

Web-Page for further information:

<http://www.tbi.univie.ac.at/~pks>

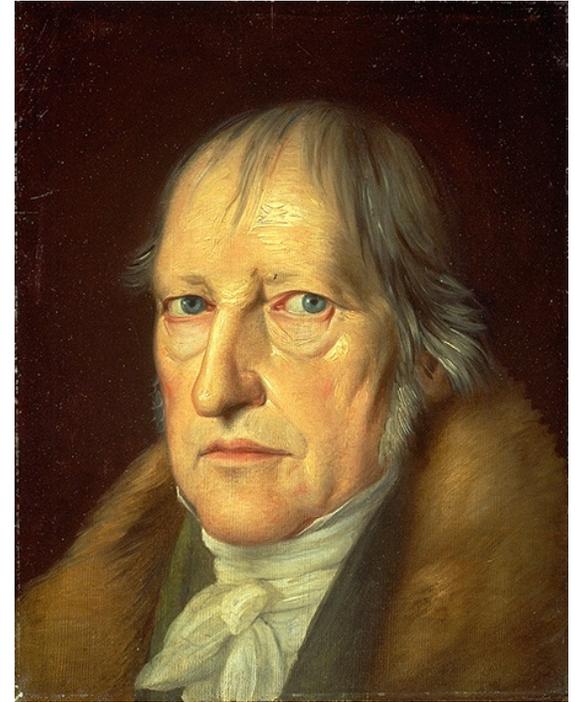
1. Anfänge der Vorstellung einer veränderlichen Natur
2. Das Jahrhundert der klassischen Evolutionstheorie
3. Selbstorganisation und Evolutionsexperimente
4. Molekularbiologie und Evolution
5. Schlussbemerkungen

1. **Anfänge der Vorstellung einer veränderlichen Natur**
2. Das Jahrhundert der klassischen Evolutionstheorie
3. Selbstorganisation und Evolutionsexperimente
4. Molekularbiologie und Evolution
5. Schlussbemerkungen

Georg Friedrich Wilhelm Hegel, 1830:

Enzyklopädie der philosophische Wissenschaften, § 249

„... Es ist eine ungeschickte Vorstellung älterer, auch neuerer Naturphilosophie gewesen, die Fortbildung und *den Übergang einer Naturform* und Sphäre *in eine höhere für eine äußerlich-wirkliche Produktion anzusehen*, die man jedoch, um sie *deutlicher* zu machen, in das *Dunkel* der Vergangenheit zurückgelegt hat. Der Natur ist gerade die Äußerlichkeit eigentümlich, die Unterschiede auseinanderfallen und sie als gleichgültige Existenzen auftreten zu lassen; der dialektische Begriff, der die *Stufen* fortleitet, ist das Innere derselben. *Solcher nebuloser, im Grunde sinnlicher Vorstellungen, wie insbesondere das Hervorgehen z.B. der Pflanzen und Tiere aus dem Wasser und dann das Hervorgehen der entwickelten Tierorganisationen aus den niedrigeren usw. ist, muss sich die denkende Betrachtung entschlagen. ...“*



Georg Friedrich Wilhelm Hegel

Thomas Robert Malthus, 1798: *Essay on the Principle of Population*.



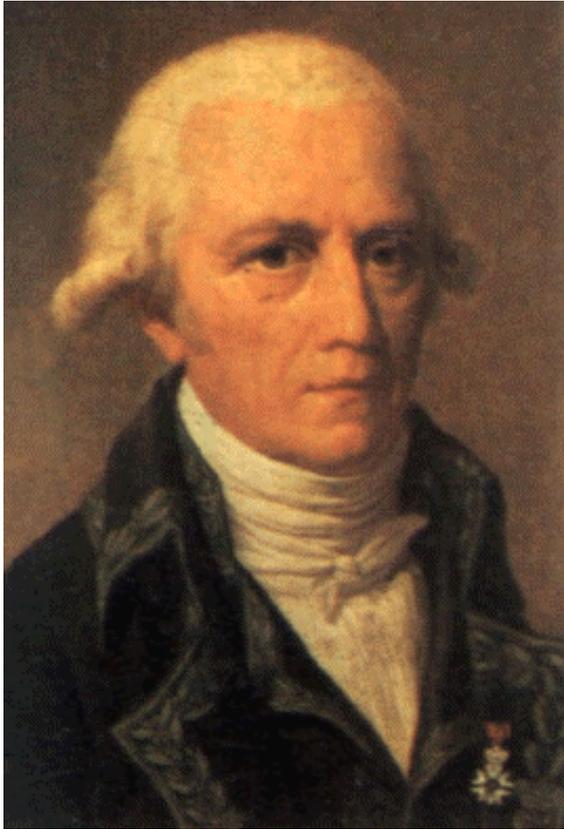
Thomas Robert Malthus

Erasmus Darwin, 1796: *Zoonomia, or, The Laws of Organic Life.*



Erasmus Darwin

Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet, Chevalier de Lamarck, 1809:
Philosophie Zoologique

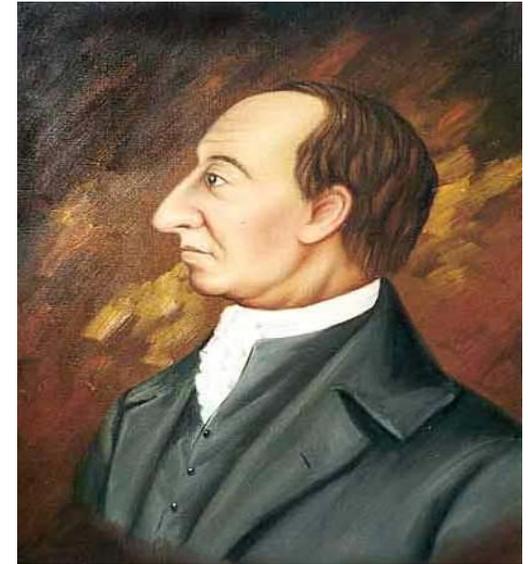


Da sich jede Art ... in Harmonie mit ihrer Umgebung befinden muss und da sich diese Umgebung ständig ändert, muss eine Art, wenn sie in Ausgewogenheit mit ihrer Umgebung bleiben will, gleichfalls einen stetigen Wandel durchmachen. Täte sie das nicht, geriete sie in Gefahr auszusterben.

Jean-Baptiste de Lamarck

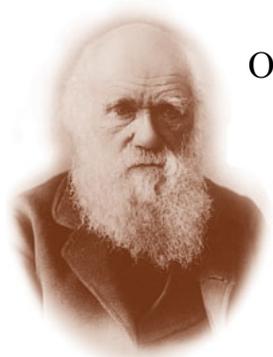
James Hutton (1794), *Investigations of the Principles of Knowledge*, Vol.2.

"... Wenn ein Körper nicht an die Umstände seiner Lebenserhaltung und Vermehrung angepasst ist, dann werden - unter Berücksichtigung der **unbegrenzten Variationen** von Individuen dieser Art - jene, die am meisten von der **bestangepassten Konstitution abweichen**, am **wahrscheinlichsten zugrunde gehen**. Und jene, welche die **beste Konstitution aufweisen**, werden **weiter bestehen** und die Individuen ihrer Rasse vermehren. ..."



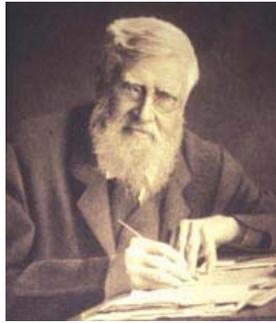
James Hutton

1. Anfänge der Vorstellung einer veränderlichen Natur
2. **Das Jahrhundert der klassischen Evolutionstheorie**
3. Selbstorganisation und Evolutionsexperimente
4. Molekularbiologie und Evolution
5. Schlussbemerkungen



Charles Darwin

Origin of evolutionary biology
1859



Alfred Russel Wallace



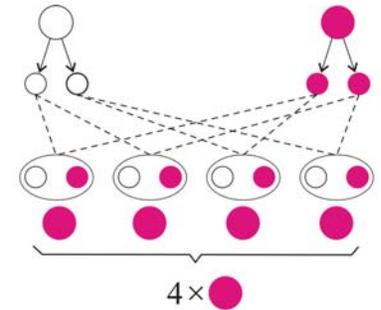
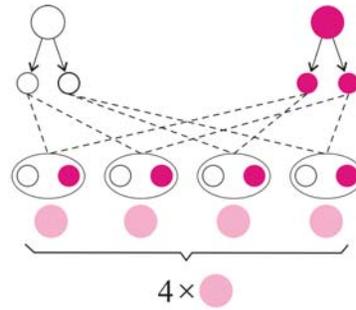
Die drei notwendige Bedingungen für das Eintreten Darwinscher Evolution und Optimierung lauten:

1. Vermehrung und Vererbung,
2. Variation, and
3. Selektion.

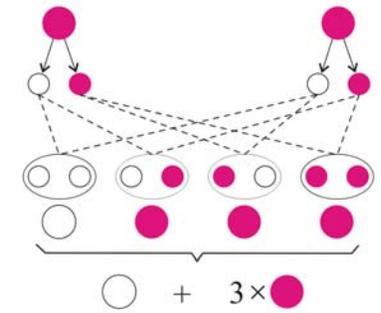
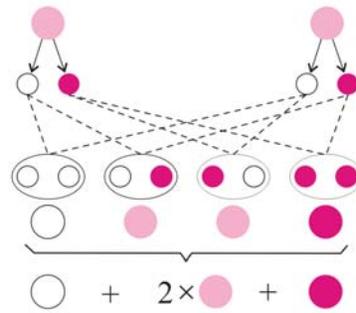
Vermehrung mit Vererbung oder Reproduktion ist der Grundprozess der belebten Natur, den alle Arten von Organismen von den Viren und Bakterien bis zum Menschen miteinander gemeinsam haben.

Variation entsteht durch Mutation und Rekombination und ist eine unvermeidbare Konsequenz der biologischen Reproduktion.

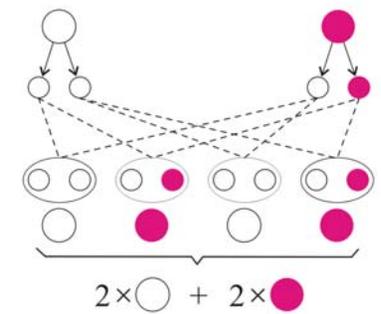
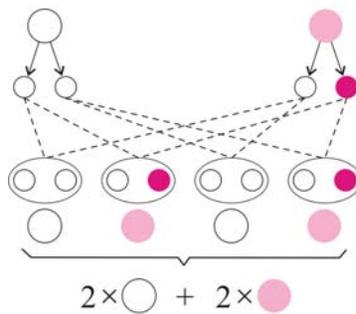
Selektion ist eine Konsequenz der endlichen Ressourcen auf dieser Welt und des exponentiellen Anwachsens der Bevölkerung durch Vermehrung.



F1



F2

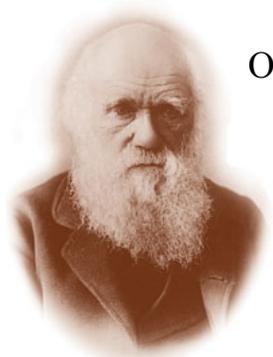


F1 × F2

Die Mendelschen Gesetze der Vererbung

Intermediäres Allelpaar

Dominant/rezessives Allelpaar



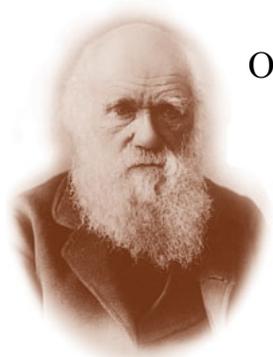
Origin of evolutionary biology
1859

Charles Darwin

Origin of genetics
1865



Gregor Mendel



Charles Darwin

Origin of evolutionary biology

1859



Origin of genetics

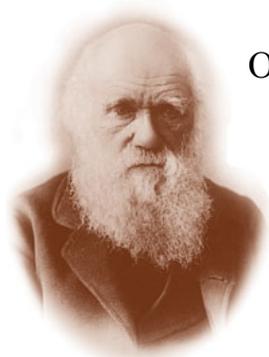
1865



Gregor Mendel

'Rediscovery' 1900





Charles Darwin

Origin of evolutionary biology

1859



Origin of genetics

1865



Gregor Mendel

'Rediscovery' 1900



First unification: Population genetics 1930



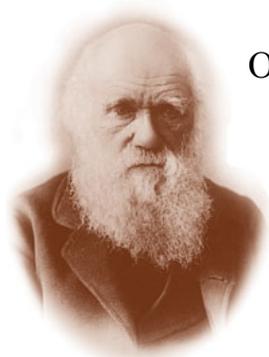
Ronald Fisher



JSB Haldane



Sewall Wright



Charles Darwin

Origin of evolutionary biology

1859



Origin of genetics

1865



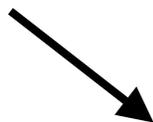
Gregor Mendel

'Rediscovery' 1900

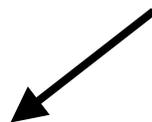


First unification: Population genetics 1930

Ernst Mayr



Theodosius Dobzhansky



Synthetic or Neo-Darwinian theory
1940 - 1950



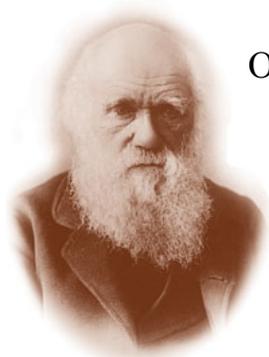
Ernst Mayr und andere Evolutionsbiologen:

Können die Beobachtungen in der Biologie ohne die Annahme einer **Causa finalis** erklärt werden?

Die Antwort der Evolutionsbiologen ist "**Ja**": Adaptation durch Variation und Selektion führt zum gleichen Resultat wie das rationale Design.

"Teleonomie ersetzt Teleologie"

In der evolutionären Biotechnologie war es möglich diese Behauptung an Hand von Molekülen zu verifizieren. An Hand von molekularen Systemen kann man rationales Design und evolutionäre Optimierung vergleichen.



