

Forlì, Darwin Day –15 febbraio 2024

La teoria dell'evoluzione, dopo le scoperte sul DNA

Saverio Forestiero
Università di Roma Tor Vergata



Contro l'evoluzionismo: il fissismo

La visione scientifica dei viventi opposta all'evoluzionismo è il fissismo secondo cui le specie vegetali e animali sono destinate a rimanere sempre uguali a sé stesse.

L'idea della costanza delle specie nel tempo, già sostenuta dal grande Aristotele, venne, assai più tardi, difesa tra gli altri, da scienziati come Linneo (1707-1778), Cuvier (1769-1832), Owen (1804-1892).

Le teorie fissiste erano strettamente legate a una interpretazione letteralistica dei passi della Genesi sulla Creazione.

In taluni ambienti culturali negazionisti dell'evoluzione, ancora oggi il Creazionismo si salda con il Fissismo.

Il primo evoluzionista, J.-B. Lamarck (1744-1829)



Lamarck fu il primo a suggerire sulla base delle sue ricerche che l'uomo e le altre specie potessero essere il frutto dell'evoluzione piuttosto che di una creazione.

Inizialmente, come botanico, Lamarck era su posizioni fissiste, ma poi, studiando gli animali, riconosce molti casi di adattamento, ne fa esempi (quasi tutti presi dagli uccelli) e ne dà una spiegazione causale.

Nelle *Recherches* (1802) compaiono :

1. la nozione di tendenza del movimento organico a produrre più alti livelli di complessità del vivente;
2. la considerazione dell'uso e del disuso degli organi con vari esempi presi da uccelli e dalla giraffa;
3. l'ereditarietà dei caratteri acquisiti;

Le 4 leggi dell'evoluzionismo di Lamarck

Histoire naturelle (1815)

Per Lamarck, la biologia è una branca della fisica terrestre che studia la dinamica dei fluidi e le trasformazioni che essi operano sulla struttura del corpo che li contiene.

1. La vita per le sue forze intrinseche tende continuamente ad accrescere il volume di ogni vivente e ad aumentare le dimensioni delle sue parti fino a un termine prefissato.
2. In un organismo animale la produzione di un nuovo organo risulta dal sopravvenire di un nuovo bisogno insistente, nonché dai movimenti interni che questo bisogno suscita e mantiene.
3. Lo sviluppo e l'efficienza degli organi sono costantemente proporzionali all'impiego degli organi stessi.
4. Tutto quello che è stato acquisito o modificato nel corso della vita degli individui, viene conservato grazie alla riproduzione e trasmesso alla progenie da quelli che hanno subito quei mutamenti (acquisizioni o modificazioni).

La teoria di Darwin e Wallace

La *teoria darwiniana* dell'evoluzione è costituita da un sistema di ipotesi rese pubbliche per la prima volta il 1 luglio del 1858 in una comunicazione congiunta Darwin-Wallace alla *Società Linneana* di Londra e successivamente sviluppate ed esposte da Darwin in due opere principali:

L'origine delle specie (I ed., 1859; VI ed., 1872)

L'origine dell'Uomo (1871)

e trattate estesamente da A. R. Wallace nel volume:

Darwinism (1889)

L'evoluzionismo darwiniano si articola in cinque distinte sottoteorie relative a: evoluzione, discendenza comune, speciazione, gradualismo, selezione naturale

L'evoluzione darwiniana, 1859

L'originalità di Darwin si basa su 3 idee e su un lungo ragionamento:

- l'ipotesi che la variazione osservabile tra gli individui di una specie possa essere molto importante per la specie,
- che la variazione rilevante, però, dovesse essere solo quella trasmissibile ai discendenti,
- che l'ambiente favorisse solo alcuni individui rispetto ad altri.

Quali individui? Quelli che lasciavano più figli.
E perché lasciavano più figli? Proprio perché dovevano forse possedere quelle certe caratteristiche che li avvantaggiavano e non le altre caratteristiche (possedute invece dagli individui che lasciavano minore progenie) pur presenti come varianti alternative nella specie.



La teoria evolutivista di Darwin



Darwin 1.0

Dunque, l'argomentazione di Darwin si articola su tre elementi:

1. Rilevanza della **Variazione** (dei caratteri)
2. **Ereditarietà** dei Caratteri
3. **Selezione naturale**, in quanto risultato dell'interazione tra ambiente e organismi.

Questa *selezione naturale* è perciò una procedura automatica, impersonale, con cui sono favorite, mediante maggiore diffusione, alcune varianti rispetto ad altre; alcuni individui rispetto ad altri .

Detto altrimenti, le varianti più frequenti nella popolazione proprio perché più frequenti, lo sono perché più adattate rispetto alle altre varianti (non in assoluto e per sempre, ma relativamente a quel dato ambiente e a quella generazione).

A questo punto è chiaro a tutti che la *selezione naturale* si manifesta come il driver dell'evoluzione e la sola causa dell'adattamento.

Di conseguenza nel mondo dei viventi l'ordine, a tutte le scale, non è dovuto ad una Provvidenza, ma a un meccanismo naturale.

