

# 光で探る 宇宙・生命・意識の起源

有坂勝史

カリフォルニア大学ロスアンゼルス校

[arisaka@physics.ucla.edu](mailto:arisaka@physics.ucla.edu)

# 講演内容 (90分)

- 宇宙の起源と進化 30分
- 生命の起源、生命とは 20分
- 脳の働き、意識の起源 30分
- まとめ — 科学の行方 10分

なぜ我々は存在するのか？

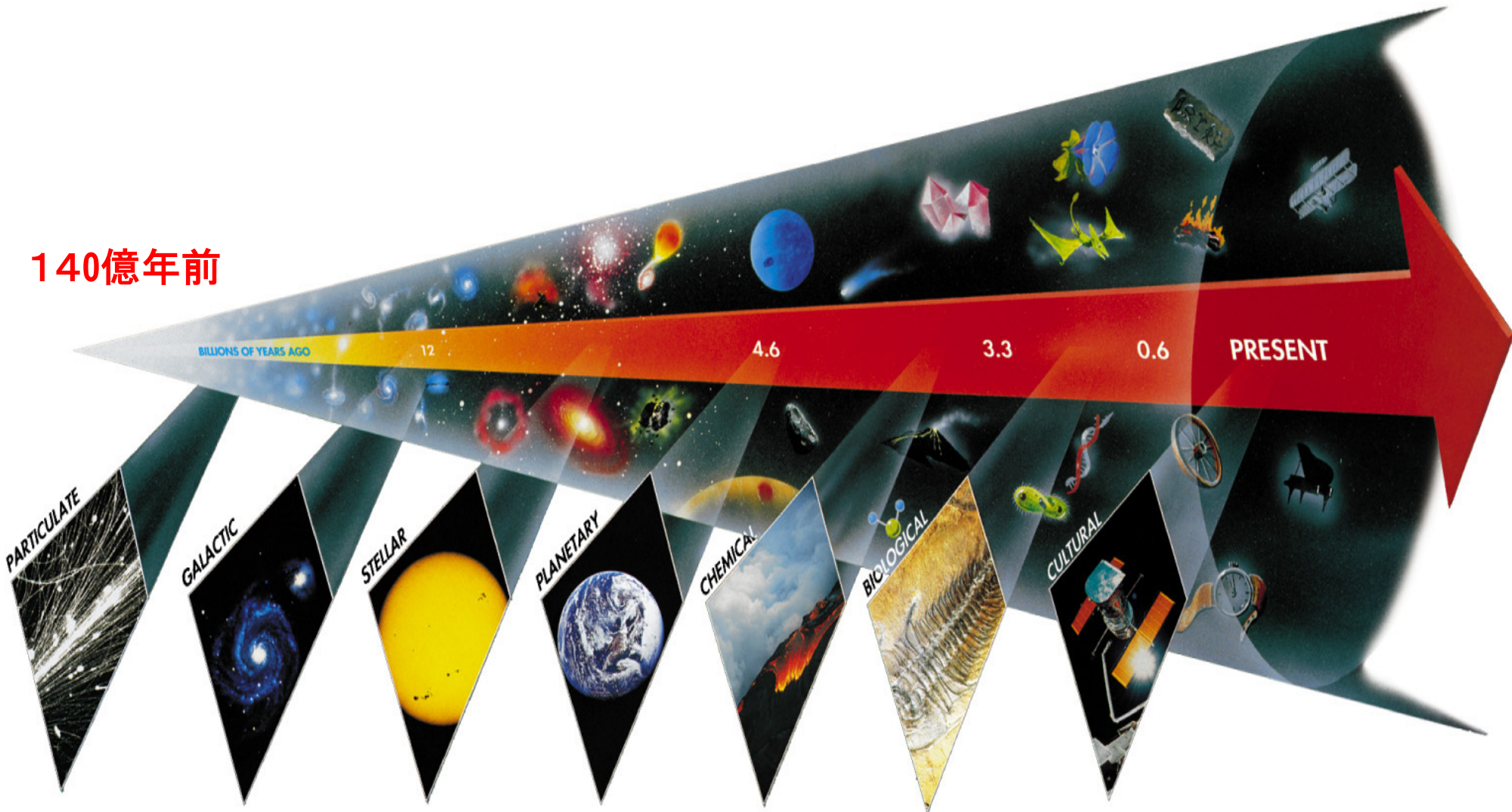
# ポール・ゴーギャン (1897)



我々はどこから来たのか  
我々は何者か  
我々はどこへ行くのか

# 宇宙進化の7段階

140億年前



粒子の  
起源

構造の  
起源

生命の  
起源

意識  
の起源

# 宇宙の起源

# Andromeda



銀河あたり約1000億の星

# Hubble Deep Field

The image is a composite of many small images, showing a vast field of galaxies. The galaxies are of various shapes and sizes, including spirals, ellipticals, and irregulars. They are scattered across the field, with some appearing as bright, distinct objects and others as faint, distant points of light. The colors range from blue to red, representing different stages of galaxy evolution and different types of galaxies. The background is a deep black, making the galaxies stand out prominently.

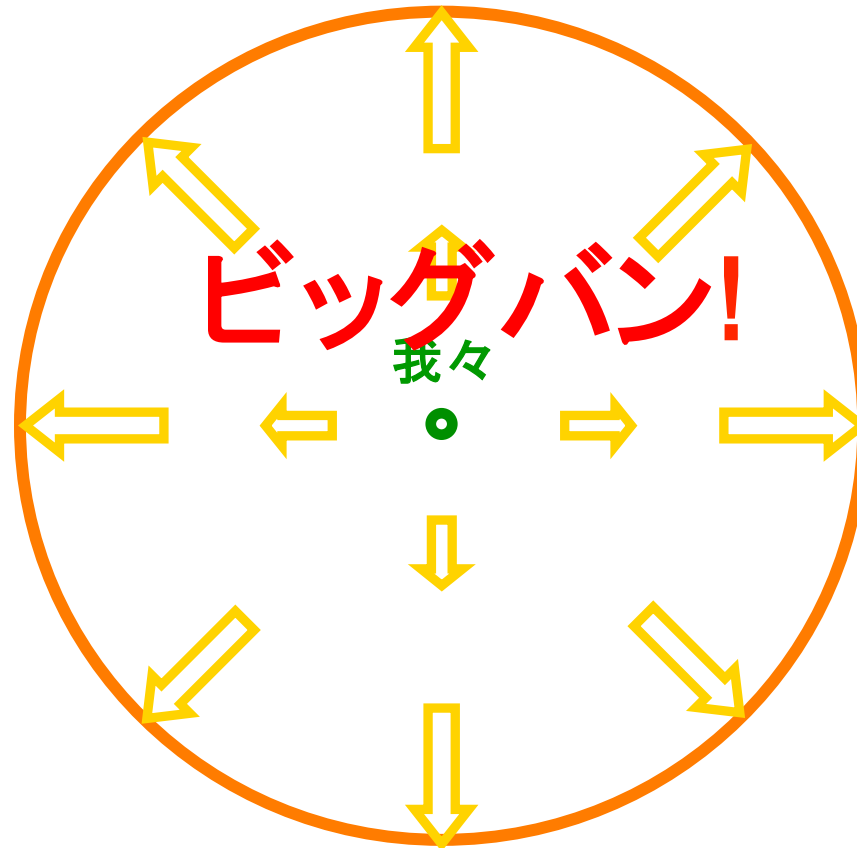
宇宙には約1000億の銀河



最遠のものは、  
光速の90%で  
遠ざかる。

# ハッブルの法則: 膨張する宇宙(1929年)

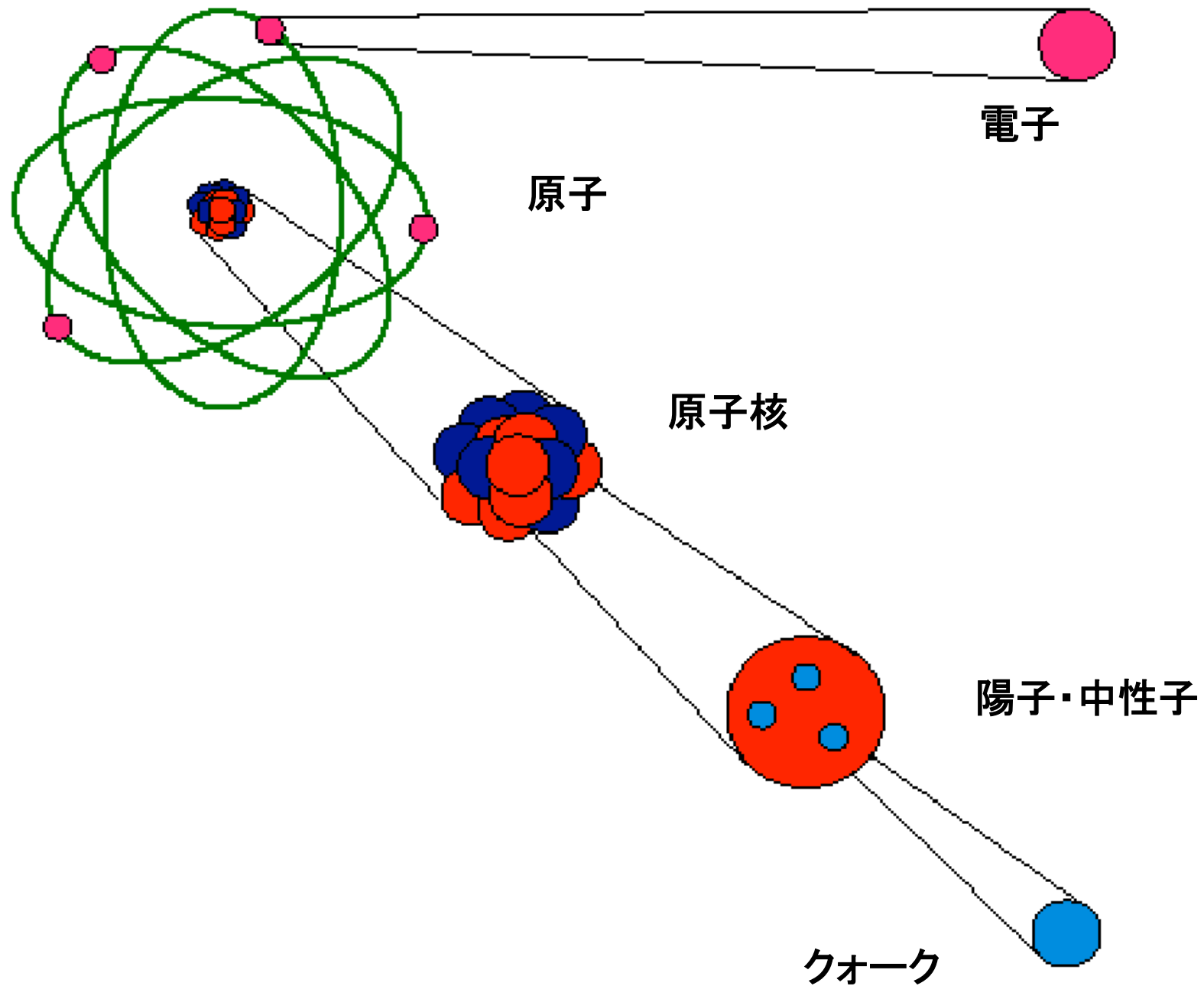
宇宙の  
地平線



140億光年

光速で  
遠ざかる地平線

# 素粒子の内部構造 (1970年頃)



# 素粒子の一覧表 (1980年頃)


		Fermion			Boson		
電荷						電荷	
+2/3	Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	$\gamma$ photon	0	
-1/3		$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom		$g$ gluon	0
0	Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$Z$ Z boson	0	
-1		$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau		$W$ W boson	$\pm 1$
		I	II	III	Force Carriers		
Three Families of Matter							

+ 反粒子

# 自然界の四つの力

## 強い力


Gluons (8)



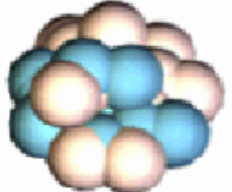
Quarks



Mesons Baryons



Nuclei



1

## 弱い力

Bosons (W,Z)



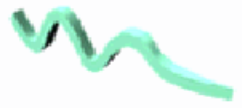
Neutron decay  
Beta radioactivity  
Neutrino interactions  
Burning of the sun



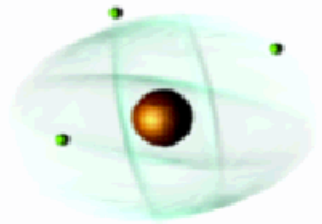
$10^{-13}$

## 電磁気力

Photon




Atoms  
Light  
Chemistry  
Electronics



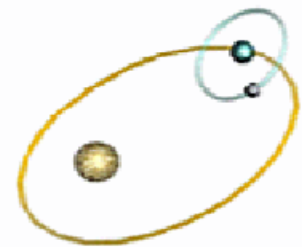
$10^{-2}$

## 重力

Graviton ?

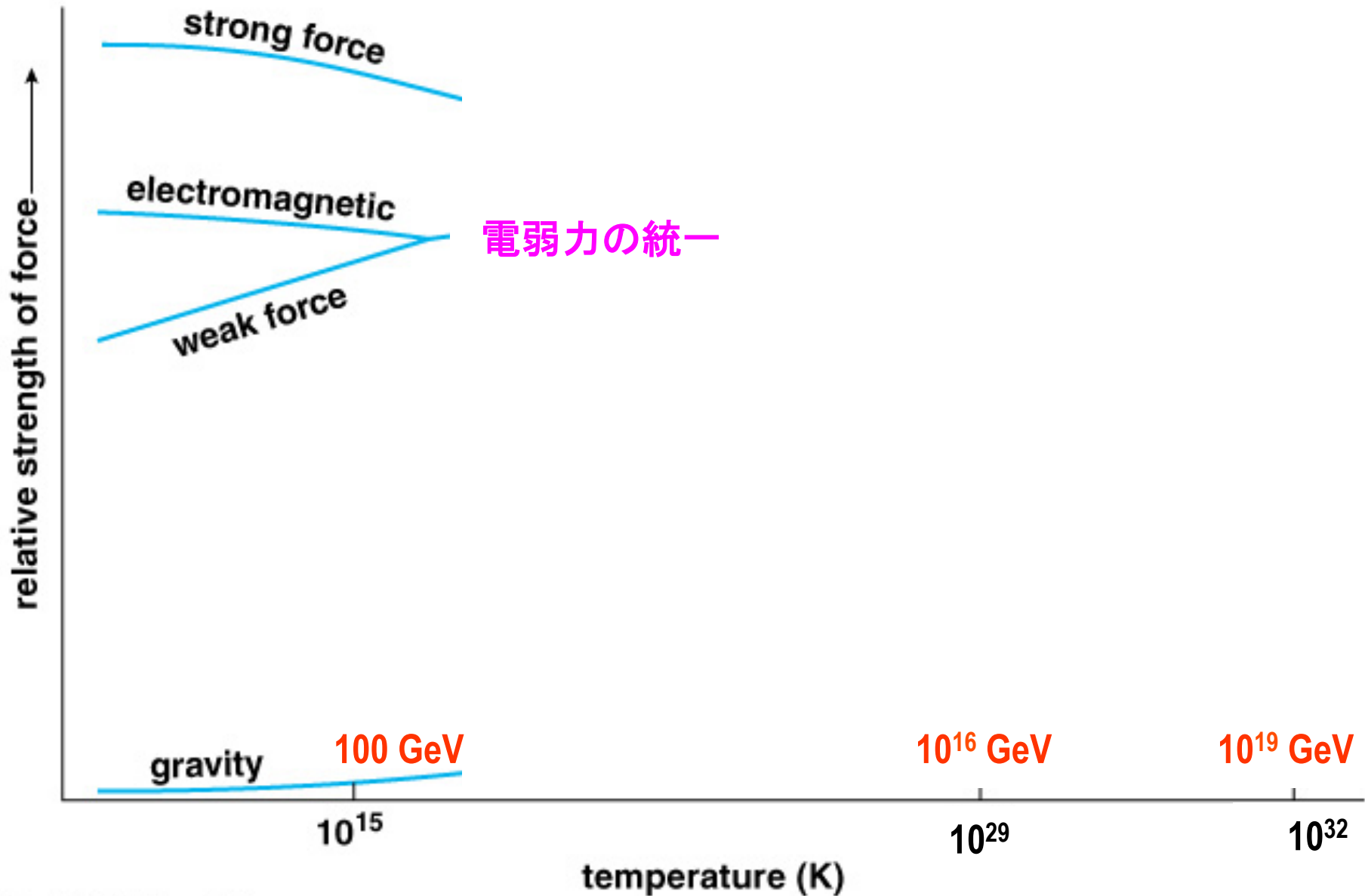


Solar system  
Galaxies  
Black holes



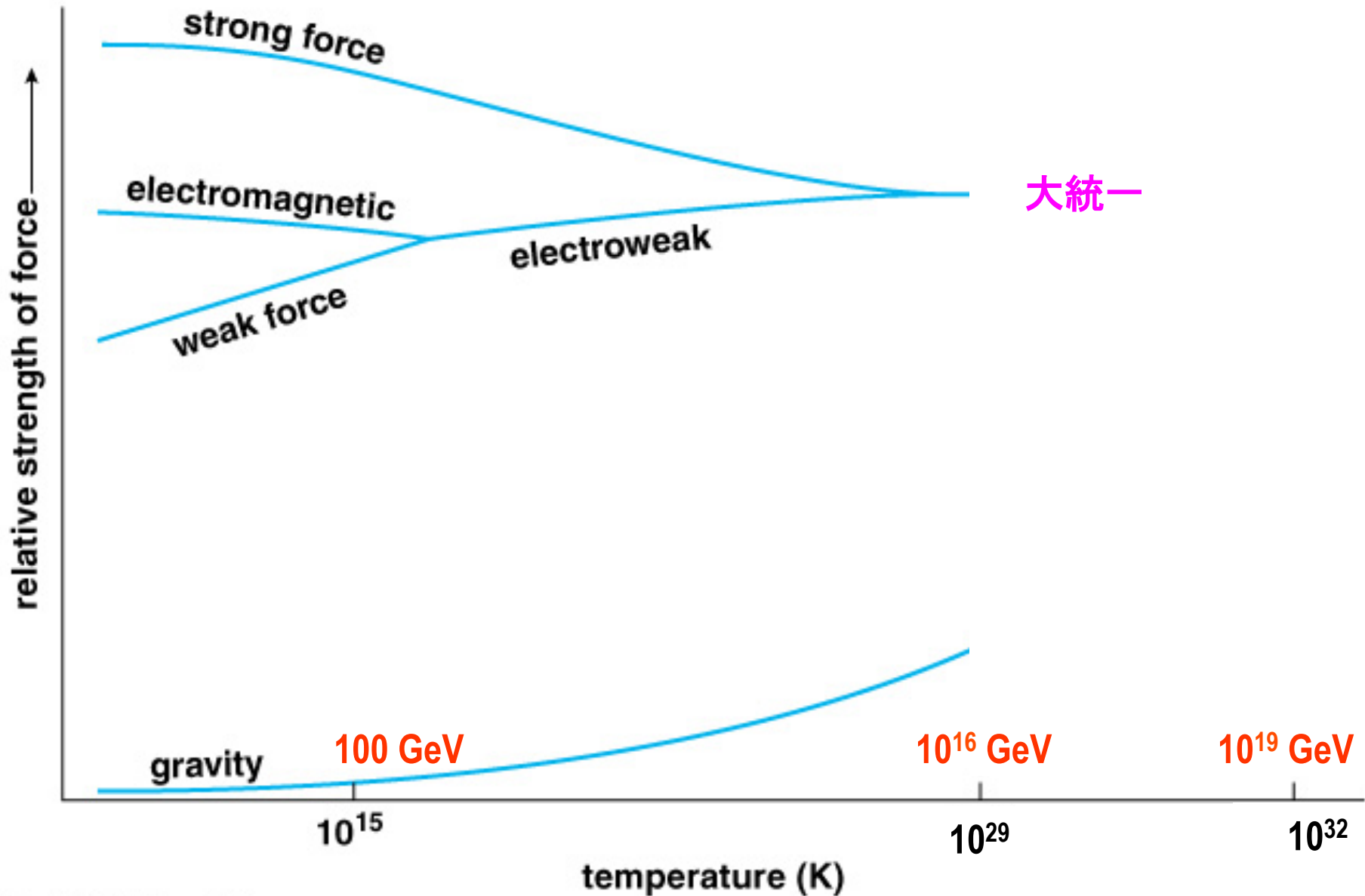
$10^{-38}$

# 四つの力の統一



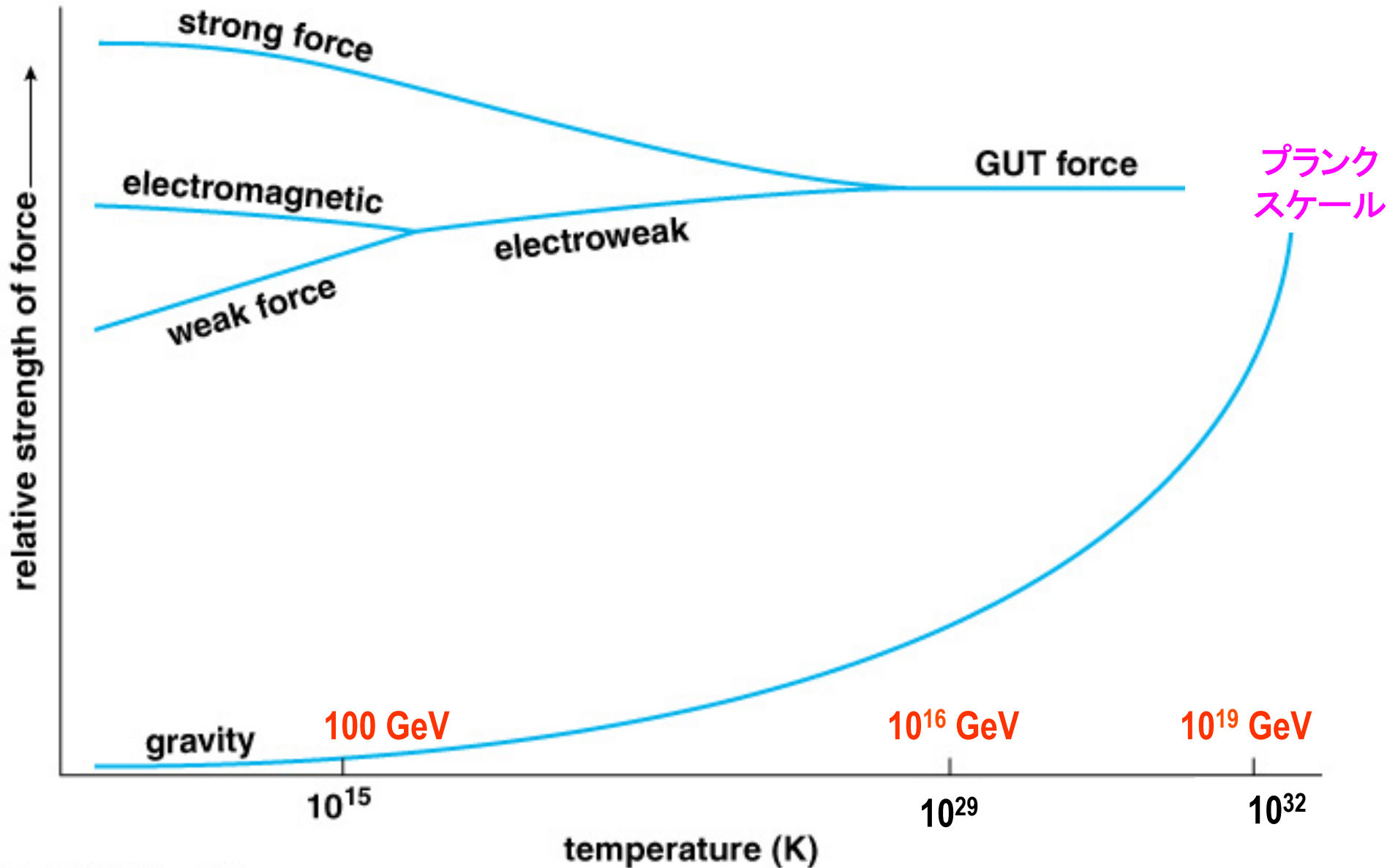
Copyright © Addison Wesley.

