

# 生命進化の統一理論

星雲遭遇・放射性火山灰・大絶滅

戎崎俊一(理化学研究所)

丸山茂徳(東工大・岡山大)

# 種分化は本当に可能なのか？

- ある個体のDNAの一つ突然変異が起こったとする
- もし、交雑不可能だったら
  - 雑種は不妊で子孫はできない
- もし、交雑可能だったら
  - 最初は必ず異形接合
  - 固定確率:  $1/2N_e$  ( $N_e$ : 有効個体数)、固定しなければ失われる(中立進化)
  - 個体数が多い種では新しい変異の固定は極めてまれ
    - 遺伝的にきわめて安定

どちらにしる難しそう

# 種分化のスピード

- 時期により大きく変動する
  - カンブリア爆発
  - 大絶滅時、またはその直後は速い
  - 断続平衡説
- 場所により変動する
  - 進化のホットスポット：東アフリカ地溝帯
  - 通常の100倍以上
  - 千-万世代で種分化？：シクリッド、人類

# 種とは何か?

- 生物学的定義: 種は、他の集団と生殖隔離されているも交雑可能な自然集団 (Mayr, 1940).
  - 交雑可能なグループ
  - 他の種との雑種は不妊(減数分裂でできる配偶子が不完全)
- 生殖隔離
  - 成立したばかりの若い種同士は、ぎりぎり交雑可能
    - 亜種
    - 犬、オオカミ、コヨーテ
    - 個体数が少ない亜種は交雑で消滅
    - ダーウィンフィンチは交雑可能 (Grant and Grant 1997)

# 大陸-島モデル

$k$ : 島グループにおける変異の数

$$\frac{dk}{dt} = \kappa \left( \mu - \frac{m}{2} kw(k) \right)$$

$\kappa$ : 固定確率  
 $\mu$ : 変異率  
 $m$ : 移民率  
 $w(k)$ : 雑種子孫の生存率

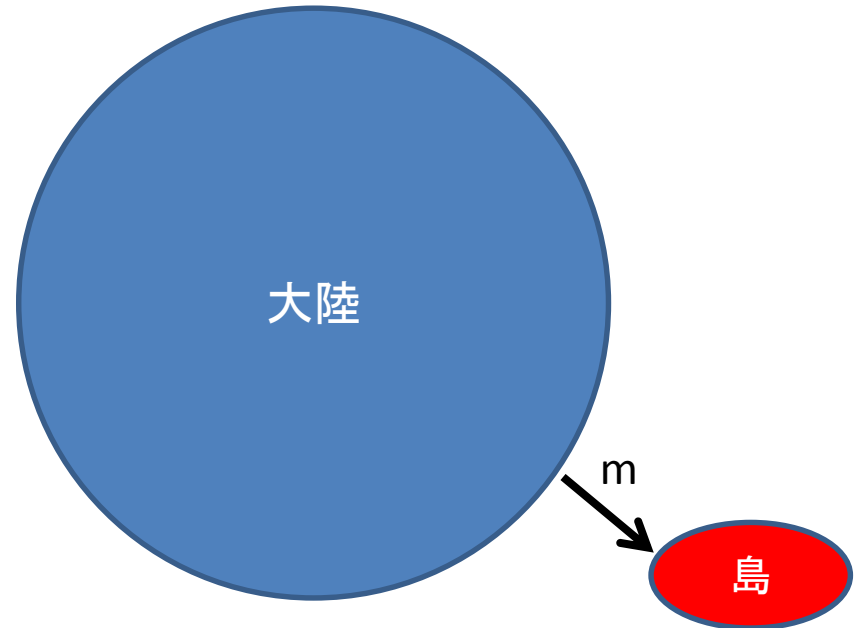
- $mN_e$  1世代での移民の数
- $\mu N_e$  1世代での変異発生

$$- w(k) = (1 - s)^k$$

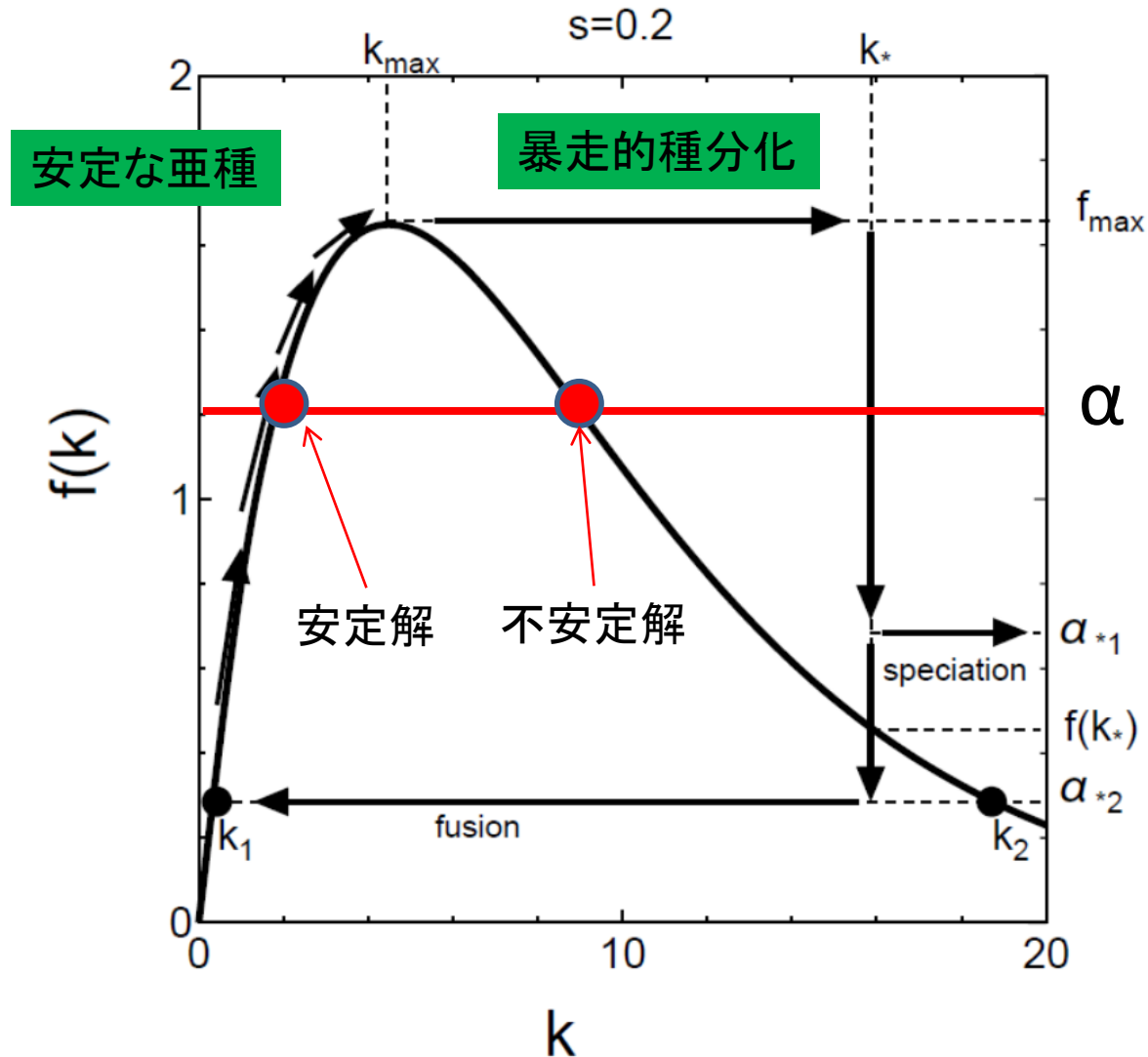
$$\frac{2}{m\kappa} \frac{dk}{dt} = \alpha - f(k)$$