Charles Darwin

Origin of evolutionary biology

1859



Origin of genetics

1865



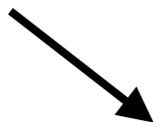
Gregor Mendel

'Rediscovery' 1900

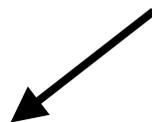


First unification: Population genetics 1930

Ernst Mayr

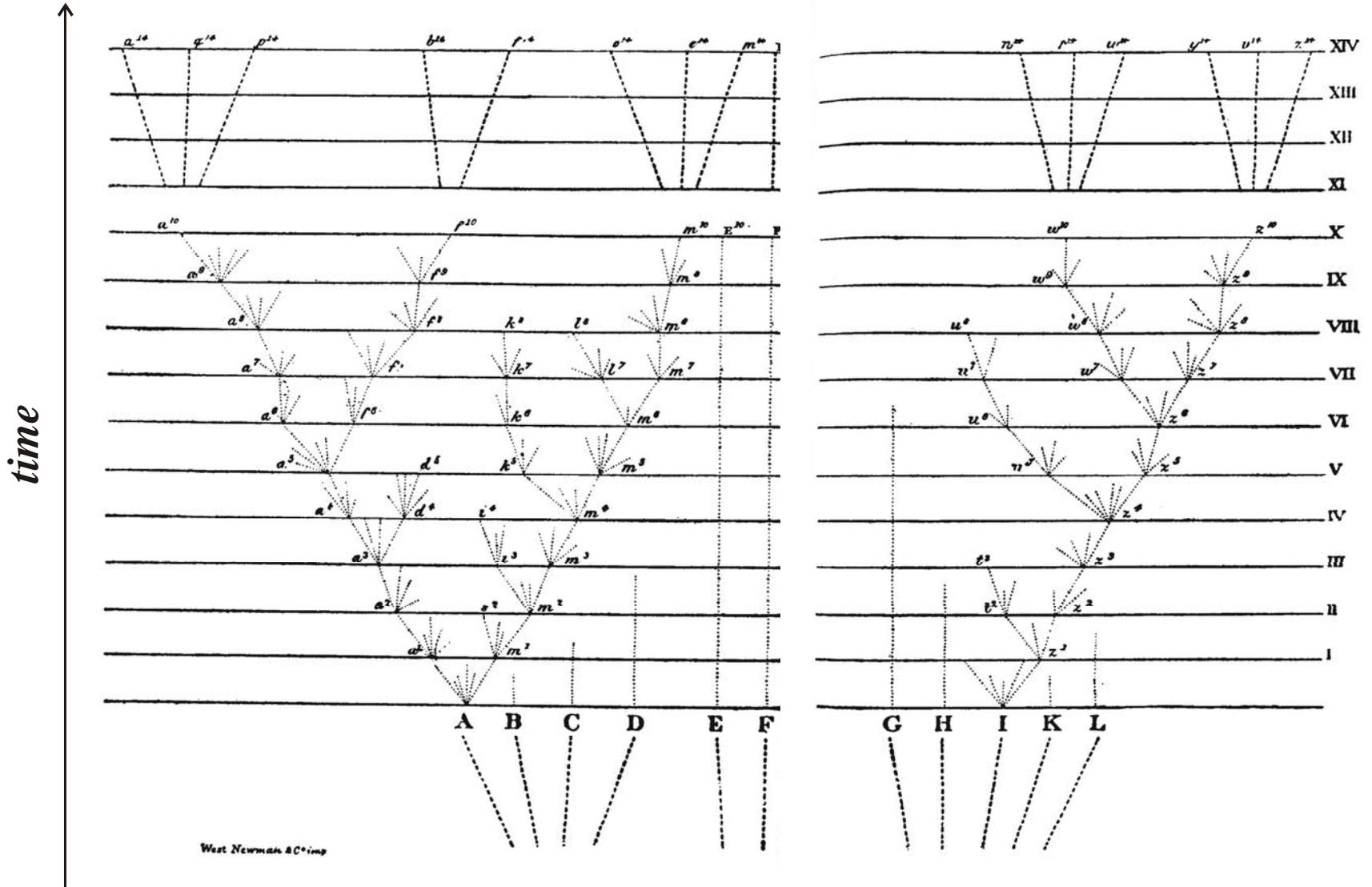


Theodosius Dobzhansky

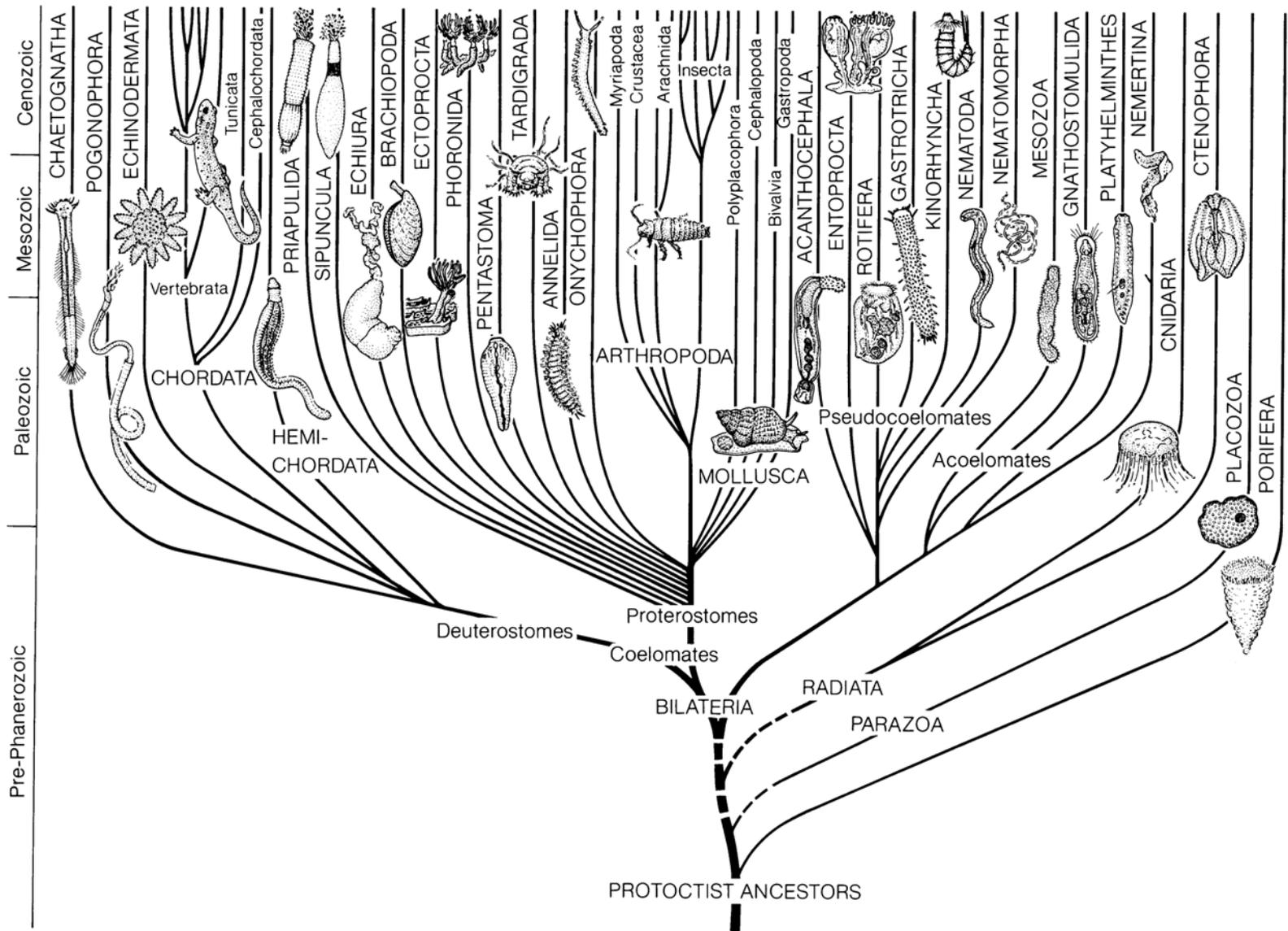


Synthetic or Neo-Darwinian theory
1940 - 1950





Charles Darwin, *The Origin of Species*, 6th edition.
 Everyman's Library, Vol.811, Dent London, pp.121-122.



Modern phylogenetic tree: Lynn Margulis, Karlene V. Schwartz. *Five Kingdoms. An Illustrated Guide to the Phyla of Life on Earth*. W.H. Freeman, San Francisco, 1982.

Mechanismen der Artenbildung

Allopatrisch: Auseinanderentwicklung durch geographische Isolation.

Sympatrisch: Auseinanderentwicklung im selben Habitat durch verschiedene Ursachen von molekulargenetischer "Entfremdung" bis zu unterschiedlicher ökologischer oder ethologischer Entwicklung.

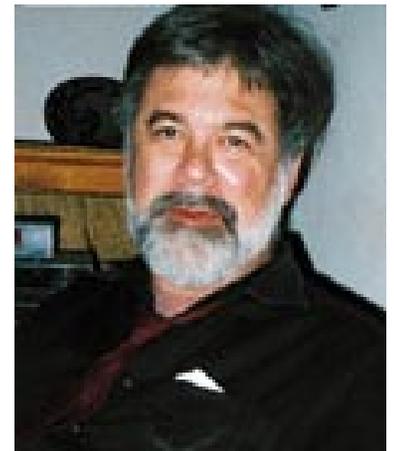


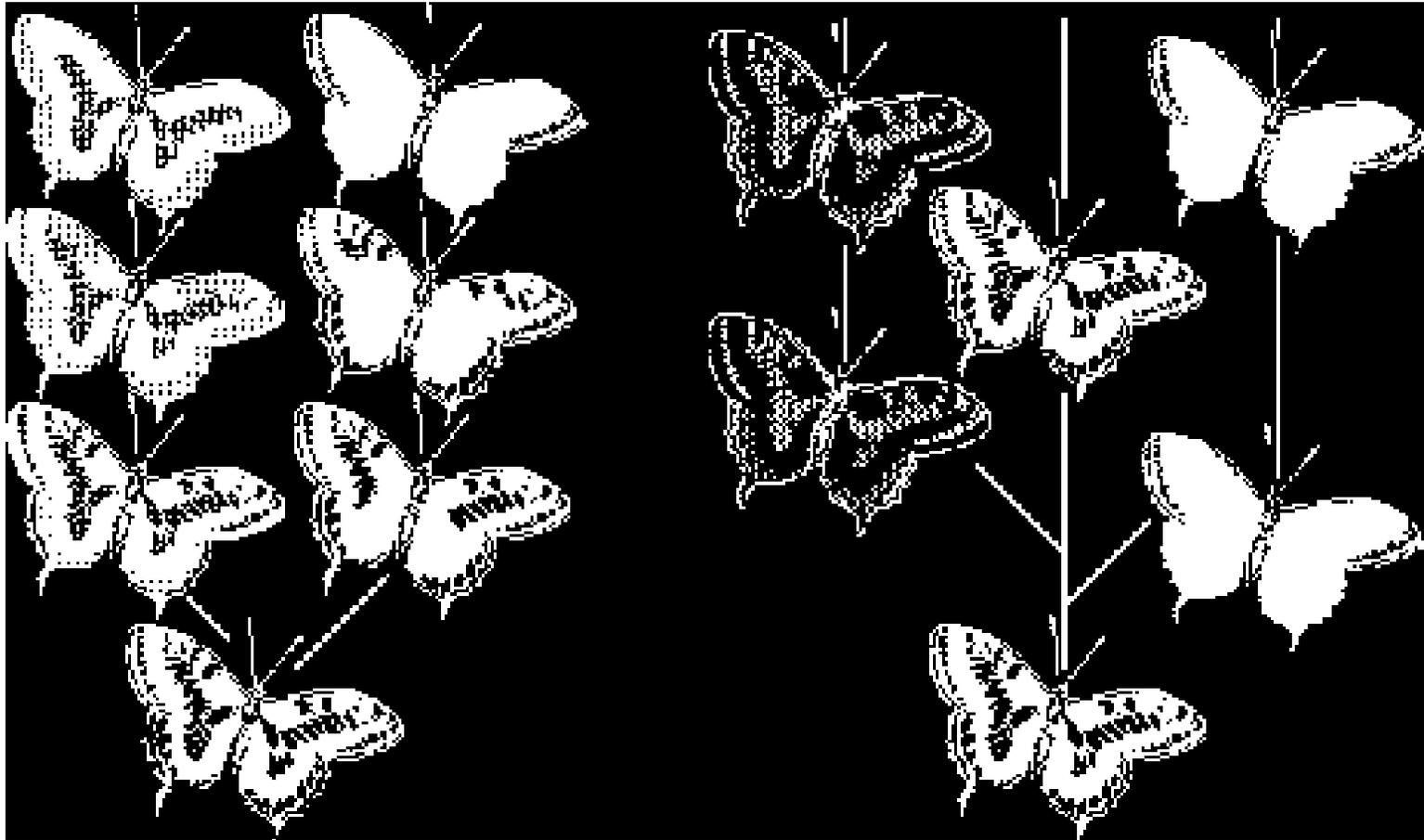
Stephen Jay Gould, 1941 - 2002

"Punctuated Equilibrium":

