

Neue Erklärung der Entstehung der irdischen Eiszeiten.

Von

Dr. Fr. Nölke.

Sonder-Abdruck aus den Abh. d. Nat. Ver. Brem., Bd. XX, Heft 1.

Bremen.

Vereinigte Druckereien Jlling & Lüken.

1909.

Neue Erklärung der Entstehung der irdischen Eiszeiten.

Von
Dr. Fr. Nölke.

Wenn wir in dem vorliegenden Aufsätze den Versuch machen, eine neue Erklärung der Entstehung der irdischen Eiszeiten zu geben, so dürften wir einer vorhergehenden Rechtfertigung unseres Vorhabens überhoben sein. Bis jetzt ist keine Theorie vorhanden, welche dem kritisch abwägenden Verstande mit dem Charakter innerer Wahrscheinlichkeit entgegenträte. Bei allen lassen sich den für sie vorgebrachten Gründen nicht minder gewichtige Gegen Gründe gegenüberstellen, und daher kann sich auch keine rühmen, bei einer grösseren Anzahl von Forschern Anerkennung gefunden zu haben.

Ein in den „Deutschen Geographischen Blättern“ (Bremen, 1909, 1. Heft) erschienener Aufsatz des Verfassers „Die Entstehung der Eiszeit“ enthält eine Kritik der wichtigsten bekannten Theorien. Die Kritik zeigt, dass nicht nur die früher vielfach anerkannte Croll'sche Theorie, sondern auch die neue Theorie von Arrhenius und die Pendulationstheorie von Reibisch und Simroth entweder mit den Glazialphänomenen selbst, oder mit feststehenden geologischen und physikalischen Thatsachen nicht im Einklang stehen und daher aufgegeben werden müssen. An dieser Stelle wollen wir auf eine Kritik der alten Theorien verzichten und sogleich zur Aufstellung der neuen Theorie schreiten. Einige Hauptpunkte derselben sind bereits in des Verfassers kürzlich erschienenen Buche „Das Problem der Entwicklung unseres Planetensystems“¹⁾ und in dem zitierten Aufsätze enthalten. In dem vorliegenden Aufsätze soll ihr eine ausführliche physikalische Begründung zu teil werden.

1. Grundlage der Theorie.

§ 1.

In den letzten 30 Jahren sind, besonders mit Hilfe der Himmelsphotographie, eine ganze Reihe grösserer und kleinerer kosmischer Nebelmassen entdeckt worden. Nach spektroskopischen Untersuchungen von Keeler bewegen sich die Nebel, ebenso wie die Sterne,

¹⁾ Das Problem der Entwicklung unseres Planetensystems; Aufstellung einer neuen Theorie nach vorhergehender Kritik der Theorien von Kant, Laplace, Poincaré, Moulton, Arrhenius u. a. Berlin, J. Springer, 1908.

mit verschiedenen Geschwindigkeiten und in verschiedenen Richtungen im Raume vorwärts. Es liegt daher, bei der ungeheuren Ausdehnung, die viele dieser Nebel besitzen, die Möglichkeit vor, dass ein Stern in einen Nebel eintritt und ihn durchschreitet; die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses ist ohne Zweifel viele Millionen Mal grösser als diejenige des Zusammenstreffens zweier Sterne. Wenn auch, wegen der ausserordentlichen Feinheit der Nebelmassen, nicht angenommen zu werden braucht, dass das Durchschreiten eines Nebels den Bestand des Sternes gefährde, so könnte es trotzdem Spuren hinterlassen. Wir behaupten, dass die Folgen des Durchschreitens eines Nebels im wesentlichen zweierlei Art sein werden:

1. Der Stern zieht kleinere oder grössere Kondensationen der Nebelmaterie, die nicht übermässig weit von ihm entfernt sind, zu sich heran und zwingt sie, wenn der Widerstand der feinen Nebelmaterie imstande ist, die hyperbolische Exzentrizität ihrer Bahnen in eine elliptische zu verwandeln, als Kometen ihm zu folgen.

2. Die Nebelmaterie absorbiert einen Teil der Licht- und Wärmestrahlung des Sternes und ruft dadurch auf den den Stern umkreisenden Planetenmassen eine Abkühlung hervor.

Die erste Folgerung führt, auf unsere Sonne angewandt, zu einer neuen Theorie des bis jetzt ebenfalls noch sehr hypothetischen Ursprungs der Kometen unseres Sonnensystems.¹⁾ Aus der zweiten Folgerung ergibt sich eine neue Erklärung der Entstehung der irdischen Eiszeiten.

2. Tatsächliche Anhaltspunkte.

§ 2.

Zunächst wollen wir uns bemühen, zu zeigen, dass sich die Theorie auf tatsächliche Anhaltspunkte stützen kann (vergl. Problem, S. 203). Nach mehrfach wiederholten Bestimmungen schreitet die Sonne bei ihrer translatorischen Bewegung nach einem Punkte fort, der in 260° bis 290° Rektascension und in -1° bis 45° Deklination liegt. Das Gebiet, welches dem angegebenen im Rücken der Sonne entspricht, schliesst ausser vielen kleineren und grösseren Nebeln auch den grossen Orionnebel ein (83° Rekt., $-5\frac{1}{2}^{\circ}$ Dekl.), der mit seinen Ausläufern nach Secchi einen Raum von ungefähr 120 Vollmondsflächen einnimmt. Nach den Beobachtungen Keelers entfernt sich dieser Nebel von der Sonne mit einer Geschwindigkeit von 18 km/sec. Wir stellen daher die Vermutung auf, dass unser Sonnensystem den Orionnebel durchschritten habe. Nehmen wir mit mehreren Forschern an, die quartäre Eiszeit liege 20 000 bis 50 000 Jahre zurück, so berechnet sich hiernach die Entfernung des

¹⁾ Siehe des Verfassers Aufsatz: „Neue Erklärung des Ursprungs der Kometen“, Abh. Nat. Ver. Brem. XX, 1. Heft.

Nebels von der Sonne zu 80 000 bis 190 000 Erdweiten (vergl. jedoch S. 16). Diese Entfernung lässt sich mit der Entfernung des der Sonne nächsten Sternes α Centauri vergleichen, welche 250 000 Erdweiten beträgt; ihr entspricht eine Parallaxe von 2,5'' bis 1''. Vorläufig dürfte es jedoch gänzlich aussichtslos sein, den angegebenen Wert der Parallaxe durch direkte Beobachtungen zu verifizieren, da Parallaxen diffuser Nebelmassen bis jetzt nicht haben bestimmt werden können. Dafür, dass der Orionnebel unserer Sonne ziemlich nahe liegt, lassen sich noch zwei Beobachtungstatsachen anführen; erstens ist er unter allen sichtbaren Nebeln die glänzendste Erscheinung, und zweitens müssen Sterne unseres Sternhaufens hinter ihm stehen, da ihr Licht eine Absorption durch die Nebelmaterie zu erleiden scheint (Arrhenius, Kosmische Physik, S. 38; Scheiner, Astrophysik, S. 565).

Wenn sich herausstellen sollte, dass der Orionnebel nicht genau im Antiapex der Sonnenbewegung liegt, so braucht er deswegen für unsere Theorie noch nicht aufgegeben zu werden; denn es wäre möglich, dass die von der Sonne seit dem Austritt aus dem Nebel beschriebene Bahn nicht mehr als gerade Linie betrachtet werden dürfte; ausserdem kann sich der Nebel in der angegebenen Zeit infolge einer seitlichen Eigenbewegung aus seiner ursprünglichen Lage entfernt haben. Trotzdem müssen wir mit der Möglichkeit rechnen, dass der Orionnebel wegen irgend welcher, noch unbekannter Umstände für unsere Theorie nicht in Frage kommen könne. Da die Sternbilder, welche in der Umgebung des Antiapex der Sonnenbewegung liegen (Orion, Lepus, Columba, Canis major, Argo, Monocerus), sehr reich an Nebeln sind, so würde es jedoch ein Leichtes sein, für ihn einen passenden Ersatz zu finden. Ausser vielen kleineren Nebeln enthalten diese Sternbilder eine Reihe sehr grosser Nebelmassen, z. B. No. 1909, 424, 1977, 1980, 1982, 1990, 2024 im Orion, 1792 in Columba, 2359 in Canis major, 2310 in Argo, 2359 im Monocerus (vergl. Valentiner, Handwörterbuch der Astronomie).¹⁾ Im Gegensatz hierzu ist die Umgebung des Apex der Sonnenbewegung an Nebeln arm (Hercules, Lyra, Vulpes, Ophiocnus, Sagitta, Aquila, Serpens). Die Wahrscheinlichkeit, dass unser Sonnensystem in absehbarer Zeit wieder in einen Nebel eintrete, und eine neue Eiszeit auf der Erde ihre verheerenden Wirkungen äussere, ist daher nur gering.

3. Ein Einwand.

§ 3.

Auf die Möglichkeit, dass ein Stern in einen Nebel eindringen könne, ist schon von anderer Seite hingewiesen worden, und zwar

¹⁾ Eine spätere Rechnung (S. 17) wird zeigen, dass die Dichte des durchschrittenen Nebels der Aetherdichte verhältnismässig nahe lag. Es wäre daher auch denkbar, dass er im Fernrohre bis jetzt überhaupt unsichtbar geblieben sei. Auf diese Möglichkeit könnte hingewiesen werden, wenn sich herausstellen sollte, dass keiner der beobachteten Nebel für unsere Theorie in Frage kommen könne.

hat man durch sie eine mit der Eiszeit scheinbar kontrastierende Erscheinung, nämlich das Aufleuchten neuer Sterne, zu erklären versucht. Ebenso wie die in die Erdatmosphäre eindringenden Sternschnuppen und Meteore ihre kinetische Energie in Wärme verwandeln, müssen auch die Nebelmassen, welche beim Durchschreiten des Nebels mit dem Sterne zur Vereinigung kommen, eine Erhöhung seiner Oberflächentemperatur bewirken. Tritt er als bereits erstarrter Weltkörper in den Nebel ein, so kann er also von neuem zum Erglühen kommen und uns als Nova sichtbar werden. Diese Erklärung hat man z. B. für die Nova Aurigae, welche bei ihrem Aufleuchten von einem Nebel umgeben war, herangezogen.¹⁾ Wenn man bedenkt, dass ein Stern längere Zeit, vielleicht Tausende von Jahren brauchen wird, um einen Nebel zu durchschreiten, die Novae aber immer nur kurze Zeit leuchten, so erkennt man zwar, dass für sie nach einer andern Erklärung gesucht werden muss; aber da sich nicht bestreiten lässt, dass beim Eindringen der Sonne in einen Nebel wirklich eine Erhöhung ihrer Oberflächentemperatur²⁾ eintrete, so müsste, wenn diese nicht auf irgend eine Weise kompensiert würde, auch unsere Erklärung der Eiszeiten aufgegeben werden. Daher wollen wir jetzt die Frage, um welchen Betrag die in die Sonne stürzende Nebelmaterie ihre Oberflächentemperatur erhöhen könne und von welchen Faktoren ihre Wärmestrahlung im Innern des Nebels abhängig sei, ausführlich erörtern.

4. Diathermansie der Nebelmaterie.

§ 4.

