Milutin Milanković: Kanon osunčavanja Zemlje

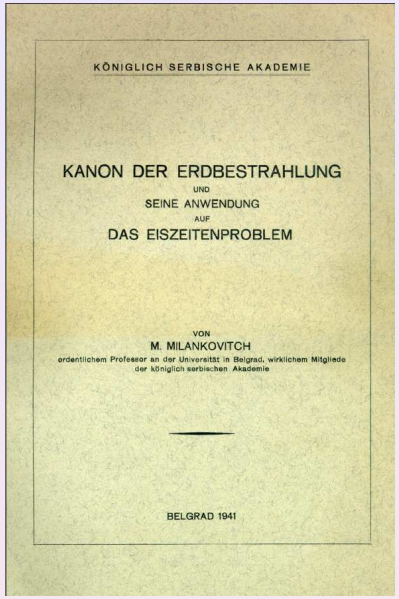
Zoran Knežević

Srpska akademija nauka i umetnosti, Beograd

KNU, Beograd, 26. decembar 2019. godine

Milutin Milanković (1879 - 1958)

Fotografija iz 1922. godine


KÖNIGLICH SERBISCHE AKADEMIE

KANON DER ERDBESTRAHLUNG
UND
SEINE ANWENDUNG
AUF
DAS EISZEITENPROBLEM

VON
M. MILANKOVITCH
ordentlichem Professor an der Universität in Belgrad, wirklichem Mitgliede
der königlich serbischen Akademie

BELGRAD 1941

”Kanon der Erdbestrahlung und Seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem”

1941, R.Serb.Acad.

Morena Surlej u Švajcarskim Alpima

Lutajuće kamenje

“Lutajuće kamenje” iz Norveške na nekadašnjem ostrvu Schokland u Holandiji.

Astronomska teorija klimatskih promena: istorijat

Otkriće i potvrda klimatskih promena;

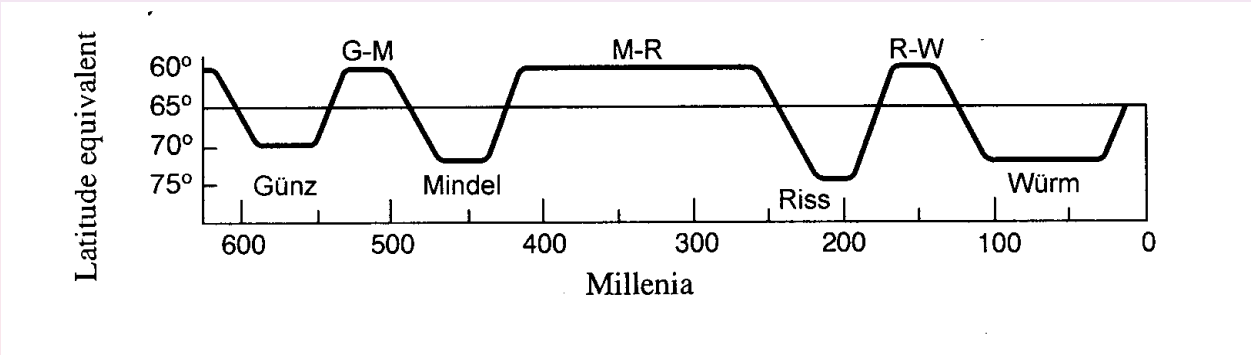
- **Playfair; Schimper; Venetz; Charpantier;** potraga za geološkim dokazima promena klime (Schimper - Die Eiszeit);
- **Goethe 1829**: “Da biste imali mnogo leda potrebno je hladno vreme, tako ja pretpostavljam da je jedna epoha velike hladnoće bar Evropom prošla”;
- **Agassiz 1840**, dokazi ledenih doba: “velike ledene ploče, poput onih koje danas vidimo na Grenlandu, su nekada prekrivale sve teritorije gde su ovi dokazi nadjeni”;

Louis Agassiz (1807–1873)
“Études sur les glaciers”

Astronomska teorija klimatskih promena: istorijat

Otkriće i potvrda klimatskih promena;

- **Penck & Brückner 1901-1909** – kvartarne glacijacije: četiri ledena doba u poslednjih 660,000 godina (Ginc, Mindel, Ris, Virm);



Astronomska teorija klimatskih promena: uzroci

Preteče Milankovića

- **Herchel 1830**, uzrok klimatskih promena ekscentričnost Zemljine putanje
- **Adhémar 1842**, precesija Zemljine ose rotacije
- **Croll 1890**, sprega promene ekscentričnosti i precesije; promene nagiba Zemljine ose rotacije, refleksija sa površine leda, morske struje
- **Pilgrim 1904**, prvi tačan račun za sve astronomske mehanizme

James Croll (1821–1890)

"Discussions on Climate and Cosmology"

Astronomska teorija klimatskih promena: istorijat

Julius Hann: Efekti predloženi kao oni koji dovode do klimatskih promena nisu dovoljno jaki, pa se sa astronomskog stanovišta pre može očekivati da klima bude stabilna nego varijabilna!

Milutin Milanković 1912–1941

- astronomski mehanizmi koji uzrokuju promene osunčavanja
- prostiranje zračenja kroz atmosferu
- reakcija površine na upadno zračenje

Astronomska teorija klimatskih promena: istorijat

Julius Hann: Efekti predloženi kao oni koji dovode do klimatskih promena nisu dovoljno jaki, pa se sa astronomskog stanovišta pre može očekivati da klima bude stabilna nego varijabilna!