$$- \alpha = \frac{2\mu}{m}$$

$$- f(k) = k(1 - s)^k$$

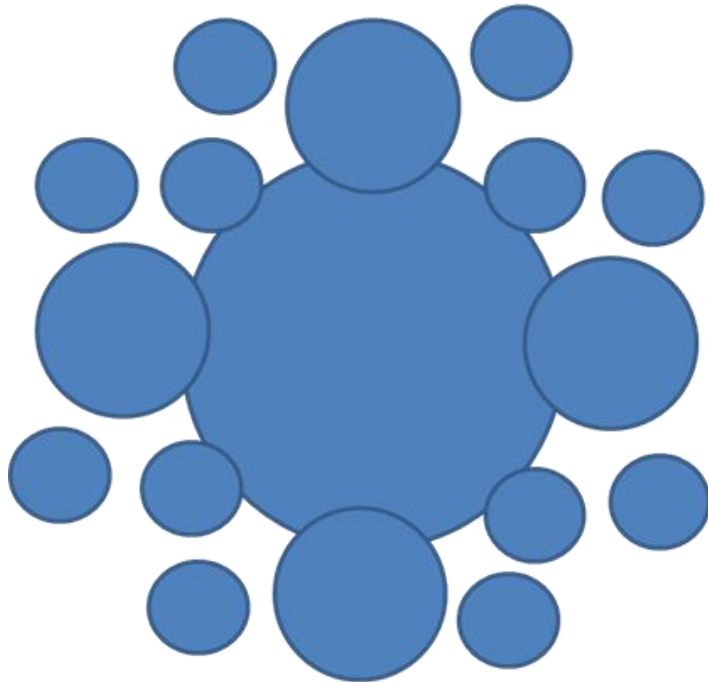


# 変数 $\alpha = 2\mu/m$ の時間変化



$\alpha = \frac{2\mu}{m}$  は破局時に大きい

Normal

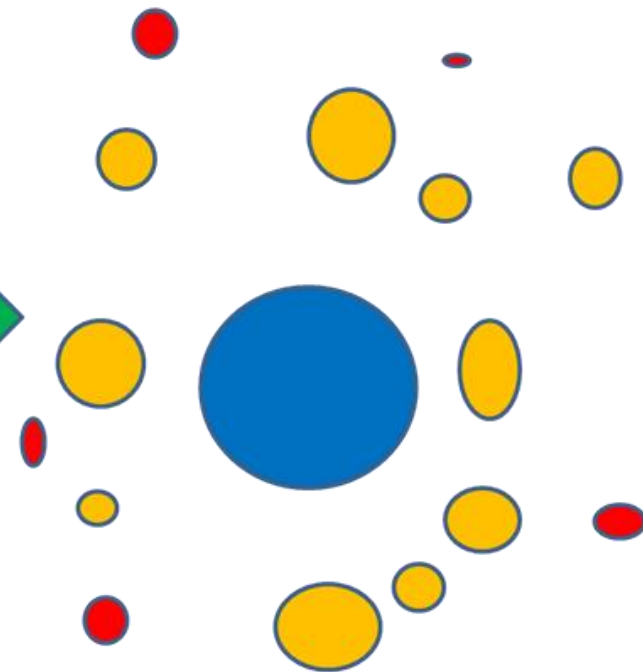


large  $N_e$ ,  $m$ , and small  $\mu$



large  $S$  and  $\alpha$

Disaster



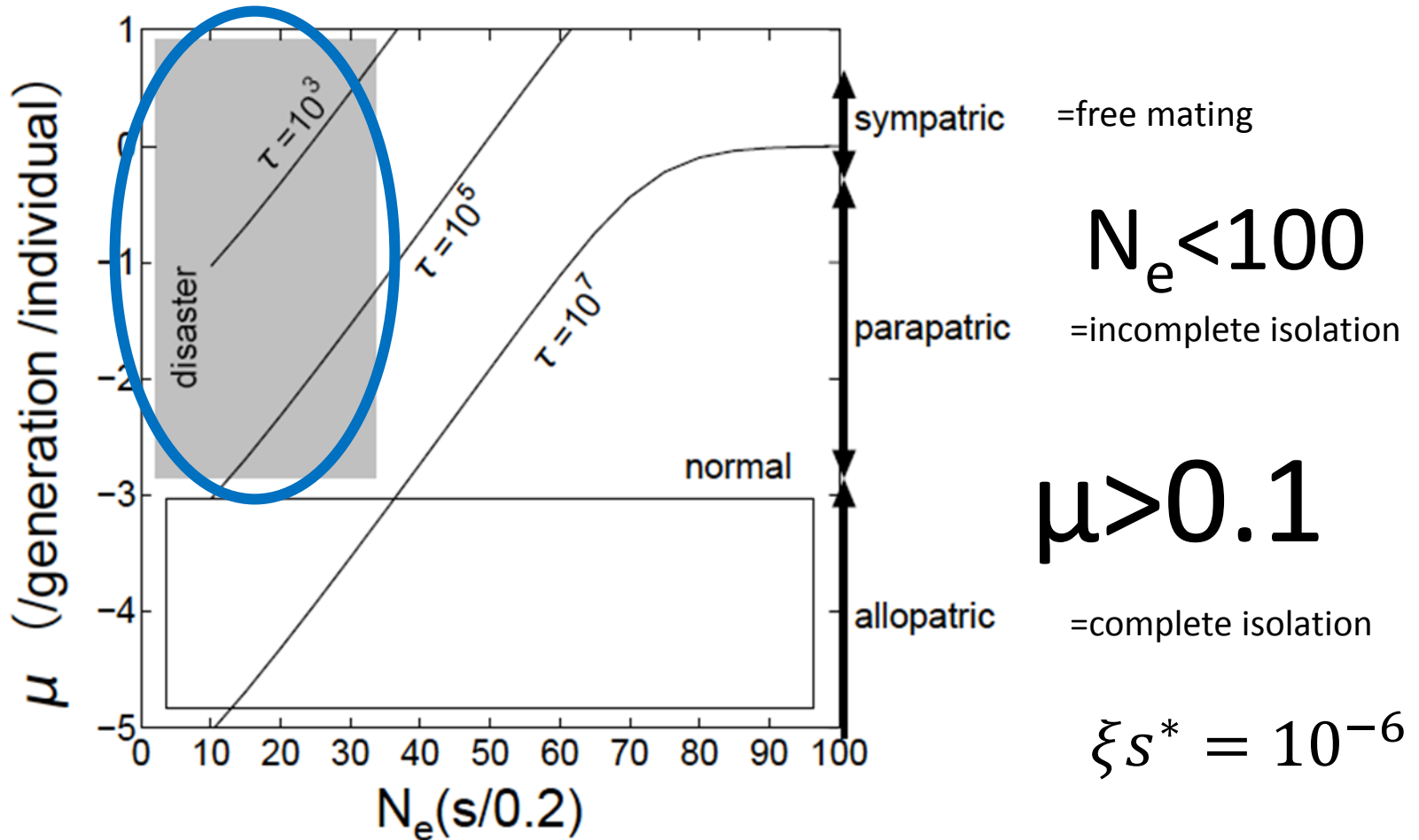
small  $N_e$ ,  $m$ , and large  $\mu$



small  $S$  and  $\alpha$

Ebisuzaki and Maruyama (2015) をもとに作成

# 種分化の条件 破局と絶滅に瀕すること

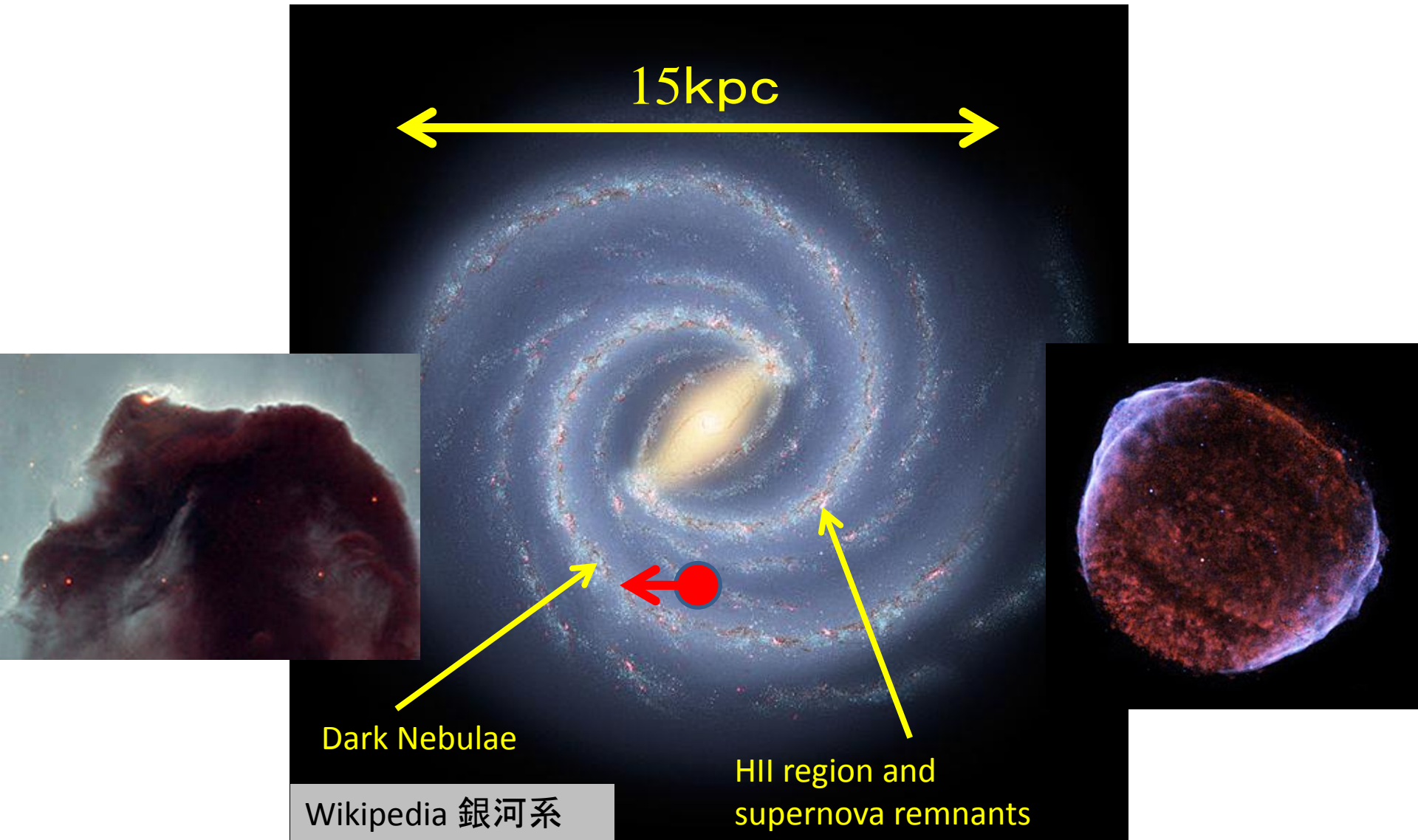




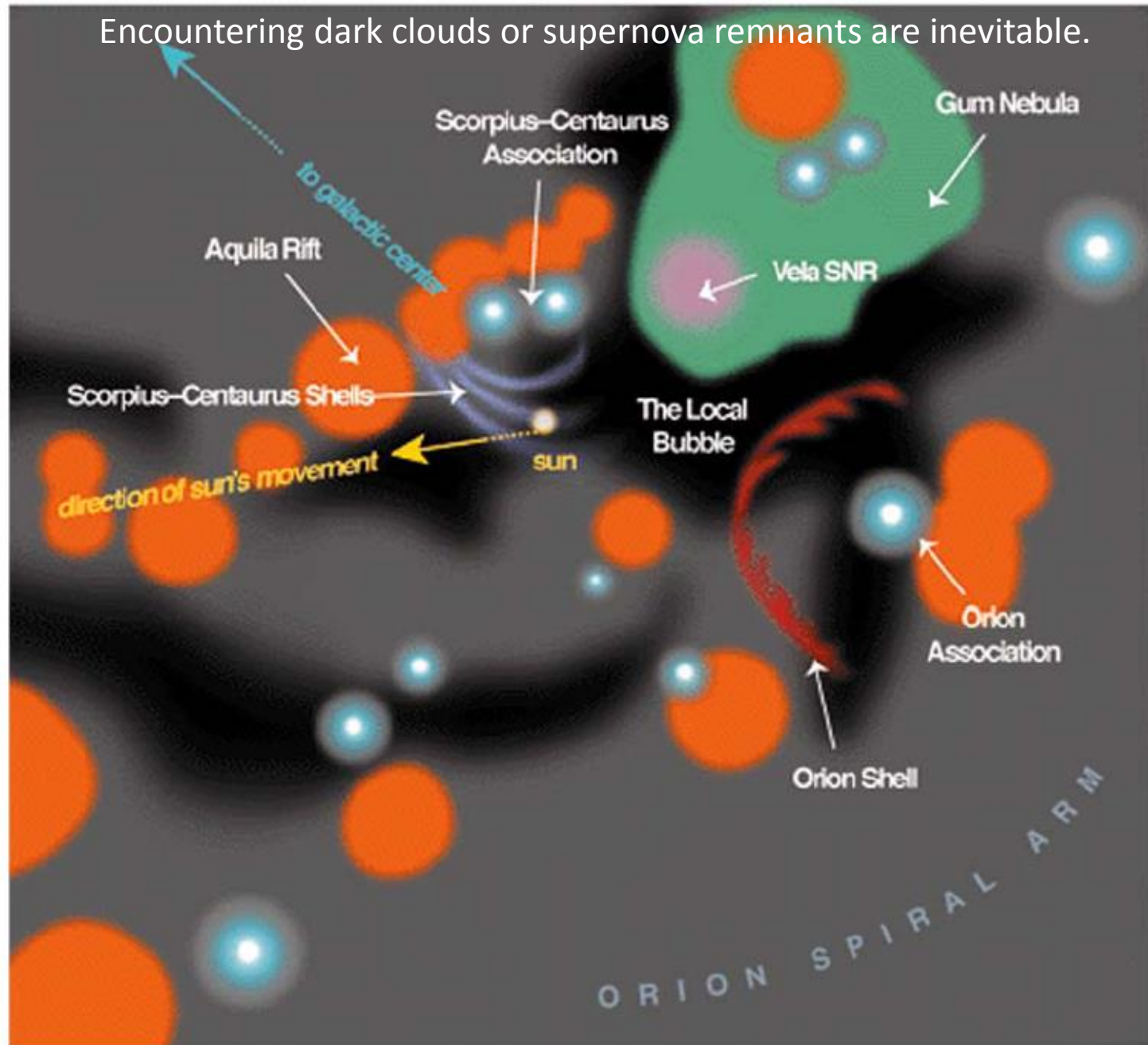
# 二つの破局

1. 全球的な破局: 超新星遭遇
2. 局所的な破局: 放射性火山灰の降下

# 天の川銀河



Encountering dark clouds or supernova remnants are inevitable.



