

# I cicli di Milankovitch

## Ringraziamenti:

- AA.VV. (UniTo) - Lessico e Nuvole: le parole del cambiamento climatico – 2020
- C. Cassardo et al. - Temporalis e tornado – cap. 1, 2021 – Ed. AlphaTest

# La teoria orbitale delle ere glaciali

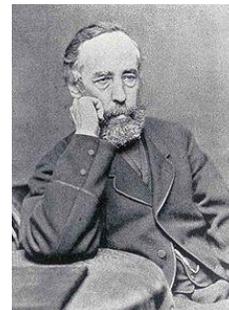
- Cambiamenti regolari nella forma dell'orbita terrestre e della geometria Terra-Sole come "cronometro" delle ere glaciali
- Teoria suggerita per la prima volta a metà del XIX secolo da **Adh mar** e (pi  tardi) da **Le Verrier** (nome importante nella storia della meteorologia moderna) e **James Croll**
- Quantificata poi dal matematico croato **Milutin Milankovitch** all'inizio del XX secolo
- Difficile da sostenere con le prove paleoclimatiche dell'epoca, la teoria fu «dimenticata» fino alla met  degli anni '60
- I dati paleoclimatici moderni supportano fortemente la teoria di Milankovitch dagli anni '70



**Joseph Alphonse Adh mar**  
1797–1862  
Matematico francese



**Urbain Jean Joseph Le Verrier**  
1811 –1877  
Matematico francese

