III 113892





ÜBER DEN ANTEIL DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN AN DER ERFORSCHUNG DER GEOLOGISCHEN VORZEIT

von

M. MILANKOVITCH (Beograd)

RESUMÉ. Der Verfasser gibt einen Überblick über den Anwendungsbereich seiner astronomischen Theorie der Klimaschwankungen.

Der mächtige Strom unserer Erkenntnisse und Wissenschaften besitzt, gleich der Donau, zwei verschiedene Quellen. Die eine derselben ist jene der Wahrnehmung, die andere, jene des Besinnens. Aus diesen zwei Quellen entspringend, sind unsere gegenwärtigen Wissenschaften entstanden. Sie können, ihrem Ursprung nach, in Erfahrungswissenschaften und exakte Wissenschaften geschieden werden, aber sie befruchten und ergänzen sich gegenseitig. Einige, der Geschichte der Naturwissenschaften entnommene Beispiele mögen dies veranschaulichen.

Die Geometrie, die älteste unserer Wissenschaften, ist aus praktischer Erfahrung im alten Ägypten entstanden, die Griechen haben sie zu einer rationellen Wissenschaft ausgebildet und damit eine feste Grundlage für alle übrigen exakten Wissenschaften geschaffen. Mit einer solchen Wissenschaft ausgerüstet, haben die Alexandriner aus der beobachtenden Astronomie eine exakte Wissenschaft geschaffen. Einen grossen Schritt in dieser Richtung vollführte Johannes Kepler, als er, sich auf die Beobachtungsergebnisse Tycho Brahe's stützend, die Bewegungen der Planeten um die Sonne durch seine mathematischen Gesetze zum monumentalen Ausdruck brachte. Und aus den Keplerschen Gesetzen hat Isaac Newton, nachdem er das Gebäude der rationellen Mechanik axiomatisch aufgebaut hatte, sein Gesetz der allgemeinen Gravitation entdeckt und verkündet, dem die gesamte im Weltall befindliche Materie unterworfen ist. Aus diesem Gesetz ist durch die Leistungen Euler's, Lagrange's und Laplace's eine neue Wissenschaft, die Mechanik des Himmels, entstanden, die den stolzen Höhepunkt unserer exakten Wissenschaften veranschaulicht, ist sie doch imstande, die Bewe-

gungen der Himmelskörper mit unerreichbarer Genauigkeit in die graue Vorzeit und in die ferne Zukunft Schritt für Schritt zu verfolgen und vorherzusagen. Sie lehrt, dass die Bewegungen der einzelnen Planeten um die Sonne nicht in unveränderlichen und unverrückbaren Keplerschen Ellipsen vor sich gehen, weil durch die wechselseitige Anziehung der Planeten ihre Bahnen langsamen Änderungen unterliegen. Dies gilt auch für unsere Erde: die Exzentrizität ihrer Bahnellipse, die Lage der Äquinoktialpunkte in derselben, der Abstand des Perihels von diesen Punkten und die Neigung der Rotationsachse der Erde zu deren Bahnebene, d. h. die Schiefe der Ekliptik, unterliegen solchen Änderungen. Sie werden als die säkularen Änderungen der astronomischen Elemente bezeichnet. Schon Lagrange war es gelungen, mathematische Formeln aufzustellen, mittels welchen diese Änderungen berechnet werden können. Leverrier, im Jahre 1843, und Stockwell, im Jahre 1873, haben die Berechnungen von Lagrange wiederholt mit Benützung numerischer Werte der Massen einzelner Planeten, welche genauer waren als jene, die einst Lagrange zur Verfügung standen. Leverrier hat noch mehr getan. Er hat, auf die beobachteten Störungen in der Bewegung des Planeten Uranus sich stützend, die Lage eines noch unbekannten Planeten rechnerisch ermittelt und Galle hat in der Nacht des 23 September 1846 diesen Planet, Neptun, an der von Leverrier angegebenen Stelle der Himmelssphäre tatsächlich entdeckt. Dies war eine der grossartigsten Leistungen der Himmelsmechanik und das Kennzeichen ihrer staunenswerten Reichweite.