■ molecular clouds

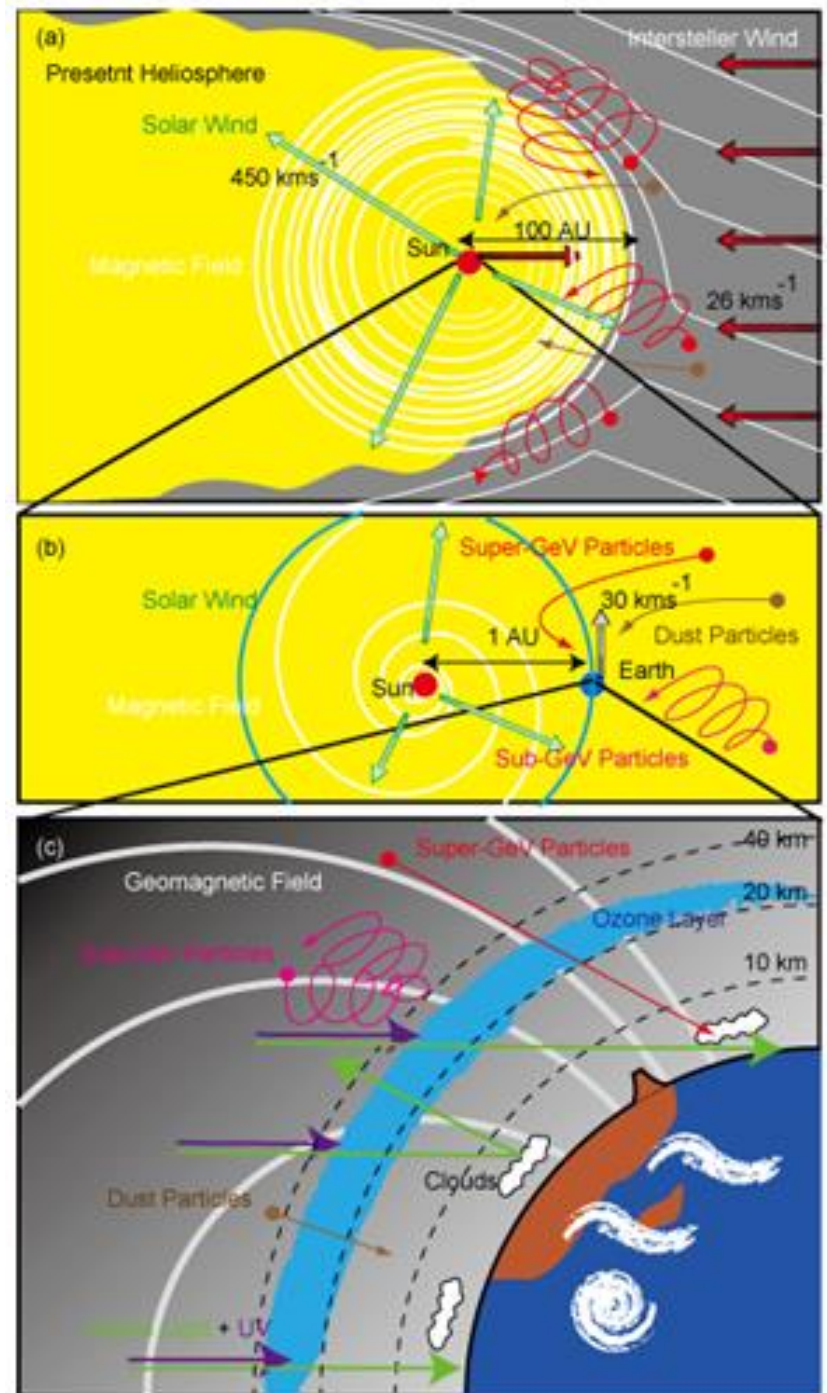
■ diffuse gas

400-500 pc view (Frisch 2000)

# 今の太陽系

## • 3つの盾に守られている

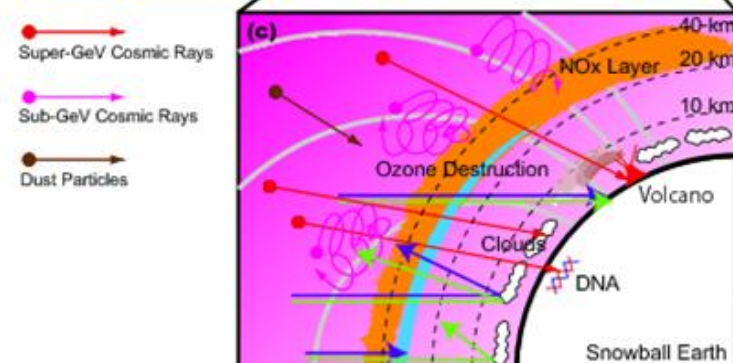
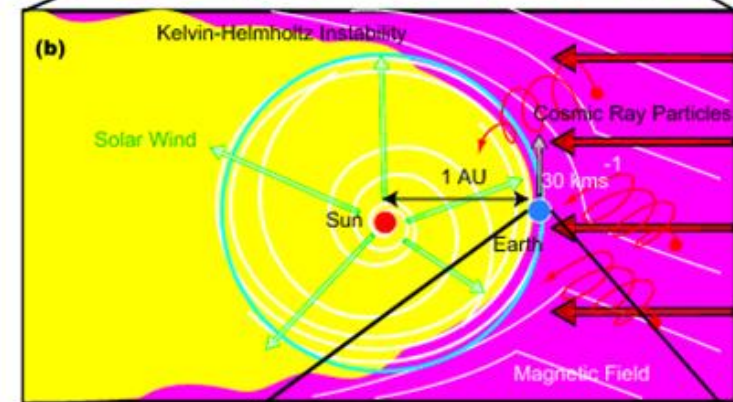
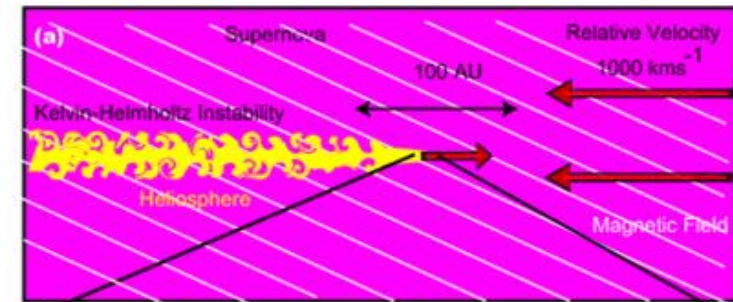
- 太陽圏境 (100AU) → 銀河宇宙線と宇宙ダストの浸入を防ぐ
- 地球磁気圏宇宙線の浸入を防ぐ
- オゾン層 → 紫外線の浸入を防ぐ (UVB)



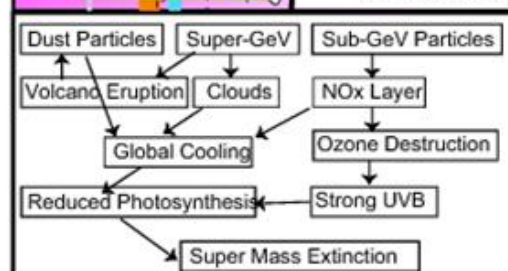


# 超新星遭遇 盾が三つとも機能し ない 全球的破局

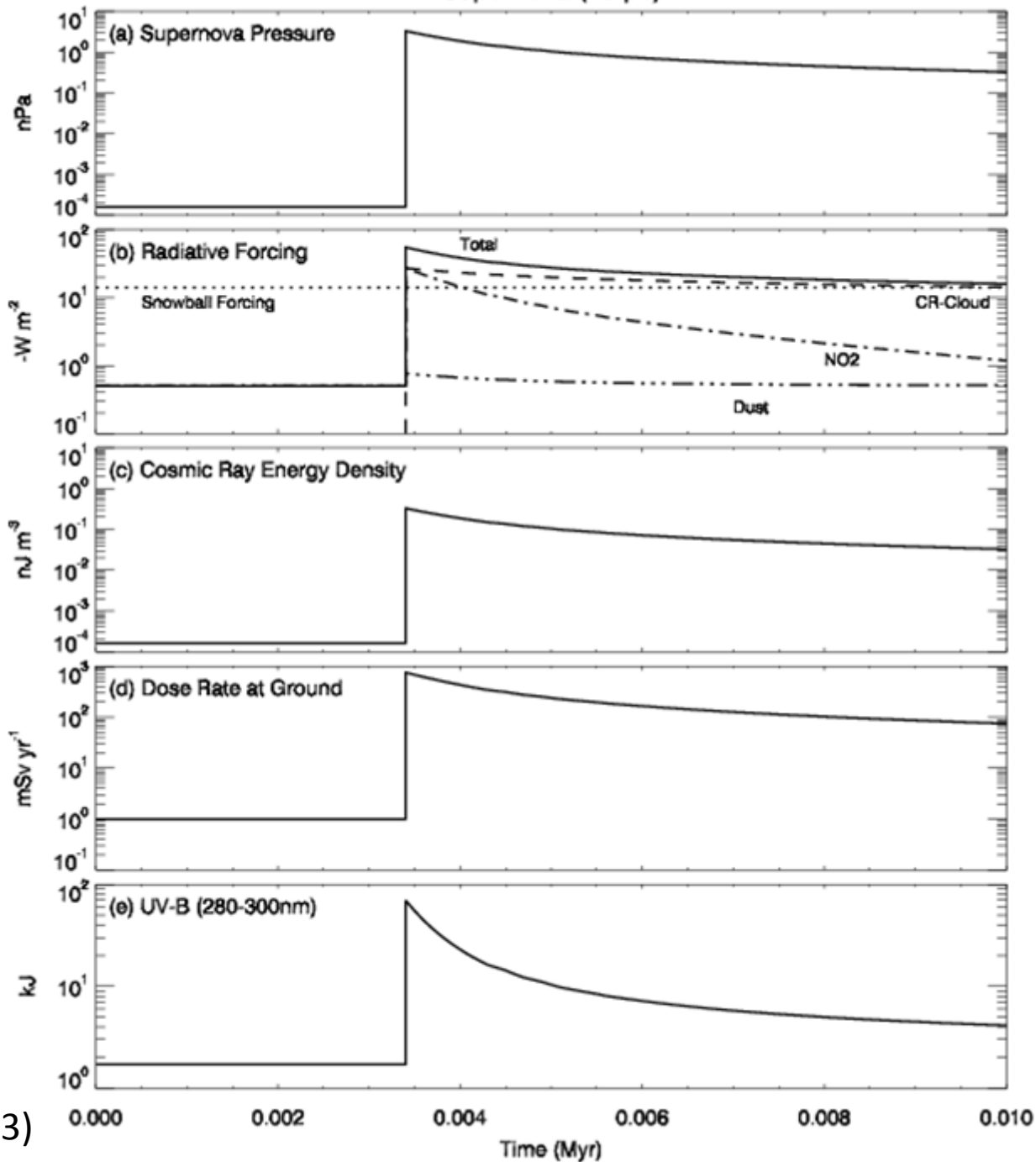
- 寒冷化
  - Super ice age (10kyr)
  - Cloud coverage increases by GCR
- 高い放射線レベル: 1 Sv/yr
- オゾン層の破壊
  - UV-B 放射
  - 動物の繁殖率の低下



