

Evoluzione dell'idea di natura

La via verso Gaia



Luigi Cerruti
Lezione 4
25 gennaio 2011

La via verso Gaia

Linee principali della ricerca

Il contributo della termodinamica:

- La termodinamica dei sistemi in equilibrio
- La termodinamica dei sistemi lontani dall'equilibrio
- I sistemi viventi sono lontani dall'equilibrio

Gaia è un sistema lontano dall'equilibrio

- Gaia ha un metabolismo
- Gaia ha una fisiologia

Noi e Gaia

- Gaia è un essere vivente?
- Gli ecosistemi sono esseri viventi?
- Cos'è la vita?

La termodinamica dei sistemi in equilibrio

I sistemi termodinamici

- La classificazione dei sistemi termodinamici
 - Sistemi isolati
 - L'universo (forse)
 - Sistemi chiusi: scambio di energia, ma non di materia
 - La Terra, con buona approssimazione
 - Sistemi aperti: scambio di energia e di materia
 - Una locomotiva a vapore
 - Tutti gli esseri viventi
 - Un lago

La termodinamica dei sistemi in equilibrio

Il primo principio: la conservazione dell'energia

- In un sistema isolato la quantità totale di energia non cambia
- In un sistema chiuso solo gli scambi di energia con l'ambiente possono alterare la quantità totale di energia presente nel sistema
- Le forme di energia si possono trasformare l'una nell'altra
- Il lavoro si trasforma in energia e viceversa

La termodinamica dei sistemi in equilibrio

Il primo principio e il sistema Terra

- In un sistema chiuso solo gli scambi di energia con l'ambiente possono alterare la quantità totale di energia presente nel sistema:
 - Radiazione solare che raggiunge la Terra: 5.500.000 EJ (E=exa= 10^{18})
 - Fotosintesi globale: 2.000 EJ
 - Produzione mondiale di carburanti fossili: 300 EJ
- In termini di potenza:
 - Radiazione solare intercettata: 170 PW (P=peta= 10^{15})
 - Onde oceaniche generate dai venti: 90 PW
 - Combustione di carburanti fossili: 10 TW (T=tera= 10^{12})

La termodinamica dei sistemi in equilibrio

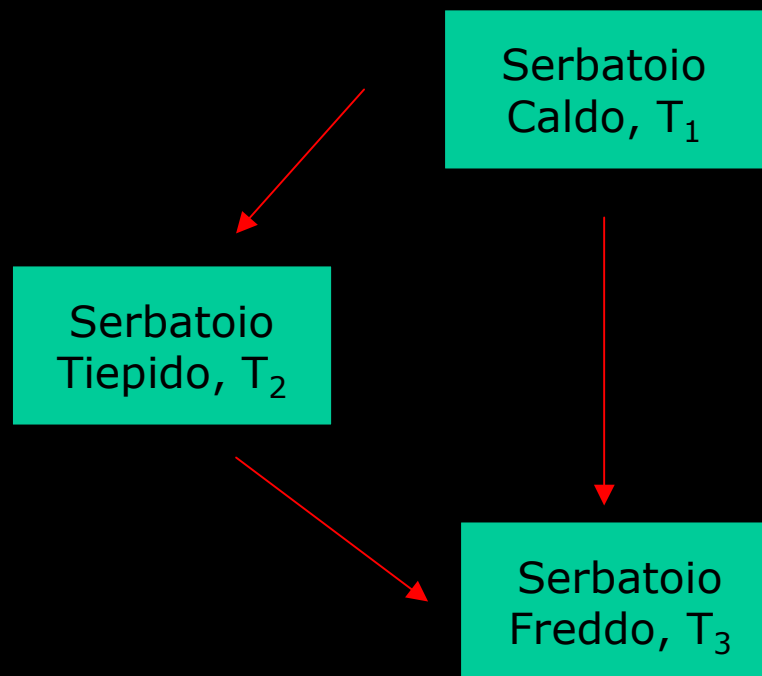
Il primo principio e il sistema Terra

- Un equilibrio cruciale: energia solare assorbita ed energia riemessa
 - Radiazione solare assorbita dalla Terra: 235 W/m^2
 - Radiazione riemessa dall'atmosfera: 195 W/m^2
 - Radiazione riemessa dal suolo: 40 W/m^2
- L'equilibrio energetico è un equilibrio quantitativo, non qualitativo