Noch eine Errungenschaft der astronomischen Wissenschaft möge hier Erwähnung finden. Sie betrifft den Lebenslauf und die Ausstrahlung der Sonne. Lange war man im unklaren über den Ursprung der Sonnenwärme; man wusste nicht, aus welcher Quelle sie den durch ihre ständige Ausstrahlung verbrauchten Wärmevorrat ersetze. Erst im zweiten Jahrzehnt unseres Jahrhunderts ist es der beobachtenden und der theoretischen Astronomie gelungen, diese Frage zu beantworten, nachdem es erwiesen war, dass allen Fixsternen ein gleichverlaufender Lebensweg eigen ist, was auch für unsere Sonne gilt. Daraus ergab es sich, dass die geologische Vorzeit der Erde nur ein kurzer Zeitabschnitt im Lebenslauf der Sonne ist und dass sich während dieser Vorzeit die Ergiebigkeit der Wärmeausstrahlung der Sonne nur ganz unerheblich verändert haben konnte. Dies stimmt auch überein mit den Ansichten der Geologen und Klimatologen, die dahingehen, dass eine Abnahme der Sonnenstrahlung im klimatischen Bilde der geologischen Vorzeit nicht nachweisbar sei. Übrigens sei bemerkt, dass sich meine nachstehenden Ausführungen nur auf die letzte Jahrmillion der Vorzeit beschränken, die nur eine verschwindend kurze Zeitspanne im Lebenslauf der Erde ist.

Die Ergiebigkeit der Wärmeausstrahlung der Sonne gelangt durch den numerischen Wert der sogenannten Solarkonstante zum mathematischen Ausdruck. Darunter ist jene Wärmemenge zu verstehen, die auf die in der mittleren Entfernung der Erde von der Sonne befindlich gedachte und auf die Sonnenstrahlung senkrecht orientierte Fläche von einem Quadratzentimeter während einer Minute auffallen würde. Sie beträgt rund 2 Grammkalorien pro Quadratzentimeter und Minute.

Aus der Sonne sich radial mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzend, nimmt die pro Quadratzentimeter berechnete Strahlungsmenge mit dem Quadrat der Entfernung von der Sonne ab. Dies folgt daraus, dass das Ausmass der um die Sonne konzentrisch gedachten durchflossenen Kugelflächen dem Quadrat ihres Halbmessers proportional ist.

Die Strahlung der Sonne ergiesst sich ohne Unterlass auch auf unsere Erde und bespült, auf ihrem Wege durch nichts behindert, die Erdatmosphäre, um erst beim Eintritt in dieselbe von ihr beeinflusst zu werden. Diese Beeinflussung soll nachträglich besprochen werden, weshalb wir vorläufig nur von der an der oberen Grenze der Erdatmosphäre anlangenden Sonnenstrahlung sprechen wollen. Dabei ist zu bedenken, das die praktisch noch fühlbare Höhe der Atmosphäre ausserordentlich klein ist im Vergleich zu den riesigen Abmessungen des Erdkörpers, weshalb wir jene Grenzfläche mittels des Gradnetzes der Erde, d. h. durch ihre Meridiane und Breitekreise, geometrisch veranschaulichen und der mathematischen Behandlung zugänglich machen können.

Die an dieser Grenzfläche pro Zeit- und Flächeneinheit anlangende Strahlungsmenge hängt ab, wie soeben gezeigt, von der jeweiligen, aus der elliptischen Form der Erdbahn sich ergebenden Entfernung der Erde von der Sonne, aber, wie leicht zu beweisen, auch von dem Einfallswinkel, unter welchem die Sonnenstrahlen diese Grenzfläche erreichen. Dieser Winkel ist offenbar gleich der augenblicklichen, in Bogenmass gemessenen Distanz der Sonne von dem Zenit der in Betracht gezogenen Stelle der Erdoberfläche. Dieser ganze Sachverhalt kann erfasst werden durch eine mathematische Formel, der dieselbe Genauigkeit eigen ist wie jener, die das Newtonsche Gravitationsgesetz verkündet.

