



**Università degli studi di Torino**  
**Centro interdipartimentale IRIS**



Corso di formazione alla sostenibilità per dottorandi fruitori di  
borse di studio finanziate dalla Regione Piemonte  
**1° ciclo – 15 febbraio 2005**

# **Le dinamiche dei cicli biogeochimici**

**Marco D. Tonon**

Dipartimento di Scienze della Terra

**Giuseppe Barbiero**

Dipartimento di Biologia animale e dell'uomo

**IRIS**

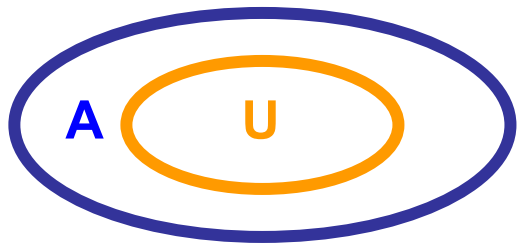


# Agenda

- 17.00 *Benvenuto* e agenda
- 17.15 Commento dei questionari
- 17.30 Le preconoscenze dei dottorandi
- 18.00 I cicli biogeochimici
- 18.15 Il ciclo geochimico del carbonio
- 18.30 *pausa*
- 18.45 Il ciclo biochimico del carbonio
- 19.10 Il ciclo biogeochimico del carbonio
- 19.25 Aumento dell'effetto serra
- 19.45 Interazione tra ricerche dei dottorandi e ciclo del carbonio
- 20.00 *fine*

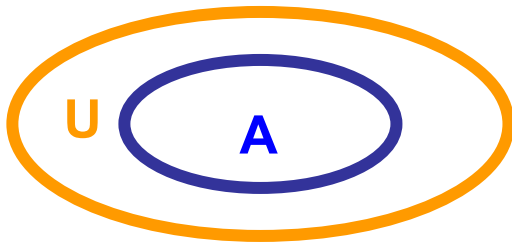


“Sostenibilità” deriva da ‘sostegno’ – ‘sostenere’.  
Secondo te, quando si parla di sostenibilità ambientale,  
**chi/che cosa SOSTIENE chi/che cosa?**



Ambiente come ...contenitore che sostiene  
– o deve sostenere – le attività umane ...

➔ 30%



L'Umanità .... sostiene l'ambiente e se stesso ...

➔ 27%

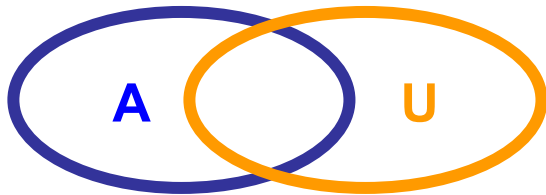
A = Ambiente U = Umanità

N = Totale risposte 33

IRIS

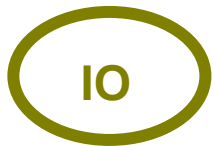


“Sostenibilità” deriva da ‘sostegno’ – ‘sostenere’.  
Secondo te, quando si parla di sostenibilità ambientale,  
**chi/che cosa SOSTIENE chi/che cosa?**



L'Ambiente e l'Umanità .... *Si sostengono reciprocamente...*

➔ 18%



Senso di estraneità .....*chi ha le maggiori competenze, istituzioni ed enti, pensa al futuro ...*

➔ 6%

Altro ... risposte molto diversificate ➔ 19%



# LE PRECONOSCENZE...

*Individualmente:*

- Elencare sul foglio tutti i composti contenenti carbonio che conoscete...

*A gruppi di due:*

- Mettere in relazione i composti elencati attraverso linee di flusso, identificando i fenomeni implicati...

# I CICLI BIOGEOCHIMICI

Sono **processi di circolazione** ciclica delle sostanze inorganiche e organiche alimentati da flussi regolari di **energia solare** (*esogena*) e di **energia geotermica** (*endogena*), realizzati per mezzo di esseri viventi organizzati in **reti alimentari**.

**BIO**

indica le **componenti biotiche** del sistema (*biocenosi*)

**GEO**

indica le **componenti non viventi** del sistema (*biotopo*)

Tali processi sono divisi in **COMPARTI** (*fasi del ciclo*)

Fase BIOLOGICA

Fase di **RICICLO** delle sostanze inorganiche (*ciclo dei nutrienti*) e di temporanea **RISERVA** di sostanze organiche

Fase GEOLOGICA

Fase di **RISERVA** delle sostanze inorganiche entro **SERBATOI** (*atmosfera, idrosfera e litosfera*)



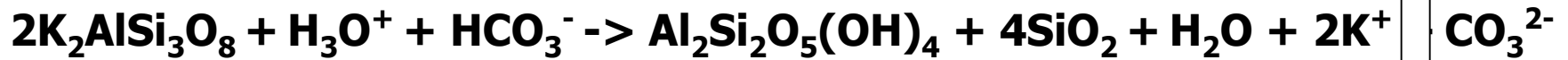
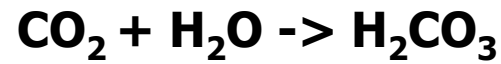
Tra le due fasi avvengono **SCAMBI DI MATERIA**,  
rappresentati da **FLUSSI**.

- le **SOSTANZE** *si muovono* da un **SERBATOIO** all'altro con una data **VELOCITÀ** (espressa in tonnellate/anno).
- le **SOSTANZE** *stazionano* in un **SERBATOIO** per un certo periodo di tempo prima di essere rimobilizzate, tale tempo (espresso in ore/giorni/mesi/anni) è detto **TEMPO DI RESIDENZA**.
- le **SOSTANZE** *si rinnovano* in un **SERBATOIO** in un certo periodo di tempo mantenendo pressoché costante (in equilibrio dinamico) la quantità totale contenuta. Tale tempo (espresso in anni) è detto **TEMPO DI RINNOVAMENTO** (due scale temporali: biologiche e geologiche).



# IL CICLO GEOCHIMICO DEL CARBONIOIO

## ATMOSFERA



## IDROSFERA

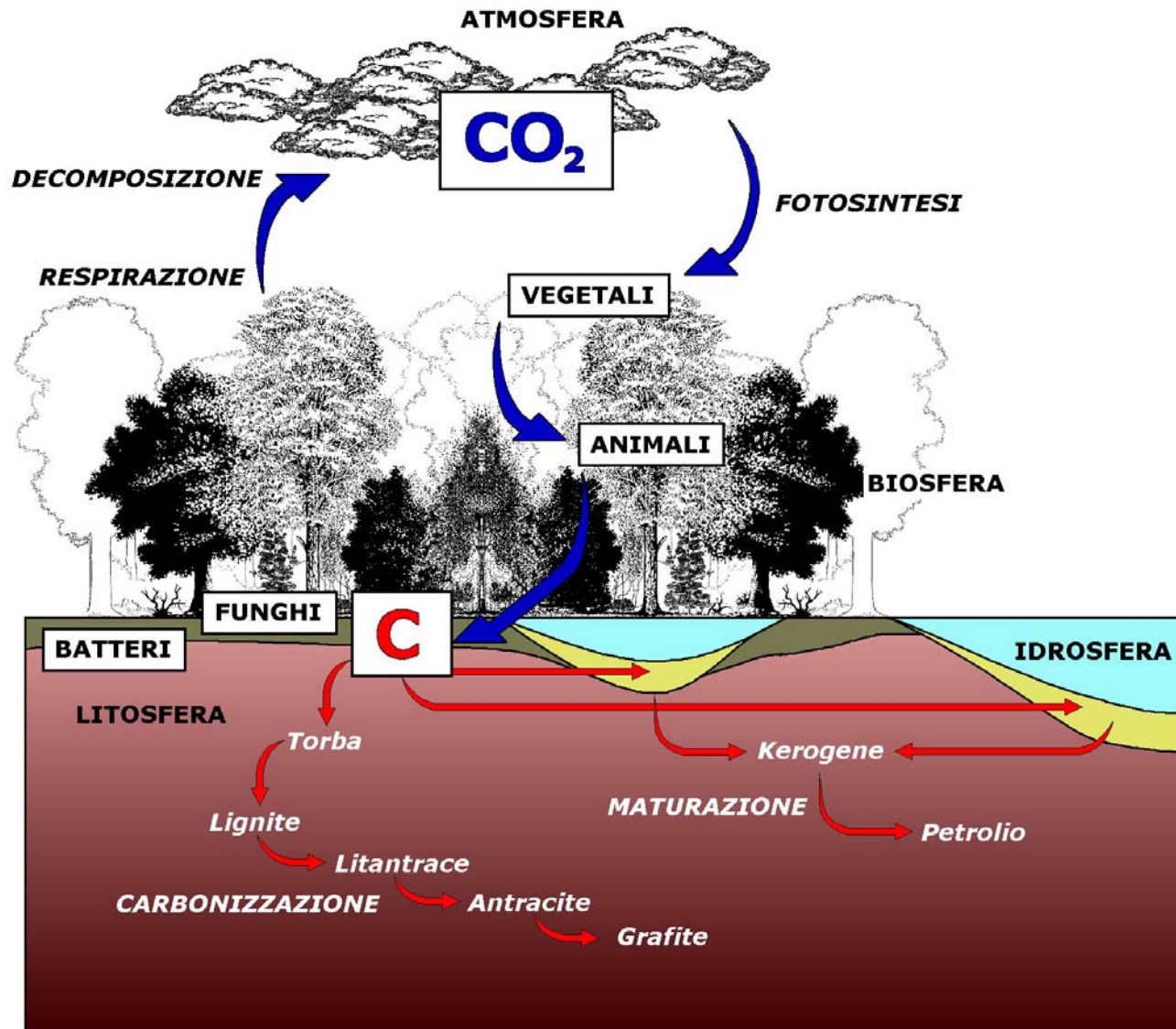


## LITOSFERA

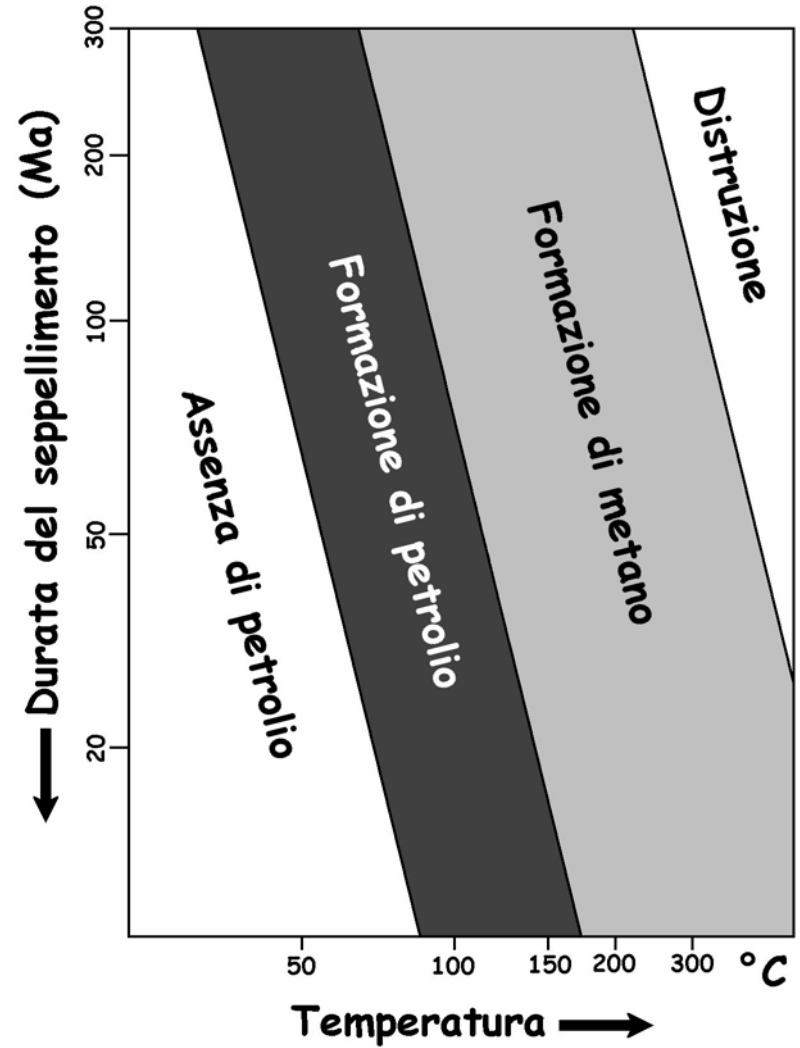
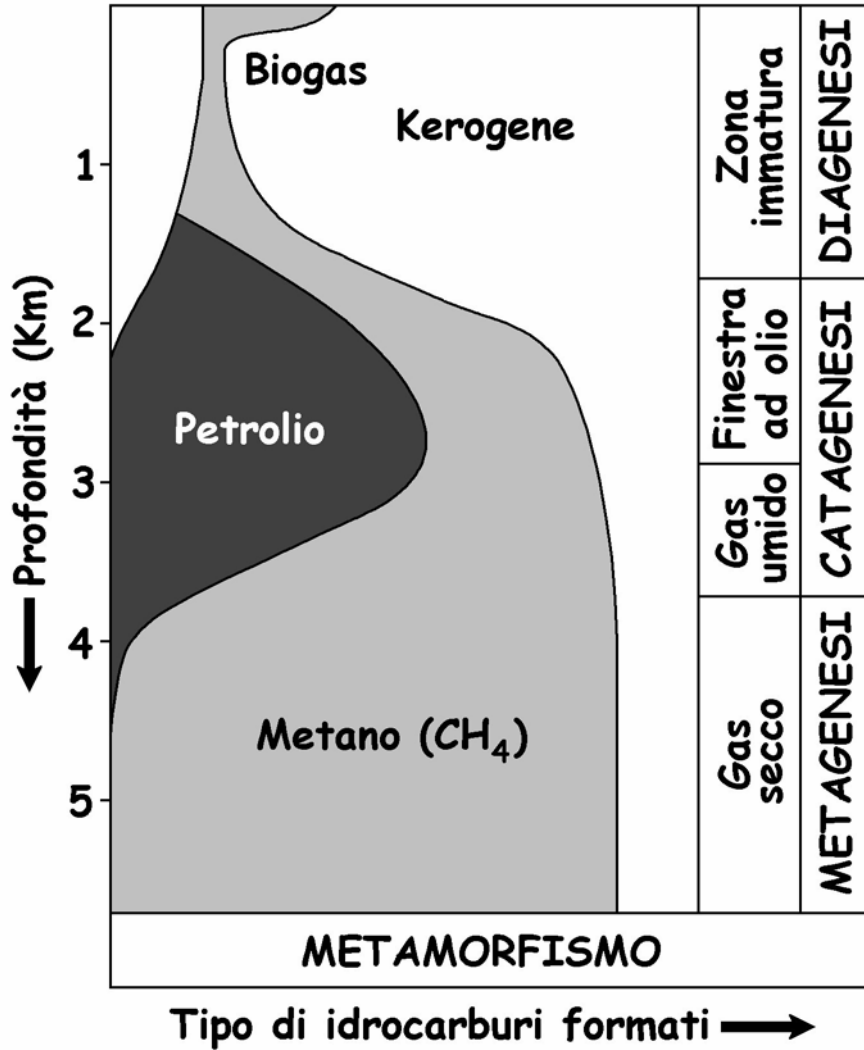