La termodinamica dei sistemi in equilibrio

Il secondo principio e la qualità del calore

- La stessa quantità di calore q può fornire una quantità diversa di lavoro a seconda della temperatura a cui inizia il trasferimento da un serbatoio all'altro



$$T_1 > T_2 > T_3$$
$$q/T_1 < q/T_2 < q/T_3$$

La variazione di entropia di un sistema che scambia calore con l'ambiente:

$$\Delta S = \Delta q/T$$

La termodinamica dei sistemi in equilibrio

Il secondo principio e il sistema Terra

- L'equilibrio energetico è un equilibrio quantitativo, non qualitativo
 - L'energia riemessa è in buona parte costituita da radiazioni 'degradate' dall'ultravioletto all'infrarosso
- La radiazione verso il suolo dai gas serra:
 - Acqua, in concentrazioni fluttuanti: 150-300 W/m²
 - CO₂: 75 W/m²

Termodinamica ed etica

- "La vita non deriva la totalità della sua energia o potenza fisica da qualcosa che sia contenuta nella materia vivente, e ancor meno da una divinità esterna, ma solamente dal mondo inanimato. Essa dipende per tutte le necessità della sua continuazione fisica dai principi della macchina a vapore. I principi e l'etica di tutte le convenzioni umane non possono andare oltre quelli della termodinamica" (F.Soddy, *Cartesian Economics*, 1922)

I processi irreversibili accoppiati



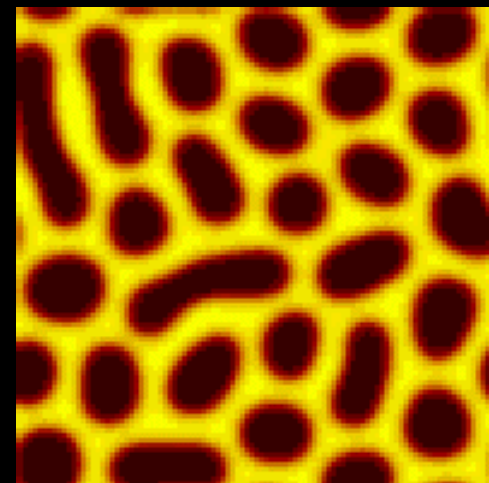
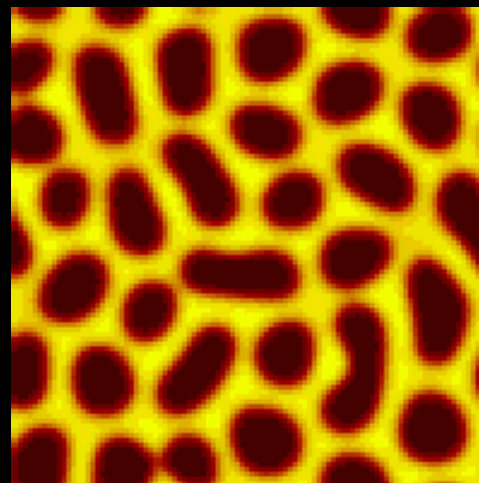
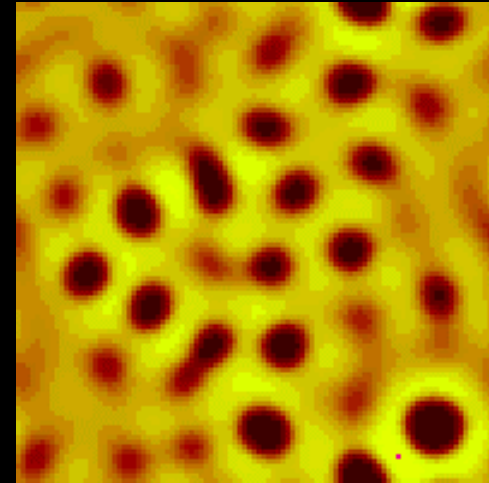
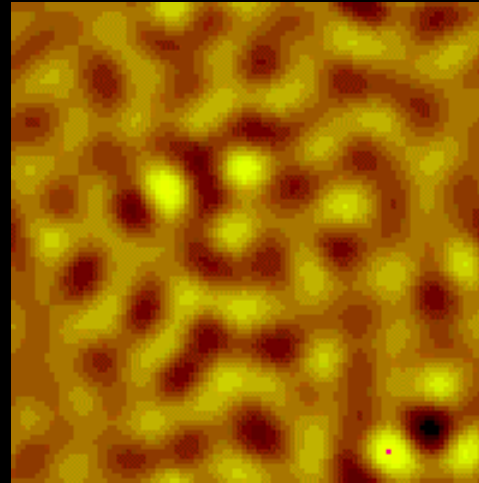
- Il contributo di Lars Onsager
- Le relazioni di reciprocità

