

Um diese Vorstellung quantitativ zu prüfen, wurde eine Anzahl Modelle gerechnet, aus denen sich ergibt, daß die Lösung der Differentialgleichungen, welche das Zusammenwirken der Disso-

ziation, Ionisation und chemischer Reaktionen unter Berücksichtigung des gleichzeitigen Wegströmens vom Kern in radialer Symmetrie beschreiben, in der Tat den qualitativ erwarteten Charakter besitzt. Die Rechnung bezieht sich auf stationäre Verhältnisse, man kann aber aus ihr erkennen, wie sich eine diskontinuierliche Entstehung eines der beiden Reaktionspartner auswirkt.

Die Gleichungen lauten (Q sind Produktionsraten pro sec und Raumwinkeleinheit, n Volumendichten, N Anzahlen pro cm längs r , v Geschwindigkeiten, konstant angenommen, α , β Dissoziationsraten, α_i Ionisationsrate, γ Reaktionsrate; A bzw. A^+ bezeichnet den ionisierten Reaktionspartner, B_0 und B den nichtionisierten,

$$v_A \frac{dN_{A^+}}{dr} = -N_{A^+} (\alpha + n_B \gamma) + N_A \alpha_i \quad \text{cm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$$

mit

$$N_A = \frac{Q_A}{v_A} \exp(-\alpha r/v_A) \quad N_{A^+}(r=0) = 0$$

und
$$n_B = \frac{Q_B}{r^2 v_B} \exp(-\beta r/v_B) \left(\text{bzw. } \frac{Q_{B_0} \beta_0}{v_B^2 \cdot r} \exp(-\beta r/v_B) \right).$$

Zwei typische Lösungen sind in den nachstehenden Figuren wiedergegeben.

Eine noch zu beweisende Voraussetzung über die chemische Zusammensetzung der Kometenkerne besteht natürlich darin, daß C und O überwiegend nicht bereits als CO bzw. CO^+ vorliegen, so daß durch die Bindung von C an O Reaktionsenergie gewonnen werden kann. Eine plausible Möglichkeit besteht darin, daß bei der Bildung der Kometen soviel Wasserstoff im Überschuß vorlag, daß sowohl C als auch O überwiegend in Form ihrer Verbindungen mit Wasserstoff entstanden. Auch aus chemischen Gründen erscheint es wenig wahrscheinlich, daß Kohlenstoff gleichzeitig in Form seiner Sauerstoffverbindung und seiner Wasserstoffverbindungen, deren Existenz aus anderen Gründen wahrscheinlich ist, in den Kometenkernen vorkommt.

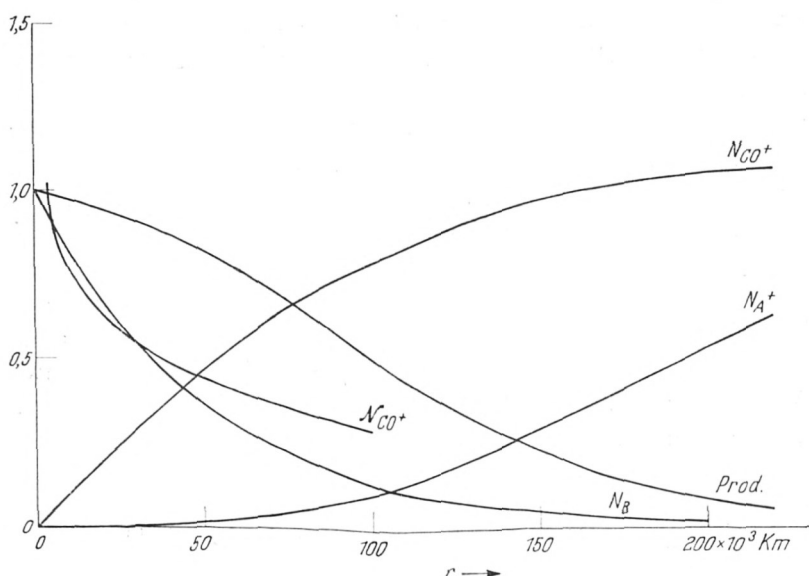


Abb. 1. Einheiten:

N_B 0.88×10^{26} Teilchen/(cm $\times$ Raumwinkel) $\times (\gamma/10^{-9} \text{ cm}^3/\text{sec})^{-1}$

N_{A^+} 2×10^{22} Teilchen/(cm $\times$ Raumwinkel)

N_{CO^+} 2×10^{22} Teilchen/(cm $\times$ Raumwinkel)

N_{CO^+} 2×10^{13} Teilchen/cm² (Anzahl der CO⁺-Ionen in Sichtlinie)

Prod 0.5×10^{18} Teilchen/(cm $\times$ Raumwinkel $\times$ sec) (Produktion von CO⁺)

Die neuen Mittel der extraterrestrischen Forschung bieten verschiedene Möglichkeiten, das hier nur skizzierte Bild¹ zu prüfen. So sollten die Moleküle, die in den bisher zugänglichen Spektralbereichen keine Resonanzbanden besitzen, in genügend großer Höhe natürlich beobachtbar sein; überhaupt sollte die Helligkeit eines Kometen im extremen UV, d. h. der von ihm emittierte Quantenfluß, etwa dem im sichtbaren Spektralbereich gleichkommen, während bei den meisten Himmelskörpern die Helligkeit im äußersten UV größenordnungsmäßig geringer ist.

¹ Für die Einzelheiten sei auf eine in der Z. f. Astrophysik erscheinende Arbeit hingewiesen.

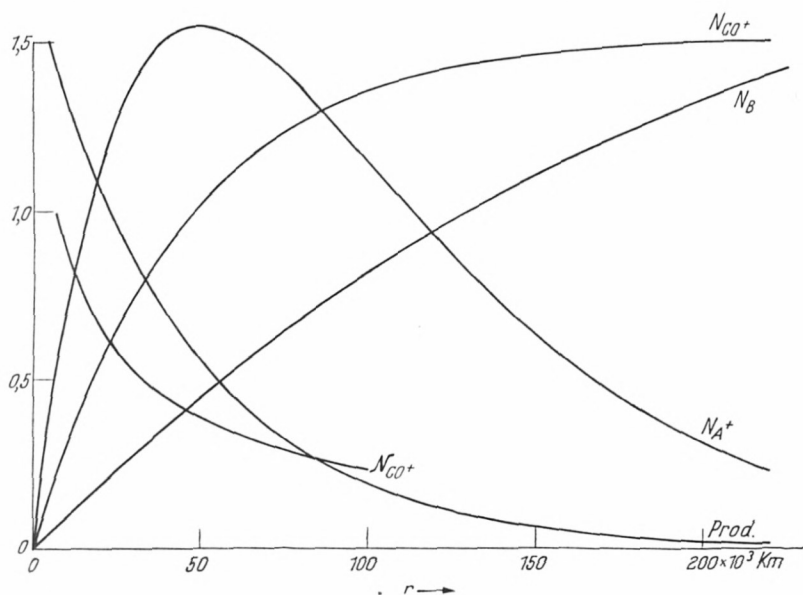


Abb. 2. Einheiten:

N_B 2×10^{23} Teilchen/(cm $\times$ Raumwinkel) $\times (\gamma/10^{-9}\text{cm}^3/\text{sec})^{-1}$

N_{A^+} 0.5×10^{22} Teilchen/(cm $\times$ Raumwinkel)

N_{CO^+} 2.5×10^{21} Teilchen/(cm $\times$ Raumwinkel)

N_{CO^+} 0.5×10^{13} Teilchen/cm³ (Anzahl der CO^+ -Ionen in Sichtlinie)

$Prod.$ 0.5×10^{17} Teilchen/(cm $\times$ Raumwinkel $\times$ sec) (Produktion von CO^+)