# I COMBUSTIBILI FOSSILI

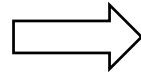


# GLI IDROCARBURI FOSSILI



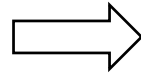
# LE CONDIZIONI GEOLOGICHE PER LA FORMAZIONE DEL PETROLIO

Presenza di una **ROCCIA MADRE**



Sedimento FINE e POCO  
PERMEABILE  
(argilla, silt o calcare micritico)

Presenza di una  
**ROCCIA SERBATOIO**



Sedimento POROSO e  
PERMEABILE  
(arenaria o calcare)

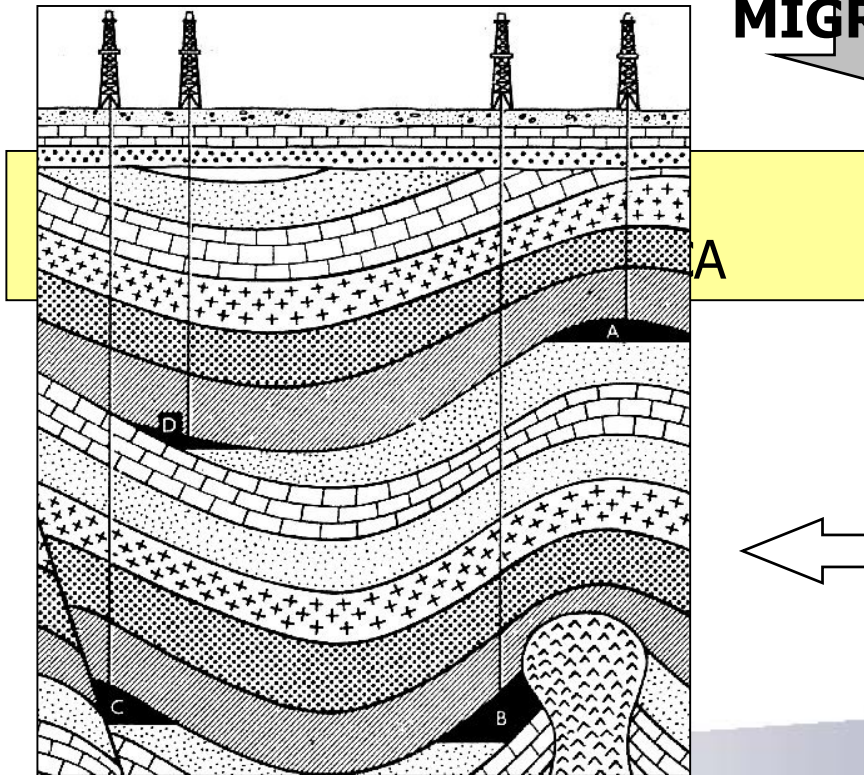
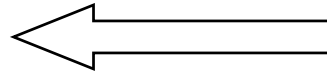
**MIGRAZIONE**



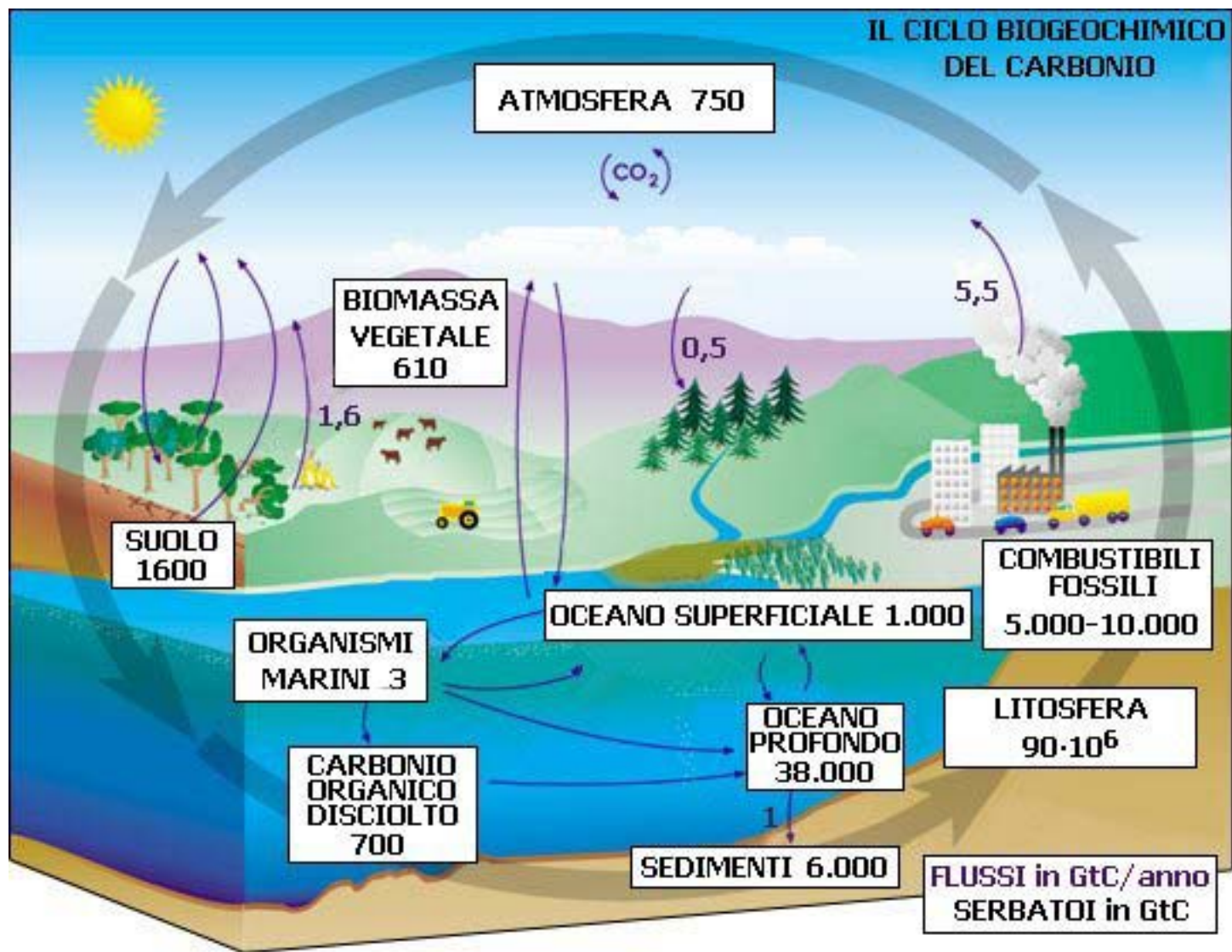
Copertura di sedimenti  
**IMPERMEABILI**  
(o altre barriere fisiche,  
quali strutture sedimentarie o  
tettoniche)



**GIACIMENTO**



# IL CICLO BIOGEOCHIMICO DEL CARBONIO



# Biologia molecolare di Gaia

I cicli biogeochimici  
dal punto di vista della biologia



# Composizione chimica dell'atmosfera dei pianeti

	Venere	Terra	Marte
			
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>96</b>	<b>0,038</b>	<b>95,3</b>
<b>N<sub>2</sub></b>	<b>3,5</b>	<b>78</b>	<b>2,7</b>
<b>O<sub>2</sub></b>	<b>assente</b>	<b>21</b>	<b>0,13</b>
<b>T media (°C)</b>	<b>460°</b>	<b>14°</b>	<b>- 63°</b>
<b>P media (atm)</b>	<b>90</b>	<b>1</b>	<b>0,01</b>



# Alcune considerazioni

- La chimica dell'atmosfera terrestre è **fuori equilibrio**
- La totalità di  $O_2$  e buona parte di  $N_2$  sono **biogeni**
- La forza principale che mantiene fuori equilibrio il sistema è chiamata **Gaia**



# Che cosa è Gaia?



- E' la sottile **pellicola di vita** che riveste completamente il pianeta Terra
- **Gaia** è un “**sistema chiuso**”  
attraversato da flussi di energia  
ricicla completamente la materia





# Gli stock di Gaia

**Matrici gaiane** sono il supporto dove la biosfera ricicla la materia, nei tre stati fondamentali

Atmosfera → gassoso

Idrosfera → liquido

Litosfera → solido

**Pozzo** è il luogo fisico dove si concentra un determinato tipo di materia perduta da Gaia

**Serbatoio** è il pozzo da dove Gaia recupera la materia depositata



# Cicli biogeochimici

- Ciclo del Carbonio (C)
- Ciclo dell'Azoto (N)
- Ciclo dell'Ossigeno (O)
- Ciclo del Fosforo (P)
- Ciclo dello Zolfo (S)
- ...
- Ciclo del Molibdeno (Mo)
- Ciclo del Vanadio (V)

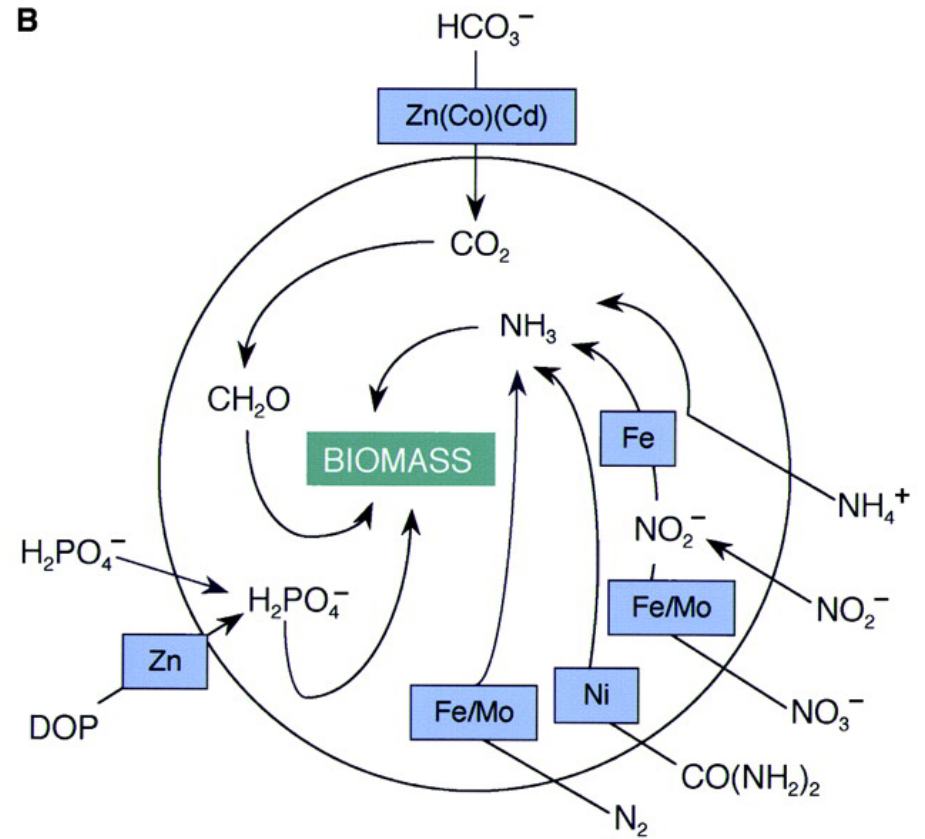
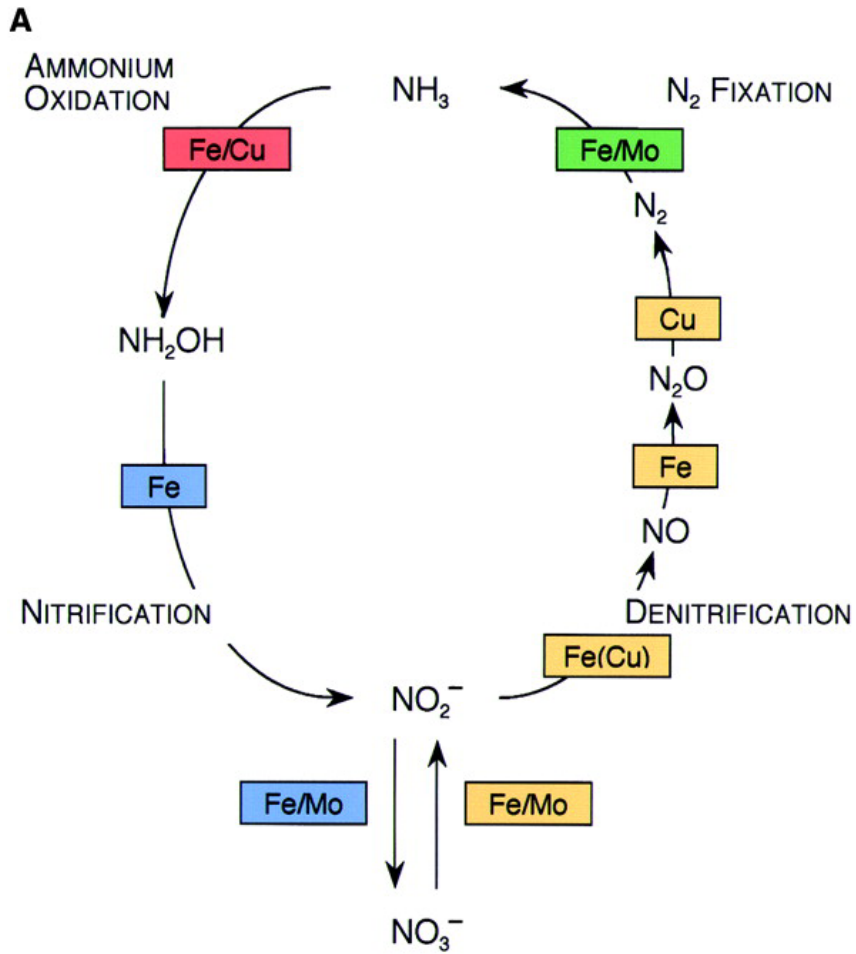


# Gilda biochimica

Si definisce **gilda biochimica** l'insieme degli organismi che svolgono la stessa funzione biochimica nel metabolismo di Gaia.

