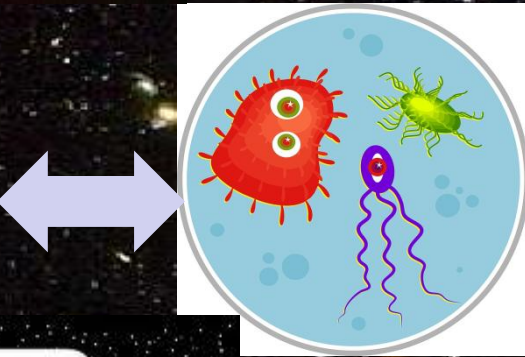
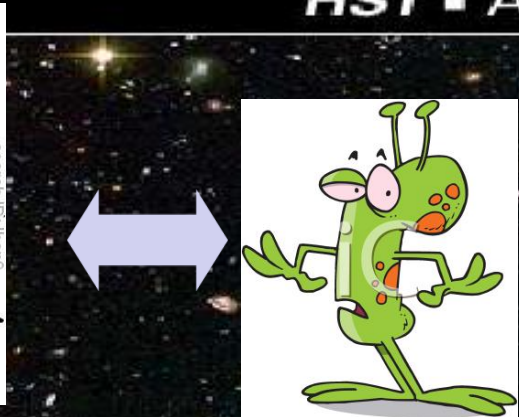
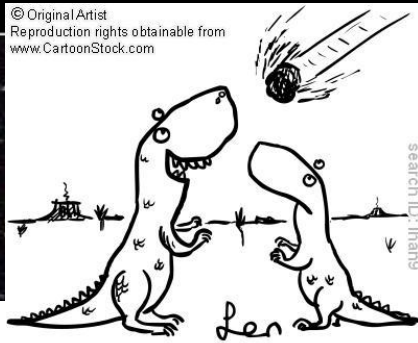


Astrobiologia : a descrição quantitativa da biodiversidade na Terra

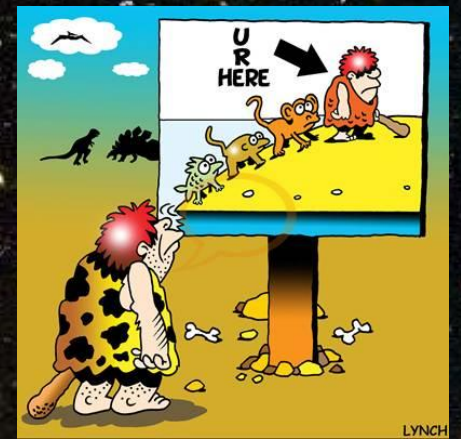
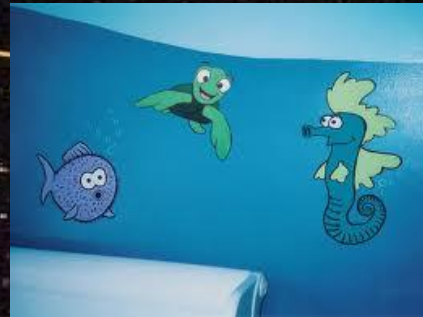


J.E. Horvath
Astronomia IAG - USP

© Original Artist
Reproduction rights obtainable from
www.CartoonStock.com



"Ooh, look! A shooting star.
Make a wish."



HONEST - I HAD
NO IDEA THEY COULD
JUMP THAT HIGH!



*Astrobiologia é
uma gestalt*

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

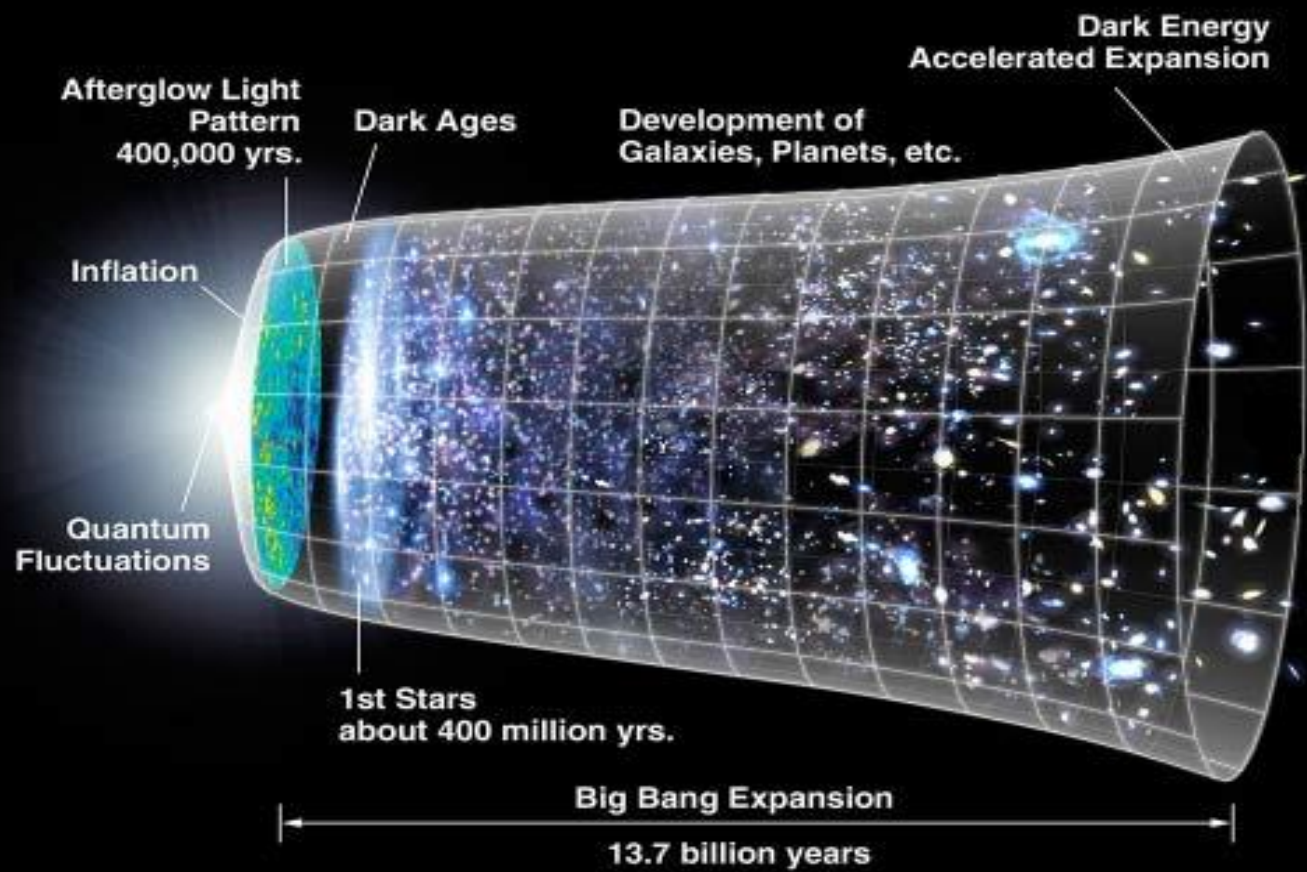
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P)$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{C}{a^2}$$