Milutin Milanković 1912–1941

- astronomski mehanizmi koji uzrokuju promene osunčavanja
- prostiranje zračenja kroz atmosferu
- reakcija površine na upadno zračenje

Astronomska teorija klimatskih promena: istorijat

Astronomska teorija klimatskih promena posle Milankovića

- **Soergel, Köppen, Wegener, Devaux, ...**; savremenici čiji rad se prepliće sa Milankovićevim
- **Brouwer&Van Woerkom 1950**, LeVerrier+Hill
- **Sharaf & Boudnikova 1967a,b**; parametri osunčavanja
- **Vernekar 1972** $\rightarrow$ **Hays et al. 1976**, korelacija astronomskih parametara i promena klime dokazana;
- **Bretagnon 1974** $\rightarrow$ **Berger 1978**, precesija i parametri osunčavanja prema S&B
- **Berger, Imbrie, 1982** Simpozijum “Milankovich and Climate”, Columbia University, SAD
- **Laskar 1984,1988; Laskar et al. 2004, 2011**, sekularne promene Zemljine putanje, parametri osunčavanja dovoljno tačni za 50–60 miliona godina

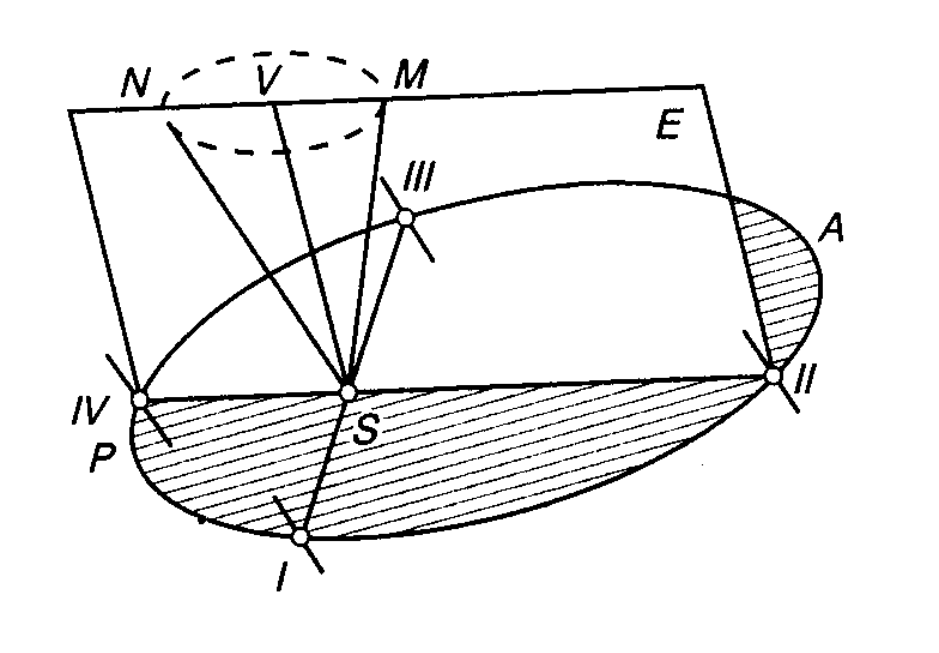
Astronomska teorija klimatskih promena danas

Laskar et al. 2004:

“Since then, the understanding of the climate response to the orbital forcing has evolved, but all the necessary ingredients for the insolation computations were present in Milankovitch’s work”

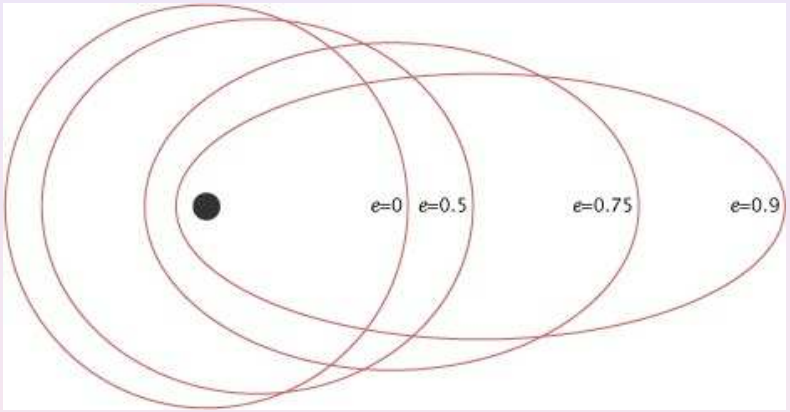
”Od tada je razumevanje odziva klime na orbitalnu prinudu evoluiralo, ali su svi potrebni sastojci za račun osunčavanja bili sadržani u Milankovićevom radu.”