Unserer Annahme nach absorbierte die durchschrittene Nebelmaterie einen Teil der Licht- und Wärmestrahlung der Sonne. Natürlich lässt sich nur dann, wenn die Dichte und die chemische Zusammensetzung der Nebelmaterie bekannt ist, die Grösse ihrer Absorption bestimmen. Als Massstab derselben könnte vielleicht die absorbierende Kraft der Erdatmosphäre dienen. Diese ist so beträchtlich, dass nur ungefähr die Hälfte der der Erde zugestrahlten Wärme die Erdoberfläche erreicht. Den Hauptanteil an der Absorption haben allerdings nicht die eigentlichen Gase der Atmosphäre selbst, sondern die ihr beigemengten Bestandteile, Staub, Wasserdampf und Kohlensäure. Nach den Versuchen Tyndalls sind die einfachen Gase Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff für Wärmestrahlen fast vollkommen durchlässig; aber in grösserer Dicke müssen auch sie eine merkliche Absorption ausüben. Beim Sauerstoff steht dies fest, da im Absorptionsspektrum breite Streifen von ihm herrühren. Wenn nun auch Wasserstoff und Stickstoff in hohem Grade diatherman sind, so darf doch angenommen werden, dass die in den Nebeln ihnen beigemischten anderen Gase, an

¹⁾ Von den meisten Astronomen ist diese Erklärung bereits wieder aufgegeben worden; vergl. Scheiner, Astrophysik.

²⁾ Vergl. hierüber die Anmerkung auf S. 13.

deren Existenz sich nicht zweifeln lässt, da sie sich im Spektrum der Nebel verraten (Eisen- und Magnesiumdämpfe und besonders die noch gänzlich unbekannt Gasart, welcher die sog. Nebulosalinie 495,9 angehört), einen bemerkbaren Teil der Wärmestrahlung absorbieren können. Die Annahme völliger Diathermanität der Nebelmassen ist auch deswegen nicht gerechtfertigt, weil sich eine Absorption der Lichtstrahlen z. B. beim Orionnebel direkt nachweisen lässt und bei fast allen Gasen die Durchlässigkeit für Lichtstrahlen grösser ist als die für Wärmestrahlen (Arrh., l. c. S. 503).

5. Absorption der Wärmestrahlung durch die Nebelmaterie.

§ 5.

Um die Grösse der Absorption, welche die feine Nebelmaterie auf die Wärmestrahlung der Sonne ausübt, beurteilen zu können, ist es erforderlich, den Wert ihrer Dichte an einem beliebigen Punkte der Umgebung der Sonne zu bestimmen.

Wir denken uns, mit der Sonne schreite ein Koordinatensystem fort, dessen positive x -Achse in die relative Bewegungsrichtung der Sonne und des Nebels fällt. Die von der Sonne angezogenen Nebelteilchen beschreiben sämtlich Hyperbeln, bei denen die Asymptote des absteigenden Astes der x -Achse parallel ist. Bedeutet M die Masse, k die Gravitationskonstante, so lauten die Integrale der Bewegungsgleichungen eines Teilchens

$$x \frac{dy}{dt} - y \frac{dx}{dt} = r^2 \frac{d\varphi}{dt} = \alpha; \left(\frac{ds}{dt}\right)^2 = \frac{2kM}{r} + \beta.$$

a sei die halbe Hauptachse, b die halbe Nebenachse der Hyperbel; dann ist der Abstand der der x -Achse parallelen Asymptote nach Sätzen der analytischen Geometrie gleich b . Bezeichnet φ_0 den Winkel zwischen der Hauptachse und der x -Achse, so ist $\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{b}{a}$.

Wenn
$$\xi = \frac{ar - b^2}{e}, \quad \eta = b \sqrt{\left(\frac{r+a}{e}\right)^2 - 1}$$

gesetzt wird, so lautet ferner die Gleichung der Hyperbel

$$x = \xi \cos \varphi_0 + \eta \sin \varphi_0; \quad y = -\xi \sin \varphi_0 + \eta \cos \varphi_0.$$

Die Integrationskonstante α ist die doppelte, vom Radiusvektor in der Zeiteinheit beschriebene Fläche. Fasst man die unendlich fernen Punkte der Kurve ins Auge, so findet man also, wenn c die Geschwindigkeit bedeutet, mit welcher die Sonne im Nebel fortschreitet,

$$\alpha = cb, \quad \beta = c^2.$$

Drückt man β durch die Konstanten der Hyperbelgleichung aus, so

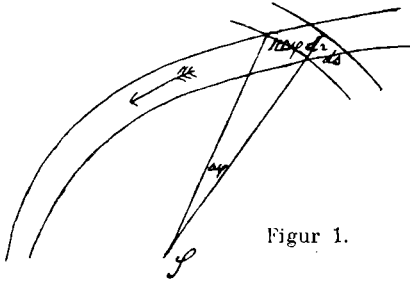
so erhält man $\beta = \frac{kM}{a}$; demnach ist $a = \frac{kM}{c^2}$.

Der absteigende Hyperbelast schneidet die y-Achse in der Entfernung $\frac{b^2}{a+b}$, der aufsteigende Ast die negative x-Achse in der Entfernung $\frac{b^2}{2a}$ vom Anziehungsmittelpunkte.

a) Dichte der Nebelmaterie.

§ 6.

Wir gehen nun dazu über, die Dichte der Nebelmaterie in einem beliebigen Punkte der Umgebung der Sonne zu bestimmen. Sämtliche Hyperbeläste, deren Asymptoten von der x-Achse dieselbe Entfernung b besitzen, bilden eine Rotationsfläche F , deren Achse die x-Achse ist; zu der Entfernung $b + \Delta b$ gehöre die Rotationsfläche F' . Kein Nebelteilchen, welches zwischen F und F' liegt, kann bei seiner Annäherung an die Sonne aus dem Zwischenraum zwischen F und F' heraustreten; ebenso wenig kann ein fremdes Teilchen in den Zwischenraum zwischen F und F' eintreten. Denkt man sich um den Anziehungsmittelpunkt beliebige Kugelflächen beschrieben, so dringt also durch die von den Flächen F und F' aus ihnen herausgeschnittenen Kugelzonen in derselben Zeit überall dieselbe Menge Nebelmaterie. Es sei $\Delta \varphi$ die Differenz der Koordinatenwinkel, welche zu den beiden, die Flächen F und F' erzeugenden, in derselben Ebene E liegenden Hyperbelästen bei übereinstimmendem r gehören.



Figur 1.

Dann ist die Breite der aus der Kugeloberfläche mit dem Radius r herausgeschnittenen Zone gleich $r \Delta \varphi$. In der Zeit dt eilt die Materie um die Strecke ds weiter und beschreibt dabei in jeder Ebene E ein Parallelogramm, dessen Inhalt gleich $-r \Delta \varphi dr$ ist (Figur 1). Bedeutet δ die Dichte der Nebelmaterie an dem betr. Orte, so ist hiernach die Menge der in der Zeit dt durch

die Kugelzone eilenden Materie gleich

$$-2\pi y \delta r \Delta \varphi dr.$$

In der Zeiteinheit erlangt sie also den Wert

$$\Delta m = -2\pi y \delta r \frac{dr}{dt} \Delta \varphi.$$

Die Gleichungen der erzeugenden Hyperbeln lauten

$$r = \frac{p}{1 - \varepsilon \cos(\varphi + \varphi_0)}; \quad r' = \frac{p'}{1 - \varepsilon' \cos(\varphi' + \varphi'_0)}.$$

Schreibt man $\varphi' = \varphi + \Delta \varphi$, $\varphi'_0 = \varphi_0 + \Delta \varphi_0$, so folgt aus ihnen für gleiches r

$$\left(1 - \frac{p}{r}\right) \frac{1}{\varepsilon} - \left(1 - \frac{p'}{r}\right) \frac{1}{\varepsilon'} = \sin(\varphi + \varphi_0). \quad (\triangle \varphi + \triangle \varphi_0).$$

und hieraus

$$\triangle \varphi = -\triangle \varphi_0 - \frac{\delta \left[\left(1 - \frac{p}{r}\right) \frac{1}{\varepsilon} \right]}{\delta b} \frac{\triangle b}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{p}{r}\right)^2 \frac{1}{\varepsilon^2}}}.$$

Nun ist $\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{b}{a}$, also

$$\triangle \varphi_0 = \frac{\cos^2 \varphi_0}{a} \triangle b = \frac{a \triangle b}{e^2}.$$

Ferner ist, da $p = \frac{b^2}{a}$ und $\varepsilon = \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}}$,

$$\frac{\delta \left[\left(1 - \frac{p}{r}\right) \frac{1}{\varepsilon} \right]}{\delta b} = -\frac{b}{re^3} (ar + 2a^2 + b^2) = -\frac{b}{re^2} (\xi + 2e).$$

Endlich hat man noch

$$\sqrt{1 - \left(1 - \frac{p}{r}\right)^2 \frac{1}{\varepsilon^2}} = \frac{\eta}{r}$$

und

$$\frac{dr}{dt} = -\sqrt{\frac{2kM}{r} + \beta - \frac{a^2}{r^2}} = -\frac{ec\eta}{br}.$$

Mit Hilfe dieser Werte erhält man nach einigen leichten Reduktionen

$$\triangle m = \frac{2\pi cy\delta}{b} (2b - y) \triangle b.$$

In grosser Entfernung von der Sonne ist $y = b$, $\delta = \delta_0$, also

$$\triangle m = 2\pi cb\delta_0 \triangle b.$$

Es besteht demnach die Gleichung

$$\frac{\delta_0}{\delta} = \frac{y}{b} \left(2 - \frac{y}{b}\right).$$

Der für $\frac{\delta_0}{\delta}$ gefundene Wert nimmt von $\frac{y}{b} = 0$ bis $\frac{y}{b} = 1$ beständig

zu. Da bei der Annäherung eines Nebelteilchens an die Sonne y kleiner wird, so vergrössert sich also die Dichte. Es ist

$$\frac{y}{b} = \frac{a\eta}{be} - \frac{\xi}{e} = \frac{a}{e} \sqrt{\left(\frac{r+a}{e}\right)^2 - 1} - \frac{ar - b^2}{e^2}.$$

Betrachtet man r als konstant, b als veränderlich, so findet man leicht, dass $\frac{y}{b}$, solange η positiv ist, beständig abnimmt, wenn b zunimmt. Auf der Kugeloberfläche mit dem Radius r ist der

Quotient $\frac{\delta_0}{\delta}$ also um so grösser, je näher das betr. Nebelteilchen der x-Achse liegt. Die geringste Dichte besitzen hier nach die Nebelmassen, welche sich in der x-Achse der Sonne nähern.

Für sie hat, da $b=0$, $e=a$ ist, $\frac{y}{b}$ den Wert

$$\frac{1}{a} (\sqrt{r^2 + 2ra} - r).$$

Man erhält dann

$$\frac{1}{2} \frac{\delta_0}{\delta} = \left(1 + \frac{r}{a}\right) \sqrt{\frac{r}{a} \left(2 + \frac{r}{a}\right)} - \frac{r}{a} \left(2 + \frac{r}{a}\right)$$

und hieraus ferner

$$\frac{\delta}{\delta_0} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 + \frac{r}{a}}{\sqrt{\frac{r}{a} \left(2 + \frac{r}{a}\right)}} + 1 \right].$$

β) Das Absorptionsgesetz.