# 四つの力の統一



Copyright © Addison Wesley.

# 四つの力の統一



Copyright © Addison Wesley.

物理学者がたどり着いた宇宙の始まり

初めに**光**ありき

物理学者がたどり着いた宇宙の始まり

初めは光のみありき

# 物理法則の基本原則

## ➤ 時空の対称性

- ローレンツ不変性
- 空間と時間の一様性

## ➤ 仮想内部空間における対称性

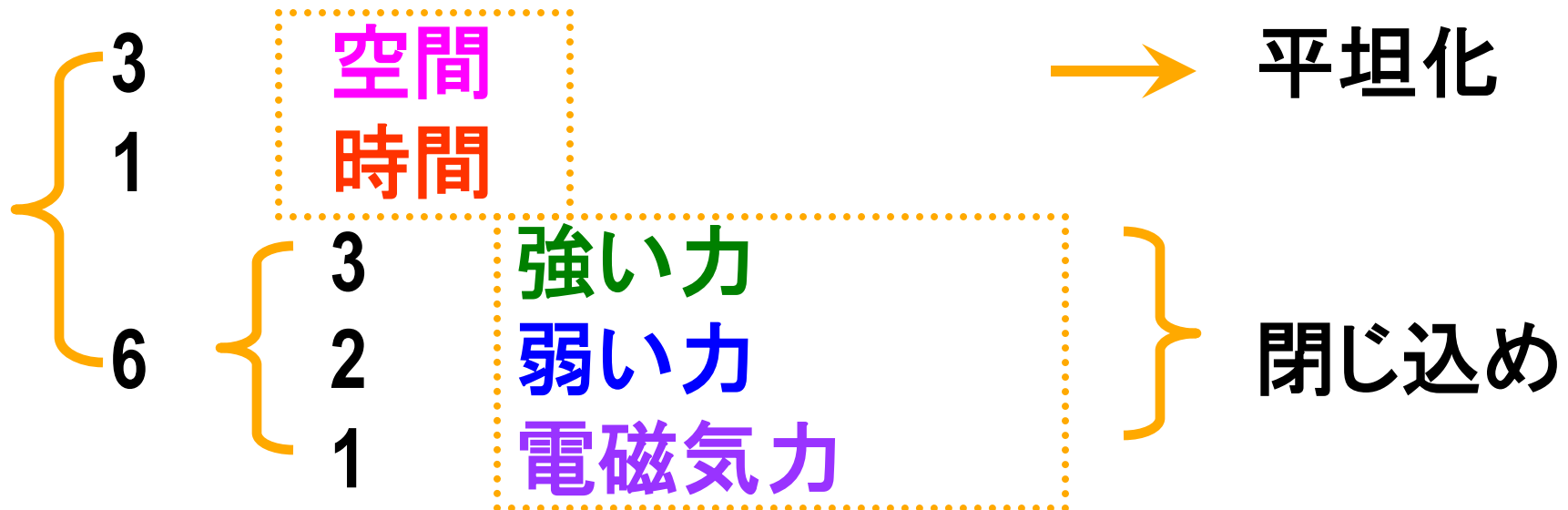
- 局所ゲージ不変性
- カ・エネルギーの源

# 宇宙の始まり

➤ 全ての物は同じ ↔ 完璧な対称性

- すべての粒子は光
- すべての力は同じ

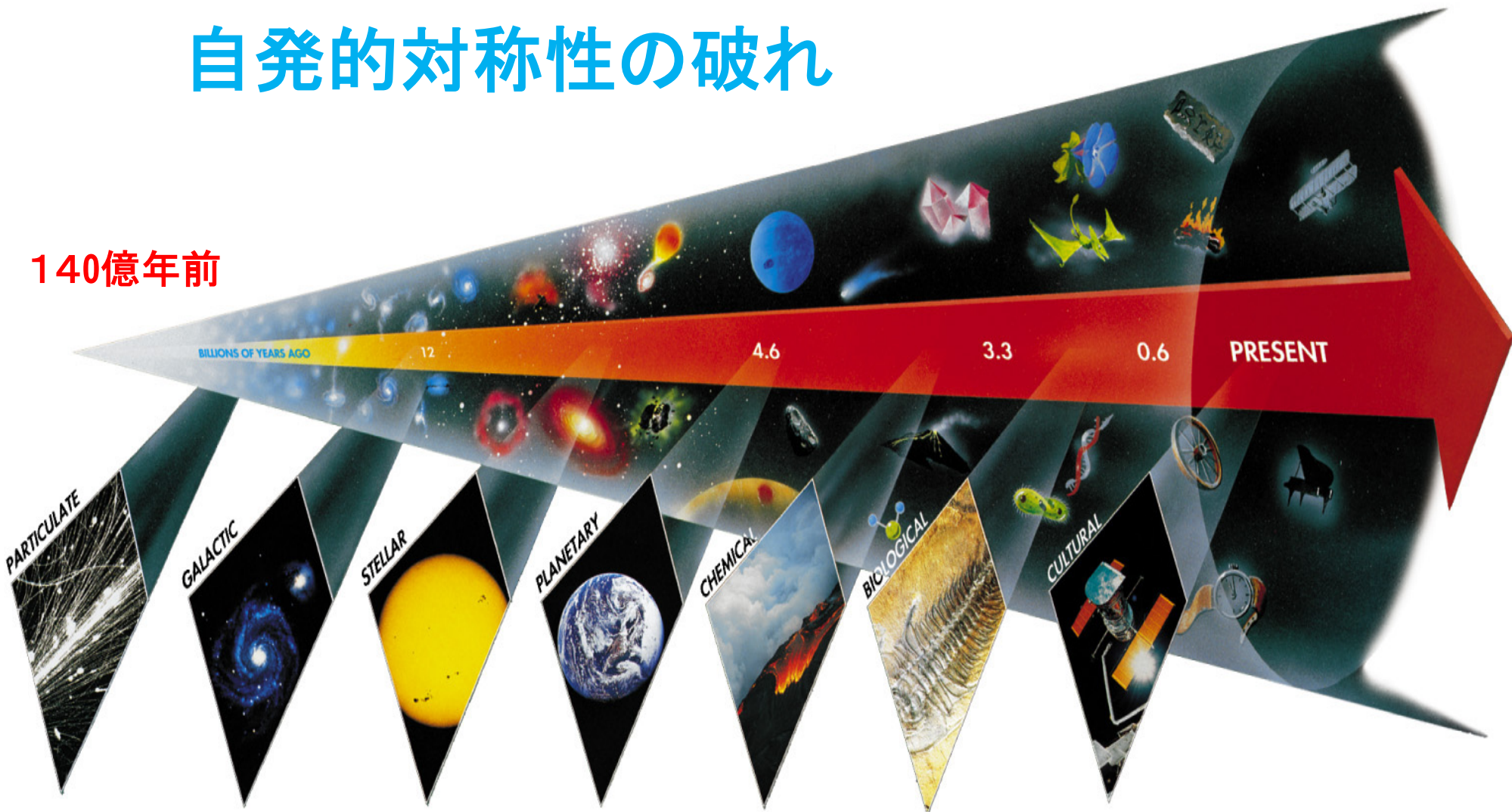
➤ 宇宙は始まりは十次元



# 宇宙進化の7段階

## 自発的対称性の破れ

140億年前



単純

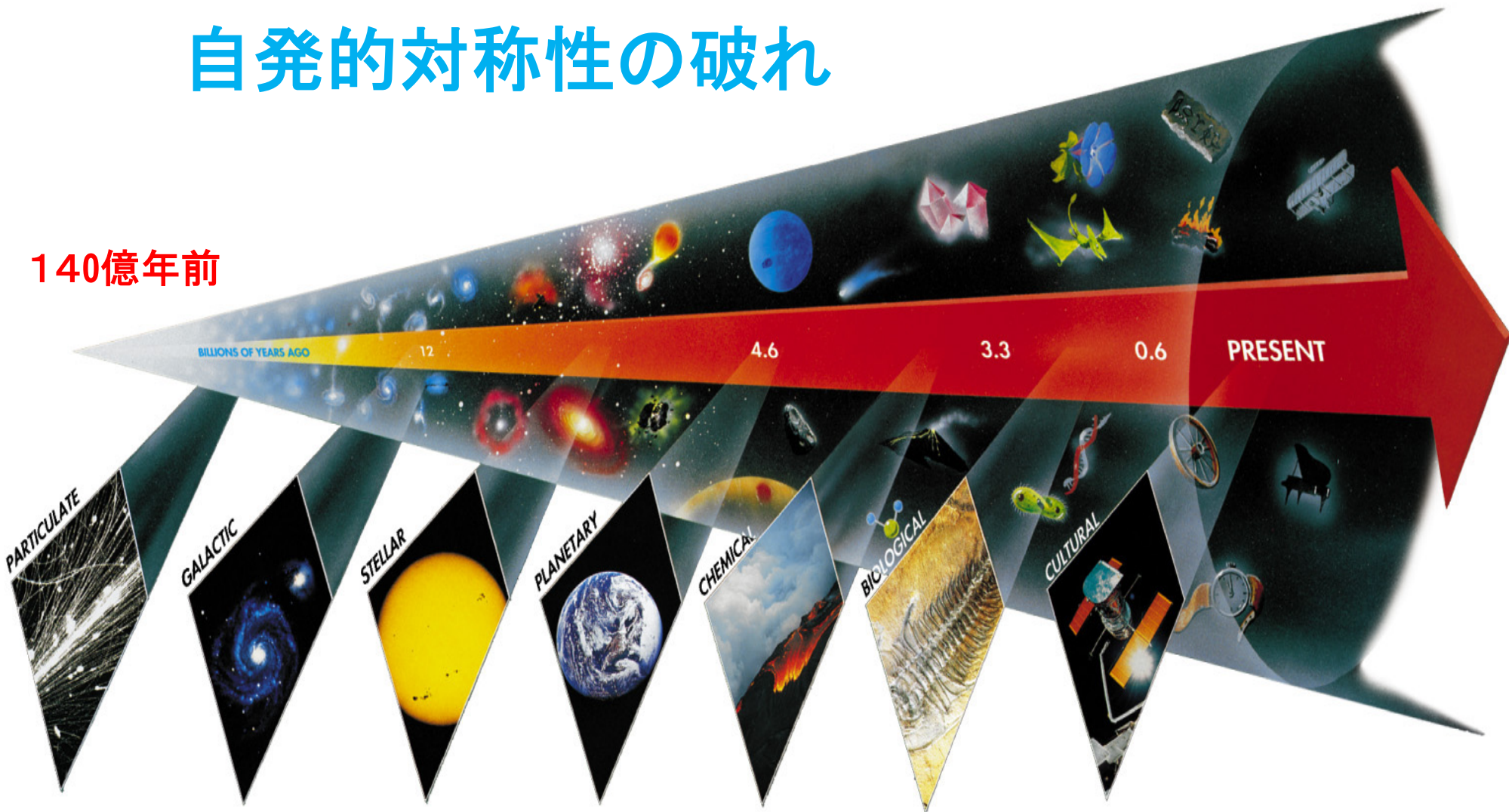


複雑

# 宇宙進化の7段階

## 自発的対称性の破れ

140億年前



粒子の  
起源

# 2008年のノーベル物理学賞



## The Nobel Prize in Physics 2008

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"

南部洋一郎



Photo: University of Chicago

Yoichiro Nambu

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"