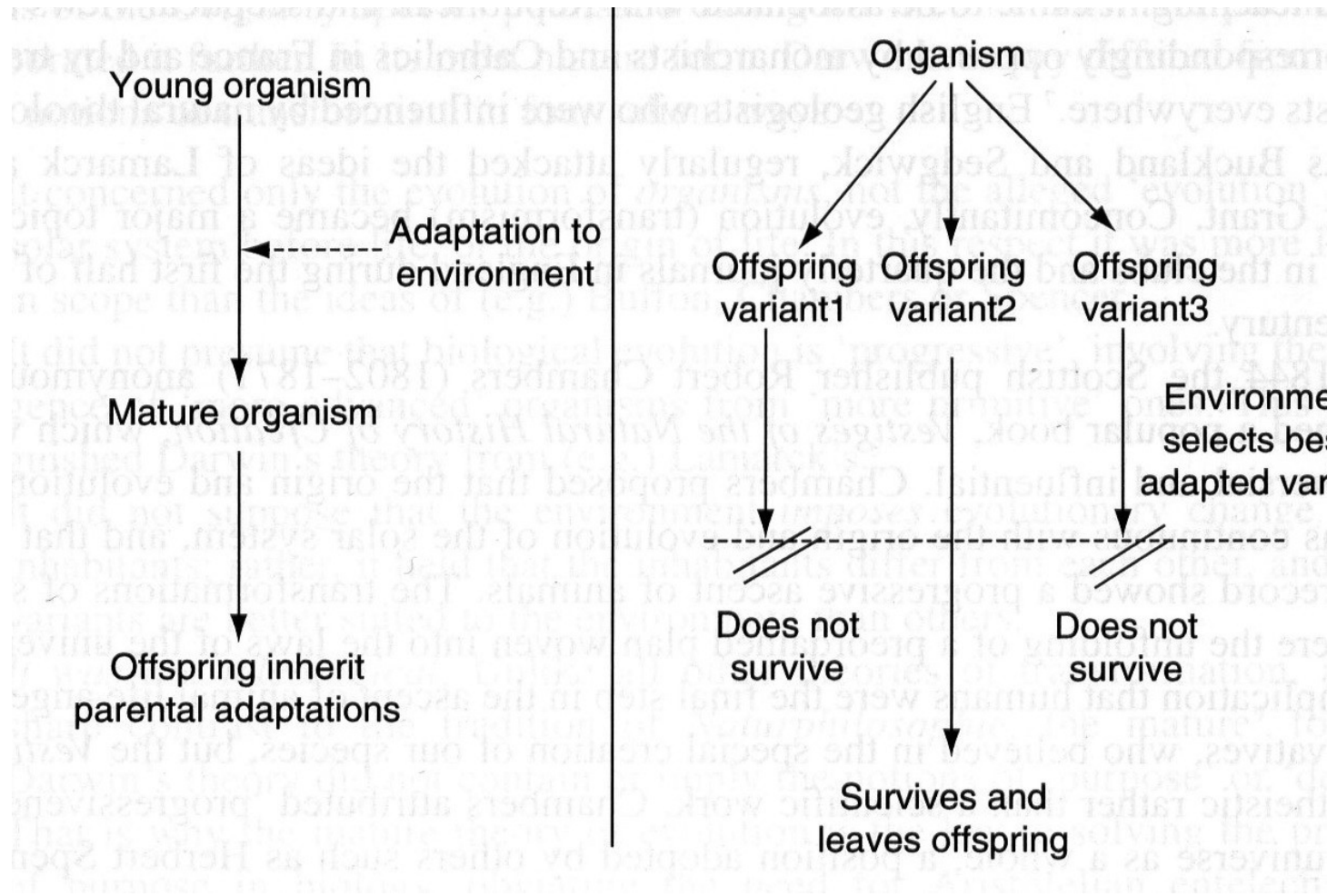
Il confronto tra due forme di evoluzione

lamarckiana

darwiniana

evolvono gli individui

evolve la popolazione



L'attuale teoria dell'evoluzione, conosciuta come **T**eoria **S**intetica dell'**E**voluzione non è la stessa di quella formulata da Darwin oltre 150 anni fa; è avvenuta una sorta di «evoluzione dell'evoluzione»

Teoria Sintetica dell'Evoluzione la fusione di Darwin con Mendel

Grosso modo tra il 1937 e il 1946, molti scienziati, tra cui spiccano sei figure principali:

T. Dobzhansky (1900-1975), *Genetics and the origin of the species* (1937)

E. Mayr (1904-2005), *Systematics and the origin of the species* (1942)

J. Huxley (1887-1975), *Evolution, the modern synthesis* (1942)

G. G. Simpson (1902-1984) *Tempo and mode in evolution* (1944)

B. Rensch (1900-1990) *Evolution above the species level* (1946)

G. L. Stebbins (1906-2000) con *Variation and evolution in plants* (1950)

articolano una serie di acquisizioni disciplinari regionali, di **genetica**, **biosistemica** e **paleontologia** in una teoria unitaria dell'evoluzione capace di spiegare un'enorme eterogenea quantità di osservazioni e di dati sperimentali fino a quel momento sprovvisti di una teoria unitaria.

Gli anni della TSE, la teoria sintetica dell'evoluzione

Nel 1947 viene fondata la rivista *Evolution* ; suo primo direttore è lo zoologo Ernst Mayr.

Con la fine della fase di elaborazione della Teoria sintetica nasce una nuova disciplina scientifica: la **Biologia evolutivista**.