Der Bestrahlungszustand der Erde ist fortwährender Änderung unterworfen als Folge der Drehung der Erde um ihre Achse und ihres Umlaufs um die Sonne. Weil aber diese Bewegungen der Erde wohlbekannten strengen Gesetzen gehorchen, können alle daraus sich ergebenden Einzelheiten der Erdbestrahlung mathematisch erfasst und exakt beschrieben werden. Und tatsächlich besitzen wir eine wohlbegründete Theorie dieser

Erscheinungen, deren erste Grundlage schon Halley geschaffen hat und die von anderen Forschern, zu denen ich auch mich zählen darf, weiter ausgebildet worden ist. In den mathematischen Formeln, die den an der oberen Grenze der Erdatmosphäre vor sich gehenden täglichen und jährlichen Gang der Bestrahlung veranschaulichen, kommen neben der geographischen Breite noch folgende astronomische Elemente vor: die Exzentrizität der Erdbahn, der Abstand des Perihels vom jeweiligen Frühlingspunkt und die Neigung der Rotationsachse der Erde zur Ebene der Erdbahn. Wären diese Elemente unveränderlich, würde sich der jährliche Gang der Bestrahlung irgend welcher geographischen Breite Jahr für Jahr wiederholen, wie wir dies tatsächlich in der Gegenwart beobachten können. Aber die säkulare Veränderlichkeit dieser Elemente, von der wir bereits gesprochen haben, bringt einen langsamen, kaum wahrnehmbaren, aber im Laufe der Jahrtausende sich fühlbar machenden säkularen Gang der Erdbestrahlung mit sich. Dies folgt unwiderruflich aus den beiden mitgeteilten Naturgesetzen, dem Gravitations- und dem Strahlungsgesetz. Ich habe mir zur Aufgabe gestellt, diese lange unbenützt gebliebene oder zumindesten ungenügend verwertete unumstössliche Tatsache zu erforchen und in exakter mathematischer Sprache zu beschreiben. Dreissig Jahre, von 1911 bis 1941, habe ich dieser Aufgabe gewidmet. Die dabei gewonnenen Ergebnisse sind in meinen, in den Jahren 1920, 1930 und 1941 erschienenen Hauptwerken veröffentlicht worden.

Es ist unmöglich, auf den in dieser langjährigen Arbeit geschaffenen mathematischen Apparat hier näher einzugehen, weshalb ich mich damit zufriedenstellen muss, nur über dessen wichtigsten Ergebnisse und ihre Anwendungen kurz zu berichten.

Die erste praktische Anwendung dieses Rechnungsapparates erfolgte im Jahre 1924 im Werke „Die Klimate der geologischen Vorzeit". Dessen Autoren, Wladimir Köppen und Alfred Wegener, luden mich, nachdem sie sich mit meinem ersten Werke über die thermischen Effekte der Sonnenstrahlung vertraut gemacht hatten, zur Mitarbeit ein und machten mir den Vorschlag, den säkularen Gang der Bestrahlung der hohen nördlichen Breiten für das Zeitintervall der verflossenen 650 Jahrtausende zu berechnen und graphisch zu veranschaulichen. Köppen riet mir dabei, mein Augenmerk auf die säkularen Änderungen der sommerlichen Bestrahlung zu richten, denn diese Änderungen mussten das Bild des vorzeitlichen Klimas am einschneidendsten beeinflusst haben. Eine Verminderung der sommerlichen Strahlungsmenge musste eine entsprechende Verschiebung der Schneegrenze nach unten und einen Vorstoss der Gletscher in die Täler der Gebirge zu unausweichlicher Folge gehabt haben, und diese Erscheinung war der

augenscheinlichste Effekt der vorzeitlichen Klimaschwankungen, der deutliche Spuren am Antlitz der Erde hinterlassen hat.