$$L_{ij} = L_{ji}$$



Alan Turing
1912-1954

Reazioni autocatalitiche e diffusione





La Terra come sistema termodinamico

Alfred Lotka (1880-1949)

- "Troveremo parecchie ragioni perché dovremmo prendere in considerazione l'evoluzione come un tutto del sistema (organismo più ambiente). Può sembrare a prima vista che si avrebbe così un problema più complicato di quello che si avrebbe se si considerasse solo una parte del sistema. Ma risulterà chiaro che le leggi fisiche che governano l'evoluzione prendono con ogni probabilità una forma più semplice quando sono riferite al sistema come un tutto piuttosto che ad una sua qualsiasi parte" (1925)



James Lovelock

James Lovelock

- Giovane studente-lavoratore nel 1939
- Si guadagnò una borsa di studio a Manchester
- Dopo la laurea entrò nel National Institute for Medical Research, a Londra, dove inventò l' *Electron Capture Detector*, il cui primo esemplare fu costruito artigianalmente
- Usò materiali di recupero; tra questi materiali vi era una sorgente di radiazioni beta (stronzio 90)
- L'apparato fu impiegato in delicate analisi, fra cui quelle sui residui dei pesticidi
- Aprile 1961: contattato dalla NASA per entrare a far parte del progetto di esplorazione della Luna, in qualità di esperto di progettazione di strumenti di analisi chimico-fisica

James Lovelock

- Il primo passo decisivo verso Gaia fu compiuto con la collaborazione di Dian Hitchcock
- Applicò al nostro pianeta nuove congetture sul rapporto fra composizione atmosferica e presenza della vita.
- Lovelock e Hitchcock constatarono che l'atmosfera terrestre aveva una composizione molto lontana dall'equilibrio:
 - La presenza simultanea di metano e di ossigeno
 - Per uno stato stazionario il metano deve essere introdotto nell'atmosfera in quantità pari a 500 milioni di tonnellate all'anno
 - 1000 milioni di tonnellate di ossigeno devono 'rimpiazzare' ogni anno la pari quantità 'bruciata' con il metano
 - Era statisticamente impossibile che una simile imponente dinamica avesse un'origine esclusivamente abiotica

