



天文气候学说的漫长历史

作者：

安德烈·贝尔热 (BERGER André)，鲁汶大学地球与气候研究中心荣休教授及荣誉研究员。
尹秋珍 (YIN Qiuzhen)，比利时法语国家科学基金会副研究员及鲁汶大学教授。



封面图片：中国陕西省西安附近的黄土-古土壤序列。图片中间的红色层对应于约 33 万年前的间冰期 MIS-9（图片来源：作者）

过去数百万年间，气候变迁呈现出哪些典型周期？这些自然波动的根源在于地球绕太阳运行的轨道参数，分别是公转椭圆轨道的偏心率、地轴倾角以及岁差运动。18 世纪的天文学家是如何洞察到冰期与间冰期交替出现的规律的？上世纪的气候学家又是依据哪些基础，建立起能够相当精确地模拟地质痕迹所揭示的实际气候变化的模型？

目录

1. 古气候数据中的天文周期	3
1.1. 轨道偏心率	3
1.2. 黄赤交角	5
1.3. 气候岁差	6
2. 重大气候变化的发现历程	8
2.1. 18 世纪以来气候演变观念的演进	8
2.2. 第一步：冰川扩张与气候变化	10
2.3. 古气候天文理论的诞生	11
3. 米兰科维奇天文理论及其后续发展	14
3.1. 米兰科维奇与冰川作用周期	14
3.2. 天文轨道参数的精确化计算	16
4. 总结	18
参考资料及说明	19

1. 古气候数据中的天文周期

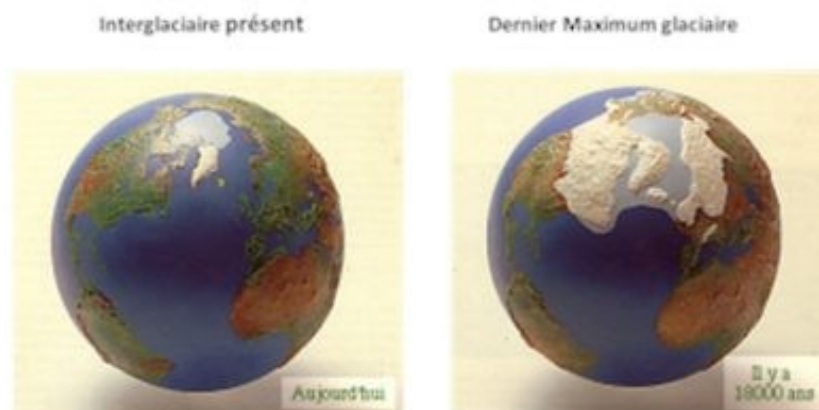


图 1. 北半球现今与末次盛冰期的冰盖范围[图片来源：改编自 Joussaume S., 参考文献^[1]]

对大气温室气体浓度、南极气温、亚洲季风强度及全球冰量总量的重建研究，清晰揭示了近百万年来以冰期-间冰期循环为特征的气候变化规律（图 1）^{[1][2]}。

基于时间序列的频谱分析^{[3][4]}识别出 10 万年、4.1 万年、2.3 万年和 1.9 万年这四个显著周期。这些周期对应着地球绕日轨道（黄道）与自转轴相关的三个天文参数，即偏心率、黄赤交角及气候岁差^[5]的长期变化特征。

1.1. 轨道偏心率

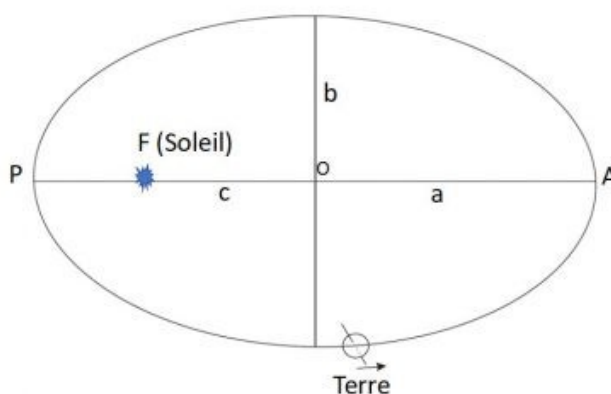


图 2. 地球绕太阳的椭圆轨道示意图。O 为椭圆中心，P 为近日点，A 为远日点，F 为椭圆的一个焦点（太阳位置）。距离 OF（记为 c ）等于半长轴 a 与偏

心率 e 的乘积，且等于 $\sqrt{a^2-b^2}$ 。注：为清晰展示原理，本图未按实际比例绘制。事实上地球轨道接近圆形，太阳位置非常接近轨道中心。[图片来源：作者绘制（A. Berger）]

偏心率是描述轨道形状的度量参数。根据约翰内斯·开普勒（Johannes Kepler, 1571-1630）于 1609 年提出的第一定律^[6]，地球绕太阳运行的轨道呈椭圆状。该椭圆的形状随时间变化，可从理想圆形（偏心率为零）逐渐变为椭圆，按比例绘制，其实是与圆形的差异也极为微小。当前地球轨道的偏心率约为 0.016，而在过去数百万年间，该值始终在 0 至 0.06 范围内波动。若以 a 表示椭圆半长轴、 b 表示半短轴（见图 2），偏心率 e 的定义式为：

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

由于半长轴保持不变，偏心率的变化只随半短轴的改变而改变。半短轴随偏心率减小而增大，当偏心率降为零时，半短轴最终与半长轴相等。此后，随着偏心率增大，半短轴将逐渐减小，直至偏心率达到最大值。

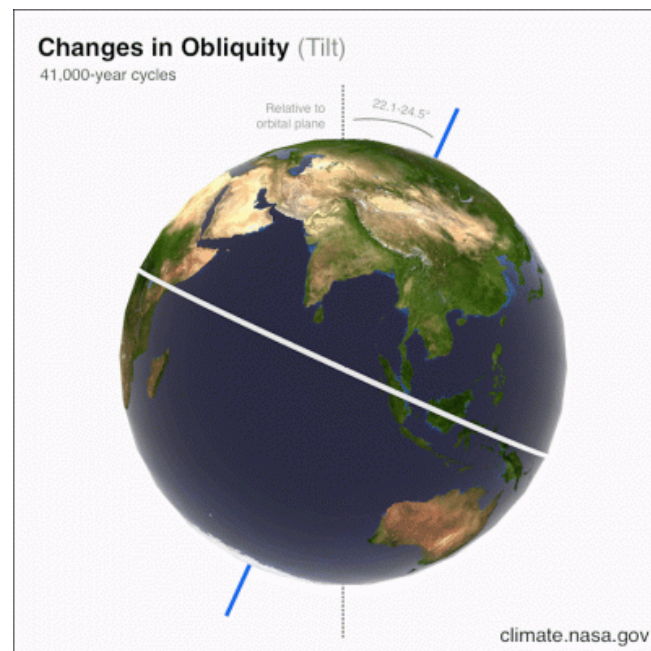


图 3. 黄赤交角变化演示动画 [来源：NASA/JPL-Caltech，https://climate.nasa.gov/internal_resources/2000/]