小林誠



© The Nobel Foundation Photo: U. Montan

Makoto Kobayashi

益川敏英

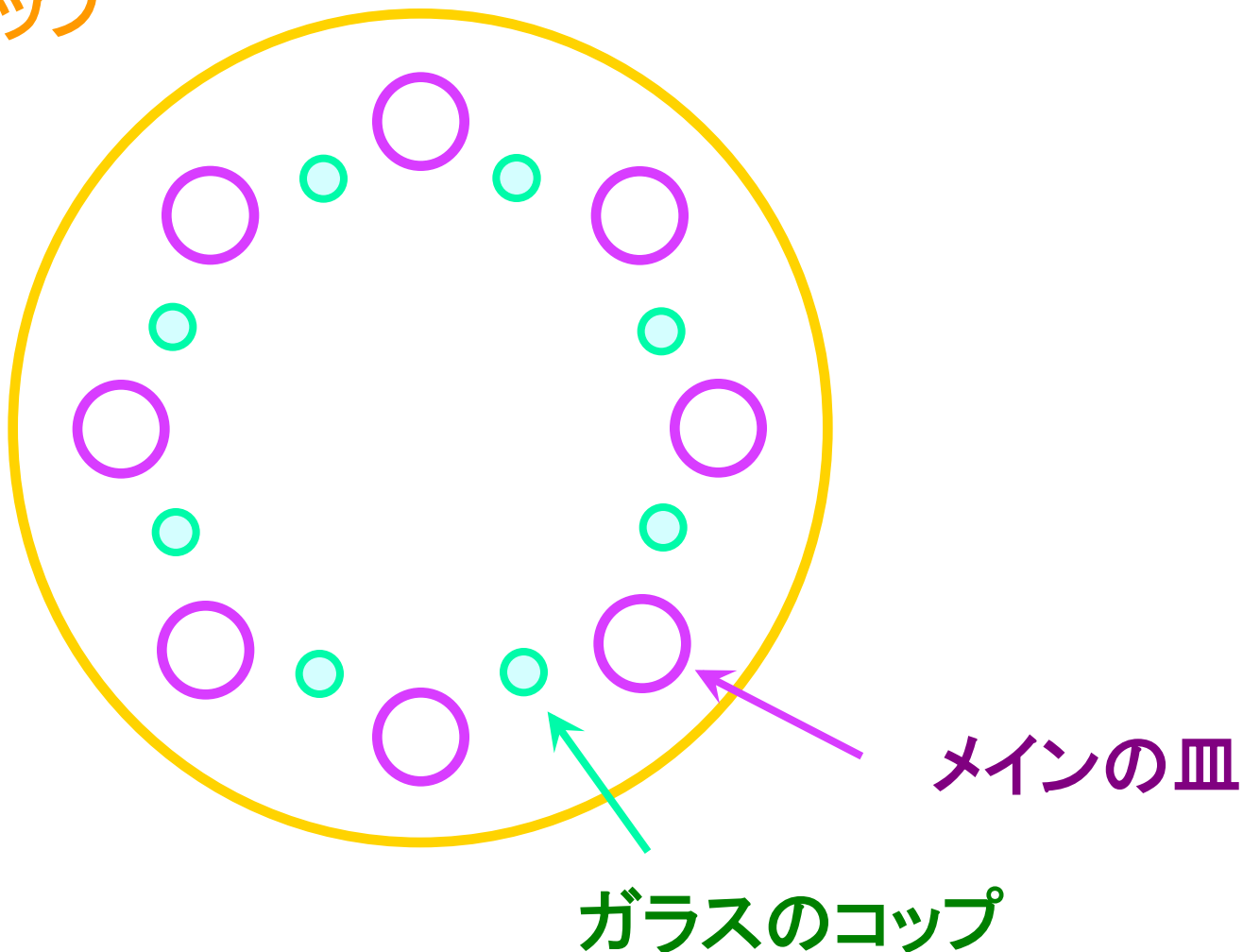


© The Nobel Foundation Photo: U. Montan

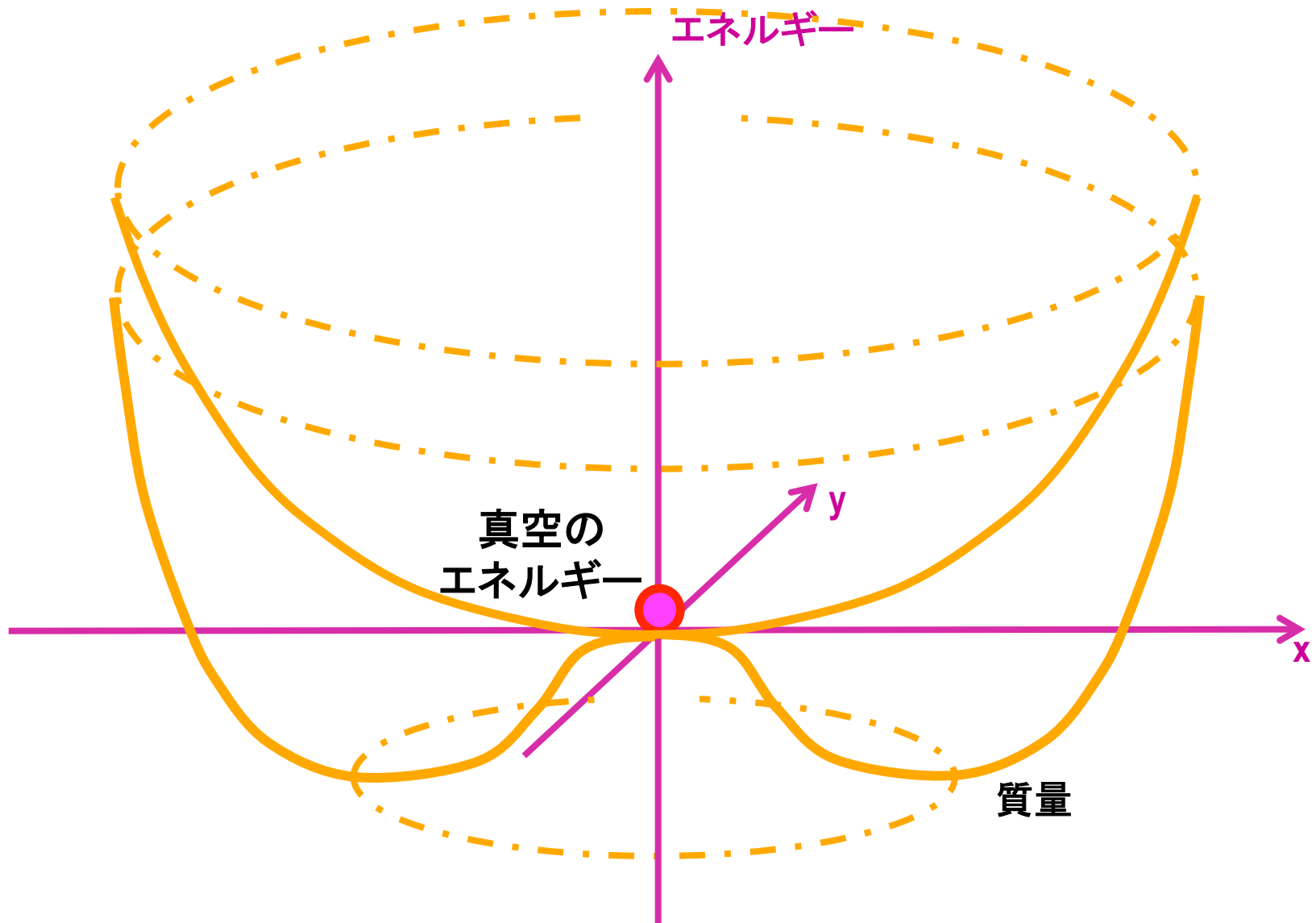
Toshihide Maskawa

# 南部洋一郎による自発対称性の破れの例

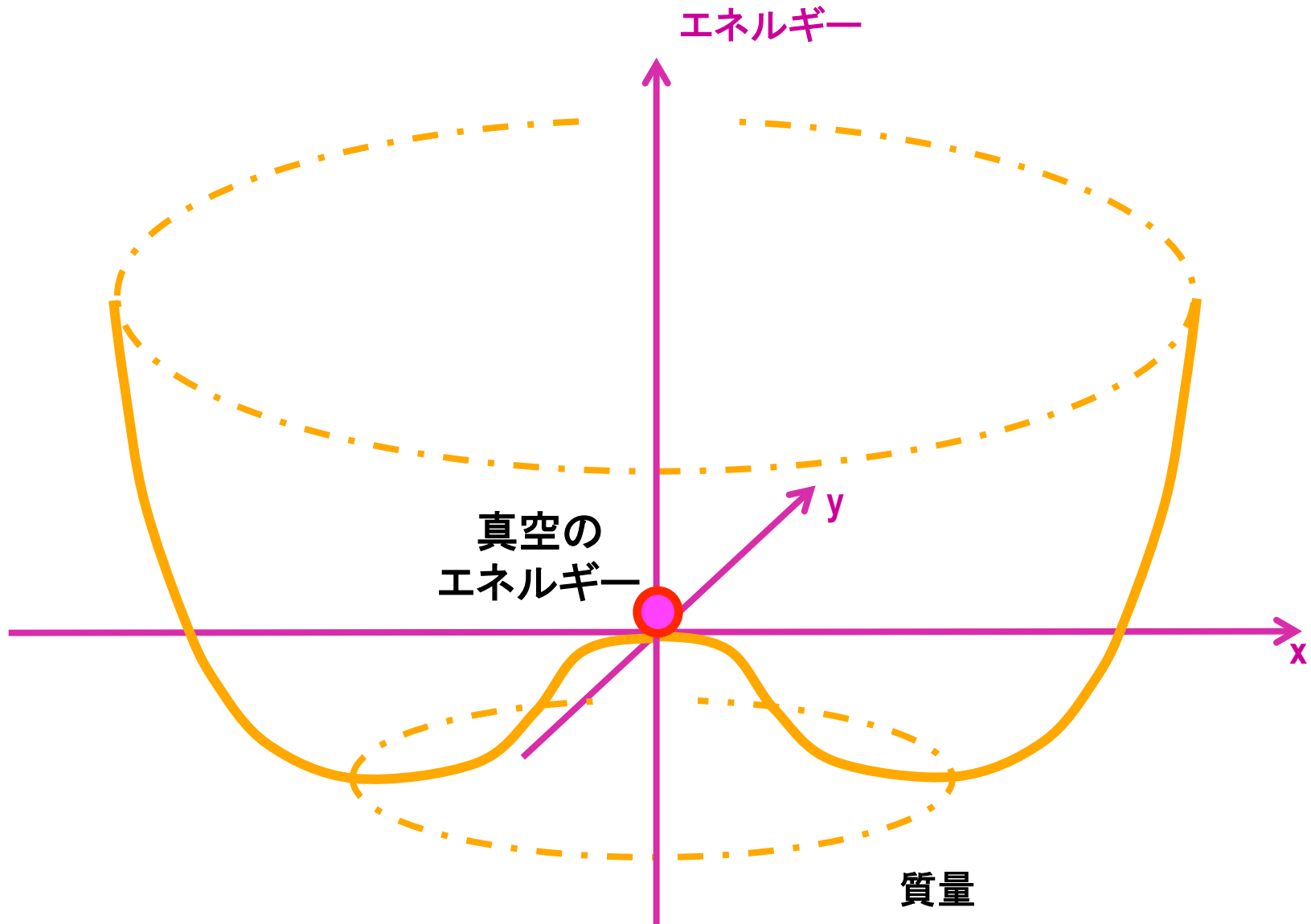
## 円卓のセットアップ




# 自発的対称性の破れ: ヒッグス機構



# 自発的対称性の破れ: ヒッグス機構



# 世界最大の加速器 LHC in Geneva



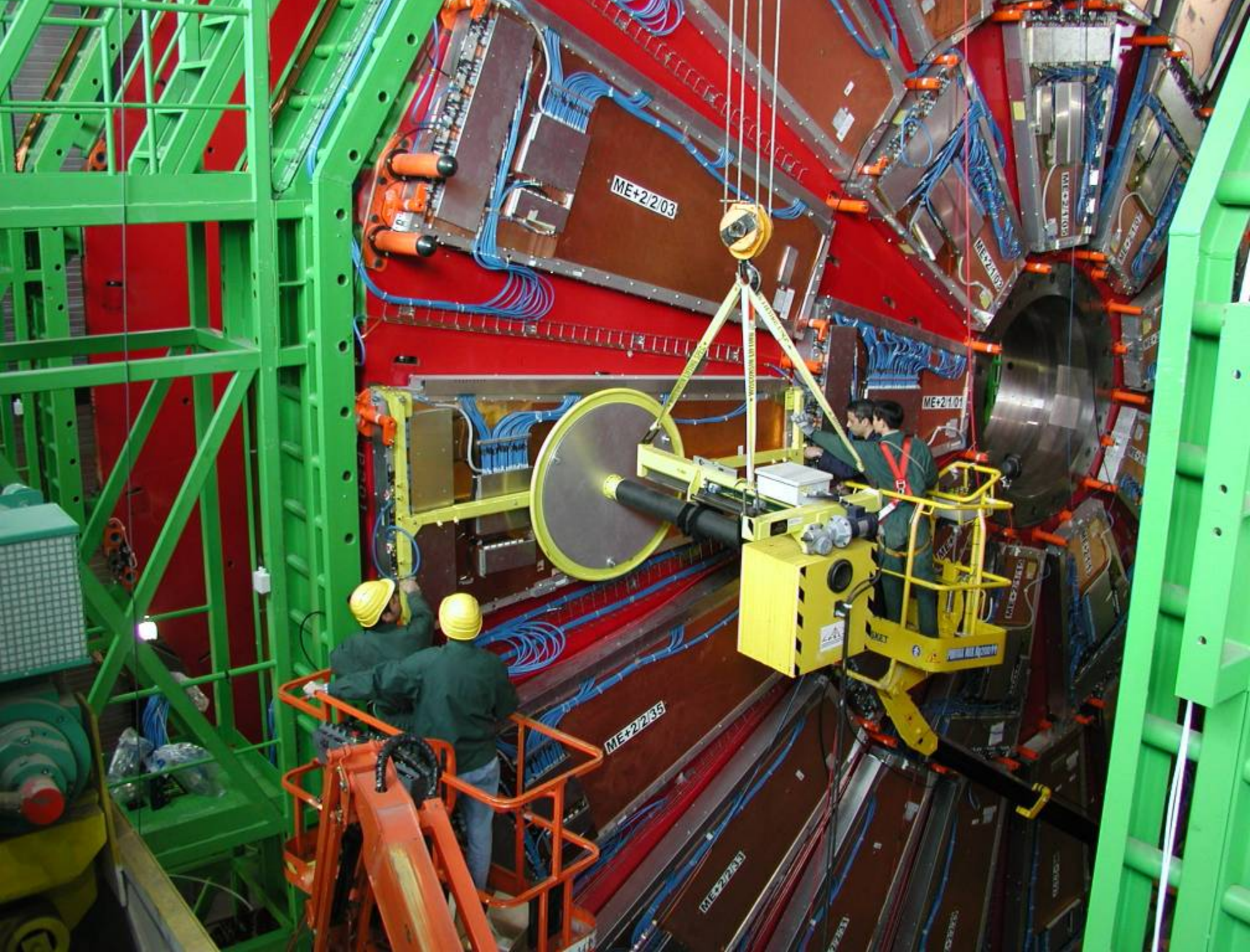
27km Circumference  
7+7=14 TeV

# LHC のトンネルと超伝導磁石



# CMS 超伝導ソレノイド磁石





ME+2/103

ME+2/101

ME+2/105

ME+2/108

ME+2/109

ME+2/110

ME+2/102

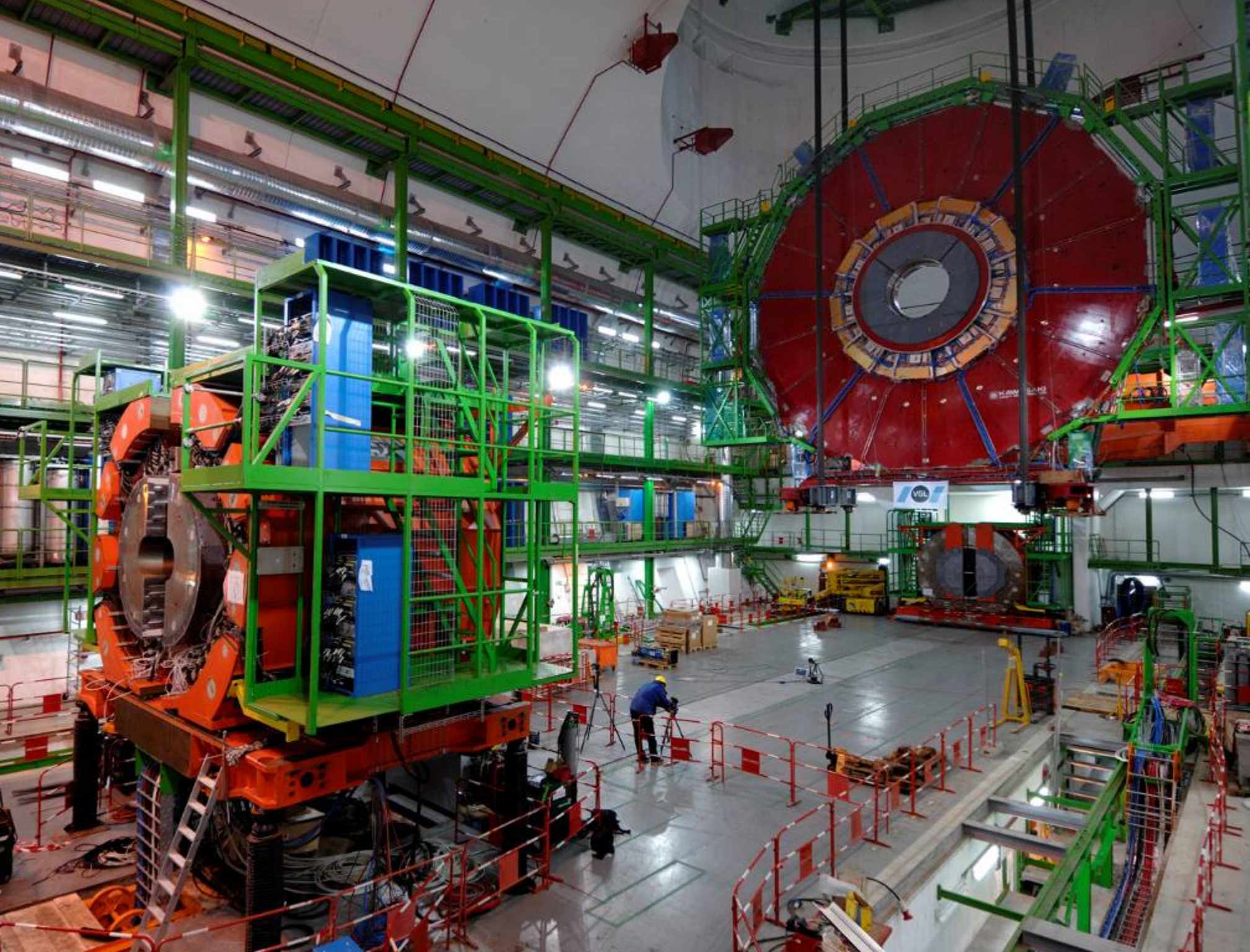
ME+2/104

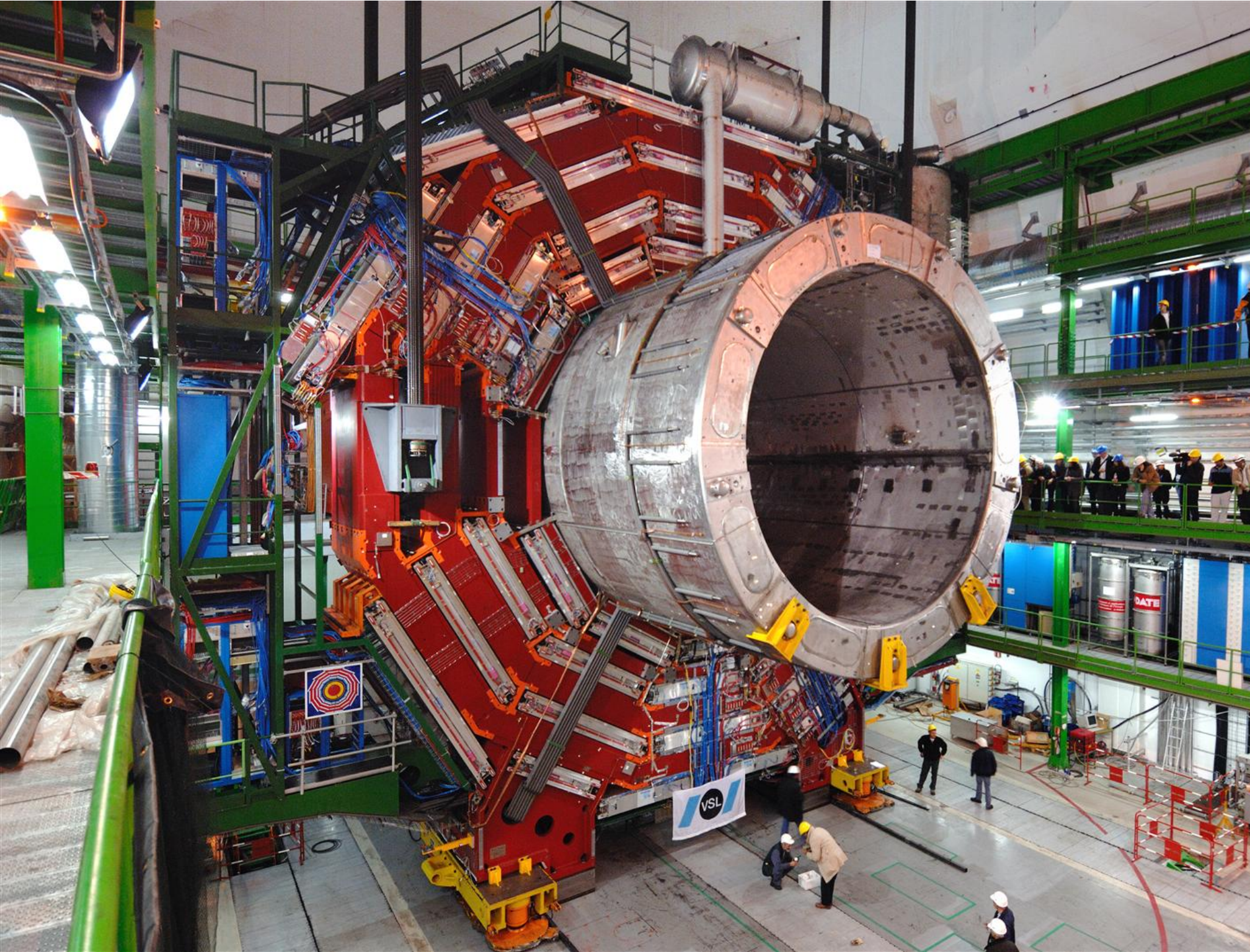
ME+2/106

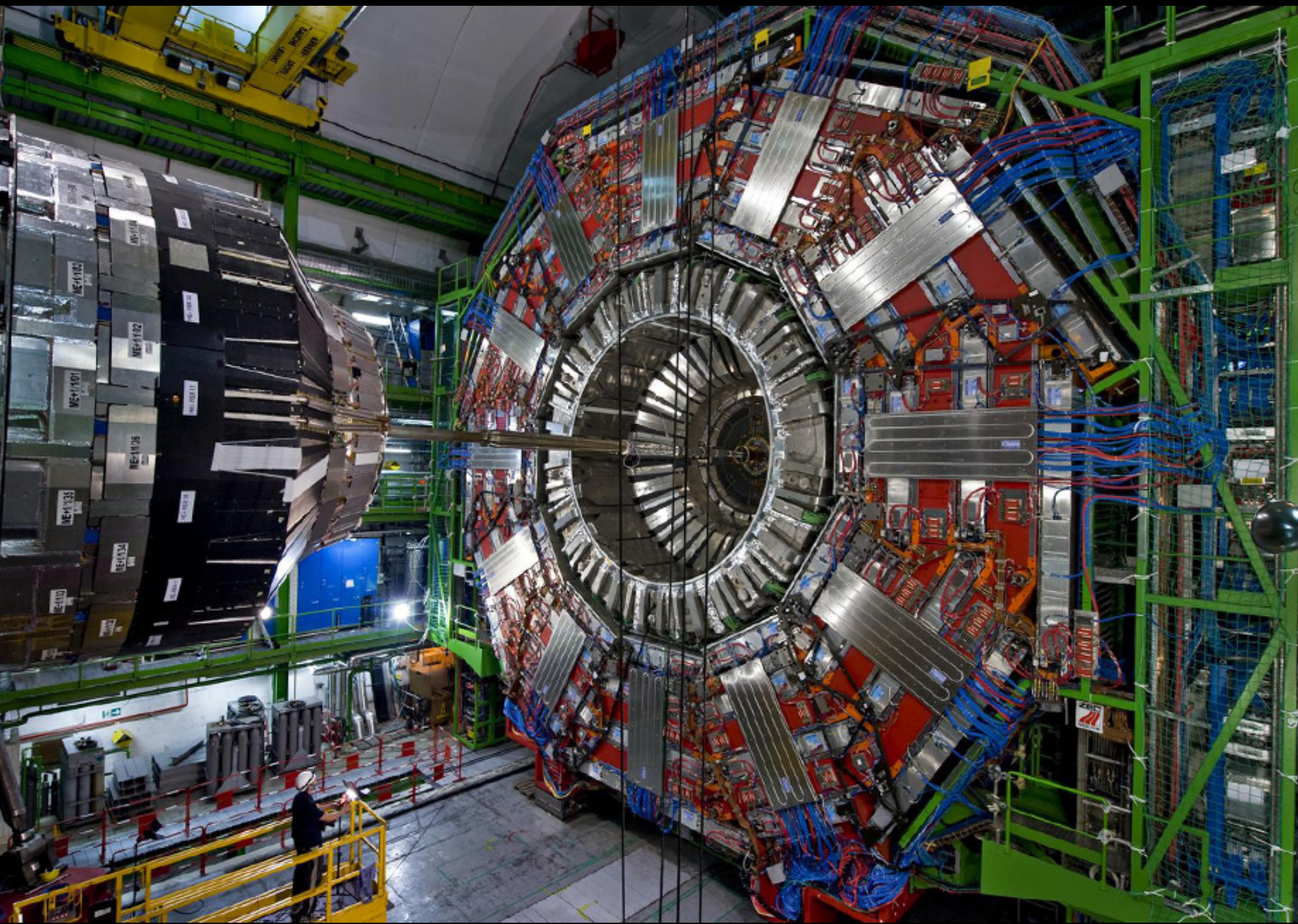
ME+2/107

ME+2/111

ME+2/112







CMS Experiment, CERN

# CMS Detector

Data\_taken 2009-Nov-07 19:12:36.880368 GMT

Run\_no 120015

Event\_no 8

Lumi\_sec 1

Orbit 584946

Crossing 2603

<http://iguana.cern.ch/isy/>

L1 Triggers:

-----  
L1\_DoubleHfBitCountsRing1\_P1N1

L1\_DoubleHfBitCountsRing2\_P1N1

L1\_ETM20

L1\_ETM30

L1\_MinBias\_HTT10

L1\_Mu3QE8\_Jet6

L1\_SingleEG1

L1\_SingleEG10

L1\_SingleEG12

L1\_SingleEG15

L1\_SingleEG20

L1\_SingleEG25

L1\_SingleEG30

L1\_SingleEG35

L1\_SingleEG40

L1\_SingleEG45

L1\_SingleEG50

L1\_SingleEG55

L1\_SingleEG60

L1\_SingleEG65

L1\_SingleEG70

L1\_SingleEG75

L1\_SingleEG80

L1\_SingleEG85

L1\_SingleEG90

L1\_SingleEG95

L1\_SingleEG100

L1\_SingleEG105

L1\_SingleEG110

L1\_SingleEG115

L1\_SingleEG120

L1\_SingleEG125

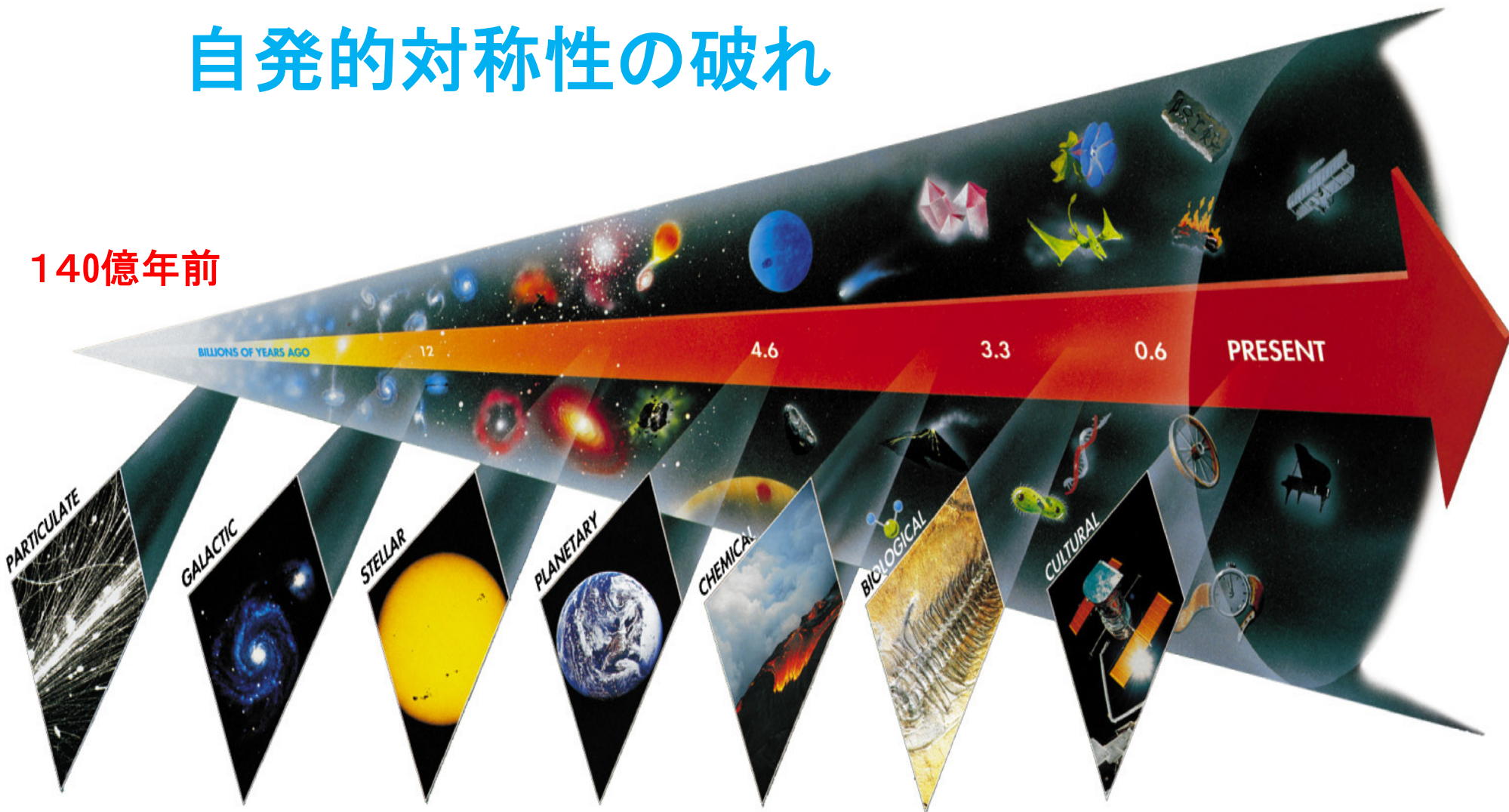
L1\_SingleEG130

**First Event at LHC – Recreation of the Big Bang! (Nov 7, 2009)**

# 宇宙進化の7段階

## 自発的対称性の破れ

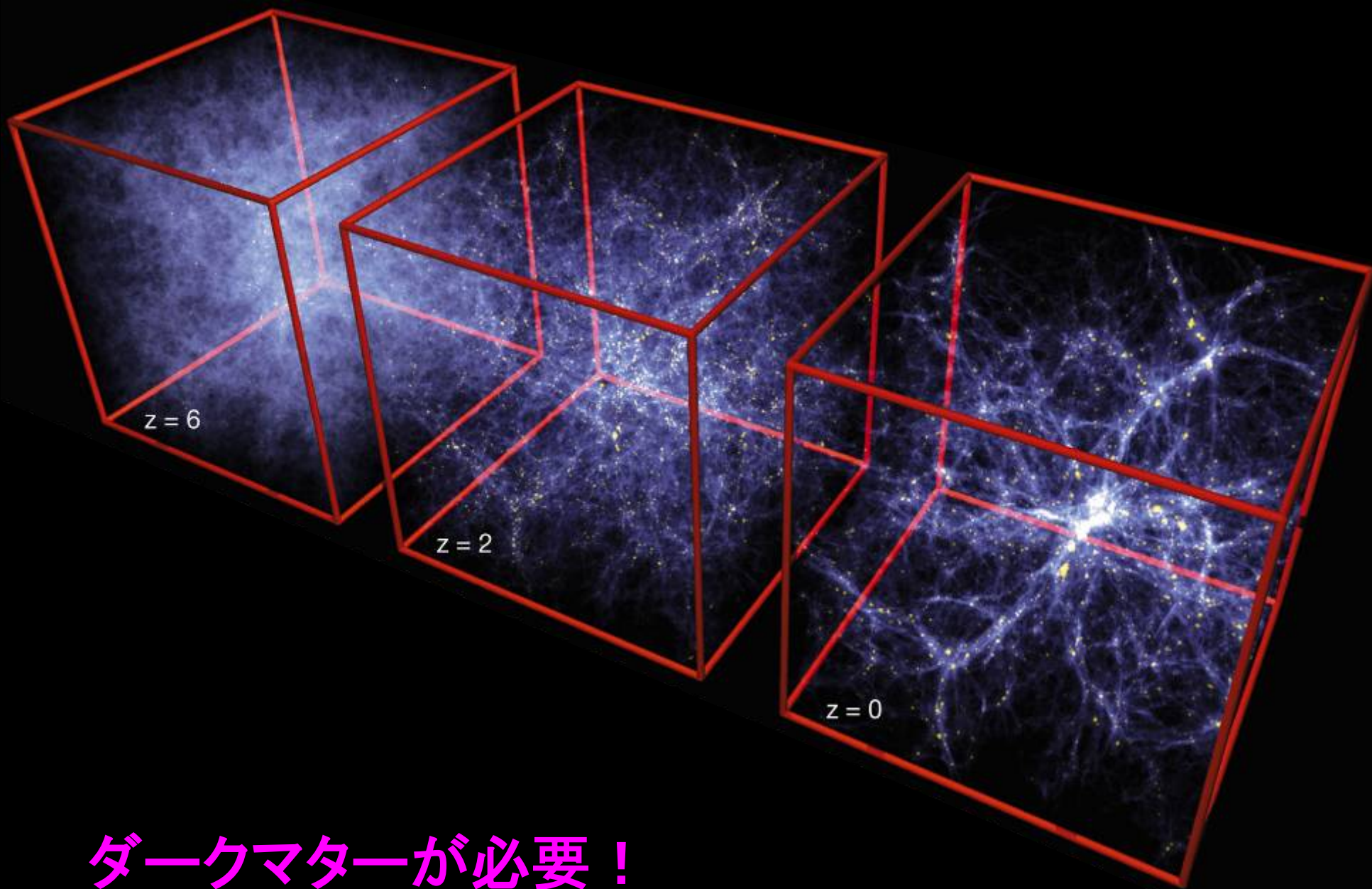
140億年前



粒子の  
起源

構造の  
起源

# 宇宙の構造の進化



ダークマターが必要！

# Andromeda



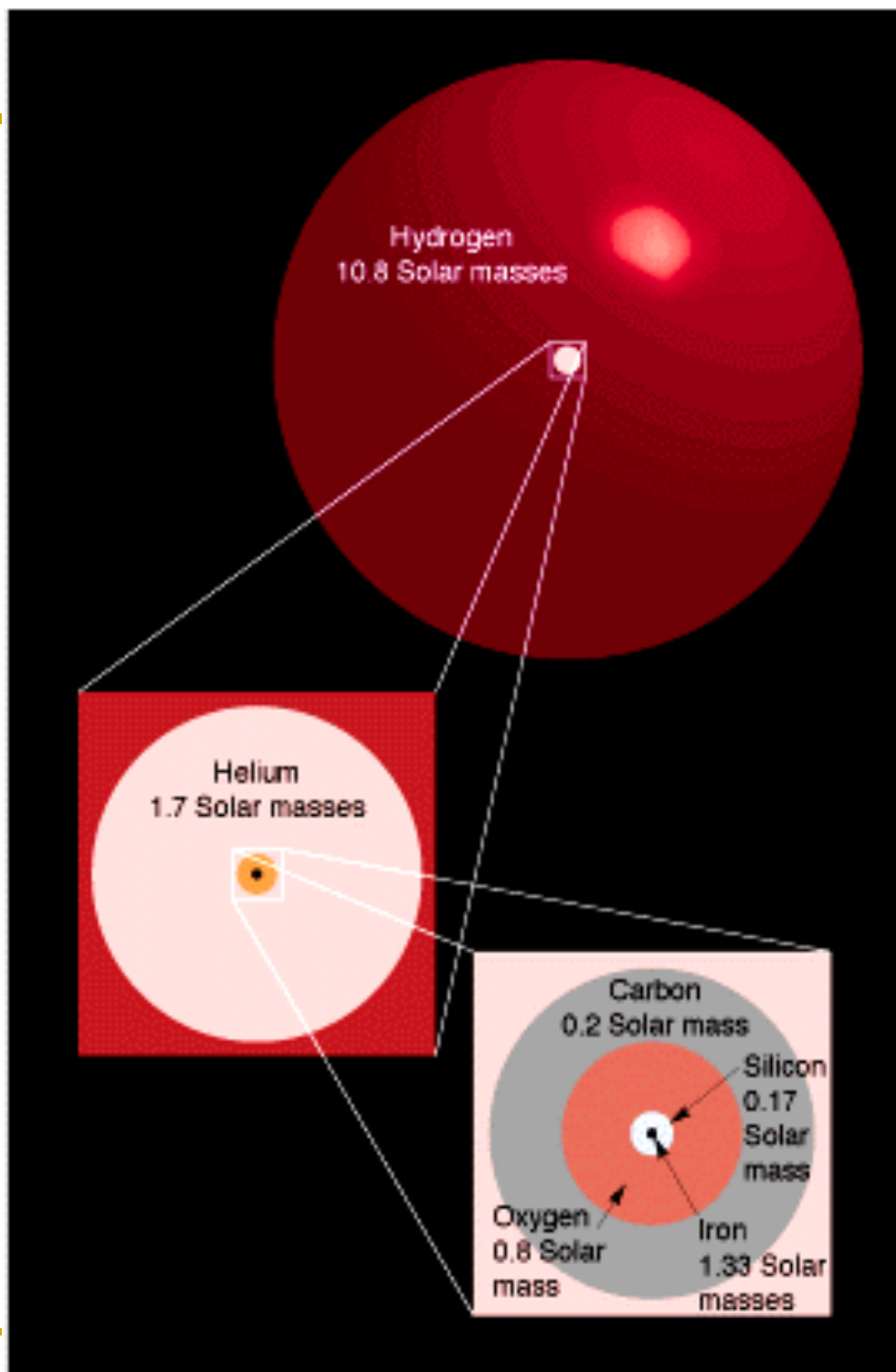
ダークマターが必要！

# 重い星の一生

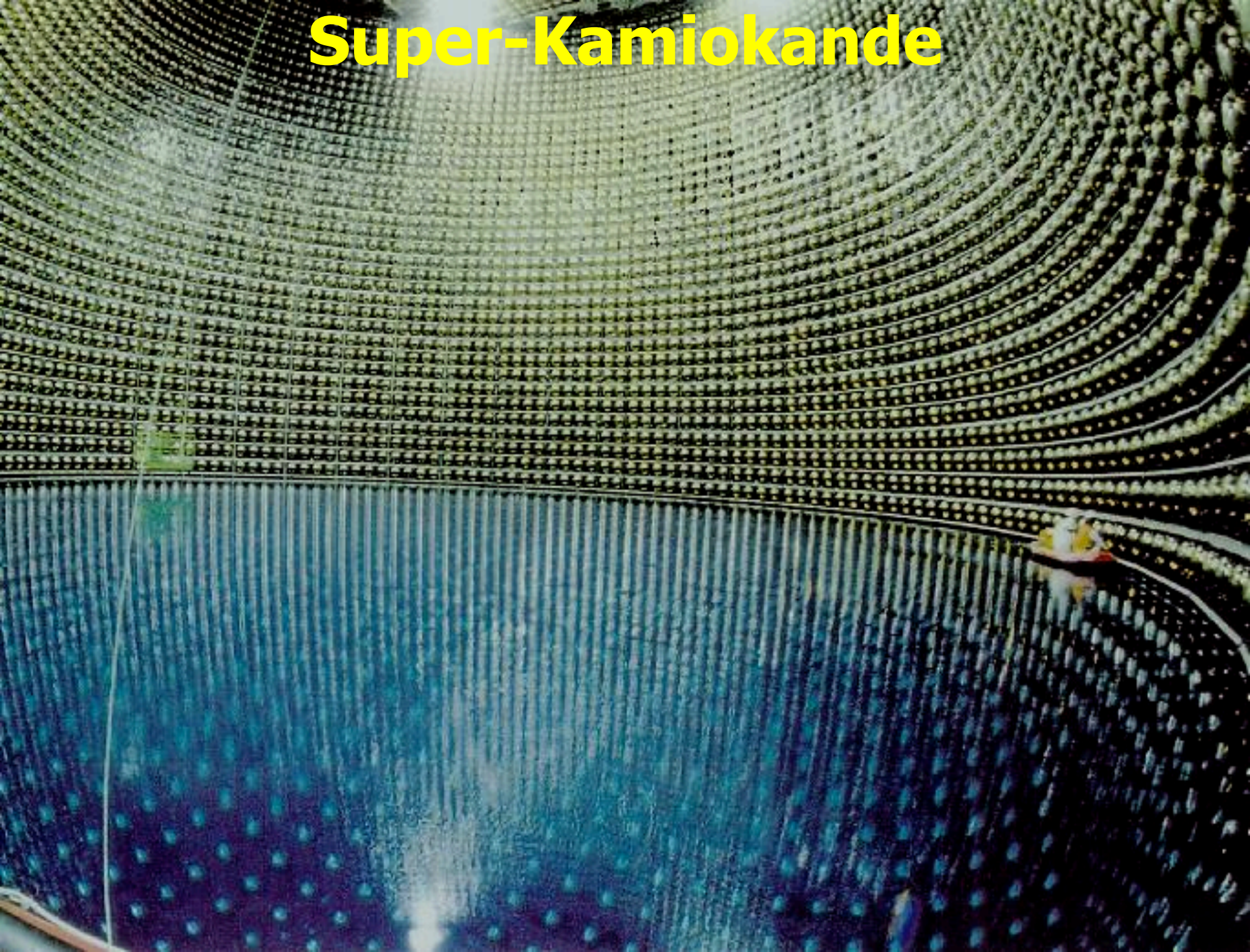
(太陽の20倍の重さ)

水素	$10^7$ 年
ヘリウム	$10^6$ 年
炭素	$10^3$ 年
酸素	1 年
珪素	1 週間
鉄	< 1 日

そして超新星爆発！  
(1987年にニュートリノ検出)



# Super-Kamiokande



# 2002年のノーベル物理学賞



## The Nobel Prize in Physics 2002

"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

"for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"

小柴昌俊



**Raymond Davis Jr.**

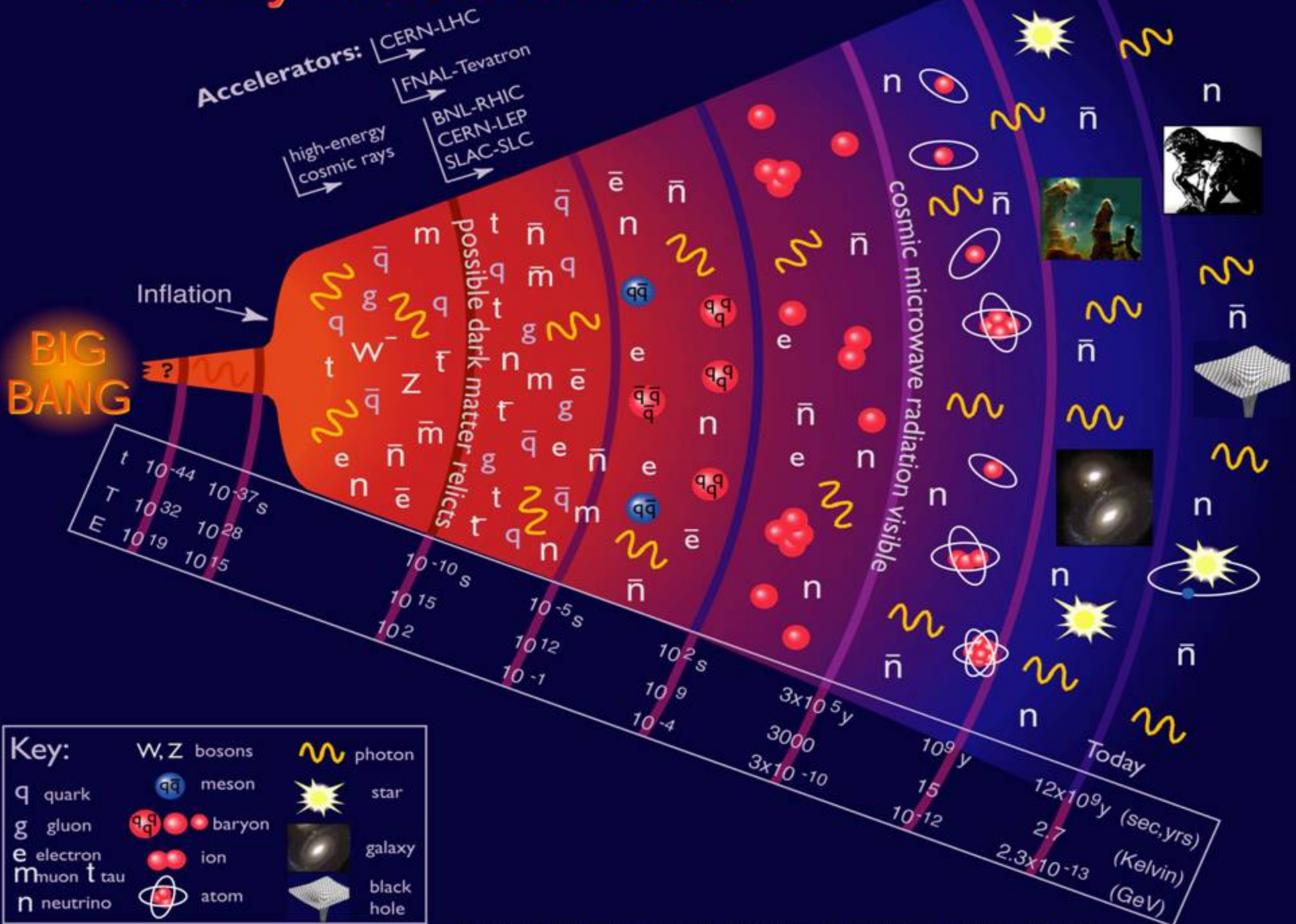


**Masatoshi Koshihara**



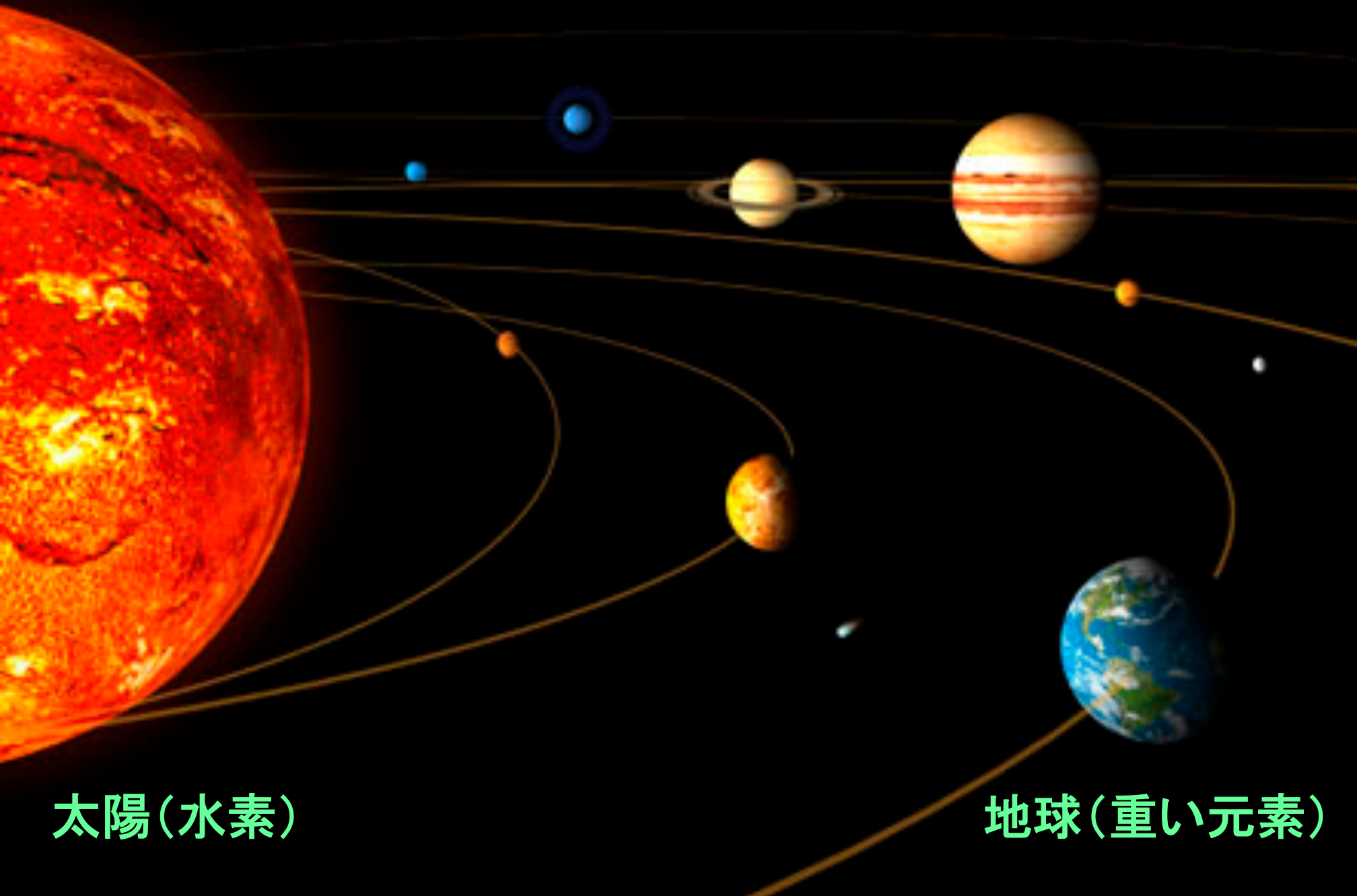
**Riccardo Giacconi**

# History of the Universe



# 生命の起源

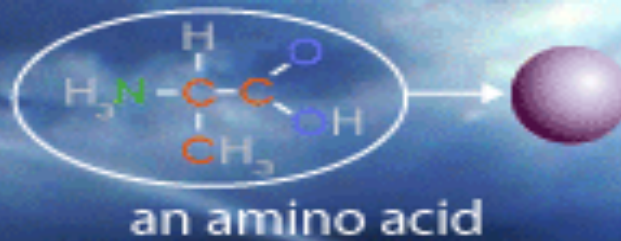
# 太陽系の誕生（46億年前）



太陽(水素)

地球(重い元素)

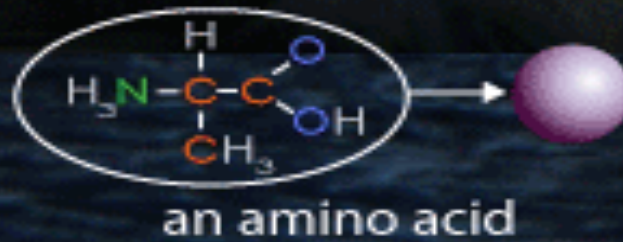
# 生命の起源 (~38億年前)



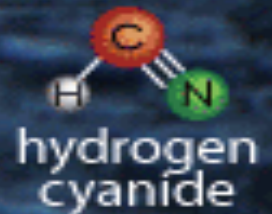
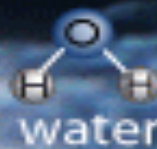
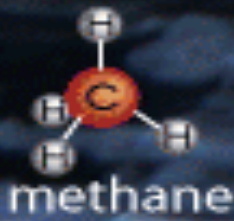
organic monomers from space