Nel 1959, al simposio di Chicago di celebrazione del centenario dell'*Origine delle specie* partecipano praticamente tutti gli architetti della teoria sintetica.

I caratteri della TSE

La Teoria Sintetica dell'Evoluzione, o Sintesi moderna, consistette nella confluenza di una serie di acquisizioni disciplinari provenienti dalla genetica, dalla sistematica e dalla paleontologia in una teoria unitaria dell'evoluzione.

Tra i principali caratteri della TSE troviamo:

1. il **gradualismo evolutivo** sia nell'adattamento sia nella speciazione; ,
2. l'**idea che la variazione è organizzata in un "pool" genetico** di proprietà della popolazione,
3. la **convinzione** raggiunta per via sperimentale **che la selezione è uno dei principali fattori di evoluzione nonché l'unica causa dell'adattamento**

TSE - La Teoria Sintetica dell'Evolutione



Darwin 2.0

Architetti

W. Bateson
G.H. Hardy



C.E. Correns,
E. von Tschermak



J. B. Haldane
J.
Huxley



G. G. Simpson
Y. Philipchenko



della TSE

W. Weinberg, R. Punnett,

H. de Vries

T.H. Morgan
S.G. Wright
R.A. Fisher

T. Dobzhansky
E. Mayr
L. Stebbins

S. Chetverikov
J.J. Schmalhausen
N.W. Timoféeff

L'adattamentismo

A partire dagli anni Cinquanta la teoria sintetica si diffonde con grande rapidità anche al di fuori del mondo della ricerca.

Questo successo, sostenuto da una divulgazione schematica, produce però un effetto negativo che verrà chiamato **adattamentismo**: la posizione pregiudiziale secondo cui più o meno tutti i caratteri di un organismo costituiscono altrettanti adattamenti; e perciò vanno visti come prodotti della selezione.

Nell'**adattamentismo la selezione è ovunque e l'evoluzione è tutta darwiniana**.

In effetti, siamo di fronte a una distorsione, dato che la selezione naturale viene assunta a priori come spiegazione di qualunque prodotto o processo anche solo vagamente adattativo.

Ovviamente proprio questa ipersemplicizzazione retroagisce sulla popolarità della teoria favorendo ancora di più la diffusione di una teoria distorta.

L'arrivo del DNA

Quando nel 1953 J. D. Watson e F. Crick scoprirono la struttura chimica dell'acido desossiribonucleico, possiamo dire che nacque la biologia molecolare. Nel corso degli anni essa si intrecciò con la genetica e la biochimica, dando finalmente un quadro integrato che teneva insieme le conoscenze sull'eredità dei caratteri, il rapporto tra DNA e geni, la relazione tra DNA e la sua copia momentanea, l'RNA, la relazione tra RNA e proteine.

Venne compresa la relazione tra l'informazione genetica codificata nel DNA, la sua espressione, la relazione tra proteine e metabolismo cellulare.

L'unità comune a tutti, tutti i viventi, la cellula, è un sistema complesso la cui identità è determinata dall'informazione genetica contenuta al suo interno, mentre il mantenimento dell'organizzazione cellulare è garantita dall'incessante attività metabolica.

Nella cellula esiste una circolarità rappresentata dalla relazione tra geni e proteine.

Attraverso la riproduzione, i geni sono trasferibili alle generazioni successive, quindi si potrebbe dire che sono «immortali», essi sono la «memoria» della specie, mentre le proteine hanno vita limitata, sono continuamente coinvolte nelle reazioni biochimiche indispensabili nel mantenere il sistema cellulare in una condizione omeostatica

La vita cellulare sta proprio nel continuo dialogo tra geni e metabolismo/metabolismo e geni: una circolarità che dura da 3.850 Ma

Sviluppi successivi alla scoperta del DNA

A partire dagli anni '80 vennero sviluppate tecniche e metodiche del tutto nuove che permisero non solo l'analisi fine del materiale genetico, ma anche la sua manipolazione.

Il ricorso all'informatica consentì al contempo di trattare le gigantesche quantità di dati prodotti del tutto inservibili senza il ricorso ai computer.

Nacque l'ingegneria genetica, si riuscì con sempre meno costi e maggiore efficienza a sequenziare qualunque gene; la reazione a catena della polimerasi, PCR, consentì l'amplificazione di porzioni del DNA del genoma di qualsiasi organismo, consentendone l'identificazione per qualunque finalità (anche di natura forense).

Quando queste tecniche vennero intensamente impiegate per studiare le sorti del genoma durante lo sviluppo embrionale furono fatte scoperte inattese e decisive; idem accadde quando le tecniche vennero impiegate per esaminare gli effetti genomici dell'azione dell'ambiente sui fenotipi.

Nuovi dati dalla biologia molecolare avanzata, insieme al riesame di dati paleontologici, alla riconsiderazione di molte ipotesi scartate in passato, nonché lo sviluppo di inediti modelli matematici in settori (come l'etologia) non coinvolti nell'elaborazione della teoria TSE, segnarono l'esigenza urgente di un rimodellamento della TSE.

