

Das Rätsel der Eiszeiten – Teil III – Hays, Imbrie & Shackleton

geschrieben von Sod, Lüdecke, Frey | 4. März 2014

Diese Studien sind ziemlich überholt, und viele neue Informationen sind seit deren Erscheinen ans Licht gekommen. Und natürlich sind seitdem tausende paper zum Thema Eiszeiten geschrieben worden. Warum also der Blick auf ältere Arbeiten? Weil es hilft, einen Zusammenhang herzustellen. Es handelt sich um „oft zitierte“ oder grundlegende paper, aber das Verständnis der Eiszeiten ist so komplex, dass es möglicherweise einfacher ist, mit einer ältere Sicht zu beginnen. Zumindest hilft es mir, meine Gedanken zu ordnen. *Wann immer ich versuche, ein Klimaproblem zu verstehen, endet dies normalerweise mit dem Versuch, einige der früher oft zitierten Studien zu verstehen. Die meisten nachfolgenden Studien stützen sich nämlich darauf, ohne die Inhalte noch einmal zu wiederholen.*

Die Arbeit "Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages von J.D. Hays, J. Imbrie, N.J. Shackleton (1976)" wird in vielen von mir gelesenen Arbeiten der jüngeren Zeit erwähnt, Google Scholar zufolge ist sie in 2656 folgenden paper als Referenz genannt worden. In der Klimawissenschaft ist das sehr viel.

Seit mehr als einem Jahrhundert sind die Gründe für die Fluktuationen der Eisschilde des Pleistozäns ein faszinierendes und ungelöstes wissenschaftliches Mysterium. Das große Interesse daran hat eine Anzahl möglicher Erklärungen hervorgebracht. Eine Gruppe von Theorien betrachtet Faktoren außerhalb des Klimasystems einschließlich Variationen des solaren Outputs oder der Sonnenenergie, die, beeinflusst durch interstellaren Staub, die Erde erreicht; die jahreszeit- und breitenabhängige Verteilung der einfallenden Strahlung infolge Änderungen der Orbitalgeometrie der Erde; den atmosphärischen Gehalt an vulkanischem Staub sowie das Magnetfeld der Erde. Andere Theorien basieren auf internen Elementen des Klimas, die lange genug andauern, um Fluktuationen im Zeitmaßstab von 10.000 bis 1.000.000 Jahren hervorzurufen. Diese Einflussfaktoren schließen auch Ausdehnung und Schrumpfung von Eisschilden ein, die Veränderungen des Meereises um die Antarktis, die Eisbedeckung des Arktischen Ozeans, den Austausch von Kohlendioxid zwischen Atmosphäre und Ozeanen und die Tiefenzirkulationen in den Ozeanen.

Außerdem wurde geltend gemacht, dass das Klima als ein fast intransitives System zwischen verschiedenen Stadien in angemessenen Zeiträumen ohne jede Einmischung äußerer Antriebe oder einer internen Zeitkonstanten pendeln kann. Dieser letzte Gedanke wurde von Lorenz 1968 aufgeworfen und zwar in der Studie, die wir in Teil II beleuchtet haben.

Die Autoren Hays et al. merken an, frühere Arbeiten hätten Beweise erbracht, dass orbitale Änderungen bei Klimaänderungen eine Rolle spielen. Sie verfassen dann einen interessanten Kommentar, der, wie wir sehen werden, in den 38 Jahren seit Erscheinen dieser Studie seine Gültigkeit nicht verloren hat:

*Das erste Problem ist die Unsicherheit bei der Identifizierung derjenigen Anteile im Strahlungshaushalt, die für Klimaänderungen kritisch sind. Die Abhängigkeit von Breite und Jahreszeit wird als höchst bedeutsam angesehen; erheblich unterschiedliche Klimaaufzeichnungen können mit den **gleichen** astronomischen Daten vorhergesagt werden. Milankovitch folgte den Ansichten von Köppen und Wegener, dass die Verteilung der sommerlichen Einstrahlung um 65°N kritisch für das Anwachsen oder Schrumpfen von Eisschilden sei. Kukla wies auf Schwächen dieser Argumentation hin und meinte, dass die kritische Zeit die Monate September und Oktober in beiden Hemisphären seien. Als Folge würden die Zeiten der letzten Zwischeneiszeit auf der Basis dieser Verläufe auf vor 80.000 bis 180.000 Jahren geschätzt.*