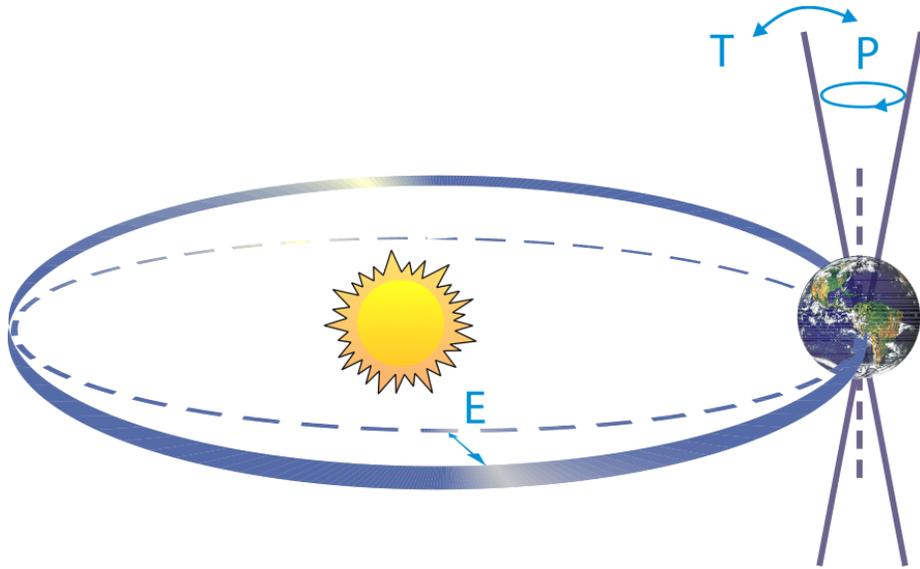


**James Croll**  
1821 –1890  
Scienziato scozzese



**Milutin Milankovitch**  
1879-1958  
Matematico croato

# I cicli di Milankovitch

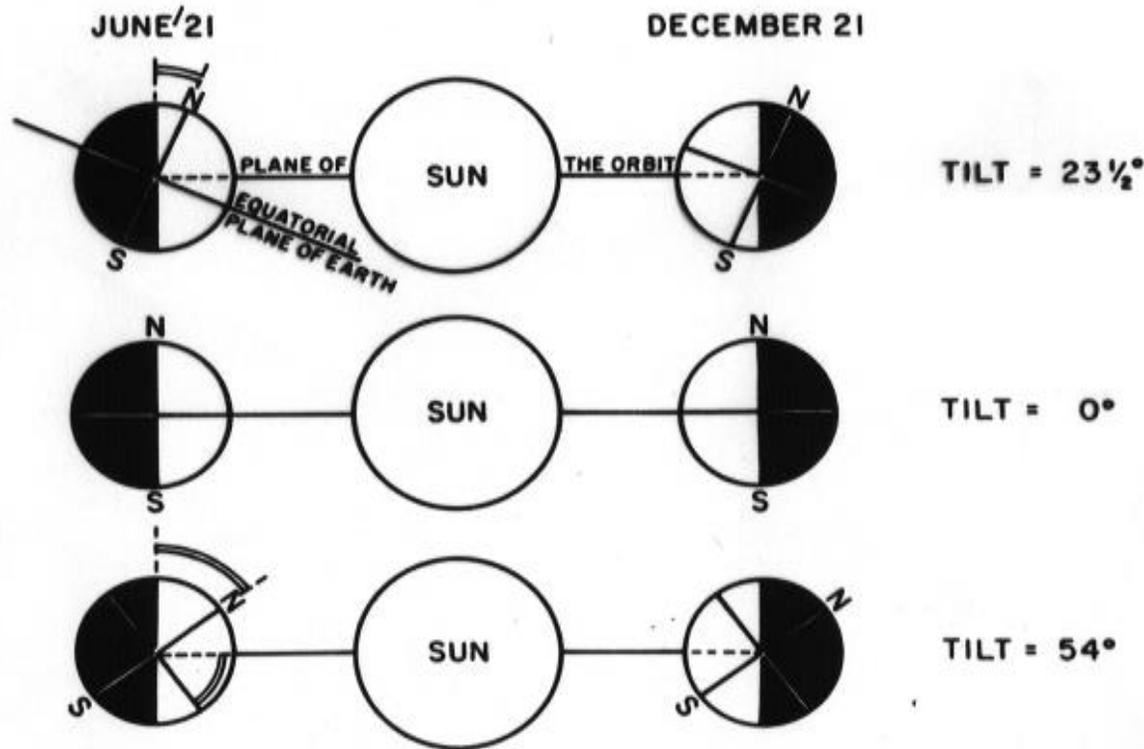


*E = eccentricità orbitale (variazione della lunghezza dell'asse minore)*

*T = inclinazione (variazione dell'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre)*

*P = precessione (cambio di direzione dell'inclinazione dell'asse)*

# Inclinazione assiale (“obliquità”)



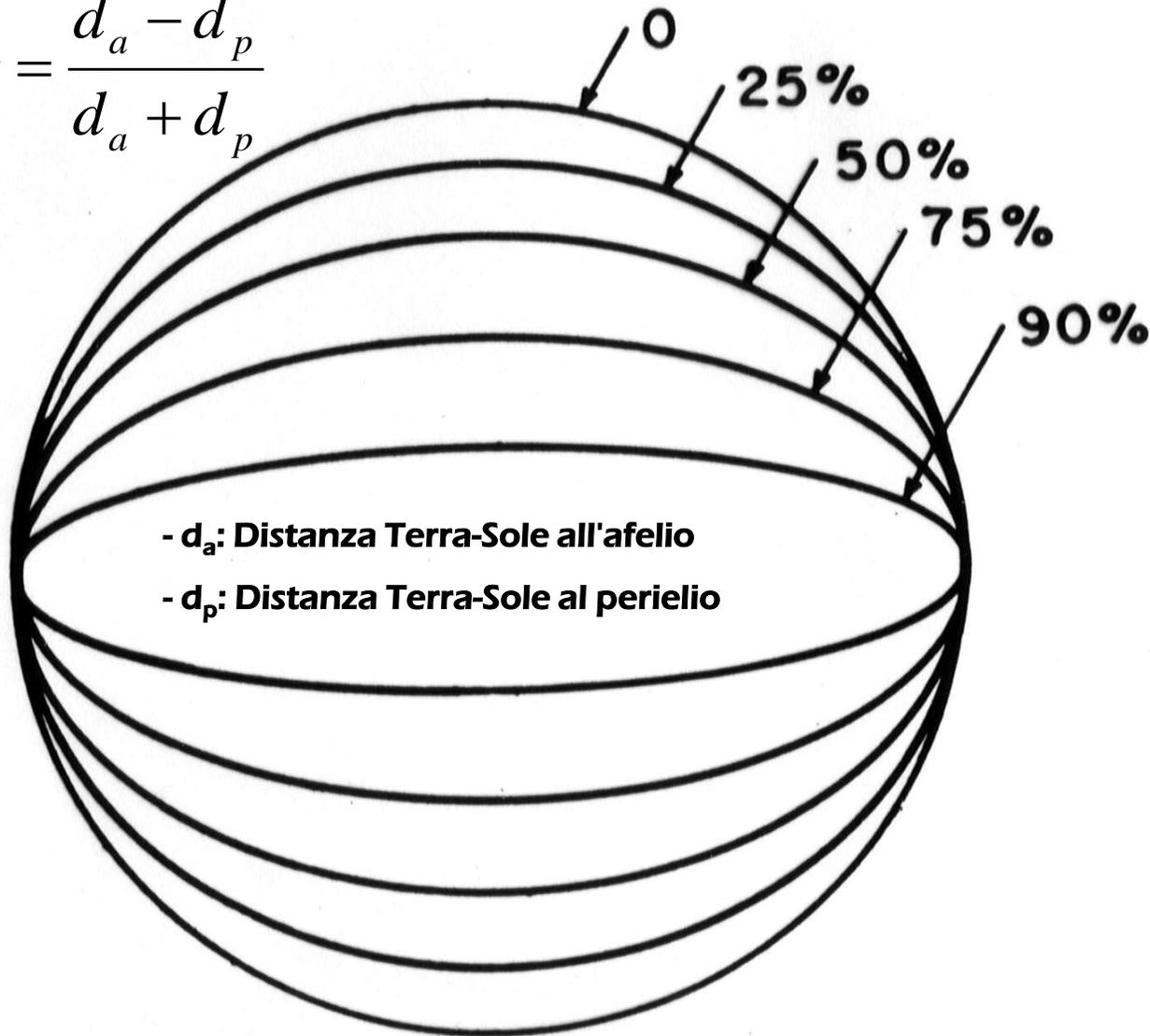
*Figure 25.* The effect of axial tilt on the distribution of sunlight. When the tilt is decreased from its present value of  $23\frac{1}{2}^\circ$ , the polar regions receive less sunlight than they do today. When the tilt is increased, polar regions receive more sunlight. The possible limits of these effects (never actually achieved) would be a tilt of  $0^\circ$ , when the poles would receive no sunlight; and  $54^\circ$ , when all points on the earth would receive the same amount of sunlight annually.