La gilda biochimica è uno **strumento** di analisi **tassonomico** utile per la valutazione dei flussi degli elementi che caratterizzano i cicli biogeochimici





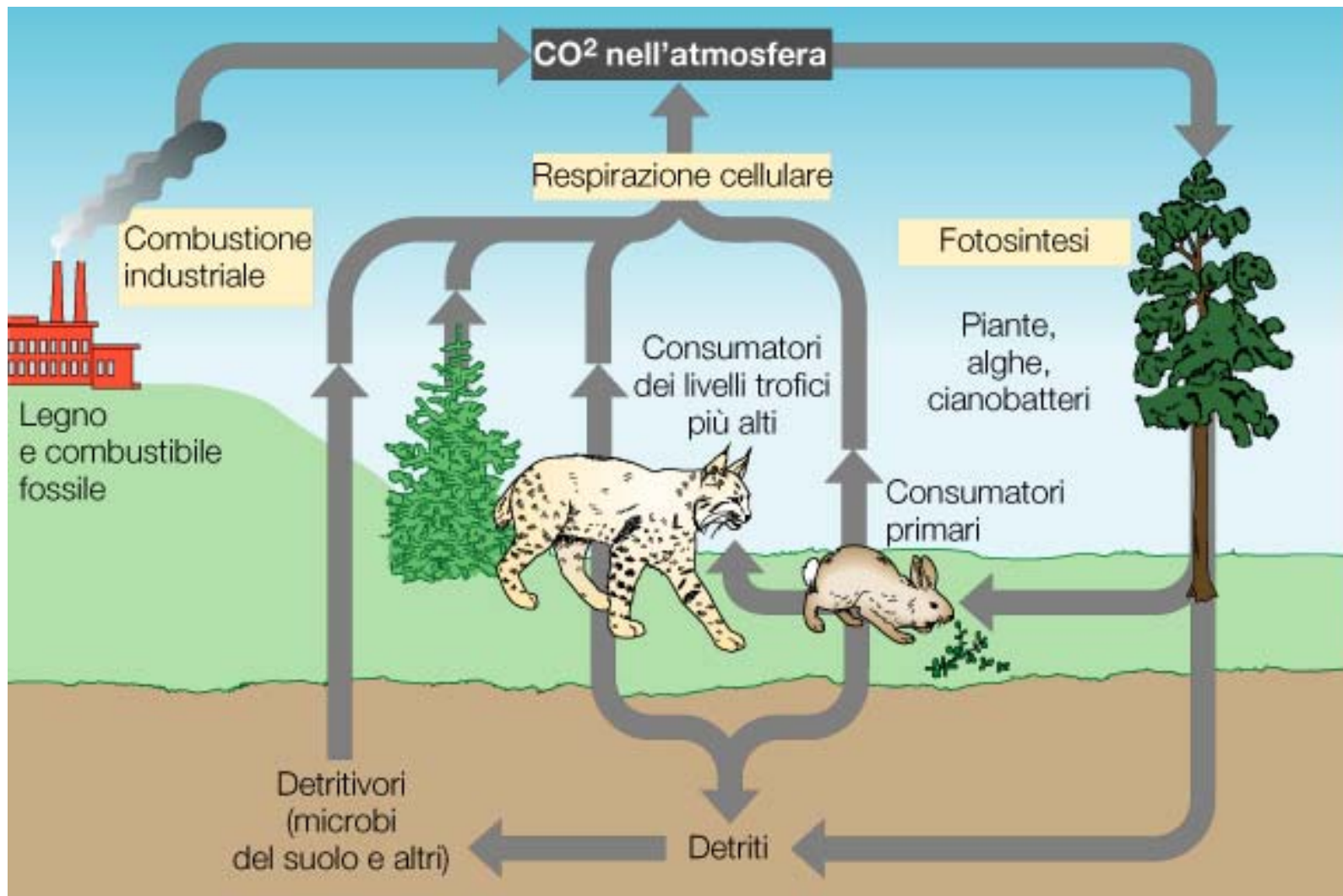
# Ciclo del Carbonio

C è l'elemento più abbondante in Gaia

Il ciclo del C è il più importante

tutti gli altri cicli biologici vi sono strettamente legati





# Alcune considerazioni

Il ciclo fondamentale è  $\text{CO}_2 - \text{O}_2$

Quando C viene organicato (**fotosintesi**) da Gaia,  $\text{O}_2$  viene rilasciato libero nell'atmosfera

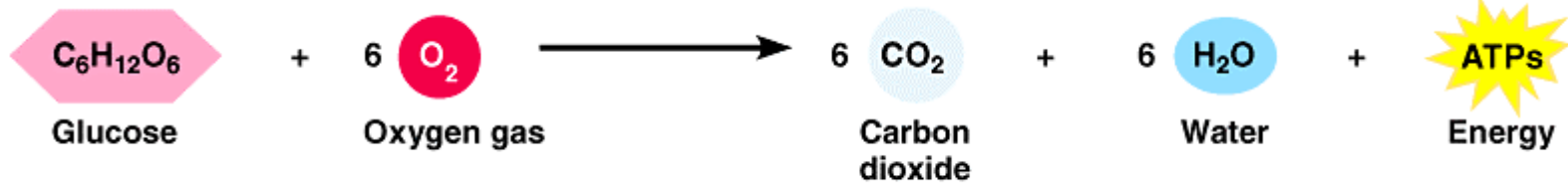
Il ciclo si chiude quando i composti organici vengono ossidati (**respirazione**)

Ma se Gaia **seppellisce** C nella litosfera, l'equilibrio si sposta a favore della **fotosintesi**

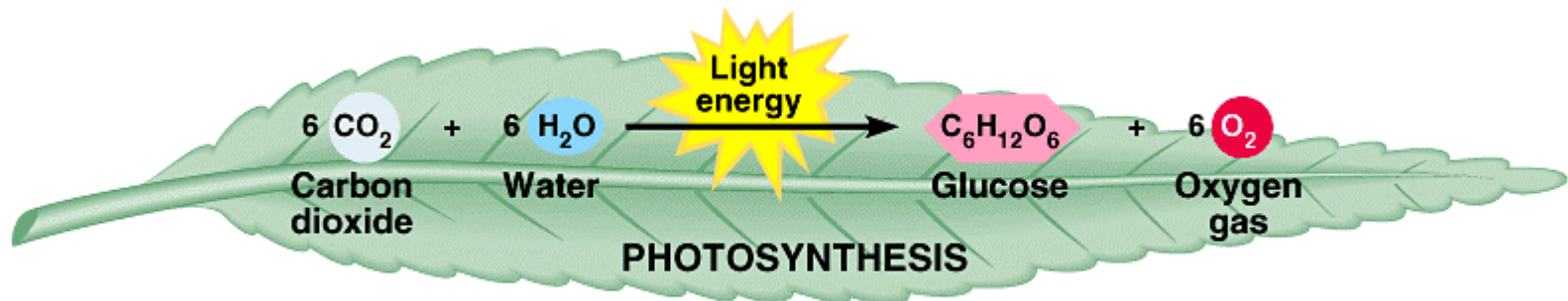


# respirazione

# fotosintesi



Copyright © 2003 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

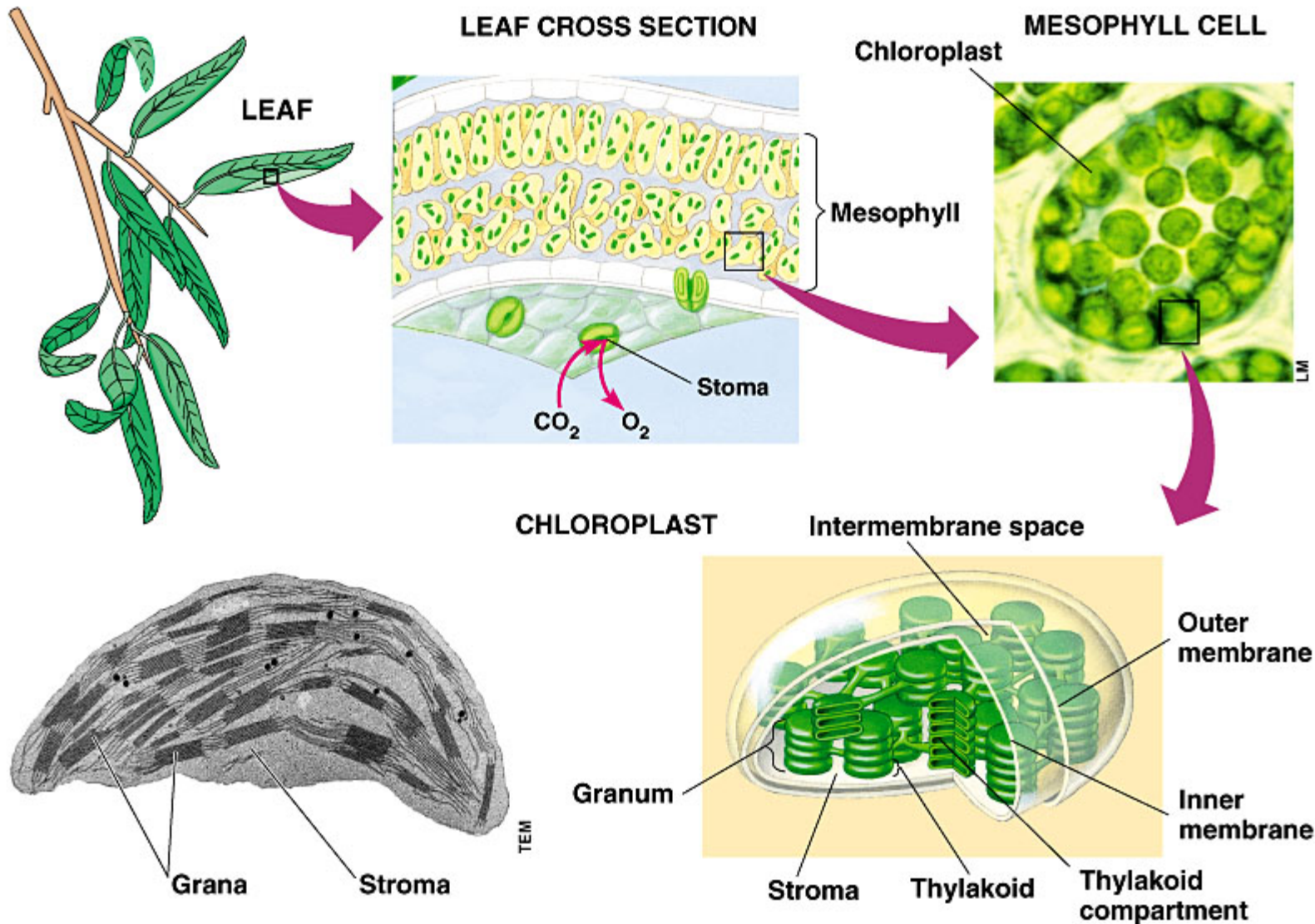


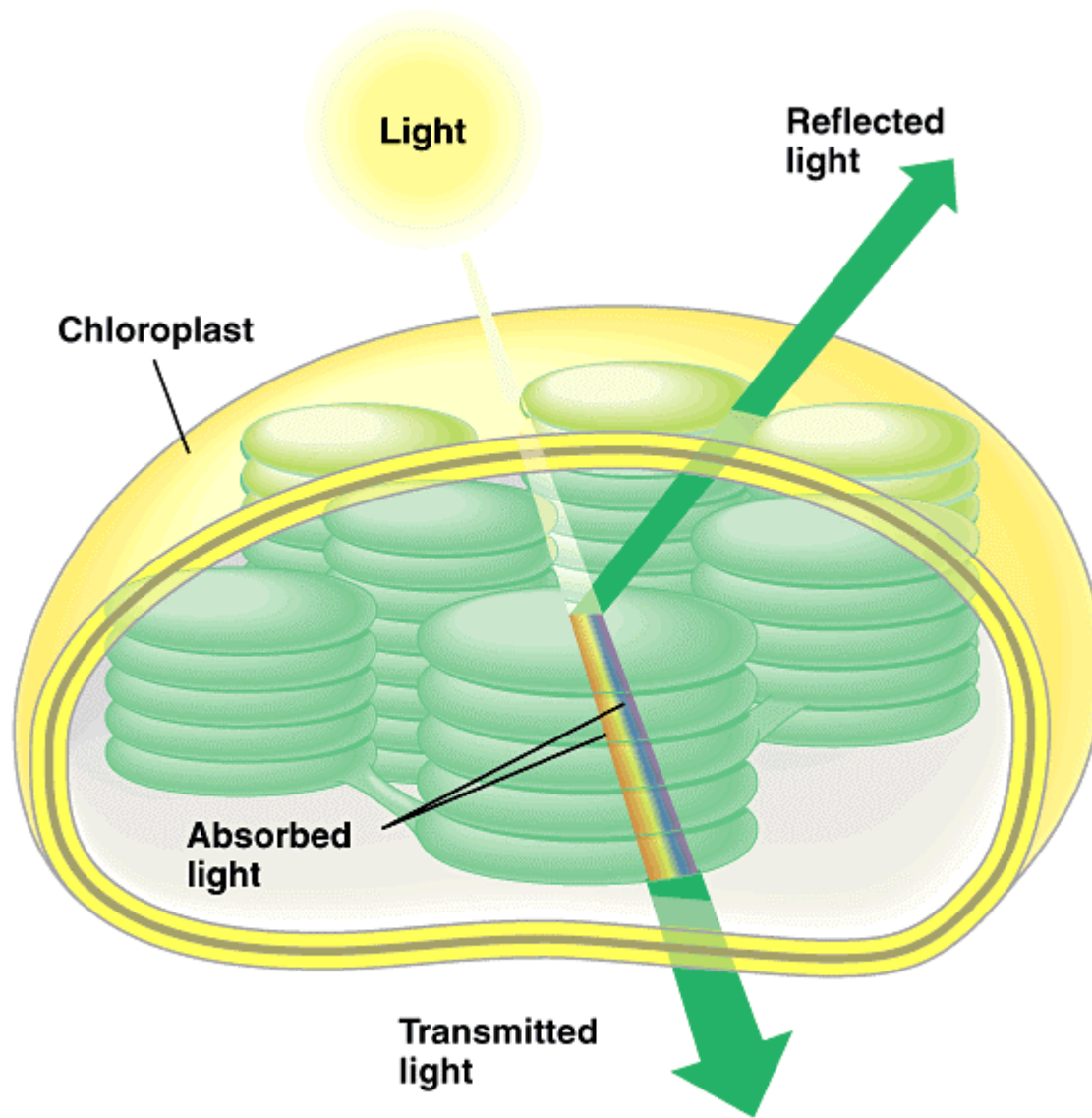
Copyright © 2003 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.