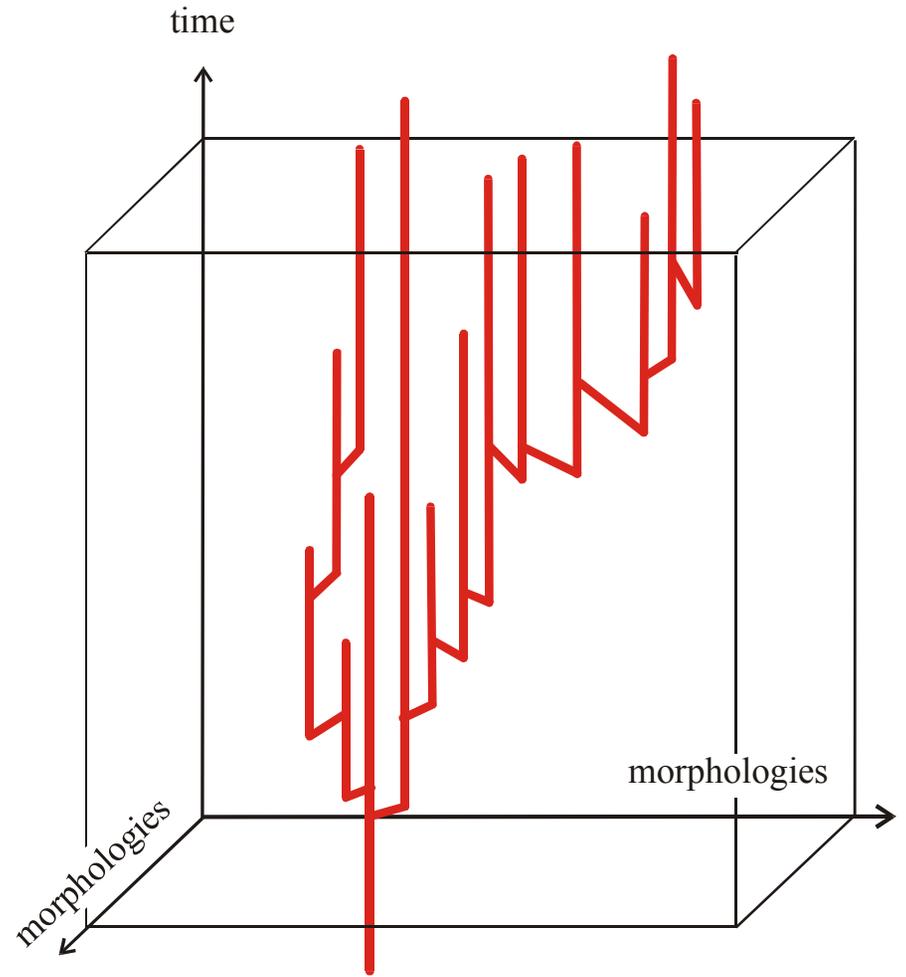
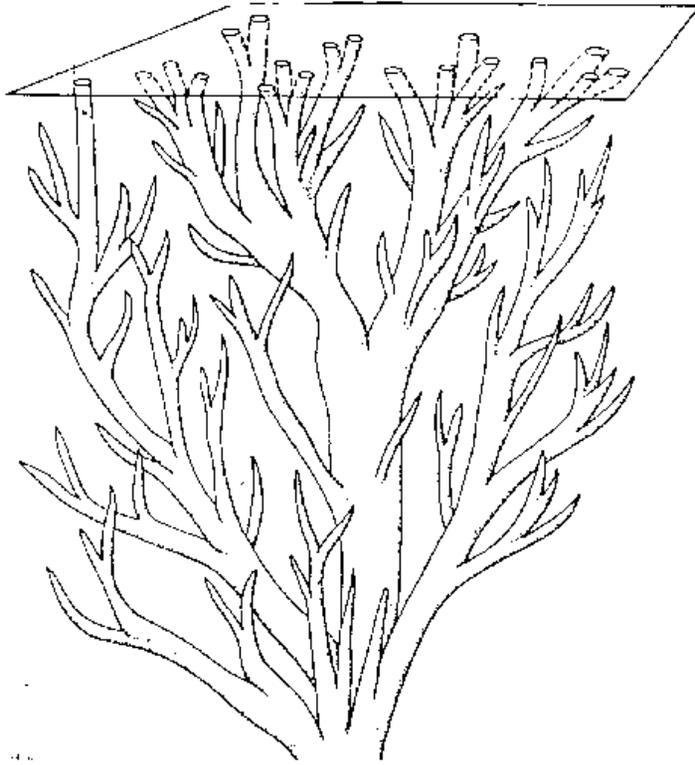
Die Evolution erfolgt in abrupten Schritten und nicht durch (unmerkbar) kleine Veränderungen.

Niles Eldredge, 1943 -





Graduelle Veränderung und “Punctuated Equilibrium” auf Schmetterlingsflügeln

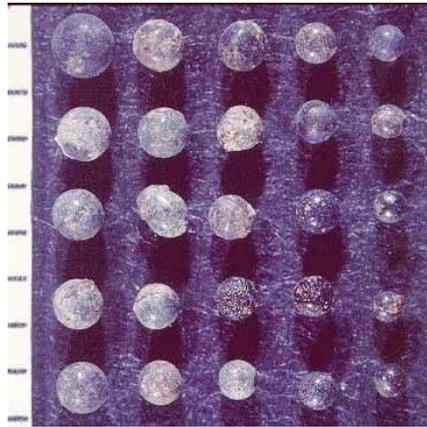
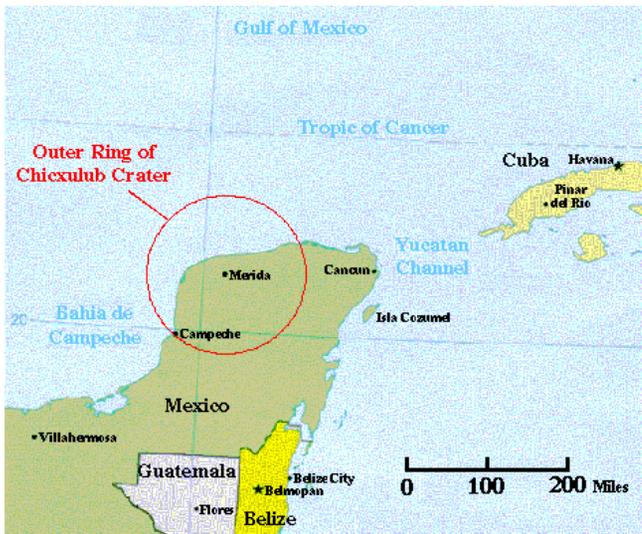


Phylogenetische Bäume aus der Sicht der “Gradualisten” und des “Punctuated Equilibrium”



Katastrophen hat es offenbar gegeben.

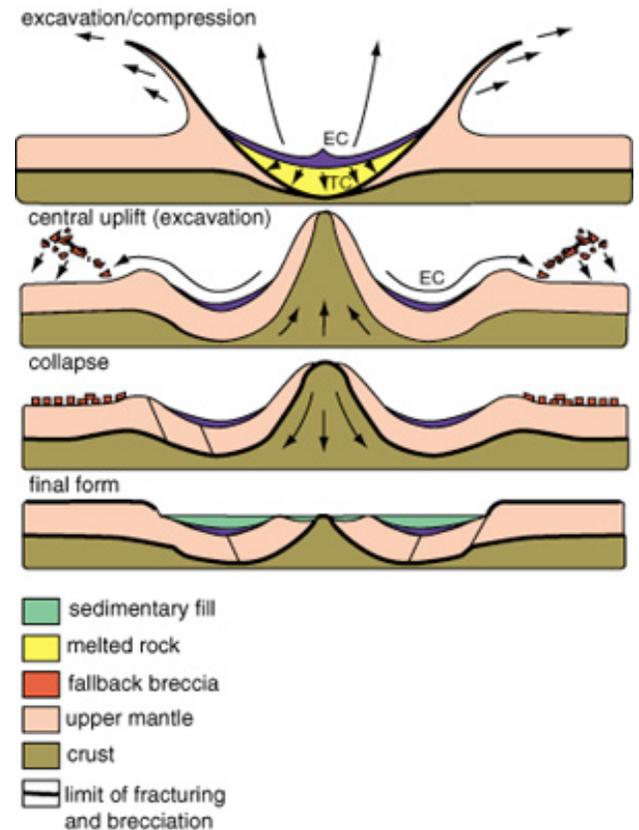
Beispiel ein Meteorit an der Kreide-Tertiär-Grenze



Falling meteorites:

An example is the Chicxulub crater in Mexico dated 65 million years ago

L.W. Alvarez, *Mass Extinctions caused by large bolide impacts*. *Physics Today* **40**: 24-33, 1987



1. Anfänge der Vorstellung einer veränderlichen Natur
2. Das Jahrhundert der klassischen Evolutionstheorie
3. **Selbstorganisation und Evolutionsexperimente**
4. Molekularbiologie und Evolution
5. Schlussbemerkungen

Immanuel Kant, 1790: *Kritik der Urteilskraft*, §65, B292, A287,288.

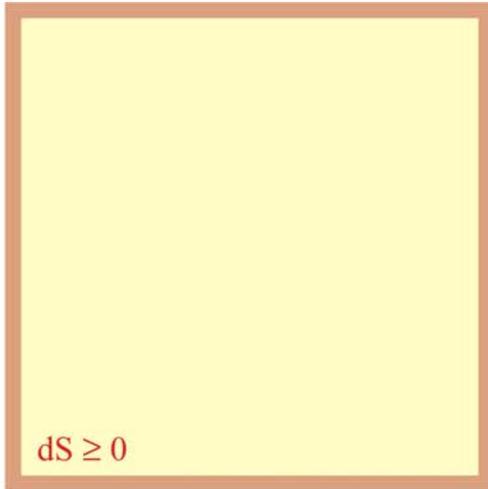


"... In einem solchen Produkte der Natur wird ein jeder Teil, so, wie er nur durch alle übrigen da ist, auch als um der anderen und des Ganzen willen existierend, d.i. als Werkzeug (Organ), gedacht: welches aber nicht genug ist (denn er könnte auch Werkzeug der Kunst sein, und so nur als Zweck überhaupt möglich vorgestellt werden), sondern als ein die anderen Teile (folglich jeder den anderen wechselseitig) hervorbringendes Organ, dergleichen kein Werkzeug der Kunst, sondern nur der allen Stoff zu Werkzeugen (selbst denen der Kunst) liefernden Natur sein kann: und nur dann und darum wird **ein solches Produkt, als organisiertes und sich selbst organisierendes Wesen**, ein Naturzweck genannt werden können. ..."

Immanuel Kant

Immanuel Kant, 1790: *Kritik der Urteilskraft*, §80, B370, A336.

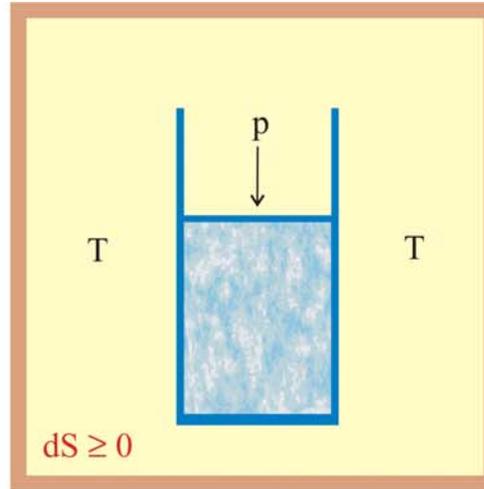
"... **Es kann den Mutterschoß der Erde**, die eben aus ihrem chaotischen Zustande herausging (gleichsam als ein großes Tier), **anfänglich Geschöpfe von minder-zweckmäßiger Form**, diese wiederum andere, welche angemessen ihrem Zeugungsplatze und ihrem Verhältnisse unter einander sich ausbildenden, **gebären lassen**. ..."