organic polymers

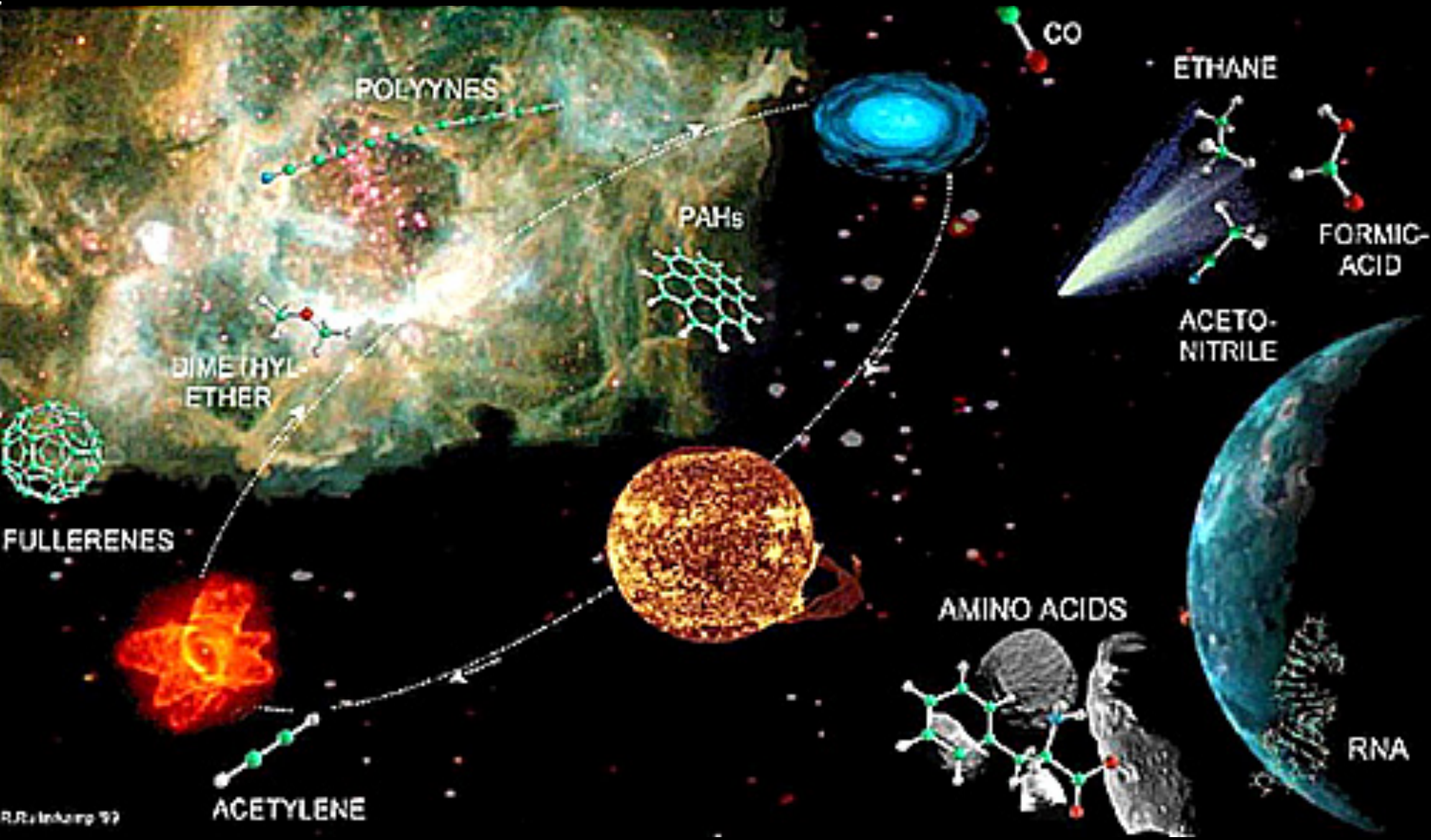


organic monomers

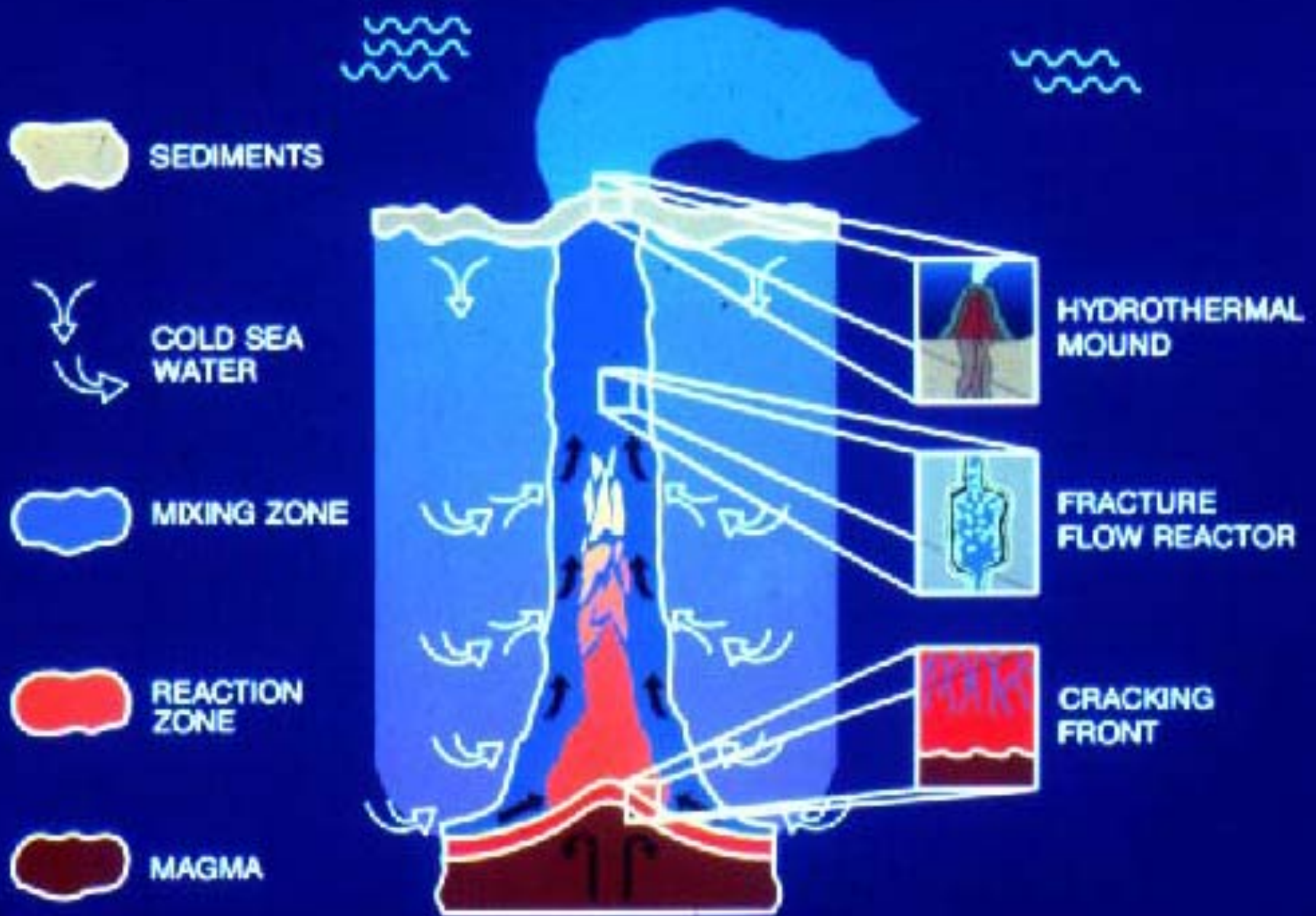


inorganic molecules from Earth

# 宇宙空間を漂う有機物



# 深海熱水孔 — 生命の起源

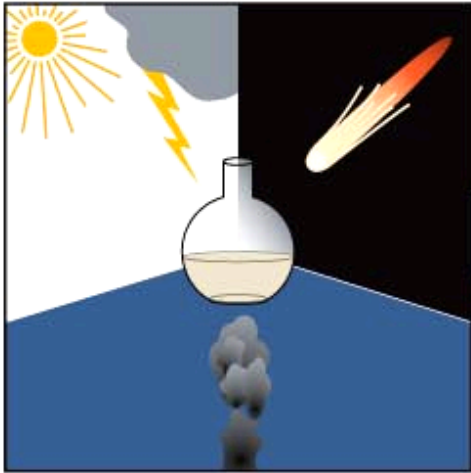


# 熱平衡からの離脱と進化

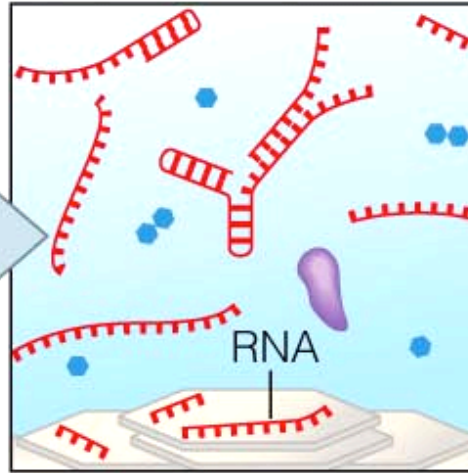
- **素粒子** — 電子、クォーク...
  - 自発的対称性の破れ(ヒッグス機構)
- **元素** — 炭素、酸素、窒素、鉄...
  - 超新星の爆発
- **有機物** — アンモニア、メタン、アミノ酸...
  - 紫外線による星間物質の進化
- **生命の起源** — RNA、タンパク質、DNA...
  - 深海熱水孔

# RNA ワールド (~37億年前)

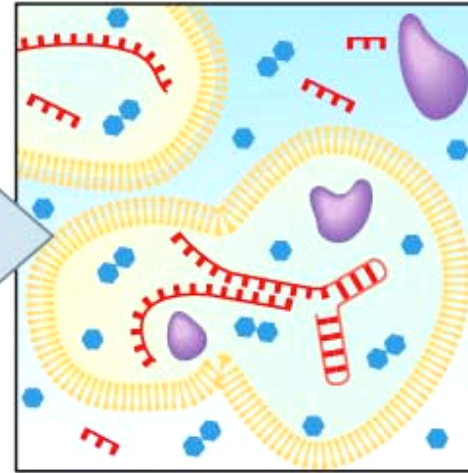
1. Organic precursor molecules appear.



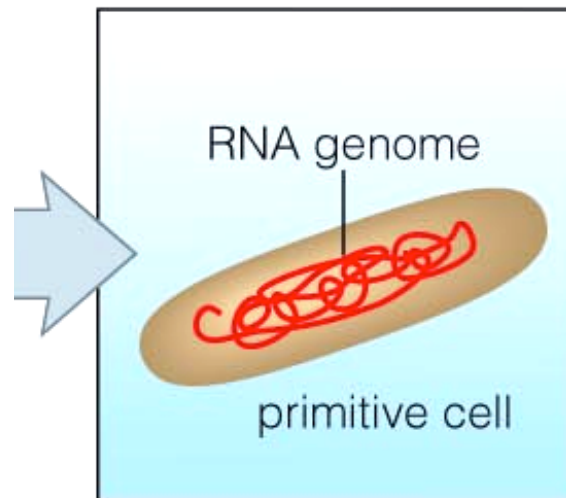
2. RNA molecules become self-replicating.



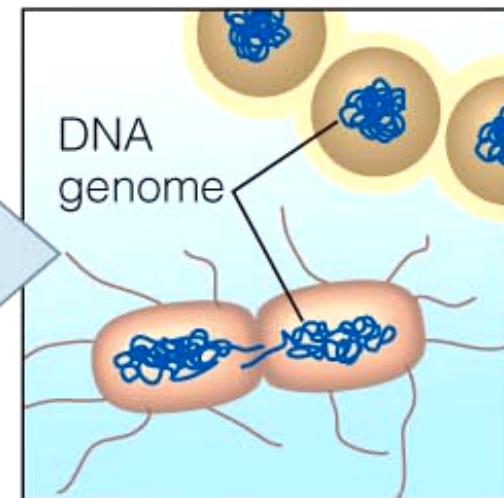
3. Membrane-enclosed pre-cells arise.



