

Ausbau und gegenwärtiger Stand der astronomischen Theorie der erdgeschichtlichen Klimate

Von M. MILANKOVITCH¹, Belgrad

Zwei Naturgesetze sind es, die die Grundpfeiler der hier zu schildernden astronomischen Klimalehre bilden, das Gravitations- und das Strahlungsgesetz:

Das NEWTONsche Gravitationsgesetz, dem die Lehre von der Bewegung der Himmelskörper, die Mechanik des Himmels, ihr festes Fundament verdankt, ist der erste Paragraph im Gesetzbuch des Weltalls und unseres Planetensystems. Diesem Paragraph reiht sich ein zweiter Paragraph an, nicht minder wichtig und nicht weniger umfassend. Der erste Paragraph spricht von der Größe der gegenseitigen Anziehung der Weltkörper, die ihren Lauf regelt und die Planeten zu ihrem Umlauf um die Sonne zwingt, der zweite Paragraph spricht von der Ausbreitung der Strahlung der Gestirne, also auch von der wärmespendenden Kraft der Sonne. Auch diese nimmt, geradeso wie die anziehende Kraft der Sonne, mit dem Quadrat der Entfernung ab. In den Weltraum sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitend, erreichen die Sonnenstrahlen die Oberflächen der Planeten. Die Wärmemengen, die sie dabei den Planeten zuführen, hängen nicht nur von der Entfernung des betreffenden Planeten von der Sonne ab, sondern auch von dem Einfallswinkel, unter dem diese Strahlen den in Betracht gezogenen Teil der Planetenoberfläche erreichen. Die Verteilung der Sonnenwärme auf den Oberflächen der Planeten läßt sich unter Berücksichtigung dieser Tatsachen auch durch eine mathematische Formel erfassen, die ähnlich jener ist, die das NEWTONsche Gesetz zum Ausdruck bringt.

Die Bestrahlung der Planeten, also auch jene des uns am meisten interessierenden Planeten, der Erde, ist ununterbrochener Änderung unterworfen. Die Drehung der Erde um ihre Achse hat den Wechsel von Tag und Nacht zur Folge, ihre Umlaufbewegung um die Sonne ruft den Ablauf der Jahreszeiten hervor; die gegenseitige Anziehung der Planeten ändert langsam aber stetig die Form und die räumliche Lage der Erdbahn; die Präzession der Erdachse bewirkt, daß sich die Äquinoktiallagen der Erde längs dieser veränderlichen Erdbahn stetig verlagern, und dies alles hat den

säkularen Gang der Erdbestrahlung zur unausweichlichen Folge.

Alle diese Änderungen lassen sich, dank der sphärischen Astronomie und der Himmelsmechanik, mathematisch exakt beschreiben und in ferne Zeiten Schritt für Schritt verfolgen. Der Schlußeffekt der Sonnenstrahlung, der uns besonders interessiert, ist der Temperaturzustand der Planetenoberflächen und ihrer Atmosphäre. Beim Eintritt der Sonnenstrahlen in die Atmosphärenhülle der Planeten erfährt die Energie, die in diesen Strahlen enthalten ist, mannigfaltige Umwandlungen, um schließlich im jeweiligen Temperaturzustand des Planeten und seiner Atmosphäre ihren sinnfälligen Ausdruck zu finden, ist doch die Sonnenstrahlung die einzige aktive Post im Wärmehaushalt unserer Erde und der mit einer festen Kruste bedeckten Planeten.

Diese in den Atmosphärenhüllen sich abspielenden Erscheinungen gehorchen ebenfalls wohlbegründeten, durch mathematische Formeln erfaßbaren Gesetzen der Physik. Gelingt es also, den Zusammenhang zwischen dem Bestrahlungszustand und dem Temperaturzustand der Planeten zu ermitteln, so wäre es möglich, aus der Stärke der Sonnenstrahlung und aus dem Mechanismus unseres Planetensystems den zeitlichen Ablauf der Temperaturerscheinungen auf den Oberflächen der Planeten mathematisch zu beschreiben und numerisch zu veranschaulichen.