§ 7.

Wenn das Gesetz, welches die Absorption der Wärmestrahlen in Gasen regelt, bekannt wäre, so würden wir nunmehr imstande sein, für die Grösse der Absorption, welche die Wärmestrahlung der Sonne im Innern des Nebels erleidet, einen Minimalwert zu bestimmen. Bis jetzt ist aber ein für Gase geltendes allgemeines Absorptionsgesetz noch nicht aufgestellt worden. Wir wollen daher versuchen, auf Grund bestimmter Annahmen, die sich den, allerdings ziemlich dürftigen, Beobachtungsergebnissen anschliessen, ein solches Gesetz mathematisch zu formulieren. Zunächst machen wir die Annahme, dass, ebenso wie bei homogenen festen und flüssigen Körpern, auch bei Gasen die Intensitäten der durchgelassenen Wärmestrahlen im geometrischen Verhältnisse abnehmen, wenn der durchlaufene Weg im arithmetischen Verhältnisse zunimmt. Ferner nehmen wir an, dass die Absorption einer bestimmten Gasmenge, welche in einer der Länge nach durchstrahlten Röhre eingeschlossen ist, unverändert bleibt, wenn durch Verkürzen oder Verlängern der Röhre die Dichte vergrössert oder verkleinert wird.¹⁾ Das Absorptionsgesetz lautet dann

$$i = J e^{-\lambda \delta x},$$

¹⁾ Nach sehr genauen, mit Kohlensäure angestellten Versuchen Angströms (Drudes Annalen, 6. 163. 1901) ist diese Annahme nicht genau erfüllt. Eine Röhre von 4 m Länge absorbierte bei 1 Atmosphäre Druck 13,2%, eine Röhre von 1 m Länge bei 4 Atm. Druck 16,2% der auffallenden Wärmestrahlen. Dieser Unterschied ist ziemlich gross; aber da die obige Annahme um so genauer erfüllt ist, je geringer die Dichte der Gasmasse ist, so darf sie bei den im Nebel vorliegenden äusserst geringen Dichten als richtig gelten.

wo δ die Dichte des Gases, x den Weg des Wärmestrahls im Innern desselben und λ eine von der Natur des Gases und der Wellenlänge des Wärmestrahls abhängende Konstante bedeutet. Das angegebene Gesetz entspricht den Beobachtungsergebnissen Tyndalls, nach welchen die Absorption der Wärmestrahlen innerhalb einer mit Gas angefüllten Röhre von bestimmter Länge bei geringen Dichten des Gases der Dichte proportional gesetzt werden kann, bei grösserer Dichte aber weniger schnell zunimmt.

Der Wert von λ hängt, wie gesagt, ausser von der Natur des Gases auch von der Wellenlänge der Wärmestrahlen ab. Da aber bei der Wärmestrahlung der Sonne die Wellen mit längerer und mit kürzerer Wellenlänge nicht voneinander gesondert sind, so kann für λ nur ein mittlerer Wert angegeben werden. Der für atmosphärische Luft gültige Wert von λ lässt sich auf folgende Weise bestimmen. Da sich der Wert δx nicht ändert, wenn sich eine Luftmenge in der Richtung des Wärmestrahls ausdehnt oder zusammenzieht, so ist die von der Lufthülle der Erde ausgeübte Absorption gleich derjenigen, welche die Luftmasse hervorbringen würde, wenn sie gleichmässig dicht über der Erdoberfläche lagerte. Bei 760 mm Quecksilberdruck ist die Dichte δ' der Luft gleich $1,293 \cdot 10^{-3}$ [g cm⁻³]; für die Höhe der gleichmässig dichten Atmosphäre von der Dichte δ' findet man leicht den Wert $h = 8$ km. Die durch Absorption in der Erdatmosphäre verloren gehende Wärmemenge beträgt wahrscheinlich etwas mehr als die Hälfte der eingestrahnten Wärmemenge. Es ist also näherungsweise $\lambda = \frac{1}{h \delta'}$. Bei der Gasart des Nebels sei die auf dem Wege $d x$ absorbierte Wärmemenge ϵ mal so gross als bei der atmosphärischen Luft von derselben Dichte; dann lautet das Absorptionsgesetz für die Nebelmaterie

$$\log \frac{J}{i} = \epsilon \frac{x \delta}{h \delta'}$$

Schreibt man dr für x , bezeichnet den Sonnenradius mit ρ und bedenkt, dass die Wärmestrahlen der Sonne sich kugelförmig ausbreiten, so erhält man hieraus für die Intensität der Strahlen, welche der Richtung der positiven x -Achse folgen, in der Entfernung r_0 von der Sonne die Gleichung

$$\frac{J}{i} = \left(\frac{r_0}{\rho}\right)^2 e^{\frac{\epsilon}{h \delta'} \int_{\rho}^{r_0} \delta dr}$$

Setzt man für δ seinen oben berechneten Wert, so findet man

$$\int \delta dr = \frac{a \delta_0}{2} \left(\sqrt{\frac{r}{a} \left(2 + \frac{r}{a} \right)} + \frac{r}{a} \right).$$

Die Wurzelgrösse $\sqrt{2 + \frac{r}{a}}$ ändert sich, wenn c verschiedene Werte

annimmt, nur wenig. Für $c=0$ hat sie den Wert 1,414, für $c=18$ km/sec den Wert 1,536. Wählt man diesen letzten Wert, als den wahrscheinlichsten, so erhält man endlich, da $r_e = 210 \rho$ ist,

$$\frac{J}{i} = \left(\frac{r_e}{\rho}\right)^2 \epsilon \sigma; \quad \sigma = \epsilon \delta_0 10^{10} \left(\frac{c_e}{c} + 0,7\right) [\text{g}^{-1} \text{cm}^3].$$

Diese Gleichung bestimmt, nach allem Gesagten, einen Minimalwert der Absorption, welche die zwischen der Sonne und der Erde befindliche Nebelmaterie auf die Wärmestrahlung der Sonne ausübt. Wenn wir die der Erde zufließende Wärmemenge bestimmen wollen, so ist diese Formel jedoch nicht ohne weiteres anwendbar; denn die auf die Sonne stürzende Nebelmaterie bewirkt, wie schon bemerkt wurde, eine Vergrößerung ihres Wärmeinhalts. Wir müssen daher zuerst feststellen, welche Wärmemenge durch den Fall der Nebelmaterie auf die Sonne erzeugt wird.

γ) Die durch den Fall der Nebelmaterie auf die Sonne erzeugte Wärmemenge.

§ 8.

Es sind zwei Fälle zu unterscheiden. Entweder nimmt man an, dass die Nebelteilchen einzeln frei beweglich seien, oder dass sie, trotz ihrer grossen Zerstreuung im Raume, sich gegenseitig in ihrer Bewegung nicht stören. Zur Begründung der ersten Annahme würde sich die kinetische Theorie der Gase mit ihren Folgerungen über die Grösse und den Abstand der Moleküle heranziehen lassen; wir neigen jedoch der zweiten Annahme als der wahrscheinlicheren zu.¹⁾

Bei der ersten Annahme lässt sich die Menge der auf die Sonne stürzenden Nebelmaterie leicht berechnen. Offenbar sind nur diejenigen Nebelteilchen imstande, sich mit der Sonnenmasse zu vereinigen, deren Periheldistanz q kleiner als der Sonnenradius ρ ist. Da

$$q = e - a = \sqrt{a^2 + b^2} - a$$

ist, so lautet die Bedingung

$$\sqrt{a^2 + b^2} < a + \rho.$$

Hieraus folgt

$$b^2 < \rho^2 \left(1 + \frac{2a}{\rho}\right).$$

¹⁾ In „Problem etc.“ S. 206 ist die erste Annahme zugrunde gelegt worden (Abschnitt 2). Die Rechnung des Abschnittes 1 daselbst geht von der irrthümlichen Annahme aus, dass das Wärmeäquivalent der kinetischen Energie, welche ein auf die Sonne stürzendes kg Masse besitzt, $4,5 \cdot 10^7$ Grammkalorien (anstatt Kilogrammkalorien) sei; das Resultat würde jedoch ähnlich lauten, wenn man sich anstatt auf die Saturnsbahn auf die Erdbahn bezöge. Allein, da auf die im Laufe der Zeit eintretende mit der Annäherung an die Sonne verbundene Verdichtung der Nebelmaterie keine Rücksicht genommen wurde, so ist die ganze Argumentation ungenau. Die exakte Begründung liefert erst der vorliegende Aufsatz.

Setzt man für a seinen Wert $\frac{kM}{c^2}$ und beachtet, dass $kM = r_e c_e^2$ ist, wo r_e den Erdbahnradius, c_e die mittlere lineare Revolutionsgeschwindigkeit der Erde bedeutet, so erhält man

$$b^2 < \rho^2 \left[1 + \frac{2r_e}{\rho} \left(\frac{c_e}{c} \right)^2 \right].$$

Da $r_e = 210 \rho$, $c_e > c$ ist, so kann die Grösse 1 in der Klammer vernachlässigt werden. Alle Nebelteilchen, für welche die angegebene Bedingung erfüllt ist, nähern sich der Sonne in einem zylindrischen Raume, dessen Achse mit der positiven x -Achse zusammenfällt und dessen Grundkreisradius b ist. Bezeichnet δ_0 , wie früher, die mittlere Dichte der Nebelmaterie in grosser Entfernung von der Sonne, so eilt dieser in jeder Sekunde in dem angegebenen Raume die Masse $b^2 \pi c \delta_0$ [sec] entgegen. An jedem Tage vereinigt sich also, da $c_e = 30$ km/sec ist, mit der Sonne die Masse

$$m = 86400 b^2 \pi c \delta_0$$
 [sec] = $86400 \cdot 2 \cdot 210 \cdot 30 \frac{c_e}{c} \rho^2 \pi \delta_0$ [km].

Hiernach fällt auf 1 qcm der Sonnenoberfläche durchschnittlich an einem Tage die Masse

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot 86400 \cdot 210 \cdot 30 \frac{c_e}{c} \delta_0$$
 [cm² km] = $2,7 \cdot 10^{13} \frac{c_e}{c} \delta_0$ [cm³].

Sind die Nebelteilchen nicht frei beweglich, so vermag die Sonne eine grössere Menge derselben auf ihre Oberfläche herabzuziehen. Da keine der durch die x -Achse gelegten Ebenen vor einer andern bevorzugt ist, so darf in diesem Falle angenommen werden, dass jedes Teilchen beim Durchschreiten der negativen x -Achse mit einem andern, von der entgegengesetzten Seite kommenden, in genau symmetrischer Bahn laufenden Teilchen zusammentreffe. Beide büssen durch den Zusammenstoss einen Teil ihrer Bewegungsenergie ein. Uebersteigt der Verlust eine gewisse Grenze, so sind die Teilchen nicht imstande, sich der Anziehung der Sonne zu entziehen; sie stürzen also auf die Oberfläche derselben. Wir wollen ihre Menge bestimmen.