偏心率的变动具有多周期特征，主要周期约为 40 万年，另外存在若干接近 10 万年的周期^[2]。尽管地球轨道接近正圆，但近日点与远日点的日地距离之差^[7]（相对于半长轴 a ）目前仍为 3.4%，该值相当于当前轨道偏心率的 2 倍。因此，太阳辐照度^[8]（亦称日射量^[9]）的相应差异可达 6.8%。

1.2. 黄赤交角

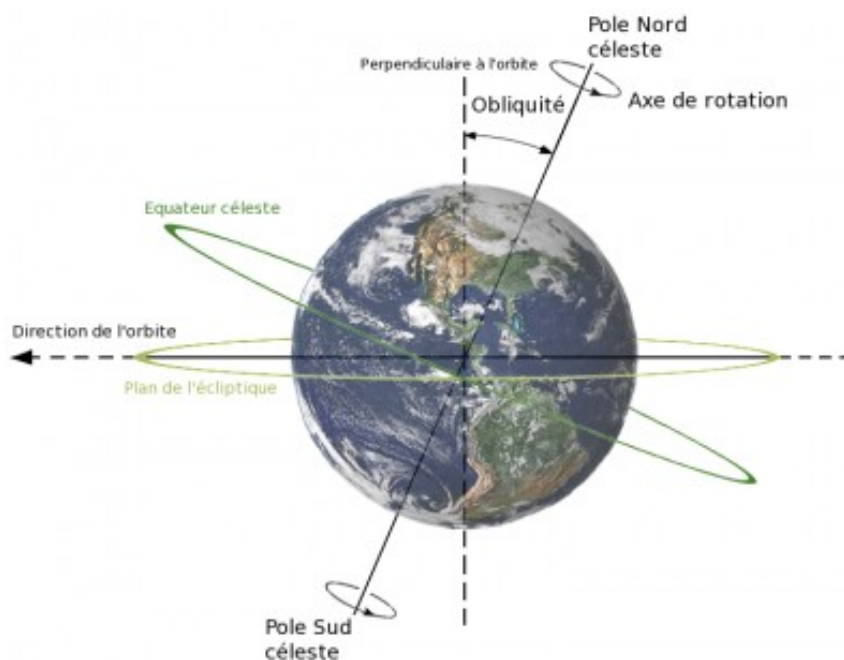


图 4. 黄道面与天赤道及地球自转轴的关系示意图[图片来源：基于 Daelomin53 (talk) 对 AxialTiltObliquity.png 的衍生创作；原图作者：Dna-webmaster，采用 CC BY 3.0 许可协议 (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0>)，通过维基共享资源获取]

黄赤交角是地球自转轴与黄道面法线之间的夹角。当前的角度为 $23^{\circ}27'$ ，其变化范围介于 22° 至 25° 之间，主要变化周期为 41,000 年。正是黄赤交角的存在定义了回归线与极圈的位置（图 3、图 4）。目前的角度正以每世纪 46.8 角秒的速度减小，这导致回归线以每世纪 1.4 公里的速度向赤道方向移动（等效于极圈向两极方向移动）。黄赤交角是形成地球四季现象的根本原因。

1.3. 气候岁差

地球自转轴目前指向**北极星**（北半球的小熊座 α 星）。地球自转轴除相对于黄道面法线的倾角变化外，还在空间中进行运动，形成一个开口角度等于黄赤交角的近似完美锥面。这种运动称为**天文岁差**，表现为观测恒星方向的渐进偏移（图 4、5、6），周期为 25,760 年。这种岁差运动与春分点在黄道上的逆行（顺时针方向）相关，移动速率为每年 50.29 角秒。春分点实际被定义为天赤道与黄道的交点（图 4）。

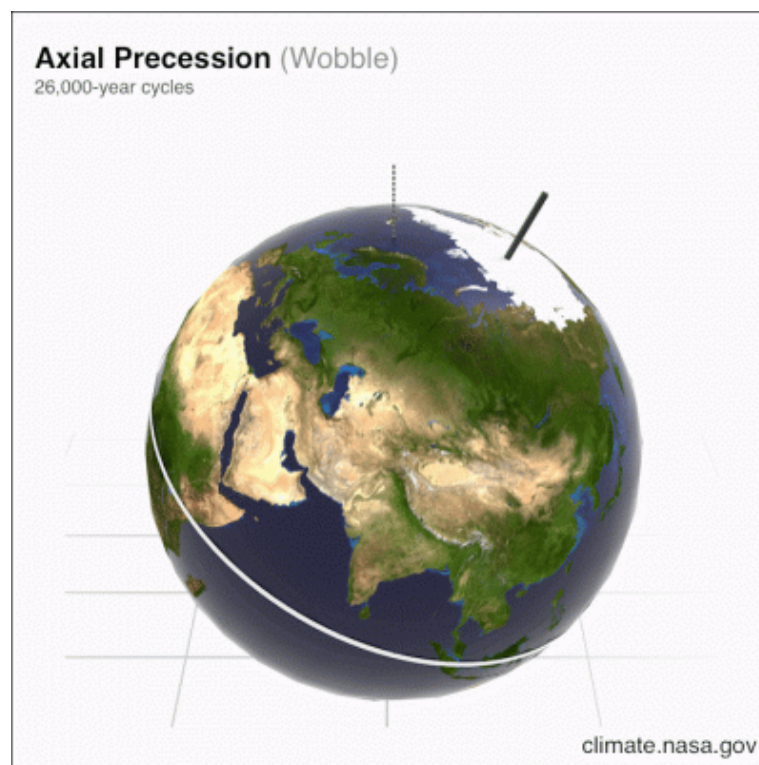


图 5. 天文岁差运动演示动画本图展示的是从太空视角观测到的顺时针方向运动，其旋转方向与下图中从地球视角观测到的运动方向相反。[来源：NASA/JPL-Caltech, https://climate.nasa.gov/internal_resources/2001/]