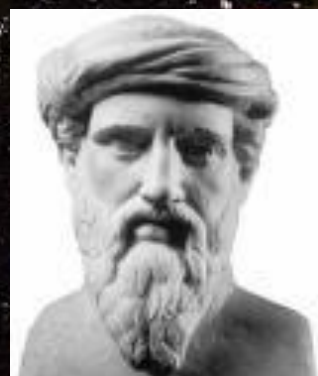
$$\dot{\rho} = -3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + P)$$

As leis físicas (matemática) formam parte do *logos*

$$P = \omega\rho$$



A ciência: Unificação vs. Dualidades



O mundo é uma
estrutura matemática

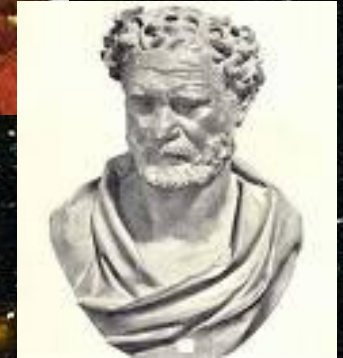
Sistemas complexos
(incluídos os biológicos)
decorrem de uma
estrutura matemática:
o algoritmo



Platão e a invenção
da *forma*

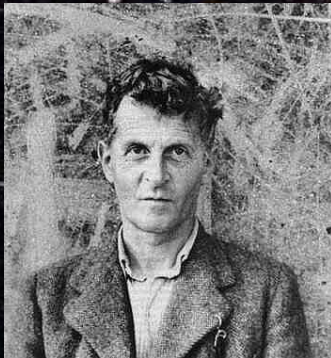


Mente e matéria



O intelecto e a alma são a mesma coisa, composta de átomos

Mecanicismo (*Deus ex Machina* - robôs?) vs. animismo (Hume)...



Leis? Fundamentais?
Meras tautologias?



“Fisicalismo”, Reduccionismo e seus desdobramentos biológicos

“Fisicalismo”: a física determina todos os fatos (não existe nada “sobrenatural”)



...mas não é tão claro se os processos biológicos são **autônomos** dos processos físicos

São autônomos :
Anti- Reduccionismo

Não são autônomos :
Reduccionismo

Epistémico
(barreira impossível
de superar)

Ontológico
(princípios)



Oposto ao
Fisicalismo !!!

Um exemplo importante:
o Princípio de Seleção Natural (PNS)

Se X está mais adaptado que Y num ambiente A, provavelmente haverá uma geração futura G na qual X terá mais descendentes que Y

- 1) O PNS é uma lei **não inferida** a respeito dos sistemas biológicos **emergente** de processos físico-químicos
- 2) O PNS é uma lei **inferida** a respeito dos sistemas biológicos **derivável** das leis da física/química (Reduccionismo)
- 3) O PNS é uma lei **não inferida** a respeito dos sistemas **em geral**, ou seja, fundamental (argumento anti-Reduccionista)