Innovazioni post-sintesi

- Esplosione faunistica cambriana
- Evenemenzialità ambientale
- Teoria degli equilibri punteggiati
- Evoluzione per cooperazione
- Comportamento altruistico
- Geni omeotici ed Evo-Devo
- Plasticità del fenotipo
- Eredità epigenetica

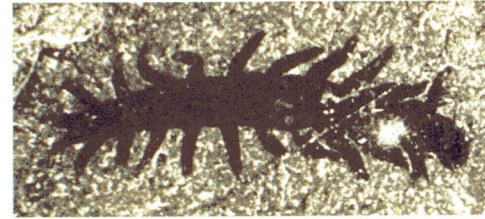
La fauna cambriana

Canada.

I fossili di animali delle argillosecisti di Burgess Shale dimostrano che nel Cambriano (510 Ma), quando ancora non erano comparsi gli antenati degli animali moderni, si verificò un'intensa attività evolutiva che diede origine a forme inspiegabilmente già molto complesse



a



b



c

L'evoluzione e il ruolo del caso sull'ambiente

Le estinzioni di massa

Le principali cinque estinzioni di massa (fine Ordoviciano 444 Ma, tardo Devoniano 360 Ma, fine Permiano 250 Ma, fine Triassico 201 Ma, fine Cretaceo-inizio Terziario) presentano caratteristiche che le distinguono dalla normale estinzione di fondo e vengono giudicate decisive occasioni di rinnovamento dell'insieme dei biomi terrestri. Il fenomeno delle estinzioni massive mette in primo piano il ruolo del caso nell'evoluzione attraverso l'ambiente e sottolinea i limiti della adattabilità delle specie.

L'evenemenzialità ambientale è praticamente imprevedibile.

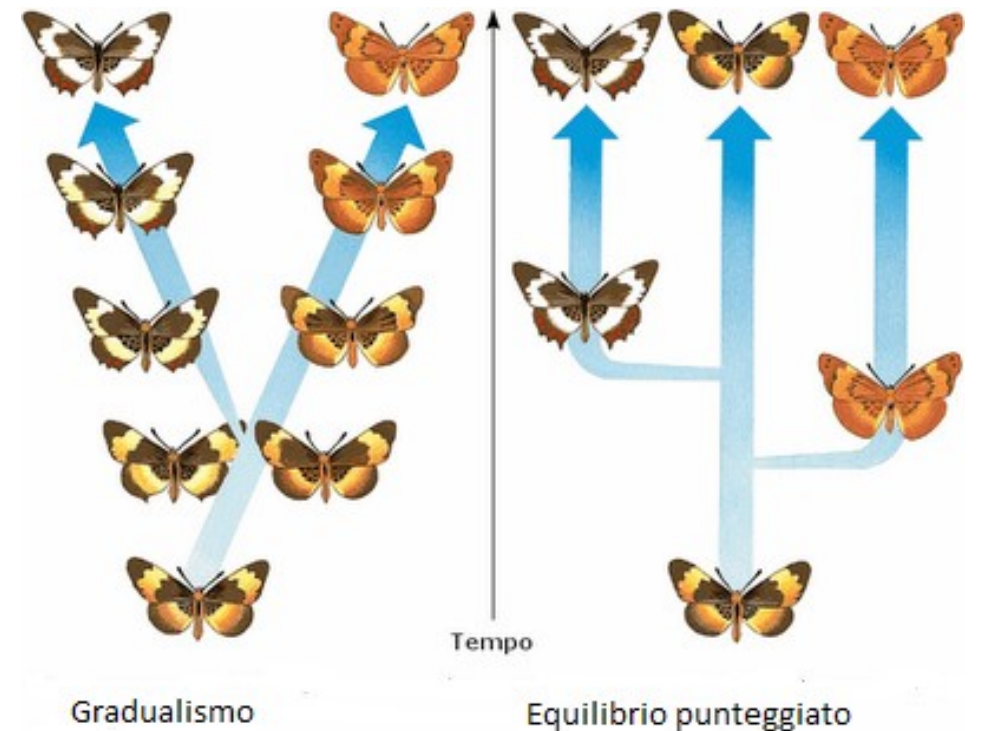
Le eruzioni vulcaniche, le glaciazioni, i mutamenti del livello dei mari, gli impatti di meteoriti, sono esempi di cambiamenti ambientali casuali

Teoria degli equilibri punteggiati *Evoluzione intermittente*

Avanzata nel 1972 dai paleontologi Niels Eldredge e Stephen Jay Gould (1942-2002), la teoria degli equilibri intermittenti sostiene che, contrariamente all'atteso della Teoria Sintetica, le specie fossili non mostrano variazioni temporali apprezzabili e i cambiamenti morfologici nella serie stratigrafica sono piccoli e non orientati.

L'idea è che una specie si mantenga stabile per molti milioni di anni per essere poi bruscamente sostituita da una nuova specie originatasi in coincidenza di brevi periodi di intensa speciazione.

Secondo questa teoria, l'evoluzione sarebbe caratterizzata soprattutto dalla speciazione piuttosto che dalle trasformazioni evolutive dovute all'adattamento.



La cooperazione nell'evoluzione

L'endosimbiosi all'origine degli Eucarioti

Proposta nel 1970 dalla microbiologa Lynn Margulis (1938-2011), sostiene che i principali organelli della cellula eucariotica (mitocondri e cloroplasti) non sono derivati autogenamente dall'invaginazione della membrana plasmatica, ma dall'associazione di antichi e primitivi piccoli procarioti (autotrofi gli antenati dei cloroplasti; eterotrofi gli antenati dei mitocondri) penetrati in una grande cellula procariotica tra 2 e 1,5 miliardi di anni fa, quando l'atmosfera si stava arricchendo in ossigeno.