Isoliertes (abgeschlossenes) System

$$U = \text{const.}, V = \text{const.},$$

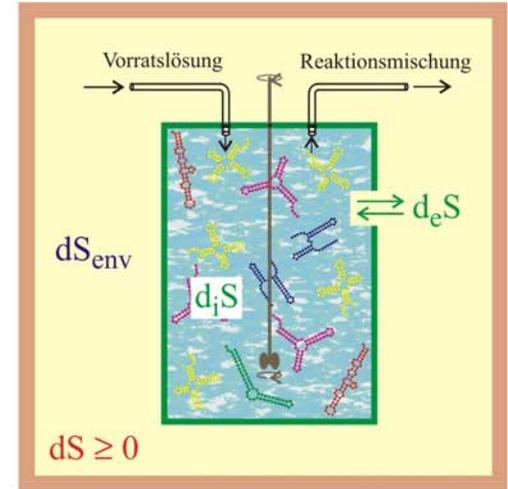
$$dS \geq 0$$



Geschlossenes System

$$T = \text{const.}, p = \text{const.},$$

$$dG = dU - pdV - TdS \leq 0$$



Offenes System

$$dS = dS_{\text{env}} + dS \geq 0$$

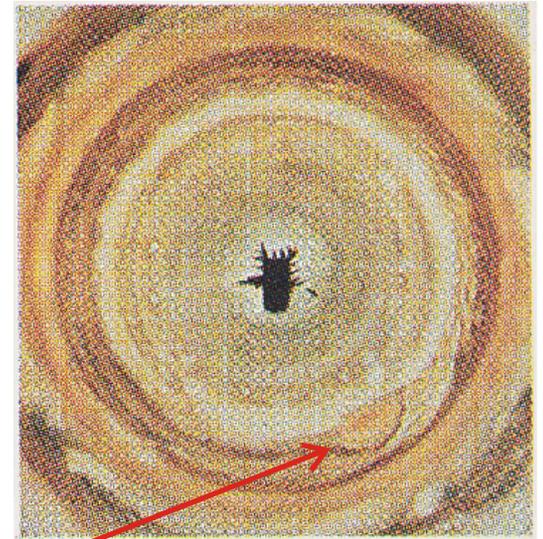
$$dS = d_i S + d_e S$$

$$d_i S \geq 0$$

Entropieänderung in verschiedenen thermodynamischen Systemen



South pole



View from south pole

Red spot



Jupiter: Observation of the gigantic vortex

Picture taken from James Gleick, *Chaos*. Penguin Books, New York, 1988

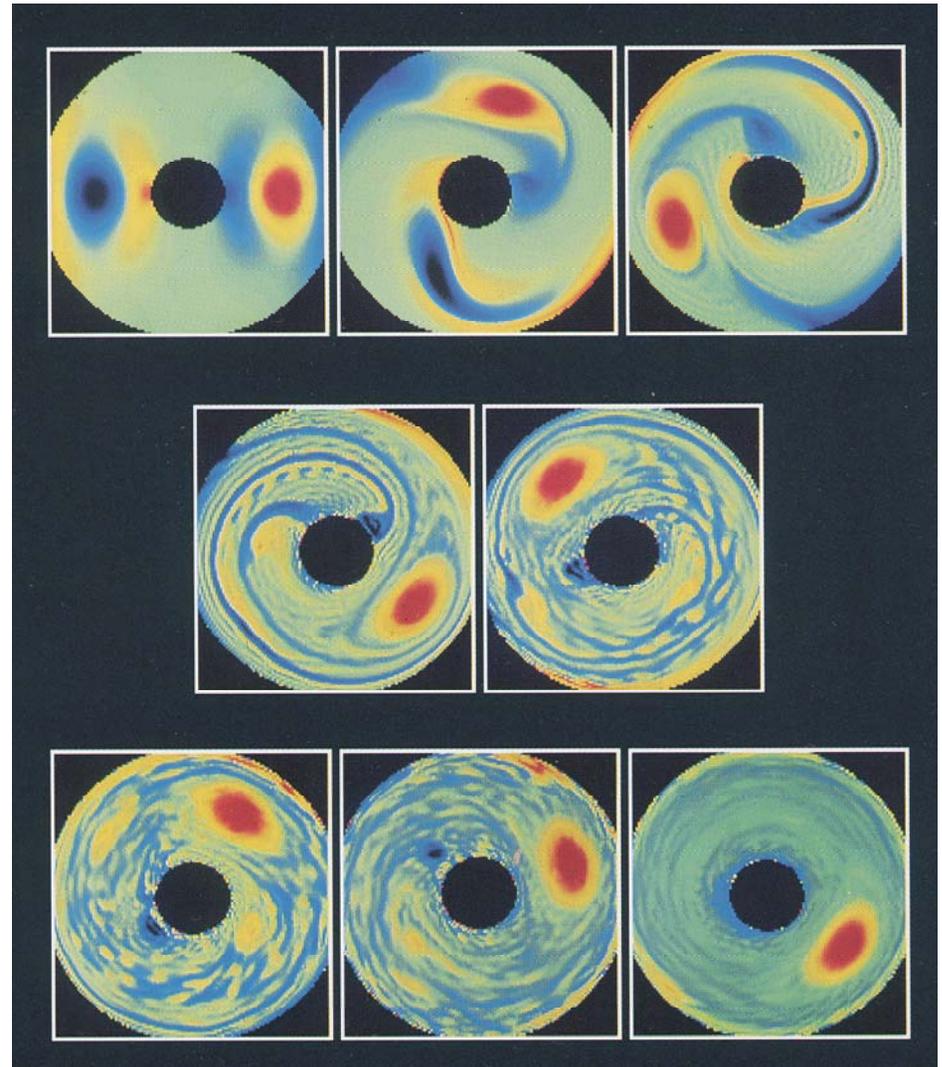
Computer simulation of the gigantic vortex on Jupiter

View from south pole

Particles turning
counterclockwise

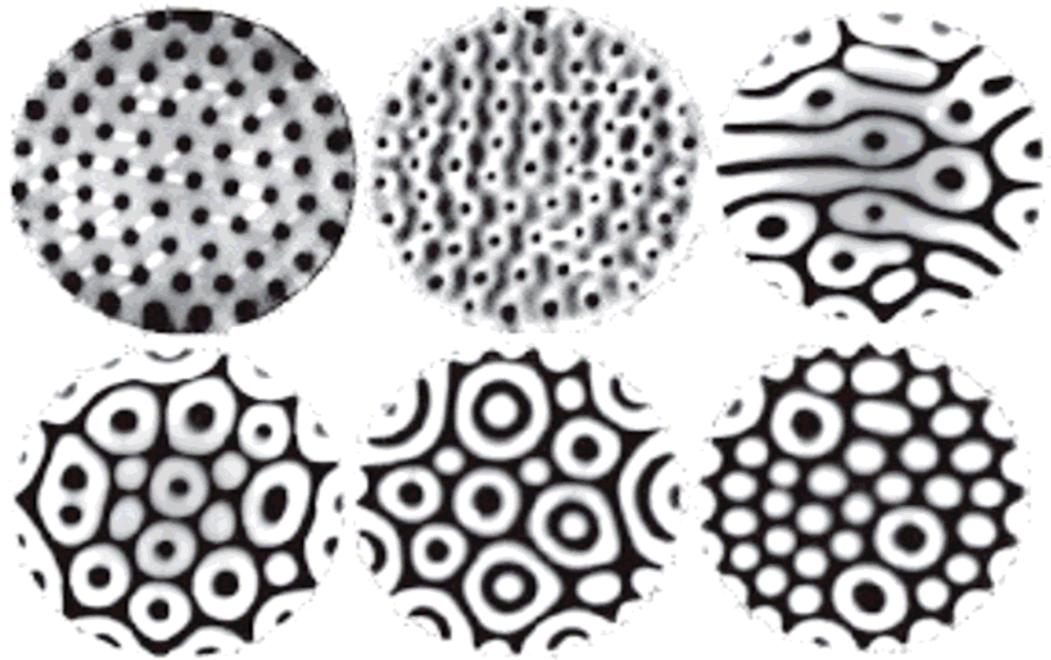
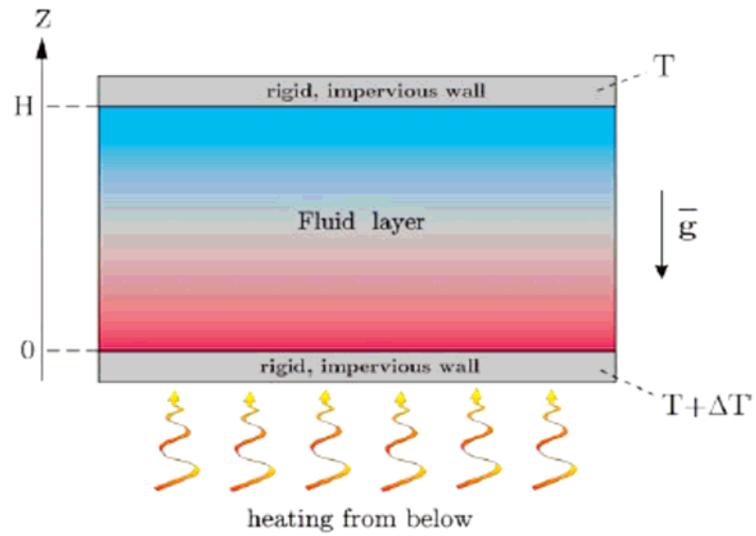


Particles turning
clockwise



Jupiter: Computer simulation of the giant vortex

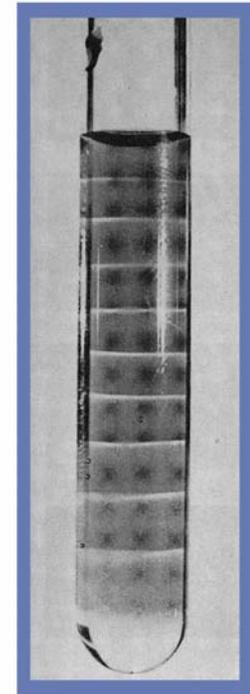
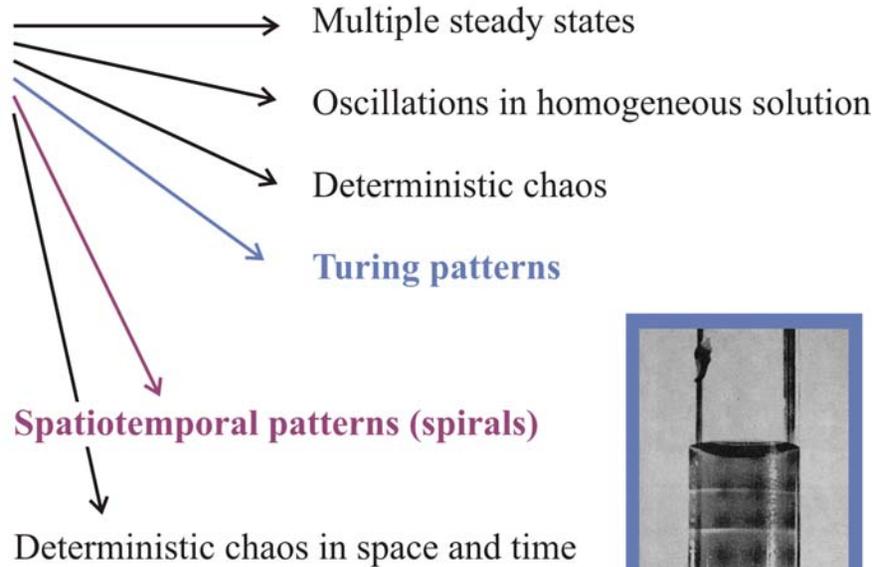
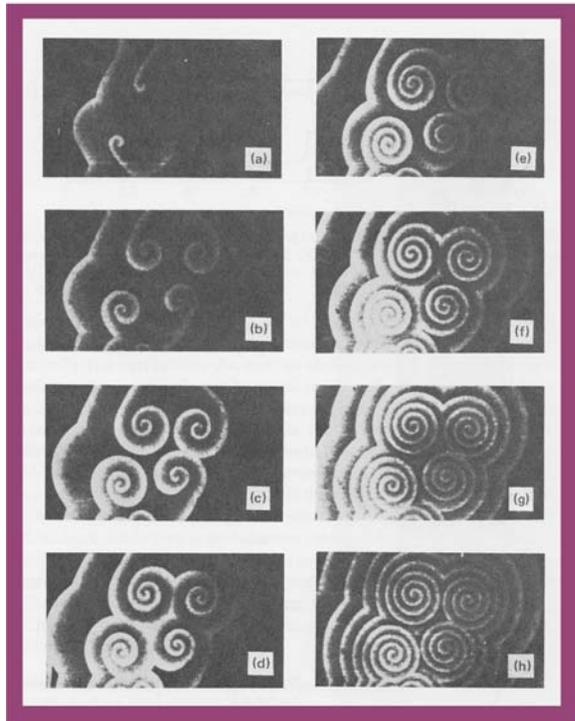
Philip Marcus, 1980. Picture taken from James Gleick, *Chaos*. Penguin Books, New York, 1988



The Rayleigh-Bénard phenomenon in heated liquids

Autocatalytic chemical reactions

Direct autocatalysis or hidden in the reaction mechanism (Belousow-Zhabotinskii reaction).



Pattern formation in autocatalytic reactions

G.Nicolis, I.Prigogine. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. John Wiley, New York 1977

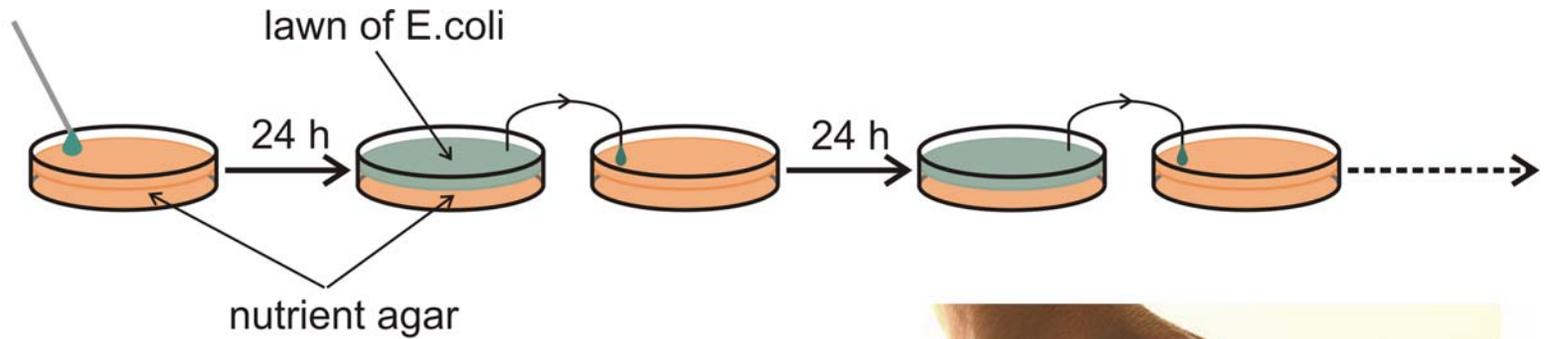
Bacterial Evolution

S. F. Elena, V. S. Cooper, R. E. Lenski. *Punctuated evolution caused by selection of rare beneficial mutants*. Science **272** (1996), 1802-1804

D. Papadopoulos, D. Schneider, J. Meier-Eiss, W. Arber, R. E. Lenski, M. Blot. *Genomic evolution during a 10,000-generation experiment with bacteria*. Proc.Natl.Acad.Sci.USA **96** (1999), 3807-3812

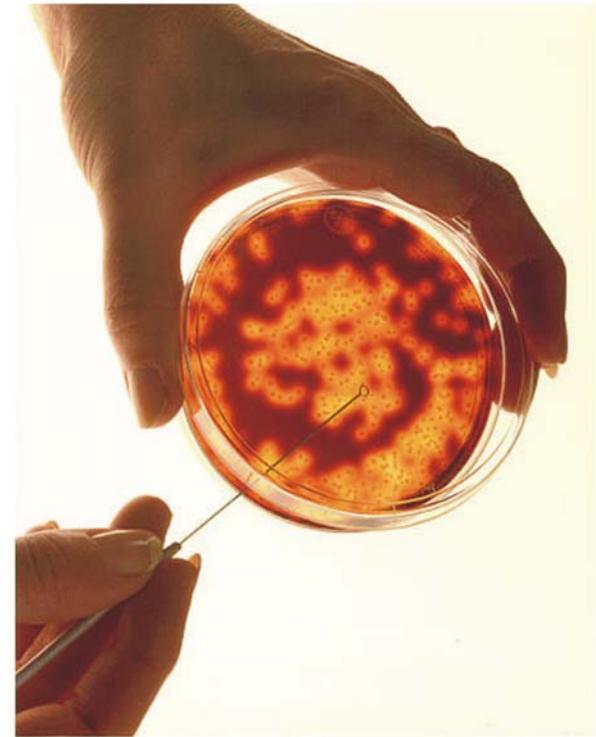
S. F. Elena, R. E. Lenski. *Evolution experiments with microorganisms: The dynamics and genetic bases of adaptation*. Nature Review Genetics **4** (2003), 457-469