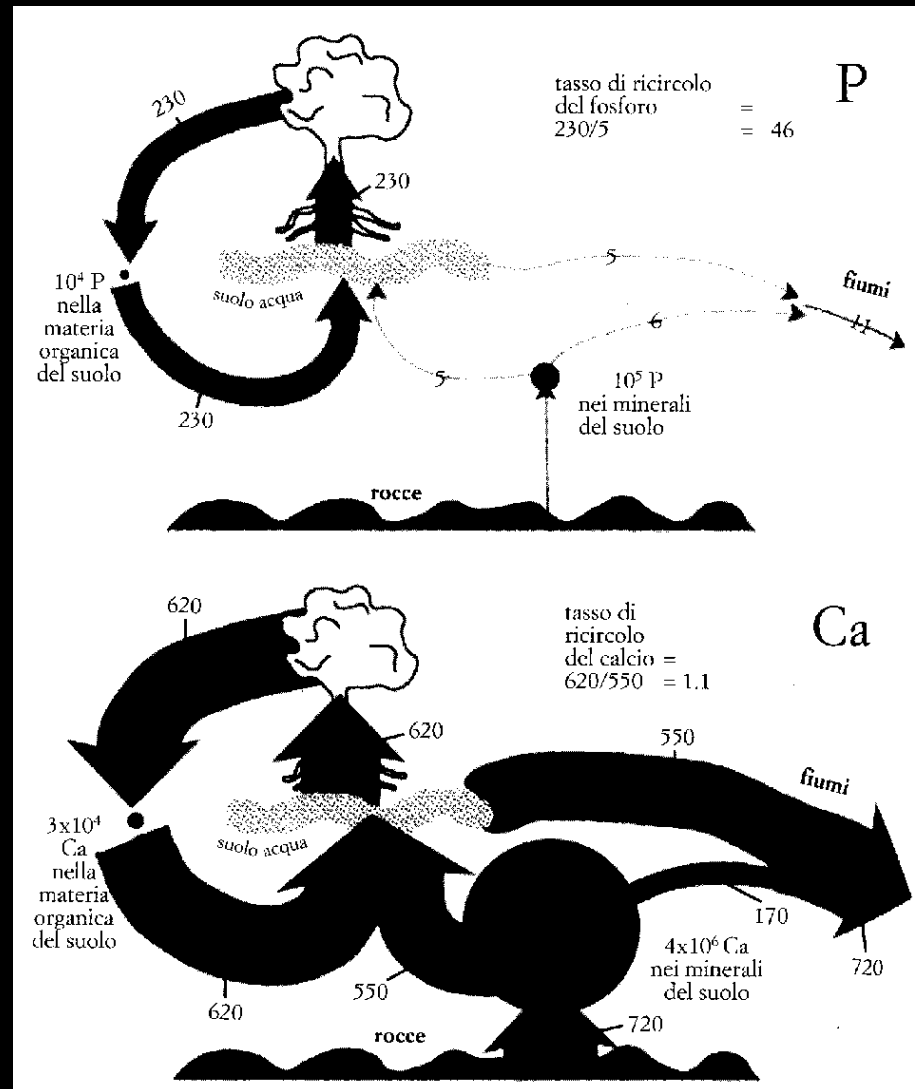
La definizione di Gaia

J.Lovelock, 1979

"Da allora [1968] abbiamo definito Gaia come una entità complessa che coinvolge la biosfera, l'atmosfera, gli oceani e il suolo della Terra; la totalità costituisce un sistema cibernetico o con retro-azione che cerca (*seeks*) un ambiente fisico e chimico ottimale per la vita su questo pianeta".