- I cambiamenti nell'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre determinano l'ampiezza del ciclo stagionale della radiazione solare

**Periodo: 41.000 anni**  
**Variazione:  $21,5^\circ$ - $24,5^\circ$**   
**Adesso:  $\sim 23^\circ$**

# Eccentricità

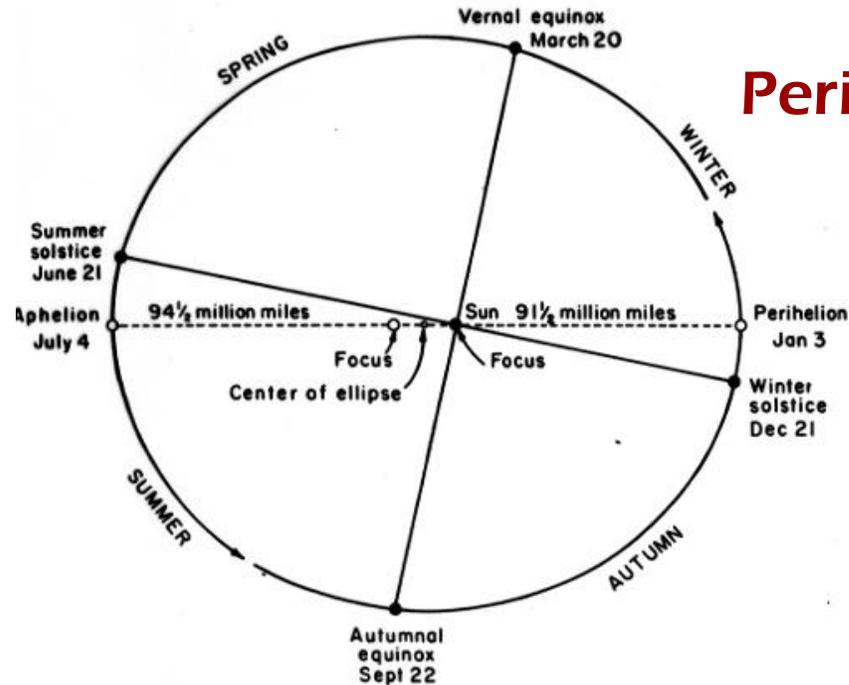
$$e = \frac{d_a - d_p}{d_a + d_p}$$



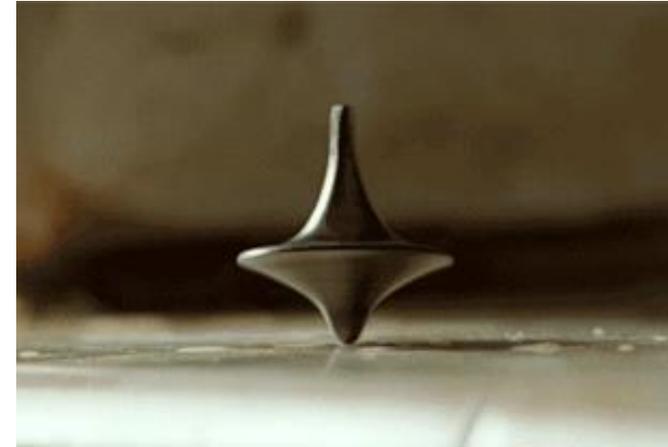
- L'orbita terrestre è ellittica
- Attualmente la Terra è leggermente più vicina al Sole a gennaio che a luglio
- L'ampiezza di questa variazione è l'eccentricità
- Influenza la distribuzione infrastagionale della radiazione solare