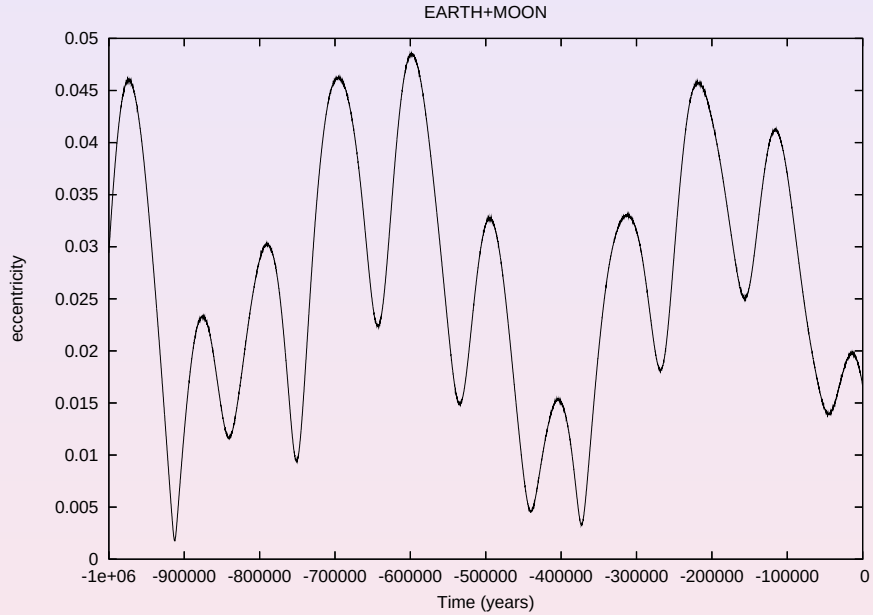
Astronomska teorija klimatskih promena



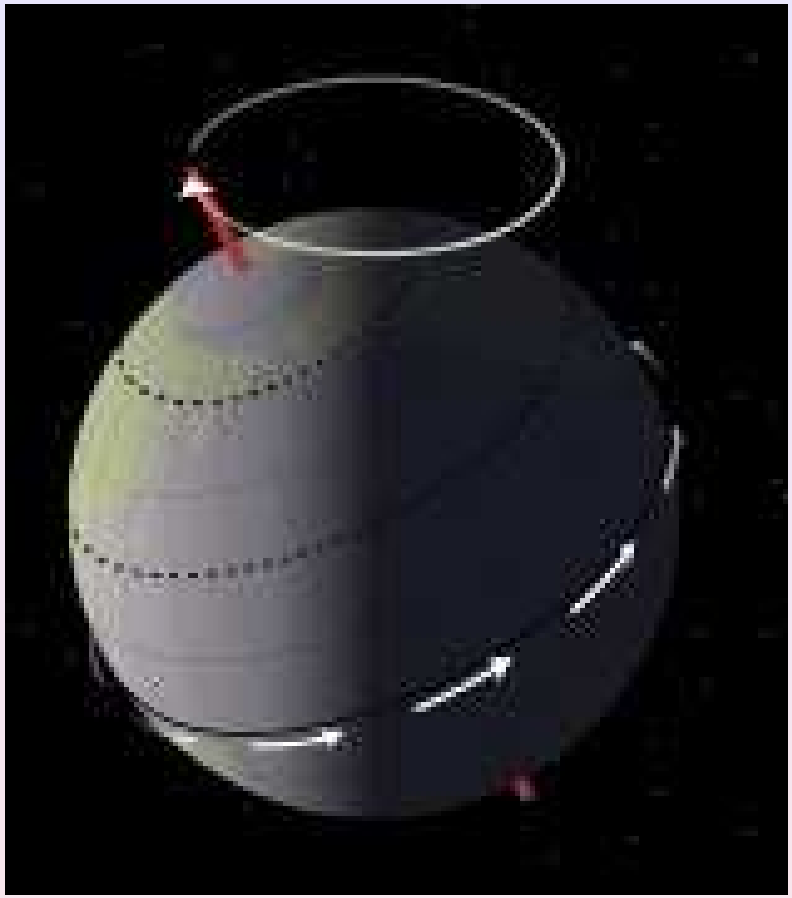
Ekscentričnost Zemljine putanje, precesija i nagib Zemljine ose rotacije $\rightarrow$ osunčavanje.