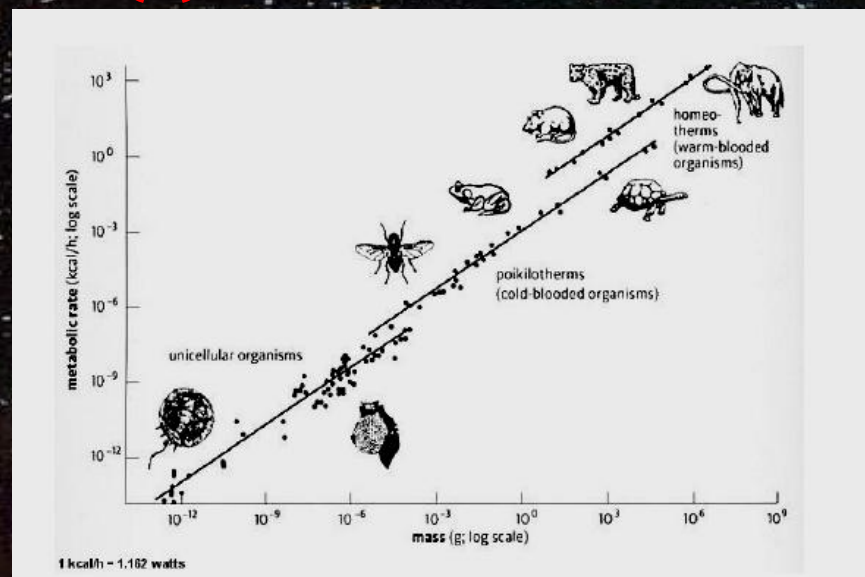
Leis biológicas (?)

**Evolutivas
(no tempo)**

**Não existem,
ou são muito
complicadas**

**Existem,
mas podem ser
reduzíveis às da
Física/Química**

**Matemática
(a priori)**



**Exemplo: alometrias
(relacionadas à Evolução !)**

Não confundir modelos matemáticos/estatísticos com leis fundamentais, ancoradas em princípios gerais

Uma tentativa recente de “ensacolar todo”: A conjectura de Pross

A vida pode ser caracterizada por um estado cinético da matéria orgânica, no qual a capacidade de replicação joga um papel central. Os seres vivos são o resultado de um longo processo de complexificação, possivelmente começando com replicadores inanimados, a exemplo da evolução Darwiniana.

Elementos-chave da conjectura de Pross

- 1) A essência da vida é a replicação
- 2) A vida é associada à existência de um estado fora do equilíbrio termodinâmico do sistema de replicação
- 3) A extensão da população de replicadores da uma medida da sua estabilidade (cinética)
- 4) A evolução consiste em transições dos replicadores no espaço interno para incrementar sua estabilidade cinética

Mas... ainda não aparece uma conexão clara com os princípios fundamentais

Nossa proposta (com O. Martin, UCLV Cuba)

(Origin of Life and Evolution of Biospheres, 43, 151 (2013))

- 1) A essência da vida é a replicação
- 2) A vida é associada à existência de um estado fora do equilíbrio termodinâmico do sistema de replicação na vizinhança de um estado estacionário
- 3) A extensão da população de replicadores da uma medida da sua estabilidade (cinética)
- 4) A evolução, propiciada pelo **ambiente** (não modelada aqui) é o novo estado dos replicadores no espaço interno que **aumenta** sua estabilidade cinética na direção a uma **maior produção de entropia**

Princípios de “mínima ação”

Maupertuis (1744 !!!) : a quantidade W é estacionária (mínimo) na trajetória real

$$W = \int_{q_A}^{q_B} p dq \quad \rightarrow \quad \delta W|_{E=cte} = 0$$

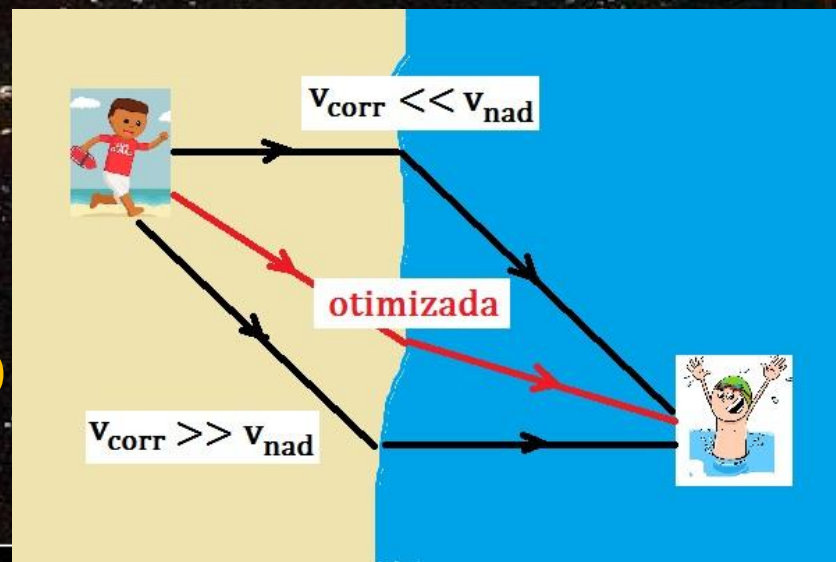
Hamilton (1834) : a ação S é estacionária (mínimo)

$$S = \int_0^T L(q, \dot{q}) dt \quad \rightarrow \quad \delta S|_{T=cte} = 0$$

E as equações de movimento deduzidas (Euler-Lagrange) são

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$$

EXEMPLO



Assim...