# Dove avviene la fotosintesi



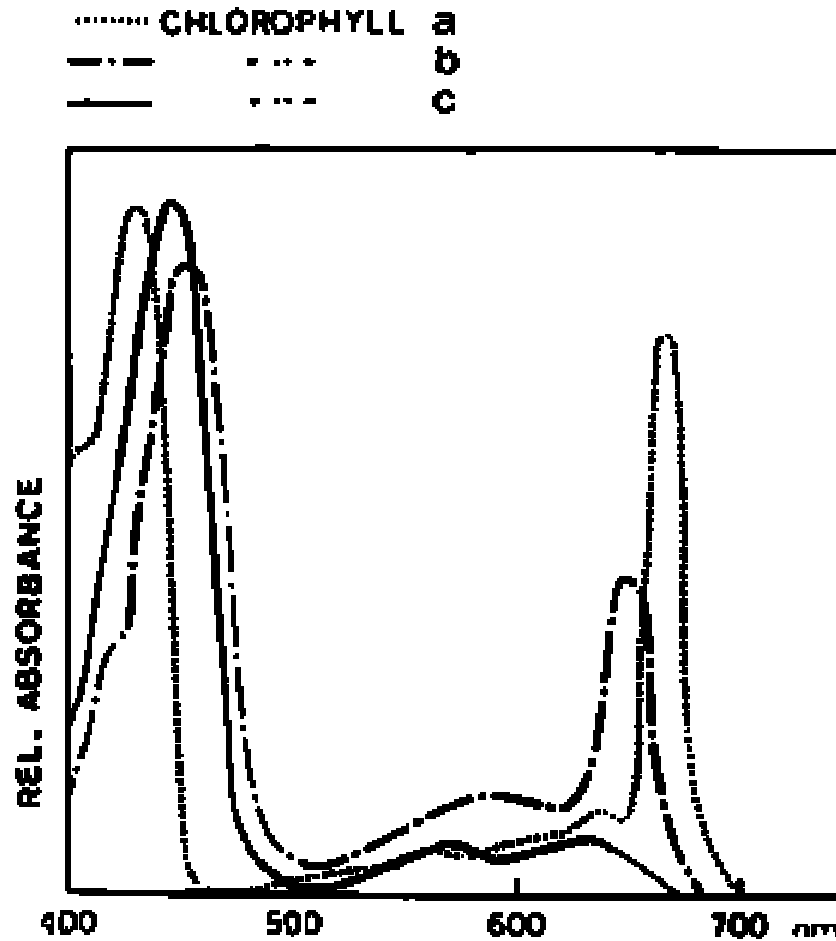


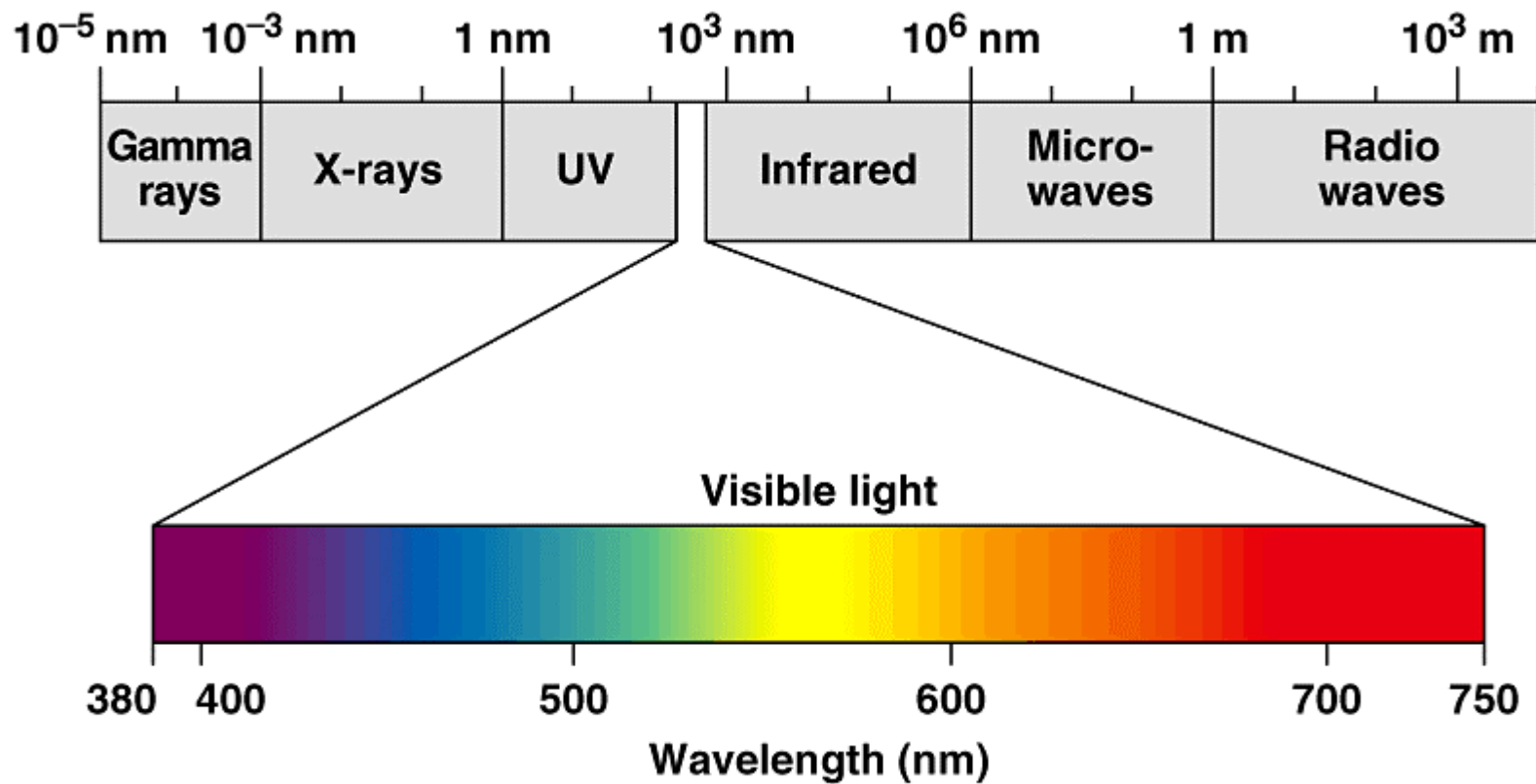
Copyright © 2003 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

IRIS



# Spettro di assorbimento





Copyright © 2003 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

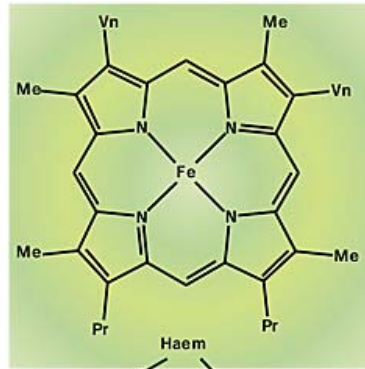
IRIS



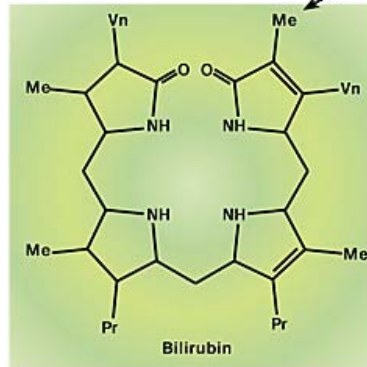
# Clorofilla



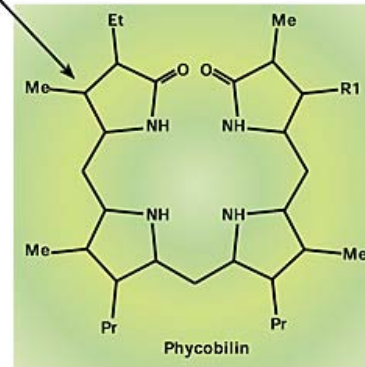
eme



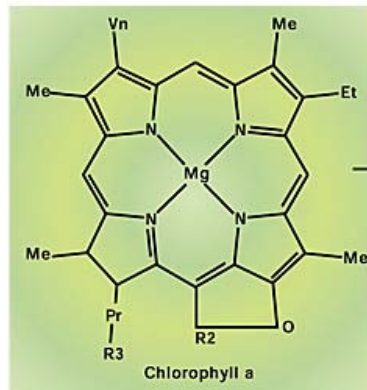
bilirubina



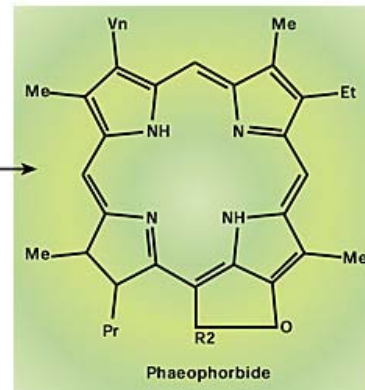
ficobilina



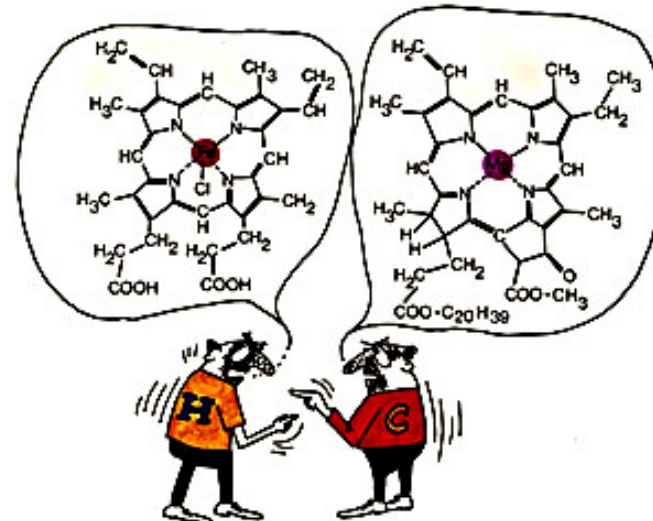
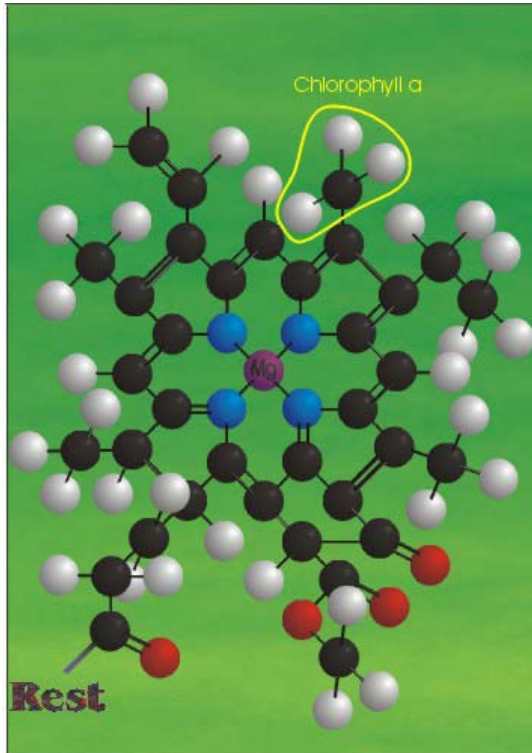
clorofilla a



feoforbide



# Clorofilla o eme ?



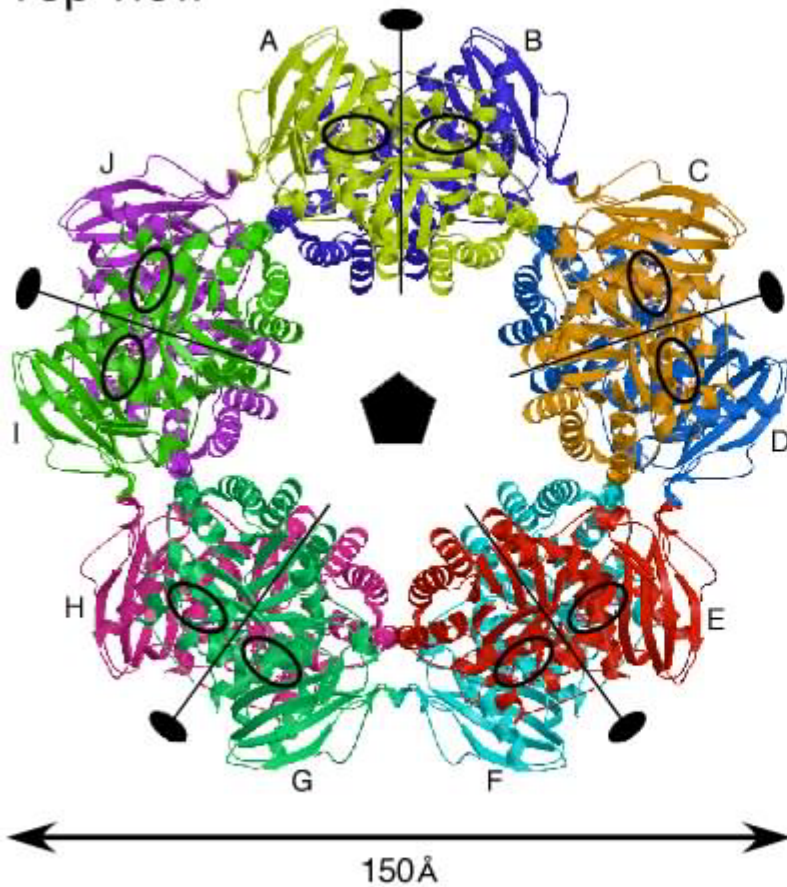
Heme and chlorophyll: which should take evolutionary precedence?

HEME AND CHLOROPHYLL:  
WHICH SHOULD TAKE EVOLUTIONARY  
PRECEDENCE?