Das andere Problem zu jener Zeit bestand im Fehlen von Qualitätsdaten über die Eis- und Zwischeneiszeiten:

Das zweite und kritischere Problem beim Testen der Orbitaltheorie war die Unsicherheit der geologischen Chronologie. Bis vor kurzem hat die Ungenauigkeit der Datierungsmethoden die Zeitspanne begrenzt, in der ein aussagekräftiger Test für die letzten 150.000 Jahre durchgeführt werden konnte.

Sie wendet sich dann einigen jüngeren Studien zu, die Daten von besserer Qualität zu den letzten paar einhunderttausend Jahren der Temperaturgeschichte aufweisen. Übrigens ist Hays Professor der Geologie, Imbrie Professor der Ozeanographie und Shackleton forschte zu jener Zeit über das Quartär (Anm. der Redaktion: Das *Quartär* ist der jüngste Zeitabschnitt der Erdgeschichte einschließlich des Holozäns und damit der Gegenwart.) und ist jetzt Professor auf diesem Gebiet.

Kurze Einführung in Orbitalparameter, die wichtig sein können

Änderungen der orbitalen Geometrie der Erde sind genau das, was wir in einem späteren Artikel näher beleuchten wollen, möglicherweise in Teil IV. Sie haben nämlich Änderungen der solaren Einstrahlung zur Folge. Als Einführung zu dieser Problematik sind drei Parameter maßgebend, die variabel sind und mit Klimaänderungen in Verbindung stehen:

1. Exzentrizität e (wie sehr nähert sich der Erdborbit einer Kreislinie an) – gegenwärtiger Wert 0,0167.
2. Ekliptik ϵ (die Neigung der Erdachse) – gegenwärtig 23,439°
3. Präzession ω (wie nahe befindet sich die Erde im Juni oder Dezember an der Sonne) – gegenwärtig erreicht die Erde ihren sonnennächsten Punkt

am 3. Januar.

Zum ersten Punkt: Die Exzentrizität, ist der einzige Parameter, der die **Gesamtmenge** der solaren Einstrahlung an der Obergrenze der Atmosphäre in einem bestimmten Jahr verändert. Man beachte, dass eine konstante Einstrahlung an dieser Obergrenze variabel sein kann, **falls** mehr oder weniger dieser Solarstrahlung durch variable Eisschilde infolge veränderter Ekliptik reflektiert wird.

Zum zweiten Punkt: Die Ekliptik oder Neigung beeinflusst den **Unterschied** der Einstrahlung an der Obergrenze der Atmosphäre (Anm. der Redaktion: TOA = top of atmosphere) zwischen Sommer und Winter. Somit werden die Jahreszeiten, genauer, die Stärken der Jahreszeiten beeinflusst.

Zum dritten Punkt: Die Präzession beeinflusst die Strahlungsmenge zu verschiedenen Zeiten des Jahres (moderiert durch die Exzentrizität). Wenn die Umlaufbahn der Erde um die Sonne ein perfekter Kreis wäre, würde dieser Einfluss verschwinden. Befindet sich die Erde im Juni/Juli in größter Nähe zur Sonne, ist der Sommer der Nordhemisphäre stärker und derjenige der Südhemisphäre schwächer, im Winter ist es umgekehrt.

Die Exzentrizität beeinflusst also die totale TOA-Einstrahlung, während Ekliptik und Präzession deren Verteilung nach Jahreszeit und Breite verändern. Allerdings hängen die Variationen der TOA-Einstrahlung von e^2 ab, so dass ihre Gesamtvariation dort über einen sehr langen Zeitraum lediglich 0,1% betragen hat. Diese Variation ist sehr gering. Dennoch ist in den Eisbohrkerndaten die Exzentrizität das stärkste „orbitale Signal“. Dieser Widerspruch ist ein Problem, das bislang nicht einmal die Befürworter dieser Theorie als gelöst ansehen.