$$\frac{d\dot{S}}{dX_i} = 0$$

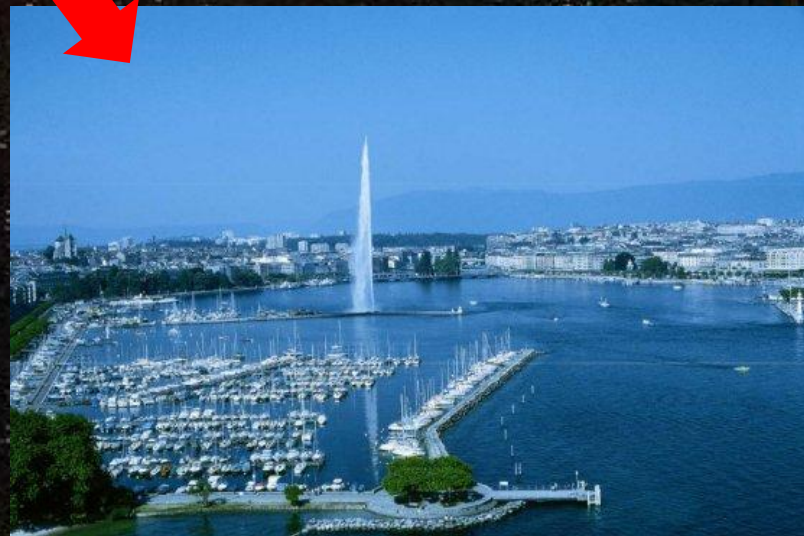
Princípio da Máxima Produção de Entropia
(MEPP)

$$\frac{dN(X_i, \dots)}{dt} = 0$$

Estabilidade Cinética (metabolismo, persistência): vínculo



A evolução é dirigida para aumentar a produção de entropia, se necessário achando um novo caminho metabólico (R. Swenson)



Assim...

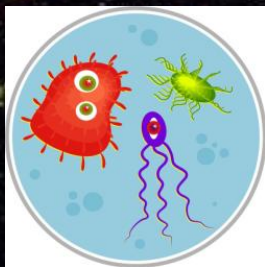
- * As leis da biologia *podem até* ser autônomas, mas nada impede que sejam expressáveis de forma matemática. Ainda estamos procurando estas leis e a conexão com o resto da biologia que conhecemos (a grande síntese)
- Quanto mais clara seja a conexão com princípios fundamentais, melhor
- É bom, no meio de tanto experimento, gráficos, etc., repensar um pouco o que estamos fazendo de fato

SOYEZ RÉALISTES
DEMANDEZ
L'IMPOSSIBLE



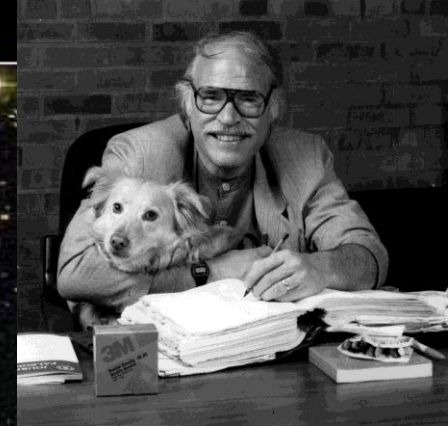
**I'm smiling
because I don't know
what the hell is going on**