4. True cells with RNA genome appear.



5. Modern cells with DNA genome evolve.



Copyright © 2007 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson

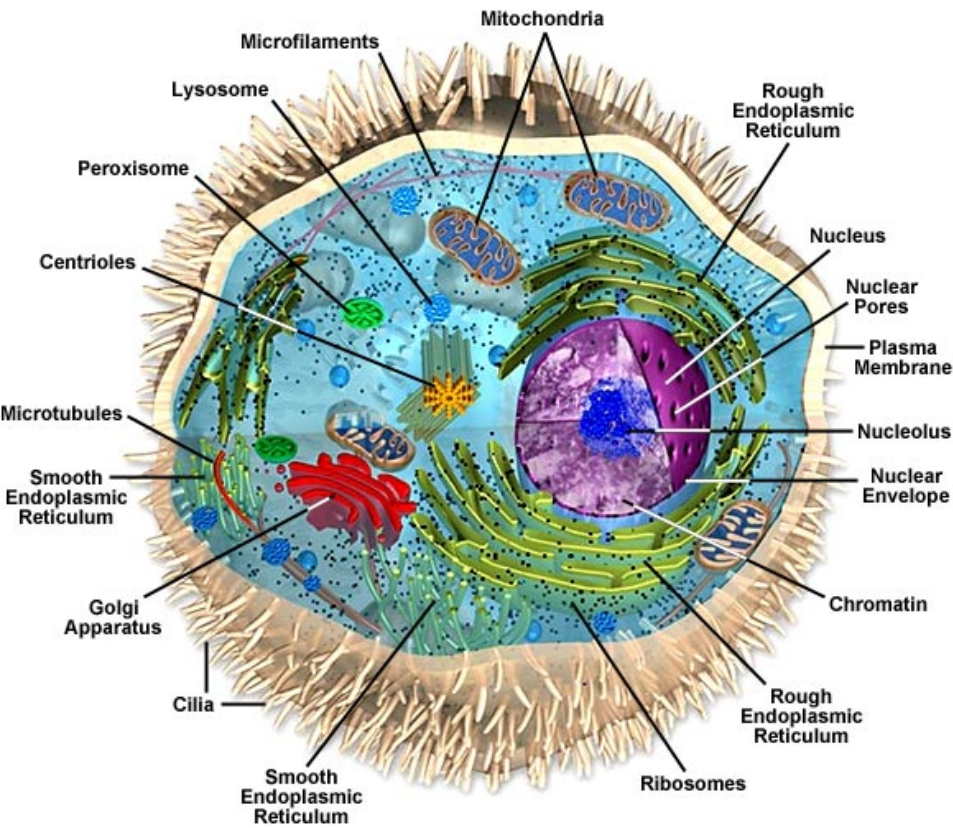
# 真核細胞（～20億年前）

## 自発的対称性の破れ

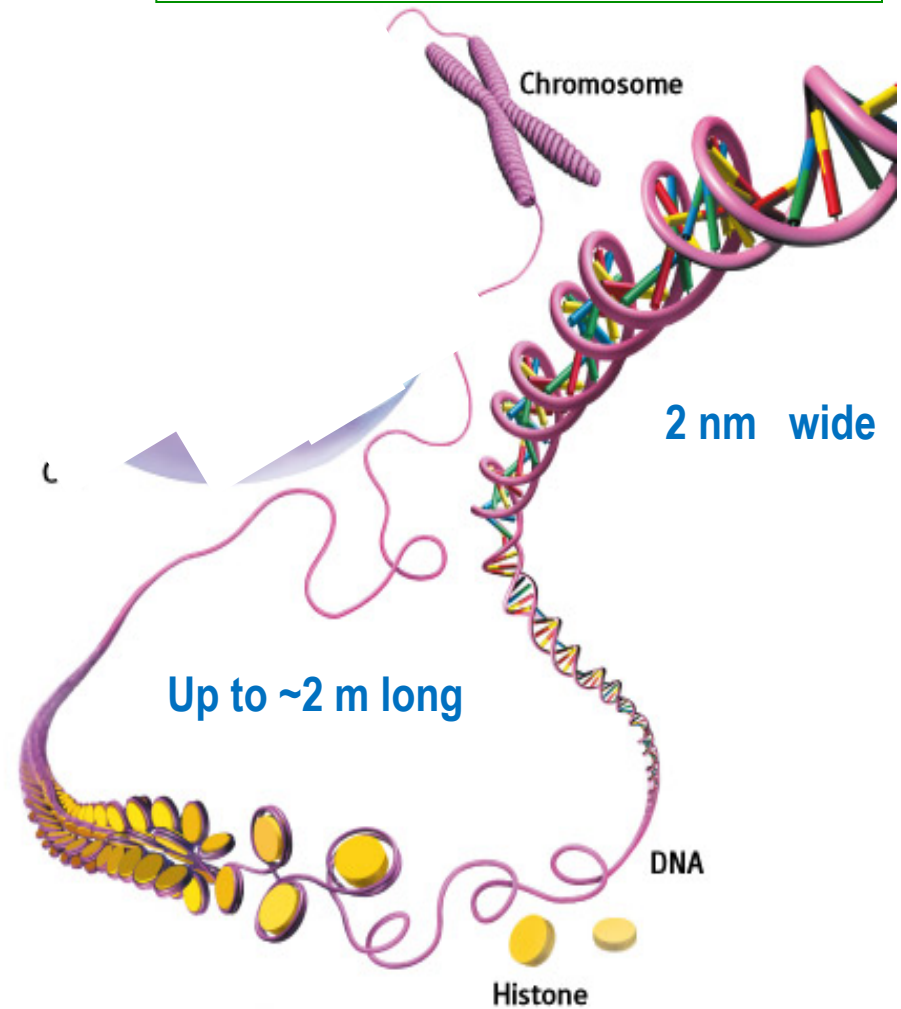
タンパク質でできた細胞



遺伝情報を持つDNA



← 10 - 50 μm →



# 光合成と呼吸

## 自発的対称性の破れ

光合成生物(植物)  
葉緑体



呼吸生物(動物)  
ミトコンドリア

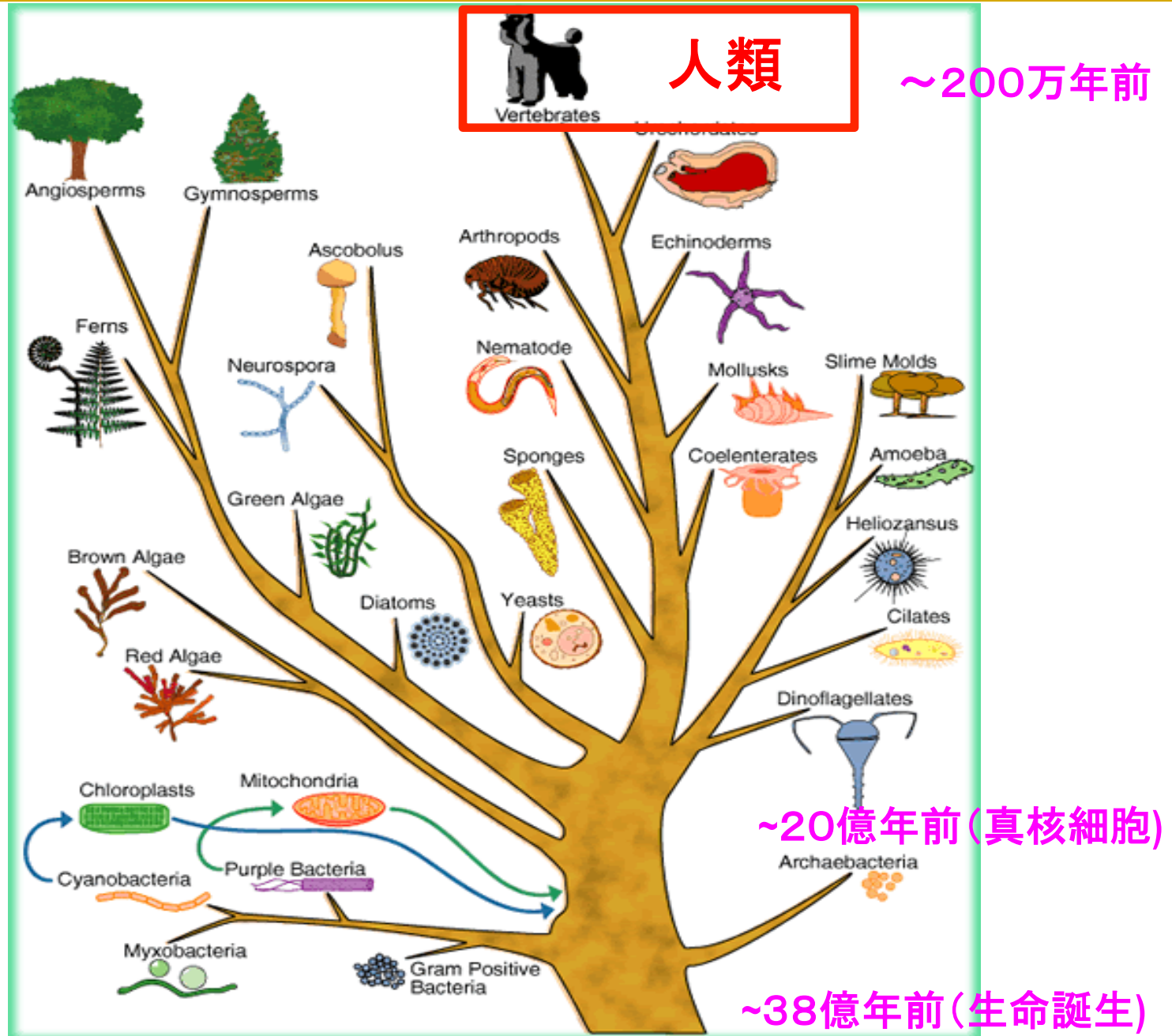
光合成



呼吸



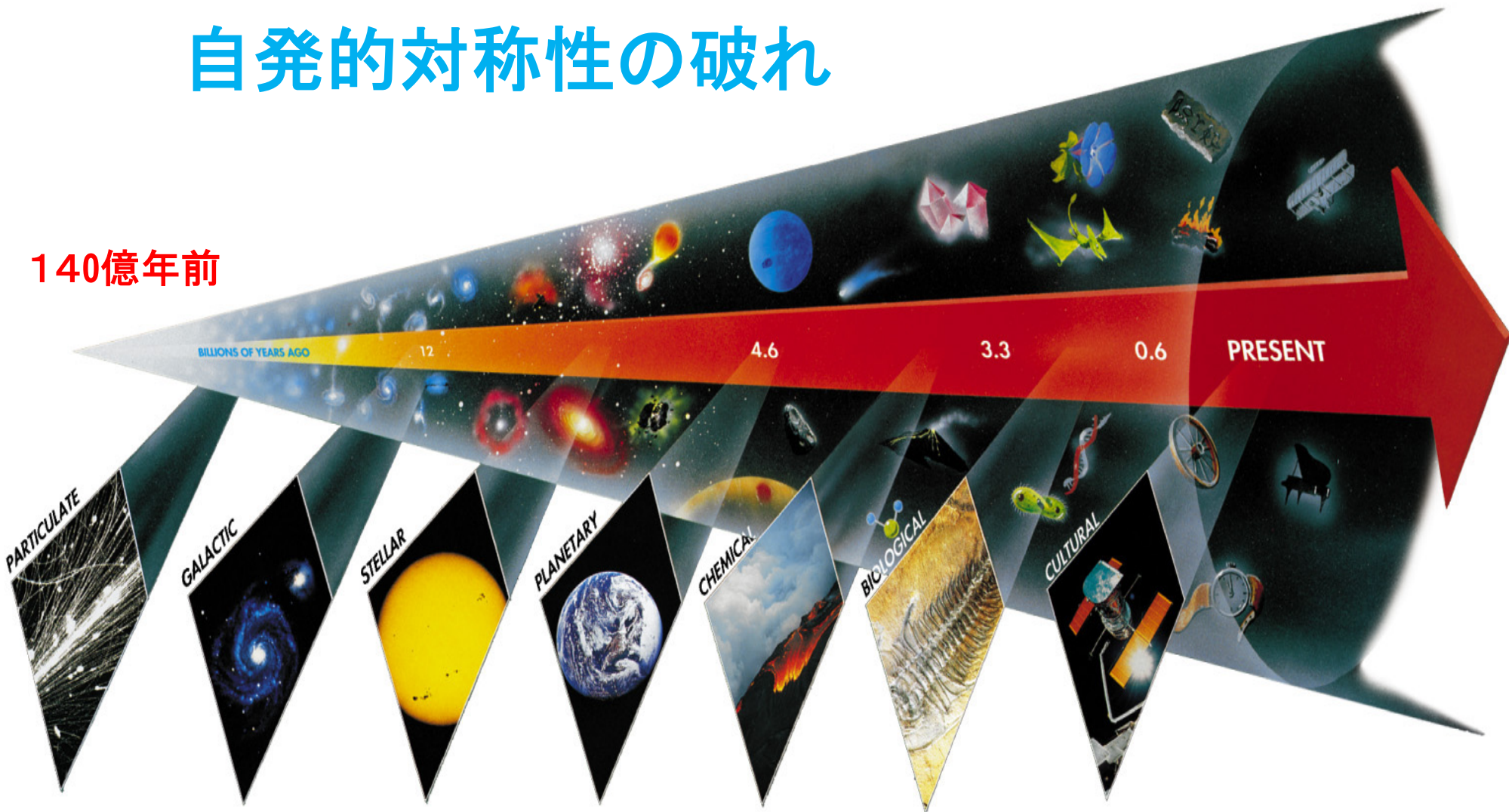
# 生命進化の系統図



# 宇宙進化の7段階

## 自発的対称性の破れ

140億年前



単純

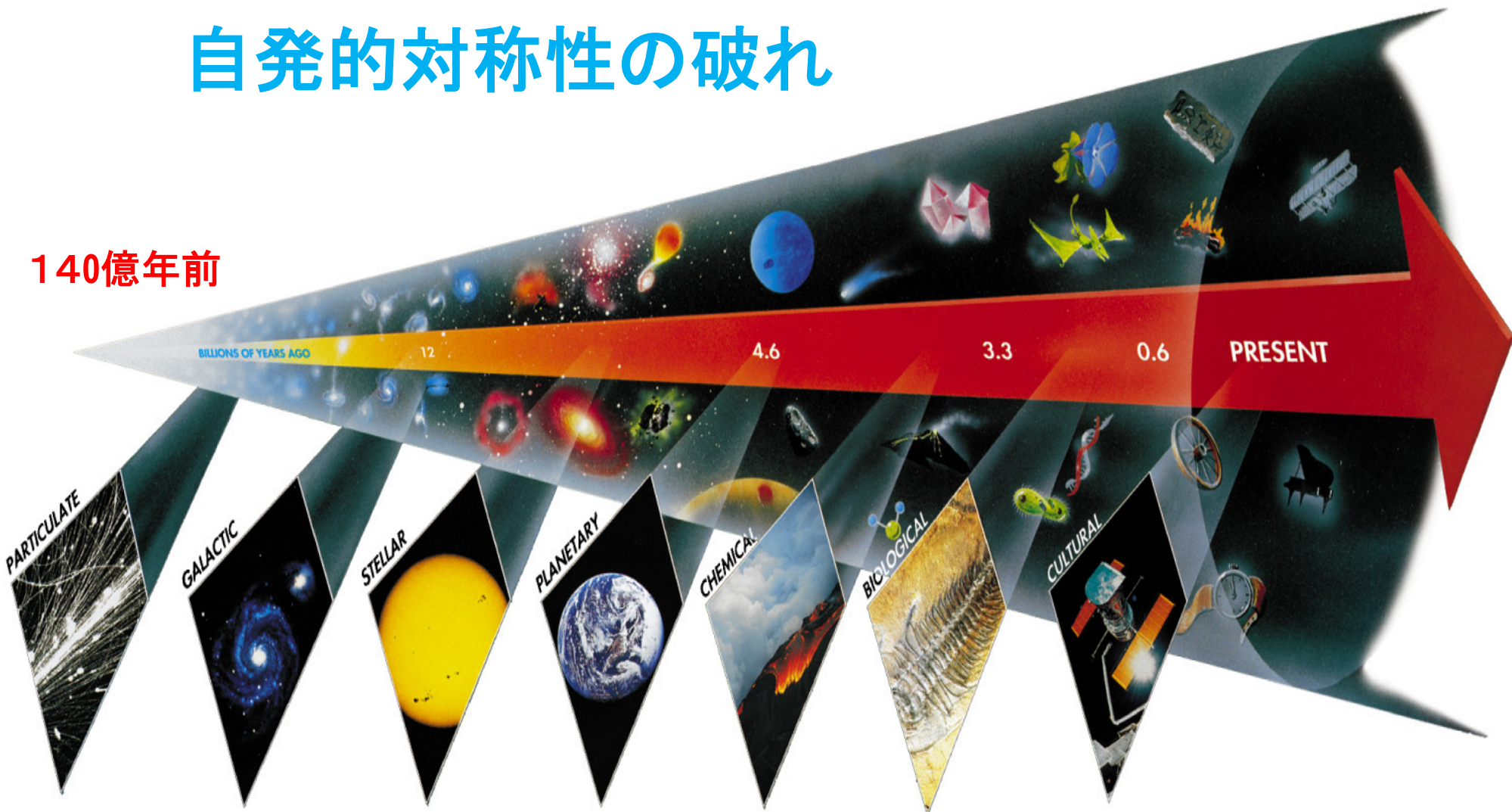


秩序だった複雑系

# 宇宙進化の7段階

## 自発的対称性の破れ

140億年前

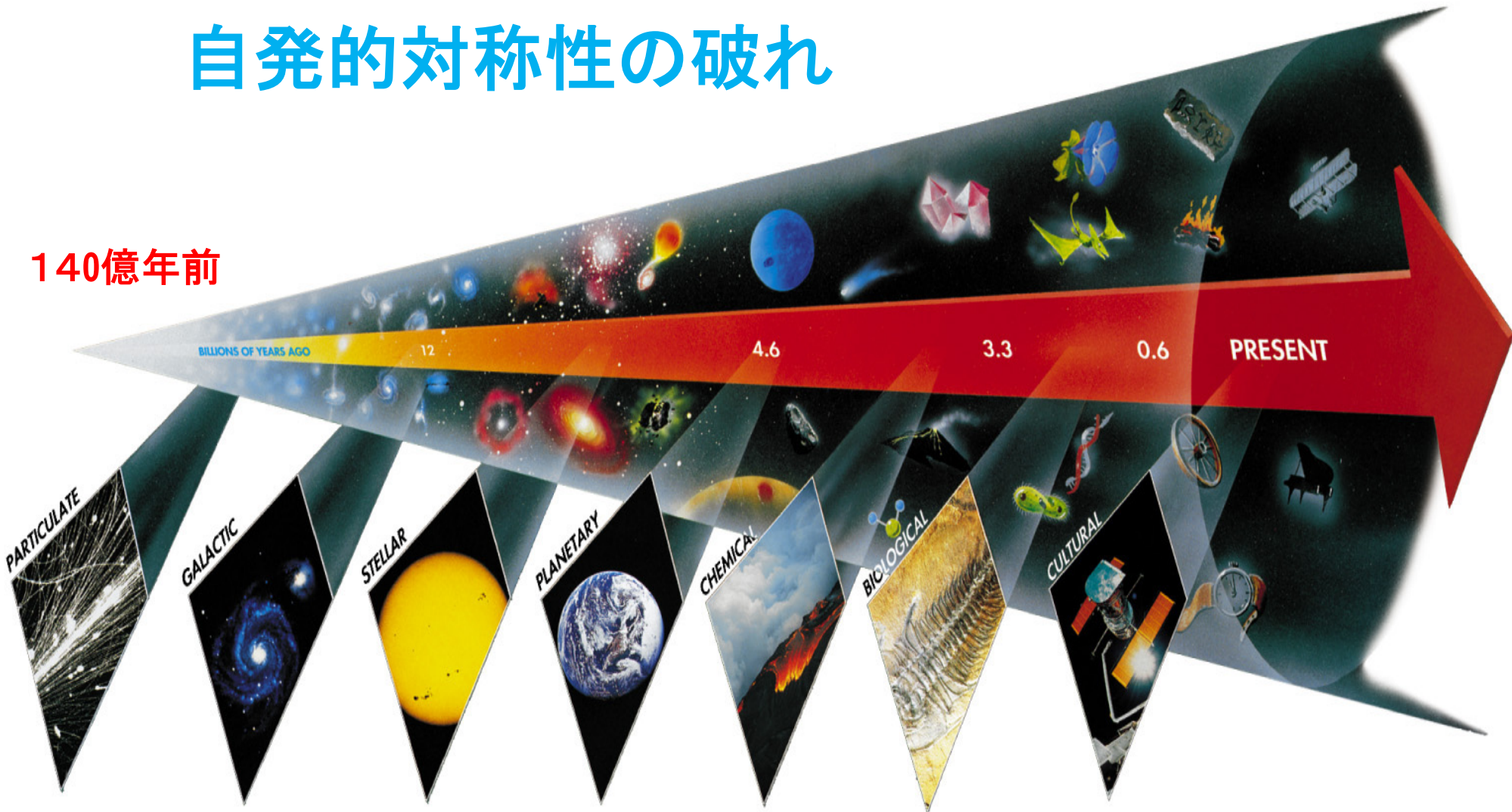


生命の  
起源

# 宇宙進化の7段階

## 自発的対称性の破れ

140億年前



加速器

望遠鏡

顕微鏡

# 生命の誕生を解き明かす意義

- 宇宙の起源と我々を結ぶ連結点が、生命の起源。
- 光で宇宙を見ると同じ原理で、光で生命現象を捉える。

望遠鏡 ↔ 顕微鏡

# 生命とは何か？

# オーストラリア Walter and Eliza Hall Institute によるコンピューターグラフィックス

## Body Code(8分間)

- 細胞と細胞膜の実際の動き
- DNAの2重螺旋の構造
- 細胞分裂時のDNAのコピー
- DNA からRNA への転写
- RNAからタンパク質(ヘモグロビン)の合成



# どうやって生命の謎を解き明かす？

## ➤ 4次元情報

- 今までの情報は2次元(xy)
  - 時間軸が未だ抜けている。
  - DNA Sequencingが良い例
- せいぜいがビデオレートの3次元像(xyt)

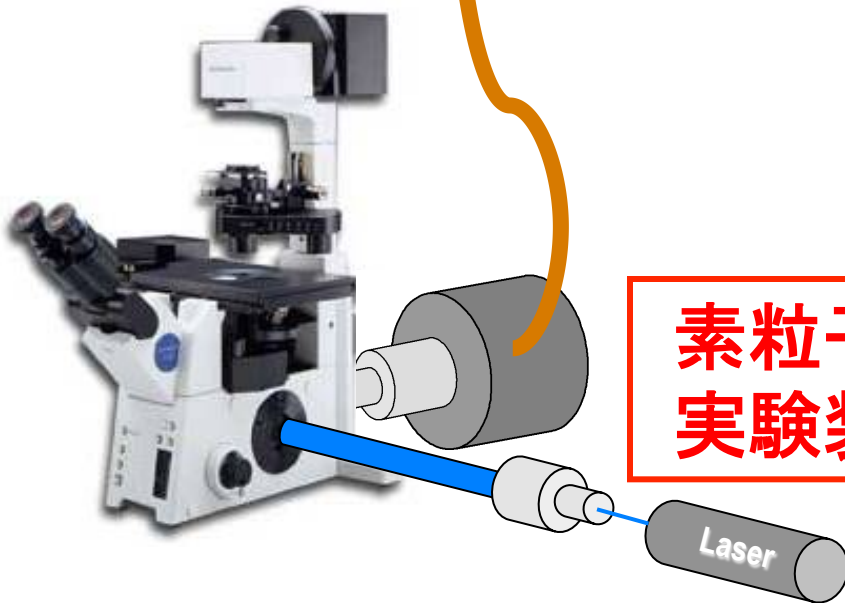
## ➤ 圧倒的なサンプル量の統計処理

- DNA Sequencingが良い成功例
- 統計揺らぎの中にガウス分布でない裾野を見出す。

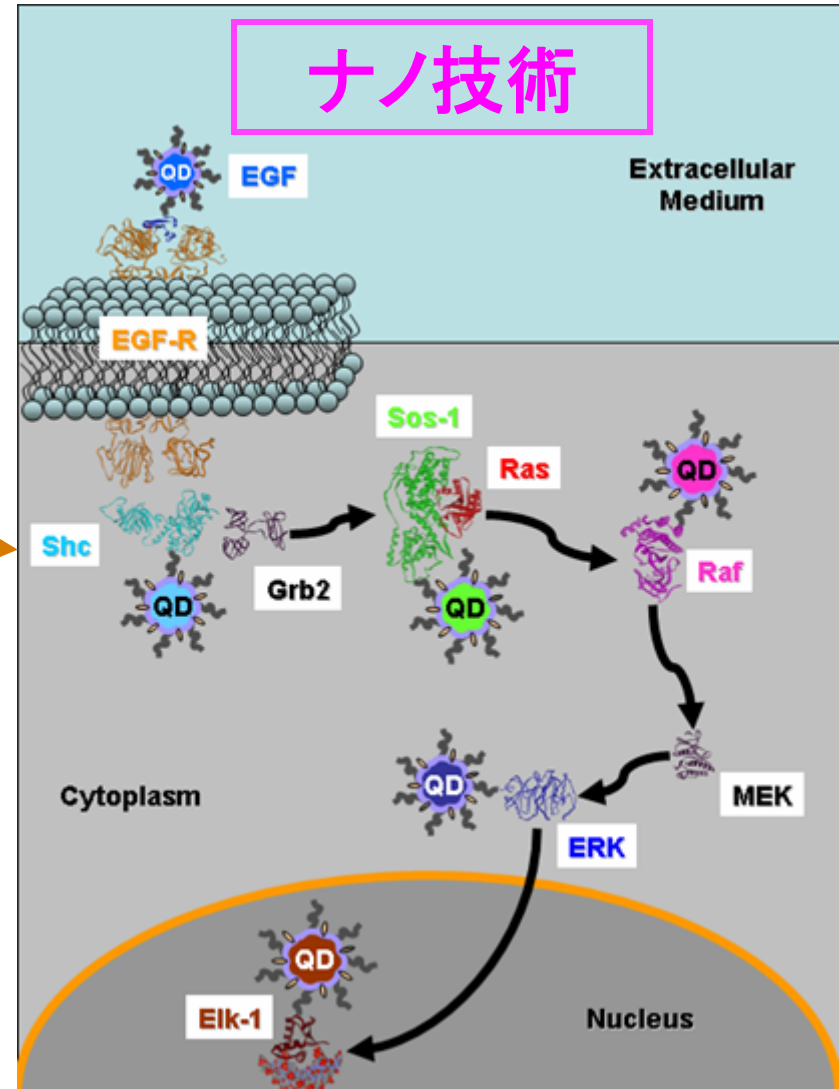
## ➤ 多体系の相互作用の観測。

# 単分子のイメージング

January 2006

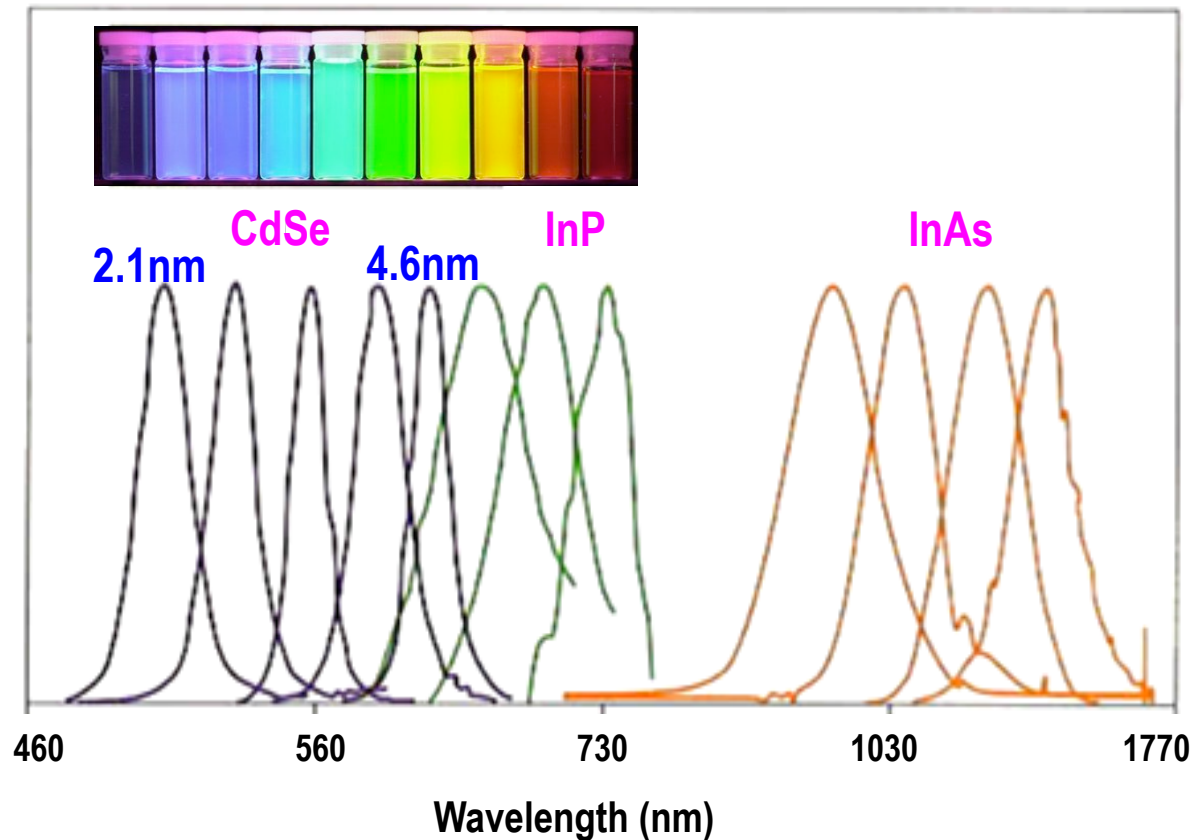
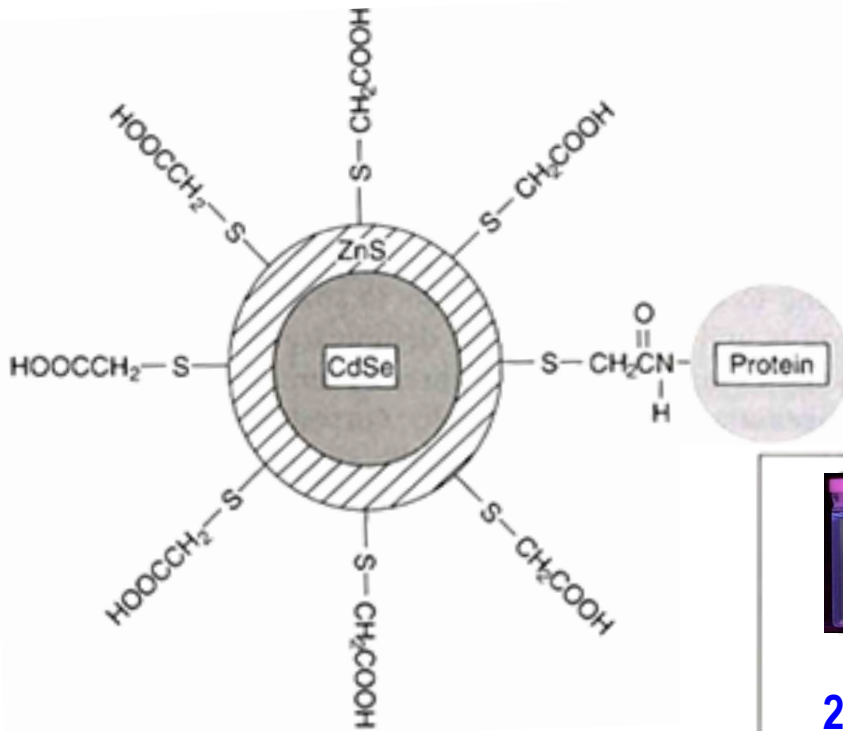


Shimon Weiss (Chemistry)



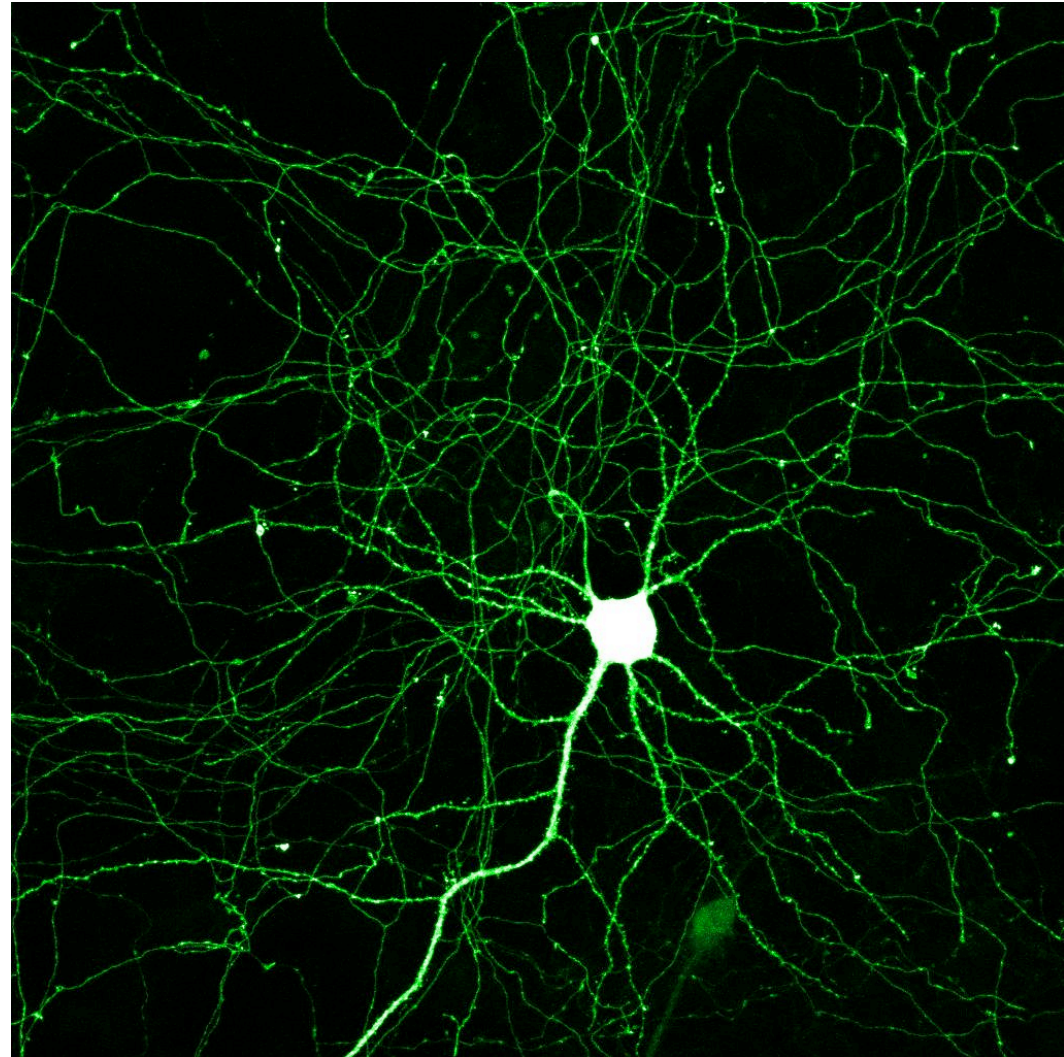
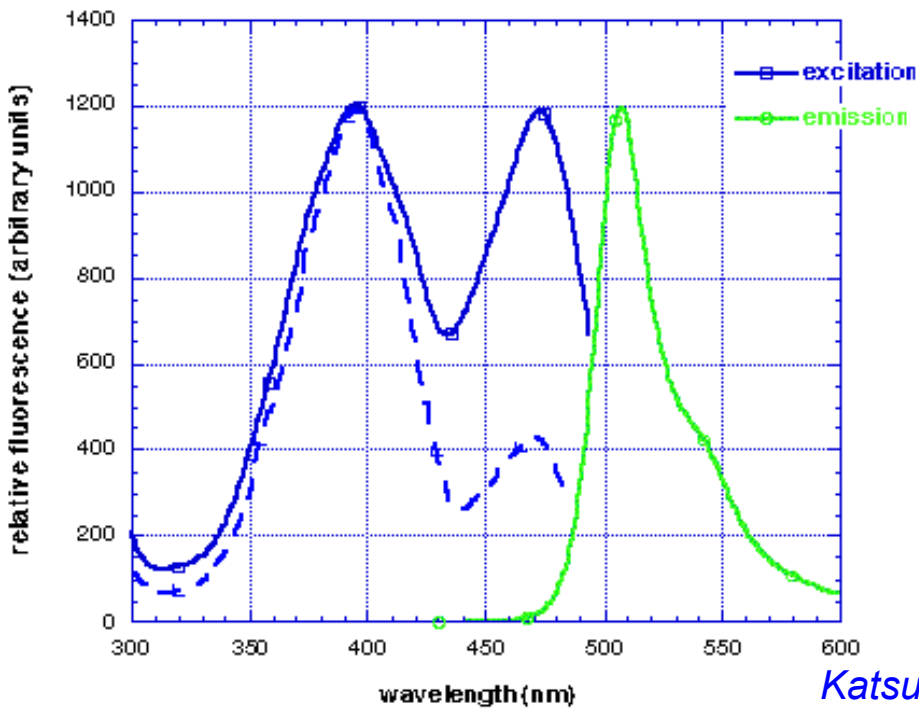
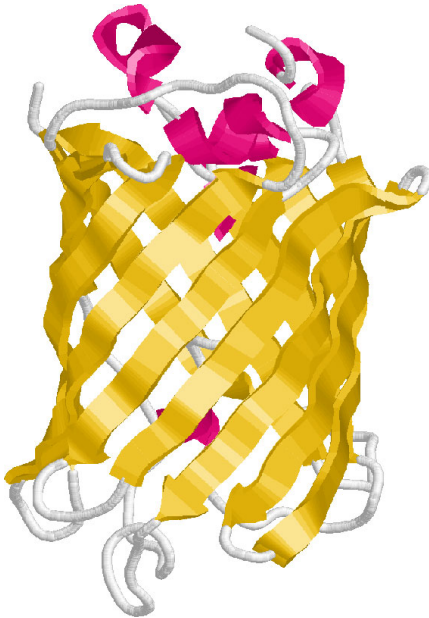
# 量子ドットの発光波長

Shimon Weiss (Chemistry)



# GFP (Green Fluorescent Protein)

*Osamu Shimomura*



# 2008年のノーベル化学賞



## The Nobel Prize in Chemistry 2008

"for the discovery and development of the green fluorescent protein, GFP"