In dieser exakt formulierten Fassung stand das große kosmische Problem bereits im Jahre 1911 im Zielpunkt meiner Forschungen und es war mir schon damals klargeworden, daß wenn es gelingen sollte, dieses Problem zu lösen, man in der Lage wäre, die wichtigsten Grundzüge des Erdklimas rechnerisch zu ermitteln und dadurch eine mathematische Theorie dieses Klimas zu schaffen, die uns den Mechanismus der thermischen Erscheinungen in der Erdatmosphäre aufdecken würde, von welchem Mechanismus wir bisher nur die Schlußeffekte kannten. Diese Theorie würde uns auch Auskunft über die Temperaturen der hohen Luftschichten geben können, bis zu denen wir noch nicht emporgestiegen sind. Sie würde aber noch weiter vordringen. Dieselbe Wärmequelle, die Sonne, die

¹ Universität Belgrad, Vizepräsident der Serbischen Akademie der Wissenschaften.

unsere Erde mit Wärme versorgt, erwärmt auch jene Planeten, die mit festen Krusten bedeckt sind. Die Ergebnisse der neuen Theorie würden auch für diese Planeten und auch für den Erdmond ihre Gültigkeit bewahren. Sie würden uns die ersten zuverlässigen Angaben über das Klima dieser fernen Welten liefern können, von dem wir bisher nichts Bestimmtes wissen. Doch selbst damit wären die Leistungen einer derartigen Theorie nicht erschöpft. Hat sie einmal die Grundzüge des gegenwärtigen Erdklimas erfaßt, so wäre sie in der Lage, das Klima der Vorzeit zu erforschen und zu beschreiben, wo die Bahnelemente der Erde und die Neigung ihrer Drehachse, wie uns dies die Himmelsmechanik lehrt, andere gewesen sind. Mit einem Worte: die neue Theorie würde uns ermöglichen, die Grenzen unserer direkten Wahrnehmungen räumlich und zeitlich weit zu überschreiten.

Diese Betrachtungen bildeten den Leitgedanken meiner daran sich anschließenden Arbeit, deren Ergebnisse in einer Reihe von Abhandlungen und Werken ihre Veröffentlichung fanden¹.

In dem Buche *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire* (Paris 1920) erscheinen die wichtigsten Teile des gestellten Problems in ihren Hauptzügen bereits als gelöst, wodurch das begonnene Lehrgebäude seine festen Grundmauern erhielt, auf die man weiter bauen konnte. In diesem Werke hat das Bild des mathematischen oder solaren Klimas seine charakteristischen Umrisse erhalten, es wurde an dem beobachteten Klima der Erde verifiziert und nachher zur Berechnung der Temperaturen der Planeten Merkur, Venus und Mars und des Erdmondes mit Erfolg angewendet.

Die Erforschung der thermischen Erscheinungen auf den Oberflächen dieser Himmelskörper schien wohl damals das wichtigste Ergebnis des Buches zu sein, weil zu jener Zeit die Frage von der Bewohnbarkeit der Planeten und namentlich jener des Planeten Mars im Blickpunkte der astronomischen Forschung stand. Diese Ergebnisse der *Théorie mathématique* lenkten die Aufmerksamkeit der Astronomen auf sich. Sie wurden durch die bald nach dem Erscheinen dieses Werkes von den amerikanischen Astronomen durchgeführten Messungen der von der Mars- und von der Mondoberfläche zu uns gelangenden Strahlung vollauf bestätigt und fanden ihre volle Würdigung in einem ausführlichen Bericht SCHÖNBERGS, der in der «Physikalischen Zeitschrift» veröffentlicht wurde. Diese Ergebnisse fanden in den späteren zusammenfassenden Darlegungen keine Aufnahme, weil sich bald nach der Veröffentlichung des Erstlingswerkes der darin niedergelegten Theorie ein anderes Anwendungs-

gebiet erschloß, das durch seine Fruchtbarkeit alle übrigen weit überflügeln sollte.