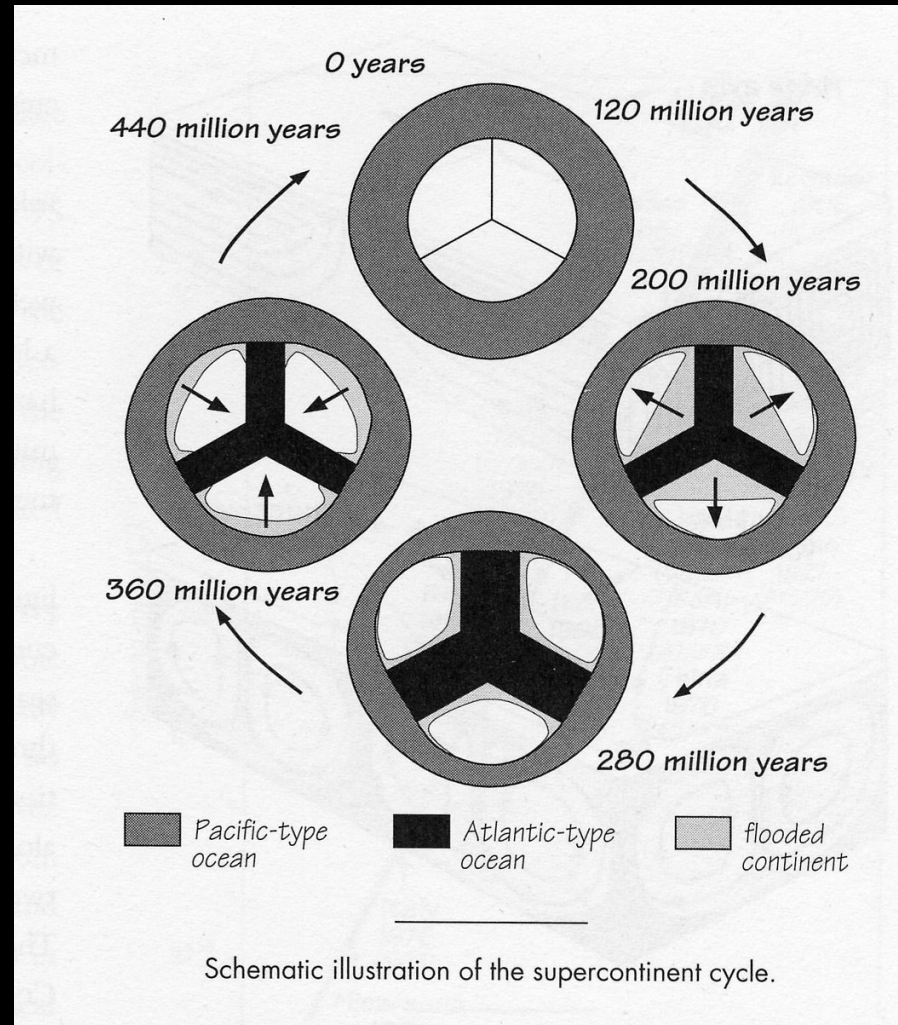
Il metabolismo di Gaia

Cicli del fosforo e del calcio



La fisiologia di Gaia

Cicli tettonici: i supercontinenti



La fisiologia di Gaia

Complessa e poco conosciuta

- (1) alla scala grandiosa dei fenomeni contribuiscono in modo fondamentale esseri viventi fra i più minuti della scala biologica
- (2) esiste un'intima e generale connessione funzionale fra le varie parti di Gaia, comunque esse siano scelte ed enumerate
- (3) a seconda dei fenomeni studiati, e dei modelli adottati, per indicare le parti di Gaia si può far riferimento a **biomi** (tundra, foresta tropicale, etc.), **livelli trofici** (produttori, erbivori, carnivori, detritivori), **gilde biochimiche** (organismi fotosintetici, respiratori, azotofissatori, denitrificanti), **cicli degli elementi** (carbonio, azoto, fosforo, etc.), **componenti primari** (aria, suolo, vita, oceano), **domini genetici** (*archaea*, *bacteria*, *eucaria*; questi ultimi suddivisi in protisti, funghi, piante, animali)
- (4) le nostre conoscenze sul 'sistema Terra' presentano ancora grandi margini di incertezza