Beim Zusammenstoss bleibt die in die Richtung des Radiusvektors fallende Geschwindigkeitskomponente erhalten¹⁾; sie hat den Wert

$$\frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{2kM}{r} + \beta - \frac{\alpha^2}{r^2}}.$$

Ein Körper, der sich in gerader Linie von der Sonne entfernt und erst in unendlicher Entfernung von derselben zur Ruhe kommt,

¹⁾ Da hier eigentlich nicht von einzelnen Teilchen, sondern von räumlich ausgedehnten Massen die Rede ist, so braucht die Frage, ob der Stoss ein zentraler oder schiefer sei, ebensowenig diskutiert zu werden, wie die andere, ob die Teilchen elastisch oder unelastisch seien.

besitzt die Geschwindigkeit $\sqrt{\frac{2 k M}{r}}$. Demnach besteht für die auf die Sonne sinkenden Teilchen die Bedingung

$$\frac{2 k M}{r} + \beta - \frac{\alpha^2}{r^2} < \frac{2 k M}{r}.$$

Hieraus folgt

$$\beta < \frac{\alpha^2}{r^2} \text{ oder } c^2 < \frac{c^2 b^2}{r^2} \text{ oder } b > r.$$

Da die Teilchen in der Entfernung $x_0 = \frac{b^2}{2a}$ vom Anziehungsmittelpunkte die x-Achse durchschreiten, so erhält man ferner

$$b > \frac{b^2}{2a} \text{ oder } b < 2a \text{ und } x_0 < 2a.$$

Hiernach kommen sämtliche Teilchen mit der Sonne zur Vereinigung, welche in Hyperbeln laufen, deren halbe Nebenachse $b < 2a$ ist. In dem zylindrischen Raume mit dem Grundkreisradius b eilt der Sonne in jeder Sekunde die Masse $b^2 \pi c \delta_0$ [sec] entgegen. An jedem Tage vereinigt sich also mit der Sonne die Masse

$$m = 86400 b^2 \pi c \delta_0$$
 [sec] = 86400. $4 a^2 \pi c \delta_0$ [sec].

Setzt man wieder

$$a = \frac{k M}{c^2}, \quad k M = r_e c_e^2,$$

so erhält man

$$m = 86400 \cdot 30 \cdot 4 r_e^2 \pi \delta_0 \left(\frac{c_e}{c}\right)^3$$
 [km].

Die Nebelmaterie vereinigt sich mit der Sonne auf der Rückseite derselben. Da aber infolge der Rotation immer neue Teile der Sonnenoberfläche die Rückseite durchwandern, so soll angenommen werden, die Nebelmaterie verteile sich gleichmässig auf die ganze Oberfläche.¹⁾ Dann findet man, dass auf 1 qcm der Oberfläche täglich die Masse

$$\mu = 86400 \cdot 30 \left(\frac{r_e}{\rho}\right)^2 \left(\frac{c_e}{c}\right)^3 \delta_0$$
 [cm² km] = 1,14 · 10¹⁶ $\left(\frac{c_e}{c}\right)^3 \delta_0$ [cm³]

fällt.

¹⁾ Im allgemeinen wird die Sonnenachse schief zur relativen Bewegungsrichtung der Sonne und des Nebels stehen. Dann fällt auf die Umgebung des der positiven x-Achse zugewandten Sonnenpols gar keine Nebelmaterie (abgesehen von derjenigen, welche von der Sonne unmittelbar aufgefangen wird). Nur wenn die Achse der Sonne senkrecht auf der Bewegungsrichtung steht, ist kein Teil der Oberfläche vor den aus der Richtung der negativen x-Achse herabstürzenden Nebelmassen geschützt, doch fällt auch bei dieser Voraussetzung auf die Flächeneinheit in den Aequatoralgegenden mehr Nebelmaterie als in den höheren Breiten. Hiernach ist die obige Annahme einer gleichmässigen Verteilung der Nebelmaterie auf die ganze Oberfläche niemals erfüllt; da aber heftige Konvektionsströme die erzeugte Wärme auch in die Gegenden führen werden, welche weniger Materie empfangen oder von ihrem Falle gänzlich verschont bleiben, so ist sie wenigstens näherungsweise richtig.

Eine aus unendlicher Entfernung auf die Sonne stürzende Masse besitzt die Endgeschwindigkeit

$$\sqrt{\frac{2 k M}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 r_e c_e^2}{\rho}} = c_e \sqrt{420}.$$

Die von einem g erzeugte Wärmemenge beträgt also, wenn das mechanische Aequivalent einer Kilogrammkalorie zu 430 mkg angenommen wird, in Grammkalorien

$$\frac{1}{2} \frac{420 c_e^2}{430 g} [m^{-1}] = 4,5 \cdot 10^7.$$

Für die von 1 qcm der Sonnenoberfläche in einer Minute ausgestrahlte Wärmemenge findet man, wenn 2,5 als Wert der Solar-konstante an den Grenzen der Erdatmosphäre angenommen wird, den Wert

$$2,5 \left(\frac{r_e}{\rho}\right)^2 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ g-kal.}$$

Hiernach müssten, um die von der Sonne ausgestrahlte Wärmemenge zu erzeugen, auf jedes qcm der Sonnenoberfläche täglich 3,7 g Masse fallen. Bei der Annahme, dass die Nebelteilchen frei beweglich seien, fällt nach unserer früheren Rechnung auf 1 qcm der Sonnenoberfläche täglich die Masse

$$\mu = 2,7 \cdot 10^{13} \frac{c_e}{c} \delta_0 [\text{cm}^3].$$

Die durch sie erzeugte Wärmemenge ist also das

$$7,3 \cdot 10^{12} \frac{c_e}{c} \delta_0 [\text{g}^{-1} \text{cm}^3]$$

-fache der gegenwärtig von der Sonne ausgestrahlten Wärmemenge. Bei der zweiten Annahme, dass die Teilchen nicht frei beweglich seien, findet man mit Hülfe des für μ berechneten Wertes in ähnlicher Weise für die durch die fallende Nebelmaterie erzeugte Wärmemenge das

$$3 \cdot 10^{15} \left(\frac{c_e}{c}\right)^3 \delta_0 [\text{g}^{-1} \text{cm}^3]$$

-fache der gegenwärtig von der Sonne ausgestrahlten Wärmemenge.

δ) Grösse der Absorption.

§ 9.

Es lässt sich zwar zeigen,¹⁾ dass die durch den Sturz der feinen Nebelmaterie erzeugte Wärme nicht notwendig zu einer der

¹⁾ Die ungeheure Geschwindigkeit [mehr als 600 km/sec], mit der die Nebelmaterie in die Sonnenatmosphäre eindringt, bewirkt, dass sie nicht schon in den äussersten dünnen Atmosphärenschichten zur Ruhe kommt, sondern bis in grössere Tiefen derselben vordringt. Besonders an der Stelle, wo die Materie des dichteren Schweißes auf die Sonne sinkt, muss sie sich, da immer neue Massen nachdrängen, keilförmig ins Innere der Sonne

erzeugten Wärme entsprechenden Erhöhung der Oberflächentemperatur der Sonne, und infolge davon, dem Stefan'schen Strahlungsgesetze gemäss, zu einer Vergrösserung ihrer Wärmestrahlung führen müsse; aber trotzdem erscheint die Annahme, dass nur dann auf der Erde eine Abkühlung eintreten könne, wenn die durch die fallende Nebelmaterie erzeugte Wärmemenge keinen nennenswerten Betrag erreicht, als die wahrscheinlichere; aus unseren späteren Untersuchungen [§ 10] wird ausserdem hervorgehen, dass sie, wenigstens bei der diluvialen Eiszeit, allein in Frage kam. Aus den am Schlusse des vorigen § für die erzeugte Wärme hergeleiteten Ausdrücken folgt dann, dass bei der Annahme freier Beweglichkeit der Teilchen die Nebeldichte ϵ_0 kleiner als 10^{-13} [g cm⁻³], bei der Annahme nicht freier Beweglichkeit kleiner als 10^{-16} [g cm⁻³] angenommen werden müsse. Der am Schlusse des § 7 angegebene Ausdruck lässt jedoch erkennen, dass bei diesen geringen Werten der Nebeldichte die Absorption in der Nebelmaterie nur dann einen bemerkbaren Betrag erreichen könne, wenn im ersten Falle $\epsilon > 30$, im zweiten Falle $\epsilon > 30000$, die Diathermanität der Nebelmaterie also beträchtlich geringer, als die der atmosphärischen Luft, im zweiten, wahrscheinlicheren, Falle sogar noch geringer als die der Kohlensäure vorausgesetzt würde. Es ist aber nicht erlaubt, diese Annahme zu machen. Denn wenn es auch keinem Bedenken unterliegen dürfte, die Diathermanität der Nebelmaterie so gross oder, wegen des Vorkommens von Metaldämpfen in derselben, etwas kleiner als diejenige der atmosphärischen Luft anzunehmen, so würde unsere Theorie doch, falls sie bei der Nebelmaterie wirklich eine fast hunderttausendmal geringere Diathermanität erforderte, als höchst problematisch zu bezeichnen sein. Diese Schwierigkeit ist jedoch nur eine scheinbare; sie lässt sich leicht aus dem Wege räumen.

Es ist unwahrscheinlich, dass in der ganzen Zeit, während welcher die Sonne im Innern des Nebels verweilte, die Fortschreitungsrichtung der Sonne im Nebel unverändert dieselbe geblieben sei. Wir dürfen z. B. annehmen, dass der Nebel

einen Weg bahnen. Dadurch geraten die ganzen äusseren Schichten der Sonne in Aufruhr und Bewegung, und die Nebelmaterie vermischt sich mit ihnen. Die durch den Sturz erzeugte Wärme wird infolge davon nicht in den äussersten Atmosphärenschichten aufgespeichert, sondern teilt sich einer grösseren Masse mit; diese kann dann natürlich nur eine verhältnismässig geringe Temperaturerhöhung erfahren. Der grösste Teil der erzeugten Wärme dient dann vielleicht nur dazu, die Gase der äusseren Sonnenschichten weiter auszudehnen, die potentielle Energie der Sonnenmasse also zu erhöhen und sie dadurch gleichsam auf einen früheren Entwicklungszustand zurückzuführen, womit übrigens, unter der Voraussetzung des adiabatischen Gleichgewichtszustandes im Innern der Sonnenmasse, sogar eine allgemeine Abkühlung derselben verbunden wäre [vergl. A. Ritter, Annalen der Physik und Chemie 1878]. Vielleicht bewirkt die erzeugte Wärme auch eine Zersetzung der in der Sonnenatmosphäre nachgewiesenen chemischen Verbindungen, des Kohlenwasserstoffs, Cyans und Titanoxyds, und wird also als Dissoziationswärme verbraucht. Auf jeden Fall zeigt sich, dass die erzeugte Wärme keineswegs sogleich wieder ausgestrahlt zu werden, und dass, selbst bei beträchtlicher Wärmeerzeugung, die Oberflächentemperatur der Sonne nur eine geringe Steigerung zu erfahren braucht.

eine Art Rotationsbewegung gehabt habe oder dass im Innern desselben Strömungen der Nebelmaterie vorhanden gewesen seien. Wenn sich infolge davon die relative Bewegungsrichtung der Sonne und der Nebelmassen mit der Zeit änderte, so erfuhren die entfernteren Teile des der Sonne folgenden Schweifes verdichteter Nebelmaterie eine seitliche Verschiebung aus der x -Achse; der Schweif nahm also eine gekrümmte Form an. Die feine Nebelmaterie übte dann auf die ferneren Teile des Schweifes bei ihrem Falle nach der Sonne einen seitlichen Widerstand aus und bewirkte, dass sie nicht mehr in gerader Linie zur Sonne stürzten, sondern langgestreckte Ellipsen beschrieben. Sie kamen also nicht sämtlich mit der Sonne zur Vereinigung, sondern eilten teilweise an ihr vorbei, kollidierten vor ihr in der Nähe der x -Achse mit anderen Massen, deren Bahn sich gegen die ihrige neigte, verkleinerten dadurch ihre Geschwindigkeit und stürzten nach der Sonne oder eilten in gestörten Bahnen weiter, so dass die ganze Umgebung der Sonne von einer ziemlich dichten Nebelmaterie erfüllt war, die bei ihrem unaufhörlichen inneren Kampfe immer mehr von ihrer Bewegungsenergie einbüsste, bis sie sich endlich mit der Sonne vereinigte. Wenn die mittlere Dichte dieser chaotischen, tumultuarisch bewegten Nebelmassen eine gewisse Grenze überstieg, so konnte ihre Absorption so gross werden, dass auf der Erde eine Eiszeit entstand.