In der *Théorie mathématique* wurden auch jene Veränderungen der Erdbestrahlung in den Bereich der Untersuchungen gezogen, die ihren Ursprung in der durch die gegenseitigen Störungen der Mitglieder unseres Planetensystems hervorgerufenen Veränderlichkeit der Bahn und der Drehachse der Erde haben. Der Bestrahlungszustand der Erde ist eine Funktion der Schiefe der Ekliptik, der Exzentrizität der Erdbahn und der Länge des Perihels. Weil diese drei astronomischen Elemente säkular veränderlich sind, hat sich auch die Bestrahlung der Erde im Laufe der Vorzeit ständig ändern müssen. In dem Buch wurde der Mechanismus dieser Veränderlichkeit der Erdbestrahlung klargelegt und gezeigt, wie diese Veränderungen auf Hunderte von Jahrtausenden in die Vergangenheit Schritt für Schritt rechnerisch verfolgt werden können. Diese Ergebnisse wurden vom deutschen Klimatologen WLADIMIR KÖPPEN aufgenommen. Er arbeitete damals mit ALFRED WEGENER an dem Werke *Die Klimate der geologischen Vorzeit*. Er sah bald ein, daß meine Theorie darin zur Anwendung gelangen könnte und lud mich zur Mitarbeit ein. Durch die Einführung der kalorischen Jahreszeiten und durch die Ableitung der Formeln zur Berechnung der zugehörigen Strahlungsmengen vervollständigte ich die in der *Théorie mathématique* niedergelegten Rechenmethoden. Dadurch konnten die charakteristischen Merkmale des säkularen Bestrahlungsganges formelmäßig erfaßt werden und man war damit in der Lage, an die rechnerische Ermittlung dieses Strahlungsganges zu schreiten. So wurden also, dem Wunsche KÖPPENS entsprechend, jene Änderungen berechnet, die die sommerliche Bestrahlung der geographischen Breiten von 55, 60 und 65° nördlich während des Intervalls der letztverflossenen 650 Jahrtausende erfahren hat, wobei ich mich darauf beschränkte, die Amplituden dieser Änderungen zu berechnen und in Zackenkurven darzustellen.

In diesen Zackenlinien, die man später die Strahlungskurven nannte, erkannte KÖPPEN den Ablauf des Eiszeitalters. Der Verlauf dieser Kurven stimmte mit den geologisch nachgewiesenen Änderungen des Erdklimas auf das beste überein. Und dies haben auch alle späteren zahlreichen Untersuchungen der Geologen und Klimatologen bewiesen. Alle durch die Strahlungskurven dargestellten Schwankungen der Erdbestrahlung haben tiefe Spuren im Antlitz der Erde hinterlassen, so daß mit Hilfe dieser Kurven diese Spuren astronomisch datiert werden konnten, wodurch eine absolute Chronologie des Eiszeitalters geschaffen wurde.

Unser bürgerlicher Kalender ist seinem Wesen nach nichts anderes als eine Abzählung der Himmelsercheinungen. In seinen Elementen, dem Tag, dem Monat und dem Jahr, widerspiegeln sich die kos-

¹ Es sind deren 33 an der Zahl; vier davon bilden zusammenfassende Darlegungen der bis zu den Jahren 1920, 1930, 1938 und 1941 sichergestellten Ergebnisse meiner Arbeit und veranschaulichen ihre wichtigsten Etappen.

mischen Erscheinungen, die Drehung der Erde, der Umlauf des Mondes und die Umkreisung der Sonne durch die Erde. Geradeso verhält es sich mit dem durch die Strahlungskurven geschaffenen Kalender der Erdgeschichte. In ihm widerspiegeln sich die kosmischen Erscheinungen höherer Kategorie, die periodische Schwankung der Ekliptikschiefe, die oszillierende Schwankung der Exzentrizität der Erdbahn und der Umlauf des Perihels. Die Ungleichheit und die Ungleichmäßigkeit dieser Erscheinungen ist es, die die äußerst komplizierten, aber rechnerisch Schritt für Schritt verfolgbaren Schwankungen der Erdbestrahlung verursachen, die ihrerseits jene Spuren im Antlitz der Erde hinterlassen hatten und deren astronomische Datierung ermöglichten.

Durch das KÖPPEN-WEGENERSche Werk haben die Strahlungskurven eine große Publizität erlangt und sind zum Ausgangspunkt anderer Arbeiten geworden. Als bald darnach KÖPPEN im Verein mit R. GEIGER an die Ausgabe seines fünfbändigen *Handbuches der Klimatologie* schritt, übertrug er mir die Ausarbeitung des einleitenden Artikels dieses Handbuches, der den Titel *Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen* erhielt und 1930 veröffentlicht wurde. Dieses Buch bildet die zweite zusammenfassende Darstellung der auf diesem Gebiete durchgeführten Forschungen. In demselben bildet nur der Planet Erde mit seinem gegenwärtigen und vorzeitlichen Klima Gegenstand der Behandlung, wodurch auch die Richtung angedeutet erscheint, in der sich das neue Wissensgebiet weiterentwickeln sollte. In dieser Richtung weist die *Mathematische Klimalehre* einen wesentlichen Fortschritt gegenüber der *Théorie mathématique* auf. Darin wurde die mathematische Theorie des gegenwärtigen Erdklimas zu einem anerkannten abgeschlossenen Lehrgebiet der exakten Wissenschaft. Auch die astronomische Theorie der Klimaschwankungen erhielt ihre festen Umrisse und die numerische Darstellung des säkularen Ganges der Erdbestrahlung ihre endgültige Form. Die in dem Buche enthaltene vielzählige Strahlungstabelle stellt eine ausführliche, in mathematischer Sprache verfaßte Geschichte der Erdbestrahlung der letztverflossenen 600 Jahrtausende dar.