La teoria valorizza il ruolo propulsivo della cooperazione simbiotica.

L'antenato dei mitocondri eterotrofi sarebbe stato avvantaggiato energeticamente dalla presenza del cloroplasto autotrofo; questo, a sua volta, essendo anaerobio avrebbe ricevuto enorme vantaggio dalla presenza di una "cellula" come il mitocondrio che è attivo consumatore di ossigeno indispensabile nel processo di produzione di energia.

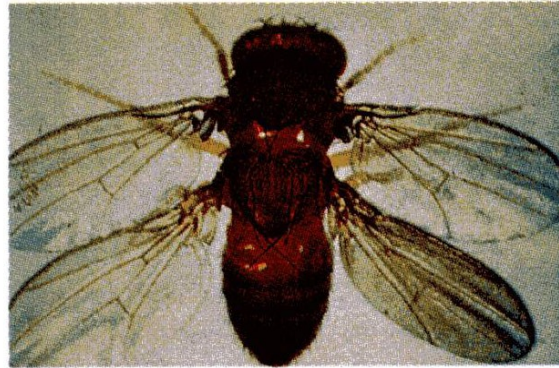
Origine del comportamento altruistico e della socialità

L'esistenza di numerosi tipi di atti altruistici e l'esistenza della sterilità di casta negli imenotteri sociali sono rimasti inspiegati fintantoché nel 1964 William Hamilton (1937-2000) non ne ha dimostrato l'ammissibilità teorica elaborando la *teoria della selezione di parentela* (*kin selection*) e la nozione di *fitness complessiva o globale* (*inclusive fitness*).

Il modello matematico di Hamilton dimostra che maggiore è il numero di geni condivisi tra donatore-altruista e beneficiario, maggiore è il premio biologico ottenuto dal donatore nell'essere altruista. Ammesso che sia capace di riconoscere la parentela, un altruista tende perciò ad aiutare i parenti più stretti più di quanto non faccia con quelli lontani.

I mutanti omeotici

Nel 1894 il genetista William Bateson (1861-1926) descrisse un'enorme ed eterogenea varietà di mutazioni negli insetti. Tra queste ve ne erano alcune assai bizzarre in cui strutture ripetute come zampe o ali si trasformavano in altre strutture simili ripetute. Chiamò il fenomeno *Omeosi* e i geni che erano mutati, *geni omeotici*. Bateson e gli altri genetisti si rendevano pienamente conto della rilevanza del fenomeno ma per identificare i geni, capire il potenziale biologico del fenomeno è servito un secolo di ricerca.



a



b

In alto il mutante *bithorax* di *Drosophila* con la trasformazione del segmento toracico T3 in una copia del segmento T2, come si vede per la presenza di due paia di ali al posto di un solo paio.

In basso il mutante *Antennapedia*, che sul capo al posto delle normali antenne possiede un paio di zampe.

Importanza dei geni omeotici

I geni omeotici, che vengono attivati solo durante lo sviluppo, sono preposti:

1. alla formazione e al controllo dell'identità dei "territori embriologici presuntivi"
2. alla formazione dei tipi cellulari
3. alla specificazione degli assi corporei

I geni Hox, un sottoinsieme di geni omeotici, sono geni regolatori di livello gerarchico molto elevato, preposti all'attivazione controllata di batterie di altri geni.

Sui cromosomi, questi geni si trovano associati su *loci* vicini e sono coinvolti nella organizzazione spaziale dell'embrione. La loro espressione specifica collettivamente l'identità delle regioni del corpo lungo l'asse antero-posteriore di tutti gli animali.

La loro scoperta ha permesso di disporre per la prima volta di un meccanismo esplicativo dei rapporti tra mutazione genetica e produzione di biodiversità tassonomica di rango elevato, superiore alle novità di livello microevolutivo.

Geni omeotici ed evoluzione

Per esempio, le differenze nell'espressione dei geni *Hox* spiegano sia la riduzione del secondo paio di ali nei ditteri come *Drosophila*, sia la presenza delle pseudozampe nei bruchi delle farfalle, ma anche la perdita degli arti dei serpenti.

Inoltre, l'esistenza dei geni omeotici e l'osservazione degli enormi effetti delle loro mutazioni sull'architettura corporea, rappresenta la prova che una mutazione anche di un solo gene *Hox*, implicando profonde alterazioni a cascata di centinaia di altri geni, può bastare per produrre un nuovo tipo di animale.

Geni omeotici ed Evo-Devo

I geni Hox hanno permesso di dimostrare un'omologia di espressione che determina la corrispondenze fra le regioni del corpo degli Insetti e quelle dei Vertebrati,

Inoltre, l'esistenza dei geni omeotici e l'osservazione degli enormi effetti delle loro mutazioni sull'architettura corporea, rappresenta la prova che una mutazione anche di un solo gene *Hox*, implicando profonde alterazioni a cascata di centinaia di altri geni, può bastare per produrre un nuovo tipo di animale.