Uma descrição matemática da evolução da biodiversidade terrestre

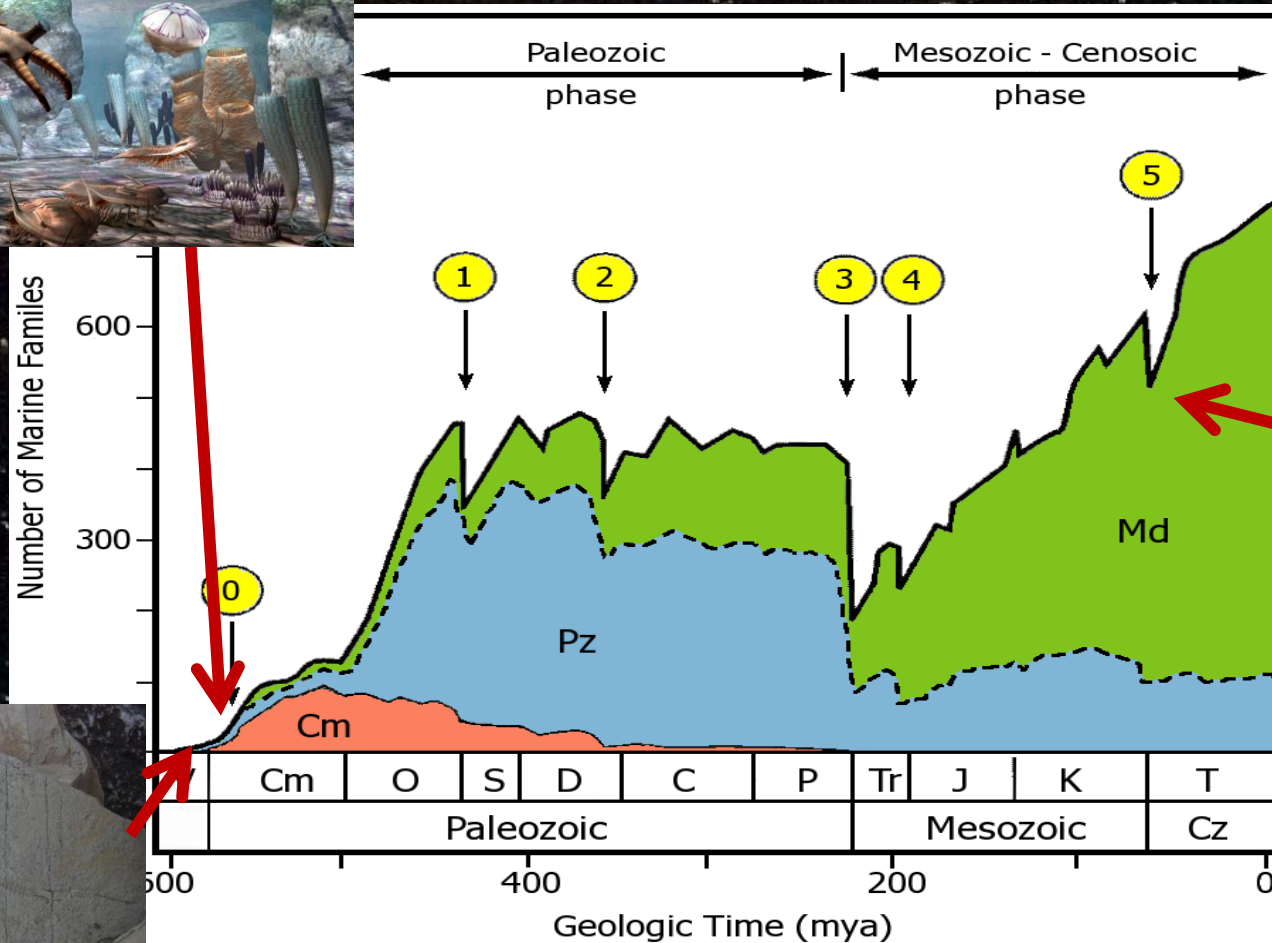


A história da biodiversidade

O crescimento sistemático (?) e as "Big Five"



Jack Sepkoski



Família (Felidae), gênero e espécie

(Felis?) Puma concolor



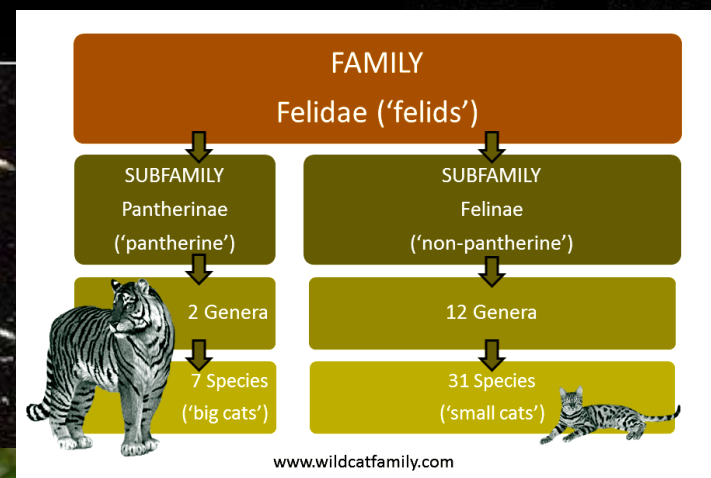
Panthera onça



Felis silvestris catus



Panthera leo



Populações na abordagem de Lotka-Volterra

Malthus (recursos ilimitados): $N(t) = N(t = 0) \times \exp(rt)$

De imediato podemos escrever alternativamente:

$$\frac{d^2(\ln N)}{dt^2} = 0$$

A abordagem de Lotka-Volterra é “aristotélica”, a de segunda ordem de Ginzburg-Colvayn é “galileana” (inercial)

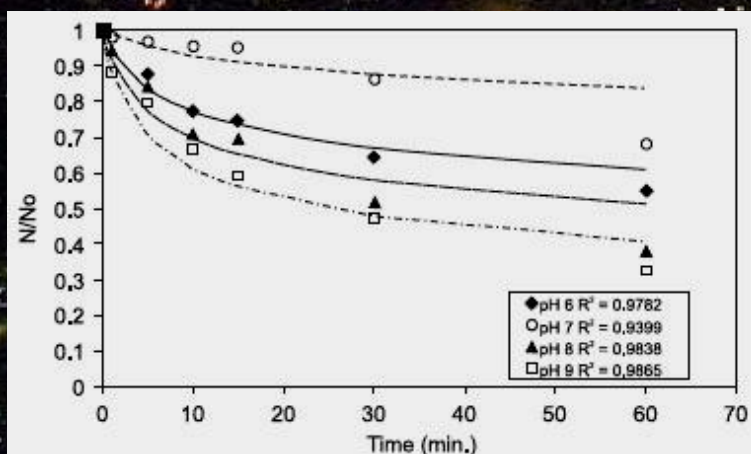


Figure 2. Kinetics of *Escherichia coli* inactivation using different initial pH values ($[H_2O_2]_0 = 100$ mg/L; \blacklozenge pH 6, \circ pH 7, \blacktriangle pH 8, \square pH 9; symbols: experimental; lines: simulation)

Morte “acelerada” das bactérias:
a taxa r é variável

A hipótese de trabalho: seja N_G o número de *genera* (biodiversidade)

Na ausência de perturbações, o N_G vai permanecer constante. Se as “forças ecológicas” estão agindo, teremos uma dinâmica do tipo inercial

$$\frac{d^2 N_G}{dt^2} = 0$$

estado estacionário, sem perturbações

(a hipótese de Mc Crea & Brandon (2010): aumento na biodiversidade em condições estacionárias pode ser incluído se a constante de integração é diferente de 0...)