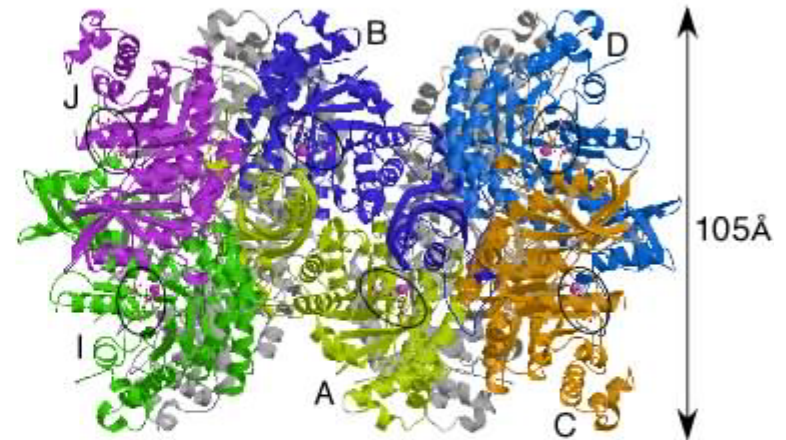


*Thermococcus kodakaraensis* è un archeobatterio scoperto nel 1999

Top view



Side view



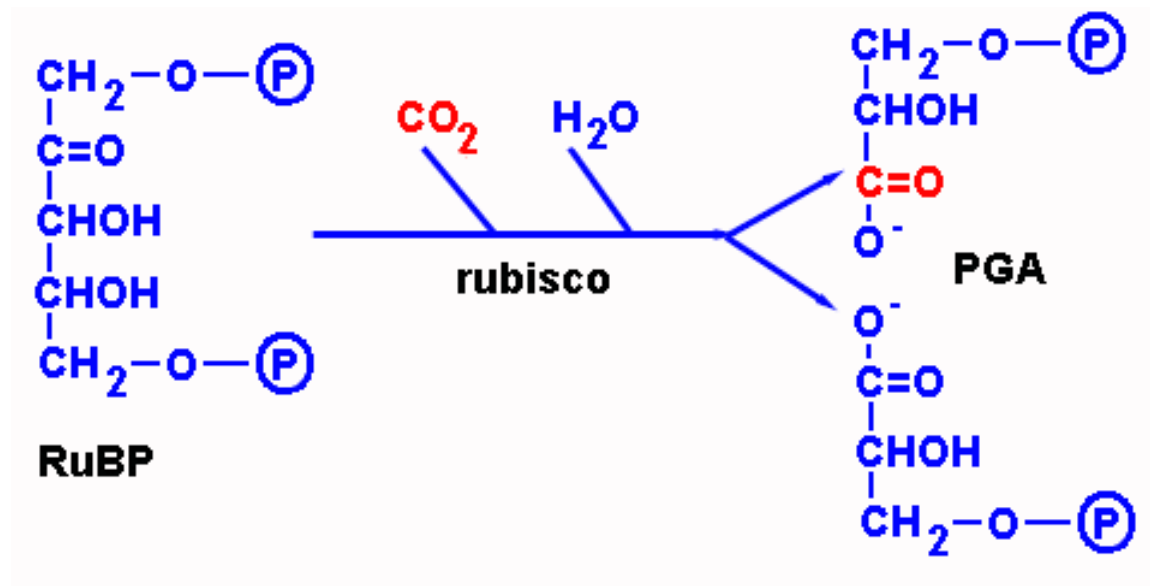
Decameric structure of *Tk*-Rubisco

IRIS

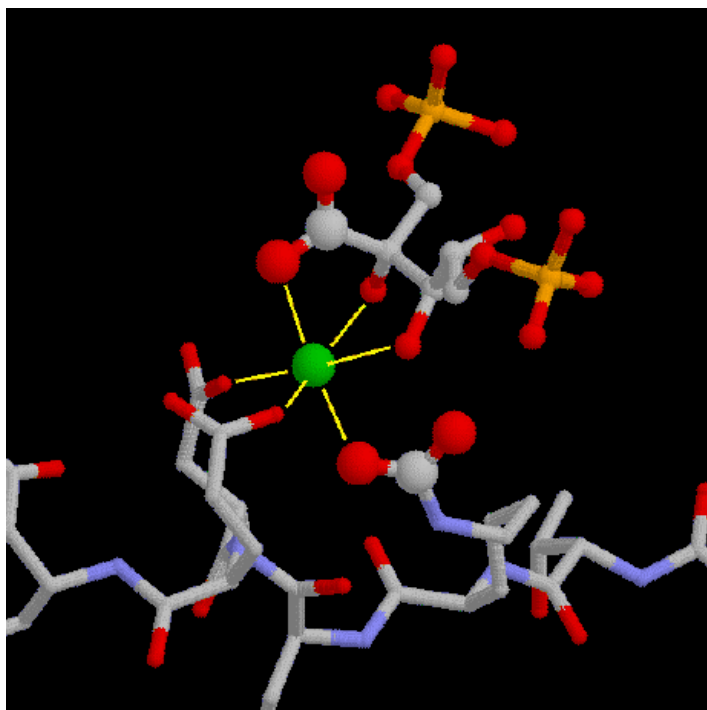




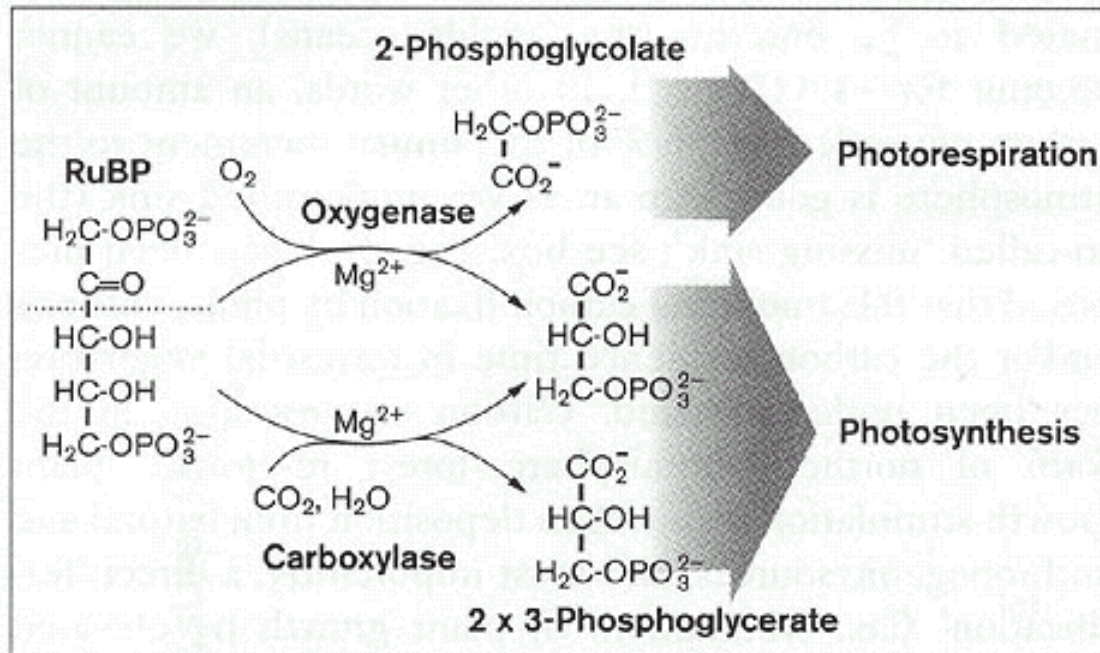
# Ribulosio difosfato carbossilasi ossigenasi



# Organicazione del carbonio



**Figure 3**



Reactions catalyzed by ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (Rubisco) [9]. The carboxylase activity catalyzes the addition of  $CO_2$  to ribulose 1,5-bisphosphate (RuBP) to form two molecules of 3-phosphoglycerate, which are used to make triose phosphates, then carbohydrates. The competing oxygenase reaction yields one molecule of 2-phosphoglycolate and one molecule of 3-phosphoglycerate.

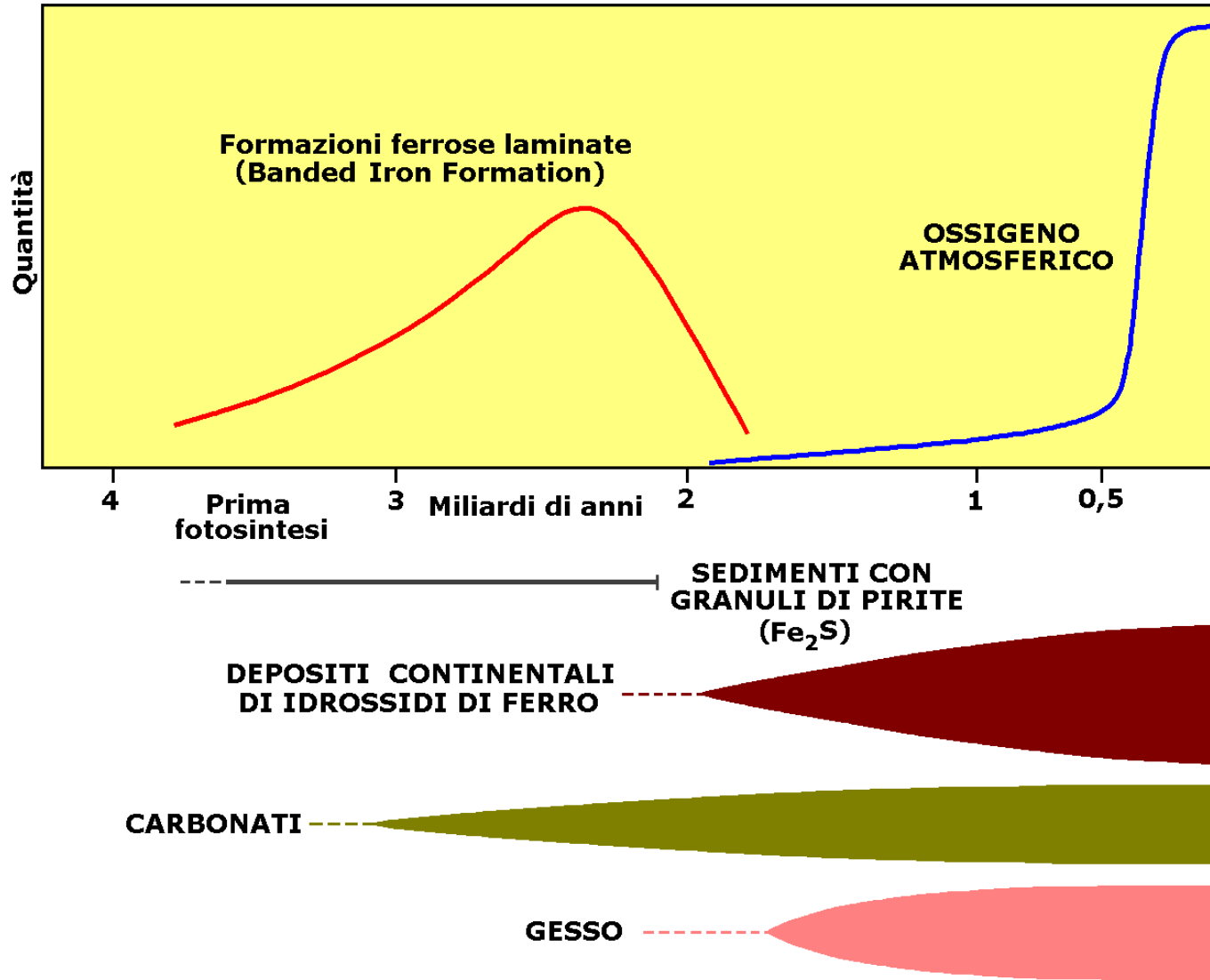


# I grandi “balzi” dell'O<sub>2</sub>

- **4,6** eoni: nascita della Terra
- **3,8** eoni: origine della vita
- **2,5** eoni: l'O<sub>2</sub> libero nell'atmosfera raggiunge la soglia critica del 0,1-1%
- **1,0** eoni: l'O<sub>2</sub> libero è sufficiente per alimentare i primi metazoi
- **0,4** eoni: comparsa dei fotosintetizzatori dotati di radici → l'O<sub>2</sub> è al 26%



# L'EVOLUZIONE DELL'ATMOSFERA



# Il 1° balzo di O<sub>2</sub>

## Fattori

Fotosintesi → O<sub>2</sub> libero

Diminuzione dell'attività vulcanica → minor disponibilità di gas riducenti (ad es.: H<sub>2</sub>S)

## Conseguenze

Attrattore autostabilizzante:

O<sub>2</sub> → metabolismo più efficiente

Maggiori quantità di C organicato

Maggior seppellimento di C → più O<sub>2</sub> libero

L'O<sub>2</sub> stermina gran parte degli organismi anaerobi (batteri)

**E' la prima grande crisi ecologica di Gaia !**



# Il 2° balzo di O<sub>2</sub>

## Fattori

Fotosintesi → O<sub>2</sub> libero

Ossidazione del solfuro (S<sup>2-</sup>) → occupazione dei fondali più profondi

Ossidazione del ferro (Fe<sup>2+</sup>) → formazione delle *Banded Iron Formation*

## Conseguenze

Sviluppo dei primi metazoi



# Omeostasi

Un sistema **omeostatico** è un sistema dove le parti instaurano e mantengono una relazione di stazionarietà fra loro, mediante anelli di retroazione negativa, che garantisce stabilità all'intero. Le reazioni alle perturbazioni sono tese a riportare continuamente il sistema alle sue condizioni iniziali.





# Omeorresi

Un sistema **omeoretico** è una variante di un sistema omeostatico all'interno del quale si attiva un anello a retroazione positiva che alimenta un processo a cascata, capace di spostare in modo irreversibile lo stato stazionario del sistema.



# Il 3° balzo di O<sub>2</sub>

## Fattori

- La formazione dell' **Ipermare** (rete di ife fungine che connettono le radici delle piante con cui sono in simbiosi permettendo la circolazione di ioni inorganici)
- “Invenzione” della lignina (depositi del Carbonifero 340-265)

## Conseguenze

- Le piante crescono in dimensioni e aumentano l'apparato radicale

**E' la seconda grande crisi ecologica di Gaia !**



# I serbatoi di carbonio

<i>Matrice</i>	<i>Serbatoio principale</i>	<i>Quantità (Gt)</i>
Biosfera	Biomassa	2.000
Atmosfera	Troposfera	805 <sup>(*)</sup>
Idrosfera	Oceano	38.400
Litosfera	Rocce carbonatiche	75.000.000 Di cui 4.130 combustibili fossili

Fonte: Falkowski et al., *Science* (2000) 290: 291-296

(\*) = fonte IPCC 2004.



# Alcune osservazioni

L'atmosfera è il serbatoio più piccolo, ma è quello da cui dipende la vita

Ciò che conta non è la dimensione del serbatoio, ma la possibilità o meno da parte di Gaia di potervi accedere

Un criterio per valutare l'importanza di un certo ciclo biogeochimico è il **tasso di ricircolo**



# Tasso di ricircolo

E' il rapporto tra il flusso di un elemento che entra nel ciclo biologico - processato direttamente o indirettamente dalla fotosintesi - e quello che esce dal ciclo per finire seppellito in qualche pozzo geologico.



# Tasso di ricircolo del carbonio

C processato dalla fotosintesi = **100 Gt/anno**

C seppellito in pozzi geologici = **0,5 Gt/anno**

**Tasso di ricircolo** =  $100/0,5 = 200$

Un atomo di C entra nel ciclo biologico e viene scambiato in media **200 volte** prima di uscirne e finire seppellito



# L'uomo nel ciclo del carbonio

Flusso naturale **terrestre** di CO<sub>2</sub>      **52** Gt/a di C

Flusso naturale **oceanico** di CO<sub>2</sub>      **50** Gt/a di C

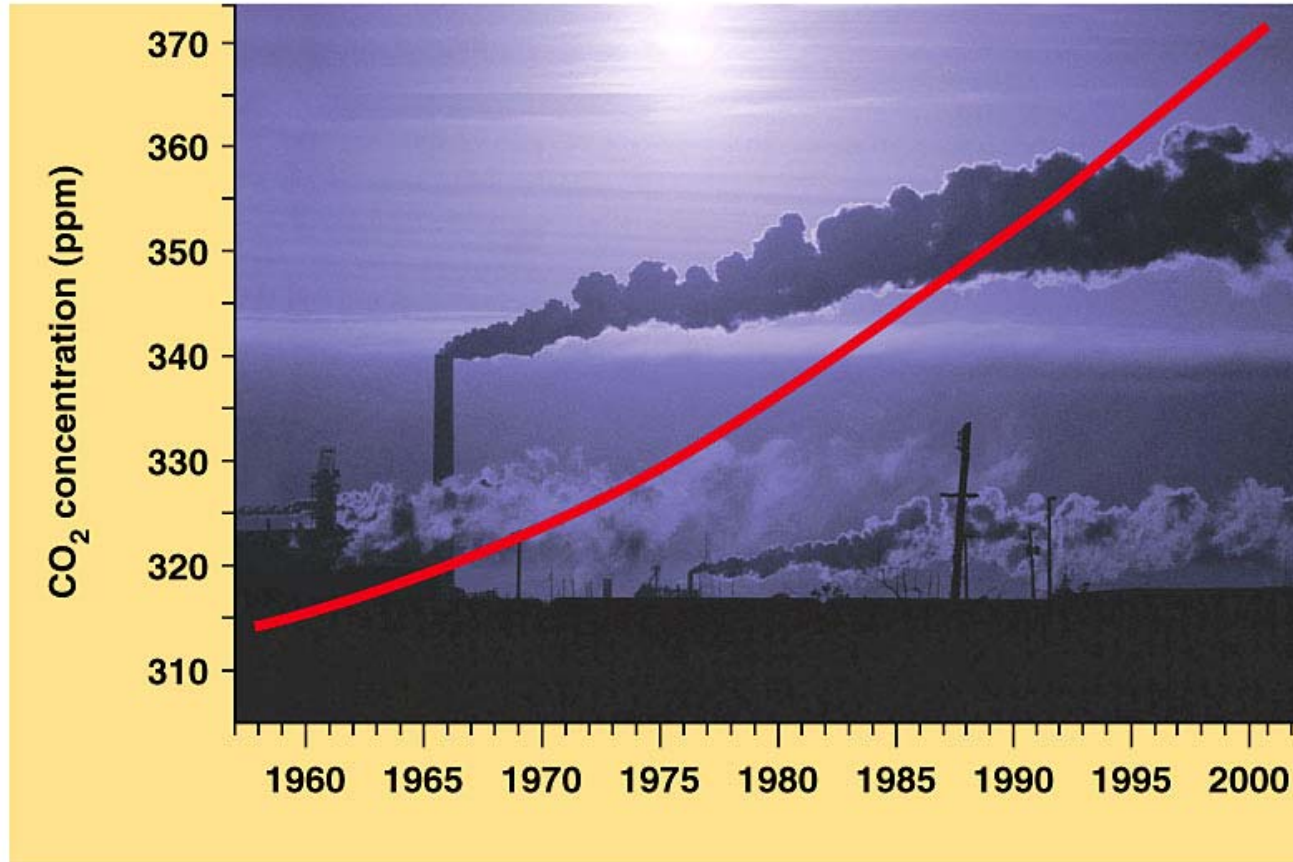
Flusso antropogenico di CO<sub>2</sub>      **6,6** Gt/a di C