Noch während der Niederschrift der *Mathematischen Klimalehre* erweiterte sich das Arbeitsgebiet durch neue Probleme, die mit den in jenem Buche behandelten in enger Beziehung standen¹.

In der geophysikalisch sehr wichtigen Frage der Polwanderungen standen damals die Lehren der beschreibenden Naturwissenschaften und jene der exakten Wissenschaften in schroffem Gegensatz. Während

die beschreibenden Wissenschaften untrügliche Belege dafür besaßen, daß während der Vorzeit die Lage der Pole auf der Erdoberfläche eine andere gewesen war als heute, stand die exakte Wissenschaft dieser Erscheinung ratlos gegenüber. Der Begriff der Pole ist ein solcher der Mechanik: die Pole veranschaulichen die Durchstoßpunkte der Drehachse der Erde mit deren Oberfläche. Die Drehbewegung der Erde muß den Gesetzen der Mechanik gehorchen. Diese Wissenschaft war tatsächlich in der Lage, alle bisher astronomisch festgestellten Eigentümlichkeiten der Drehbewegung, die Präzession, die astronomische und die freie Nutation der Erdachse auf das befriedigendste zu erklären und zu beschreiben, aber ihre Lehren waren nicht imstande, eine Ursache für größere Verlagerungen der Drehpole der Erde anzugeben und deren Mechanismus zu erklären. Ich unternahm es also, diese ganze Frage noch einmal zu überprüfen und nach Möglichkeit zu klären. Es ergab sich dabei, daß die Ursache, warum alle diesbezüglichen Versuche bisher fruchtlos geblieben sind, darin zu erblicken ist, daß man bei allen früheren theoretischen Untersuchungen der Drehbewegung der Erde nicht alle Eigentümlichkeiten des Erdkörpers in Rechnung gestellt hatte. Der Bau der Erde ist viel komplizierter als es die Theoretiker bei ihren Untersuchungen vorausgesetzt hatten. Es hat sich auch hier abermals gezeigt, daß die gegenwärtige Trennung der Wissenschaften in ihre Spezialgebiete für manches neue Problem nachteilig ist, und man ist bei der Stellung eines solchen Problems gezwungen, vorerst einen Brückenschlag zwischen zwei solchen Gebieten zu bewerkstelligen. Ich mußte deshalb, bevor ich mich an die Lösung des gestellten Problems wagen konnte, als Himmelsmechaniker in die Schule der Geophysiker gehen.

Hier war mein Lehrer ALFRED WEGENER. Das Studium seiner wissenschaftlichen Arbeiten und die mehrfachen Unterredungen mit ihm haben mich mit geophysikalischen Tatsachen vertraut gemacht, die sonst einem Mathematiker und Himmelsmechaniker wenig geläufig sind. Diese Gespräche haben mir nicht nur die grundlegende Bedeutung des Polverlagerungsproblems offenbart, sondern zu neuen Anschauungen über die Beschaffenheit des Erdkörpers geführt, die sich in der Folge als fruchtbringend erweisen sollten. Erst als ich mich mit dem Aufbau der Erdkruste und mit der isostatischen Lagerung der Kontinentalschollen auf ihrer gegen lang andauernde Kräfte nachgiebigen Unterlage vertraut machte, konnte man das Problem fest anpacken und beweisen, daß die dynamische Asymmetrie des Erdkörpers eine langsam vor sich gehende, aber unaufhaltsame Verschiebung der Sialdecke der Erde auf ihrer nachgiebigen Unterlage, also eine säkulare Verlagerung der Erdpole auf der Erdoberfläche, zur Folge haben müsse. Die weitere Untersuchung ergab, daß die Verlagerung der Pole längs der orthogonalen Trajektorie des Trägheitsfeldes dieser Sialdecke vor sich gehen müsse. Dadurch wurde die Grundgleichung der Polverlagerungen gewonnen, aus der sich in der Folge alle Einzelheiten dieser Erscheinung ableiten und mathematisch darstellen ließen.

¹ Als Mitarbeiter an dem *Handbuch der Geophysik* von B. GUTENBERG hatte ich für den ersten Band *Die Erde als Planet* drei voneinander getrennte Abschnitte zu liefern: *Stellung und Bewegung der Erde im Weltall*, *Drehbewegungen der Erde* und *Säkulare Polverlagerungen*.