As “forças ecológicas”

Uma das propostas mais simples é que a variação da taxa seja proporcional ao próprio N_G

$$\alpha(N_G - N_G^{max})$$

Número máximo de genera, em analogia com a *carrying capacity* em L-V

“Atrito ecológico”: o ambiente retarda a resposta do N_G e pode ser modelado como

$$\beta \dot{N}_G$$

Este termo introduz uma escala de *damping* $\tau \equiv 1/\beta$ relacionada à ação da biosfera na relaxação das perturbações

Outros termos não lineares são possíveis (e *devem* existir, vide logo a seguir)
Mas por ora vamos considerar a equação dinâmica

$$\frac{d^2 N_G}{dt^2} + \beta \frac{dN_G}{dt} + \alpha(N_G - N_G^{max}) = f$$

Com f arbitraria representando a ação encima da biodiversidade

A equação dinâmica é similar à de um *oscilador*

Soluções estacionárias

$$N_G(t) = A \exp(i\omega_1 t) + B \exp(i\omega_2 t) \quad \text{com} \quad \omega_{1,2} = (i\beta \pm \sqrt{-\beta^2 + 4\alpha})/2$$

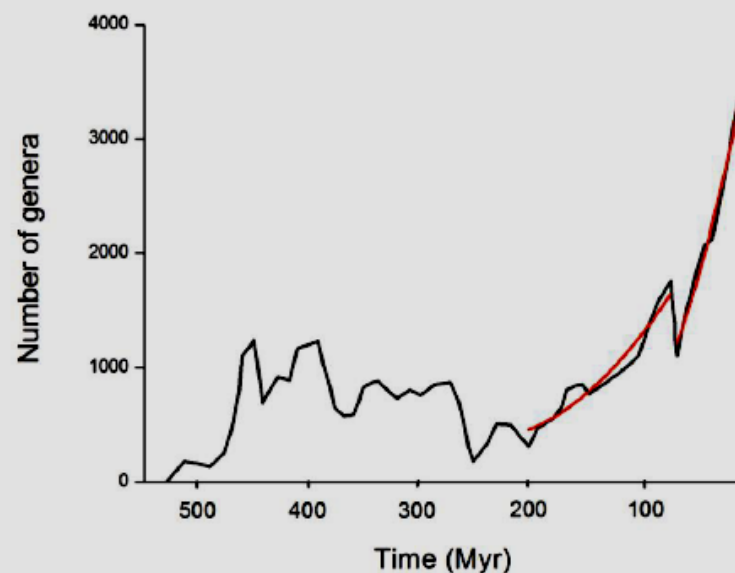
Dependendo da relação de α com $\beta^2/4$ pode haver comportamento amortecido, amortecido crítico ou super-amortecido

Se considerarmos $f(t) = \delta(t - t_0)$ então obtemos a função de Green, particularmente importante para o estudo de perturbações instantâneas e a posterior recuperação (Big Five !!!!!). A função de Green é

$$N_G \equiv G(t, t_0) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ A(t_0) \exp(\lambda_1 t) + B(t_0) \exp(\lambda_2 t) & t > t_0 \end{cases} \quad \text{onde} \quad \lambda^2 + \lambda\alpha + \beta = 0$$

Comparação com os registros fósseis

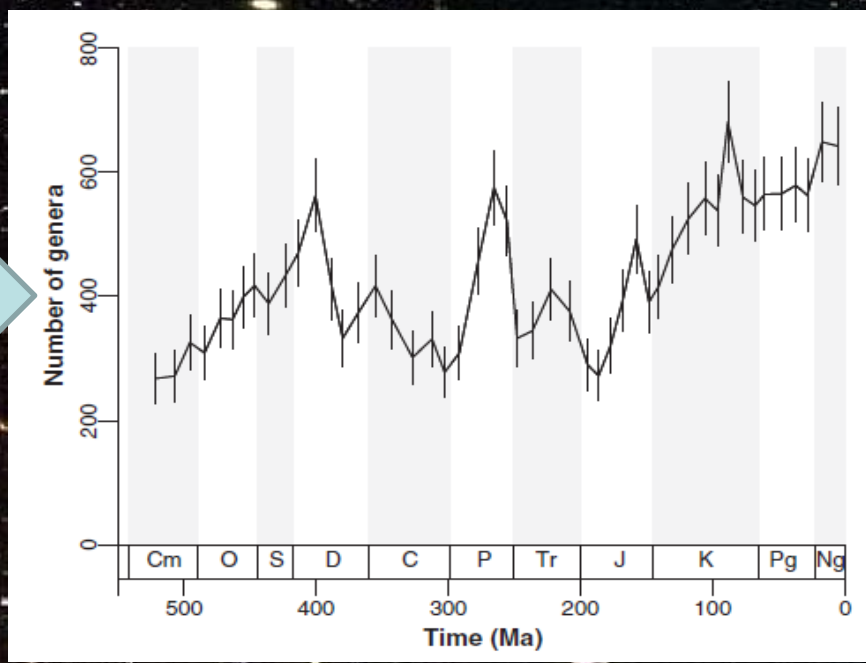
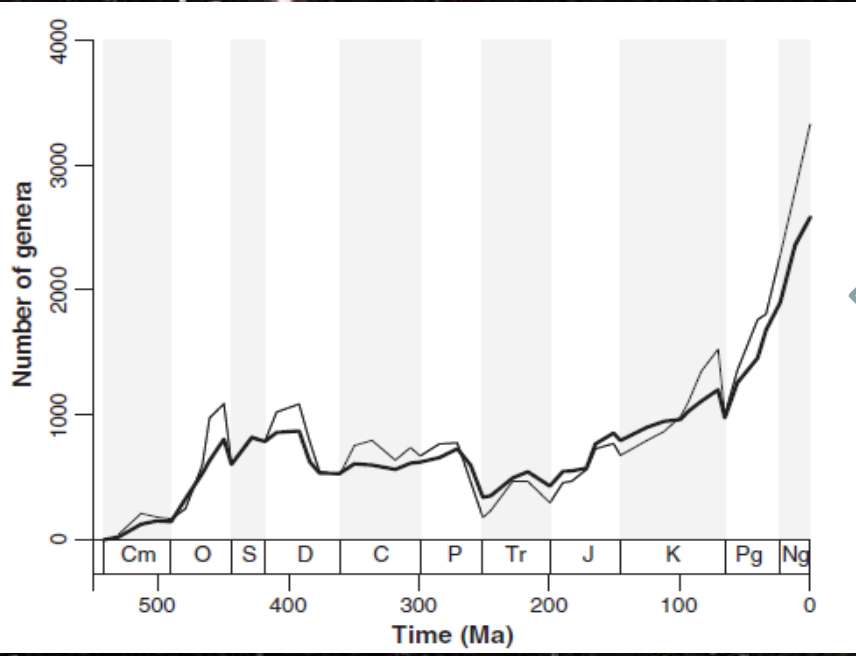
Figure 1. Best fits to the long-term recovery after the Triassic-Jurassic (left red segment) and Cretaceous-Paleogene (right red segment) extinctions. The black curve is the data by Sepkoski [22], which suggests a more dramatic growth for the latter and overall for N_G . The model performs well within a quadratic evolution stemming from the solutions of $(d^2N_G/dt^2) = \text{constant}$.