Noch wirksamer als das genannte war ohne Zweifel ein anderes, die Absorption der Wärmestrahlung der Sonne betreffendes Moment. Ihrer gasartigen Beschaffenheit wegen konnte die Nebelmaterie bei der Vereinigung mit der Sonne nicht bis in grössere Tiefen des eigentlichen Sonnenkörpers vordringen, sondern musste sich grösstenteils mit der Atmosphäre der Sonne vermischen und ihre Dichte vergrössern. Da aber immer neue Nebelmassen mit der Sonne zur Vereinigung kamen, so musste auch die Dichte der Sonnenatmosphäre immer grösser und schliesslich so gross werden, dass ihre Absorption imstande war, die Wärmestrahlung der Sonne in bemerkbarer Weise einzuschränken.

Wenn die ganze auf die Sonne sinkende Nebelmaterie in der Sonnenatmosphäre schweben bliebe, so würde nach einer gewissen Zeit ihre Absorptionswirkung so stark werden, dass nur noch ein geringer Bruchteil der Sonnenwärme die Erde erreichte. Da aber die zur Erde gelangende Wärme immer noch genügte, um wenigstens in den niederen Breiten eine Vegetation hervorzubringen, so muss angenommen werden, dass sich ein Teil der Nebelmaterie aus der Sonnenatmosphäre wieder ausschied. Vielleicht entstanden schwerere chemische Verbindungen, welche allmählich auf die eigentliche Sonnenoberfläche sanken und der Wärmestrahlung der Sonne dann nicht mehr hinderlich waren. Es könnte dabei die Annahme gemacht werden, dass die Sonnenatmosphäre sich anfangs zwar durch Aufnahme neuer Materie mehr und mehr verdichtete, dass aber, wenn ihre Absorption einen gewissen Grad er-

reicht hatte, ein stationärer Zustand eintrat, bei welchem Aufnahme und Abgabe neuer Stoffe ungefähr gleichen Schritt hielt. Es wäre auch denkbar, dass die Sonne den Nebel schon wieder verlassen hatte, bevor der Zeitpunkt gekommen war, wo infolge der eingetretenen grossen Verdichtung der Atmosphäre fast keine Wärme mehr die Erde erreichen konnte. In diesem Falle musste auch nach dem Austritt der Sonne aus dem Nebel die Absorption der Wärmestrahlung in der Sonnenatmosphäre noch fort dauern und die Eiszeit der Erde also verlängert werden. Da aber wenigstens eine langsame Absonderung der Nebelmaterie aus der Atmosphäre angenommen werden darf, so musste die Wärmestrahlung der Sonne doch allmählich zunehmen, bis sie endlich, nach einer schätzungsweise nicht angebbaren Zeit, wieder ihre alte Stärke erreichte. Diese Erklärung könnte herangezogen werden, wenn sich herausstellen sollte, dass der Orionnebel weiter von der Erde entfernt sei, als unsere frühere Rechnung ergab. Vielleicht haben sich die Nebelmassen, welche sich mit der Sonnenatmosphäre vermischten, auch jetzt noch nicht ganz wieder aus ihr niedergeschlagen. Dann würde die Wärme, welche die Erde empfängt, im Wachsen begriffen sein. Auf diese Weise liesse sich vielleicht die fortschreitende Austrocknung grosser Gebiete der Erdoberfläche und der Rückgang vieler Gletscher erklären.

Wir wollen noch die Zeit bestimmen, die verfliessen musste, damit die Absorptionswirkung der Sonnenatmosphäre gross genug geworden war, um die Wärmestrahlung der Sonne auf einen kleineren Betrag zu reduzieren. Wir vernachlässigen die geringe Absorptionswirkung der zwischen der Sonne und der Erde befindlichen der Sonne zustürzenden Nebelmaterie und beziehen die Formel

$$\log \frac{J}{i} = \frac{\epsilon \delta x}{\delta' h}$$

allein auf die Sonnenatmosphäre. Bezeichnen wir mit δx [cm²] die in einem Tage auf 1 qcm der Sonnenoberfläche fallende Masse, so hat diese den auf S. 12 bestimmten Wert μ . Wenn die Nebelmaterie nicht spezifisch schwerer als die Gase der Sonnenatmosphäre ist, so bleibt ihre gesamte Masse der Atmosphäre erhalten und δx [cm²] nimmt also nach einem n-jährigen Aufenthalte der Sonne im Nebel den Wert $365 n \mu$ an. Schreibt man $\delta' = 1,293 \cdot 10^{-3}$ [g cm⁻³], $h = 8$ km, so findet man

$$\log \frac{J}{i} = 4 \cdot 10^{15} \epsilon n \delta_0 \left(\frac{c_e}{c}\right)^3 [\text{g}^{-1} \text{cm}^3] = \tau.$$

Damit die Absorption einen nennenswerten Betrag erreicht, muss τ ein grösserer Bruch sein. Für $\tau = 1$ wird von der früheren Wärmestrahlung schon mehr als $\frac{3}{5}$ absorbiert. Zur Erklärung der Phänomene der diluvialen Eiszeit genügt der Wert $\tau = \frac{1}{15}$. Setzt man diesen Wert in der letzten Gleichung ein, so erhält man

$$n \leq 1,67 \cdot 10^{-17} \left(\frac{c}{c_0}\right)^3 \frac{1}{\delta_0^\varepsilon} [\text{g cm}^{-3}].$$

Nach unseren früheren Untersuchungen muss $\delta_0 < 10^{-16} [\text{g cm}^{-3}]$ sein. Schreibt man $\delta_0 = x \cdot 10^{-16} [\text{g cm}^{-3}]$, and setzt $\varepsilon = 1$, so folgt

$$n \leq \frac{0,036}{x}.$$

Für x dürfte der Wert 10^{-5} bis 10^{-6} eine untere Grenze sein, da sich andernfalls die Sonne sehr grosse Zeitperioden im Nebel aufgehalten haben und aus diesem Grunde wieder, wenigstens wenn die relative Geschwindigkeit der Sonne und des Nebels nicht bedeutend kleiner als 18 km/sec war, eine ungeheure Erstreckung des Nebels angenommen werden müsste. Die mittlere Dichte des Nebels wird also, wenigstens in den peripherischen Teilen, nicht geringer als $10^{-22} [\text{g cm}^{-3}]$ gewesen sein.¹⁾ — Aus geologischen Funden hat man schliessen wollen, dass beim Eintritt der Eiszeit Tiere und Pflanzen Zeit gehabt hätten, sich in wärmere Gegenden zurückzuziehen, dass die Eiszeit also nicht wie eine plötzliche Katastrophe hereinbrach. Dies würde bei unserer Annahme seine Erklärung finden, wenn die Dichte der peripherischen Nebelteile dem Werte $10^{-22} [\text{g cm}^{-3}]$ nahe lag.

ε) Die durch den Fall der Nebelmaterie auf die Erde erzeugte Wärmemenge.

§ 10.

Ebenso wie die Sonne übte auch die Erde auf die Nebelmaterie eine anziehende Wirkung aus und zwang die in ihre Nähe kommenden Massen zum Falle auf ihre Oberfläche. Wenn wir noch imstande sind zu zeigen, dass die gesamte Masse, die mit der Erde während des Durchschreitens des Nebels zur Vereinigung kam, so gering war, dass sie keine grösseren Wirkungen hervorzurufen vermochte, so dürfte kein Punkt, der für die Beurteilung unserer Theorie von Wichtigkeit wäre, unberücksichtigt geblieben sein.

Um die in einer begrenzten Zeit auf die Erde fallende Masse zu bestimmen, machen wir zuerst die Annahme, die Erdbahn stehe senkrecht auf der Bewegungsrichtung der Sonne im Nebel. In diesem Falle sind die Nebelmassen, welche die Erde während ihres jährlichen Umlaufs treffen, stets gleich dicht. Den Wert der Dichte findet man auf folgende Weise. Die Hyperbeln schneiden die y -Achse in dem Punkte

$$y = \frac{b^2}{a + b}.$$

¹⁾ Mit dieser Dichte würde die Sonnenmasse als homogene Kugel einen Radius von 110 000 Erdweiten, d. i. ungefähr die Hälfte der Entfernung von α Centauri, haben. Nach Lord Kelvins Untersuchungen würde sie der Dichte des Aethers, für welche er den Wert $10^{-22} [\text{g cm}^{-3}]$ berechnete, entsprechen (Transact. of the R. S., Ed. 1854).