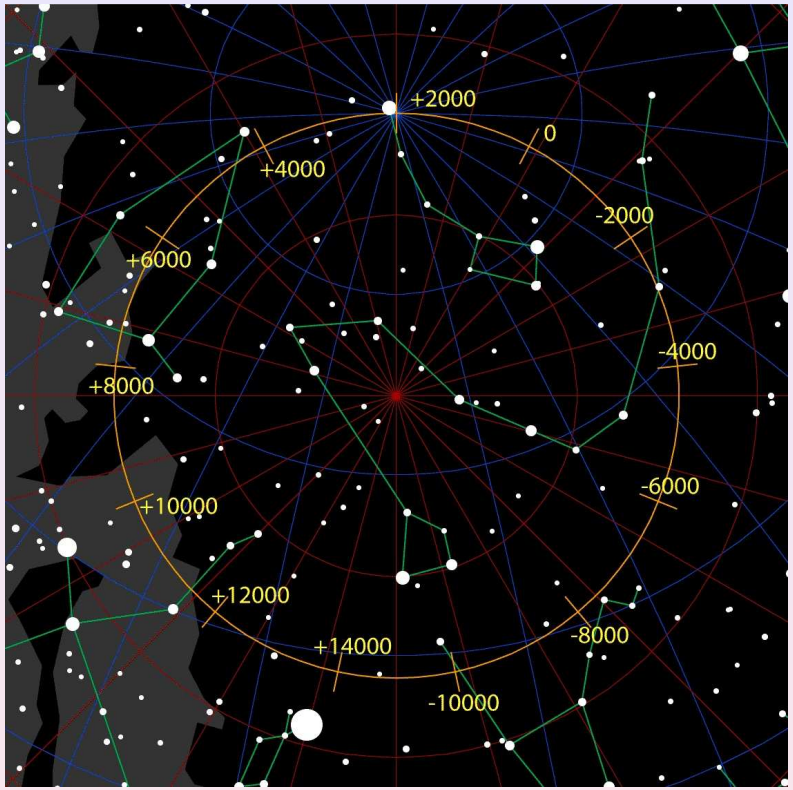
Ekscentričnost Zemljine putanje, *e*

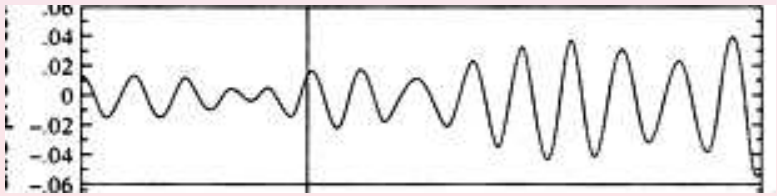




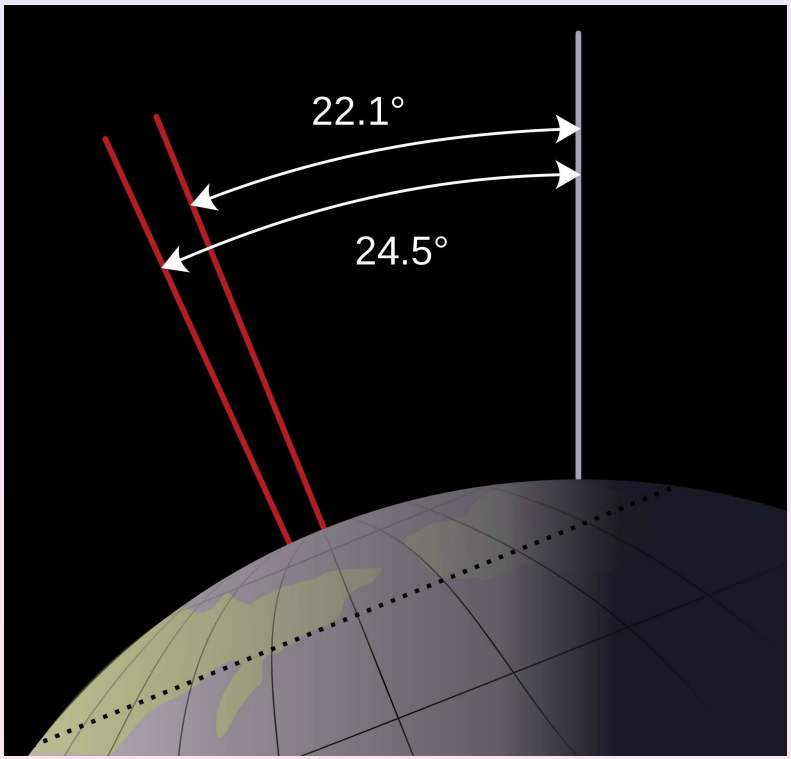
Precesija Zemljine ose rotacije, Π_γ

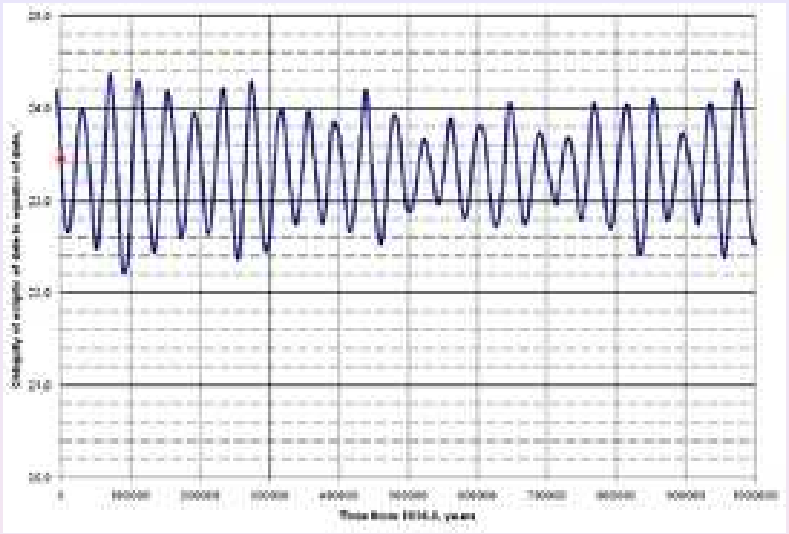


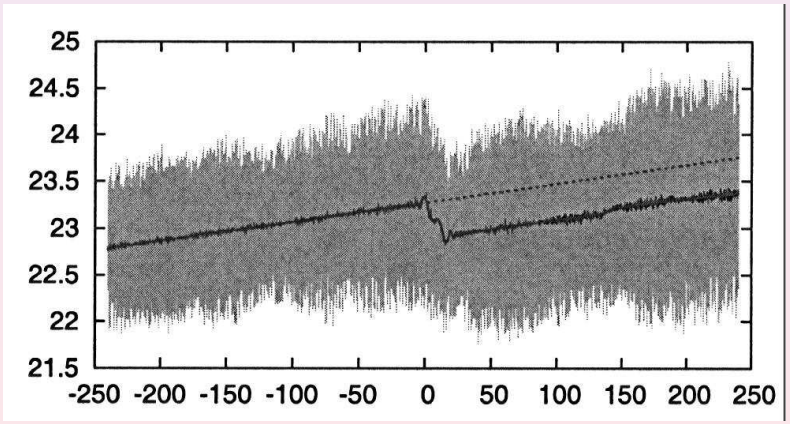




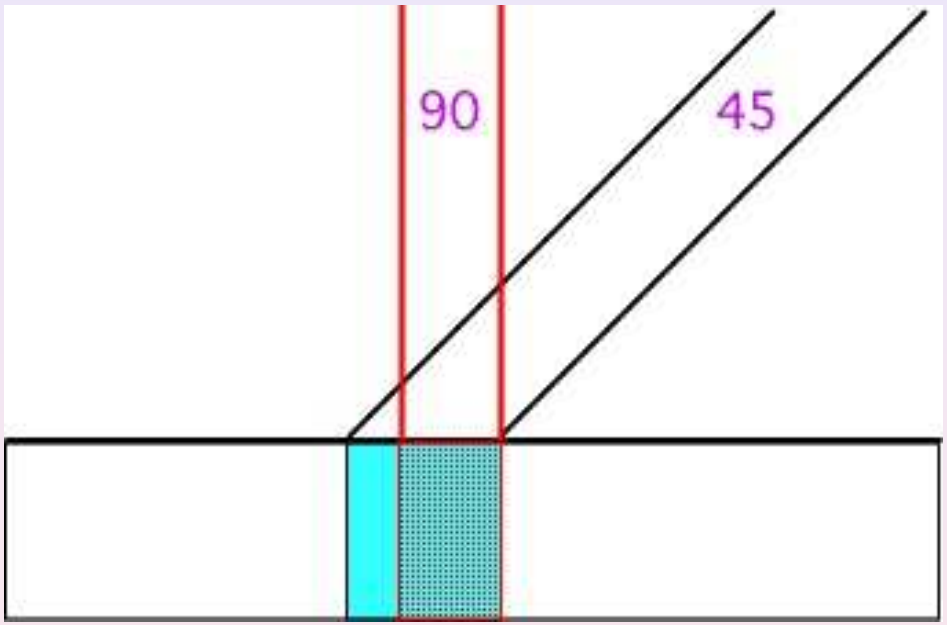
Nagib Zemljine ose rotacije, ϵ







Geografski kontrasti



SIN 80° = 0.98 or 98%
SIN 70° = 0.94 or 94%
SIN 60° = 0.87 or 87%
SIN 50° = 0.77 or 77%
SIN 40° = 0.64 or 64%
SIN 30° = 0.50 or 50%
SIN 20° = 0.34 or 34%
SIN 10° = 0.17 or 17%
SIN 0° = 0.00 or 0%