É possível obter uma boa descrição da evolução temporal antes e depois das extinções sem grande esforço, devido às derivadas de segunda ordem (estado estacionário !)

Alroy et al. vs. Sepkoski

N_G^{max} ?



Sepkoski: synoptic data, crescimento exponencial? depois do K-T

Alroy et al: binning dos dados e tratamento dos vieses estatísticos, eliminação de repetências etc. Biodiversidade aumenta moderadamente

Alta resolução temporal no teste da fase transitória

No registro fóssil, não há como resolver temporalmente as extinções, já que os *bins* temporais não podem ser menores que 5-10 Myr

Mas recentemente, os geólogos conseguiram datações estratigráficas de alta precisão calibrando os cronómetros U-Pb e outros. A resolução temporal aumentou para $< 10^4$ yr

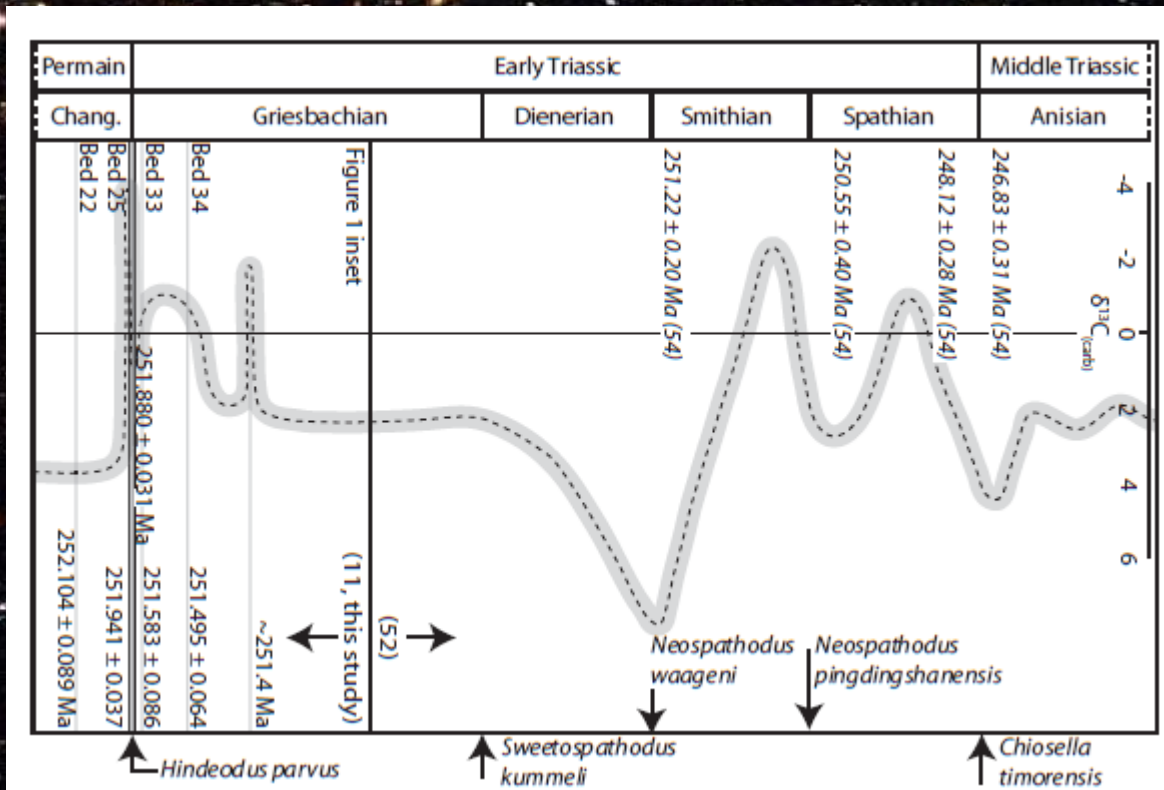
High-precision timeline for Earth's most severe extinction