Lo studio sui geni Hox hanno promosso la nascita della cosiddetta *biologia evolutiva dello sviluppo, evolutionary developmental biology: Evo-Devo*, e dimostrano la centralità dell'ontogenesi nei processi evolutivi. Inoltre, attraverso la futura prospettata integrazione tra genetica dello sviluppo e genetica di popolazione, promettono di fare luce sui rapporti tra micro e macroevoluzione.

Plasticità del fenotipo

Benché la conoscenza della capacità adattativa di larve ed embrioni all'ambiente fosse già note nell'Ottocento, solo da pochi decenni sono disponibili strumenti metodologici e tecnici per approfondire e chiarire la cosiddetta *funzione di mappa genotipo-fenotipo*.

Questo rapporto non è lineare (uno stesso genotipo può infatti produrre un ventaglio di possibili fenotipi in funzione delle interazioni gene-gene e gene-ambiente), e le ricerche iniziate negli anni Novanta stanno sottolineando l'enorme importanza evolutiva della *plasticità fenotipica*. Le indagini si servono di modelli animali ma soprattutto di piante.

L'interesse generale di queste ricerche risiede nella scoperta di come i segnali ambientali modificano i prodotti dello sviluppo.

Tutto ciò comporta un approccio nuovo, ibrido tra quello di laboratorio e quello naturalistico, con la descrizione meccanicistica che cerca l'integrazione con la descrizione delle relazioni ecologiche tra organismo in sviluppo e ambiente.

Eredità epigenetica

È la trasmissione di informazione non codificata nella sequenza nucleotidica, da un individuo alla sua progenie. Si manifesta attraverso la modulazione dell'espressione dei geni negli organismi multicellulari, innanzitutto durante lo sviluppo, attraverso l'interazione tra i geni, e l'interazione tra i geni e i loro prodotti (l'RNA e le proteine).

È accertato che non tutta l'informazione necessaria alla produzione del fenotipo risiede nel DNA. Per esempio, le differenze fenotipiche esistenti tra un'ape operaia e l'ape regina non sono genetiche (entrambe possiedono lo stesso genoma) ma sono del tutto epigenetiche e dipendono dalla dieta larvale.

Si stanno individuando i tipi di segnali esterni capaci di indurre un'attività epigenetica.

Un numero crescente di ricercatori è convinto che la chiave per capire l'evoluzione delle specie stia nello studio delle influenze dell'ambiente sui sistemi in sviluppo (gli embrioni, innanzitutto).

Le ricerche sull'eredità epigenetica e la plasticità fenotipica danno molto spazio al ruolo dell'ambiente nell'evoluzione ed entrambe, in prospettiva, questi studi sembrano convergere verso un'ecologia evolutiva dello sviluppo (*eco-evo-devo*) focalizzata sulla relazione tra informazione genetica e informazione ambientale

Esempio di eredità epigenetica: il polifenismo bifasico di *Schistocerca gregaria*

In risposta alle proprie esperienze di affollamento, le femmine di locusta alterano la traiettoria di sviluppo della progenie. La locusta madre possiede una memoria degli episodi di affollamento e di conseguenza sposta lo stato di fase della sua ovatura. La madre trasmette questa caratteristica fenotipica alla progenie mediante il feromone locustolo secreto nella schiuma che protegge i gruppi di uova deposte.