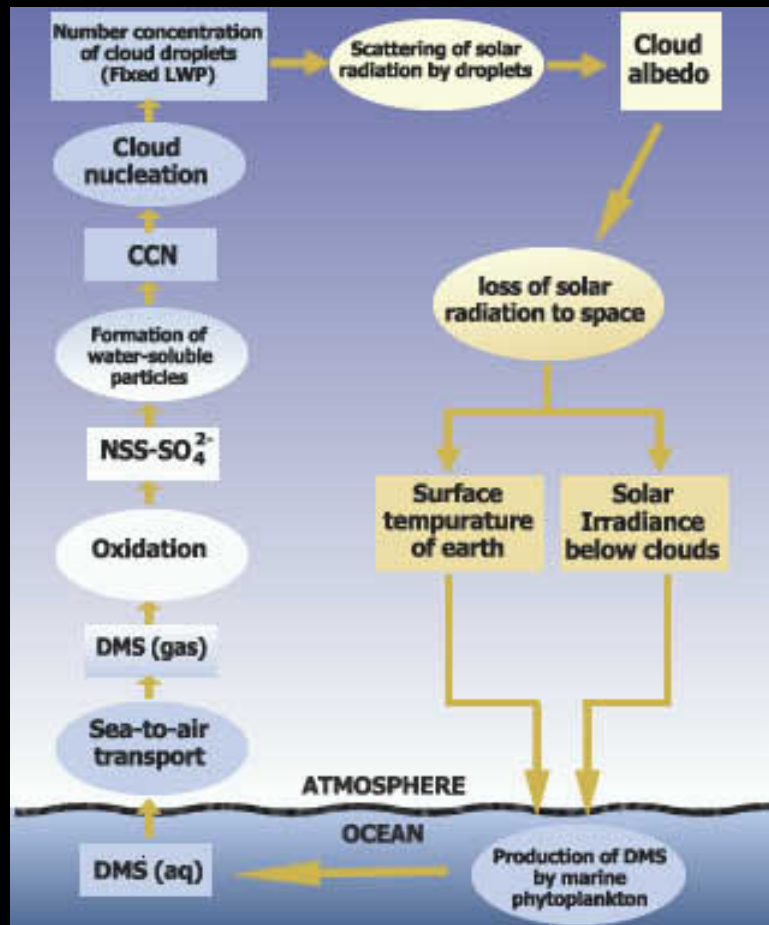
A tale of seas and clouds

- 1987, *Nature*: "Oceanic phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate: a **geophysiological feedback**".

Charlson was a chemist, working in the field of atmospheric chemistry; Lovelock was a chemist turned in a physical chemist; Andreae had studied earth sciences and was an oceanographer; Warren was a meteorologist, specialised in the study of cloud albedo.

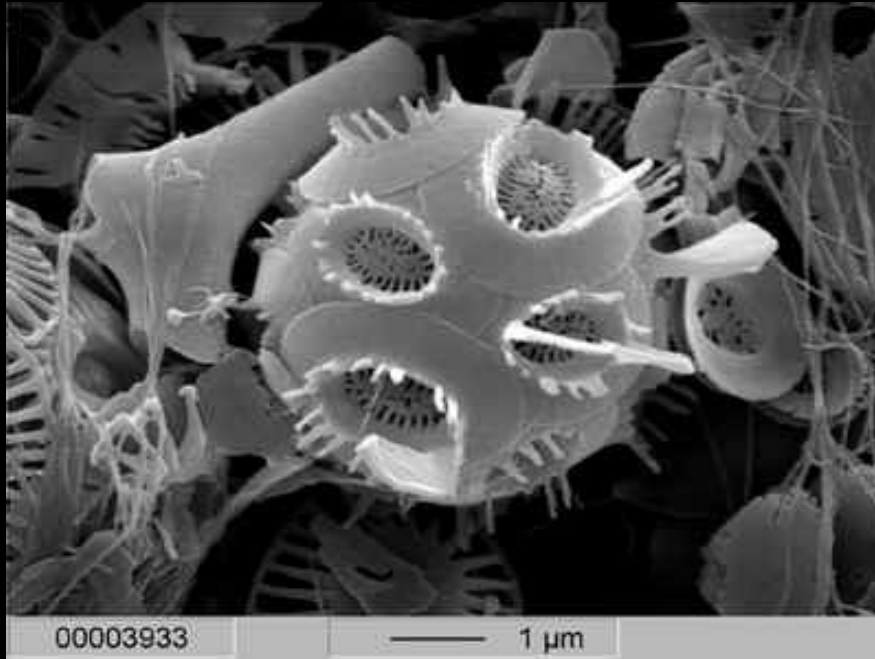
- The four authors proposed that phytoplankton in the oceans might be a precursor of tropospheric aerosols and cloud condensation nuclei, thereby affecting the Earth's radiative balance and possibly constituting a negative feedback to global warming.
- The names of the authors were Charlson, Lovelock, Andreae, and Warren, and in short time the hypothesis was dubbed '**the CLAW hypothesis**'.