C. Borland, R. E. Lenski. *Spontaneous evolution of citrate utilization in Escherichia coli after 30000 generations*. Evolution Conference 2004, Fort Collins, Colorado



1 day » 6.67 generations
1 month » 200 generations
1 year » 2400 generations

Serial transfer of *Escherichia coli* cultures in Petri dishes



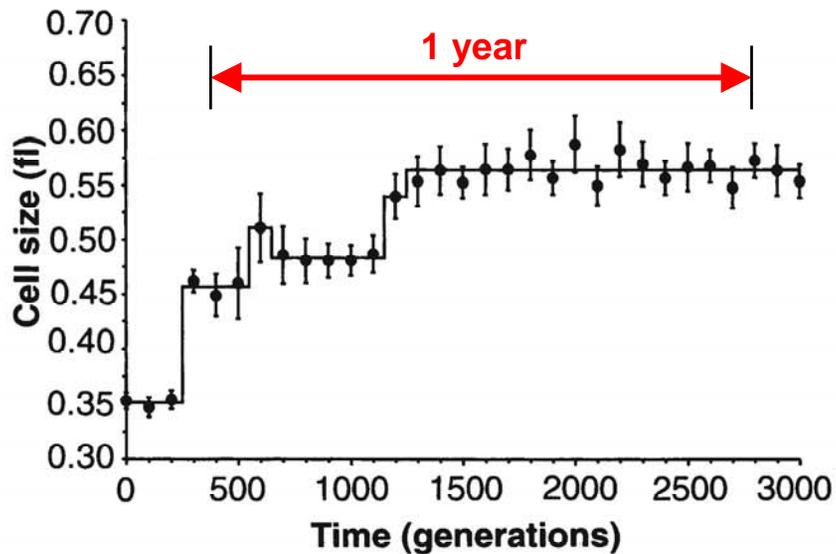


Fig. 1. Change in average cell size (1 fl = 10^{-15} L) in a population of *E. coli* during 3000 generations of experimental evolution. Each point is the mean of 10 replicate assays (22). Error bars indicate 95% confidence intervals. The solid line shows the best fit of a step-function model to these data (Table 1).

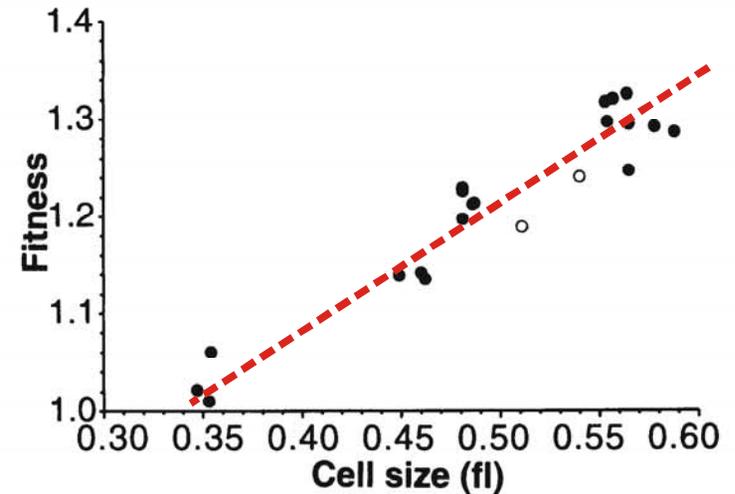


Fig. 2. Correlation between average cell size and mean fitness, each measured at 100-generation intervals for 2000 generations. Fitness is expressed relative to the ancestral genotype and was obtained from competition experiments between derived and ancestral cells (6, 7). The open symbols indicate the only two samples assigned to different steps by the cell size and fitness data.

Epochal evolution of bacteria in serial transfer experiments under constant conditions

S. F. Elena, V. S. Cooper, R. E. Lenski. *Punctuated evolution caused by selection of rare beneficial mutants.* Science **272** (1996), 1802-1804

Evolution of RNA molecules based on Q β phage

D.R.Mills, R.L.Peterson, S.Spiegelman, *An extracellular Darwinian experiment with a self-duplicating nucleic acid molecule*. Proc.Natl.Acad.Sci.USA **58** (1967), 217-224

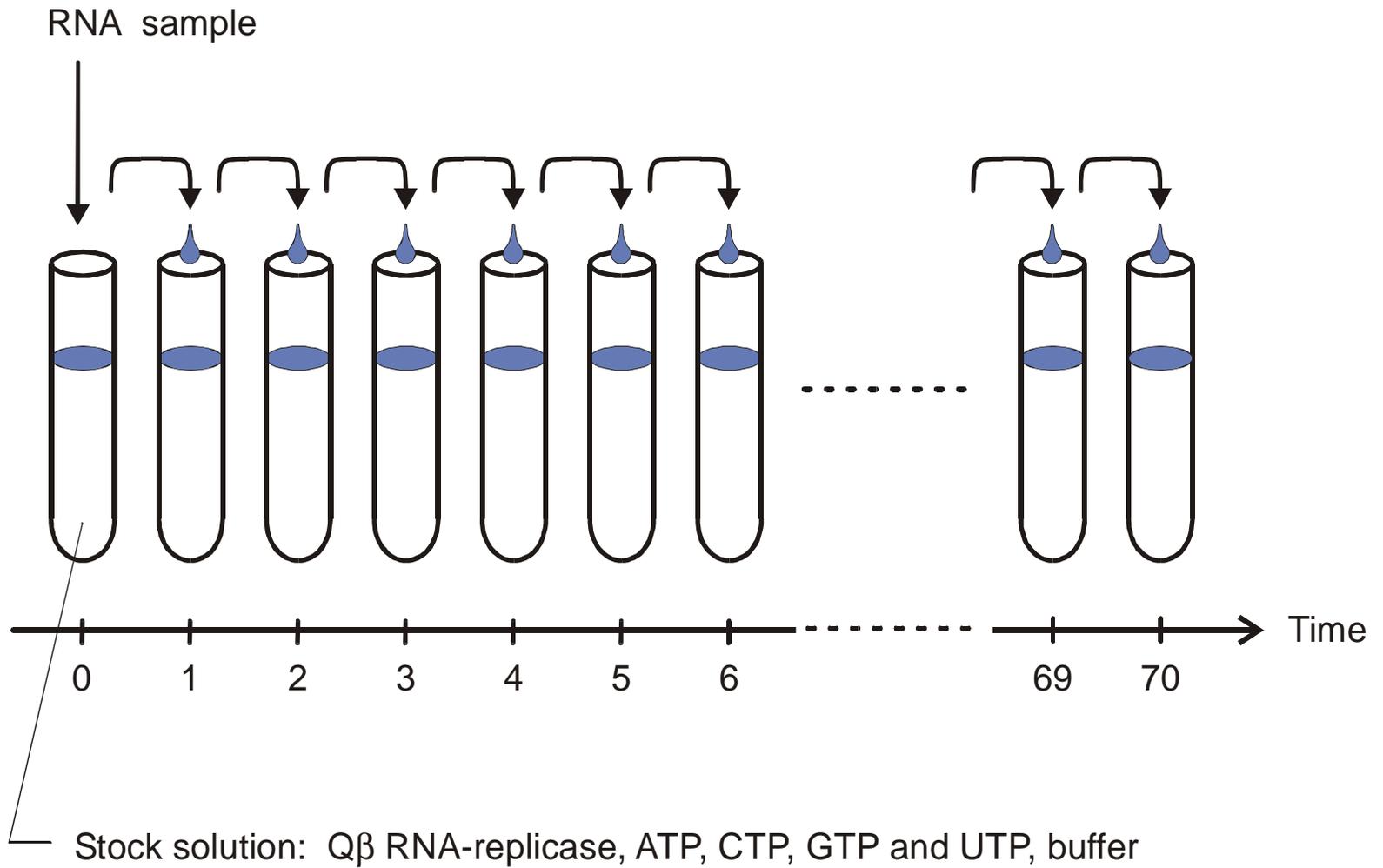
S.Spiegelman, *An approach to the experimental analysis of precellular evolution*. Quart.Rev.Biophys. **4** (1971), 213-253

C.K.Biebricher, *Darwinian selection of self-replicating RNA molecules*. Evolutionary Biology **16** (1983), 1-52

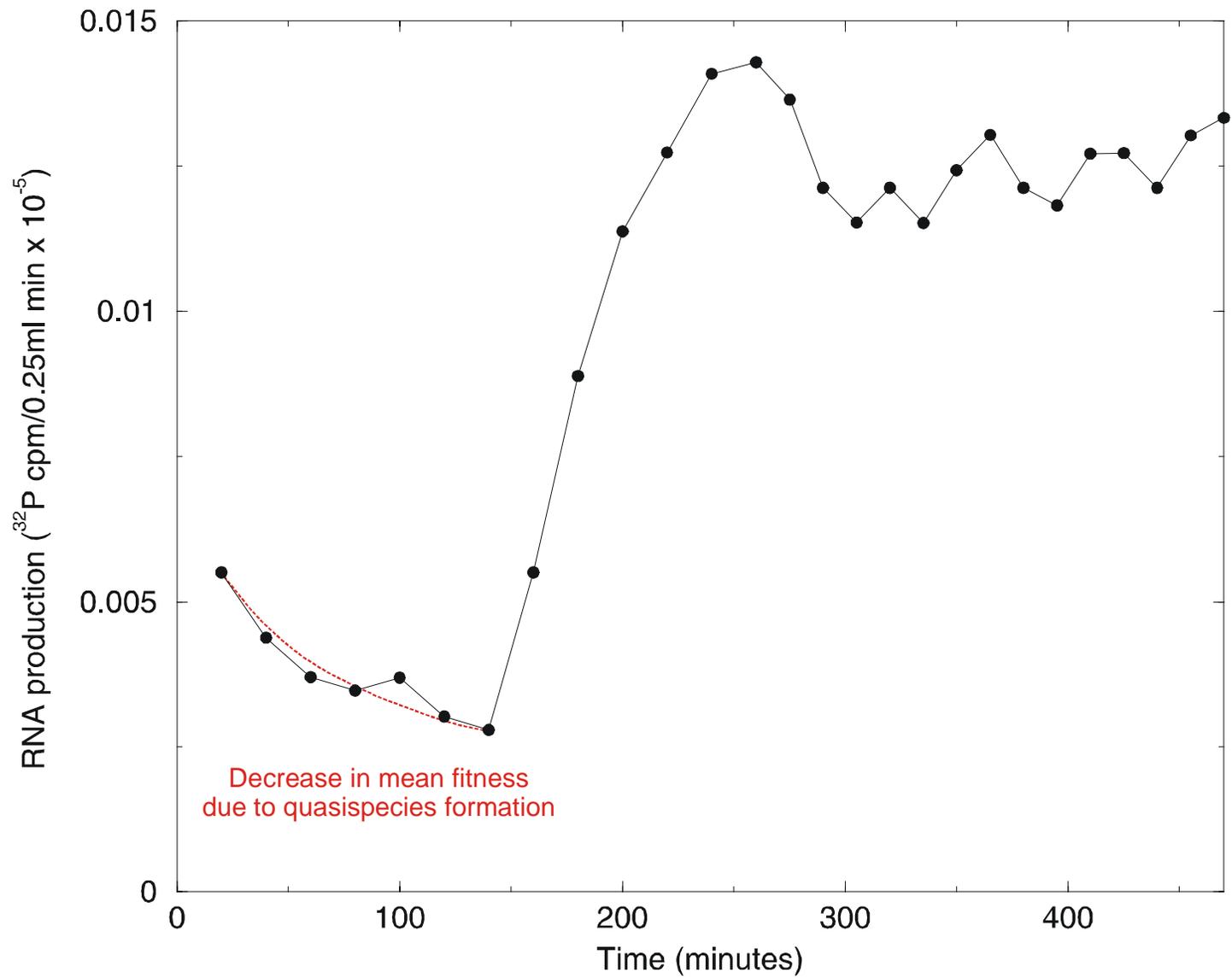
G.Bauer, H.Otten, J.S.McCaskill, *Travelling waves of in vitro evolving RNA*. Proc.Natl.Acad.Sci.USA **86** (1989), 7937-7941

C.K.Biebricher, W.C.Gardiner, *Molecular evolution of RNA in vitro*. Biophysical Chemistry **66** (1997), 179-192