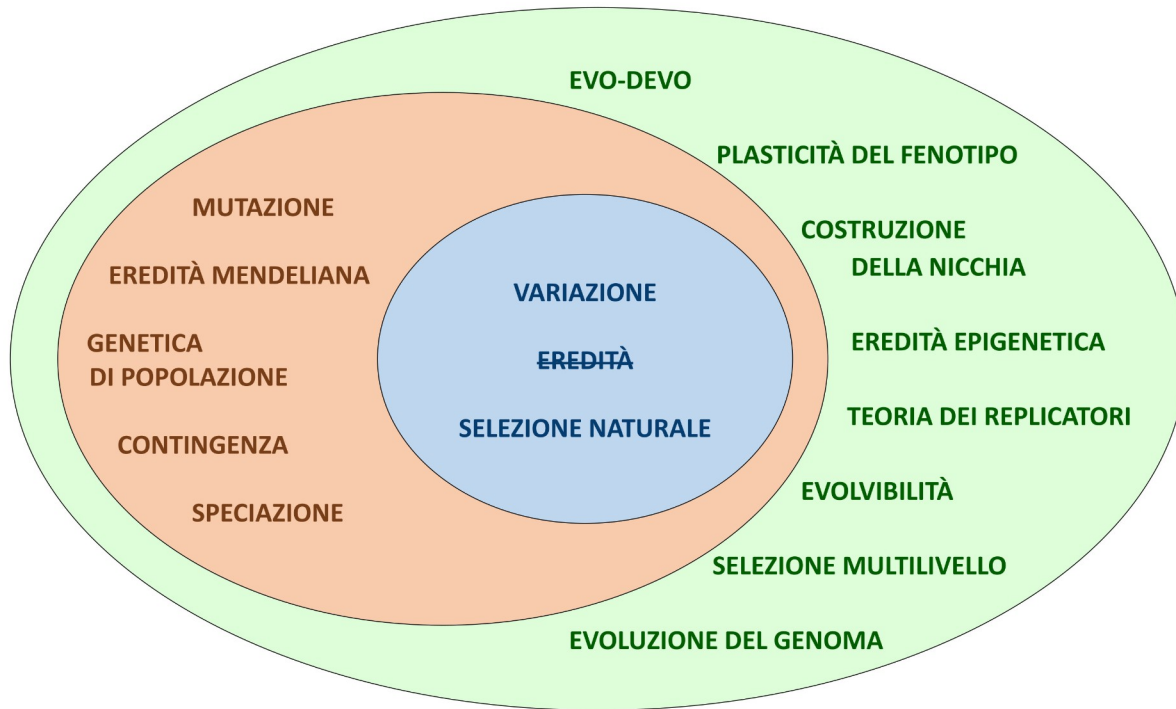
Solitary



Gregarious



Verso una teoria di fase tre: Darwin 3.0



- La complessità dei sistemi biologici è innanzitutto storica.
- La complessità maggiore appartiene al fenotipo.
- Nei viventi trasformazione (sviluppo) e variazione (evoluzione del genoma) sono integrate.
- Il ruolo dell'individuo è centrale nell'evoluzione.
- L'informazione per l'evoluzione non è concentrata nei geni ma è distribuita in più sorgenti.
- L'ordine biologico è in parte dovuto a selezione, in parte ad autorganizzazione della materia.

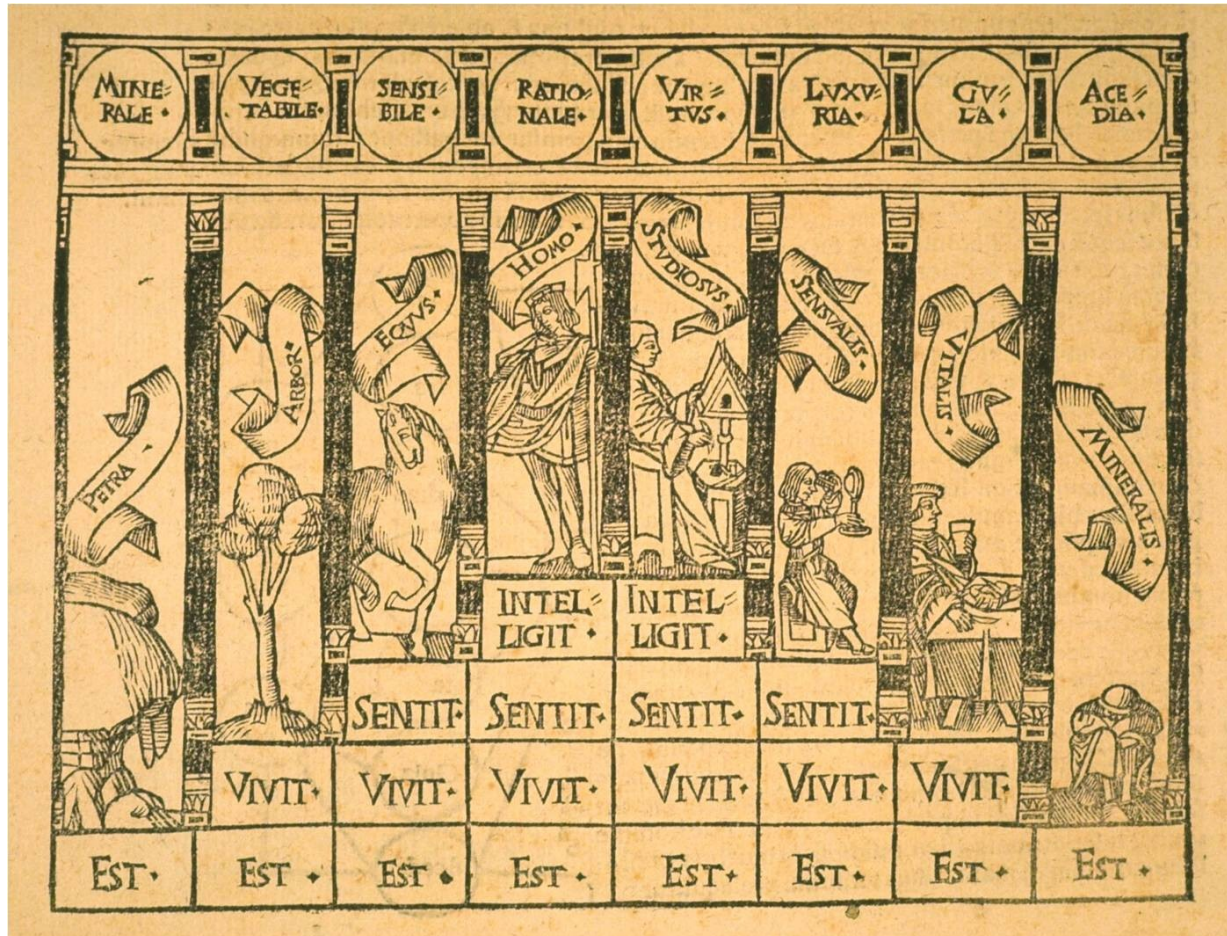
Appendici

Lo studio dell'evoluzione biologica

Rappresentazione pittorica dei rapporti tra le discipline coinvolte
nelle ricerche sull'evoluzione



La scala di Bovillo (1509)