Zu den letzten Klimata der Zwischeneiszeiten heißt es bei vielen Autoren, einschließlich George J. Kukla, Wallace S. Broecker, John Imbrie, Nicholas J. Shackleton:

*Am Ende der letzten Zwischeneiszeit (Warmzeit) vor etwa 100.000 Jahren bewegte sich die Erde **ähnlich wie heute** in eine ausgeprägt **kältere Phase**. Gletscher wuchsen, der Meeresspiegel sank und Wüsten dehnten sich aus. Der gleiche Übergang erfolgte auch viele Male früher, verbunden mit periodischen Veränderungen des Erdorbits um die Sonne. **Der Mechanismus dieser Änderung, das wichtigste Puzzleteil der Klimatologie, ist bislang nicht aufgefunden.***

Sediment-Bohrkerne

Unsere geologischen Daten umfassen Messungen von drei klimasensitiven Parametern in zwei Bohrkerne aus Sedimenten der Tiefsee. Diese Bohrkerne stammen aus einem Gebiet, in dem sich, wie frühere Arbeiten gezeigt haben, Sedimente schnell genug ablagern, um Informationen in der hier interessierenden Frequenz zu liefern. Messungen des Sauerstoffisotopenverhältnisses $\delta^{18}O$ (Anm. der Redaktion: das Isotopenverhältnis 180 zu 160, bezeichnet als $\delta^{18}O$, ist proportional zur

lokalen Umgebungstemperatur), machen es möglich, diese Bohrkerndaten mit anderen weltweit zu vergleichen und so sicherzustellen, dass sich die untersuchten Sedimente ohne signifikante Pausen und mit Raten abgelagert haben, die keine wesentlichen Fluktuationen zeigen...

...Aus vielen hundert Bohrkernen, die stratigraphisch durch das CLIMAP-Projekt untersucht worden sind, haben wir die beiden ausgesucht, deren Fundort und Eigenschaften zum Testen der Orbital-Hypothese ideal sind. Am wichtigsten aber: sie enthalten eine Klimaaufzeichnung, die kontinuierlich und lang genug ist, um statistisch brauchbar zu sein (450.000 Jahre) und sich durch Akkumulationsraten auszeichnet, die schnell genug sind (>3 cm pro Jahrtausend), um noch klimatische Fluktuationen mit Perioden deutlich unter 20.000 Jahren zeitlich aufzulösen.

Die Bohrkernkerne stammen aus dem südlichen Indischen Ozean. Interessant an ihnen ist, dass von jeder Stelle 3 unterschiedliche Parameter ausgewertet werden konnten, einschließlich von $\delta^{18}O$ Werten, die ein Maßstab für die globale Eisschilde und die Temperaturen an den Stellen der Ozeane sein müssten, von wo die Bohrkernkerne herkommen.