Als ich es unternahm, diesem Wunsche zu entsprechen, drängten sich mir folgende Gedanken auf. Die astronomischen Jahreszeiten, wie sie von den chaldäischen und alexandrinischen Astronomen in die Wissenschaft eingeführt worden sind, teilen das Jahr nach dem Kriterium der Länge des Tages, aber nicht nach der zugehörigen Quantität der Bestrahlung. Das gegenwärtige astronomische Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr, beide mit den Tag- und Nachtgleichen beginnend, haben nicht dieselbe Länge, sondern weisen einen Unterschied auf, der gegenwärtig 7 Tage und 14 Stunden beträgt. Dieser Unterschied kann infolge der Variabilität der astronomischen Elemente den Betrag von 31 Tagen 20 Stunden erreichen. Diese Ugleichmässigkeit kann beseitigt werden, wenn man das Jahr in zwei gleich lange Halbjahre teilt, von denen das eine alle jene Tage umfasst, während welcher die Bestrahlung der in Betracht gezogenen geographischen Breite stärker ist als an irgend einem Tage des anderen Halbjahres. Diese beiden Zeitintervalle habe ich die kalorischen Halbjahre benannt. Jenes Halbjahr, welches alle Tage der stärkeren Bestrahlung umfasst, heisst das kalorische Sommerhalbjahr, das andere, das kalorische Winterhalbjahr. Die Länge dieser Halbjahre unterliegt keinen säkularen Änderungen, weshalb die ihnen zugehörigen Strahlungsmengen, auf denselben Nenner gebracht, unter einander direkt vergleichbar sind.

Es ist ein exakt formuliertes mathematisches Problem, wie die diesen Halbjahren zugehörigen Wärmemengen ermittelt werden können. Als ich es gelöst hatte, ging ich an die numerische Berechunung des säkularen Ganges der Erdbestrahlung. Der ausgezeichnete und tüchtige Forscher Pilgrim hat mir, ohne es zu wissen und zu erleben, die Wege geebnet. Er hat mit Benützung der Stockwellschen Formeln die Änderungen ausgerechnet, welche die erwähnten drei astronomischen Elemente während des Zeitintervalles vom 1010. Jahrtausend vor der Gegenwart bis zum 50. Jahrtausend nach der Gegenwart erfahren haben. Er hat die Ergebnisse seiner Berechnung in den Jahren 1903 und 1904 veröffentlicht. Auf diese verdienstvolle Veröffentlichung mich stützend, ermittelte ich mit dem von mir geschaffenen Apparat alle Minima und Maxima, die die sommerliche Bestrahlung der in Betracht gezogenen geographischen Breiten während der verflossenen 650 Jahrtausende erreicht hat. Dann stellte ich diese Amplituden des säkularen Bestrahlungsganges durch jene Breitenwerte dar, um die man sich bei dem gegenwärtigen Bestrahlungszustande der Erde von der in Betracht gezogenen geographischen Breite nach Norden oder Süden begeben müsste, um die jenem Zeitpunkte der geologischen Vorzeit zukom-

mende sommerliche Bestrahlung anzutreffen. Die einer solchen Veranschaulichung dienenden Linien, von den deutschen Gelehrten „Strahlungskurven" genannt, hatten, weil sie nur die Ausschläge der Strahlugsschwankungen darstellten, ein zackenförmiges Aussehen, aus dem man deutlich ersehen konnte, dass die sommerliche Strahlungsmenge, die den in Betracht gezogenen geographischen Breiten während der Vorzeit zugestrahlt worden war, in langsam verlaufender Änderung sich befand und einen oszillatorischen Charakter hatte. Die fiktive Breitenschwankung, die dieser Bestrahlungsänderung entsprach, führte dabei je dreiundzwanzig Ausschläge nach Norden und nach Süden aus. Diese extremen Werte, namentlich die Minima der zugestrahlten Wärmemenge, waren nicht von gleicher Grösse. Dabei überragten neun Minima die vierzehn übrigen durch ihr auffallendes Ausmass. Sie verzeichneten also neun gewaltige Einbrüche der Zeiten kalter Sommer. Diese neun stark ausgebildeten Minima sommerlicher Bestrahlung der hohen nördlichen Breiten erreichten ihr volles Ausmass in folgenden Jahrtausenden vor der Gegerwart:

590, 550, 476, 435, 230, 187, 116, 72, 23.