Durch die Ableitung der vektoriellen Grundgleichung der Polverlagerungen wurde das mir vom Herausgeber des *Handbuches der Geophysik* zur Behandlung zugewiesene Problem im Prinzip gelöst.

In später folgenden Arbeiten wurde die bereits erwähnte differentiale Grundgleichung integriert, d. h. die analytische Gleichung der Polbahnkurve abgeleitet. Mit Hilfe dieser Gleichung konnte dann an die numerische Berechnung der aus der Konfiguration der Kontinente sich ergebenden säkularen Bahnen der beiden Pole geschritten und das rechnerische Ergebnis mit den Dokumenten der Erdgeschichte verglichen und beglaubigt werden.

Nicht minder wichtig waren die Ergebnisse der inzwischen geleisteten Arbeit über den säkularen Gang der Erdbestrahlung, die in der in den Berichten der Königlich Serbischen Akademie erschienenen Abhandlung *Neue Ergebnisse der astronomischen Theorie der Klimaschwankungen* veröffentlicht worden sind. Das wichtigste derselben betraf die Frage, ob der durch die Veränderlichkeit der astronomischen Elemente hervorgerufene Bestrahlungsgang der Erde, an dessen Existenz und an dessen durch die Rechnung sich ergebenden Rhythmus nicht mehr zu zweifeln war, ausreichend sei, um auch die größten der klimatischen Schwankungen des Quartärs in ihrem vollen Umfang zu erklären. Manche Gelehrte bezweifelten dies, und es war deshalb wünschenswert, die Berechnungen dieses Bestrahlungsganges durch die Ermittlung seiner klimatischen Effekte zu vervollständigen, um zu sehen, wie groß diese Effekte gewesen sind. Ein Schritt in dieser Richtung wurde bereits in der *Mathematischen Klimalehre* gemacht, aber der entscheidende erst in der erwähnten Abhandlung vollführt. Dabei wurde von der mathematischen Analyse des Zusammenhanges zwischen der Höhenlage der Schneegrenze in den verschiedenen Breiten und der zugehörigen, dem kalorischen Sommerhalbjahr entsprechenden Strahlungsenergie ausgegangen und gefunden, daß jeder Veränderung dieser Menge von einer kanonischen Einheit eine Verschiebung der Schneegrenze von einem Meter entspricht. Dasselbe Resultat folgt übrigens auch zwangsläufig aus dem in der *Mathematischen Klimalehre* abgeleiteten Zusammenhang zwischen Bestrahlung und Temperatur.

Auf Grund dieses Ergebnisses konnte der wichtigste klimatische Effekt des vorzeitlichen Ablaufes der Erdbestrahlung, d. h. die dadurch hervorgerufenen Verschiebungen der Schneegrenze erfaßt werden: man hatte die in den Tabellen mitgeteilten Zahlen, die die Änderungen der sommerlichen Bestrahlung der einzelnen geographischen Breiten in kanonischen Einheiten wiedergeben, einfach als Meter zu deuten, um die zugehörigen Verschiebungen der Schneegrenze zu erhalten. Dabei bedeutet das Vorzeichen + die Verschiebung der Schneegrenze nach oben, das Zeichen — die Verschiebung nach unten. Dadurch haben jene

Tabellen einen mit der Hand greifbaren klimatologischen Inhalt erhalten.

Die derart gedeuteten Tabellen der Erdbestrahlung zeigen, daß die durch die Änderung dieser Bestrahlung an Ort und Stelle hervorgerufenen Verschiebungen der Schneegrenze genügend mächtig gewesen sind, um deutliche Spuren zu hinterlassen, also den säkularen Bestrahlungsgang der Erde auf ihrem Antlitz zu markieren, aber nicht ausreichend gewesen sind, um die großen Vereisungen der Vorzeit in ihrem vollen Ausmaß hervorzurufen. Zu diesem vollen Ausmaß der Vereisungen war ein weiterer klimatischer Faktor erforderlich. Um diesen Faktor zu entdecken und mathematisch zu erfassen, mußte noch ein letzter zum Ziele führender Schritt gemacht werden, zu dem folgende Überlegungen führten.

Sind wir imstande, rechnerisch zu verfolgen, wie sich die Schneegrenze im Laufe der Vorzeit nach oben bzw. nach unten verschoben hat, so sind wir dadurch in die Lage versetzt, auch jene Veränderungen rechnerisch zu verfolgen, die die polaren Eiskalotten durch diese Verschiebung der Schneegrenze während der Vorzeit erfahren hatten.