气候岁差是研究地球气候变迁的核心参数。它由天文岁差和近日点进动（拱线进动）共同作用形成。气候岁差通过**近日点位置与春分点位置**（即春季地球观测太阳的方向）之间的**夹角**来定义，从而能够确定季节与近日点的相对位置关系，或计算特定季节的日地距离。例如，目前地球在冬至时最接近太阳，即北半球正

值冬季。因此，气候岁差所决定的季节相位变化调节着季节温度变化的幅度，当前它使北半球冬季相对温和，夏季则相对凉爽。

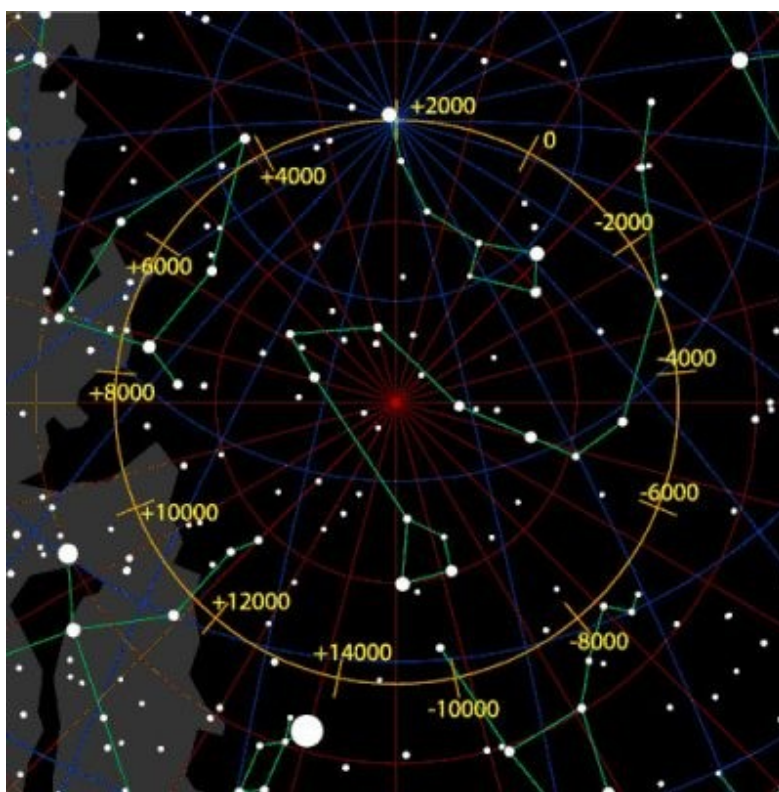


图 6. 天文岁差（从地球视角观测）图中展示了从地球观测到的北天极在天空中的移动轨迹。此视角对应我们仰望天空时所见的实际天球运动，由此可解释春分点的逆时针方向移动（而从太空俯视时该运动为顺时针方向）。本示意图假设岁差运动速度与黄赤交角保持不变。[图片来源：Tau'olunga，采用 CC BY-SA 2.5 许可协议 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5>)，通过维米共享资源获取]

气候岁差的平均变化周期为 **21740 年**。该周期的成因在于春分点与近日点相对于背景恒星的位置均发生改变，且运动方向相反：春分点以顺时针方向绝对运动，近日点则以逆时针方向运动（周期约 135200 年）。因此两者之间的相对运动周期可近似计算如下：

$$\frac{360}{21740} = \frac{360}{25760} + \frac{360}{135200}$$

这一平均周期实际上是其两个基本周期分量（约 23000 年与 19000 年）叠加的结果。这两个分量于 20 世纪 70 年代被明确提出^[2]，从而验证了海斯(Hays)等人^[3]从地质数据中发现的相应周期。

“气候岁差”这一名称的提出^[2]，是基于气候学关注的核心在于春分点与近日点的相对位置关系，而非二者在天空中的绝对位置。

古气候天文理论^{[10][11]}通过耦合上述天文参数的长期周期变化、太阳辐照度分布与全球气候系统演化而建立。该理论在发展过程中形成了若干学说分支^[12]，下文将基于近几个世纪气候变迁的发现史脉络对其展开系统阐述。

2. 重大气候变化的发现历程

2.1. 18 世纪以来气候演变观念的演进

气候学作为一门描述性学科，已发展为涉及气候系统五大圈层及其相互作用的交叉科学：

- 大气圈
- 水圈
- 冰雪圈
- 岩石圈
- 生物圈

因此，气候在季节至数百万年尺度上的变化也就不足为奇。尽管这门科学在近几十年呈爆发式发展，但对超年际-年代际尺度气候变化的首次证据发现与研究，实则可追溯至 18 世纪。下表汇总了相关进展：

表. 18 世纪以来参与气候变化观念演进的部分科学家^[13]

Scientists		Proposed ideas		
	Jens Esmark (1763-1839) Norwegian	The first to propose the variations of the Earth orbit as the causes of climate changes		
	Joseph-Alphonse Adhémar (1797-1862) French	Attempt to explain the recurrence of ice ages from the precession of the equinoxes		
	James Croll (1821-1890) Scottish	Introduce the three astronomical parameters and propose that boreal winter play a fundamental role in the ice age theory		
			Propose CO ₂ variations as the causes of glacial periods	
Joseph Fourier (1786-1830) French	John Tyndall (1820-1893) Irish	Svante Arrhenius (1859-1927) Swedish		
	Joseph John Murphy (1827-1894) Irish	Introduce the idea that a cool summer in the northern hemisphere is at the basis of glacial periods		
	Milutin Milankovitch (1879-1958) Serbian- Croatian	Popularize the astronomical theory, introduce a model of climate variations based on the astronomical elements and retake the idea of Murphy that cool summer plays an important role		
				Improve decisively the techniques for paleoclimate reconstructions. Hays, Imbrie and Shackleton are famous for their fundamental article published in Science in 1976.
James D Hays (1933-) American	John Imbrie (1925-2016) American	Nicholas Shackleton (1937-2006) English	Cesare Emiliani (1922-1995) American	
		Introduce respectively the 1976 (Berger) and 1986 (Laskar) new astronomical solutions that allow to explain the climate variations reconstructed from different geological data during the last decades		
André Berger (1942-) Belgian	Jacques Laskar (1955-) French			