DMS and the CLAW hypothesis



- In the decade following the initial description, the CLAW hypothesis was the subject of over 700 scientific papers describing the biogeochemistry of DMS, its precursors, and their connection to earth's climate

DMS and the CLAW hypothesis



A little maker of DMS.
Gephyrocapsa sp, one of many
species of coccolithophorids
living in the ocean

- **Biochemical researches** on the phytoplankton metabolism, and **physico-chemical researches** on the conversion of DMS to sulphate and methanesulphonic acid, must be complemented by difficult **analytical investigations** in and on oceans. The whole of chemistry is pertinent to confirm or disprove the CLAW hypothesis

La funzione del dimetilsolfuro

- Il DMS è un prodotto di rifiuto di molte specie di fitoplancton
- Il DMS raggiunge l'atmosfera, e viene ossidato a solfato, formando un aerosol in grado di addensare l'umidità dell'aria sotto forma di nuvole
- Le nuvole ricche dell'aerosol generato dal DMS sono particolarmente riflettenti, così da impedire ai raggi solari di raggiungere la superficie dell'oceano
- le specie di fitoplancton che producono DMS hanno un'importante funzione di raffreddamento del pianeta

Gaia, at last

- James Lovelock, a physical chemist, stated the Gaia hypothesis in 1972 in the journal *Atmospheric Environment* .
- In 1992 Lovelock affirms:
 - "The whole system of life and its material environment is self-regulating at a state comfortable for the organisms".
 - "From the start, Gaia has been a top-down systems view of the Earth, the hard science view of a physical chemist with an interest in control theory. This was never some trendy new age pseudo-science".

The big question: what is life?

- In 1944, Erwin Schrödinger published a booklet with the title *What is life?*
- In 1994, NASA adopted the Gerald Joyce's definition: "life is a self-sustained chemical system capable of undergoing Darwinian evolution"
- The essential points of the definition are three:
 - life is understood as the activity of a chemical system;
 - the system sustains itself without external intervention, i.e. the process is thermodynamically spontaneous;
 - the system not only self-replicates but reproduces itself with the possibility of errors and competes with other systems.

Convenzione sulla diversità biologica 1992

- "Per «diversità biologica» si intende la variabilità tra gli organismi viventi di ogni origine, compresi tra gli altri, gli ecosistemi terrestri, marini e gli altri ecosistemi acquatici, ed i complessi ecologici di cui fanno parte; ciò include la diversità nell'abito di ciascuna specie, e tra le specie degli ecosistemi".
- "Per «ecosistema» si intende un complesso dinamico formato da comunità vegetali, animali e micro-organismi e dal loro ambiente non vivente, che interagiscono come unità funzionale".

Another big question: is Gaia a living being?

- The Convention on Biological Diversity is a legally binding agreement proposed at the Earth Summit in Rio de Janeiro in 1992. By 2002, the Convention had been signed by 175 countries.
- The Convention defines biodiversity as "**the variability among living organisms** from all sources, including, *inter alia*, terrestrial, marine and other aquatic ecosystems and the ecological complexes of which they are part: **this includes diversity** within species, between species and **of ecosystems**".
- The German translation is particularly clear:
die Vielfalt der Ökosysteme

I componenti della diversità biologica

- "Gli ecosistemi e gli habitat: contenenti un'elevata densità, **un vasto numero di specie** endemiche o minacciate, o zone desertiche; frequentati da specie migratorie; **di importanza sociale, economica, culturale o scientifica**; o che sono rappresentativi, unici o associati a processi evolutivi di base o ad altri processi biologici"