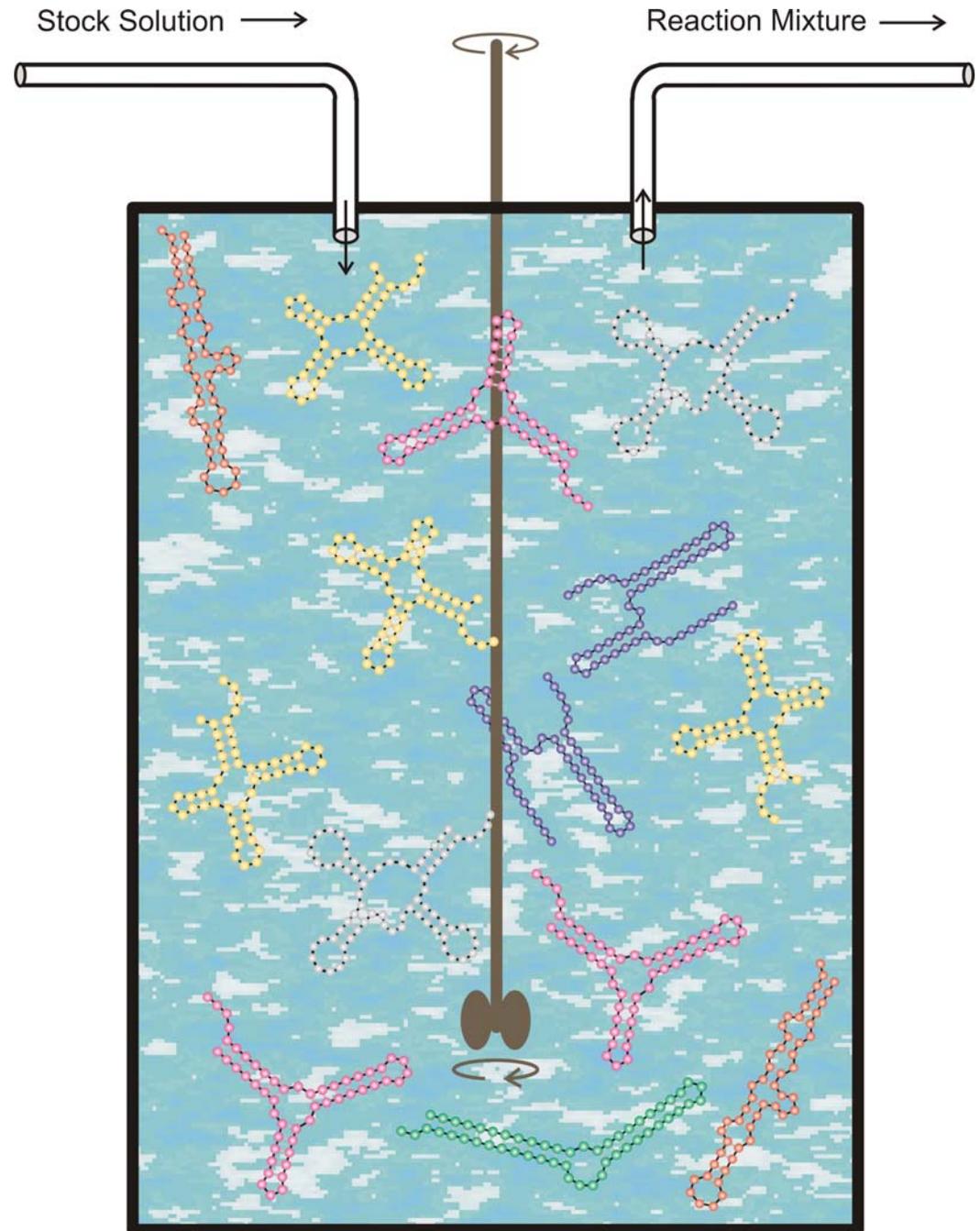
G.Strunk, T.Ederhof, *Machines for automated evolution experiments in vitro based on the serial transfer concept*. Biophysical Chemistry **66** (1997), 193-202



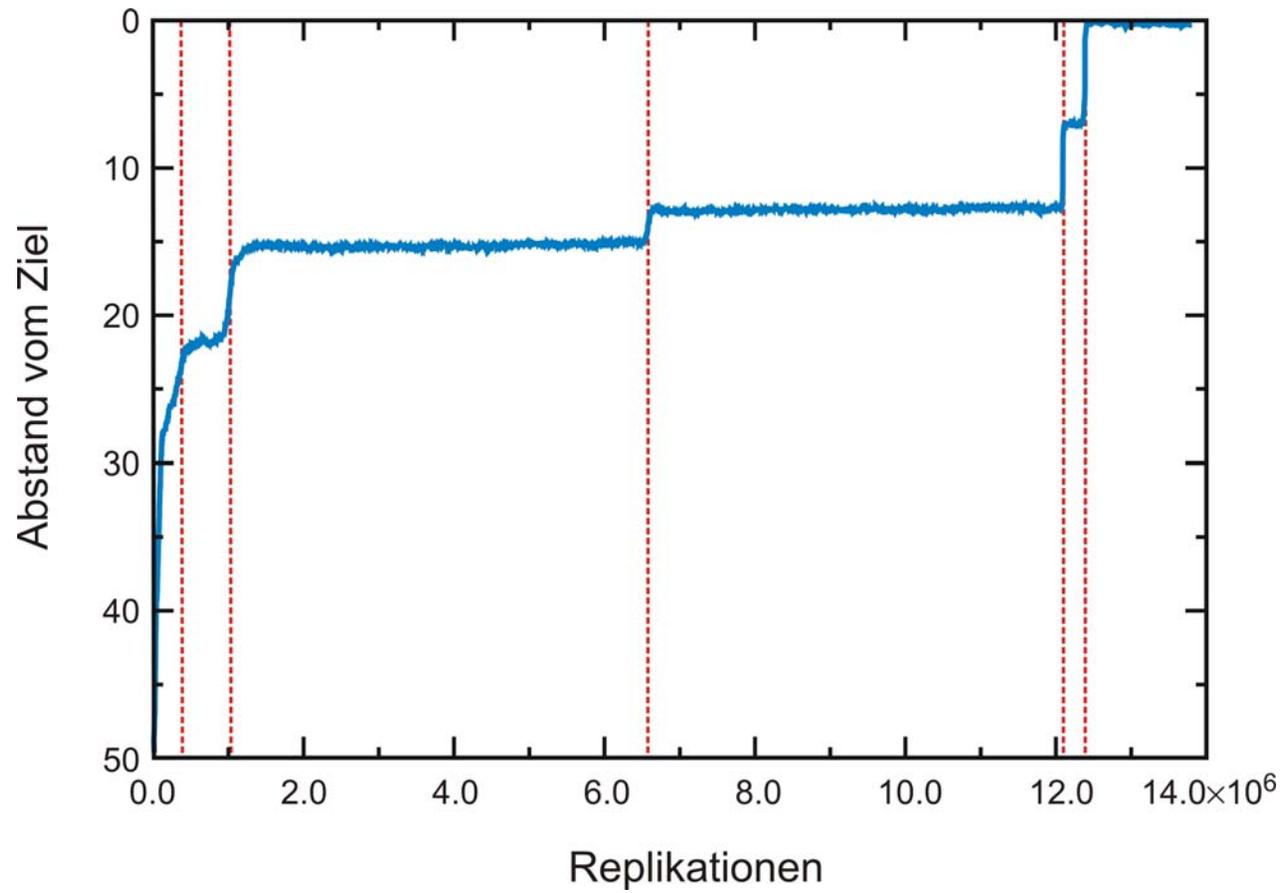
The serial transfer technique applied to RNA evolution *in vitro*



The increase in RNA production rate during a serial transfer experiment

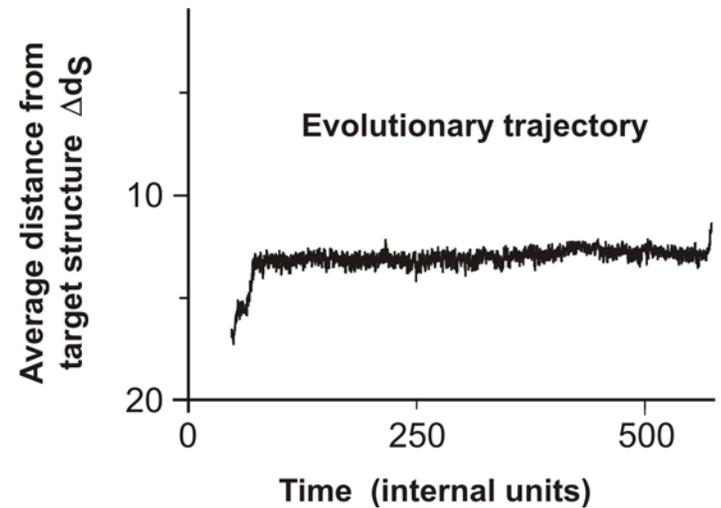


Der Flussreaktor zur
Optimierung von
Strukturen im
Computereperiment



Computersimulation eines SELEX-Experiments im Flussreaktor

28 neutral point mutations during a long quasi-stationary epoch



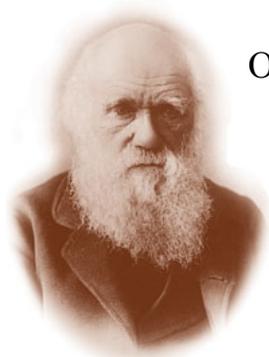
entry	GGUAUGGGCGUUGAAUAGUAGGGUUUAAACCAAUCGG	CAACGAUCUCGUGUGCGCAUUUCAUAUCCCGUACAGAA
8	.(((((((((((((. (((.))))))))(((((.))))))))	
exit	GGUAUGGGCGUUGAAUA	AJAGGGUUUAAACCAAUCGGCCAACGAUCUCGUGUGCGCAUUUCAUAU
entry	GGUAUGGGCGUUGAAUA	AUAGGGUUUAAACCAAUCGGCCAACGAUCUCGUGUGCGCAUUUCAUAU
9	.((((((.(. (((.))))))))(((((.))))))))	
exit	UGGAUGGACGUUGAAUAACAAGGUAUCGACCAAACAACCAACGAGUAAGUGUGUA	CGCCACACACCGUCCCAAG
entry	UGGAUGGACGUUGAAUAACAAGGUAUCGACCAAACAACCAACGAGUAAGUGUGUA	CGCCACACACCGUCCCAAG
10	.(((((. (((.))))))))(((((.))))))))	
exit	UGGAUGGACGUUGAAUAACAAGGUAUCG	ACCAAACAACCAACGAGUAAGUGUGUA

Transition inducing point mutations change the molecular structure

Neutral point mutations leave the molecular structure unchanged

Neutral genotype evolution during phenotypic stasis

1. Anfänge der Vorstellung einer veränderlichen Natur
2. Das Jahrhundert der klassischen Evolutionstheorie
3. Selbstorganisation und Evolutionsexperimente
- 4. Molekularbiologie und Evolution**
5. Schlussbemerkungen