Diese schneeweißen Polarkappen besitzen ein sehr hohes Reflexionsvermögen, weshalb sie einen namhaften Teil der ihnen zugestrahlten Wärmemengen in den Weltraum zurückweisen, der dadurch für den Wärmehaushalt der Erde verlorengeht. Vergrößert sich durch die säkulare Verschiebung der Schneegrenze die mit Eis bedeckte Kalotte der in Betracht gezogenen Hemisphäre der Erde, so wird durch das vergrößerte Reflexionsvermögen dieser Hemisphäre ihre nutzbare Bestrahlung vermindert, und daraus resultiert eine weitere sekundäre Verschiebung der Schneegrenze nach unten. Es handelte sich also darum, auch diese durch das veränderte Reflexionsvermögen hervorgerufene Verschiebung der Schneegrenze mit ihrer primären Ursache, dem Gang der Erdbestrahlung in Beziehung zu bringen und mathematisch zu erfassen. Ich bemühte mich bereits in meiner *Mathematischen Klimalehre*, diesbezügliche Berechnungen durchzuführen, stieß aber dabei auf Schwierigkeiten, die davon herrühren, daß ich keine verlässliche numerische Angabe darüber besaß, welcher Bruchteil der Wärmestrahlung der Sonne von der mit Schnee bzw. Eis bedeckten Flächeneinheit in den Weltraum zurückreflektiert wird. Eine erfolgversprechende Berechnung wäre ohne eine diesbezügliche Angabe nicht möglich gewesen und eine solche konnte nur durch systematische Forschungen in schneebedeckten Gegenden der Erde gewonnen werden, was damals noch nicht geschehen war.

Das im Sinne gehabte Vorhaben war aufzugeben, bis derartige Messungen durchgeführt werden konnten. Schon im Sommer des Jahres 1933 kam aus Paris eine wissenschaftliche Arbeit von JOSEPH DEVAUX, in der dieser junge Gelehrte, der bald nachher

auf einer Forschungsreise in den Polargegenden seinen Tod fand, die Ergebnisse seiner an den Gletschern der Pyrenäen und den Alpen und in Grönland durchgeführten Untersuchungen über das Reflexionsvermögen dieser Schneebedeckungen bekanntgab. In dieser Abhandlung fand sich die für die Durchführung der Berechnungen erforderliche zuverlässig ermittelte numerische Angabe, womit die Berechnungen durchgeführt werden konnten.

Diese Berechnungen ergaben, daß der mit Berücksichtigung des veränderlichen Reflexionsvermögens der Erde berechnete vorzeitliche Gang der Erdbestrahlung vollkommen ausreicht, um auch die großen klimatischen Änderungen des Quartärs in ihrem vollen Umfange zu erklären. Die abkühlende Wirkung der zeitweilig verbreiterten Eiskalotte der Erde gesellte sich als sekundärer Effekt dem säkularen Gange der Erdbestrahlung hinzu, ja sie wurde durch diesen Gang hervorgerufen. Deshalb weisen die neuen, mit Berücksichtigung dieses Effektes ermittelten Strahlungskurven denselben Rhythmus auf, wie die früher berechneten und zeichnen sich nur durch ihre größeren Ausschläge aus¹.

Bei der endgültigen Niederschrift des letzten Beitrages zum Handbuch der Geophysik, *Astronomische Mittel zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate*, waren alle noch offengebliebenen Fragen vollständig gelöst, und so konnte diese Veröffentlichung als Schlußstein meiner Forschungen auf dem Gebiete der Erdgeschichte betrachtet werden.

In der Mechanik des Himmels fand ich ein neues Forschungsgebiet. Diese Wissenschaft war ja das Fundament, auf dem das begonnene Lehrgebäude der astronomischen Klimatologie errichtet worden war. Die zu diesem Aufbau gehörigen theoretischen Grundlagen der Himmelsmechanik waren in den drei erwähnten Artikeln des ersten Bandes des Handbuches der Geophysik und im Lehrbuche der Himmelsmechanik mit Benützung der Vektoranalyse neu bearbeitet worden. Es waren dies mit Ausnahme des Kapitels der Polverlagerungen klassische Probleme dieser Wissenschaft, auf die ich mich früher, in meiner *Théorie mathématique* und meiner *Mathematischen Klimalehre*, nur zu berufen hatte. Das für die Klimalehre wichtigste Kapitel dieses klassischen Teiles der Himmelsmechanik war die Theorie der säkularen Störungen der Bahn und der Drehachse der Erde. Diese Theorie hat im Verlaufe eines Jahrhunderts und darüber im wesentlichen jene Form beibehalten, die ihr ihre großen Schöpfer LAGRANGE und LAPLACE gegeben hatten. Diese Theorie, einmal ausgebaut, hatte fast keine praktische Anwendung gefunden und ist vielfach in Vergessenheit geraten. Erst die Unter-