2.2. 第一步：冰川扩张与气候变化



图 7. 冰川漂砾示例：从萨瓦省搬运至里昂地区（圣丰斯）的巨石[图片来源：Tusco, 采用 CC BY-SA 3.0 许可协议 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>), 通过维基共享资源获取]

18 世纪，人们首次将山区景观中的冰川漂砾（图 7）与冰川的大规模扩张联系起来。1744 年，格勒诺布尔地理学家皮埃尔·马特尔（Pierre Martel, 1706-1767）^[14]记载，萨瓦阿尔卑斯山霞慕尼谷的居民将这些羊背石的散布归因于冰川自身，并认为冰川在过去规模更为巨大。这一观点具有**革命性**，因为此前大多数科学家仍引用《圣经》中大洪水的神话来解释地貌结构。例如日内瓦的霍拉斯-贝内迪克特·德·索绪尔（Horace Bénédict de Saussure, 1740-1799）、法国古生物学家乔治·居维叶（George Cuvier, 1769-1832）和苏格兰地质学家查尔斯·莱尔（Charles Lyell, 1797-1875）均延续旧说，认为这些巨石是由洪水激流搬运的。

然而，这些漂砾及其他冰碛物的分布位置与岩性特征，促使部分科学家开始承认冰川搬运能更好地解释各类观测现象。苏格兰博物学家詹姆斯·赫顿（James Hutton, 1726-1797）最早支持这一观点。随后，更多学者通过冰川范围波动发现了气候变化的痕迹：瑞士工程师伊格纳茨·费内兹（Ignace Venetz, 1788-1859）、德国森林工程师阿尔布雷希特·莱因哈特·伯恩哈迪（Albrecht Reinhart Benhardi, 1797-1849）、瑞士地质学家让·德·沙庞捷（Jean de Charpentier, 1786-1855）以及

提出“冰期”概念的德国植物学家卡尔·弗里德里希·辛普（Karl Fredrich Schimper, 1803-1867）相继加入此研究行列。而丹麦-挪威地质学家延斯·埃斯马克（Jens Esmark, 1763-1839）在 1824 年延续其对冰川搬运的研究，最早明确提出**气候变化**是冰期形成的原因，并首次将根本成因指向**地球轨道参数**的变化。

正是基于这些先驱者的工作，瑞土地质学家路易斯·阿加西（Louis Agassiz, 1801-1873）于 1837 年在纳沙泰尔向瑞士自然科学学会发表了题为《论冰川、冰碛与漂砾》的著名演讲。然而此次演讲存在争议，因为阿加西的冰川理论核心观点似乎“借鉴”自他的大学同窗辛普（Schimper），且沙庞捷（Charpentier）引领他进入了冰川研究领域，他未能恰当承认沙庞捷的原创贡献。

2.3. 古气候天文理论的诞生

同样在 19 世纪初，法国学者约瑟夫·阿德玛（Joseph Adhémar, 1797-1862）不满足于仅研究极地冰盖，在他的著作《海洋革命：周期性大洪水》^[15]中尝试用**二分点岁差解释冰期的复现现象**。至此，古气候天文理论正式诞生，并随着以法国学者让·勒朗·达朗贝尔（Jean le Rond d'Alembert, 1717-1783）、让-巴蒂斯特·约瑟夫·德朗布尔（Jean-Baptiste Joseph Delambre, 1749-1822）、皮埃尔-西蒙·拉普拉斯（Pierre Simon de Laplace, 1749-1827）、路易·邦雅曼·弗雷内尔（Louis Benjamin Francoeur, 1773-1849）和于尔班·勒威耶（Urbain Le Verrier, 1811-1877）为代表的天体力学的发展而得以延续。与此同时，科学界迈出了关键一步，首次计算了因地球轨道偏心率、二分点岁差及黄赤交角变化导致的太阳辐射能量长期波动。相关贡献者包括约翰·弗雷德里克·威廉·赫歇尔（John Frederick William Herschel, 1792-1871）、L.W.米奇（L.W. Meech, 1821-1912）与克里斯托夫·维纳（Chr. Wiener, 1826-1896），并可追溯至数学家阿德里安-马里·勒让德（André-Marie Legendre, 1752-1833）和西莫恩·德尼·泊松（Simon-Denis Poisson, 1781-1840）。

至此，苏格兰学者詹姆斯·克罗尔（James Croll, 1821-1890）已具备充分条件，得以建立基于三个天文参数协同作用的冰期理论。该理论提出北半球冬季在冰期形成中起决定性作用，受到博物学家查尔斯·罗伯特·达尔文（Charles Robert Darwin, 1809-1882）的高度推崇，并被苏格兰地质学家兄弟阿奇博尔德（Archibald, 1835-1924）与詹姆斯·盖基（James Geikie, 1839-1914）继承发展，詹姆斯·盖基后

者正式引入了“间冰期”概念。该理论亦成为阿尔布雷希特·彭克（Albrecht Penck，1858-1945）和爱德华·布吕克纳（Edouard Brückner, 1862-1927）建立阿尔卑斯冰川分期体系、以及托马斯·乔德·钱伯林（Thomas Chowder Chamberlin, 1843-1928）构建北美冰期序列的理论基础。然而，克罗尔(Croll)的理论逐渐引起地质学界日益强烈的不满，遭到多方质疑。

许多学者否定了天文理论，转而支持仅与地球自身相关的解释。苏格兰地质学家查尔斯·莱尔（Charles Lyell, 1797-1875）强调海陆分布对冷暖气候交替的影响，而其他学者则关注大气中某些气体浓度的变化^[16]。法国物理学家约瑟夫·傅里叶（Joseph Fourier, 1786-1830）由此开创性地提出与空气中二氧化碳浓度相关的温室效应理论。爱尔兰化学家约翰·廷德尔（John Tyndall, 1820-1893）紧随其后，他率先通过实验研究红外辐射吸收现象，并提出水汽在温室效应中起关键作用的假说。此后，意大利学者路易吉·德马尔基（Luigi de Marchi, 1857-1937）与瑞典化学家斯万特·阿伦尼乌斯（Svante Arrhenius, 1859-1927）连同当时其他科学家共同提出：冰期是由大气二氧化碳浓度下降所致。1895年，阿伦尼乌斯(Arrhenius)在斯德哥尔摩物理学会发表的文章中指出，大气中CO₂浓度增减40%可能引发反馈过程，进而解释冰川的前进与后退（参见《从温室效应的发现到IPCC》）。