Charles Darwin

Origin of evolutionary biology

1859



Origin of genetics

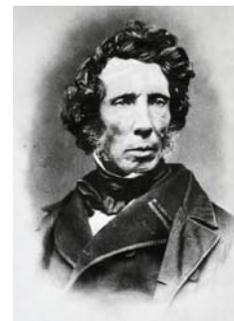
1865



'Rediscovery' 1900



Gregor Mendel



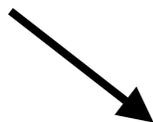
Friedrich Woehler

Origin of biochemistry
1828

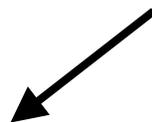


First unification: Population genetics 1930

Ernst Mayr

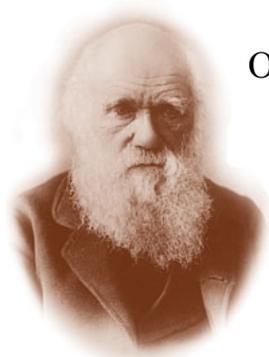


Theodosius
Dobzhansky



Synthetic or
Neo-Darwinian theory
1940 - 1950





Charles Darwin

Origin of evolutionary biology

1859



Origin of genetics

1865

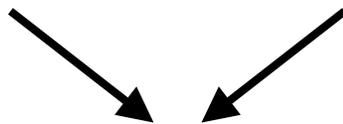


'Rediscovery' 1900



First unification: Population genetics 1930

Ernst Mayr



Synthetic or Neo-Darwinian theory
1940 - 1950



Theodosius Dobzhansky



Max Perutz



Gregor Mendel



Friedrich Woehler

Origin of biochemistry
1828



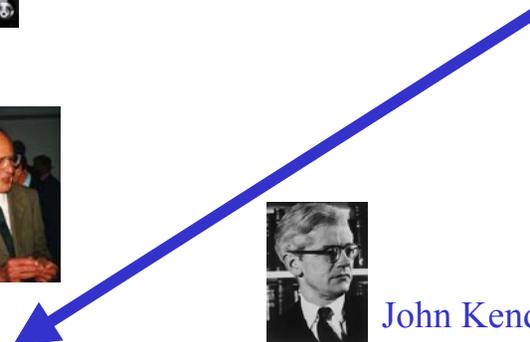
Origin of molecular biology 1953



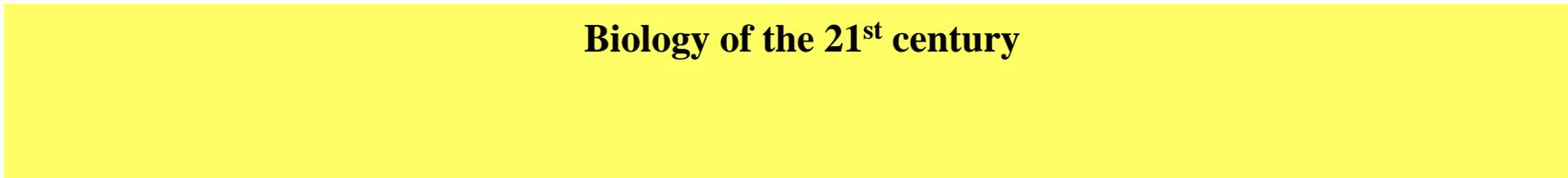
James Watson and Francis Crick

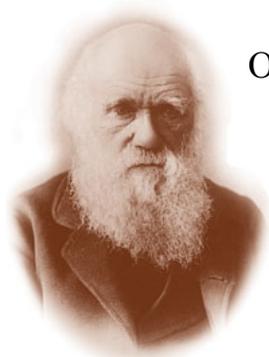


John Kendrew



Biology of the 21st century





Charles Darwin

Origin of evolutionary biology

1859



Origin of genetics

1865



'Rediscovery' 1900



First unification: Population genetics 1930



Gregor Mendel



Friedrich Woehler

Origin of biochemistry
1828



Origin of molecular
biology 1953



Jacques Monod



James Watson and
Francis Crick

Ernst Mayr



Synthetic or
Neo-Darwinian theory
1940 - 1950



Theodosius
Dobzhansky



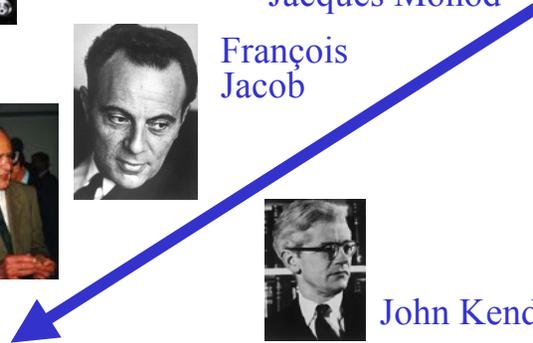
François
Jacob



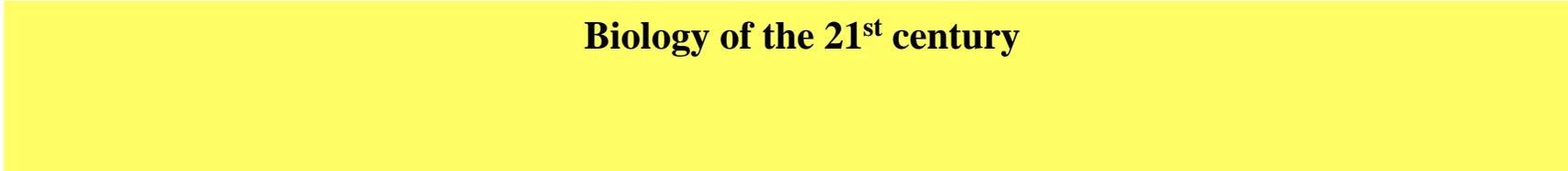
Max Perutz

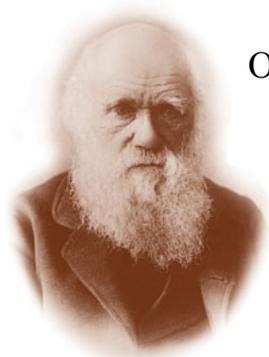


John Kendrew



Biology of the 21st century





Charles Darwin

Origin of evolutionary biology
1859

Origin of genetics
1865



Gregor Mendel



Friedrich Woehler

Origin of
biochemistry
1828



'Rediscovery' 1900

First unification: Population genetics 1930

Ernst Mayr



Synthetic or
Neo-Darwinian theory
1940 - 1950



Theodosius
Dobzhansky

Origin of molecular
biology 1953



Jacques Monod



James Watson and
Francis Crick



Max Perutz



François
Jacob



John Kendrew



Sydney Brenner



Manfred
Eigen

Biology of the 21st century

Biomathematics, bioinformatics, ... , biophysics, biochemistry, ... , molecular genetics, ... , systems biology, biomedicine, macroscopic biology, **evolutionary biology**, sociobiology, anthropology, ...



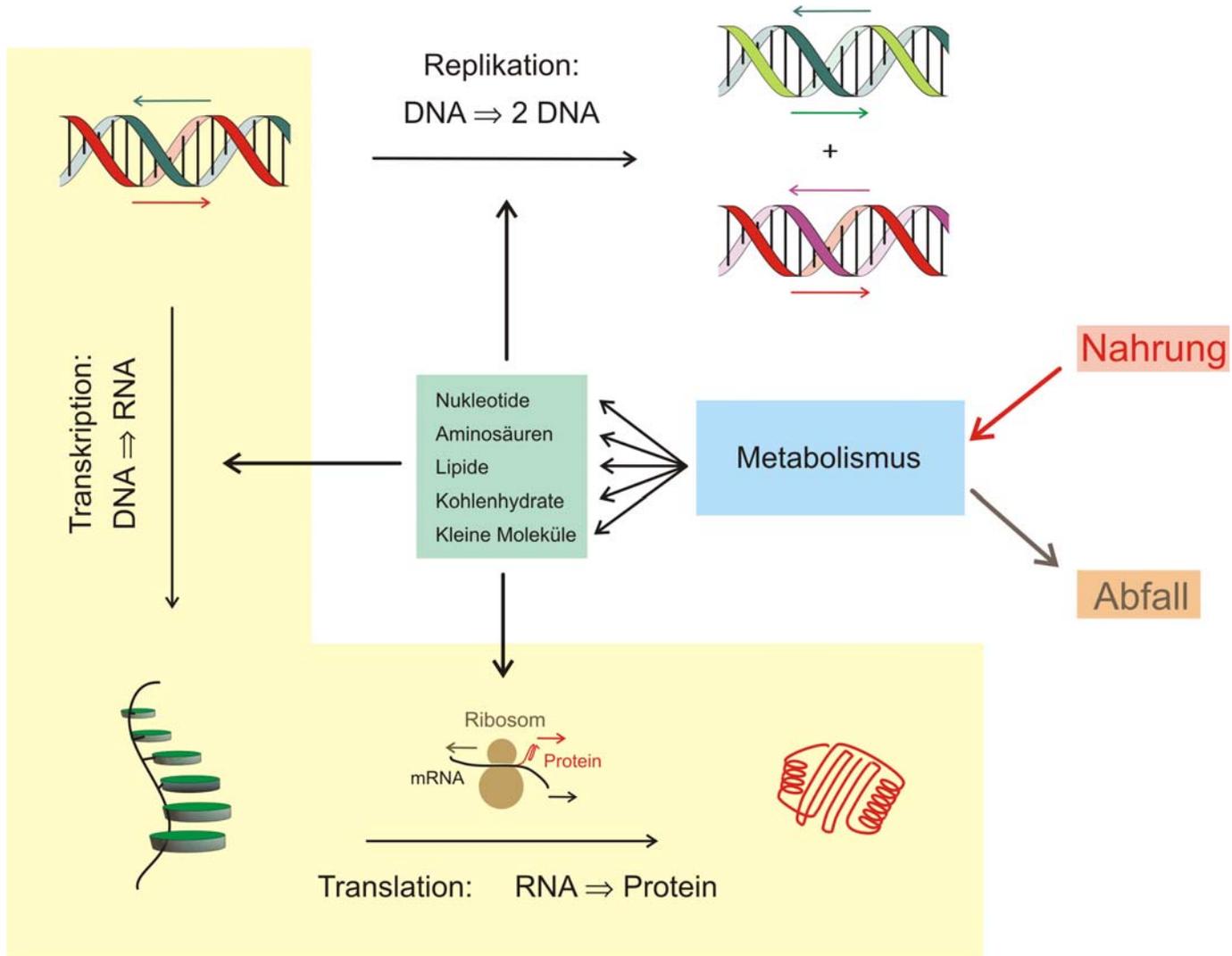
A ≡ Adenine

G ≡ Guanine

T ≡ Thymine

C ≡ Cytosine

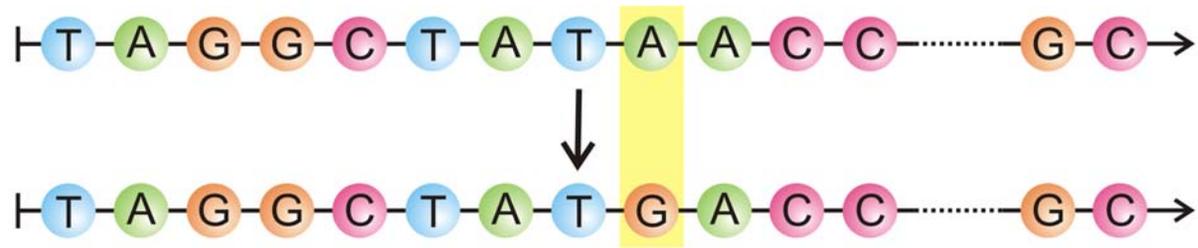
Deoxyribonucleic acid - DNA



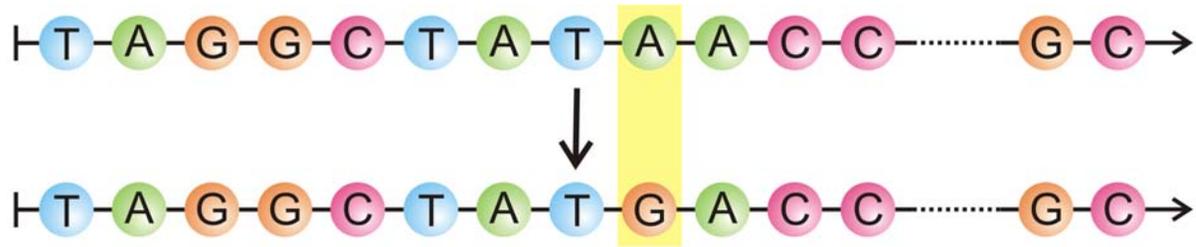
Skizze des zellulären Stoffwechsels

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Biochemical Pathways											
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												

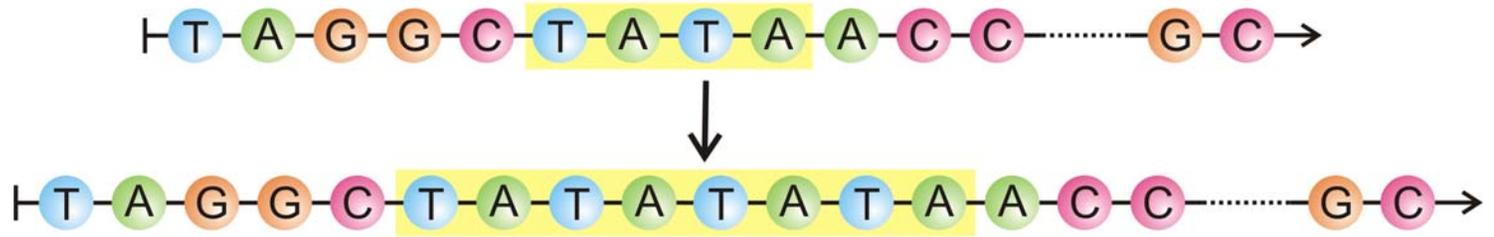
Das Reaktionsnetzwerk des zellulären Stoffwechsels publiziert von Boehringer-Ingelheim.