+13 % circa di quello terrestre

+ 6 % di quello globale



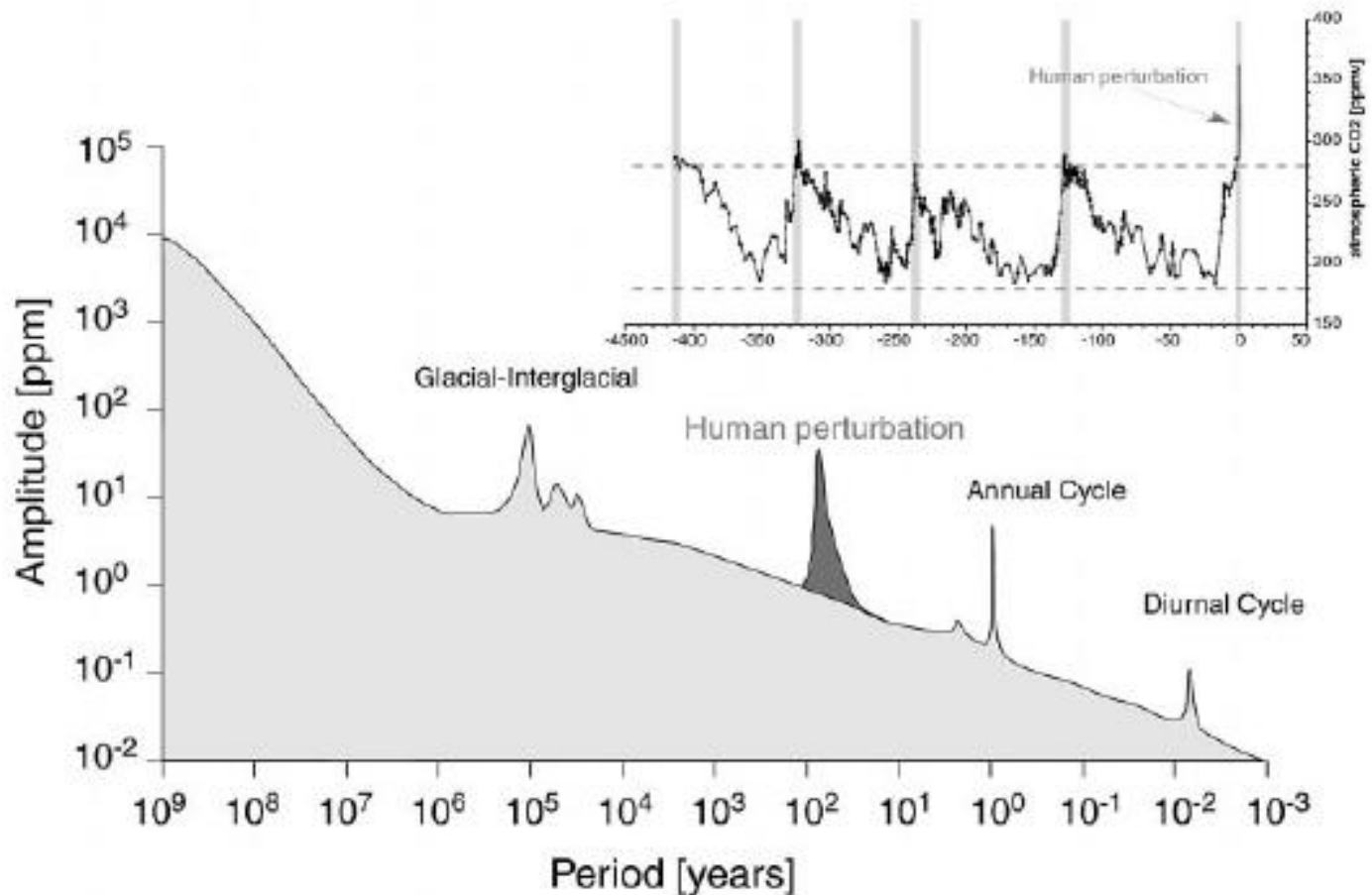
# Effetti dello sbilanciamento del ciclo del carbonio



Copyright © 2003 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.



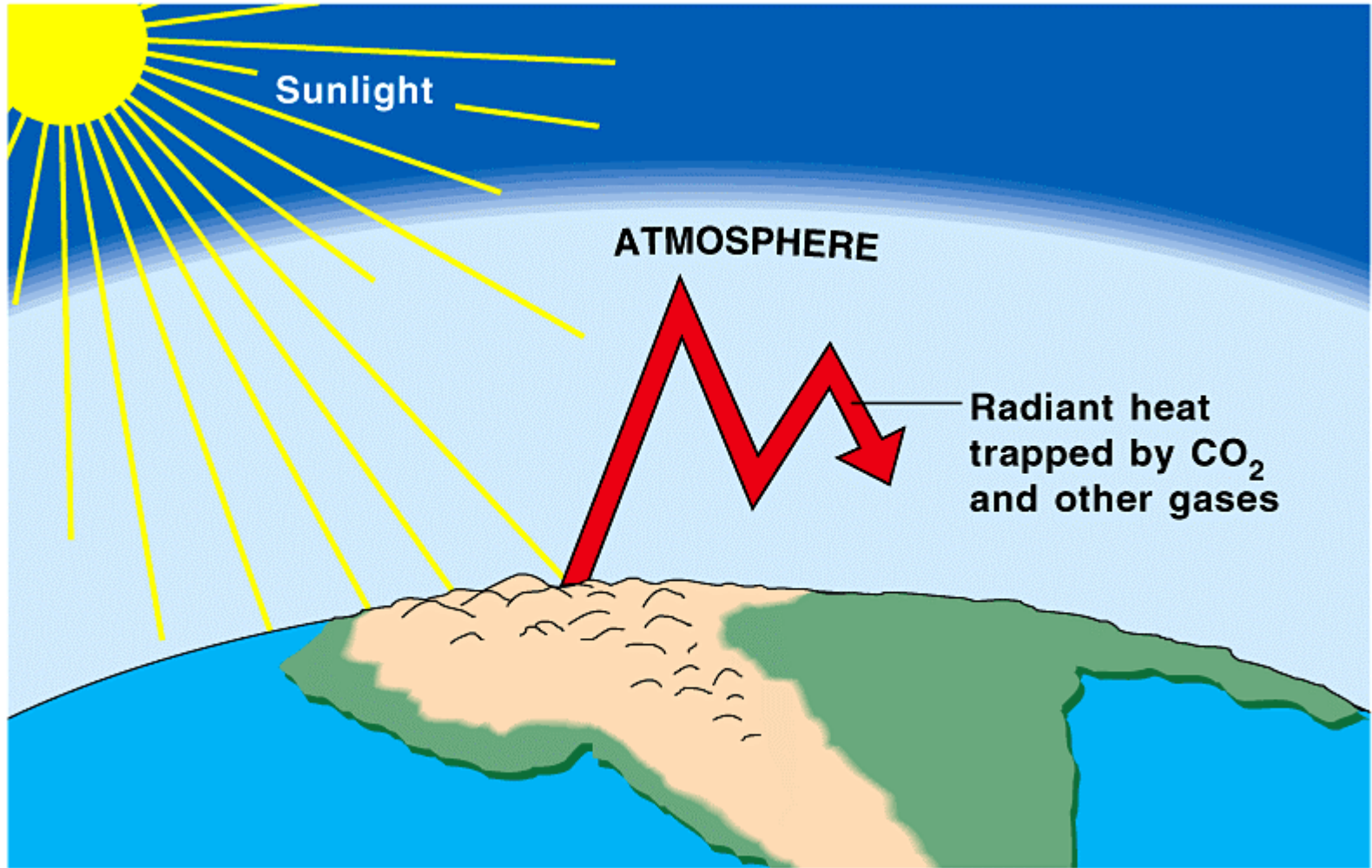




**Fig. 2.** Schematic variance spectrum for CO<sub>2</sub> over the course of Earth's history. Note the impact of human perturbations on the decade-to-century scale. **(Inset)** Changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the past 420,000 years as recorded in the Vostok ice, showing that both the rapid rate of change and the increase in CO<sub>2</sub> concentration since the Industrial Revolution are unprecedented in recent geological history.

Fonte: Falkowski et al., *Science* (2000) 290: 291-296.

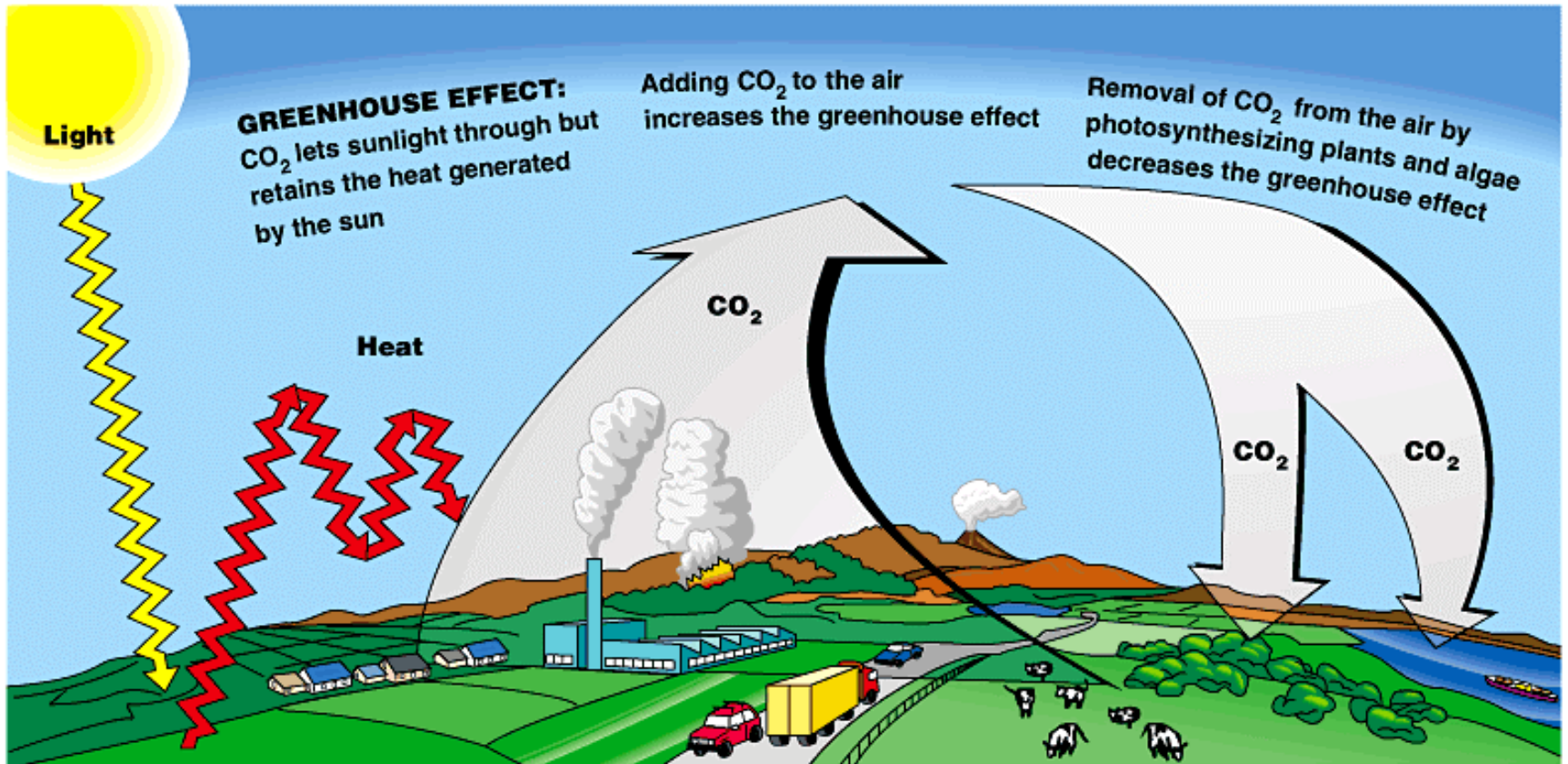




Copyright © 2003 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

IRIS





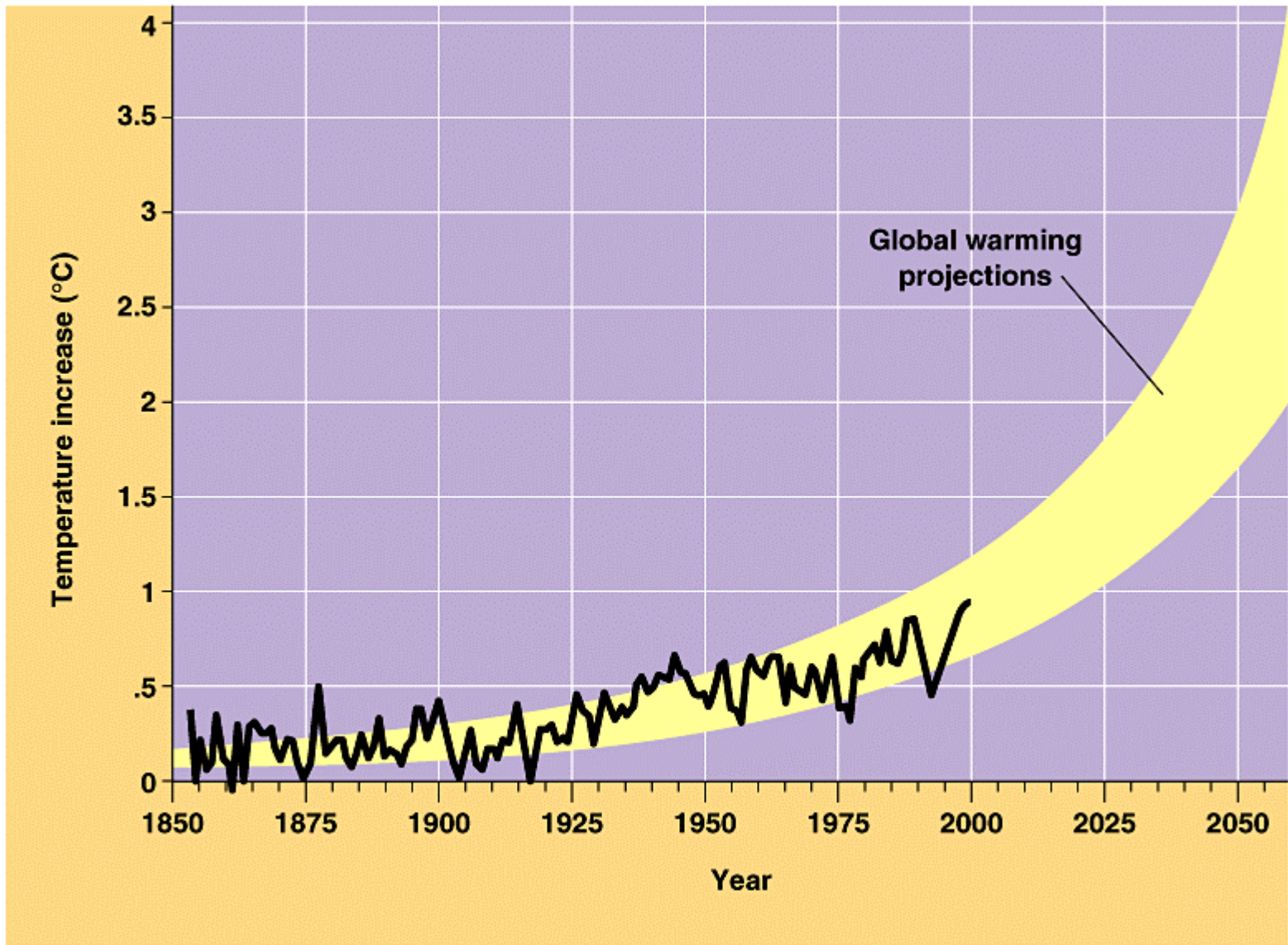
Copyright © 2003 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.