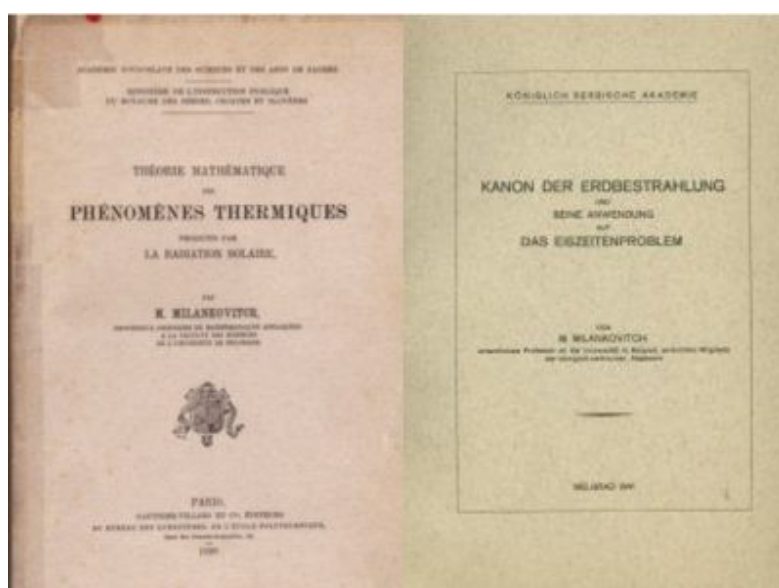


图 8. 米兰科维奇（Milankovitch）两部著作的封面[图片来源：© 安德烈·贝尔热（André Berger）摄影]

然而，随着美国天文学家约翰·纳尔逊·斯托克韦尔（John Nelson Stockwell, 1832-1920）对天文轨道要素计算的改进，以及德国数学家路德维希·皮尔格林（Ludwig Pilgrim, 1879-1935）于 1904 年对太阳辐照度计算的优化，天文理论得以迎来复兴。但早在 1869 年，约瑟夫·约翰·墨菲（Joseph John Murphy, 1827-1894）就已提出核心假说，认为北半球凉爽的夏季是**冰期形成的基础**。这一开创性观点于 1921 年被奥地利气候学家鲁道夫·施皮塔勒（Rudolf Spitaler, 1859-1946）继承，而后主要由塞尔维亚地球物理学家米卢廷·米兰科维奇（Milutin Milankovitch, 1879-1958）（图 9）通过其著作《太阳辐射热现象的数学理论》^[17]（1920 年）与《地球辐照准则及其在冰期问题中的应用》^[5]（1941 年）（图 8）得以普及。

米兰科维奇（Milankovitch）与地球物理学家兼气象学家阿尔弗雷德·魏格纳（Alfred Wegener, 1880-1930）处于同一时代，两人通过俄德气候学家弗拉基米尔·柯本（Vladimir Köppen, 1846-1940）结识。柯本获悉米兰科维奇的研究工作，柯本的女儿埃尔莎·柯本（Elsa Köppen）后来嫁予魏格纳。尽管当时缺乏可靠的古气候数据与可信的时间尺度，导致该理论受到地质学界和气象学界的广泛质疑，但现代天文理论的时代就此开启。

直到 20 世纪 50 至 60 年代，新技术的发展才使得对海洋沉积物、冰芯及大陆气候记录的测年、测量与解读成为可能。

1955 年，美国学者切萨雷·埃米利亚尼（Cesare Emiliani）^[18]基于深海沉积物中有孔虫壳体测得的**氧-18/氧-16 同位素**比值极小值与极大值序列，提出了一套沿用至今的地层学框架。随后，让-克洛德·迪普莱西（Jean-Claude Duplessy）^[19]从盐度角度解读该同位素比值，而尼古拉斯·沙克尔顿（Nicholas Shackleton）与尼尔斯·奥普代克（Niels Opdyke）^[20]则从温度与冰量变化角度进行阐释。

数学工具的进步使得通过传递函数定量解读海洋沉积物或树木年轮所记录的气候信息成为可能。CLIMAP 研究组^[21]（1976 年）的工作成果绘制出**首张末次盛冰期季节气候分布图**，而詹姆斯·海斯（James Hays）、约翰·英布里（John Imbrie, 1925-2016）与尼古拉斯·沙克尔顿（Nicholas Shackleton, 1937-2006）于同年发表的里程碑论文更推动了领域发展。大型计算机的出现使得基于大气环流模

式^[22]的首批气候模拟得以实现，同时持续的天文计算产生了高精度参考时间标尺及日、季节辐照度数据，这为气候建模奠定了关键基础^[23]。

3. 米兰科维奇天文理论及其后续发展

3.1. 米兰科维奇与冰川作用周期



图 9. 帕亚·约万诺维奇（Paja Jovanovic）于 1943 年绘制的米兰科维奇肖像，现藏于贝尔格莱德塞尔维亚科学与艺术学院[来源：frwiki, (CC BY-SA 3.0), <https://fracademic.com/dic.nsf/frwiki/1167469>]

米卢廷·米兰科维奇（图 9）于 1879 年出生在达利（当时属奥匈帝国，今克罗地亚境内），1958 年在贝尔格莱德逝世。他于 1902 年在维也纳大学获得土木工程学位，1904 年取得科学博士学位。随后他开启了土木工程师的职业生涯，他因设计的水坝、桥梁及工业厂房而享有盛誉。1909 年，他被任命为贝尔格莱德大学教授，并在该校讲授天体力学与理论物理长达 46 年。1912 年，他决定投身于气候问题的数学研究。