**Periodo: 100.000 anni**  
**Variazione: 0,00-0,05**  
**Adesso: ~ 0,03**

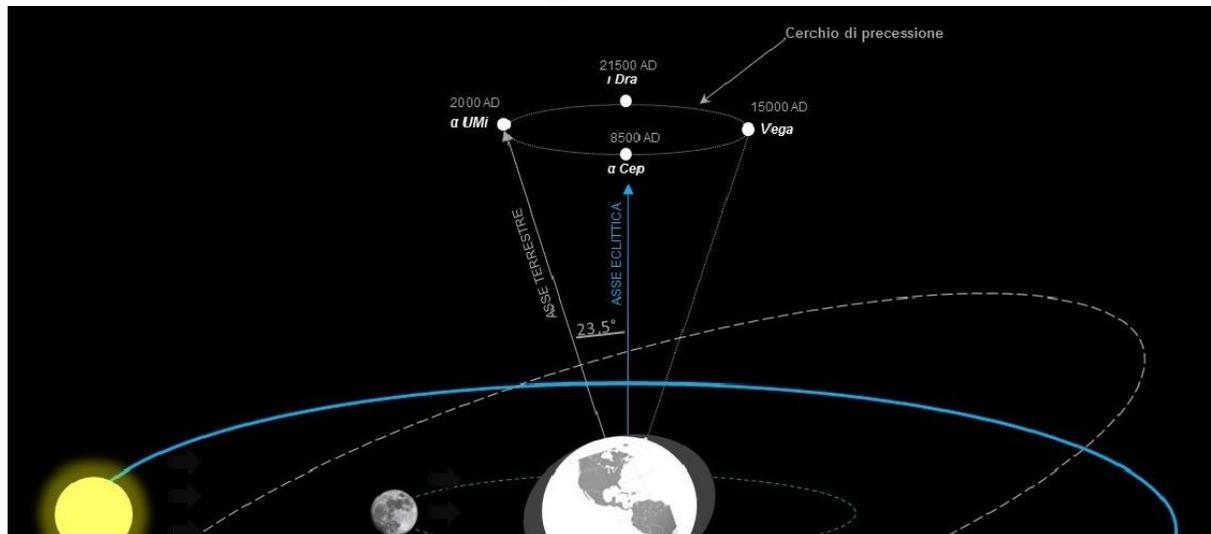
# Precessione degli equinozi



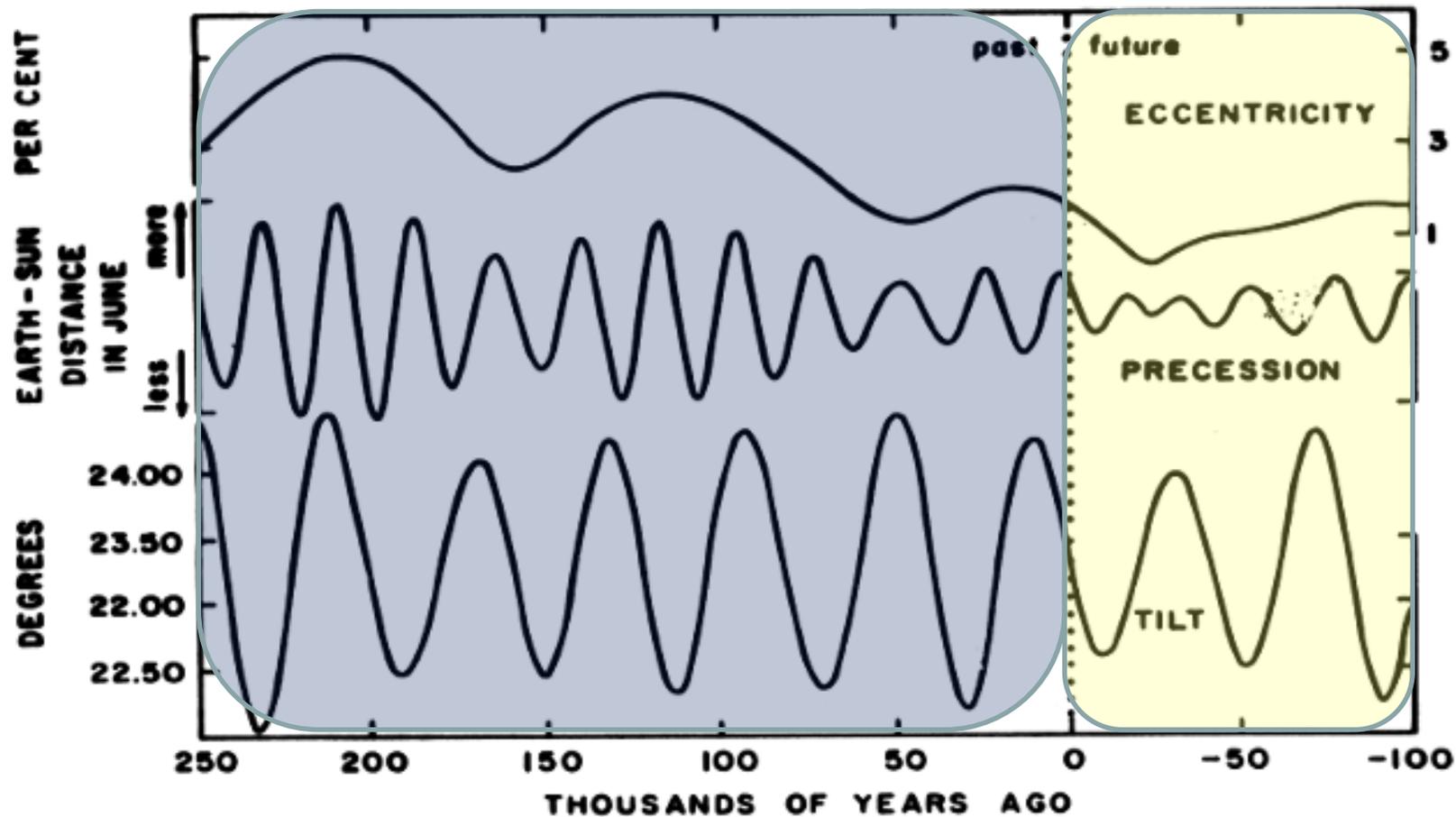
**Periodo: 25.800 anni**



- La direzione dell'asse rotazionale «gira come una trottola» (più lentamente)
- Attualmente il sole è in perielio d'inverno
- In questo modo l'ampiezza stagionale della radiazione è minima
- La precessione inverte periodicamente la direzione dell'asse
- Attualmente l'asse terrestre punta verso la stella polare Polaris, Mismar oppure Yilduz (Ursa Polaris I)
- Tra 13.000 anni l'asse terrestre punterà verso Vega, nella costellazione della Lira