Sezonski kontrasti

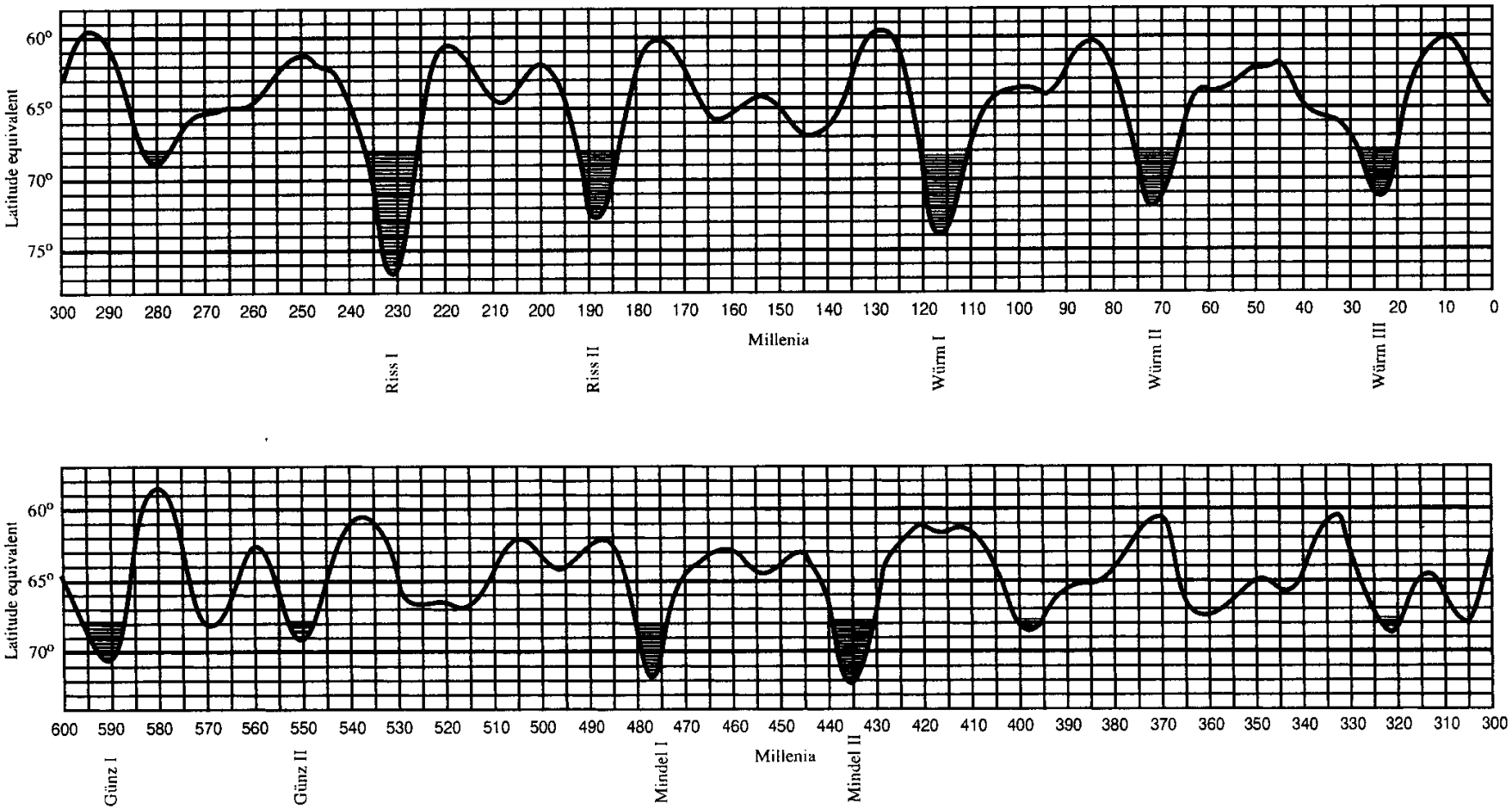
Razlika količine zračenja koju data paralela prima u toku letnje i zimske astronomske polugodine:

$$W_s - W_w = \frac{T}{\pi} \cdot \frac{J_0}{\sqrt{1 - e^2}} \sin\varphi \sin\epsilon$$

Razlika dužine trajanja letnje i zimske astronomske polugodine:

$$T_s - T_w = \frac{4T}{\pi} e \sin\Pi_\gamma$$

Astronomska teorija klimatskih promena: rezultat



Astronomska teorija klimatskih promena

Milankovićevi ciklusi

Mehanizam	Period [god.]
Ekscentričnost	100000[1]
Nagib	41000
Precesija	21000[2]

[1] 405000 god.