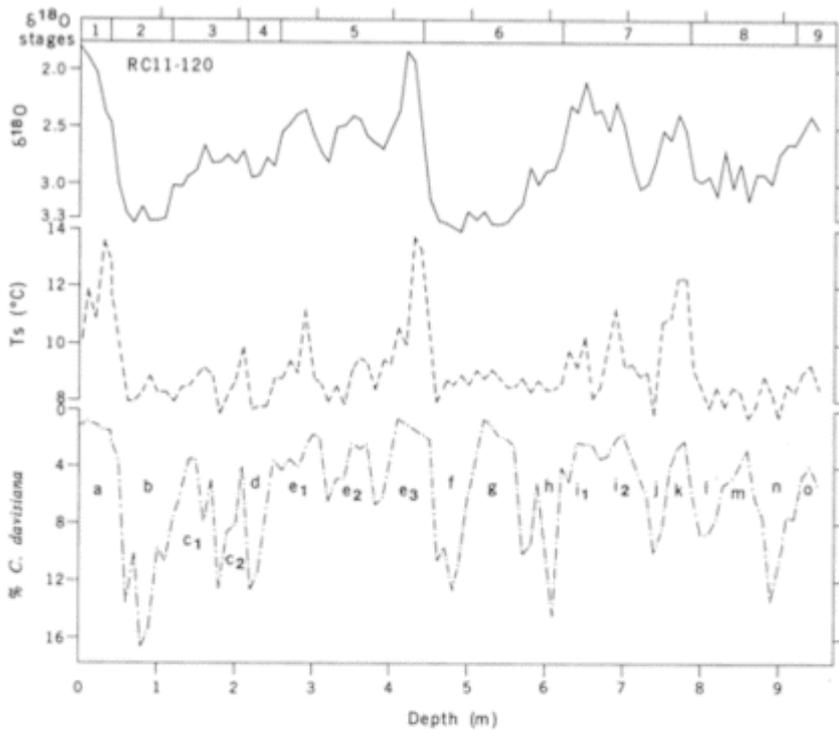


Fig. 2. Depth plots of three parameters measured in core RC11-120: $\delta^{18}\text{O}$ (solid line), T_s (dashed line), and percentage of *C. davisiana* (dash-dot line). Letter designations of peaks on the latter curve are informal designations of various parts of the record.

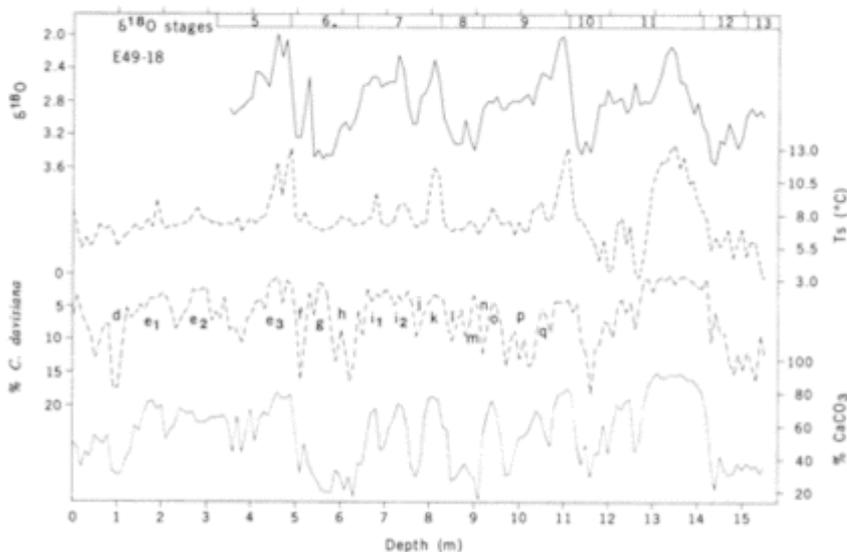


Fig. 3. Depth plots of four parameters measured in core E49-18: $\delta^{18}\text{O}$ (solid line at the top), T_s (dashed line), percentage of *C. davisiana* (dash-dot line), and percentage of CaCO_3 (solid line at the bottom). The technique used for CaCO_3 measurement is that of Hülsemann (81). A comparison of the lettered intervals of the *C. davisiana* curve for this core with those for core RC11-120 (Fig. 2) shows that the time represented by the top 1.5 m of RC11-120 is not present in E49-18.

Hays, Imbrie & Shackleton (1976)

Über die Datierung der Bohrkern wurde viel diskutiert. Im Wesentlichen erlauben andere Informationen einige Abänderungen der Datierung, wobei die Arbeitshypothese lautet, dass innerhalb dieser Änderungen die Akkumulation der Sedimente mit konstanter Rate erfolgte.

Zwar ist einheitliche Sedimentierung ein Ideal, von dem es unwahrscheinlich ist, dass es überall vorherrscht. Dass die gleichen

Charakteristika der Sauerstoffisotope in allen Bohrkernen gleichermaßen zu finden sind, zeigt aber, dass es keine substantiellen Zungen mit Abweichungen geben kann. Die frappierende Ähnlichkeit der Bohrkerne aus weit entfernten Gebieten zeigt zudem, dass es keine großen Verzerrungen der Akkumulationsraten geben kann.