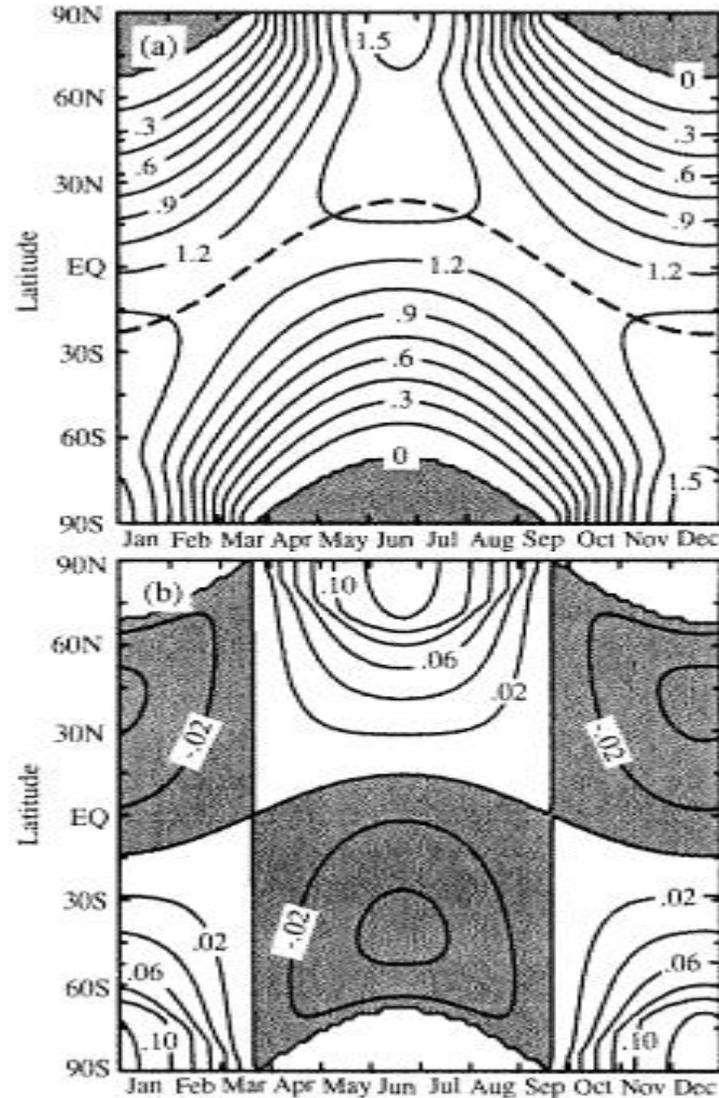


# Variazioni passate e future dei parametri orbitali



**Figure 41.** Changes in eccentricity, tilt, and precession. Planetary movements give rise to variations in the gravitational field, which in turn cause changes in the geometry of the earth's orbit. These changes can be calculated for past and future times. (Data from A. Berger.)