# Variazioni stagionali di CO<sub>2</sub>

- **Emisfero boreale:** fotosintesi  
Vi sono i 2/3 della vegeazione terrestre, gran parte decidua
- **Emisfero australe:** scambio con l'Oceano  
Acque polari fredde: solubilità di CO<sub>2</sub> maggiore  
Formazione di ghiaccio fa aumentare la salinità  
Le acque superficiali, ricche di CO<sub>2</sub> sprofondano  
In inverno la CO<sub>2</sub> viene assorbita  
Ma inverni miti diminuiscono l'assorbimento

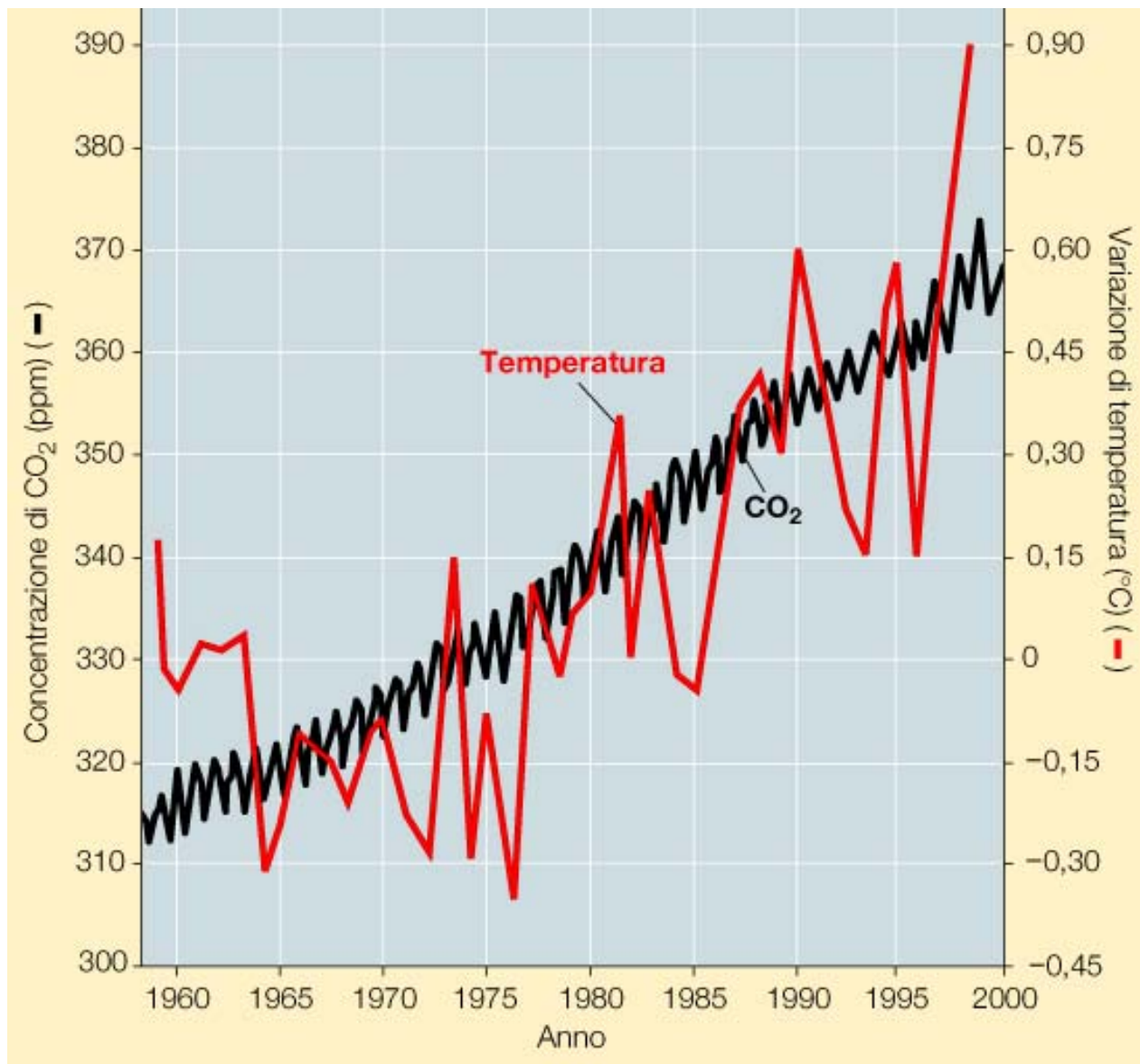




Copyright © 2003 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

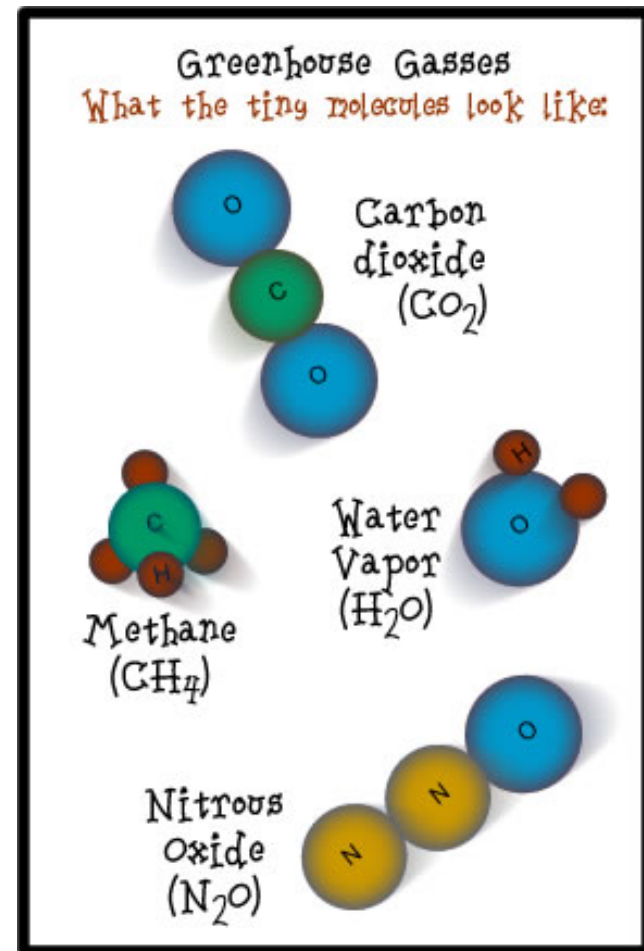
IRIS



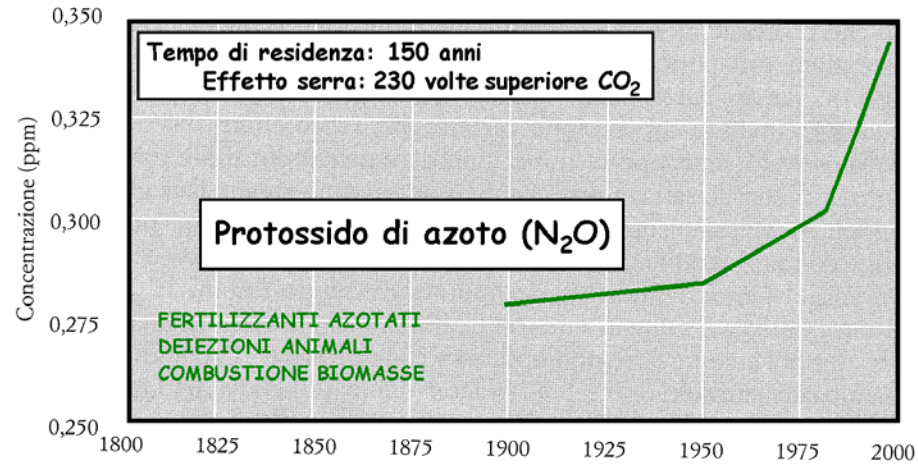
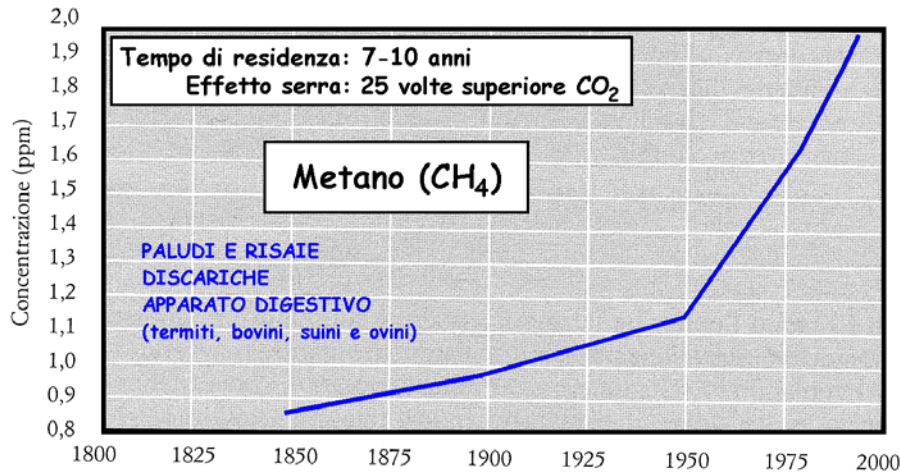
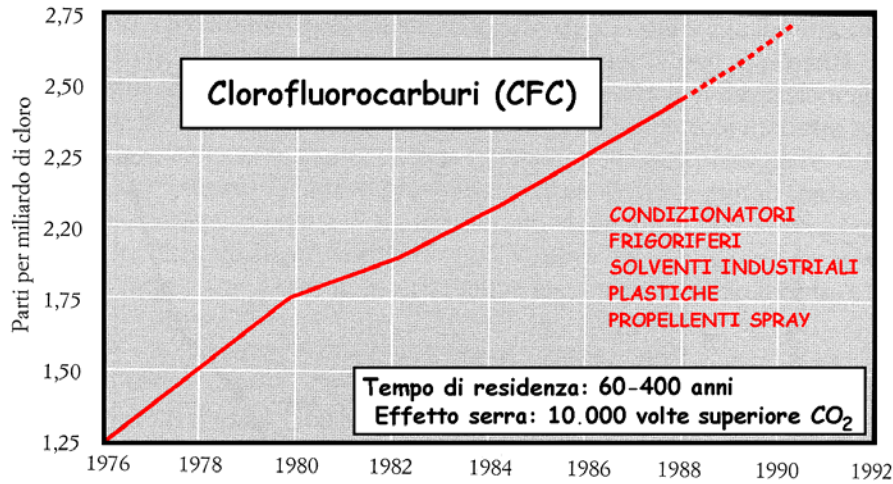


# CO<sub>2</sub> ed altri gas serra

- CH<sub>4</sub> = 1,7 ppm
- Ma è 25 volte più efficace della CO<sub>2</sub>



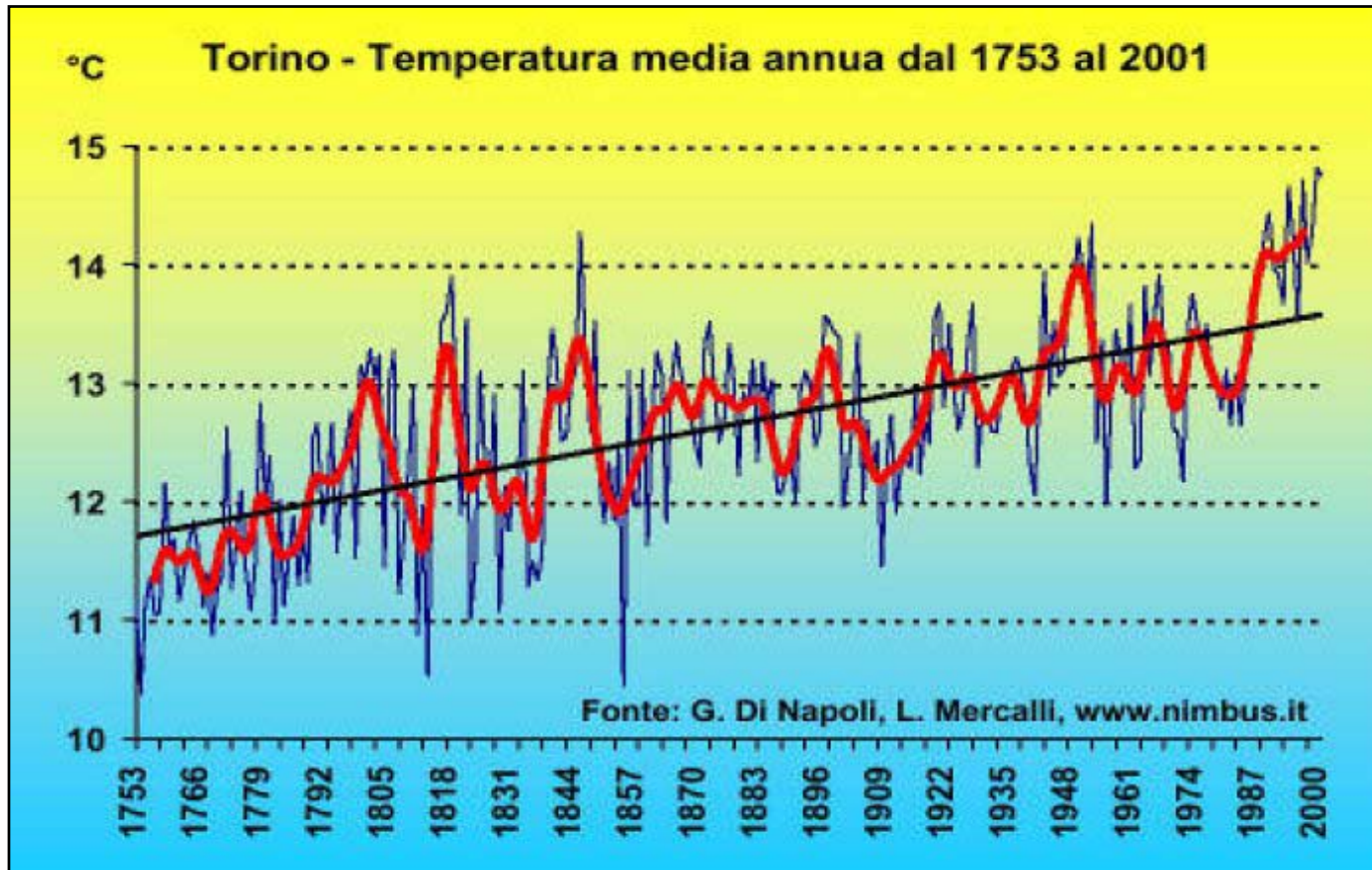
# GLI ALTRI GAS SERRA...