下村脩

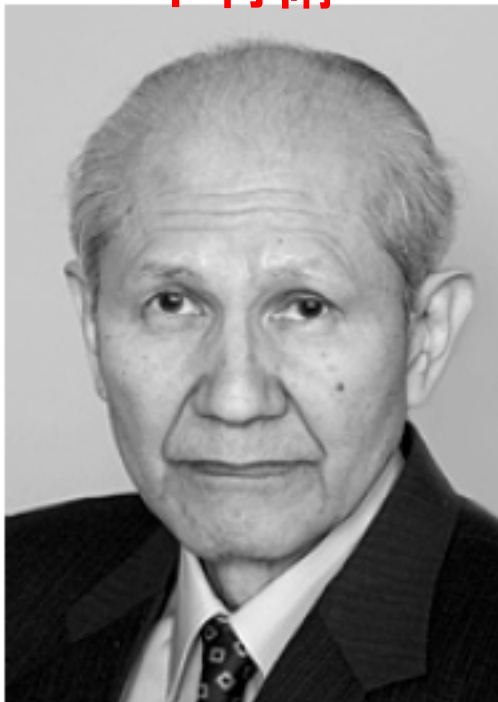


Photo: U. Montan

**Osamu Shimomura**



Photo: U. Montan

**Martin Chalfie**

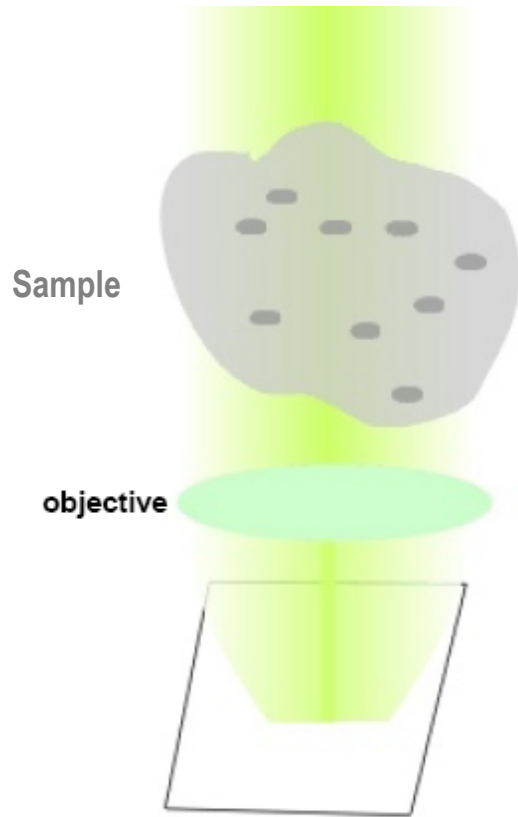


Photo: U. Montan

**Roger Y. Tsien**

# どうやって顕微鏡を高速化するか？

広角

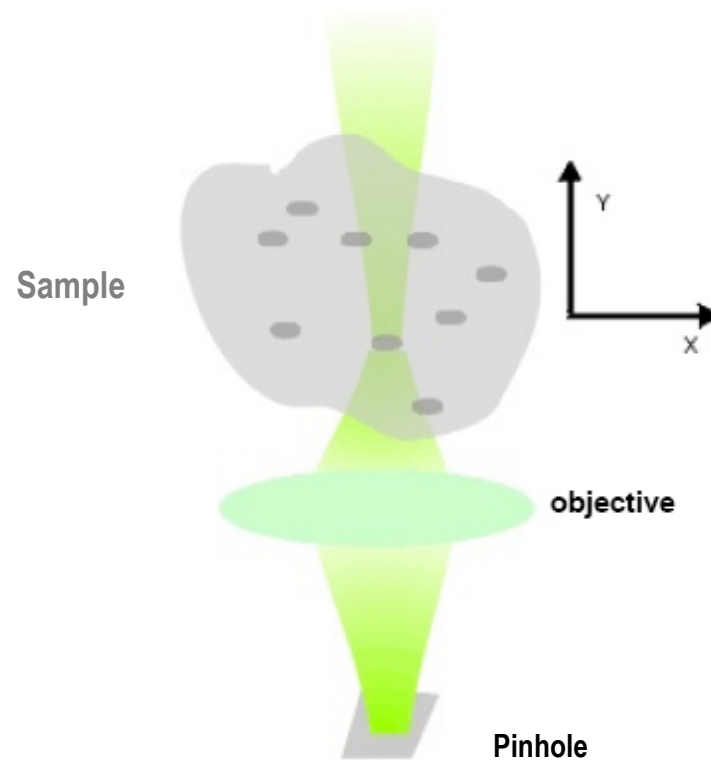


CCD + FADC (10 – 50 MHz)



CMOS [ FADC (50 MHz) \* 100 ]

共焦点



PMT + FADC (10 – 50 MHz)



[ HAPD + FADC (1 GHz) ] \* 64

# どうやって顕微鏡を高速化するか？

- 現状の顕微鏡は読み出し回路のバンド幅で制限されている。 (~ 10MB/sec)
  - たった1チャンネルのFACD
- 素粒子実験の応用 (> 10GB/sec)
  - もっとも高速の光検出器
  - Photon Counting
  - 複数チャンネルのFADCの使用

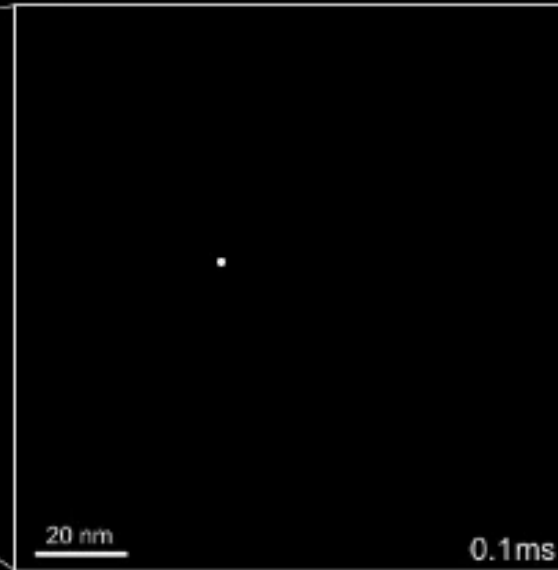
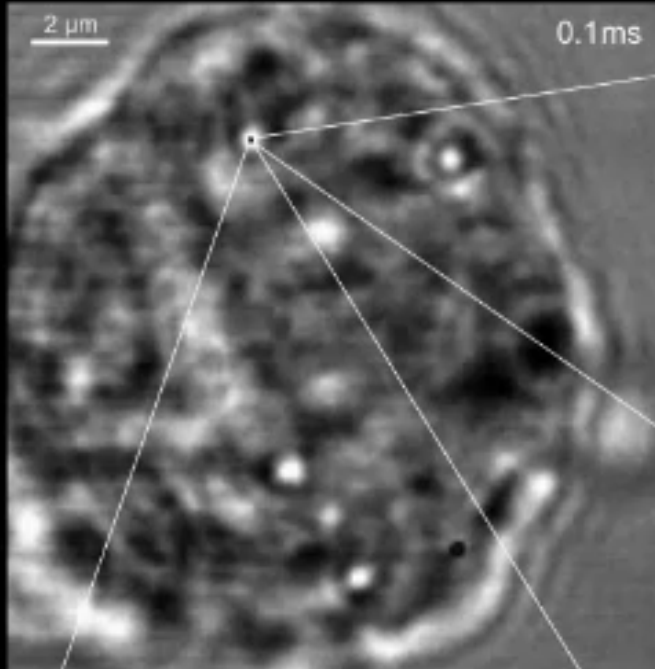
# Photron SA-5 CMOS Camera



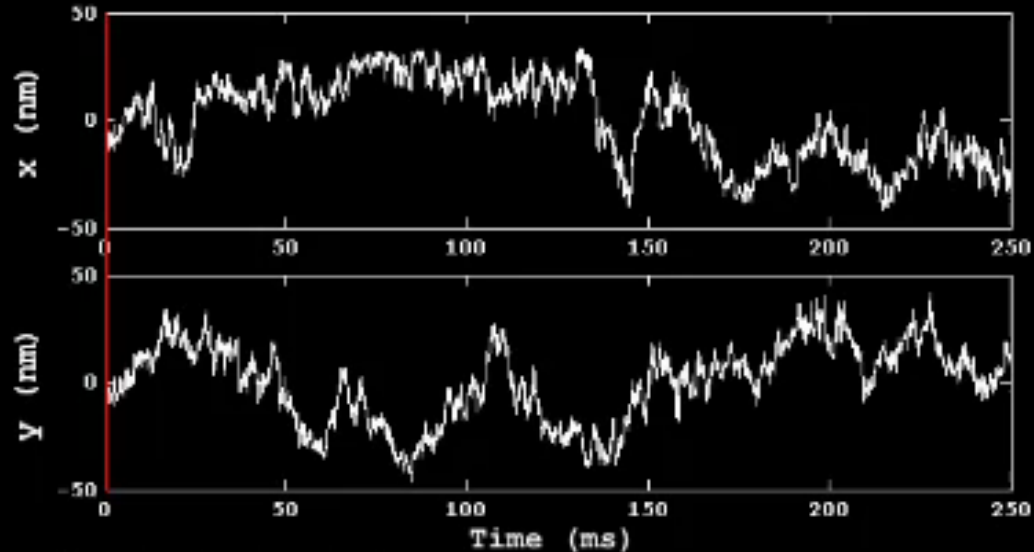
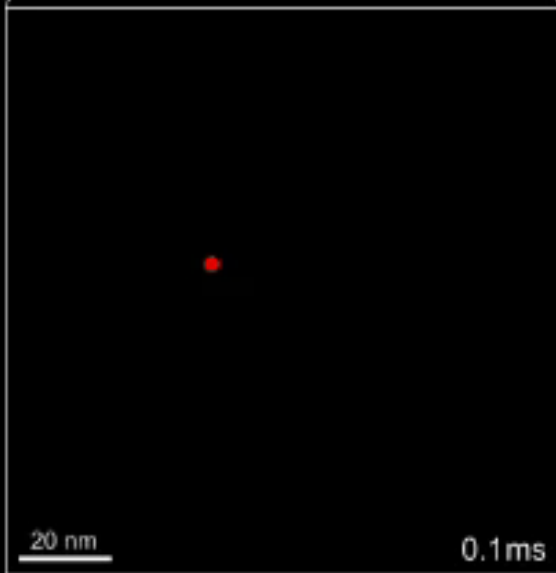
FRAME RATE (fps)	MAXIMUM RESOLUTION	
	Horizontal	Vertical
1,000	1,024	1,024
2,000	1,024	1,024
4,000	1,024	1,024
5,000	1,024	1,024
7,000	1,024	1,024
7,500	1,024	1,000
9,300	1,024	800
10,000	1,024	744
15,000	960	528
20,000	832	448
30,000	768	320
50,000	512	272
75,000	320	264
100,000	320	192
150,000	256	144
300,000	256	64
420,000	128	64
525,000	128	48
775,000	128	24
930,000	128	16
1,000,000	64	16

# Gold nano particle (40nm) attached to Transferrin Receptor (TfR) on Cancer Cell

*Manuel Penichet (Oncology), John Miao (Physics)*



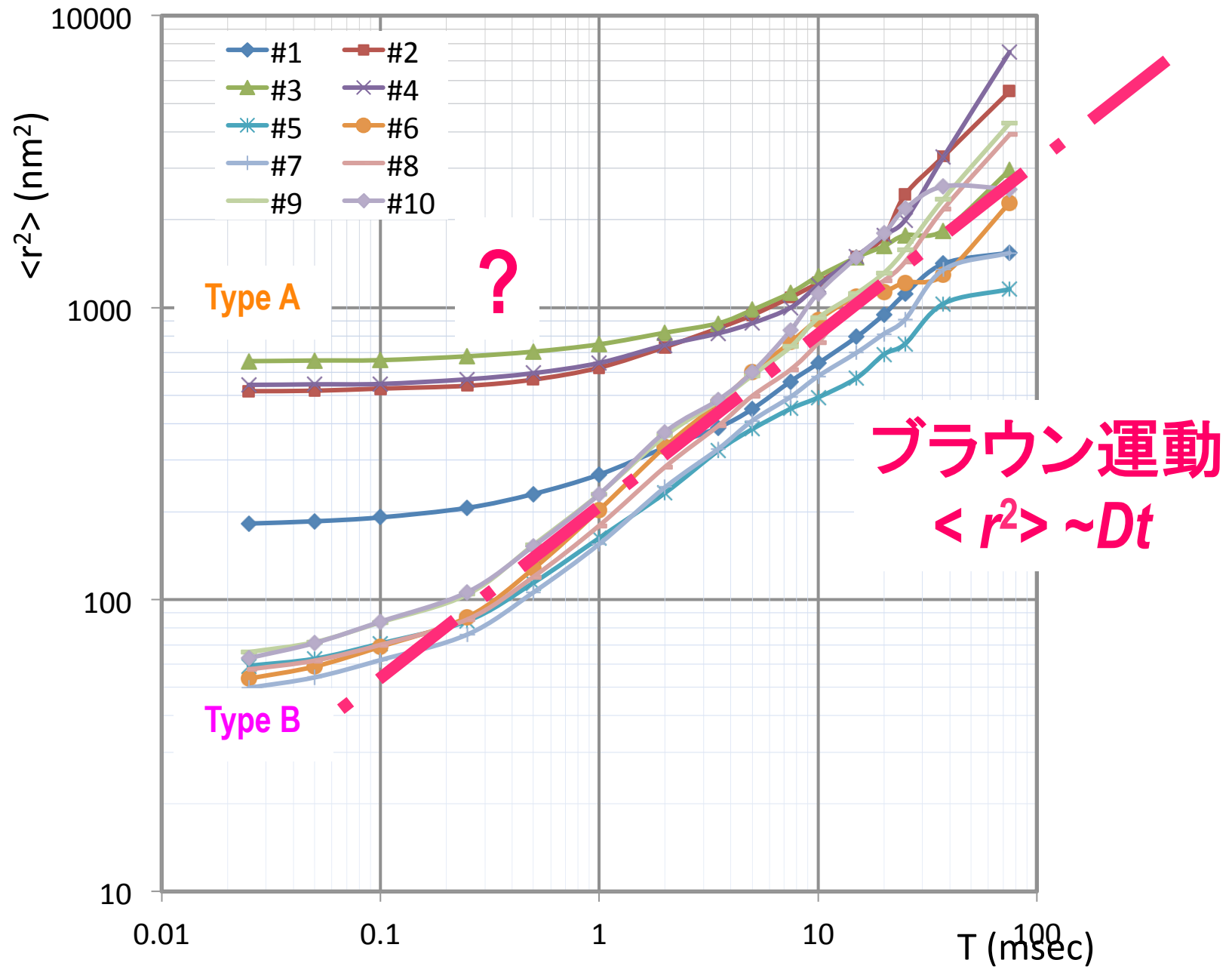
10,000 frame/sec



UCLA Fast Bio-Imaging Group

L. Fredrickson, J. Rodriguez, A. Cheng, K. Jewhurst, J. Miao, K. Arisaka

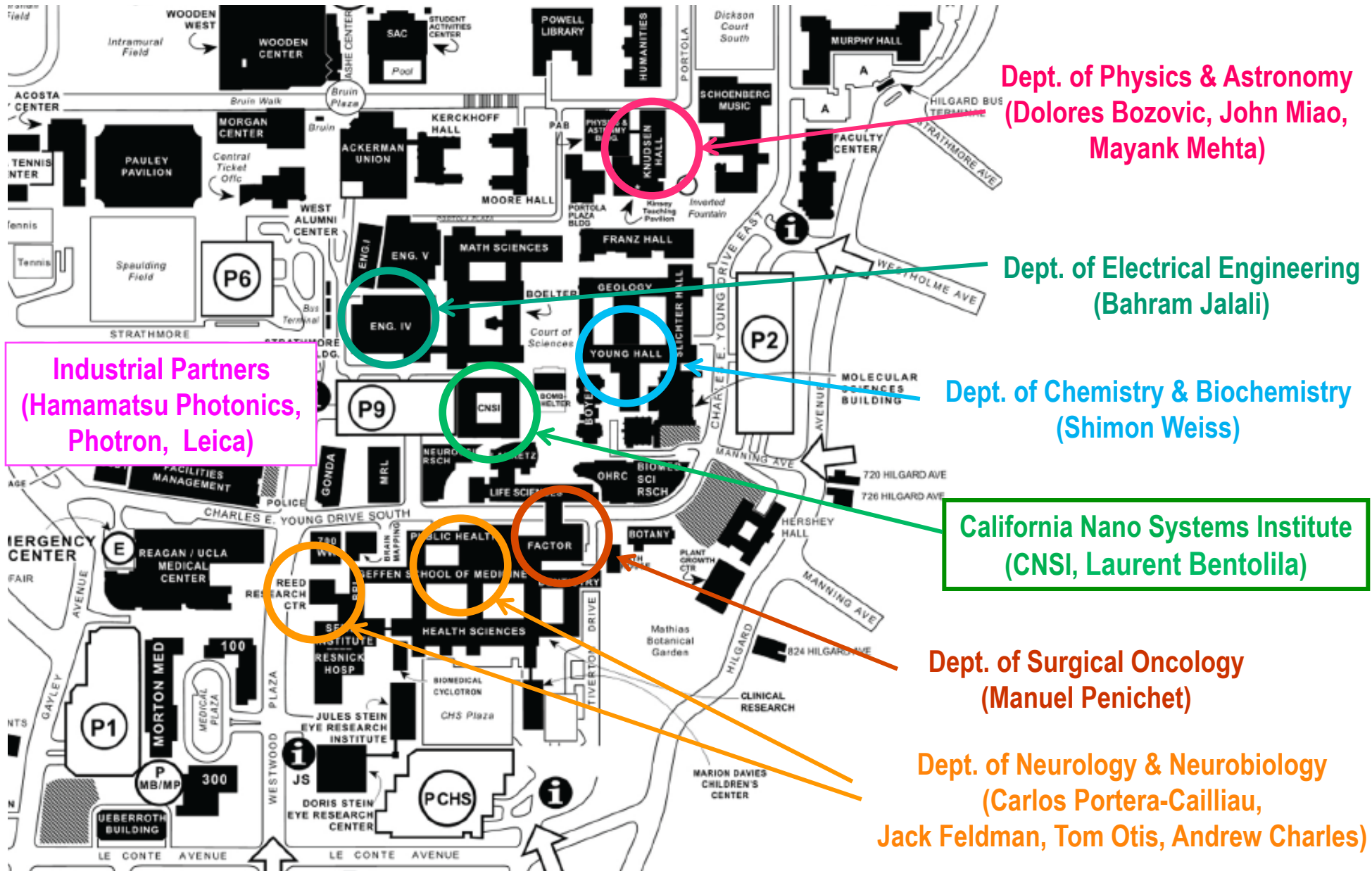
# Mean Squire Displacement $\langle r^2 \rangle$ of TfR on a Human Multiple Myeloma Cell vs. Time



# 生命とは何か

- 4次元時空間における複雑系
  - 素粒子物理より遥かに複雑
- 強い相互作用
  - 陽子の中身の様、しかし遥かに複雑
- ミクロなレベルでは熱雑音に晒されている。
  - 1 msec で  $\sim 1 \mu\text{m}$
  - 1  $\mu\text{sec}$  で  $\sim 1 \text{ nm}$
- しかし秩序だった(コヒーレントな)動き
- 隠し持ったエネルギーの有効利用