# Effetti radiativi dell'inclinazione dell'asse

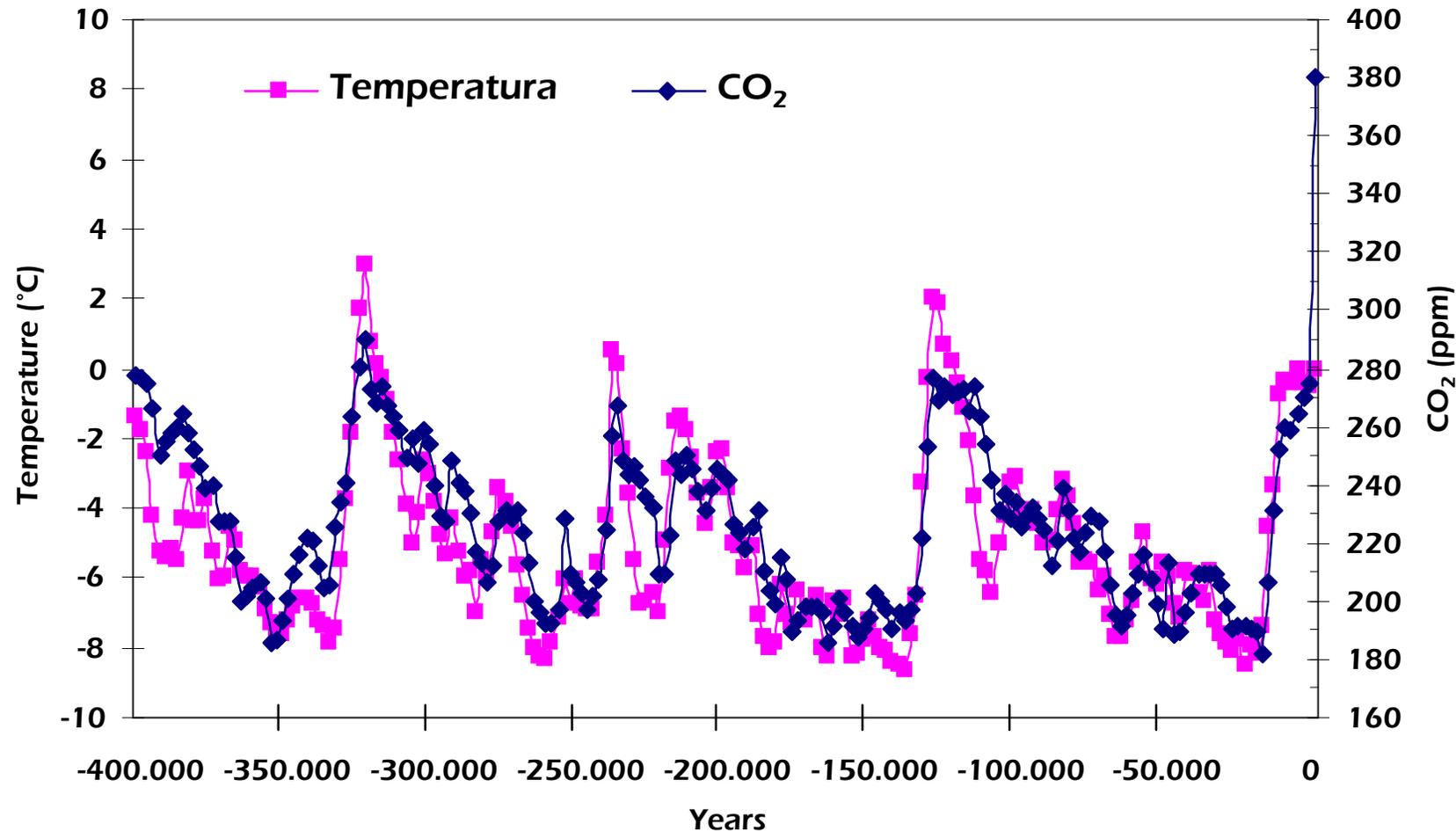


**Fig. 11.10** (a) Insolation distribution function  $\bar{S}(\Phi, x, t)$  plotted as a function of latitude and season for an obliquity of  $\Phi = 23.5^\circ$ . (b) Sensitivity of the insolation distribution function to obliquity,  $\Delta\Phi(\partial\bar{S}/\partial\Phi)_{\Phi=23.5}$ , evaluated for  $\Delta\Phi = 2^\circ$ .

- Per quanto riguarda la radiazione solare effettiva nella parte superiore dell'atmosfera (TOA):
  - ✓ Nessuna variazione della radiazione solare complessiva in arrivo
  - ✓ Piccole variazioni del gradiente meridionale medio annuale della radiazione solare complessiva in arrivo
  - ✓ Variazioni sostanziali nella distribuzione stagionale della radiazione solare complessiva in arrivo alle alte latitudini
- D'estate arriva più radiazione
- D'inverno arriva meno radiazione

TOA = Top Of Atmosphere

# Andamento nel tempo di temperatura e CO<sub>2</sub> negli ultimi 400 ky



Concentrazioni di CO<sub>2</sub> e temperature ricostruite dalle misurazioni di Vostok  
(Fonte: CDIAC, 2007)