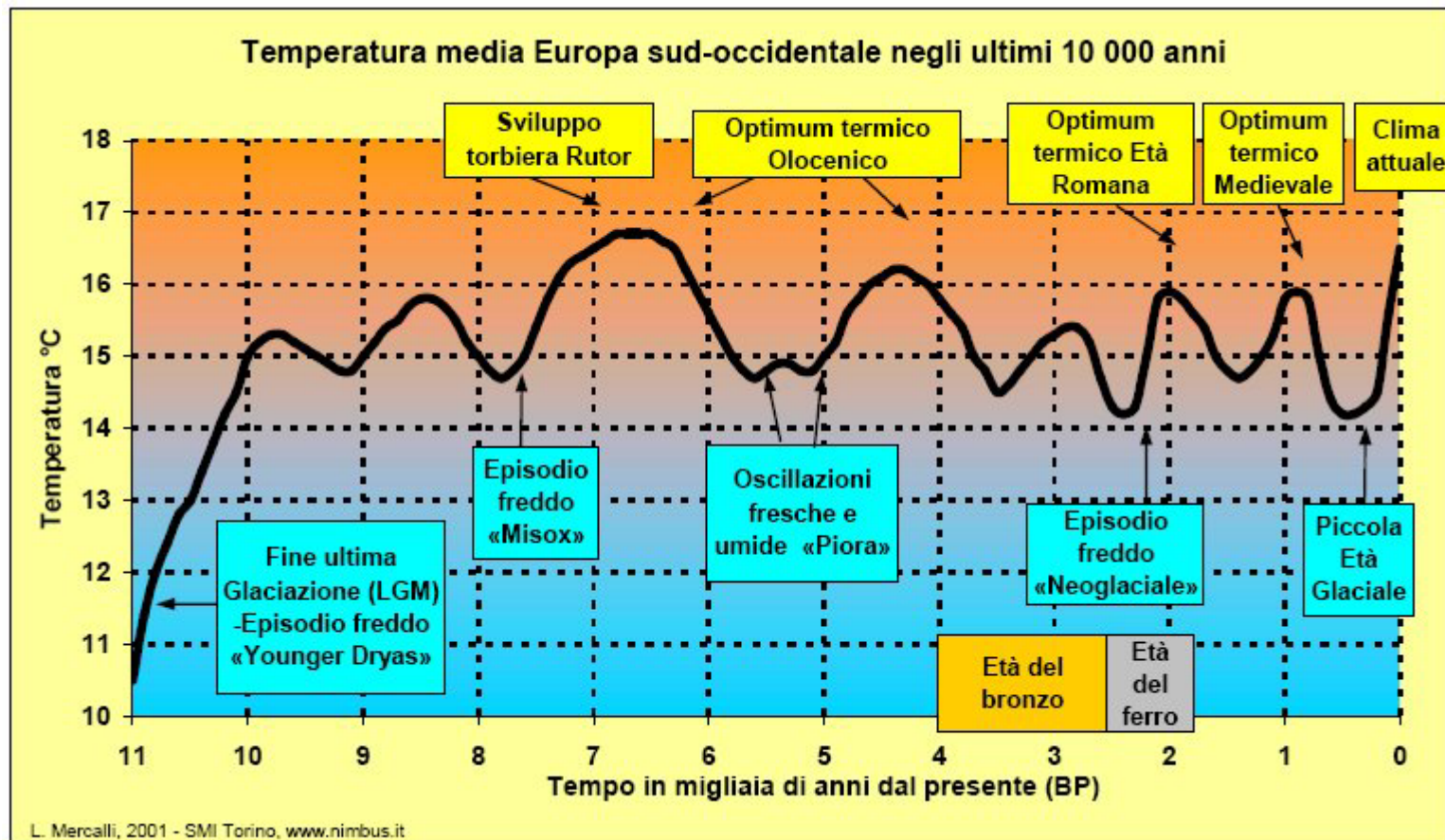
# L'AUMENTO DELL'EFFETTO SERRA: I DATI...

## GLI ULTIMI 250 ANNI A TORINO



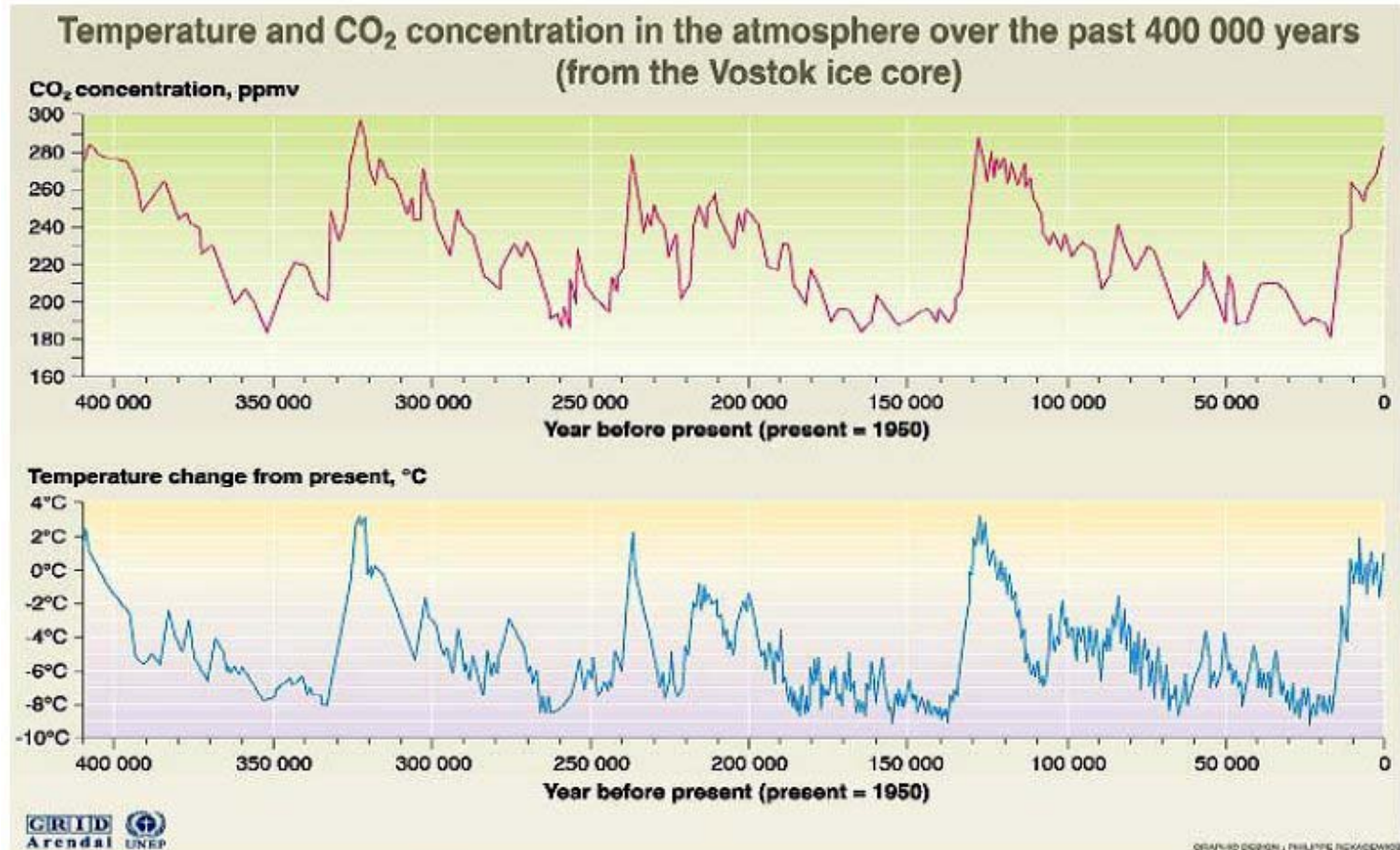
# L'AUMENTO DELL'EFFETTO SERRA: I DATI...

## GLI ULTIMI 11.000 ANNI



# L'AUMENTO DELL'EFFETTO SERRA: I DATI...

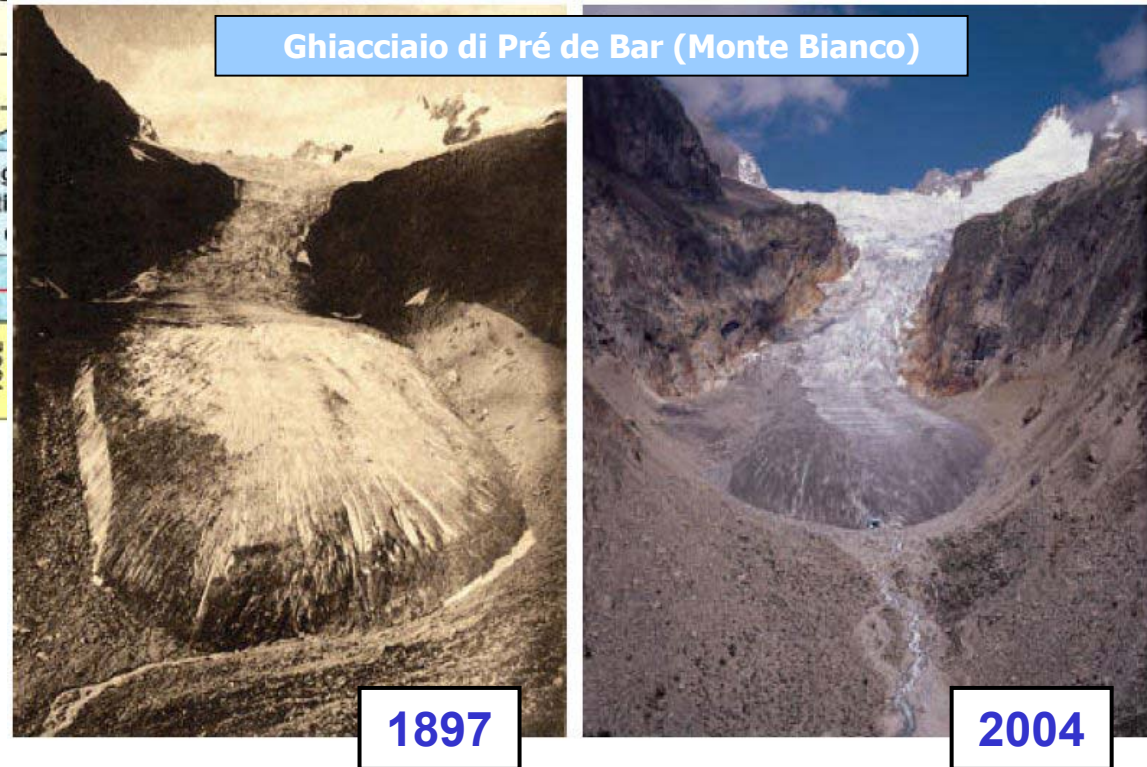
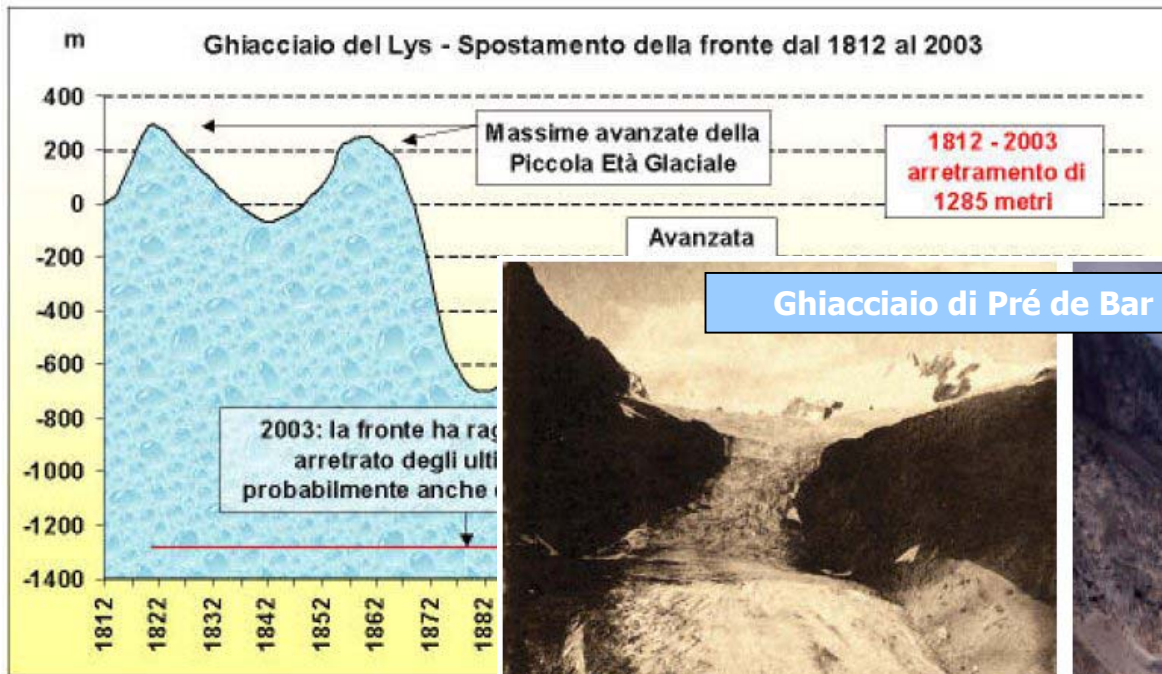
## GLI ULTIMI 420.000 ANNI



Source: J.R. Petit, J. Jouzel, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica, Nature 399 (3June), pp 429-436, 1998.



# L'ARRETRAMENTO GLACIALE



Arretramento di circa 500 m



# La variabile $t_n$

Si definisce “tempo di rinnovamento di una risorsa naturale” ( $t_n$ ) il rapporto tra il flusso in uscita e il flusso in entrata di un elemento (risorsa) nel sistema Gaia

Quando un elemento esce dal ciclo di Gaia, cambia il suo tempo di rinnovamento che diventa geologico.

La risorsa diventa così non rinnovabile sulla scala temporale storica

Su una scala temporale storica  $t_n$  è costante



# La variabile $t_u$

L'aumento della potenza provoca una diminuzione dei tempi umani ( $t_u$ )

$$t_u = \text{lavoro} / \text{potenza}$$

Sostenibilità si ha quando:

$$t_u > t_n$$