suchungen über den säkularen Gang der Erdbestrahlung haben ein weites Gebiet für die Anwendung dieser Theorie erschlossen und ihr neue Aktualität verliehen. Es wurde versucht, dieser Theorie eine zeitgemäßere Form zu geben, was in einer diesbezüglichen, in den Berichten der Königlich Serbischen Akademie veröffentlichten Abhandlung geschehen ist. In derselben wurden in die astronomische Störungsrechnung statt der bisher zur Variation benützten elliptischen Elemente andere — vektorielle Elemente — eingeführt, die mit dem mechanischen Wesen des Problems in einem innigeren Zusammenhange stehen als jene früheren und es wurde auf diese Weise dieser klassischen Theorie eine für ihre geophysikalischen Anwendungen zweckmäßigere Form gegeben, wodurch freilich ihre Endergebnisse unangetastet blieben. Als diese Abhandlung Ende des Jahres 1938 fertiggestellt war, führte eine Umschau über das bis dahin Geleistete zum Entschluß, eine zusammenfassende Darstellung meiner Forschungen zu geben.

In zweijähriger Arbeit war das neue Werk *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem* in deutscher Sprache verfaßt und als Sonderausgabe der Königlich Serbischen Akademie¹ fertiggedruckt. Es faßt die Ergebnisse meiner Arbeit zusammen, ergänzt sie durch die Forschungen ausländischer Gelehrten und formt sie zu einem einheitlichen Ganzen, zu einem neuen Zweig der kosmischen Physik. In ihm sind alle wichtigsten Ergebnisse über das Klima der Gegenwart und jenes der Vorzeit mit ihren himmelsmechanischen Grundlagen vereinigt, erweitert und vervollständigt.

Das Werk ist in sechs große Abschnitte gegliedert. Der erste Abschnitt behandelt die Bewegung der Planeten um die Sonne und die gegenseitigen Störungen dieser Bewegung, der zweite Abschnitt die Drehbewegungen der Erde. Es sind dies klassische Lehren der Himmelsmechanik, die hier in einer neuen und für die nachfolgenden Anwendungen zurechtgelegten Fassung dargeboten erscheinen. Der dritte Abschnitt, der die säkularen Wanderungen der Drehpole der Erde zum Gegenstande hat, ist dagegen durchaus originell, was auch für die nachfolgenden zwei Abschnitte gilt. Der vierte Abschnitt, «Die Bestrahlung der Erde durch die Sonne und die säkularen Änderungen dieser Bestrahlung», und der fünfte, «Zusammenhang zwischen Einstrahlung und Temperatur der Erde», beinhalten und ergänzen meine früheren Untersuchungen über diesen Gegenstand. Der sechste Abschnitt, «Das Eiszeitalter, sein Mechanismus, seine Gliederung und Chronologie», hat die Anwendungen der im Buche niedergelegten Theorie zum Gegenstand.

Welch reiche Früchte diese Arbeiten nahnhafter Klimatologen und Geologen, deren Namen ich hier

¹ Aus diesem Grund hat mein Kalender des Eiszeitalters auch weiterhin seine Gültigkeit behalten, nur sind darin die großen Ereignisse der Vorzeit, ähnlich den Feiertagen des bürgerlichen Kalenders, mit fetten Buchstaben eingetragen.

¹ Veröffentlichungen der Serbischen Akademie der Wissenschaften, Band XLII, 654 Seiten, 4^o (Belgrad 1941).

nicht aufzählen kann, getragen haben, kann nur aus dem Buche selbst deutlich ersehen werden. Diese Forscher haben nachgewiesen, daß der säkulare Gang der Erdbestrahlung, wie er mit den Strahlungstabellen und durch meine Strahlungskurven veranschaulicht wurde, deutliche Spuren im Alpengebiet hinterlassen und durch die bei den einzelnen Gletschervorstößen geschaffenen Erdmoränen seine Ausschläge und seinen Rhythmus derart markiert hat, daß eine weitgehende Zergliederung und eine auf zuverlässiger astronomischer Berechnung fußende Chronologie des alpinen Glazials aufgestellt werden konnte.