[2] 19000, 23000 god.

Mase velikih planeta

Planeta	Le Verrier	Milanković	JPL
Merkur	1,909,706	6,000,000	6,023,600
Venera	401,939	408,000	408,523.71
Zemlja+Mesec	356,354	329,390	328,900.56
Mars	2,680,337	3,093,500	3,098,708
Jupiter	1,050	1,047	1,047.3486
Saturn	3,512	3,501	3,497.898
Uran	17,918	22,869	22,902.98
Neptun	14,400	19,380	19,412,24

Konstanta precesije [”/god]

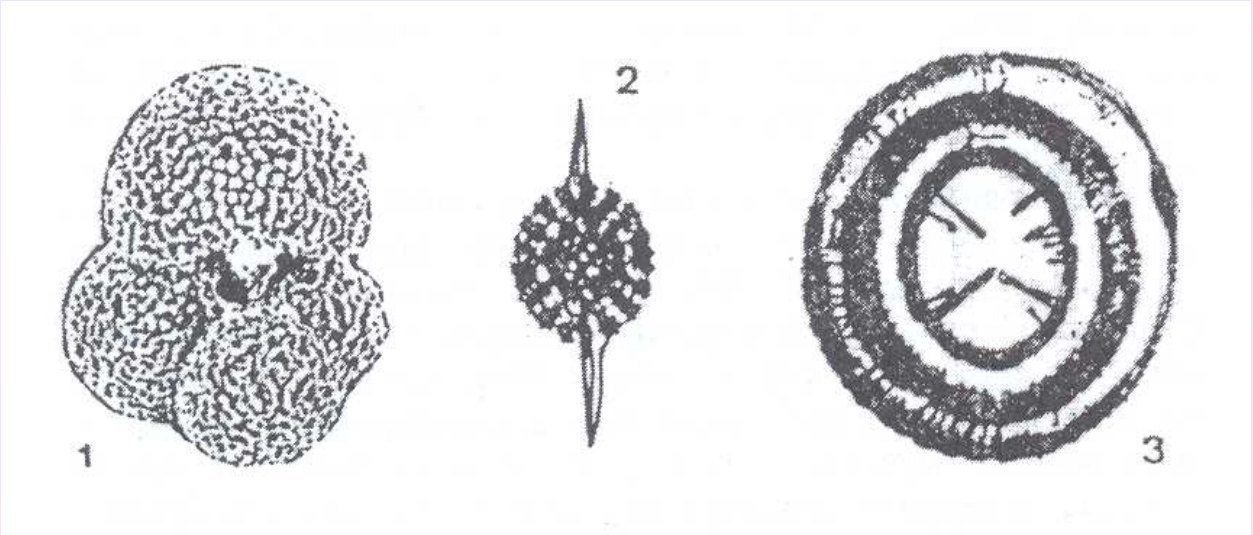
Milanković	IERS2000	Laskar et al.
50.3684	50.290966	50.467718

Per aspera ad astra

Dokazi:

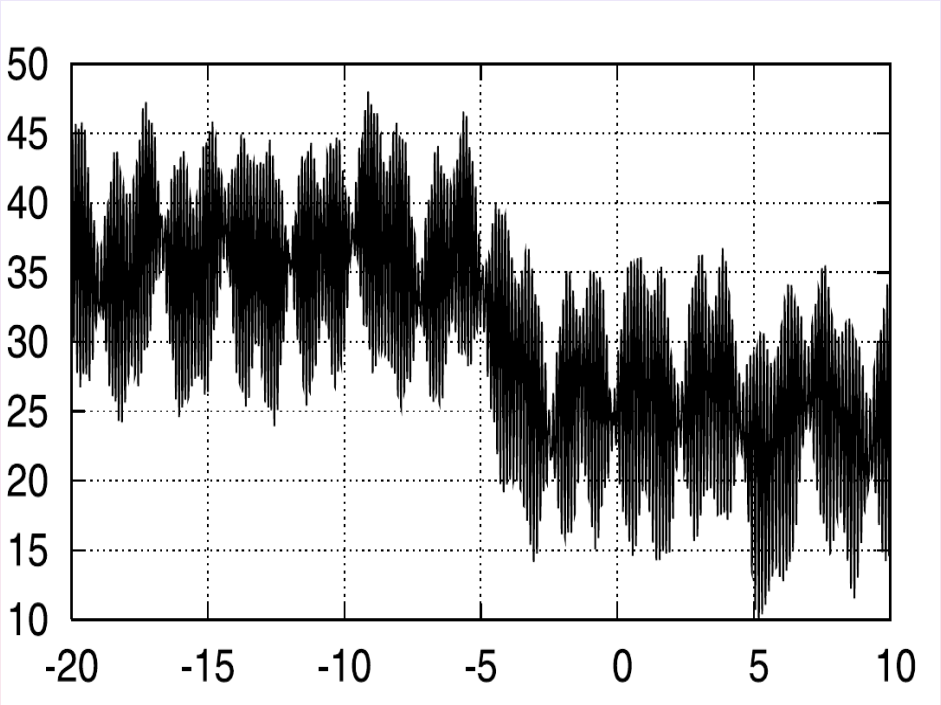
- **Emiliani 1955**; $^{18}O/^{16}O \rightarrow$ temperatura morske vode
- **Ericson, 1956/63**; foraminifera *Globorotalia menardii*
- **CLIMAP, 1971:**
- Indijski okean: dve bušotine, 500000 godina, 1-3 cm za milenijum
- izotopsko proučavanje ljušturica foraminifere *Globigerina bulloides*
- zastupljenost radiolarije *Cyclocladophora dovisiana*, posebno dobar indikator klimatskih promena
- zastupljenost kokolitske vrste *Pseudoemiliania lacunosa* i radiolarije *Stylatractus universus*
- koralni sprudovi i abrazione terase Barbadosa, Nove Gvineje, Havaja$\rightarrow$ kolebanja nivoa mora