Sie sind, wie aus diesen Zahlen ersichtlich, über das in Betracht gezogene Intervall der geologischen Vorzeit nicht gleichmässig verteilt, vereinigen sich vielmehr zu vier, durch sehr lange Intervalle getrennte Gruppen, wobei die ersten sechs Minima zu drei Paaren, und die letzten drei zu einem Dreizack vereinigt erscheinen. In diesen vier Gruppen erkannte Köppen die untrüglichen Belege der vier europäischen quartären Eiszeiten, jener von Günz, Mindel, Riss und Würm, denn das Ausmass und die zeitliche Verteilung dieser vier Gruppen stimmte mit dem von Penck und Brückner auf Grund ihrer geologischen Befunde festgestellten Verlauf dieser vier Eiszeiten sehr gut, ja überraschend gut überein, wenn man bedenkt, dass diese beiden Gliederungen des Eiszeitalters auf zwei von einander ganz unabhängigen Wegen erzielt worden sind.

Sechs Jahre später, als ich meine „Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen" als Einführung in das Köppen-Geigersche „Handbuch der Klimatologie" verfasste, wiederholte ich meine Berechnungen des säkularen Bestrahlungsganges der Erde, diesmal mit Benützung der Leverrierschen Formeln, an denen mein lieber Kollege V. V. Michkovitch, Direktor des Astronomischen Observatoriums in Belgrad, die aus der gegenwärtigen besseren Kenntnis der Planetenmassen sich ergebenden Korrekturen vornahm und erst dann die säkularen Änderungen der astronomischen Elemente berechnete. Als ich, auf diese Berechnungen mich stützend, meine Berechnungen des säkularen Bestrahlungsganges

durchführte, gelangte ich zu denselben Resultaten wie früher. Die ganz unwesentlichen Unterschiede, die dabei zum Vorschein kamen, sind leicht zu erklären durch die nicht ganz genau mit einander übereinstimmenden Massenwerte der Planeten, die den Stockwellschen und den durch Michkovitch verbesserten Leverrierschen Formeln zugrunde lagen und auch dadurch, dass in den Leverrieschen Formeln die Wirkung des Planeten Neptun, den er erst später entdeckte, nicht inbegriffen war.

In meiner „Mathematischen Klimalehre" und in meinen späteren Veröffentlichungen habe ich meine früheren Berechnungen dadurch vervollständigt, dass ich mich nicht nur auf die Ermittlung der Amplituden des säkularen Ganges der Erdbestrahlung beschränkte, sondern auch eine genügende Anzahl der dazwischen liegenden Werte berechnete und dadurch die früheren Zackenlinien durch kontinuierlich verlaufende Kurven ersetzte. Auch dehnte ich meine Berechnungen auf die ganze Oberfläche der Erde aus, indem ich den säkularen Bestrahlungsgang an je acht nördlich und südlich liegenden Breiten berechnete und dabei auch die Strahlungsmengen der Winterhalbjahre ermittelte.

Diese Strahlungskurven stellen die exakte Lösung eines im Grunde genommenen Problems der Himmelsmechanik dar mit einer Zuverlässigkeit und Genauigkeit, die dieser hohen Wissenschaft eigen ist. Deshalb kann behauptet werden, dass der säkulare Bestrahlunsgang der oberen Grenze der Erdatmosphäre so verlaufen ist, wie er durch die Strahlugskurven dargestellt erscheint. Er hat, wie dies durch die Ergebnisse der geologischen Forschung erwiesen ist, tiefe Spuren am Antlitz der Erde hinterlassen. Auf diese Weise hat das Eiszeitalter seinen astronomischen Kalender erhalten. Dieser Feststellung muss, um nichts verheimlicht zu lassen, folgendes hinzugefügt werden.