Seth D. Burgess^{a,1}, Samuel Bowring^a, and Shu-zhong Shen^b

^aDepartment of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139; and ^bState Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, People's Republic of China

Edited by Dennis Kent, Rutgers University and Lamont-Doherty Earth Observatory, Palisades, NY, and approved January 2, 2014 (received for review September 18, 2013)

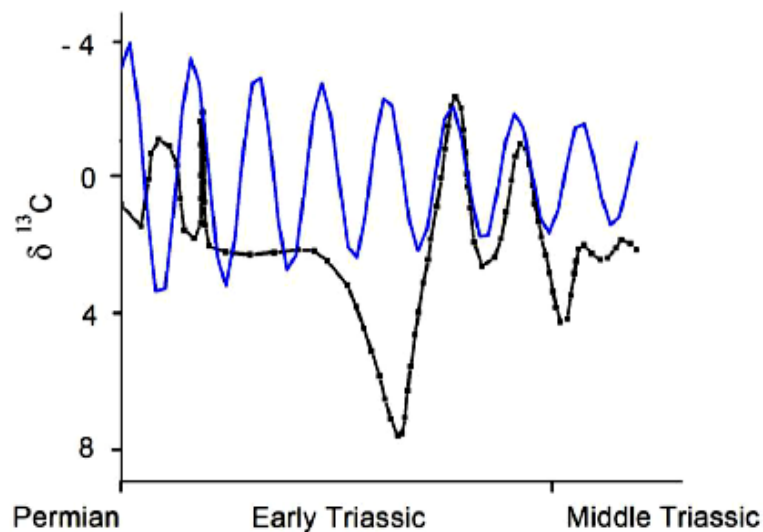
A extinção do Permo-Triássico aconteceu em $< 60 \pm 48 \text{ kyr}$
 O registro de $\delta^{13}\text{C}_{(\text{carb})}$ é



Supondo que N_G segue as incursões $\delta^{13}\text{C}_{(\text{carb})}$

Comparamos com a função de Green (supondo que a perturbação violenta parou logo...

Figure 2. A comparison between the Green function response Equation (5) (blue curve) with the time-resolved data corresponding to the Permo-Triassic extinction event analyzed by Burgess, Bowring and Shen [23] (black curve). The origin of the time axis has been set to the end of the extinction interval given by these authors. See the text for details.



O acordo não é bom, mas sugere que o $\tau \equiv 1/\beta$ está presente nos dados, possivelmente relacionado à escala de recuperação de Kirchner & Weil (2000) de 5-10 Myr ou à periodicidade de 26 Myr defendida por Raup & Sepkoski (1986)

Conclusões

- Uma descrição matemática “galileana” da biodiversidade é possível e oferece uma simplificação importante nos conceitos fundamentais para este problema
- A ideia de um comportamento “inercial” + forças ecológicas simples parece representar os estados estacionários com precisão
- * Os transitórios resolvidos temporalmente não são bem descritos pela função de Green da equação dinâmica, esta última deve ser modificada (mas ainda não sabemos como...). Um oscilador estocástico deve fornecer uma descrição mais acurada

<https://sites.google.com/usp.br/livro-astrobiologia>

ASTROBIOLOGIA UMA CIÊNCIA EMERGENTE

Organização

Douglas Galante
Evandro P. Silva
Fabio Rodrigues
Jorge E. Horvath
Marcio G. B. Avellar



USP

TIKINET

- 23 **CAPÍTULO 1
ASTROBIOLOGIA**
Estudando a vida no Universo
- 43 **CAPÍTULO 2
A ORIGEM DOS ELEMENTOS**
- 61 **CAPÍTULO 3
ASTROQUÍMICA**
A formação, a destruição e a busca de moléculas prebióticas no espaço
- 75 **CAPÍTULO 4
PLANETAS HABITÁVEIS**
Onde estão os lugares no Universo adequados ao nosso ou outros tipos de vida?
- 95 **CAPÍTULO 5
QUÍMICA PREBIÓTICA**
A química da origem da vida
- 115 **CAPÍTULO 6
ORIGEM DA VIDA**
Estudando a vida no Universo
- 137 **CAPÍTULO 7
A EVOLUÇÃO DA VIDA EM UM PLANETA EM
CONSTANTE MUDANÇA**
- 155 **CAPÍTULO 8
VIDA AO EXTREMO**
A magnífica versatilidade da vida microbiana em ambientes extremos da Terra
- 173 **CAPÍTULO 9
METABOLISMOS POUCO CONVENCIONAIS**
- 197 **CAPÍTULO 10
QUANDO OS ANIMAIS HERDARAM O
PLANETA**
- 217 **CAPÍTULO 11
BUSCA DE VIDA FORA DA TERRA**
Estudando o Sistema Solar
- 235 **CAPÍTULO 12
LUAS GELADAS DO SISTEMA SOLAR**
- 277 **CAPÍTULO 13
BUSCA DE VIDA ALÉM DO SISTEMA SOLAR**
- 293 **CAPÍTULO 14
O SETI E O TAMANHO DO PALHEIRO...**
Otimismo e pessimismo na busca de nosso alter ego extraterrestre
- 315 **CAPÍTULO 15
FUTURO DA VIDA NA TERRA E NO UNIVERSO**
- 341 **CAPÍTULO 16
EXPLORAÇÃO INTERESTELAR**
Motivações, sistemas estelares, tecnologias e financiamento