# Analisi armonica

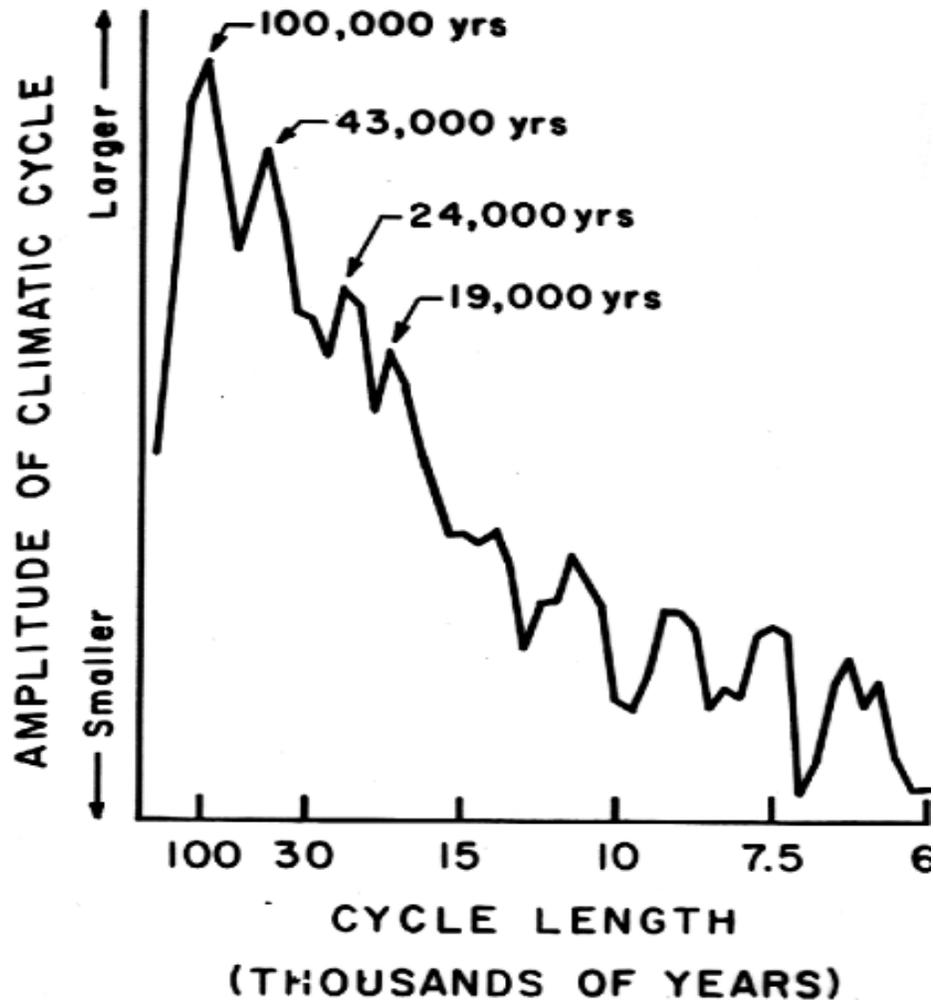
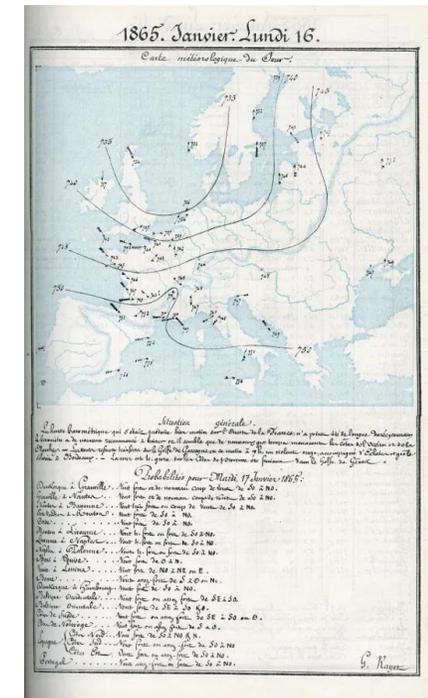


Figure 42. Spectrum of climatic variation over the past half-million years. This graph—showing the relative importance of different climatic cycles in the isotopic record of two Indian Ocean cores—confirmed many predictions of the Milankovitch theory. (Data from J.D. Hays et al., 1976.)

- Spettri di Fourier di record isotopico di volume di ghiaccio (500 ky)
- La maggior parte della "potenza" è in variazioni con periodi di 100.000, 43.000 e 24.000 anni
- Questi periodi corrispondono approssimativamente alla periodicità dei cambiamenti orbitali (teoria di Milankovitch)

# Urbain Le Verrier “crea” la meteorologia moderna

- Urbain Le Verrier è stato un matematico francese specializzato in meccanica celeste (tra le altre cose scoprì Nettuno)
- Nel 1854, in particolare il 14/11/1854, quella che poi sarà chiamata «La Grande Tempesta» spazzò il Mar Nero, creando gravissimi danni alla flotta di rifornimento britannica e alleata nel Mar Nero durante la guerra di Crimea, che vedeva alleati Gran Bretagna, Francia, Turchia e regno di Sardegna contro la Russia
- Napoleone III comprese quanto sarebbe prezioso per le operazioni militari se si potessero prevedere simili fatalità, e chiese a Le Verrier se era possibile farlo
- Le Verrier era astronomo. In quegli anni si verificò un’eclissi solare. Raccogliendo i dati osservativi nelle varie nazioni, Le Verrier vide che mancava in tutte le nazioni un giorno, causa cielo nuvoloso, ma non era lo stesso
- Intuì quindi che la nuvolosità faceva parte di un sistema che si era propagato. E quindi, guardando i dati a grande scala, era possibile seguire il movimento dei sistemi e prevederne il movimento
- L’ovvio passo successivo fu di istituire un servizio meteorologico di raccolta dati: l’Osservatorio di Parigi dal 1855 raccolse le osservazioni meteorologiche inviate ogni mattina tramite telegrafo
- In breve tempo ogni paese europeo nacque un servizio meteorologico nazionale



Carta meteorologica del 16/01/1865  
Fonte: [Observatoire de Paris](https://www.observatoiredeparis.fr/)