Unser, bürgerlicher und kirchlicher, Kalender ist, seinem Wesen nach, nianht sderes cals eine Zuordnung unserer Erlebnisse und der Weltereignisse an die Himmelserscheinungen. In seinen Elementen, dem Tag und dem Jahr, spiegeln sich die astronomischen Erscheinungen, die Drehbewegung der Erde und ihre Umkreisung der Sonne, getreulich wider. Geradeso verhält es sich mit dem durch die Strahlungskurven geschaffenen Kalender des Eiszeitalters. In ihm widerspiegeln sich die Himmelserscheinungen höherer Kategorie: die periodischen Schwankungen der Ekliptikschiefe, die oszillierende Schwankung der Exzentrizität der Erdbahn und der Umlauf des Perihels. Die Ungleichheit und Ungleichmässigkeit dieser drei Erscheinungen sind es, die die äusserst komplizierten, aber Schritt für Schritt verfolgbaren Schwankungen der Erdbestrahlung verursachen.

Aus den Strahlungskurven sind aber nicht alle Folgen der unzweifelhaft festgestellten Veränderlichkeit der Erbestrahlung direkt ablesbar. Denn zwischen der oberen Grenze der Erdatmosphäre, auf die sich die Strahlungskurven beziehen, und der Erdoberfläche liegt die Lufthülle der Erde ausgebreitet. Beim Eintrit der Sonnenstrahlen in die Erdatmosphäre erleidet die von ihnen mitgefühtre Energie mannigfaltige Umwandlungen durch Refraktion, Diffusion, Reflexion und Absorption und erreicht, dadurch geschwächt, die Oberfläche der Erde, wo ein Teil derselben absorbiert, der andere zurückreflektiert wird, um auf seinem Rückweg von der Atmosphäre abermals beeinflusst zu werden. Die von der Atmosphäre und von der Erdoberfläche absorbierten Strahlungsmengen bestimmen den Temperaturzustand derselben und ihre damit verbundene und durch das Stefansche Gesetz geregelte Wärmeausstrahlung. Alle diese Erscheinungen unterliegen wohlbekannten physikalischen Gesetzen, und so war man seit langem bemüht, diese Gesetze zur Erforschung dieser Erscheinungen dienstbar zu machen. Namhafte Forscher haben sich um die Lösung dieses Problems verdient gemacht, das nun zu einem Problem der theoretischen Physik erweitert erscheint. Auch ich habe demselben einen grossen Teil meiner wissenschaftlichen Tätigkeit gewidmet. Bei allen diesbezüglichen Untersuchungen mussten, um die Erscheinungen einer auf physikalische Gesetze sich stützenden mathematischen Behandlung zugänglich zu machen, vereinfachende Annahmen gemacht werden. Die wichtigsten derselben sind die einer ruhenden Atmosphäre, eines durchschnittlichen Grades ihrer Bewölkung und ihrer Transmissionsfähigkeit. Das aus diesen Voraussetzungen sich rechnerisch ergebende Klima der Erde wird als das solare Klima bezeichnet, weil in demselben die von der Sonnenstrahlung an Ort und Stelle hervorgerufenen thermischen Erscheinungen zum Ausdruck gelangen, ohne Berücksichtigung der in der Atmosphäre stattfindenden Strömungen und Niederschläge. Es ist mir unmöglich, die Ergebnisse einer solchen Theorie, die ich als die mathematische Klimalehre bezeichnete und durch die man einen tiefen Einblick in den thermischen Aufbau der Atmosphäre gewann, hier aufzuzählen. Ich muss mich damit begnügen, nur ein Resultat dieser Theorie zu erwähnen. Es betrifft die Erscheinung der Verspätung der Temperaturextreme hinter den Bestrahlungsextremen. Aus dem mathematisch präzis erfassten jährlichen Bestrahlungsgang der Erde, aus der über ihr lastenden Masse der Atmosphäre, ihrer physikalischen Konstanten und aus dem Wärmeleitungs-Koeffizient des Erdbodens konnte ohne Zuhilfenahme weiterer Angaben berechnet werden, dass, infolge der Aufspeicherung der Wärme in Erdboden und in der Atmosphäre die jährlichen Temperaturextreme sich hinter den Extremen der Bestrahlung um 26 Tage