- Super-GeV Cosmic Rays
- Sub-GeV Cosmic Rays
- Dust Particles

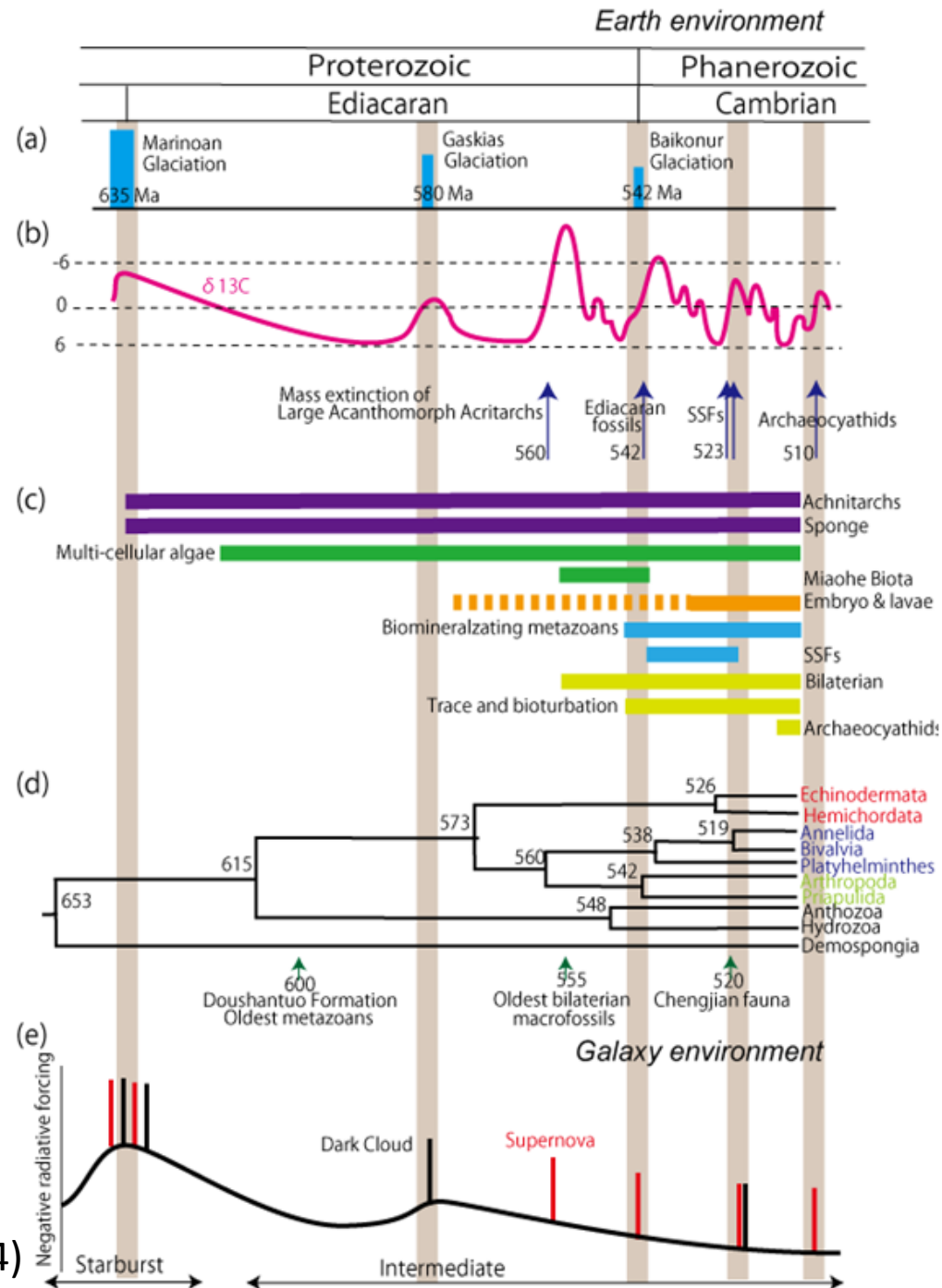


# Supernova (10 pc)



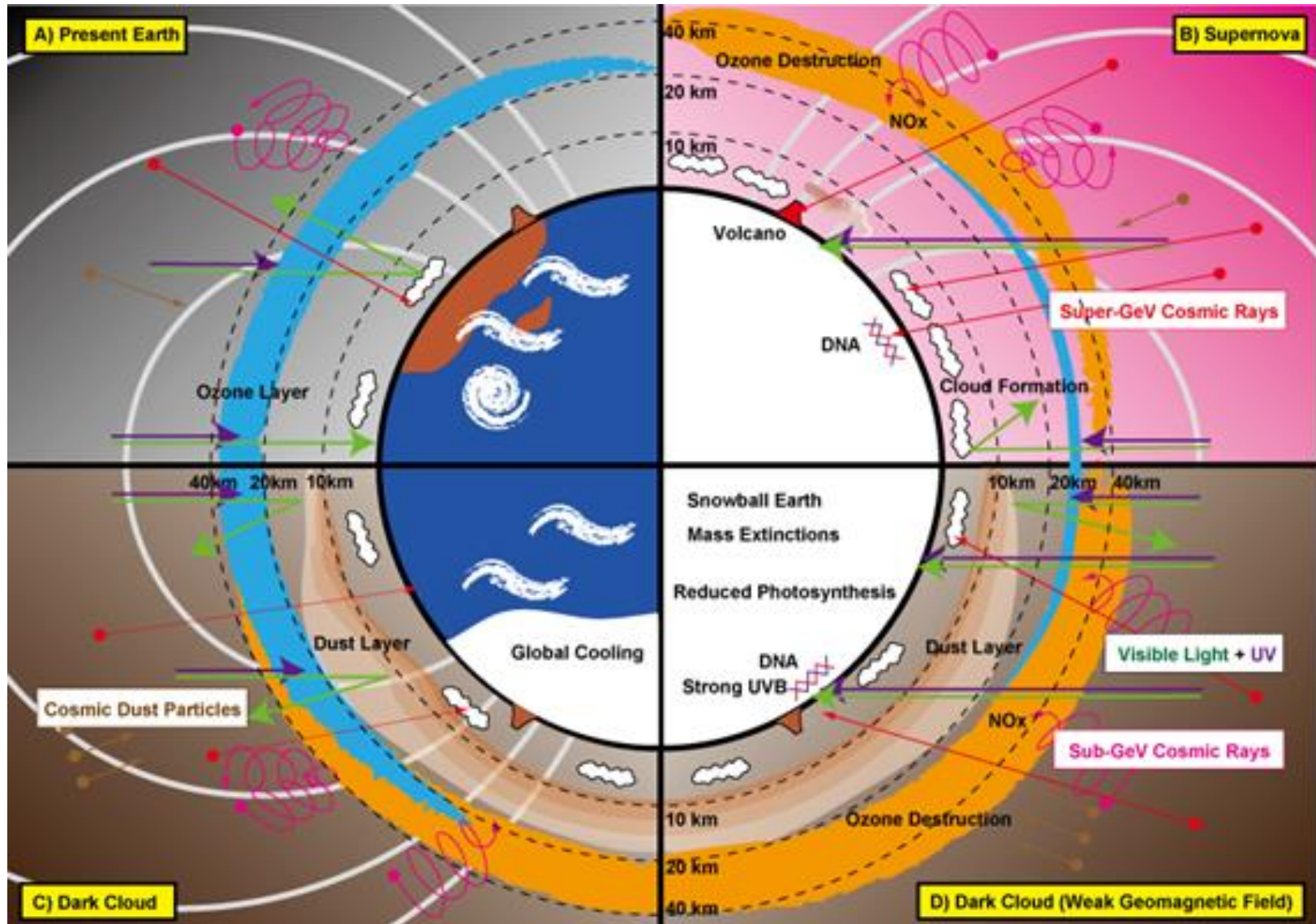
# Ediacaran/Cambrian Explosion (2)

- At least five mass extinctions
- Corresponds to excursion in  $\delta^{13}\text{C}$
- New body plan appeared after each mass extinctions



# Nebula Winter

Kataoka et al. (2014)