Dokazi



1. foraminifera 2. radiolarija 3. kokolit nanoplanktona

Krater Becquerel na Marsu: tragovi klimatskih ciklusa



Reference

ICARUS
Climate zones on Pluto and Charon
Richard P.Binzel, Alissa M.Earle, Marc W.Buie, Leslie A.Young, S. Alan Stern, Cathy B.Olkin, Kimberly Ennico, Jeffrey M.Moore, Will Grundy, Harold A.Weaver, Carey M.Lisse, Tod R.Lauerfth, New Horizons Geology and Geophysics Imaging Team
Volume 287, 1 May 2017, Pages 30-36

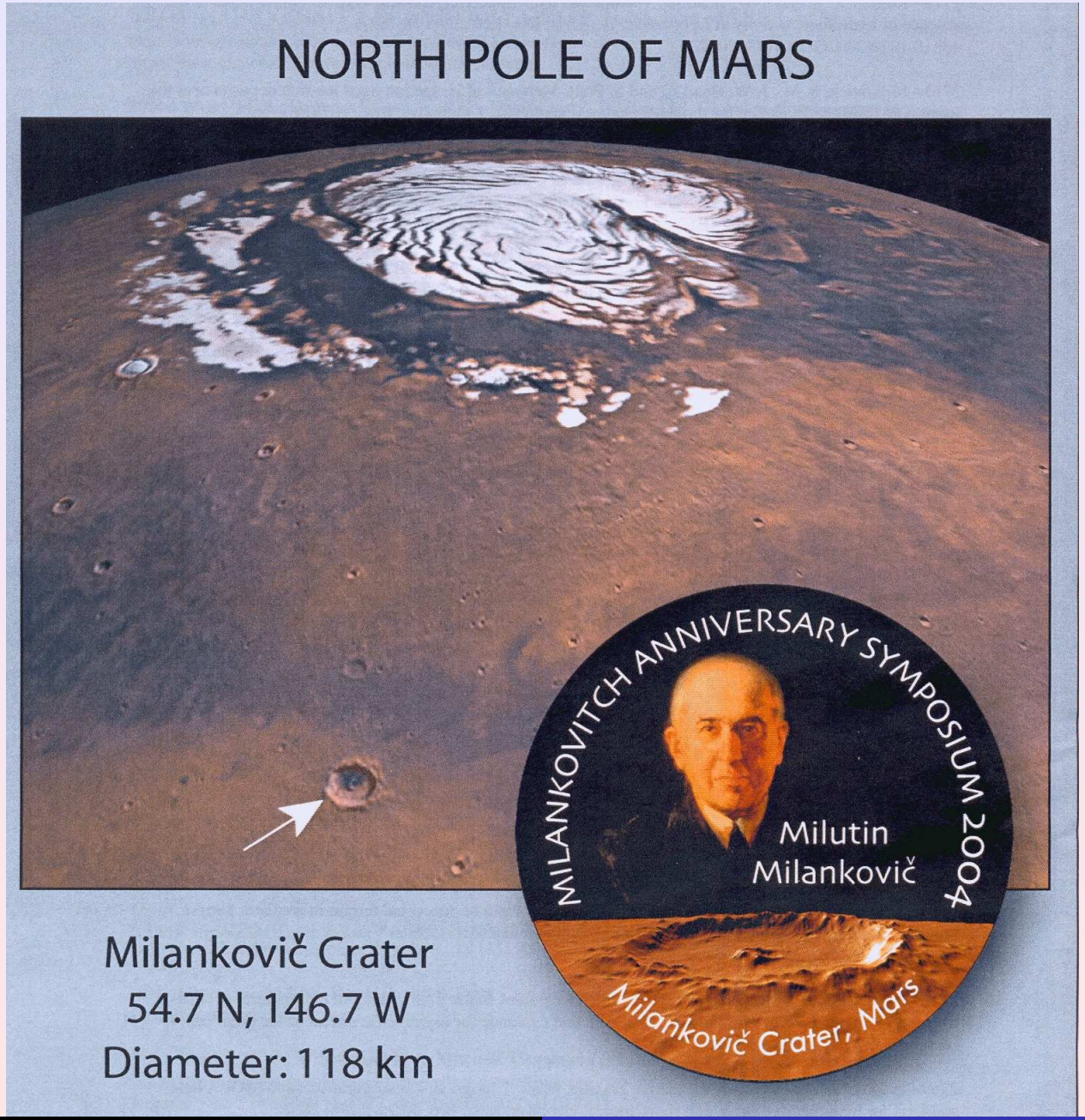
THE ASTRONOMICAL JOURNAL
Exo-Milankovitch Cycles. I. Orbits and Rotation States
Russell Deitrick, Rory Barnes, Thomas R. Quinn, John Armstrong, Benjamin Charnay, and Caitlyn Wilhelm
Published 2018 January 16, 2018. The American Astronomical Society.
The Astronomical Journal, Volume 155, Number 2