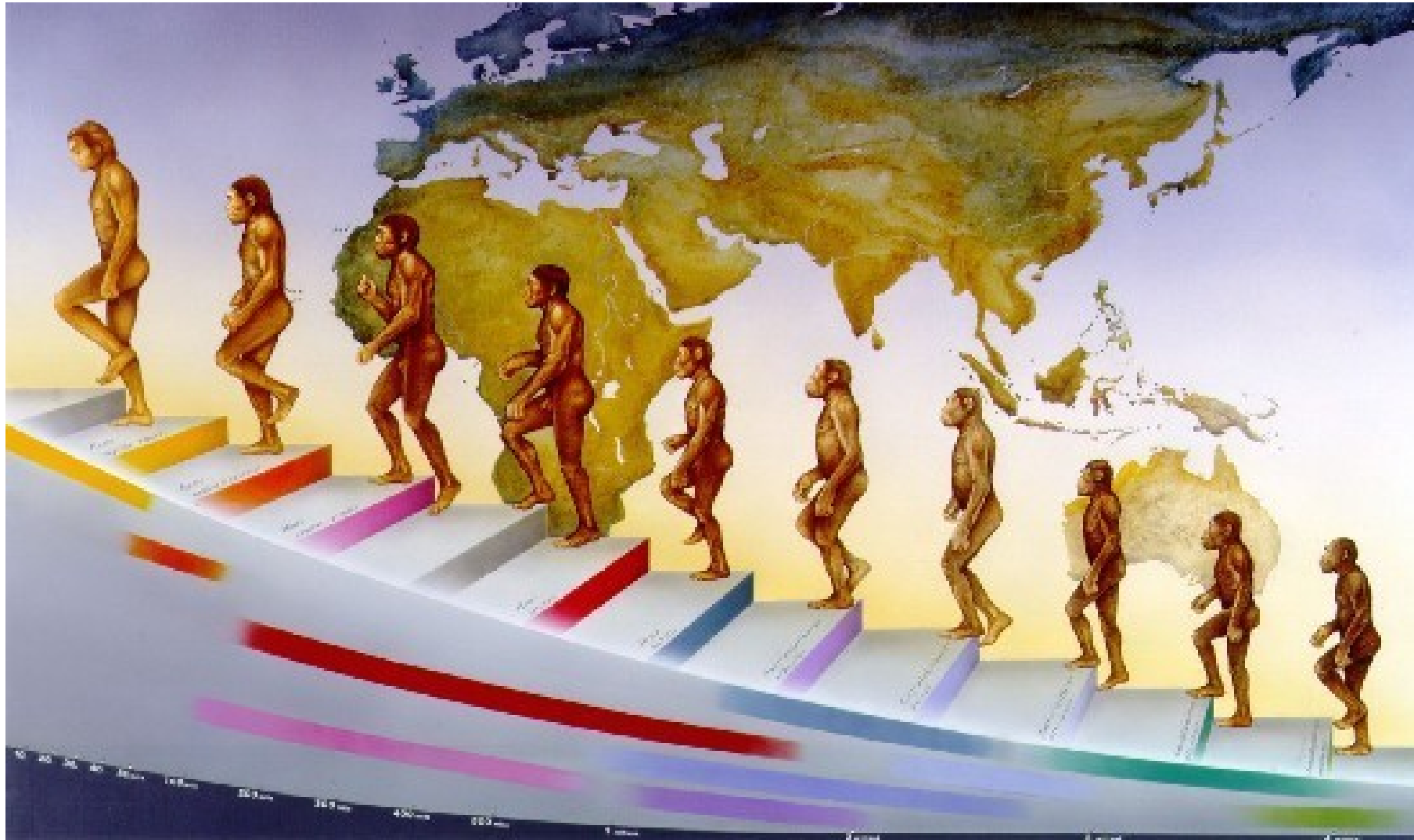


La scala fisica che termina con l'uomo.

I quattro gradini individuano proprietà che vanno sovrapponendosi.

(*Liber de sapiente*, 1509, Charles de Bovelles, 1479-1567)

Ominazione, e la scala resiste!



Una scoperta dell'approccio genomico

Modi di produzione della psilocibina nei funghi psichedelici



La genomica ha dimostrato che non c'è un solo modo con cui gli *Psilocybe* producono l'allucinogeno psilocibina

Gli *Psilocybe* oltre a causare esperienze mistiche, erano strettamente associati ai riti sciamanici delle popolazioni dell'America latina e in anni recenti vengono impiegati con successo in alcune patologie psichiatriche. Secondo un ampio studio genomico, questi funghi psichedelici sono comparsi circa 67 milioni di anni fa, più di 65 milioni di anni prima della comparsa dell'Uomo. Recentemente (PNAS, 2024) gli scienziati hanno scoperto che delle oltre 50 specie del genere *Psilocybe*, 35 specie possiedono una nuova disposizione genetica che codifica per la psilocibina, l'allucinogeno che conferisce ai funghi *Psilocybe* la loro azione psichedelica.

Studi precedenti avevano identificato soltanto un unico, diverso percorso genetico per produrre la psilocibina (precursore della *psilocina*, la molecola con valore terapeutico), mentre le nuove scoperte aprono alla possibilità di altri modi per creare l'allucinogeno.

Le persone utilizzano sempre più certi funghi psichedelici per aiutare a gestire i sintomi della depressione e del disturbo da stress post-traumatico, e le aziende farmaceutiche e biotecnologiche pianificano lo sfruttamento di questi nuovi percorsi per la produzione di psilocibina.