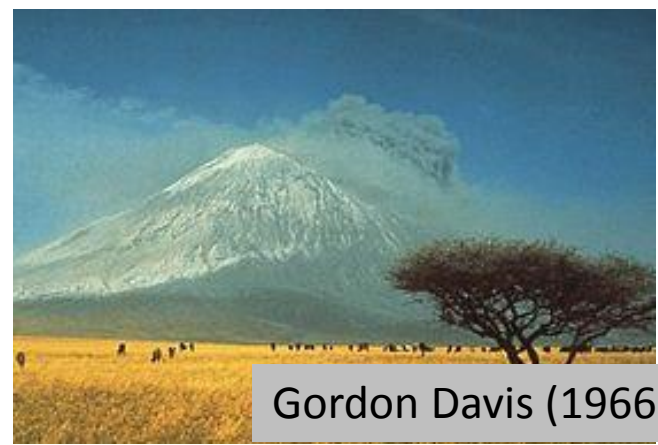


# 二つの破局

1. 全球的な破局: 超新星遭遇
2. 局所的な破局: 放射性火山灰の降下

# 強アルカリマグマの噴火

## 局所的破局



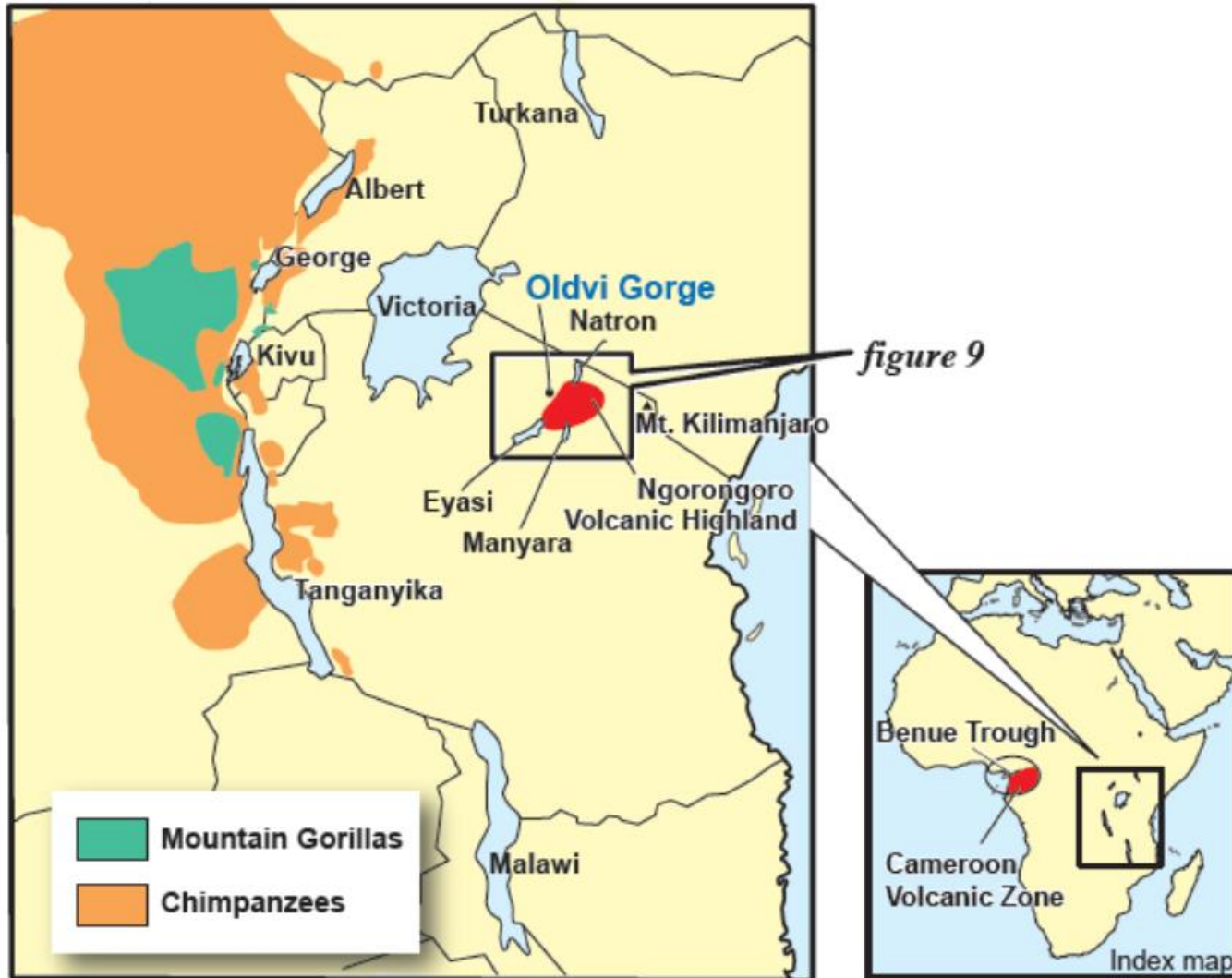
<http://stonesagasi.seesaa.net/index-4.html>

- リフト帯にのみ
- リン酸とランタノイド元素に富む
  - 高い放射能
    - $\sim 10^5$  Bq/kg: トリウムとウラン
- 火山灰降下

$$R = 2 \times 10^{19} \text{ Bq} \left( \frac{\rho}{5 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}} \right) \left( \frac{E}{100 \text{ km}^3} \right) \left( \frac{r}{10^4 \text{ Bqkg}^{-1}} \right)$$

# African Rift Valley

Ebisuzaki and Maruyama (2015)