Bestimmt man aus dieser Gleichung b , bildet $\frac{y}{b}$ und substituiert den erhaltenen Wert in der auf S. 7 für $\frac{\delta_0}{\delta}$ hergeleiteten Gleichung, so erhält man

$$\frac{\delta}{\delta_0} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{y + 2a}{\sqrt{y^2 + 4ay}} \right].$$

Diese Gleichung bestimmt den Wert der Nebeldichte in den y -Achsen. Für $y = r_e$ und $c = 18$ km/sec ist $\delta = 1,45 \delta_0$. Die Geschwindigkeit, welche eine Nebelmasse beim Durchkreuzen der Erdbahn besitzt, hat den Wert

$$v_e = \sqrt{\frac{2kM}{r_e} + c^2} = \sqrt{2c_e^2 + c^2}.$$

Da die Bewegungsrichtungen der Nebelmasse und der Erde aufeinander senkrecht stehen, so ist die Geschwindigkeit V , mit welcher die Nebelmasse der Erde entgegeneilt, gleich

$$V = \sqrt{v_e^2 + c^2} = \sqrt{3c_e^2 + c^2}.$$

Wie aus unseren früheren, die Sonne betreffenden analogen Untersuchungen folgt, vermögen sich die im Rücken der Erde zusammenstossenden Nebelmassen dann der Anziehung der Erde zu entziehen, wenn der Ort ihres Zusammenstosses weiter als

$$2a_e = \frac{2kM_e}{V^2},$$

wo M_e die Masse der Erde bedeutet, vom Mittelpunkte der Erde entfernt ist. Da diese Grösse noch nicht den 23. Teil des Erdradius beträgt, so können sich nur diejenigen Nebelmassen mit der Erde vereinigen, deren Periheldistanz kleiner als der Erdradius ρ_e ist. Der Radius b_e des zylinderförmigen Raumes, innerhalb dessen die Nebelmassen, welche auf die Erde stürzen werden, sich ihr nähern, ergibt sich (vergl. S. 10) aus der Gleichung

$$b_e^2 = \rho_e^2 \left(1 + \frac{2a_e}{\rho_e} \right).$$

Die Nebelmasse, welche in der Zeiteinheit auf die Erde heruntersinkt, ist gleich $b_e^2 \pi V \delta$ [sec]. Auf jedes qcm der Erdoberfläche fällt also in der Zeiteinheit durchschnittlich die Masse

$$\frac{V \delta}{4} \left(1 + \frac{2a_e}{\rho_e} \right) [\text{sec. cm}^2] = 0,26 V \delta [\text{sec. cm}^2].$$

Wählt man $c = 18$ km/sec, so wird $V = 55$ km/sec. Da $\delta < 1,45 \delta_0$ ist, so erhält man hiernach für die in einer Minute auf 1 qcm der Erdoberfläche fallende Masse

$$\mu_e < 1,3 \cdot 10^8 \delta_0 [\text{cm}^3].$$

Die Nebelmaterie dringt in die Erdatmosphäre mit der Geschwindigkeit

$$V_1 = \sqrt{\frac{2kM_e}{\rho_e} + v^2} = c_e \sqrt{3,14 + \left(\frac{c}{c_e}\right)^2}$$

ein. Ist $c = 18$ km/sec, so hat die der kinetischen Energie eines Gramms äquivalente Wärmemenge den Wert

$$\frac{1}{2} \frac{V_1^2}{430 \text{ g}} [\text{m}^{-1}] = 3,66 \cdot 10^5 \text{ g-kal.}$$

Die von μ_e erzeugte Wärmemenge ist also kleiner als $4,6 \cdot 10^{13} \delta_0$ [g⁻¹ cm³] g-kal. Da diese Wärmemenge in den oberen Schichten der Atmosphäre erzeugt wird, so dürfte nur ungefähr die Hälfte derselben gegen die Erdoberfläche, die andere Hälfte aber in den Weltraum ausgestrahlt werden. Nimmt man für die Solarkonstante den Wert 2,5 g-kal an, so wird einem qcm der Erdoberfläche von der Sonne durchschnittlich in jeder Minute die Wärmemenge $\frac{2,5}{4} =$

0,63 g-kal zugestrahlt. Für den zu gross gewählten Wert $\delta_0 = 10^{-16}$ [g cm⁻³] beträgt also die von der Nebelmaterie erzeugte Wärmemenge noch nicht den 270. Teil derjenigen, welche die Erde gegenwärtig von der Sonne erhält. Offenbar kann dieser geringe Betrag keine bemerkbaren Wirkungen hervorrufen.

Wenn die Erdbahn nicht senkrecht auf der x-Achse steht, sondern mit ihr den spitzen Winkel φ bildet, so erkennt man leicht, dass, unter der Voraussetzung gleicher Dichte, weniger Materie auf die Erde fällt als im betrachteten Falle. Da aber, verglichen mit der Dichte in der y-Ebene, die Dichte der Nebelmaterie im Rücken der Sonne schneller zunimmt, als sie, in gleichem Abstände von der Sonne, vor derselben abnimmt, so werden sich die Resultate nur unwesentlich von dem hergeleiteten unterscheiden. Auf eine genauere mathematische Untersuchung können wir daher verzichten. Anders liegen die Verhältnisse jedoch, wenn der Winkel φ so klein ist, dass die Erde den im Rücken der Sonne befindlichen Nebelschweif durchschreitet. Auf diese Möglichkeit werden wir im nächsten § zurückkommen.

Nachdem wir nachgewiesen haben, dass die durch den Fall der Nebelmaterie auf die Erde erzeugte Wärme ihrer Kleinheit wegen vernachlässigt werden kann, bleibt uns noch übrig zu zeigen, dass die mit der Erde zur Vereinigung kommende Gesamtmenge der Nebelmaterie die Zusammensetzung der Erdatmosphäre nicht wesentlich zu ändern vermochte, da andernfalls Pflanzen und Tiere bei den veränderten Lebensbedingungen hätten zugrunde gehen oder doch wenigstens in ihrer Entwicklung empfindlich gestört werden müssen. — Nach unserer früheren Rechnung stürzt in 1 Minute auf jedes qcm der Erdoberfläche durchschnittlich die Masse

$$\mu_e < 1,3 \cdot 10^8 \delta_0 [\text{cm}^3].$$

Für n Jahre ergibt sich hieraus

$$\mu_e^{(n)} < 6,6 \cdot 10^{13} \delta_0 n [\text{cm}^3].$$

Für $\delta_0 = 10^{-17}$ [g cm⁻³] beträgt die Wärmemenge, welche durch die auf die Sonne stürzende Nebelmaterie erzeugt wird, noch ungefähr $\frac{1}{7}$ der von der Sonne ausgestrahlten Wärmemenge; daher dürfte der Wert $\delta_0 = 10^{-17}$ [g cm⁻³] als mittlerer Wert der Dichte der durchschrittenen Nebelmassen noch zu gross gewählt sein. Trotzdem würde, bei diesem Werte von δ_0 , die Menge der auf 1 qcm der Erdoberfläche fallenden Nebelmaterie $\mu_0^{(n)}$ erst in 100 000 Jahren zu dem Werte 6,6 g anwachsen!

Jedes g Wasserstoff der Nebelmaterie vereinigt sich, infolge der beim Falle entstehenden Wärme, mit 8 g Sauerstoff der atmosphärischen Luft zu 9 g Wasser.¹⁾ Da die Atmosphäre über jedem qcm der Erdoberfläche 210 g Sauerstoff enthält, so entzieht jedes pro qcm fallende g Wasserstoff der Atmosphäre rund 4% ihres Sauerstoffgehaltes; es würde also bereits eine wesentliche Aenderung der Zusammensetzung der Atmosphäre herbeiführen. Hieraus dürfen wir schliessen, dass, wenn während des Verweilens der Sonne im Nebel auf 1 qcm der Erdoberfläche mehr als 1 g Nebelmaterie fiel, nicht Wasserstoff den Hauptbestandteil derselben bildete. Ausser Wasserstoff und Helium sind Eisen und Magnesium in Nebelspektren nachgewiesen worden. Allerdings sind die Linien dieser Metalle äusserst schwach; aber daraus darf nicht geschlossen werden, dass die Nebel nur Spuren von ihnen enthielten. Sie könnten sehr wohl die Hauptmasse der Nebel bilden und sich nur deswegen im Spektrum kaum verraten, weil sie bei ihrem grossen Atomgewichte und der niedrigen Temperatur der Nebel nicht imstande sind, Licht auszusenden.²⁾ Bedenkt man, dass die Geologen, um die grosse Dichte der Erde zu erklären, zu der Annahme eines eisernen Erdkerns gedrängt werden, ferner, dass der Hauptbestandteil der Meteormassen Eisen ist, und endlich, dass die Eisenlinien im Spektrum fast aller Sterne anzutreffen sind, so dürfte unsere Vermutung, dass der Hauptbestandteil der Nebelmaterie Eisendämpfe seien, als glaubwürdig erscheinen. 1 g Eisen vereinigt sich jedoch nur mit $\frac{4}{7}$ g Sauerstoff zu Eisenoxyd; es müssten also auf

¹⁾ Da der Sauerstoff nur $\frac{1}{8}$ der atmosphärischen Luft ausmacht, so ist es jedoch auch möglich, dass die Wasserstoffmassen während der Zeit, wo sie ihre kinetische Energie in Wärme verwandeln, nicht genügende Sauerstoffmengen antreffen, um sich mit ihnen zu Wasserdampf zu verbinden. In diesem Falle muss reiner Wasserstoff zurückbleiben. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass die geringen Spuren von Wasserstoff und Helium, die in der Erdatmosphäre nachgewiesen worden sind, und welche auch einen wesentlichen Bestandteil der kosmischen Nebel bilden, aus dem während der Eiszeit durchschrittenen Nebel stammen.

²⁾ Am Rande vieler Nebel hat man einen merkwürdig sternarmen Raum vorgefunden und hieraus schliessen wollen, dass die in der Umgebung des Nebels sichtbaren Sterne zu dem Nebel selbst in Beziehung stünden. Ein solcher Zusammenhang von Sternen und Nebeln ist aber äusserst hypothetisch. Viel näher liegt die Annahme, dass sich die unsichtbaren Gase des Nebels weiter erstrecken als die photographische Platte erkennen lässt und dass sie die Lichtstrahlen der schwachen, hinter dem Nebel stehenden Sterne vollständig absorbieren. Dass der Orionnebel Lichtstrahlen hinter ihm stehender Sterne absorbiert, lässt sich, wie bereits bemerkt wurde, direkt nachweisen.

jedes qcm der Erdoberfläche schon 3,7 g Eisen fallen, wenn sich der Sauerstoffgehalt der Luft auch nur um 1% verringern sollte. Eine wesentliche Aenderung der Zusammensetzung der Atmosphäre würde dadurch nicht herbeigeführt werden. — Es ist hiernach nicht unwahrscheinlich, dass der in tropischen Gegenden weitverbreitete, an Eisenoxyd reiche Lateritboden seinen Eisengehalt der zur Eiszeit auf die Erde gefallenen Nebelmaterie verdankt. Vielleicht hat auch das Eisen des roten Tiefseetons denselben Ursprung. Doch bedürfen diese Vermutungen noch einer näheren Untersuchung.

6. Die Interglazialzeiten.

§ 11.

Die Erklärung der Entstehung der Interglazialzeiten, die allen Theorien über die Eiszeit, abgesehen von der Croll'schen Theorie, die grössten Schwierigkeiten bietet, ergibt sich nach unserer Theorie auf einfache Weise. Wir brauchen zu dem Zwecke nur anzunehmen, dass der durchschrittene Nebel aus mehreren getrennten Teilen bestand, oder dass sich seine Materie wenigstens an einigen Stellen mehr häufte als an anderen. Wenn die Sonne an Stellen gelangte, wo sich keine Nebelmaterie befand, oder wo sie feiner verteilt war, so musste auf der Erde eine Erwärmung eintreten. Diese Erwärmung führte zur Ausbildung der Interglazialzeiten.¹⁾

Man erkennt ohne weiteres, dass unsere Erklärung erlaubt, Interglazialzeiten von beliebiger Anzahl und beliebiger Dauer anzunehmen. Intensitätsunterschiede der Wärmeverhältnisse würden sich dadurch erklären, dass die während der Interglazialzeiten durchschrittenen Stellen des Weltraums nicht gänzlich von aller Nebelmaterie entblösst waren. Es ist offenbar unnötig, der Erklärung noch irgend etwas hinzuzufügen.