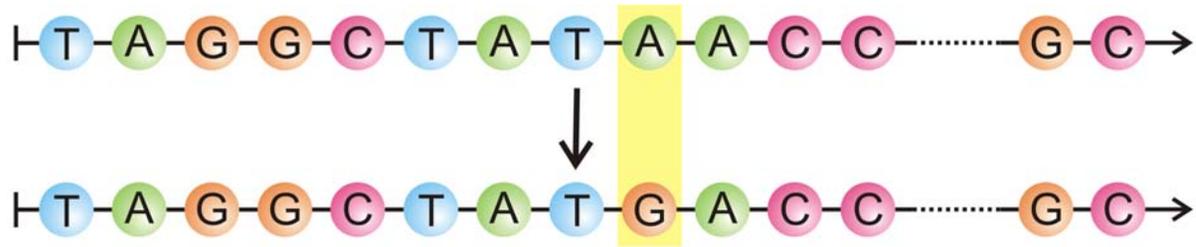
Punktmutation



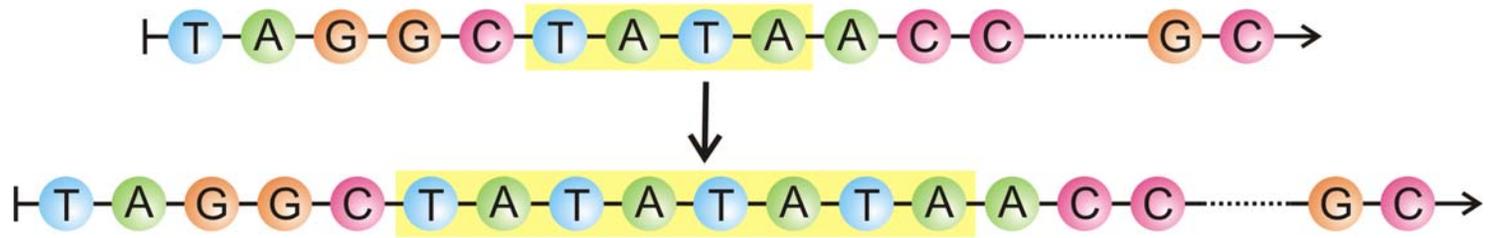
Punktmutation



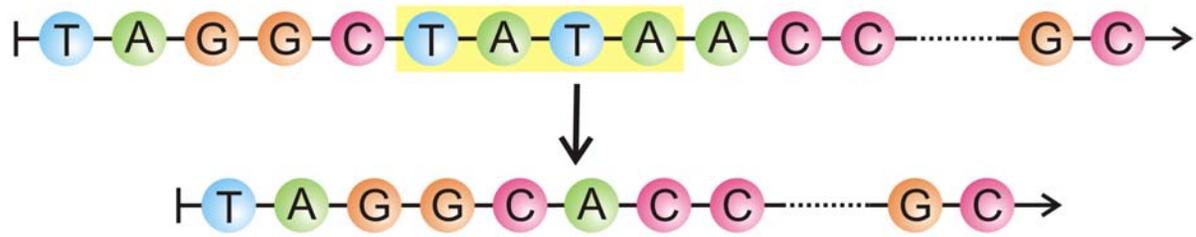
Insertion



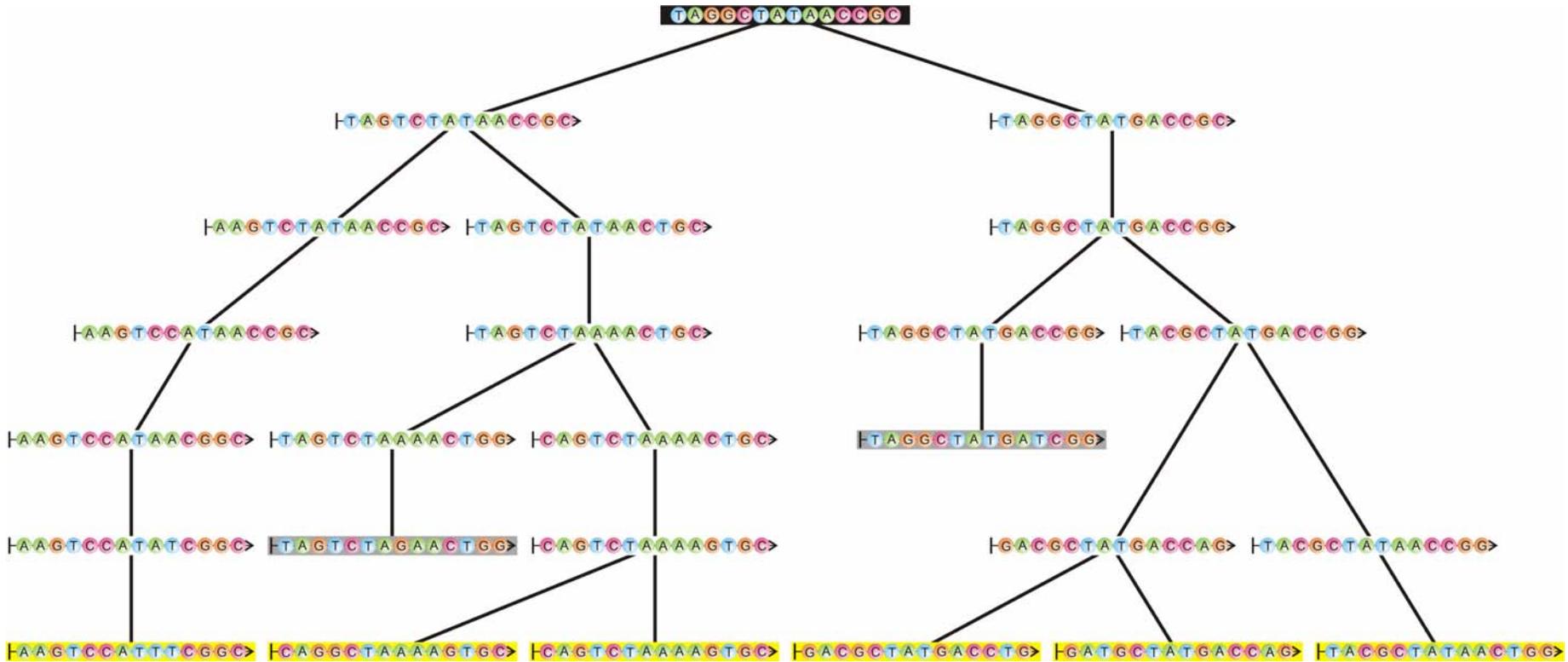
Punktmutation



Insertion



Deletion



Reconstruction of phylogenies through comparison of molecular sequence data

Molekulare Evolutionsforschung durch DNA-Sequenzierung

Aus dem Vergleich der heutigen **DNA-Sequenzen** kann die geschichtliche Abfolge der Mutationen rekonstruiert werden und diese ergibt **phylogenetische Bäume**, die jenen aus der **vergleichenden Morphologie**, welche durch Betrachtung von Formen und Gestalten der Organismen gewonnen wurden, weitest gehend entsprechen.

Walter Gehring, Biozentrum, Universität Basel

Die Molekulargenetik zeigt, dass die Entwicklung aller verschieden geformten Augen denselben evolutionären Ursprung hat, welcher bis zu einer einfachen lichtempfindlichen Vorstufe eines Organs zurückverfolgt werden kann, das bereits in primitiven Bakterienstämmen gefunden wird.

W. J. Gehring. The genetic control of eye development and its implications for the evolution of the various eye-types. *Zoology* **104**:171-183, 2001

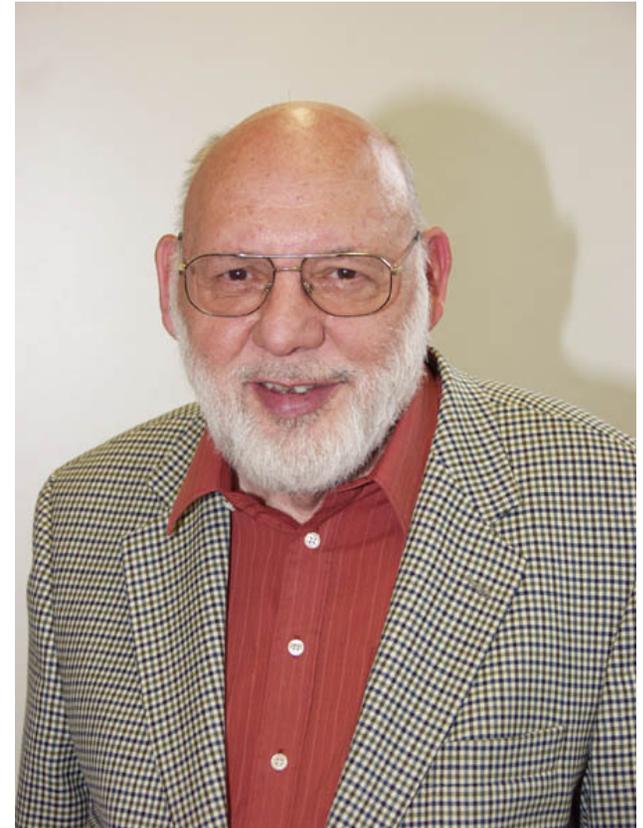




Fig. 1. Different types of eyes. (A) Camera-type eye from the Lemur *Propithecus verreauxi*. (B) Compound eye of the praying Mantis. (C) Camera-type eye from the Cephalopod *Sepia erostrata*. (D) Mirror eye from the clam *Chlamys nobilis*. (Courtesy of Dr. Kazuto Kato; photographs kindly provided by Masahiro Iijima, Susumu Yamaguchi and Isamu Soyama).

Walter J. Gehring, The genetic control of eye development and its implications for the evolution of the various eye-types. *Zoology* **104** (2001), 171-183

Eye Formation in

Cephalopods

Vertebrates

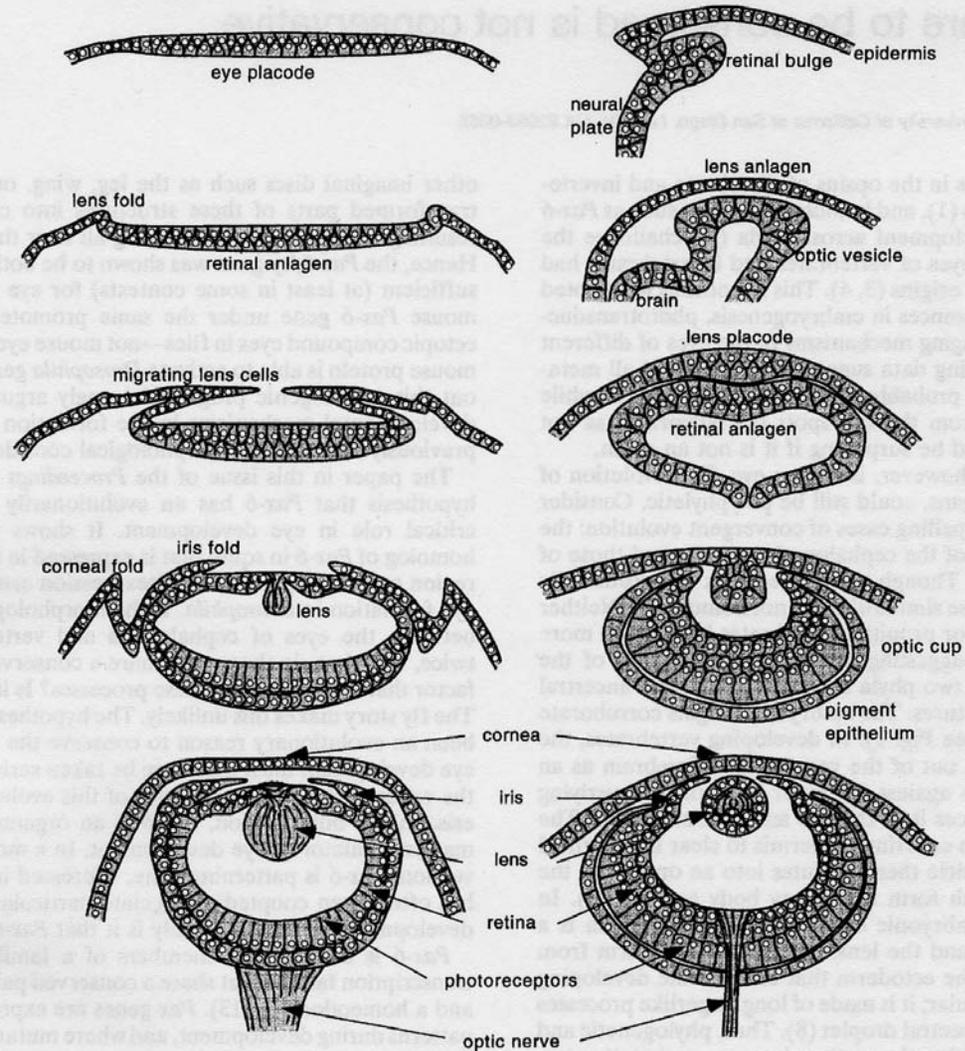


FIG. 1. Schematic diagram of cephalopod eye development (*Left*) and vertebrate eye development (*Right*) as explained in more detail in refs. 7 and 8. Development proceeds from top to bottom. Even though the adult structures are fairly similar, excepting certain obvious features such as the placement of the photoreceptors and lentigenic cells, the development is very different. The cephalopod eye forms from an epidermal placode through a series of successive infoldings, while the vertebrate eye emerges from the neural plate and induces the overlying epidermis to form the lens.

Die großen Evolutionsschritte (nach John Maynard Smith und Eörs Szathmáry)

Replizierende Moleküle ⇒ Moleküle in Kompartments
Membranen, organisierte Teilung

Unabhängige Replikatoren ⇒ Chromosomen
Molekülverkettung, gemeinsame Replikation

RNA als Gen und Enzyme ⇒ DNA und Protein
genetischer Code, Ribosom

Prokaryoten ⇒ Eukaryoten
Zusammenschluß durch Endosymbiose

Asexuell vermehrende Klone ⇒ Sexuell vermehrende Populationen
Ursprung der sexuellen Vermehrung

Protisten ⇒ Pflanzen, Pilze und Tiere
Zelldifferenzierung und Entwicklung

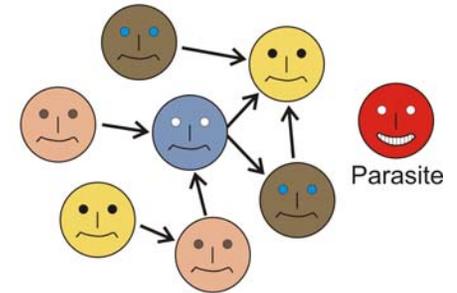
Einzel lebende Individuen ⇒ Tierkolonien
Entstehung nicht-reproduktiver Kasten

Primatengesellschaften ⇒ menschliche Gesellschaften
Sprache, Schrift, Kultur, ...

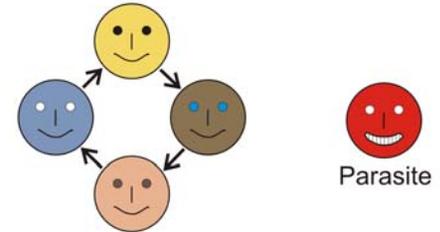
Stufe I:
Unabhängige Replikatoren
in Konkurrenz



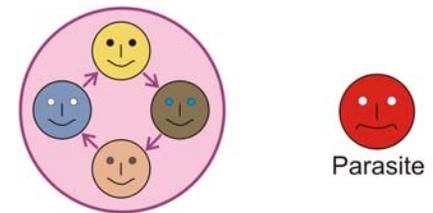
Stufe II:
Katalyse und Konkurrenz
bei der Replikation



Stufe III:
Funktionell verknüpfte
Replikatoren



Stufe IV:
Neue Einheit der
Selektion



Ein Modell für die Integration
von Konkurrenten in einer
höheren hierarchischen Einheit

Stufe V:
Unabhängige Einheiten
in Konkurrenz



1. Anfänge der Vorstellung einer veränderlichen Natur
2. Das Jahrhundert der klassischen Evolutionstheorie
3. Selbstorganisation und Evolutionsexperimente
4. Molekularbiologie und Evolution
5. **Schlussbemerkungen**

Darwin hatte in folgenden Punkten **nicht recht**:

- Der Darwinsche **Vererbungsmechanismus** war falsch. Mendel hatte die korrekte Lösung.
- Mutation und Rekombination können keine, kleine und große Auswirkungen haben und es besteht kein Grund, dass die biologische Evolution quasikontinuierlich oder anders ausgedrückt nur **in verschwindend kleinen Schritten** erfolgt.
- Im Verlaufe der biologischen Evolution gab es auch **katastrophenartige Ereignisse** terrestrischen und extraterrestrischen Ursprungs.
- Die Komplexität der höheren Lebewesen ist so groß, dass ihre Eigenschaften nicht **voll optimiert** sein können.

Darwins Theorie wurde in folgenden Punkten **voll bestätigt**:

- Das **Auftreten von Varianten** bei der Reproduktion wurde durch die Aufklärung der molekularen Mechanismen von Rekombination und Mutation auf eine solide wissenschaftliche Basis gestellt.
- Das Darwinsche **Prinzip der Optimierung durch Variation und Selektion** in endlichen Populationen gilt nicht nur in der Biologie sondern auch in der unbelebten Welt.
- Die natürliche Entstehung der Arten und die daraus resultierenden **phylogenetischen Stammbäume** wurde durch die Vergleiche der genetischen Informationsträger heute lebender Organismen voll bestätigt.

Was könnte G. W. F. Hegel an der heutigen Evolutionstheorie interessieren?

- Das **Auftreten von Stufen** und hierarchisch organisierten Lebensformen steigender Komplexität in der biologischen Evolution.
- Die **evolutionären Übergänge** von einer hierarchischen Ebene zur nächst höheren.
- Die Entstehung der Vielzellerorganismen durch Vereinigung oder **Endosymbiose** von mehreren Einzellern zu einer neuen Lebensform.

Web-Page for further information:

<http://www.tbi.univie.ac.at/~pks>