# シクリッド

- 真水に住む魚
- 子育てをする
- ビクトリア湖: 12,400年前に完全に干上がった
- 300-500 固有種
- 数千年で種分化
- 千一萬世代で

シクリッドはなぜそんなに特別なのか？

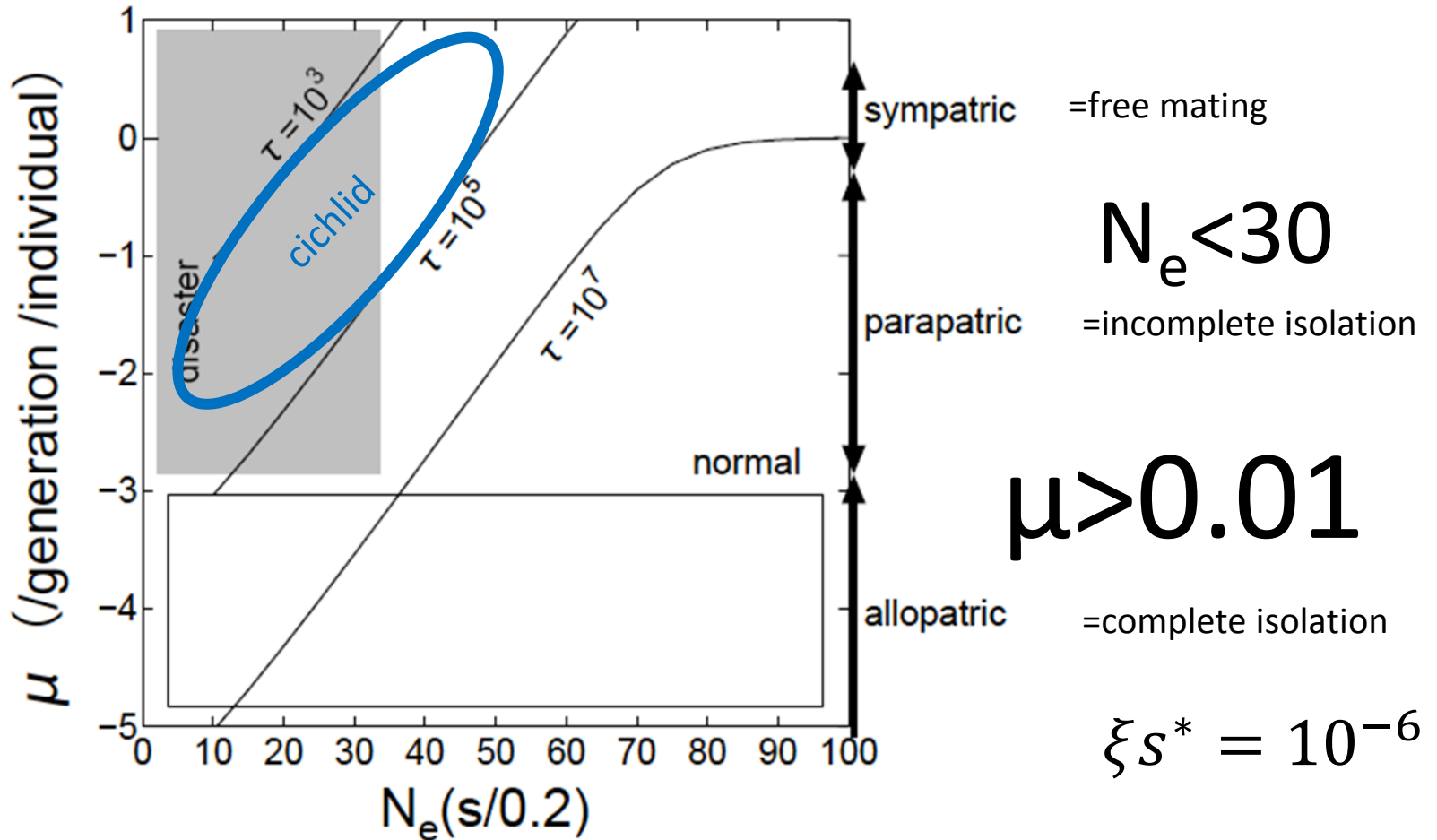
琵琶湖のフナはなぜ進化しない？



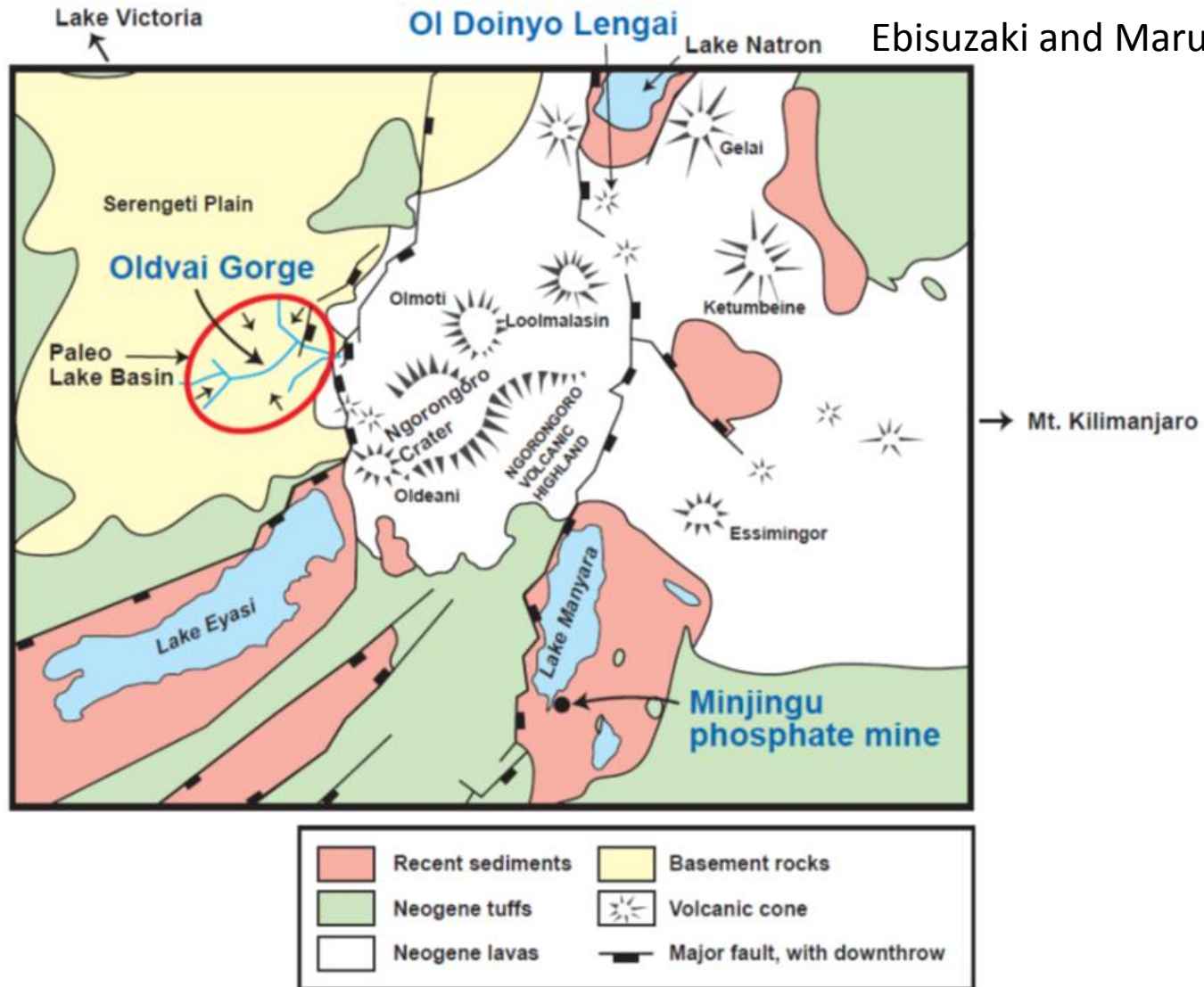
# Cichlid in African Lakes

Lake	Area (km <sup>2</sup> )	Endemic cichlid species	Age of lake (Myr)	Age of flock (Myr)	Net diversification interval (kyr)
Victoria	68,635	~500	0.0146-0.75	0.0146-0.75	2.6-135
Malawi	29,604	659-1000	0.7-2	0.7-1.8	101-277
Tanganika	32,893	170-250	5-12	5-12	764-1139
Nobugabo	29	5	0.004	0.004	<4
Barombi Mbo	4	11	1	0.9	375
Berman	0.6	9	<2.5	0.5	<277