米兰科维奇并非首位提出解释冰期重现的古气候天文理论的学者，但他以卓越的贡献推动了该理论的普及。他首先致力于搜集当时最佳参数值，用以计算**偏心率、黄赤交角及气候岁差**的长期变化。在 1920 年的著作中，他采用了斯托克韦尔（Stockwell, 1873 年）和皮尔格林（Pilgrim, 1904 年）的数据。而在 1941 年的著作中，他与塞尔维亚天文学家米斯科维奇（Miskovitch, 1892-1976）合作，决定使用勒威耶(Le Verrier)1855 年的数据，但根据期间最新公布的行星质量参数对其进行了修正。

他基于墨菲假说，并依据勒威耶和米斯科维奇的研究成果，计算绘制的北纬 65°北半球夏季日照曲线（图 10）已成为经典。该曲线使地质学家，特别是布吕克纳、柯本和魏格纳（1925 年）能够据此解释当时已知的冰期-间冰期旋回。

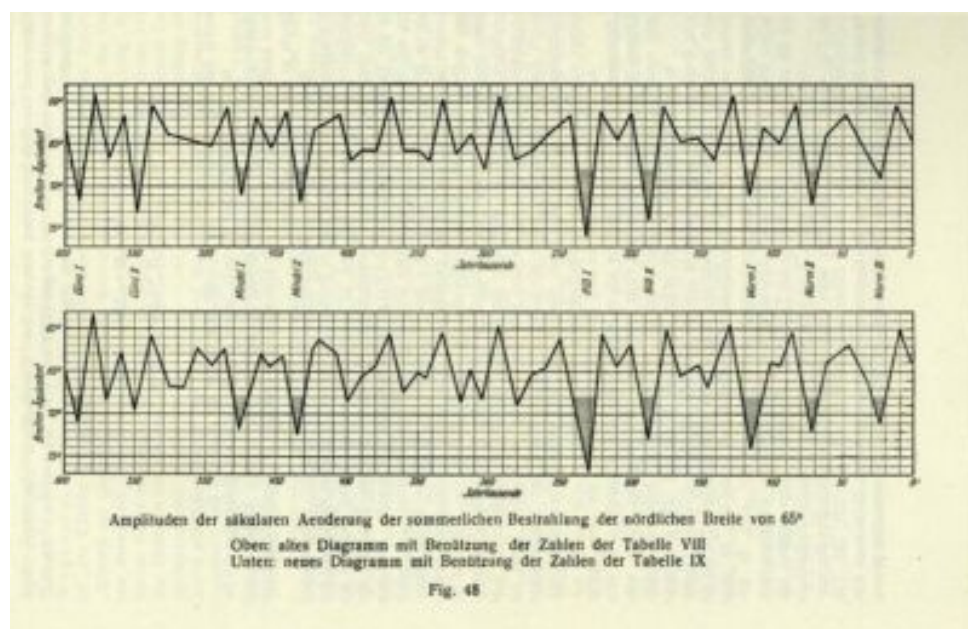


图 10. 基于勒威耶数据绘制的北纬 65°等效纬度长期变化（公元 1800 年起回溯 60 万年）[图片来源：摘录自米兰科维奇著作^[5]]

在图 10 中，上方曲线基于斯托克韦尔与皮尔格林的天文参数计算得出的夏季热辐射量，下方曲线则基于勒威耶与米斯科维奇的天文参数计算得出的夏季热辐射量。两幅图表均展示了当前纬度（称为等效纬度），该纬度在北半球**热量夏季**接收的能量，与历史上同期北纬 65°所接收的能量相等。例如，22000 年前北纬 65°接收的能量比现今少 426 热量单位，即从 13455 热量单位减去 426 后得到

13029 热量单位，这一数值几乎等同于当前北纬 70°所接收的能量（13074 热量单位）。热量单位是米兰科维奇引入的度量标准，其中太阳常数作为辐射单位，时间单位则取年的十万分之一。热量夏季恰好为半年，包含所有接收辐射最强的日期。换言之，同一半球热量夏季中的任一日所获能量均高于该半球热量冬季中的任一日。

米兰科维奇似乎并未关注这些天文参数长期变化的特征周期，仅如埃米利亚尼（Emiliani, 1922-1995）在 1955 年所做的那样^{[12][19]}，指出其曲线中连续极大值的平均间距：偏心率约为 92000 年，黄赤交角约为 40000 年，岁差约为 21000 年。他也未深入探究这些参数的解析拓展。事实上，直到米兰科维奇晚年，才出现第一批能够更精确计算天文轨道要素的数学解法。

3.2. 天文轨道参数的精确化计算

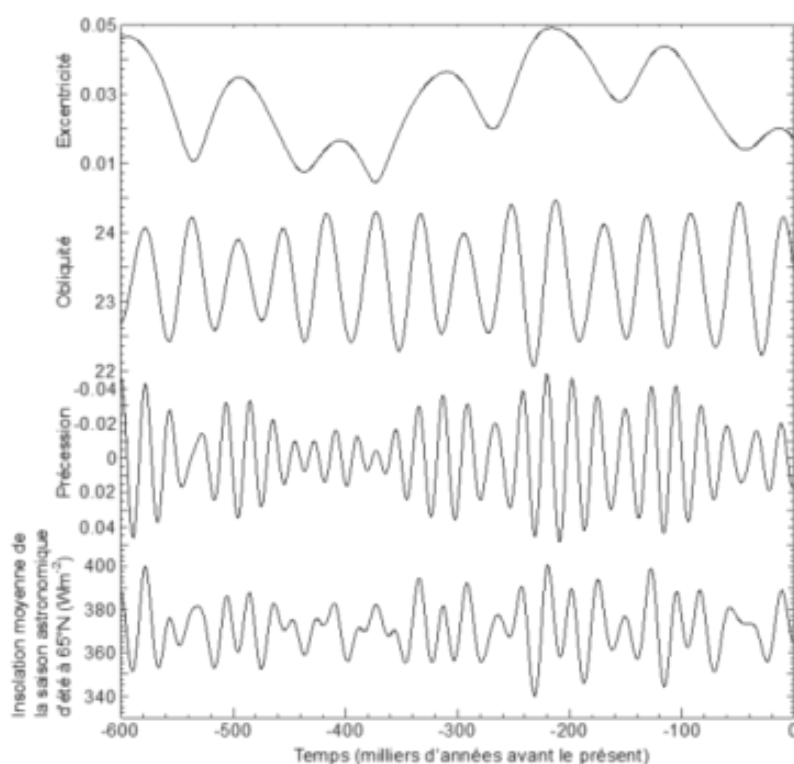


图 11. 过去 60 万年间偏心率、气候岁差、黄赤交角及北半球天文夏半年期间北纬 65°接收的平均太阳辐射量的长期变化[图片来源：作者根据参考文献 29 和 30 绘制]