Da es für unsere Theorie von Wert ist, alle Möglichkeiten ins Auge zu fassen, auch wenn die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens vielleicht nur gering ist, so wollen wir noch auf eine andere, von der ersten völlig abweichende Erklärung der Interglazialzeiten eingehen, weil ihr immerhin eine gewisse Bedeutung zukommen könnte. Im § 10 wurde gezeigt, dass die Wärmemenge, welche durch die auf die Erde stürzende Nebelmaterie erzeugt wird, nur verschwindend

¹⁾ Findet eine nur langsame Absonderung der Nebelmaterie aus der Sonnenatmosphäre statt, so führt eine Hypothese zum Ziele, die mit der oben aufgestellten in einem gewissen Gegensatze steht. Es zeigte sich früher (S. 13), dass bei einer Nebeldichte 10^{-16} [g cm^{-3}] die durch den Fall der Nebelmassen auf die Sonne erzeugte Wärme das 1,4fache der von der Sonne ausgestrahlten betrage. Nehmen wir nun an, die Dichte des durchschrittenen Nebels habe sich stellenweise dem Werte 10^{-16} [g cm^{-3}] genähert, so konnte beim Eindringen in diese Gebiete die durch den Fall der Nebelmassen erzeugte Wärme der Erde Ersatz für die verlorene Sonnenwärme liefern; d. h. es konnte eine Interglazialzeit entstehen. Sobald die Dichte der durchschrittenen Nebelmassen geringer wurde, musste sie jedoch wieder einer neuen Kälteperiode weichen.

kleine Beträge erreicht, solange δ_0 unter der Grenze 10^{-16} [g cm^{-3}] bleibt und die Ebene der Erdbahn mit der Fortschreitungsrichtung der Sonne im Nebel einen grösseren Winkel bildet. Bedeutend grösser wird jedoch die erzeugte Wärmemenge, wenn die Erde auf ihrer jährlichen Bahn in den der Sonne folgenden Schweif verdichteter Nebelmaterie eintritt. Der Durchmesser des Schweifes in der Entfernung r_e von der Sonne sei νr_e . Da die Geschwindigkeit der auf die Sonne zurückstürzenden Massen des Schweifes hinter der parabolischen zurückbleibt, so ist sie in der Entfernung r_e kleiner als $c_e \sqrt{2}$. Bezeichnet man die mittlere Dichte des Schweifes mit δ , so fällt auf 1 qcm der Erde in der Zeiteinheit durchschnittlich die Masse

$$\mu_e' = \frac{b^2 \pi \nu \delta}{4 \rho^2 \pi} [\text{sec. cm}^2] < \frac{\delta}{4} \sqrt{2 c_e^2 + c_e'^2} [\text{sec. cm}^2] = \frac{\delta c_e}{4} \sqrt{3} [\text{sec. cm}^2].$$

Durch den in der Entfernung r_e von der Sonne gelegten Querschnitt des Schweifes bewegt sich in der Sekunde die Masse

$$\frac{\nu^2 r_e^2 \pi}{4} c_e \sqrt{2} [\text{sec}].$$

Sie ist gleich der in einer Sekunde auf die Sonnenoberfläche fallenden Masse, welche den Wert

$$4 \pi \cdot 30 r_e^2 \delta_0 \left(\frac{c_e}{c}\right)^3 [\text{km}]$$

besitzt (S. 12). Durch Kombination beider Werte findet man

$$\delta = 8 \sqrt{2} \left(\frac{c_e}{c}\right)^3 \frac{\delta_0}{\nu^2}.$$

Setzt man diesen Wert in dem für μ_e' angegebenen Ausdrucke ein, so ergibt sich¹⁾

$$\mu_e' < 2 \sqrt{6} \left(\frac{c_e}{c}\right)^3 \frac{c_e \delta_0}{\nu^2} [\text{sec. cm}^2].$$

Für $c = 18 \text{ km/sec.}$ erhält man

$$\mu_e' < 6,8 \cdot 10^7 \frac{\delta_0}{\nu^2} [\text{cm}^3].$$

Die Endgeschwindigkeit der fallenden Masse ist kleiner als

$$\sqrt{\frac{2 k M_e}{\rho_e} + 3 c_e^2} = c_e \sqrt{3,14},$$

¹⁾ Die meiste Schweifmaterie fängt die Erde in dem Falle auf, wo sie sich durch die Achse des Schweifes hindurchbewegt. Dann braucht sie zum Durchschreiten des Schweifes die Zeit $\frac{\nu r_e}{c_e}$; für die Gesamtmasse der in n Jahren auf 1 qcm der Erdoberfläche stürzende Schweifmaterie erhält man also als Maximalwert, wenn $c = 18 \text{ km/sec}$ gesetzt wird,

$$\mu_e^{(n)} = \frac{\nu r_e n}{c_e} \mu_e' [\text{sec}^{-1}] < 3,4 \cdot 10^{14} \frac{\delta_0 n}{\nu} [\text{cm}^3].$$

die durch 1 g erzeugte Wärmemenge also kleiner als $3,3 \cdot 10^5$ g-kal. Die in jeder Sekunde auf 1 qcm der Erdoberfläche entstehende Wärmemenge ist hiernach $< 2,25 \cdot 10^{13} \frac{\delta_0}{\sqrt{2}} [g^{-1} cm^3] g\text{-kal}$, und in einer Minute kleiner als

$$1,35 \cdot 10^{15} \frac{\delta_0}{\sqrt{2}} [g^{-1} cm^3] g\text{-kal.}$$

Die Hälfte davon wird der Erde selbst zugestrahlt. Wählt man für ν z. B. den Wert $\frac{1}{2}$,¹⁾ so beträgt diese Wärme für $\delta_0 = 10^{-17} [g cm^{-3}]$ bereits $\frac{1}{23}$ derjenigen Wärmemenge, die 1 qcm der Erdoberfläche in einer Minute durchschnittlich von der Sonne erhält. Durchschreitet die Erde den Schweif verdichteter Nebelmaterie, so liegt also die Möglichkeit vor, dass die durch den Fall der Nebelmassen auf die Erde erzeugte Wärmemenge Ersatz für die während dieser Zeit absorbierte Sonnenwärme liefert. Unserer ersten Erklärung der Entstehung der Interglazialzeiten können wir demnach noch eine zweite anreihen. Hatte z. B. die nördliche Erdhalbkugel Winter, während die Erde den Schweif durchschritt, so fing sie mehr von der auf die Sonne zurückstürzenden Nebelmaterie auf als die südliche Halbkugel; ihre Wintertemperatur wurde also verhältnismässig mehr gemildert, als sich die Sommertemperatur der südlichen Halbkugel erhöhte. Ausserdem wurde die Sommertemperatur der südlichen Hemisphäre dadurch herabgedrückt, dass die dichte Materie des Schweifes auf die Wärmestrahlung der Sonne während des südlichen Sommers eine ungleich grössere Absorption ausübte als die feine Nebelmaterie während der übrigen Zeit des Jahres. Aus den angegebenen Gründen wäre es sogar denkbar, dass auf der nördlichen Halbkugel eine völlige Umkehrung der Jahreszeiten eingetreten sei, dass beide Halbkugeln also zu gleicher Zeit Sommer und Winter gehabt hätten. Jedenfalls aber mussten die Glazialphänomene auf der südlichen Halbkugel deutlicher in die Erscheinung treten als auf der nördlichen; hier lag also die Möglichkeit vor, dass eine Interglazialzeit entstand.

Aus unserer ersten Erklärung der Entstehung der Interglazialzeiten würde folgen, dass die Glazial- und Interglazialperioden auf beiden Halbkugeln gleichzeitig eingetreten seien. Im Gegensatz hierzu würde die letzte Erklärung verlangen, dass die Glazialphänomene auf einer Halbkugel in grösserer Stärke hervorgetreten seien als auf der andern, dass die Eiszeit aber von einer Halbkugel auf die andere hinüberwandern konnte, falls die Erdbahn sich so langsam gegen die Schweifrichtung verschob, dass die Rotationsachse der Erde Zeit fand, ihre durch die Anziehung der Sonne und der Planeten hervorgerufene, die Präzession der Tag- und Nachtgleichen verursachende Kegelbewegung ein- oder mehrere Male auszuführen. Wenn sich umgekehrt feststellen liesse, ob Glazial- und Interglazial-

¹⁾ Die Erde braucht dann 1 Monat, um den Schweif im Zentrum zu durchschreiten.

zeiten auf der ganzen Erde gleichzeitig oder auf beiden Halbkugeln abwechselnd eintraten, so würde man also zwischen den Erklärungen eine Wahl treffen können.

7. Die paläozoische Eiszeit.

§ 12.

Es ist ein Vorzug unserer Theorie, dass sie sich auch auf die paläozoische Eiszeit ohne weiteres anwenden lässt. Da Nebel im Weltraum bekanntlich in grosser Menge vorhanden sind, so kann innerhalb der Jahrmillionen, welche für die Entwicklung unseres Sonnensystems in Frage kommen, der Eintritt desselben in einen Nebel offenbar mehrmals stattgefunden haben. Für alle anderen Eiszeittheorien aber gestaltet sich die Erklärung der Entstehung der paläozoischen Eiszeit äusserst schwierig. Denn letzten Endes gehen sie sämtlich auf die Annahme einer geringen, durch kosmische oder tellurische Verhältnisse verursachten Aenderung der Strahlungsintensität der Sonne zurück; es ist aber ohne Zweifel rätselhaft, wie auf der Erde eine Eiszeit entstehen konnte, als die Strahlungsintensität der Sonne so gross war, dass noch lange Zeit nach der paläozoischen Vergletscherung sich auf der Erde nicht einmal nach der geographischen Breite abgestufte klimatische Zonen herausbilden konnten.

Die Spuren der paläozoischen Eiszeit sind vorwiegend auf der südlichen Halbkugel und in den Aequatorealgegenden anzutreffen, und gewisse Anzeichen scheinen darauf hinzudeuten, dass die nördliche Halbkugel sich noch längere Zeit eines warmen Klimas erfreute, als auf der südlichen schon die Eiszeit ihre Herrschaft angetreten hatte. Allerdings ist diese Annahme recht zweifelhaft, und zwar um so mehr, als die ungeheuren, auf der nördlichen Halbkugel vorhandenen Konglomeratablagerungen des Rotliegenden, die man bis jetzt grösstenteils als Uferbildungen betrachtete, ihres moränenartigen Charakters wegen auf einen glazialen Ursprung schliessen lassen; wenn sich aber die Vermutung, dass in der paläozoischen Glazialperiode nur die südliche Halbkugel vereiste, während die nördliche grösstenteils verschont blieb, wirklich bestätigen sollte, so würde die im vorhergehenden § behandelte zweite Hypothese über die Entstehung der Interglazialzeiten mit Nutzen verwandt werden können. Die günstigeren Wärmeverhältnisse der nördlichen Halbkugel würden sich dann dadurch erklären, dass die Erde zu ihrer Winterszeit den Nebelschweif durchschritt. In diesem Falle fing sie mehr Nebelmaterie auf und bekam daher auch einen grösseren Wärmezuwachs als die südliche Halbkugel, die in dem Schweife einen kühlen Sommer gehabt haben dürfte.