# Necessary condition for speciation disaster and endangerment



# オールドバイ溪谷





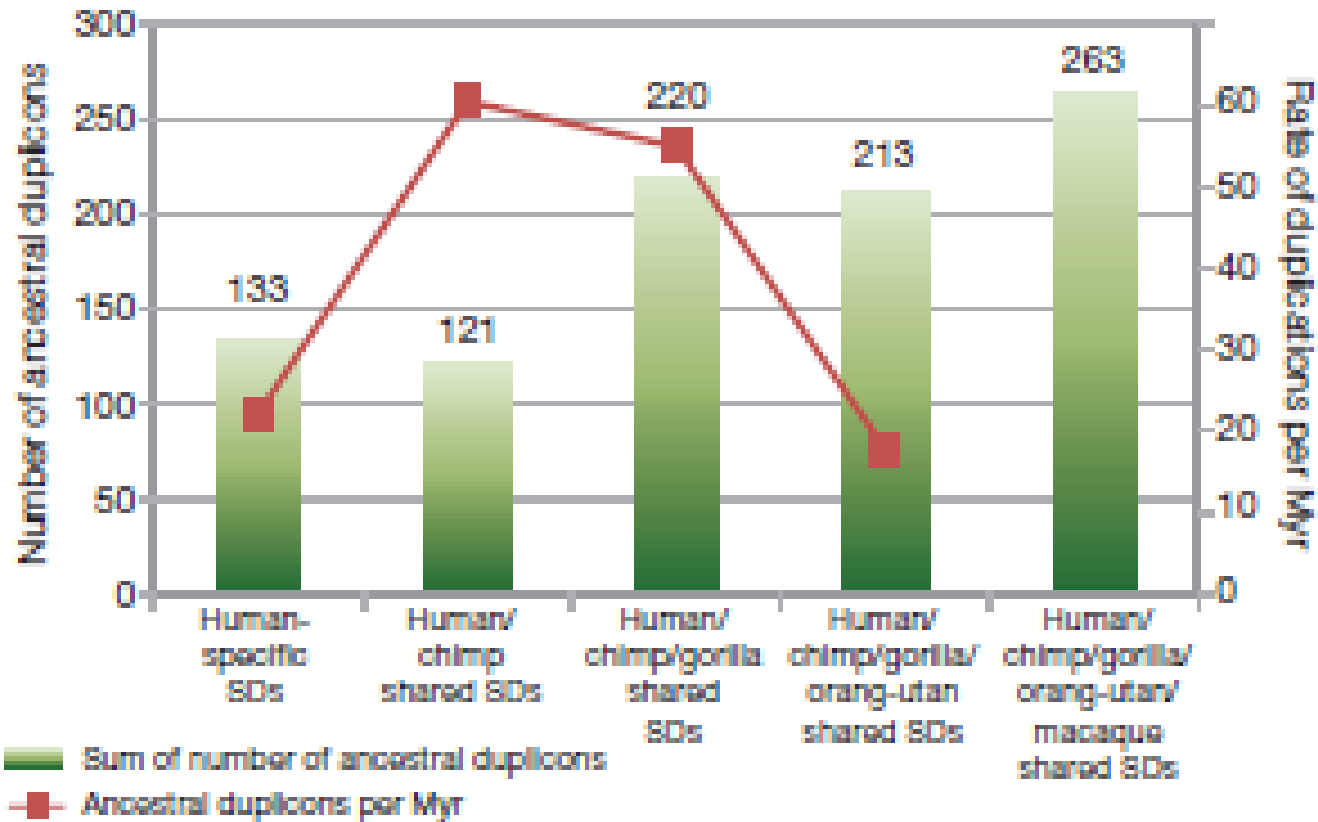
# 大型アフリカ霊長類



Taken from Marques-Bonet et al. 2009, Nature, 457, 877-881

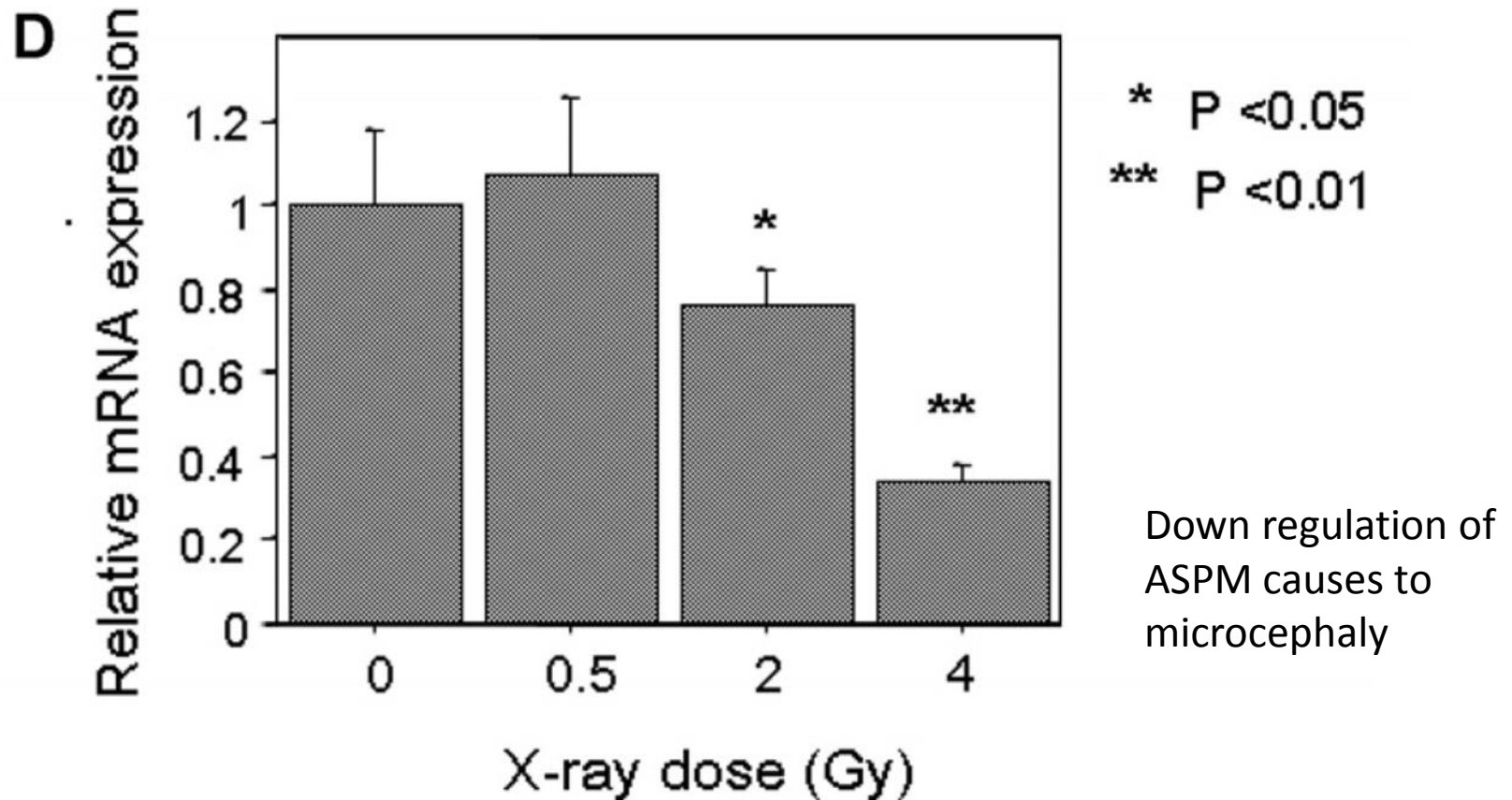


# Chimp/Gorilla分離のころに セグメントコピーバースト

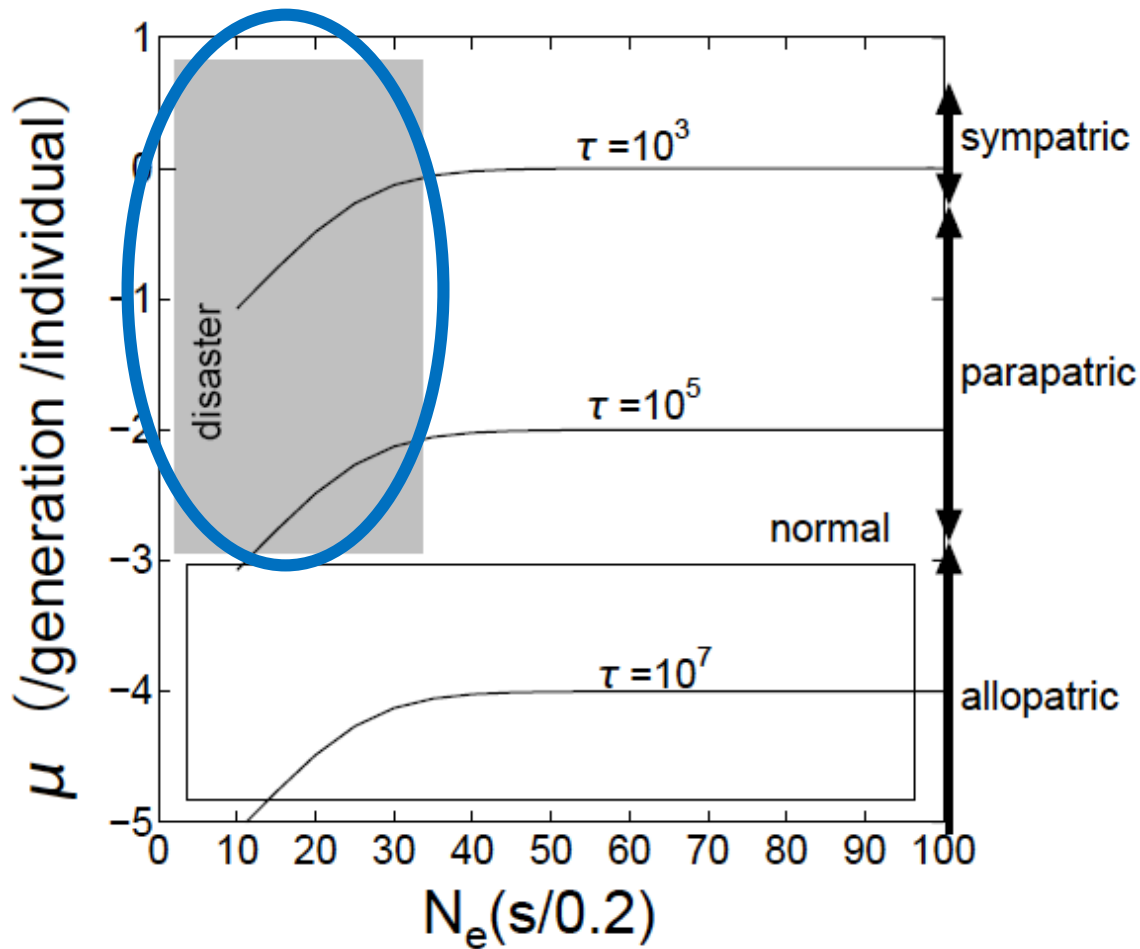


Taken from Marques-Bonet et al. 2009, Nature, 457, 877-881

# ASPM is down regulated by X-ray dose



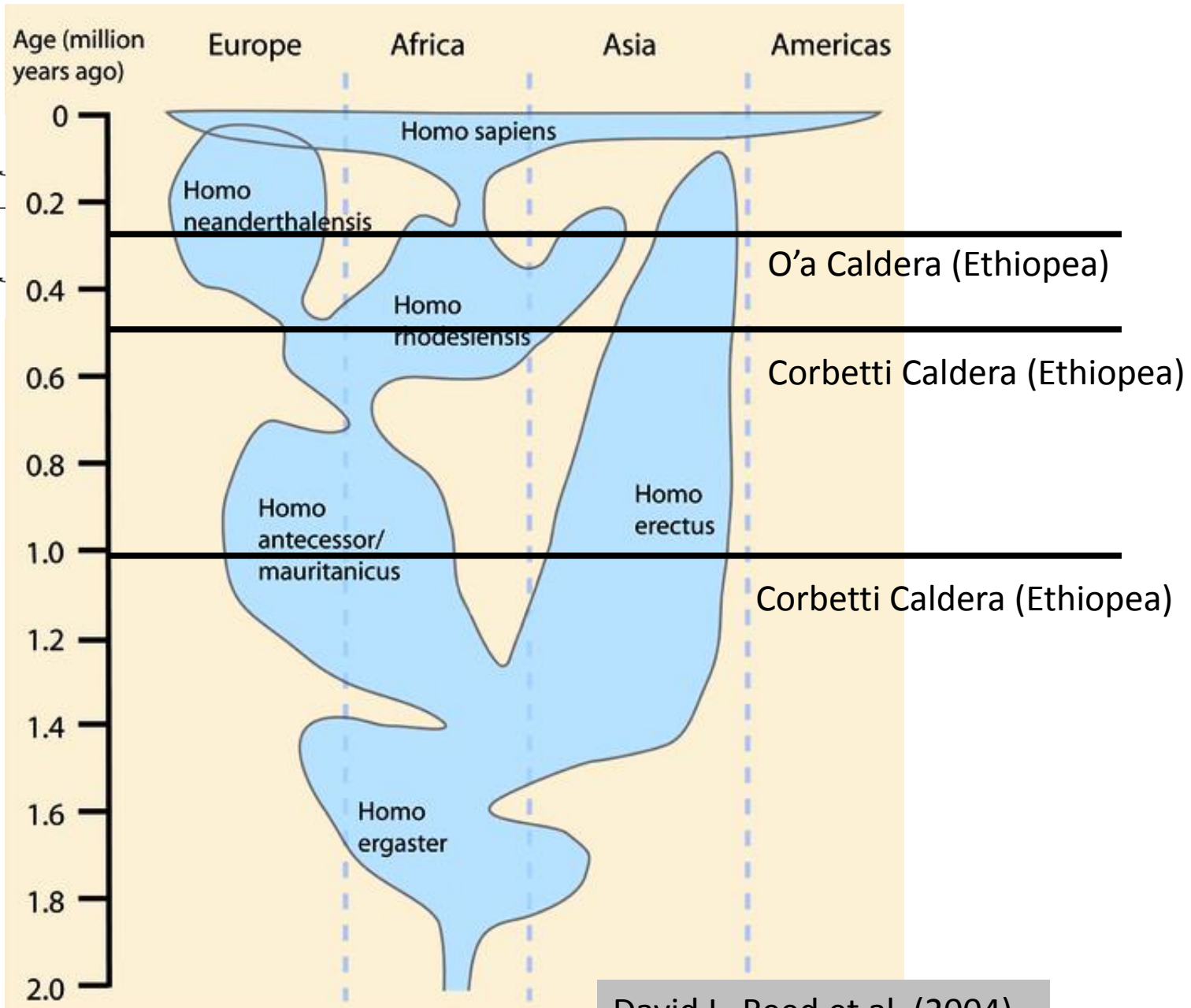
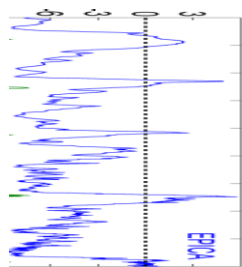
# 種分化の条件 破局と絶滅に瀕する



$$N_e < 100$$

$$\mu > 0.1$$

$$\xi s^* = 10^{-2}$$

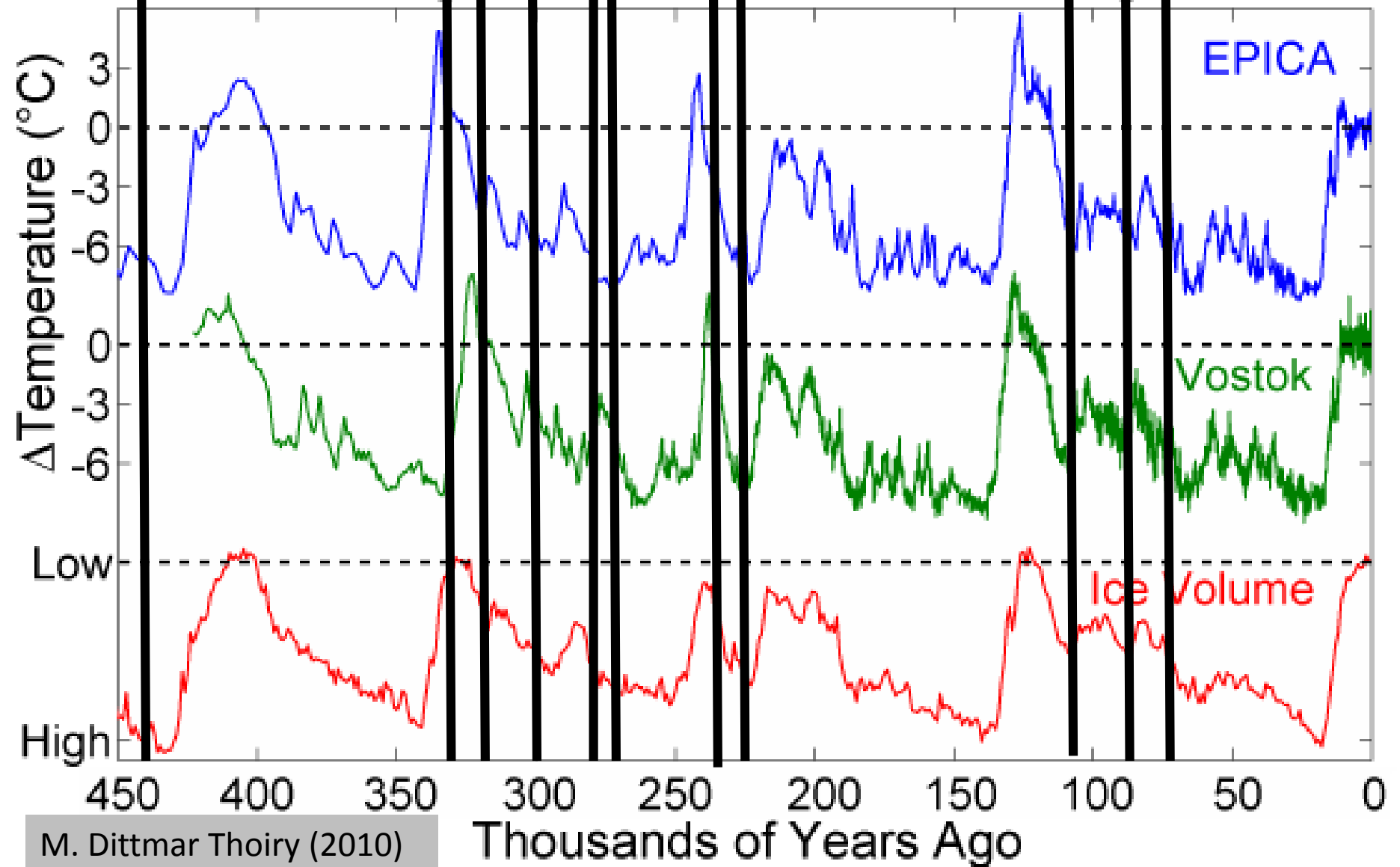


David L. Reed et al. (2004)