首批重要成果包括荷裔美国天文学家德克·布劳威尔（Dirk Brouwer, 1902-1966）与 A.J.约斯·范沃尔科姆（A.J. Jos van Woerkom, 1915-1991）于 1950 年的研究、苏联地球物理学家 S.G.沙拉夫(S.G. Sharaf)与 N.A.布德尼科娃(N.A. Budnikova)1967 年的工作，以及法国天文学家皮埃尔·布勒塔尼翁（Pierre Bretagnon , 1942-2002）^[24]1974 年的贡献。

此后，安德烈·贝尔热(André Berger)发表了可直接给出偏心率、黄赤交角与岁差长期变化谱的**三角级数**，使过去数百万年间这些参数的数值能够被简便而精确地计算^{[2][25]}。随着过去数百万至数千万年**地质数据**的可靠性日益提升，雅克·拉斯卡(Jacques Laskar)的研究成果得以校准^[26]，他首次以极高精度计算出三大天文参数在极长时间尺度上的数值^[27]。对天文周期受地球自转速度、地月距离及地球动力扁率变化敏感性的研究最终表明，这些周期在数亿年间呈现逐渐缩短的趋势^[28]。

近几十年来，地球轨道与自转参数计算精度的提升，使得偏心率、黄赤交角与气候岁差的**长期变化**得以**高精度**重建。这些参数^[29]可进一步用于计算抵达地球的太阳能，例如北半球夏半年天文季节期间北纬 65°区域的辐射量^[30]。图 11 展示了过去 60 万年间的变化曲线，以便与米兰科维奇描述的同类变化（图 10）进行比较。这一对比既能评估百年前米兰科维奇曲线的质量（表征的是北纬 65°夏季同等可用能量），也凸显了时间尺度的优化与变化结构的精细化呈现。

爱尔兰学者约瑟夫·约翰·墨菲(Joseph John Murphy)早在 1869 年首次提出，**漫长凉爽的夏季与短暂温和的冬季是进入冰期的最有利条件**。米兰科维奇通过研究北纬 65°的太阳辐射量，将这一观点推广普及。关注高纬度地区的思路源于他对雪原、冰川与冰盖气候影响的研究。正是在北半球这些高纬度大陆区域，广阔的陆地空间为巨大冰盖的形成提供了条件，冰盖显著的正反馈效应使太阳辐射强迫得以大幅增强。图 11 表明，天文参数的周期性变化是**过去气候发生循环性波动的根源**（古气候天文理论）。特别值得注意的是，过去数十万年间冰期的 10 万年周期律^[4]与地球轨道偏心率变化存在明确关联。

4. 总结

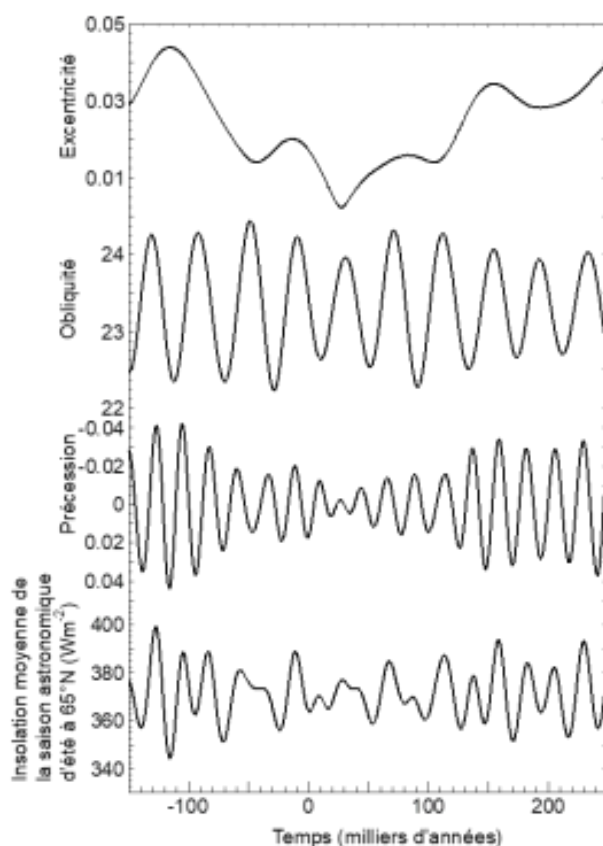


图 12. 天文参数在过去 15 万年与未来 25 万年间的变化趋势 [图片来源：作者根据参考文献 29 和 30 绘制]

- 古气候天文理论及其不同学说版本，无疑深化了我们对过去数百万年气候变迁的理解，尤其阐明了第四纪冰期-间冰期循环的周期性规律^[31]。
- 地球绕太阳运行的轨道参数（椭圆轨道的偏心率、黄赤交角与岁差）是导致近数百万年自然气候波动的主要驱动因素。
- 这段科学探索始于三个多世纪前。它让我们能够逐步明确当前气候变化的框架，从而更准确地定义人类活动对未来数千年气候可能产生的影响^[32]。图 12 展示了从过去 15 万年到未来 25 万年之间天文参数的变化。值得注意的是，在未来 5 万年间，黄赤交角和轨道偏心率将会减小，大约在 2.7 万年后，地球轨道将变得近乎圆形。这直接影响气候岁差，而在未来数万年间，岁差的