Priznanja

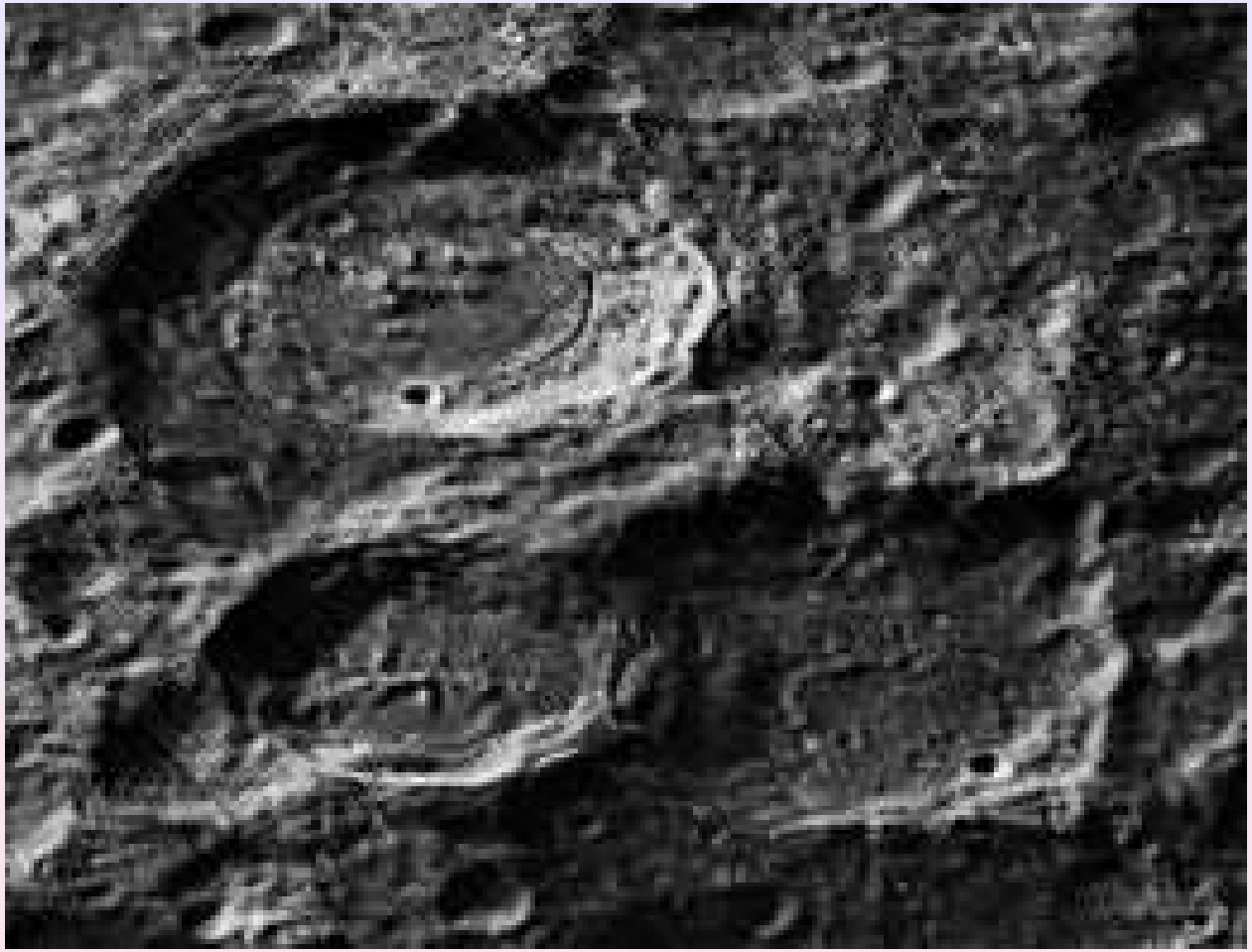
Evropska geofizička unija: medalja Milutin Milanković za istraživanja u oblasti klime u prošlosti, sadašnjosti i budućnosti.

NASA: Milanković medju 10 najvećih naučnika svih vremena u oblasti nauka o Zemlji!

Krater Milanković na Marsu



Krater Milanković na Mesecu



Krateri Karpinskiy (gore levo), Ricco (dole levo) i Milanković (dole desno, D=46 km).

asteroid 1605 Milankovitch

element	veličina	greška
a (AJ)	3.0124	2.199e-08
e	0.078954	7.626e-08
I (stepen)	10.568	1.122e-05
Ω (stepen)	173.915	4.609e-05
$\tilde{\omega}$ (stepen)	279.071	8.645e-05
M (stepen)	26.707	7.2e-05
Apsolutna magnituda	10.196	
Prečnik (km)	55	
MOID (AJ)	1.81622	
Orbitalni period (dan)	1909.71	

Milutin Milanković (1879-1958)

Bulevar, park, spomenik, škole, društva.

Vasko Milanković:

“Po prirodi bio je sentimentalist, čak sanjalica, svakako rodjeni optimist. Medju prijateljima bio je poznat po svojoj mirnoj i tihoj naravi, pa su ga često pitali kako uspeva da se nikada ne iznervira. “O ne, ja ne brinem”, odgovorio bi on “o mnogim stvarima, sa izuzetkom dve - onima koje ne mogu da promenim i onima koje mogu.”

HVALA!