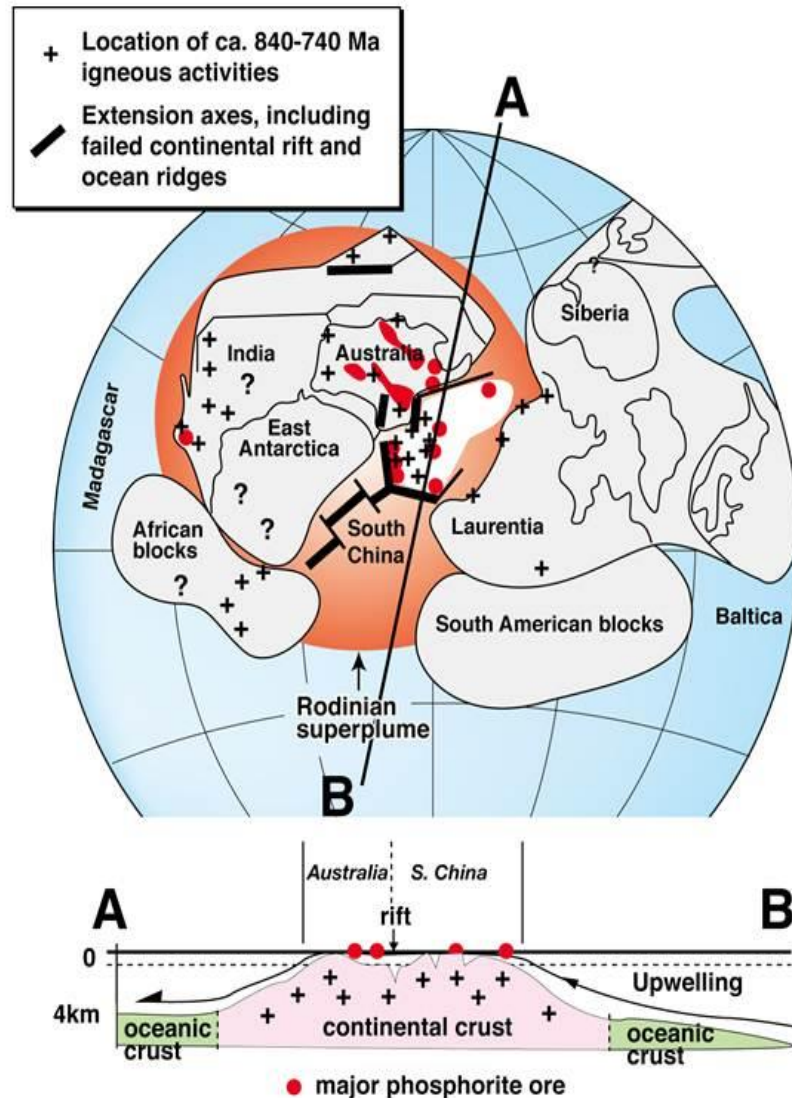
# アフリカにおける噴火史

Volcano Name	Area	Volcano Type	Year BP	Bulk deposit volume	Bulk DRE volume
Corbetti Caldera	Ethiopea	Caldera(s)	1000000	1000	400
Corbetti Caldera	Ethiopea	Caldera(s)	500000	103.5	45
O'a Caldera	Ethiopea	Caldera(s)	240000	276	120
Menengai	Kenya	Shield volcano(es)	33000	25.1	20
Menengai	Kenya	Shield volcano(es)	12345	70	28
Longonot	Kenya	Stratovolcano(es)	10860	50	21.7
Menengai	Kenya	Shield volcano(es)	8985	70	30

# Ice Age Temperature Changes



# Ediacaran/Cambrian Explosion (1)



# 3つの批判？

- 変異率
- 初期人類の人口
- 分子時計



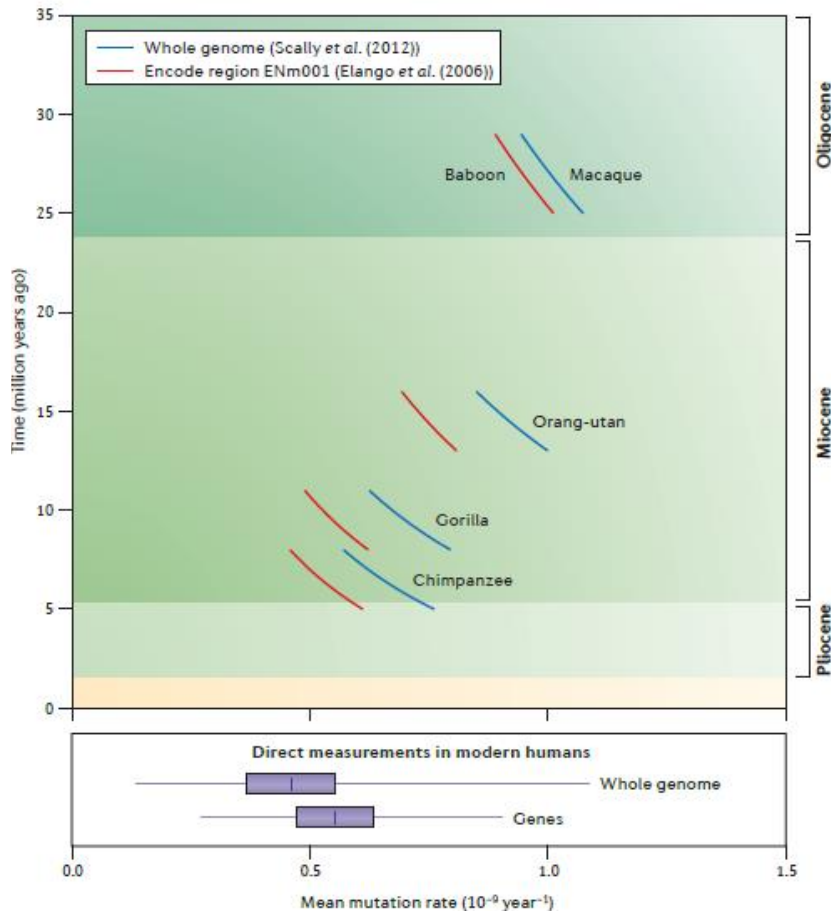
# 変異率は上昇したか？

- SNPでは変異率が下がっている (Scully and Durbin 2012)

– Single strand break: 修復可能、修復システムが放射線強度で強化か？

- Segment duplication発生率は数倍高い (Marques-Bonet et al. 2009)

– Double strand break: 修復可能だが、高い確率でsegment duplication



# 分子時計一定に矛盾しないか？

- 変異率が1000倍の時期が10000年続いても、その間の変異の数は1億年で平均すると10%以下
- 100万年より短い進化を議論するときに変化が見えるかもしれない。

# ゲノム進化のシミュレーション

- 種分化時に $N_e < 100$ なら、集団遺伝学のフルシミュレーションは簡単
  - 既に $N_e < 10$ 以下のシミュレーションは実行済み
    - 実は、その振る舞いを見て理論を作った
  - $N_e \sim 100$ で中立進化理論 (coalescent theory) と詳細比較を企画中

# 現世人類の初期人口

- ~10,000 (Relenthfold 2010)
- 平衡からのずれ→人口が小さかった時の影響
- Heterogeneity heterozygosity (h):

$$h = \frac{4\mu N_e}{1 + 4\mu N_e}$$

Maruyama and Nei 1981

- $4\mu N_e \sim 0.1$ 
  - $N_e \sim 25000$  if  $\mu = 10^{-5}$
  - $N_e \sim 25$  if  $\mu = 10^{-2}$

# まとめ

- **生物進化の統一理論**

- 同所分化、異所分化、隔離分化を包含
- 大進化(破局時)と小進化(繁栄時)
  - 断続平衡仮説と漸進説を包含

- **種分化の条件: 特殊な機構は必要ない**

- 個体数が少ないこと:  $N_e < 3-30$
- 変異率が高いこと:  $\mu > 0.01-0.001$
- $\mu N_e \sim 0.1-1$

- **破局**

- 超新星による全球的破局:

**大絶滅 (全球凍結事件、エディアカラ・カンブリア爆発、P/T境界、K/T境界)**

- 放射性火山灰の降下による局所的な破局

**進化のホットスポット**

- 0 Ma: アフリカリフト帯: シクリッド、人類の起源?
- 600Ma: オーストラリア、カナダ、南中国: エディアカラ・カンブリア爆発

# 二つの破局

1. 全球的な破局: 超新星遭遇
2. 局所的な破局: 放射性火山灰の降下
3. 両方

# 参考文献

- David L. Reed et al. , 2004: Genetic Analysis of Lice Supports Direct Contact between Modern and Archaic Humans, PLoS Biology, 2, e340.
- Ebisuzaki and Maruyama , 2015: United Theory of Biological Evolution: Disaster-forced Evolution through Supernova, Radioactive Ash Fall-Outs, Genome Instability, and Mass Extinctions. Geoscience Frontiers, 103-119.
- Frisch, 2000: The Galactic Environment of the Sun The heliosphere appears to protect the inner solar system from the vagaries of the interstellar medium. American Scientist, 52-59.
- Fujimori et al. , 2008: Ionizing radiation downregulates ASPM, a gene responsible for microcephaly in humans, Biochemical and Biophysical Research Communications, 369, 953-957.
- Gordon Davis, 1966: U.S. Geological Survey.
- Kataoka et al. , 2013: Snowball Earth events driven by starbursts of the Milky Way Galaxy, New Astronomy, 21, 50-62.

# 参考文献

- Kataoka et al. , 2014:The nebula winter: the united view of the snowball Earth, mass extinctions, and explosive evolution in the late Neoproterozoic and Cambrian periods, Gondwana Research, 25, 1153-1163.
- Marques-Bonet et al. , 2009: A Burst of Segmental Duplications in the African Great Ape Ancestor, Nature, 457, 877-881.
- Maruyama et al. , 2014: Initiation of leaking Earth: An ultimate trigger of the Cambrian Explosion. Gondwana Research, 25, 910-944.
- M. Dittmar Thoiry, 2010: Changement climatique et la méthode scientifique, <http://wwweth.cern.ch/~dittmar/thoiry/climaconfthoiry.pdf>
- Scally and Durbin, 2012: Revising the human mutation rate: implications for understanding human evolution, Nature Reviews Genetics, 13, 745-753.
- Wikipedia 銀河系, [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/12/Artist's\\_impression\\_of\\_the\\_Milky\\_Way\\_\(updated\\_-\\_annotated\).jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/12/Artist's_impression_of_the_Milky_Way_(updated_-_annotated).jpg)
- Wikipedia シクリッド, <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%83%83%E3%83%89>
- あなたの石探し, 2006, <http://stonesagasi.seesaa.net/index-4.html>