Eine andere Annahme freilich erklärt den Zeit- und Intensitätsunterschied der paläozoischen Glazialphänomene auf den beiden Halbkugeln noch besser als die im vorigen Abschnitte diskutierte. Diese ist nur dann anwendbar, wenn der Schweif eine ziemlich

beträchtliche Dicke besass, und es ist fraglich, ob sie so bedeutend war, dass die beim Durchschreiten des Schweifes erzeugte Wärme hinreichte, auf die Temperatur des ganzen Sommers bestimmend einzuwirken.

Mehrere Anzeichen lassen darauf schliessen, dass die paläozoische Eiszeit mit viel grösserer Gewalt ihre Wirkungen äusserte als die diluviale Eiszeit. Die an vielen Stellen gefundenen, ausserordentlich massigen Moränenablagerungen können nur durch eine Vereisung grössten Massstabes entstanden sein. Wenn die Eishülle der südlichen Halbkugel sich bis in die Aequatorgegend und über sie hinaus erstreckte, so darf ohne weiteres geschlossen werden, dass die Wärmestrahlung der Sonne fast vollkommen durch die Absorption der Nebelmaterie unterdrückt wurde. Die Wärme, welche auf der nördlichen Halbkugel den Fortbestand der Pflanzenwelt ermöglichte, konnte dann nur durch die Nebelmaterie erzeugt werden, welche unmittelbar auf die Erde stürzte. Wenn wir nun die Annahme, dass die Erde den der Sonne folgenden Schweif verdichteter Nebelmaterie durchschritten habe, fallen lassen wollen, so müssen wir der Dichte der Nebelmaterie, damit die durch ihren Fall auf die Erde erzeugte Wärme den erforderlichen Betrag erreiche, einen grösseren Wert beilegen. Der Minimalwert der Nebeldichte lässt sich leicht bestimmen. Nach unseren früheren Rechnungen (S. 19) beträgt die durch die fallende Nebelmaterie in einer Minute erzeugte Wärmemenge für jedes qcm der Erdoberfläche weniger als

$$4,6 \cdot 10^{13} \delta_0 [g^{-1} cm^3] \text{ g-kal.}$$

Da die Erdoberfläche 4mal so gross ist, als ein grösster Kreis der Erde, so beträgt die Wärme, welche auf einem in senkrechter Richtung von der fallenden Materie getroffenen qcm erzeugt wird, das 4fache des angegebenen Wertes; doch wird nur die Hälfte davon gegen die feste Erdoberfläche ausgestrahlt. Soll die durch die Nebelmaterie erzeugte Wärme die Sonnenwärme ersetzen, so besteht also, wenn 2,5 als Solarkonstante angenommen wird, die Bedingung

$$2,4,6 \cdot 10^{13} \delta_0 [g^{-1} cm^3] > 2, 5.$$

Hieraus folgt

$$\delta_0 > 2,7 \cdot 10^{-14} [g \text{ cm}^{-3}].$$

Bei dieser Dichte würde die durch den Fall der Nebelmassen auf die Sonne erzeugte Wärmemenge $83 \left(\frac{c_e}{c}\right)^3$ mal so gross¹⁾ als die gegenwärtig von der Sonne ausgestrahlte, also, auch noch für grössere Werte von c , ein Vielfaches der gegenwärtigen sein. Dafür, dass unserer Annahme gemäss, diese beträchtliche Wärmemenge für die Erde unwirksam blieb, lassen sich mehrere Gründe anführen.

¹⁾ Setzt man in dem auf S. 12 für μ berechneten Ausdrücke für δ_0 den angegebenen Wert, so findet man $\mu = 308 \left(\frac{c_e}{c}\right)^3 [g]$. Die gegenwärtige Sonnenwärme würde erzeugt werden, wenn auf jedes qcm der Sonnenoberfläche täglich 3,7 g Masse fielen (S. 13). Durch Division erhält man den obigen Wert.

Erstens war es möglich, dass die fallende Nebelmaterie verhältnismässig tief in die Sonnenmasse eindrang, die beim Fall erzeugte Wärme also einer grösseren fremden Masse mittheilte und diese demnach nur wenig erwärmte (vergl. die Anmerkung auf S. 13); zweitens wurde die Absorptionswirkung der zwischen der Sonne und der Erde befindlichen Nebelmaterie vielleicht dadurch verstärkt, dass die zur Sonne zurückstürzenden Massen des Schweifes teilweise an ihr vorbeieilten, untereinander kollidierten und die Sonne wie eine schützende Hülle umgaben (vergl. S. 14 f.); endlich konnte drittens die Absorptionswirkung der Nebelmaterie wegen der in ihr enthaltenen Metaldämpfe grösser als die der atmosphärischen Luft sein (vergl. § 4).

Wir machen nun weiter die einfache Annahme, dass die Erdachse mit ihrem Nordpole ungefähr nach dem Apex der Sonnenbewegung zeigte. Da die Erdachse sich nur um $23\frac{1}{2}^{\circ}$ gegen die Senkrechte auf der Erdbahn neigt und die Aenderungen der Neigung zwischen engen Grenzen [das Intervall beträgt nicht mehr als 7°] bleiben, so bildete die Ebene der Erdbahn mit der Bewegungsrichtung der Sonne einen ziemlich grossen Winkel. Die Nebelmassen eilten dann der Erde mit einer Geschwindigkeit entgegen, welche grösser als $c_e \sqrt{3}$ war (vergl. S. 19). Eine leichte Rechnung¹⁾ zeigt nun, dass die Anziehung der Erde die mit der Geschwindigkeit $V = c_e \sqrt{3}$ sich ihr nähernden Massen nur unbedeutend aus ihrer fast geradlinigen Bahn abzulenken vermochte, dass sie demnach fast sämtlich auf die Vorderseite der Erde fielen, und dass die Rückseite, abgesehen von einem ungefähr $1\frac{1}{3}^{\circ}$ breiten Grenzstreifen, von ihrem Fall gänzlich verschont blieb. Die durch die fallende Materie erzeugte Wärmemenge kam also fast allein der nördlichen Halbkugel zugute.

Fiel die Rotationsachse der Erde mit der Bewegungsrichtung der Sonne im Nebel zusammen, so war ferner die in den oberen Atmosphärenschichten durch den Fall der Nebelmassen erzeugte Wärmemenge sehr nahe dem sinus der geographischen Breite proportional. Bevor die Wärmestrahlen die eigentliche Erdoberfläche erreichten, erlitten sie jedoch durch die Erdatmosphäre eine Absorption; diese war um so grösser, je schiefer der Strahl die Atmosphäre durchdrang. Bildet der Strahl mit der Erdoberfläche den Winkel α , so ergibt sich aus unseren früheren Annahmen über die Absorptionswirkungen der Gase (S. 8) folgendes Absorptionsgesetz

¹⁾ Aus

$$b_e^2 = \rho_c^2 \left(1 + \frac{2 a_e}{\rho_e} \right)$$

(S. 18) folgt, wenn man

$$a_e = \frac{k M_o}{V^2} \text{ und } V = c_e \sqrt{3}$$

setzt, $\frac{b_e}{a_e} = 47$. Nun ist $\text{tg } \varphi_0 = \frac{b_e}{a_e}$, also $\varphi_0 = 88\frac{2}{3}^{\circ}$. $90^{\circ} - \varphi_0$ ist der oben

angegebene Wert.

$$\log \frac{i_0}{i} = \frac{z}{\sin \alpha}$$

Bedeutet i die der Flächeneinheit am Pole zugestrahlte Wärmemenge, so findet man also die auf die Flächeneinheit in der Breite α entfallende Wärmemenge i_α aus der Gleichung

$$i_\alpha = i \sin \alpha e^{z \left(1 - \frac{1}{\sin \alpha}\right)}$$

Die Atmosphäre, welche die Erde im paläozoischen Zeitalter besass, war ohne Zweifel dichter als die gegenwärtige; für diese besitzt z ungefähr den Wert 1. Setzt man $z = 1$, so wird i_α z. B. für $\alpha = 30^\circ$ bereits kleiner als $\frac{1}{5}$. Es erklärt sich also zur Genüge, dass sich die ganze Aequatorzone in Eis hüllen konnte.

Wenn die mittlere Dichte der durchschrittenen Nebelmassen den Wert $2,7 \cdot 10^{-14}$ [g cm^{-3}] überstieg, so war die durch ihren Fall auf die Erde erzeugte Wärmemenge grösser als diejenige, welche die Sonne gegenwärtig ausstrahlt. In diesem Falle braucht jedoch noch nicht angenommen zu werden, dass sie das organische Leben auf der nördlichen Halbkugel vernichten musste; denn da bei wachsender Wärme auch der Wasserdampfgehalt der Luft zunahm, so war die durch ihn bewirkte Absorption vielleicht so gross, dass nur ein kleiner Bruchteil der Wärme die feste Erdoberfläche erreichte;¹⁾ wahrscheinlich wurde diese auch durch eine dichte Wolkendecke vor übermässiger Erhitzung geschützt, um so mehr, da die Atmosphäre der ganzen nördlichen Halbkugel eine einzige riesige Cyklone darstellte, deren Zentrum mit dem Pole zusammenfiel. — Bei der angegebenen Richtung der Erdachse herrschte auf der nördlichen Halbkugel fortwährend Tag, auf der südlichen Nacht. Ein Wechsel der Jahreszeiten war auf der nördlichen Halbkugel nur dann bemerkbar, wenn die Erdachse einen etwas grösseren Winkel mit der Bewegungsrichtung der Sonne bildete.

Ueberblicken wir am Schlusse noch einmal die wesentlichen Punkte unserer zweiten Erklärung, so zeigt sich, dass sie sich auf drei einfachen Annahmen aufbaut: 1. Die Erdachse zeigte mit ihrem Nordpole ungefähr in die Richtung des Apex der Sonnenbewegung; 2. Die mittlere Dichte des Nebels überstieg den Wert $2,7 \cdot 10^{-14}$ [g cm^{-3}]; 3. Verschiedene Ursachen (siehe S. 25) bewirkten, dass die durch den Fall der Nebelmaterie auf die Sonne erzeugte Wärmemenge für die Erde unwirksam blieb. — Unsere Erklärung wird überflüssig, wenn sich herausstellen sollte, dass die paläozoischen Glazialphänomene auch auf der nördlichen Halbkugel anzutreffen sind. Doch würde sie wieder Bedeutung gewinnen, wenn bei den Glazialphänomenen der beiden Halbkugeln Intensitätsunterschiede nachweisbar wären.

¹⁾ Die Absorptionswirkung der Atmosphäre wurde ferner auch durch die bereits mit ihr zur Vereinigung gekommenen Nebelmassen vergrössert.

Schluss.

§ 13.

Auf das Hindurchgehen unserer Sonne durch einen Nebel sind ausser den Erscheinungen der irdischen Eiszeiten und der Erwerbung von Kometen durch die Sonne vielleicht noch einige andere zurückzuführen, für welche es bis jetzt an einer genügenden Erklärung fehlt. Z. B. ist es denkbar, dass die Materie des Zodiakallichtes aus dem durchschrittenen Nebel stammt,⁴ und ferner, dass der Widerstand der Nebelmaterie die kleinen, die inneren Saturnsringe zusammensetzenden Massen zwang, sich dem Planeten zu nähern und infolge davon ihren Umlauf in kürzerer Zeit zu vollenden als der Planet seine Rotation.