Spektralanalyse

Der Schlüsselabschnitt der Analyse von Hays et al. ist die Spektralanalyse der Daten, die mit einer Spektralanalyse der „astronomischen Antriebe“ verglichen wird. Die Autoren sagen:

...wir postulieren ein einzelnes Strahlungs-Klimasystem, welches orbitale Inputs in klimatische Outputs verwandelt. Daher haben wir nicht die Verpflichtung, den physikalischen Mechanismus der Klimareaktion zu identifizieren und können das Verhalten des Systems modellfrei spezifizieren. Die Dynamik unseres Modells liegt lediglich durch die Annahme fest, es sei ein zeitinvariantes, lineares System – was heißt, dass sein Zeitverhalten als lineare Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten beschrieben wird. Die Frequenzantwort eines solchen Systems ist bekannt: Frequenzen im Output passen zu denen im Input, aber ihre Amplituden werden bei unterschiedlichen Frequenzen moduliert. Daher können wir erwarten, sie in paläoklimatischen Spektren zu finden, egal welche Frequenzen die orbitalen Signale haben (außer Frequenzen, die zu stark gedämpft werden).... Meine „Übersetzung“: wir wollen das orbitale Spektrum mit dem historischen Spektrum vergleichen, ohne zu versuchen, eine Theorie zu formulieren, und abwarten, wie der Vergleich der beiden Spektren aussieht.

Die orbitalen Effekte:

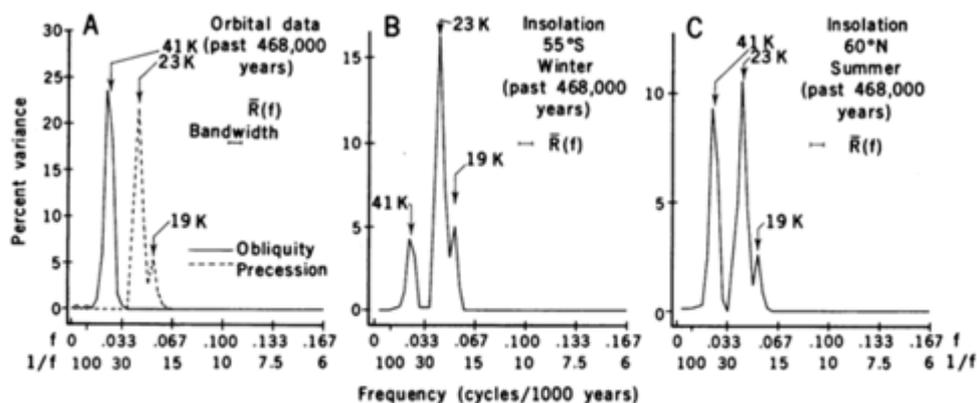


Fig. 4. High-resolution spectra of orbital and insolation variations over the past 468,000 years. Variance (as percentage of total variance per unit frequency band) is plotted as a function of frequency (cycles per thousand years). Arrows indicate weighted mean cycle lengths of spectral peaks (in thousands of years). (A) Spectra for obliquity and precession ($\Delta \epsilon \sin II$). (B) Spectrum for winter insolation at 55°S. (C) Spectrum for summer insolation at 60°N. [All data are from Vernekar (39)]

Bildunterschrift: Hochauflösende Spektren von orbitalen und strahlungsbedingter Variationen während der letzten 468.000 Jahre. Die Varianz (als Prozentteil der Gesamtvarianz pro Einheit auf dem

Frequenzband) ist geplottet als Funktion der Frequenz (Zyklen pro eintausend Jahre). Die Pfeile geben die gewichtete mittlere Zykluslängen an (in tausender Jahren). (A) Spektren der Schiefe und der Präzession (B) Spektrum der winterlichen Einstrahlung bei 55°S. (C) Spektrum der sommerlichen Einstrahlung bei 60°N. Alle Daten von Vernekar (39)

From Hays et al (1976)

Die historischen Daten:

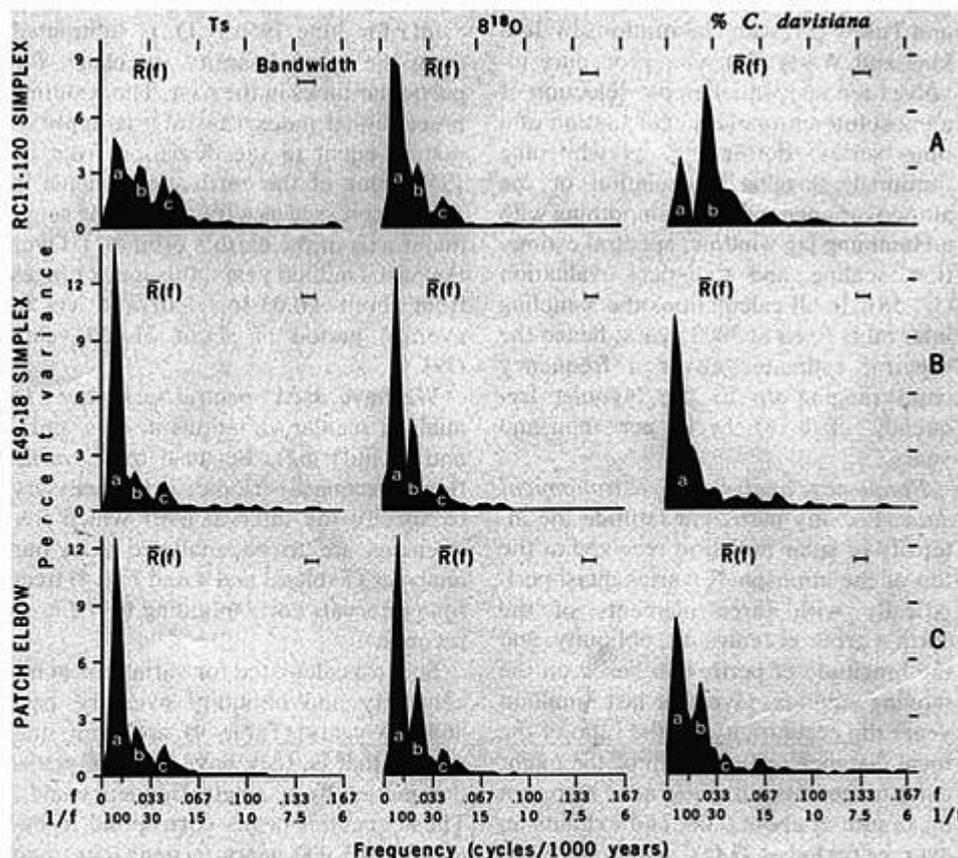


Fig. 5. High-resolution spectra of climatic variations in T_s , $\delta^{18}O$, and percentage of *C. davisiana*. Variance (as percentage of total variance per unit frequency band) is plotted as a function of frequency (cycles per thousand years). Prominent spectral peaks are labeled *a*, *b*, and *c*. Arrows indicate weighted mean cycle lengths (in thousands of years). The age models used in the calculations are given in Table 2. (A) Spectra for core RC11-120 are calculated for the SIMPLEX age model. (B) Spectra for core E49-18 are calculated for the SIMPLEX age model. (C) Spectra of the combined (PATCH) record are calculated for the ELBOW age model.

Bildunterschrift: Hochauflösende Spektren klimatischer Variationen in T_s , $\delta^{18}O$ und Prozentanteil von *C. davisiana*. Die Varianz (als Prozentanteil der Gesamtvarianz pro Einheit auf dem Frequenzband) ist geplottet als Funktion der Frequenz (Zyklus von tausender Jahren). (A) Spektren für den Bohrkern RC11-120 wurden für das SIMPLEX-Modell berechnet. (B) Spektren des Bohrkerns E49-18 wurden für das SIMPLEX-Modell berechnet. (C) Spektren der gemeinsamen Aufzeichnung wurden berechnet für das ELBOW-Modell.