verspäten, also um diese Zeitspanne nach dem Sommer- bzw. nach dem Wintersolstitium eintreten müssen, was mit den das kontinentale Klima betreffenden meteorologischen Beobachtungen gut übereinstimmt. Ich stellte mir daraufhin die Frage, ob ein ähnliches Rechnungsergebnis auch für den säkularen Gang der Erdbestrahlung gewonnen werden könnte. Dabei stellte sich folgendes heraus. Während der langen Interglazialzeiten, wie solche in den Strahlungskurven verzeichnet erscheinen, ist die Verspätung der Temperaturextrema ganz gering und beträgt nur einige Jahrhunderte, aber während der Eiszeiten kann diese Verspätung etliche Jahrtausende erreichen ch will dies rechnerisch beweisen. Diese Verspätung hatte ihren Ursprung in den damaligen mächtigen Schneebedeckungen der Erde. Die Wirkung derselben, auf die der ausgezeichnete Klimatologe Walter Wundt wiederholt hingewiesen hat, war eine zwiefache. Sie äusserte sich erstens in dem hohen Reflexionsvermögen ihrer Oberfläche, wodurch ein namhafter Teil der auf sie auffallenden Sonnenstrahlung in den Weltraum zurückgewiesen wurde und für den Wärmehaushalt der Erde verloren ging. Diese Wirkung war eine sofortige und dem Flächenausmass der Schneebedeckungen direkt proportional. Sie konnte mathematisch erfasst und gezeigt werden, dass sie mit dem säkularen Gang der Erdbestrahlung Hand in Hand ging und dessen Amplituden vergrösserte. In den Zeiten der neun Minima der sommerlichen Bestrahlung der hohen nördlichen Breiten, wie sie in den Strahlungskurven sichtbar sind, wirkte sich die abkühlende Wirkung der nördlichen Schneekallotte gewaltig aus und drückte die Minima der Bestrahlung tief hinunter. Daraus ergab es sich, dass der säkulare Bestrahlungsgang der Erde vollkommen ausreicht, um auch die grössten Klimaänderungen des Quartärs in ihrem vollen Umfang zu erklären und dass zu diesem Zwecke keine phantastischen Hypothesen, wie sie zuweilen herangezogen werden, erforderlich sind.

Hing die in der Zurückweisung eines Teiles der Erdbestrahlung sich äussernde Wirkung der Schneebedeckungen nur von dem Flächenausmass derselben ab, so stand ihre weitere Wirkung in engster Beziehung mit der Mächtigkeit dieser Schneemassen. Sie waren, unseren Eiskellern ähnlich, wahre Kältespeicher. Sollte also nach einer Periode der Vereisung, die in den Wellen der Strahlungskurve durch ein Wellental veranschaulicht erscheint, zu einem nachfolgendem Temperaturaufstieg kommen, dann musste vorher die Eisbedeckung der in Betracht gezogenen Gegend durch die in der Strahlungskurve durch einen Wellenberg dargestellte verstärkte Sonnenstrahlung weggeschafft werden. Blicken wir tiefer in diesen Abschmelzugsvorgang!