Dies gilt, vielleicht in noch größerem Maße, für das Randgebiet der norddeutschen Vereisungen. Hier haben die Terrassen der Flüsse alle Ausschläge der Strahlungskurven deutlich markiert, so daß nicht nur die neun großen Ausschläge, sondern auch die kleineren ihr Korrelat in den Schotterterrassen dieser Flüsse fanden.

Aus dieser Zusammenstimmung unternahmen es deutsche Geologen, namentlich SÖRGEL und seine

Schüler, zur Vollgliederung des Eiszeitalters zu schreiten und dehnten dabei ihre Untersuchungen auf das übrige Europa aus; russische, polnische, finnländische, italienische und ungarische Forscher beteiligten sich an diesem Unternehmen.

Seit der Fertigstellung des *Kanons*¹ habe ich, isoliert von der übrigen Welt, den soeben geschilderten Aufschwung nicht weiter verfolgen können.

Summary

After numerous attempts to explain the phenomenon of the glacial periods, undertaken since 1842, had failed, it became evident that the solution of this problem must be sought in a wider field of science. When finally use was made of the requisite items of knowledge concerning celestial mechanics, spheric astronomy, and cosmic rays, the secular variations of the terrestrial radiation could be calculated exactly out of their interrelations, which gave the key to the solution. How this came about is described in detail in the article.

¹ Im Klimaheft der «Geologischen Rundschau» (1943) teilten W. WUNDT und W. MEINARDUS die Ergebnisse der *Kanons* mit und widerlegten anhand derselben Einwände gegen meine Theorie der Eiszeiten.

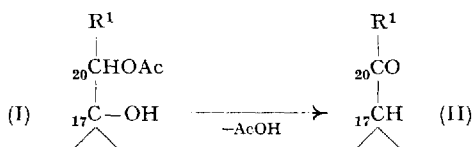
ADDITAMENTUM

ad L. FIESER et M. FIESER, Exper. 4, 285 (1948)

The Serini Reaction

By C. W. SHOPPEE¹, London

This reaction, discovered by SLOTTA and NEISSER², and first employed in the steroid field by SERINI *et al.*³, involves the conversion of a 17:20-diol 20-acetate (I) by treatment with zinc dust into a 20-ketone (II). It has recently been discussed by FIESER and FIESER⁴ who give a concise and valuable summary of the available examples.



There is no direct evidence as to the mechanism of the Serini reaction and FIESER and FIESER⁴ postulate that an enol-acetate, a 17:20-oxide, or a cyclic orthoester is formed as an intermediate by *trans*-

elimination or cyclisation. On the basis of the stereochemical form ($\text{C}_{13}\text{-Me}/\text{C}_{20}\text{-R}^1$: *cis* or *trans*) of such an intermediate, they achieve an empirical correlation of the existing data, and are able to account for the production through a *trans*-intermediate of the 17-*iso*-20-ketone (IV) from *both* the 17*n*-20*b*-acetate (III) and the 17-*iso*-20*a*-acetate (V)¹.

On the same stereochemical basis, however, FIESER and FIESER predict that REICHSTEIN's substance 0-diacetate (*allo*pregnane-3 β :17 α :20*a*-triol diacetate²)

¹ A. BUTENANDT, J. SCHMIDT-THOMÉ, H. PAUL, Ber. Dtsch. chem. Ges. 72, 1112 (1939).

² The nomenclature proposed by FIESER and FIESER (*loc. cit.*), with a view to international adoption is used here and supersedes that formerly employed by the writer:—"α" and "β" remain as trivial indices; (α) and (β), denoting orientation of nuclear substituents, become α and β, and their use is extended to C₂₀ only in the side-chain for configurations which can be related to configuration at C₁₇ in accordance with the convention suggested by FIESER and FIESER; α and β, denoting configuration in the side-chain, become a and b, e.g. for configuration at C₂₀ non-relative to C₁₇, as in the pregnane-3:20-diols, and at C₂₂ in the phytosterols.

This system eliminates the stereochemical use of parentheses but maintains the distinction which they signified; it can therefore be used in respect of continental nomenclature e.g. androstandiol-(3α,11β)-on-17 in which the parentheses were and still are used only typographically.

¹ The Chester Beatty Research Institute, The Royal Cancer Hospital, University of London, and University College, Swansea.

² K. H. SLOTTA and K. NEISSER, Ber. Dtsch. chem. Ges. 71, 2342 (1938).

³ A. SERINI, W. LOGEMANN, and W. HILDEBRAND, Ber. Dtsch. chem. Ges. 72, 391 (1939).

⁴ L. F. FIESER and MARY FIESER, Exper. 4, 285 (1948).