变化将非常微小。这种稳定性明显地反映在太阳辐射的变化上，并可能对气候产生影响，因为其他驱动力（如温室气体）届时可能对气候施加更大的影响。

参考资料及说明

封面图片：中国陕西省西安附近的黄土-古土壤序列。图片中间的红色层对应于约 33 万年前的间冰期 MIS-9（图片来源：作者）

- [1] Joussaume S., 1993. *Climate from yesterday to tomorrow*. CNRS éditions/CEA, Paris
- [2] Berger A., 1978. Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. *J. Atmos. Sci*, 35(12),2362-2367.
- [4] Hays J.D., Imbrie J. & Shackleton N.J., 1976. Variations in the earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science* 194: 1121-1132. <http://www.jstor.org/stable/1743620?origin=JSTOR-pdf>
- [5] Milankovitch M., 1941. *Kanon der Erdbastrahlung und seine Anwendung auf des Eiszeitenproblem*. Special Publication 132, Section of Mathematical and Natural Sciences, Vol. 33, p. 633. Belgrad, Royal Serbian Academy of Sciences. ('Canon of Insolation and the Ice-Age Problem', translated from German by the Israel Program for Scientific Translations and published for the U.S. Department of Commerce and the National Science Foundation, Washington DC, 1969. Reprinted by Zavod za udzbenike i nastavna sredstva in cooperation with Muzej nauke i tehnike Srpske akademije nauka i umetnosti, Beograd, 1998).
- [6] Johannes Kepler (1571-1630), astronomer. <https://www.astrofiles.net/astromie-johannes-kepler>
- [7] 近日点与远日点是地球绕太阳公转轨道上日地距离分别最短和最长的位置。若设 rp 为近日点距离， ra 为远日点距离，则椭圆轨道方程给出：
$$rp=a(1-e),$$
$$ra=a(1+e),$$
且 $ra-rp=2ae$ 。
- [8] 辐照度以瓦特每平方米 (W/m^2) 表示，指在日地平均距离处，每秒钟垂直通过一平方米单位面积的能量（单位为焦耳）。
- [9] "Insolation"（日射量）是"incoming solar radiation"（入射太阳辐射）的缩写。
- [10] Imbrie, J., Imbrie, K. P., 1979. *Ice Ages, Solving the Mystery*. Enslow Publishers, New Jersey.
- [11] Berger, A. 1988. Milankovitch theory and climate. *Reviews of Geophysics* 26(4): 624-657.
- [12] Berger, A., 2012. A brief history of the astronomical theories of paleoclimates. In: "Climate change at the eve of the second decade of the century. Inferences from paleoclimates and regional aspects". *Proceedings of Milankovitch 130th Anniversary Symposium*, A. Berger, F. Mesinger, D. Sijacki (eds). 107-129. Springer-Verlag/Wien. DOI 10.1007/978-3-7091-0973-1.
- [13] The sources of the engravings or photos in the table are as follows: Jens Esmark (engraving Louis Fehr / Public domain, via Wikipedia Commons); James Croll (photo Luis Alberto 9919 / CC

BY 3.0, via Wikipedia Commons); Joseph Fourier (engraving Amédée Félix Barthélemy Geille / Public domain, via Wikipedia Commons); John Tyndall (Woodburytype by Lock and Whitfield, no copyright, United States, CC0, via The Sminthsonian Libraries); Svante Arrhenius (Photogravure Meisenbach Riffarth & Co. Leipzig. / Public domain, via Wikimedia Commons); Joseph John Murphy (Photo reproduced from Complex adaptations, University of Utah); Milutin Milankovitch (Portrait at the Serbian Academy of Sciences and Arts in Belgrade, painted by Paja Jovanovic in 1943 [source frwiki / CC BY-SA 3.0]); James D Hays (Columbia University); John Imbrie (Columbia University); Nicholas Shackleton (source frwiki / CC-BY-SA); Cesare Emiliani (Universal Holocene Calendar, Facebook); André Berger (photo André Berger); Jacques Laskar (photo <https://perso.imcce.fr/jacques-laskar/en/>)

[14] References to ancient texts are given in Berger (reference [12]).

[15] Adhémar, J. A., 1842. *Revolution of the Seas, Periodic Floods*. First edition: Carilian-Goeury et V. Dalmont, Paris. Second edition: Lacroix-Comon, Hachette et Cie, Dalmont et Dunod, Paris, 359 p.

[16] Bard, E., 2004. Greenhouse effect and ice ages: historical perspective. *C. R. Geoscience*, 336, 603-638.

[17] Milankovitch, M., 1920. *Mathematical Theory of Thermal Phenomena Produced by Solar Radiation*. Yugoslav Academy of Sciences and Arts in Zagreb (Gauthier Villars, Paris).

[18] Emiliani, C. R. W., 1955. Pleistocene temperatures. *Journal of Geology* 63(6): 538-578.

[19] Duplessy, J. C., 1970. Preliminary note on variations in the isotopic composition of the Indian Ocean in the O18-salinity relationship. *C. R. Académie des Sciences de Paris*, 271 series D, 1075-1078.

[20] Shackleton, N. J. and Opdyke, N. D., 1973. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 105 and 106 year scale. *Quaternary Research* 3: 39-55.

[21] CLIMAP Project Members. 1976. The surface of the Ice-Age Earth. *Science* 191: 1131-1136.

[22] Aleya, F.N., 1972. Numerical simulation of an ice-age paleoclimate. *Atmosphere Science Papers* 193, Colorado State University, Fort Collins, USA.

[23] Berger A., 1973. *Astronomical theory of paleoclimates*. Doctoral dissertation, Catholic University of Louvain, Faculty of Sciences, 2 volumes.

[24] Bretagnon, P., 1974. Long-term terms in the solar system. *Astronomy and Astrophysics* 30: 141-154.

[25] Berger, A., 1976. Obliquity and general precession for the last 5 000 000 years. *Astronomy and Astrophysics*, 51, pp. 127-135.

[26] Laskar J., 1986, Secular terms of classical planetary theories using the results of general theory, *Astronomy and Astrophysics*, 157, 59-70.

[27] Laskar J., Fienga A., Gastineau M. & Manche H., 2011. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*, 532, A89, 1-15. 0. EDP Sciences, 1051/0004-6361/201116836

[28] Berger A., Loutre M.F. & Laskar J., 1992. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimate studies. *Science*, 255, pp. 560-566.

- [29] Berger A. and Loutre M.F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10 n°4, pp. 297-317.
- [30] Berger A., Loutre M.F. and YIN Q.Z., 2010. Total irradiation during the interval of the year using elliptical integrals. *Quaternary Science Reviews*, 29, pp. 1968-1982. doi:10.1016/j.quascirev.2010.05.007
- [31] Yin Q.Z. & A. Berger, 2012. Individual contribution of insolation and CO₂ to the diversity of the interglacial climates of the past 800,000 years, *Climate Dynamics*, 38, 709-724. DOI 10.1007/s00382-011-1013-5
- [32] Berger A. & M.F. Loutre, 2002. An Exceptionally long Interglacial Ahead? *Science*, 297, pp. 1287-1288