From Hays et al (1976)

Wir haben auch Spektren für zwei Zeitreihen aufgezeichneter Variationen

der Einstrahlung (ihre Abbildung 4, unsere Abbildung 2) berechnet, eine für 55°S, die andere für 60°N. Die drei dominanten Zyklen in diesen Spektren (41.000; 23.000 und 19.000 Jahre) korrespondieren mit jenen, die in den Spektren der Ekliptik und der Präzession gefunden wurden. Obwohl dieses Ergebnis zu erwarten war, unterstreicht es zwei wichtige Punkte. Erstens: Strahlungsspektren sind charakterisiert durch Peaks, welche die Einflüsse von **Ekliptik und Präzession, aber nicht der Exzentrizität widerspiegeln**.

Zweitens: Die relative Bedeutung der Strahlungskomponenten infolge Ekliptik und Präzession variiert mit der geographischen Breite und der Jahreszeit.

Zur Interpretation der historischen Spektren sagen Hays et al.:

Nichtsdestotrotz sind fünf der sechs untersuchten Spektren charakterisiert durch drei diskrete Peaks, die die gleiche Frequenzverteilung wiedergeben. Es sind die Perioden von 87.000 bis 119.000 Jahren, mit a bezeichnet; 37.000 bis 47.000 Jahre mit b; und 21.000 bis 24.000 Jahre mit c. Dies legt nahe, dass die b und c Peaks die Ekliptik und Präzession reflektieren.

Man beachte dagegen, dass der Hauptpeak des Frequenzspektrums bei 100.000 Jahren liegt.

Es gibt viel Diskussion in der Hays et al. Studie über ihre Datenanalyse. Um hierzu mehr zu erfahren, sollte man ihr paper lesen. Die Details sind für das Verständnis hier aber vielleicht nicht so wichtig. Die Autoren folgern:

Im Frequenzbereich von 10.000 bis 100.000 Zyklen pro Jahr konzentriert sich der klimatische Anteil auf drei getrennte Peaks bei 23.000, 42.000 und etwa 100.000 Jahren. Diese Peaks korrelieren mit den dominanten Perioden des Umlaufes der Erde um die Sonne und enthalten jeweils 10, 25 und 50% der Klimavarianz.

Die Klimakomponente von 42.000 Jahren hat die gleiche Periode wie Variation der Ekliptik und hat eine konstante Phasenbeziehung mit ihr.

Der 23.000 Jahreanteil der Klimavarianz zeigt die gleichen Perioden (etwa 23.000 und 19.000 Jahre) wie der quasi-periodische Präzessionsindex.

Die dominante Klimakomponente von 100.000 Jahren hat eine mittlere Periode nahe der orbitalen Exzentrizität und ist auch mit dieser in Phase. Anders als die Korrelationen zwischen Klimavariationen und höheren Frequenzen orbitaler Umläufe (welche mit der Hypothese erklärt werden können, dass das Klimasystem linear auf den orbitalen Antrieb reagiert) erfordert eine Erklärung der Korrelationen zwischen Klima und Exzentrizität möglicherweise eine Hypothese der Nicht-Linearität.

Wir folgern daraus, dass Änderungen der orbitalen Geometrie der Erde der fundamentale Grund für Eiszeiten im Quartär sind.

Es sah also alles recht gut für die Erklärungen der Eiszeiten im Jahre 1975 aus.

Diejenigen, die etwas über jüngere Evaluierungen der Spektralanalyse des Vergleichs zwischen Temperaturgeschichte und Orbitalantrieb wissen wollen, mögen in Studien von Carl Wunsch 2003, 2004 und 2005 nachschauen, z. B. *The spectral description of climate change including the 100 ky energy, Climate Dynamics (2003).*

Einige Jahre später

Ein paar Kommentare von Imbrie & Imbrie (1980):

Seit den Arbeiten von Croll und Milankovitch zielten viele Forschungen auf die zentrale Frage der astronomischen Theorie der Eiszeiten: Verursachen Änderungen der orbitalen Geometrie Klimaänderungen, die geologisch erkennbar sind?