Zum Abschmelzen eines Grammes Eis sind 80 Grammkalorien notwendig. Das spezifische Gewicht des Eises mit 0,90 angesetzt, sind zum Abschmelzen eine Kubikzentimeters Eis 72 Grammkalorien notvendig oder, weil eine kanonische Wärmeeinheit, wie sie den Strahlungstabellen zugrunde gelegt wurde, 10,5 Grammkalorien umfasst, sind zum Abschmelzen eines Kubikzentimeters Eis 6,86 kanonische Einheiten erforderlich. Ein durch die ganze Eisdecke reichendes Prisma, das eine Grundfläche von einem Quadratzentimeter und eine in Metern gemessene Höhe H aufweist, braucht zu seiner Abschmelzung 686 H kanonische Einheiten. Das Abschmelzen der Eisdecke beginnt erst dann wenn die Eisdecke ihre grösste Mächtigkeit erreicht hat und kann nur in einem aufsteigenden Ast der Strahlungskurve vor sich gehen. In diesem Zeitpunkte halten sich die abkühlende Wirkung der Eisdecke und die wärmespendende Wirkung der Sonnenstrahlung die Waage. Das Abschmelzen des Eisdecke kann also nur durch den von Jahr zu Jahr steigenden Zuwachs der sommerlichen Strahlungsmenge, wie er aus der Strahlungskurve ersichtlich ist geleistet werden. Der Einfachheit halber nehme ich an, dass dieser Strahlungszuwachs ein gleichmässiger ist und bezeichne ihn mit p. Während des Zeitintervalles von t Jahren wird also aus dem säkularen Aufstieg der Bestrahlung eine Wärmemenge zum Wegschmelzen der Eisdecke zur Verfügung gestellt, die durch den Ausdruck $^1/_2\, pt^2$ veranschaulicht ist. Von dieser, an der oberen Grenze der Atmosphäre anlangenden Wärmemenge wird nur ein Teil bis zur Eisdecke gelangen, von ihr absorbiert und zum Wegschmelzen des Eises verwendet werden. Roh geschätzt, kann angenommen werden, dass von der soeben angegebenen Wärmemenge nur etva die Hälfte zum Wegschmelzen des Eises verwendet wird, also $^1/_2\, pt^2$. Stellen wir diese Wärmemenge gleich jener, die zum Wegschmelzen der Eisbedeckung von der Mächtigkeit H erforderlich ist, so bekommen wir

$$686\, H = \frac{1}{4}\, pt^2 \qquad t^2 = 2744\, \frac{H}{p}\,.$$

Die letzte Formel gibt uns die in Jahren gemessene Zeitspanne an, die zur Abschmelzug einer Eisbedeckung von H Metern erforderlich ist. Wenden wir sie auf einen konkreten Fall an, beispielsweise auf den letzten grossen Aufstieg der für die geographische Breite von 55° nördlich berechneten Strahlungskurve! Aus der dazu gehörigen Tabelle ergiebt es sich, dass dort der säkulare Aufstieg der sommerlichen Bestrahlung zwischen dem Jahrtausend 20 und 15 vor der Gegenwart 515 Einheiten betrug, oder 0,103 pro Jahr. Setzt man diese Zahl in die obige Formel ein, so ergiebt es sich: für $H = 200$ m, $t = 2300$ Jahre; für $H = 400$ m, $t = 3260$ Jahre;

für $H = 600$ m, $t = 4000$ Jahre. Erst nach dieser Zeitspanne konnte es zu einem steilen Temperaturaufstieg kommen und im Verlauf desselben ein Klimaoptimum erreicht werden.

Die soeben mitgeteilten Zahlen sind das Ergebnis einer rohen Überschlagsrechnung, mit der man nicht alle bei dem geschilderten Abschmelzungsprozess mitwirkenden Einflüsse erfassen konnte. Solcher Nebeneinflüsse gab es viele, Bewölkung, Niederschlagsmenge, Höhenlage der Schneedecke, Relief des Bodens und vieles andere. Sie bilden den tellurischen Teil des Eiszeitenproblems und sind einer exakten mathematischen Behandlung nicht zugänglich. Dieser Teil des Eiszeitenproblems muss den Erfahrungswissenschaften zur Behandlung und Lösung überlassen werden.

(*Eingegangen am 8 Mai 1953*)