...Einerseits haben Klimatologen das Problem theoretisch attackiert, indem sie die Grenzwertbedingungen der Energiebilanzmodelle adjustiert und dann die Stärke der berechneten Reaktion beobachtet haben. Betrachtet man diese numerischen Experimente mehr oder weniger als einen Test der astronomischen Theorie, wirft das offene Fragen auf, weil die verwendeten Modelle ungetestete Parametrisierungen wichtiger physikalischer Prozesse enthalten. Die Arbeit mit frühen Modellen zeigte, dass die Klimareaktion auf orbitale Änderungen zu klein war, um die Eiszeiten des Pleistozäns zu erklären. Aber Experimente mit einer neuen Generation von Modellen zeigen, dass orbitale Variationen ausreichen, um wesentliche Änderungen der Eisschilde in der Nordhemisphäre zu erklären...

... Im Jahre 1968 haben Broecker et al. (34, 35) darauf hingewiesen, dass der Verlauf der sommerlichen Insolation bei 45°N viel besser zu den paläoklimatischen Aufzeichnungen der letzten 150.000 Jahre passt als der Verlauf bei 65°N, wie er von Milankovitch ausgewählt worden ist.

Gegenwärtiger Status: Dies heißt jetzt nicht, dass alle wichtigen Fragen beantwortet sind. Tatsächlich ist es ein Ziel dieses Artikels, zur Lösung eines der verbleibenden wesentlichen Probleme beizutragen: nämlich Ursprung und Verlauf des Klimazyklus' von 100.000 Jahren.

Zumindest während der letzten 600.000 Jahre werden fast alle Klimaaufzeichnungen von Komponenten in einem engen Frequenzbereich dominiert, dessen Zentrum in der Nähe des 100.000-Jahres-Zyklus' liegt. Und doch wird eine Klima-Antwort bei dieser Frequenz nicht von der Milankovitch-Version der astronomischen Theorie vorhergesagt – oder von irgendeiner anderen Version als linearer Response-Theorie.

...Ein anderes Problem besteht darin, dass die meisten veröffentlichten Klima-Aufzeichnungen, die älter als 600.000 Jahre sind, keinen 100.000-Jahres-Zyklus zeigen...

Ziel unserer Modellierungsbemühungen war es, die Klimareaktion auf orbitale Variationen während der letzten 500.000 Jahre zu simulieren. Das sich ergebende Modell kann vier wichtige Aspekte nicht wiedergeben. Es kann den 100.000-Jahre Einfluss nicht wiedergeben; der 23.000- und 19.000-Einfluss ist dagegen zu stark; es wird zu viel 413.000-Einfluss produziert und das Modell passt nicht zu den Daten des letzten 413.000-Jahres-Minimums der Exzentrizität, als Werte von e (Exzentrizität) niedrig waren und die Amplitude der 100.000-Exzentrizität deutlich reduziert war.

Die Existenz eines instabilen Fixpunktes macht das Tuning zu einer extrem kniffligen Aufgabe. Zum Beispiel schreibt Weermann, dass die Änderung eines Parameters um weniger als 1% der physikalisch zulässigen Bandbreite den Unterschied zwischen einer Eiszeit und einer Zwischeneiszeit in einem Teil des experimentellen Modelllaufes ausmacht.

Dies wäre ein gutes Beispiel für Lorenz' Konzept eines fast intransitiven Systems (eines, dessen Charakteristiken über lange, jedoch begrenzte Zeitintervalle stark von den Anfangsbedingungen abhängt).

Noch einmal taucht der „Geist“ von Lorenz auf. In späteren Artikeln werden wir sehen: auch mit viel komplizierteren Modellen ist es nicht einfach, eine Eiszeit zu erzeugen oder eine Eiszeit in eine Zwischeneiszeit (Warmzeit) übergehen zu lassen.

Link:

<http://scienceofdoom.com/2013/10/13/ghosts-of-climates-past-part-three-hays-imbrie-shackleton/>

Die bisherigen Teile:

Teil I und II:

<http://www.eike-klima-energie.eu/climategate-anzeige/das-raetsel-der-eiszeiten-teil-i-und-ii/>