# UCLAに於ける有坂の共同実験チーム

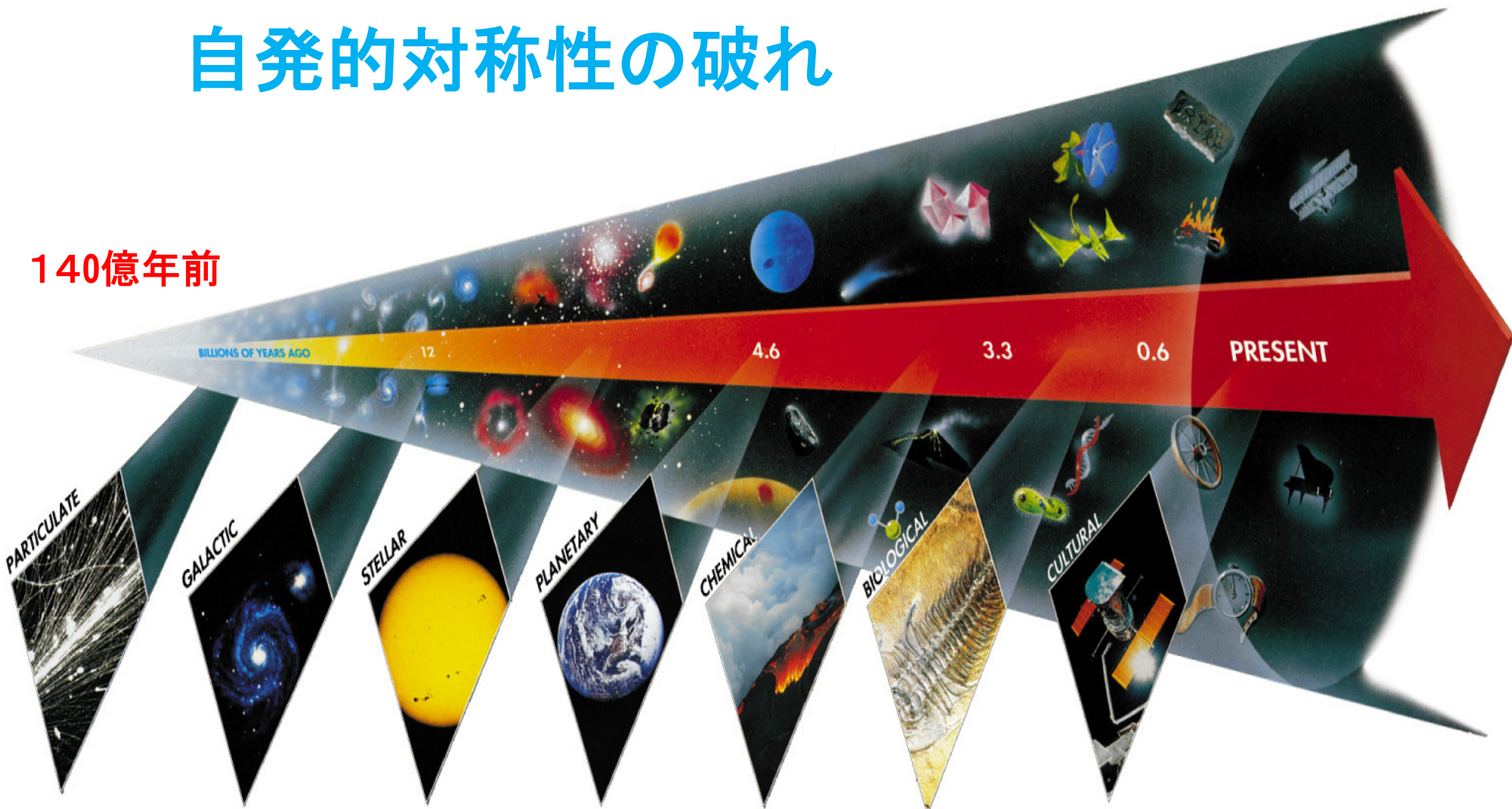


# 意識の起源

# 宇宙進化の7段階

## 自発的対称性の破れ

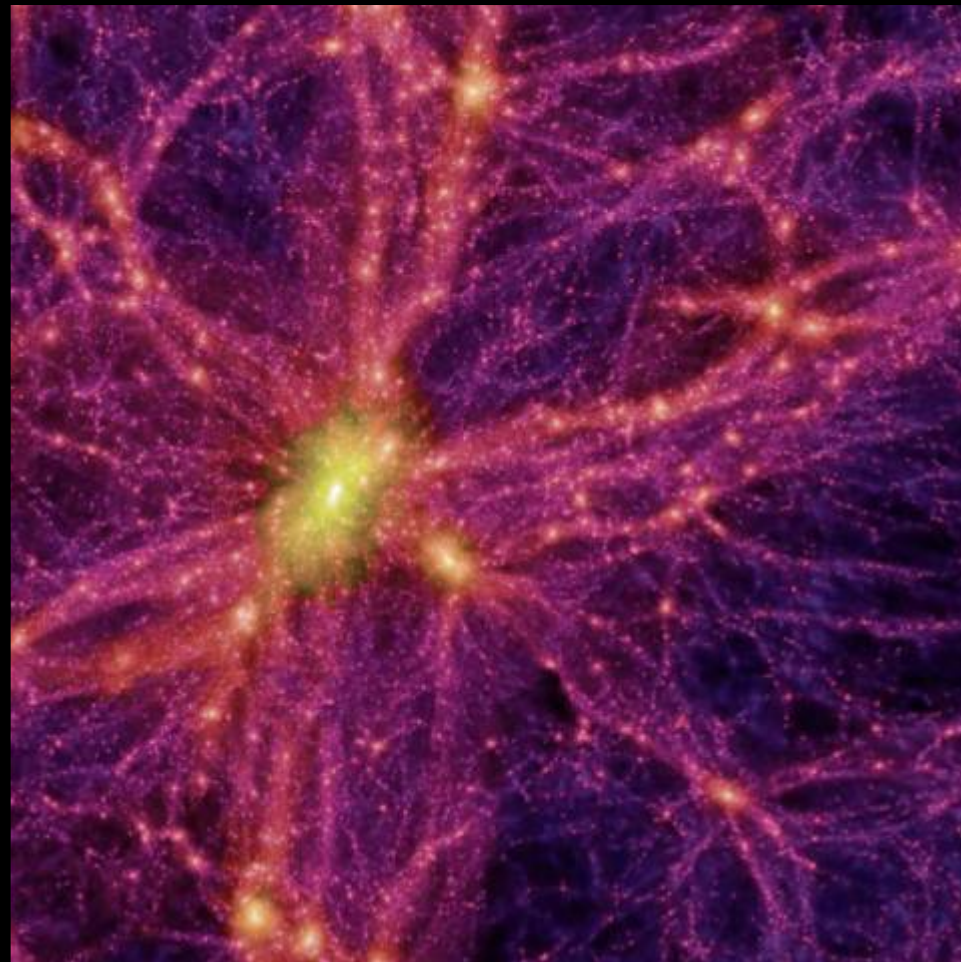
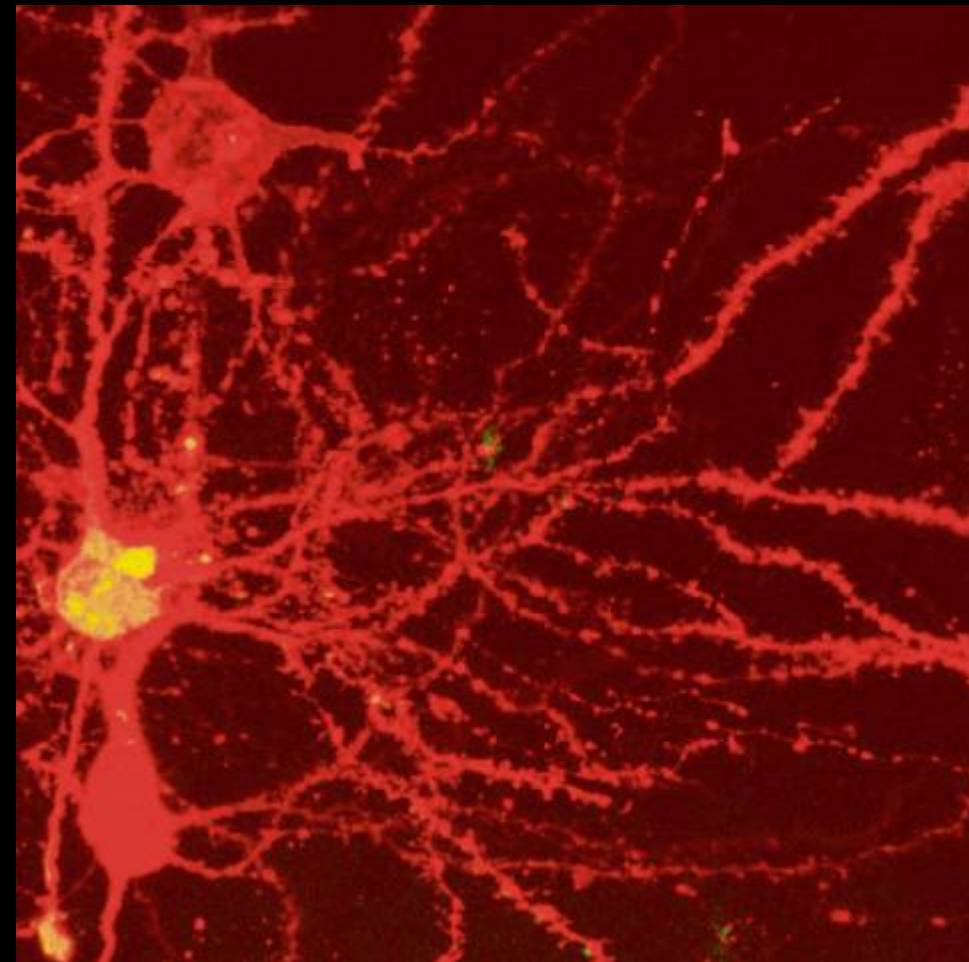
140億年前



意識  
の起源

# 脳

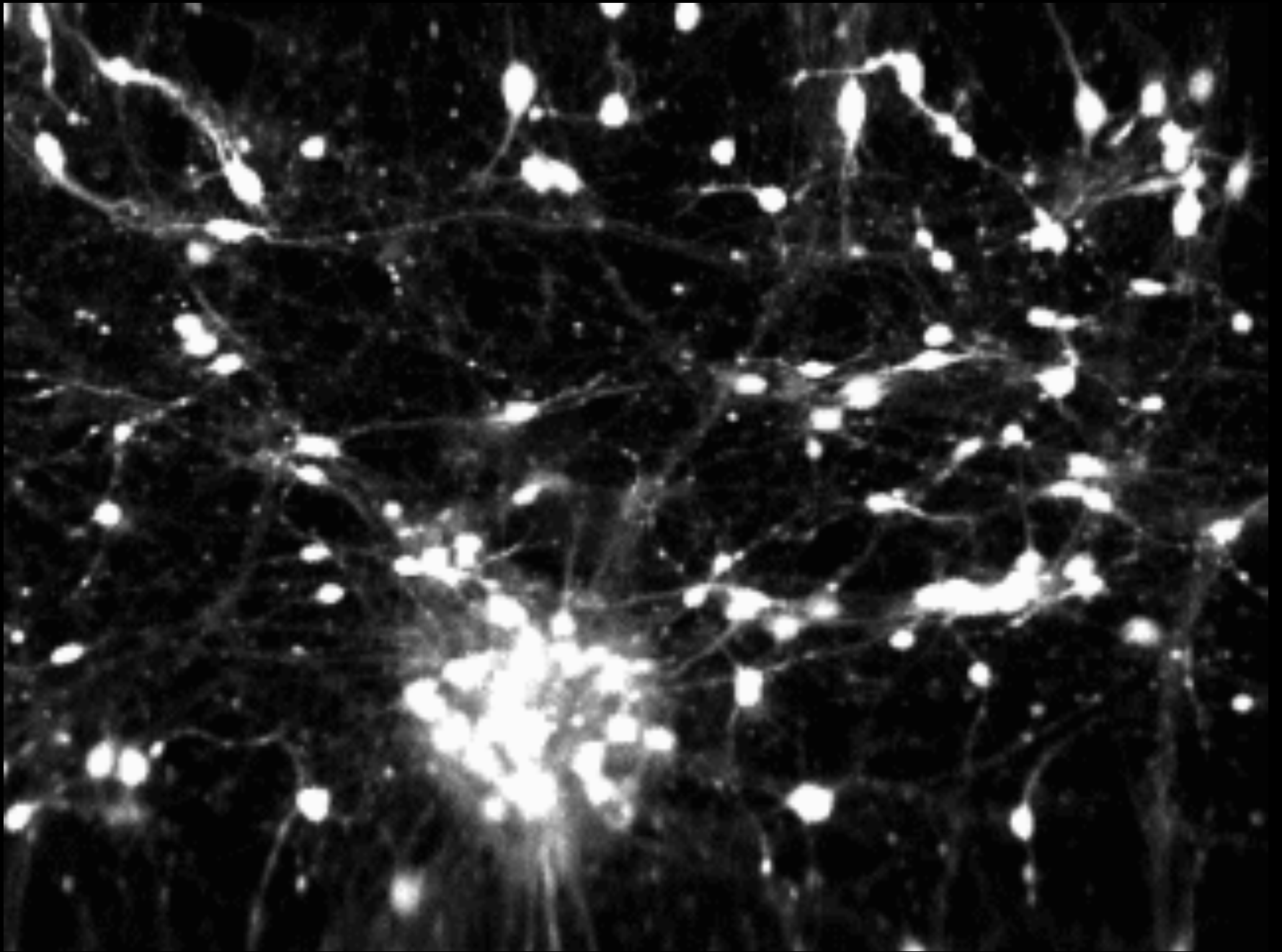
# 宇宙



一千億のニューロン

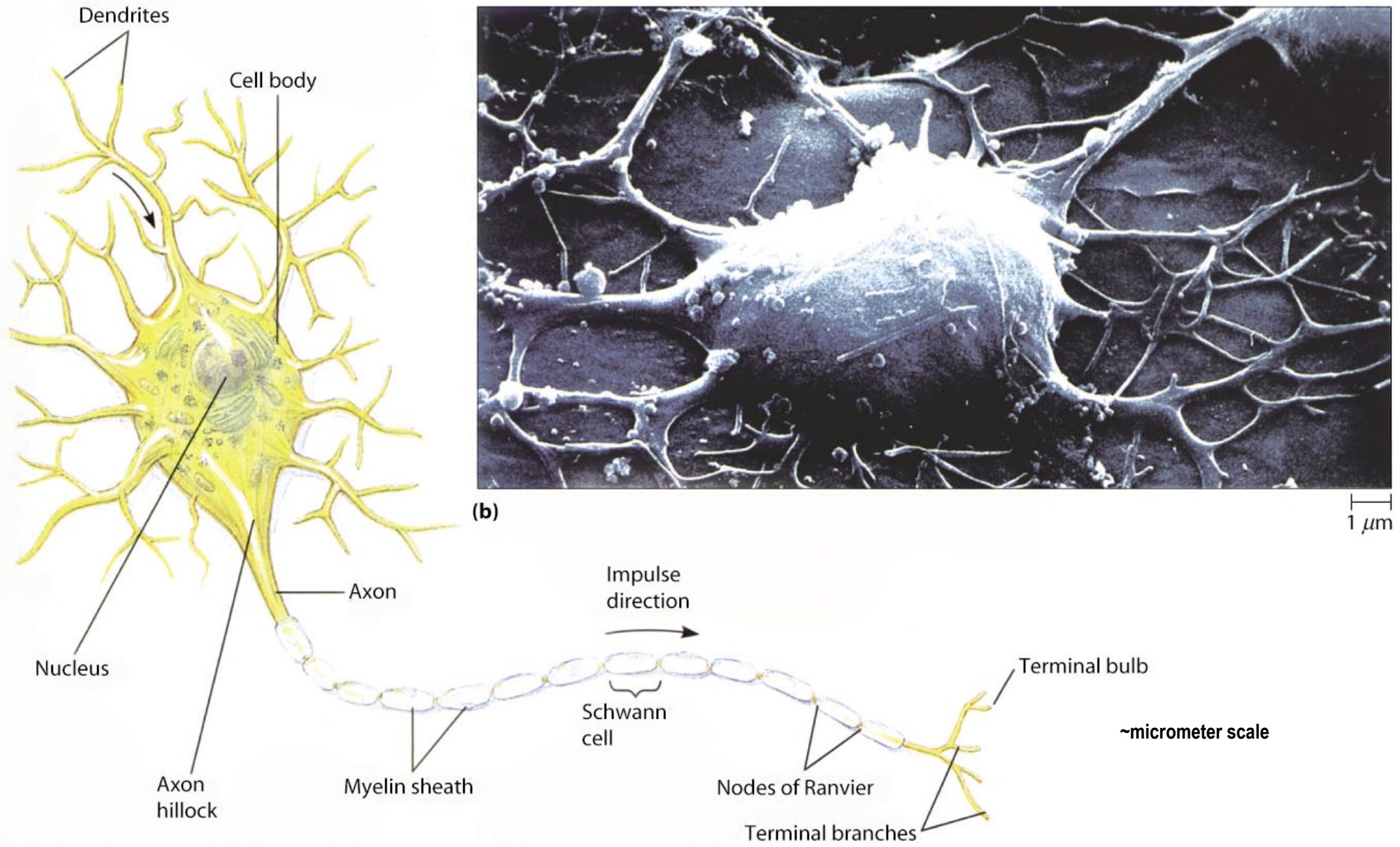
一千億の銀河

# 培養したネズミの脳神経系の顕微鏡ビデオ



# 脳神経

脳神経ひとつあたり千もの樹状突起 (1000億 x 1000 = 100兆)



# 脳とコンピューターの違い

## ➤ コンピューター

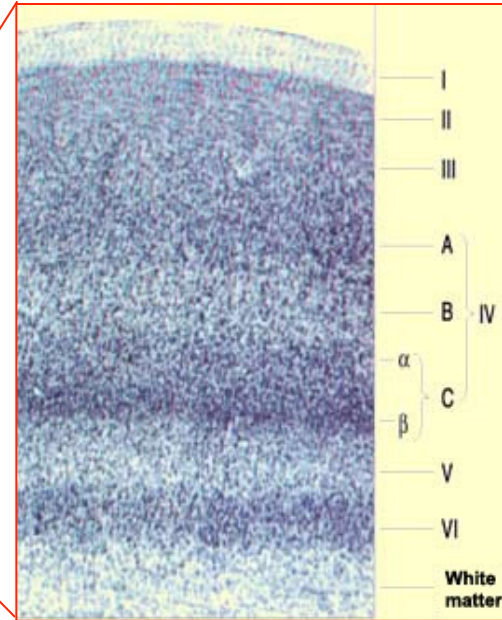
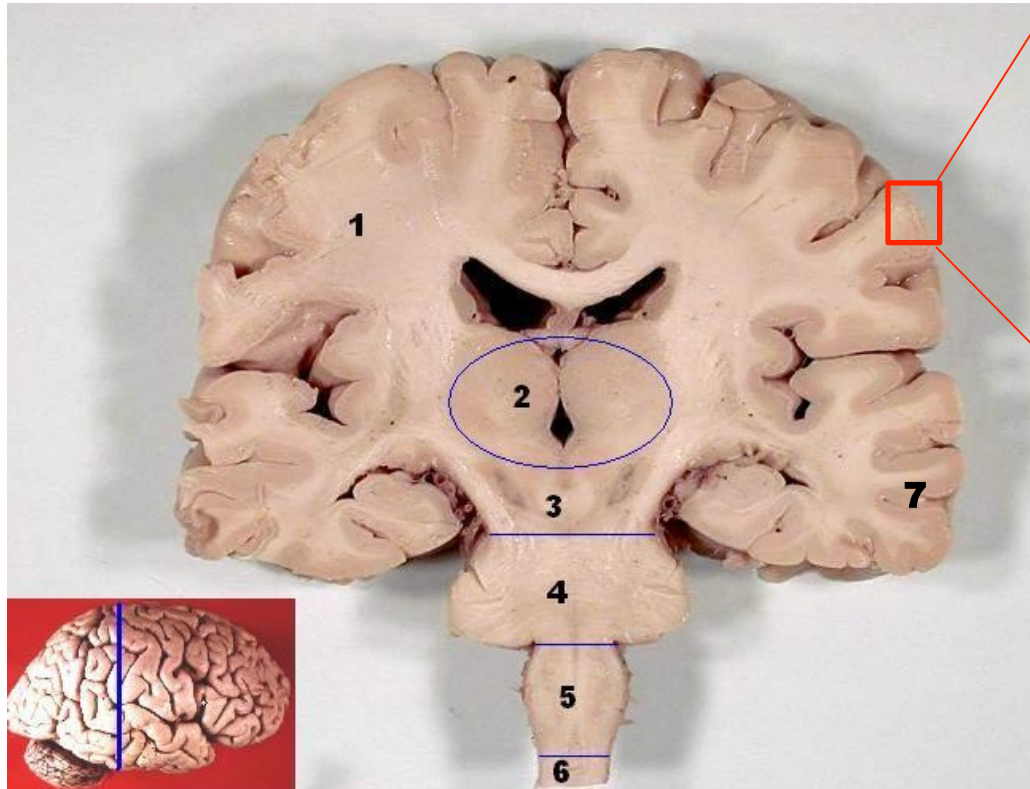
- GHzの演算速度
  - 驚異的な計算速度
- 但し、一度にひとつの演算のみ
- プログラムとして書き込んだ通り実行

## ➤ 脳

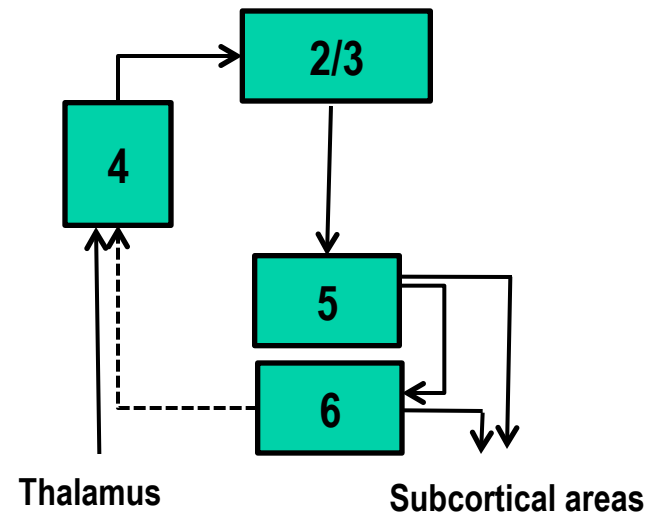
- KHzの演算速度
  - コンピューターの100万分の一
- 但し、3次元結合による驚くべき並列演算
  - 驚異的なパターン認識能力
- 遺伝と記憶による膨大な情報の保持
- 意識と無意識の世界が共存

# 大脳皮質

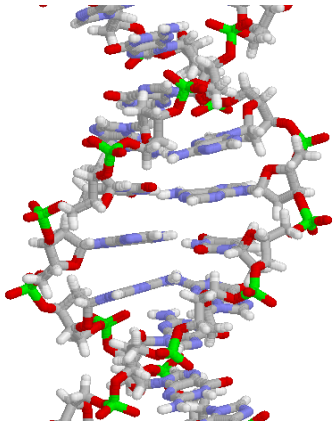
意識



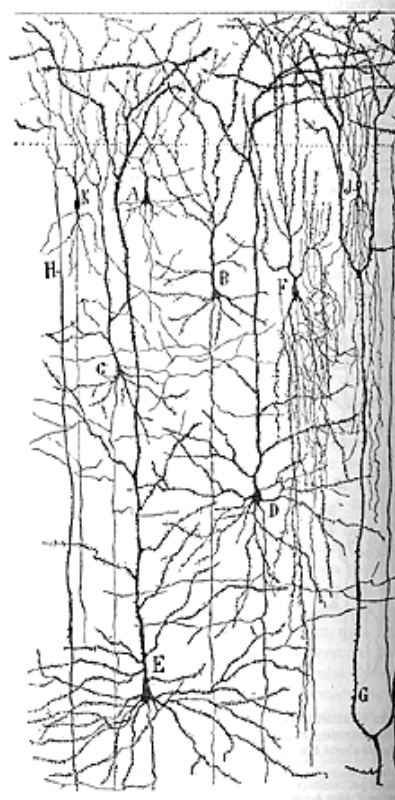
無意識



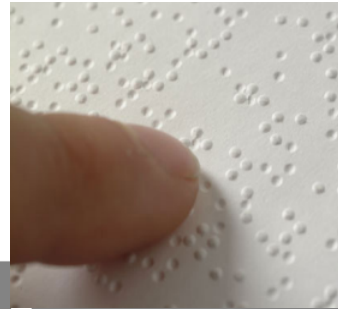
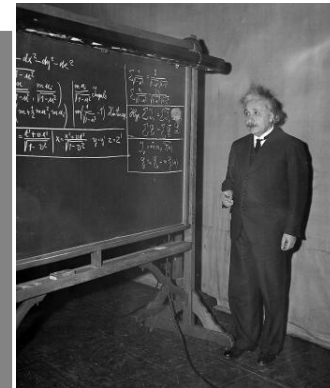
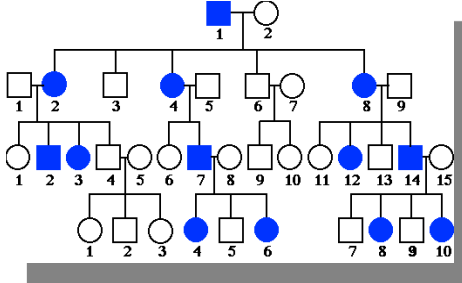
# 先天的か後天的か



先天的



後天的



# どうして遠くの人物の男女の区別がつくのか？



- 遺伝情報？
- 学習と記憶？

# 先天的か後天的か

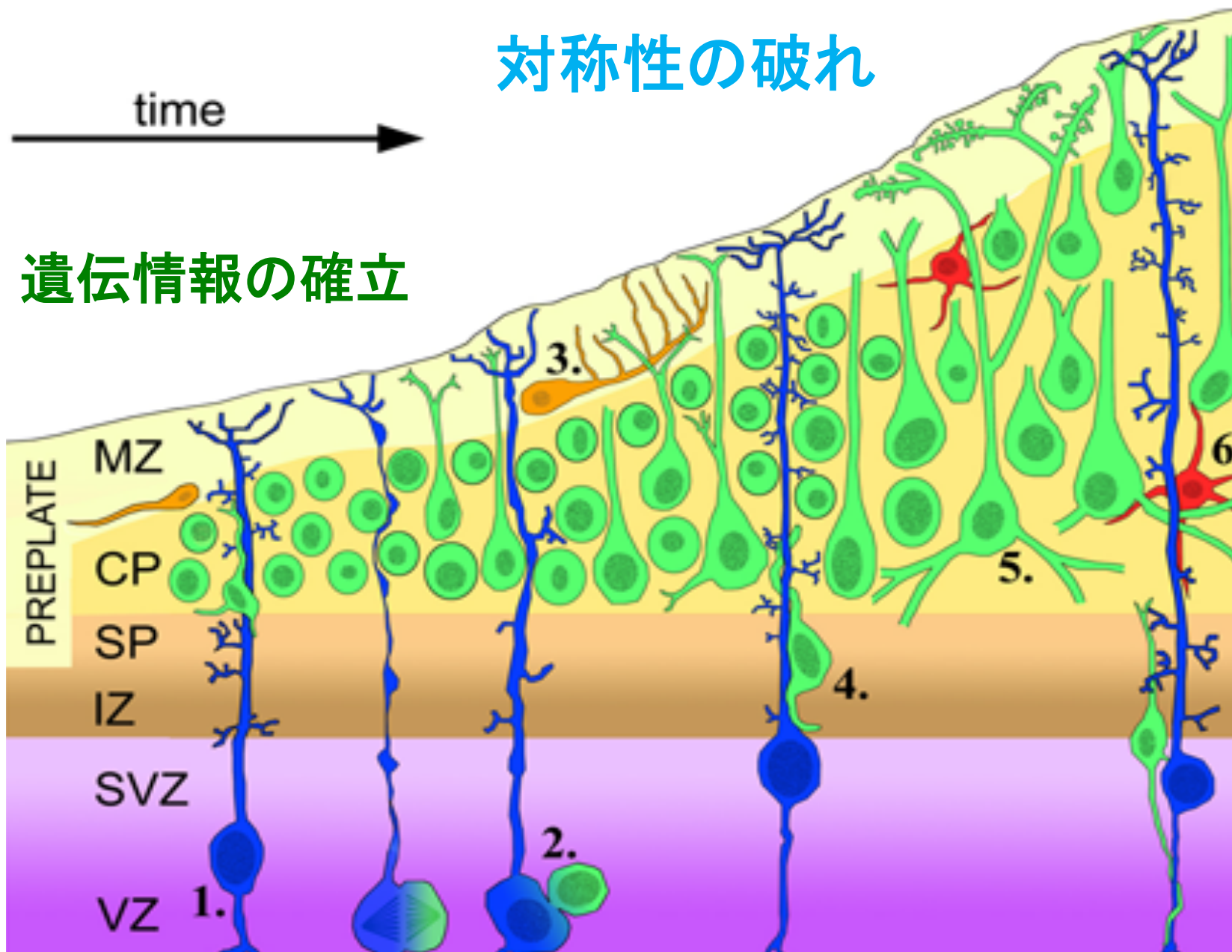
## ➤ 視覚の不思議

- なぜ人は、遠くにいる人を見て、男女の違いを瞬時に理解できるのか。
- なぜ人は、ヘビを見ると身がすくむのか。

## ➤ 創造性

- なぜ、音楽を作曲できるのか。
- なぜ、物理法則を数式で表現できるのか。

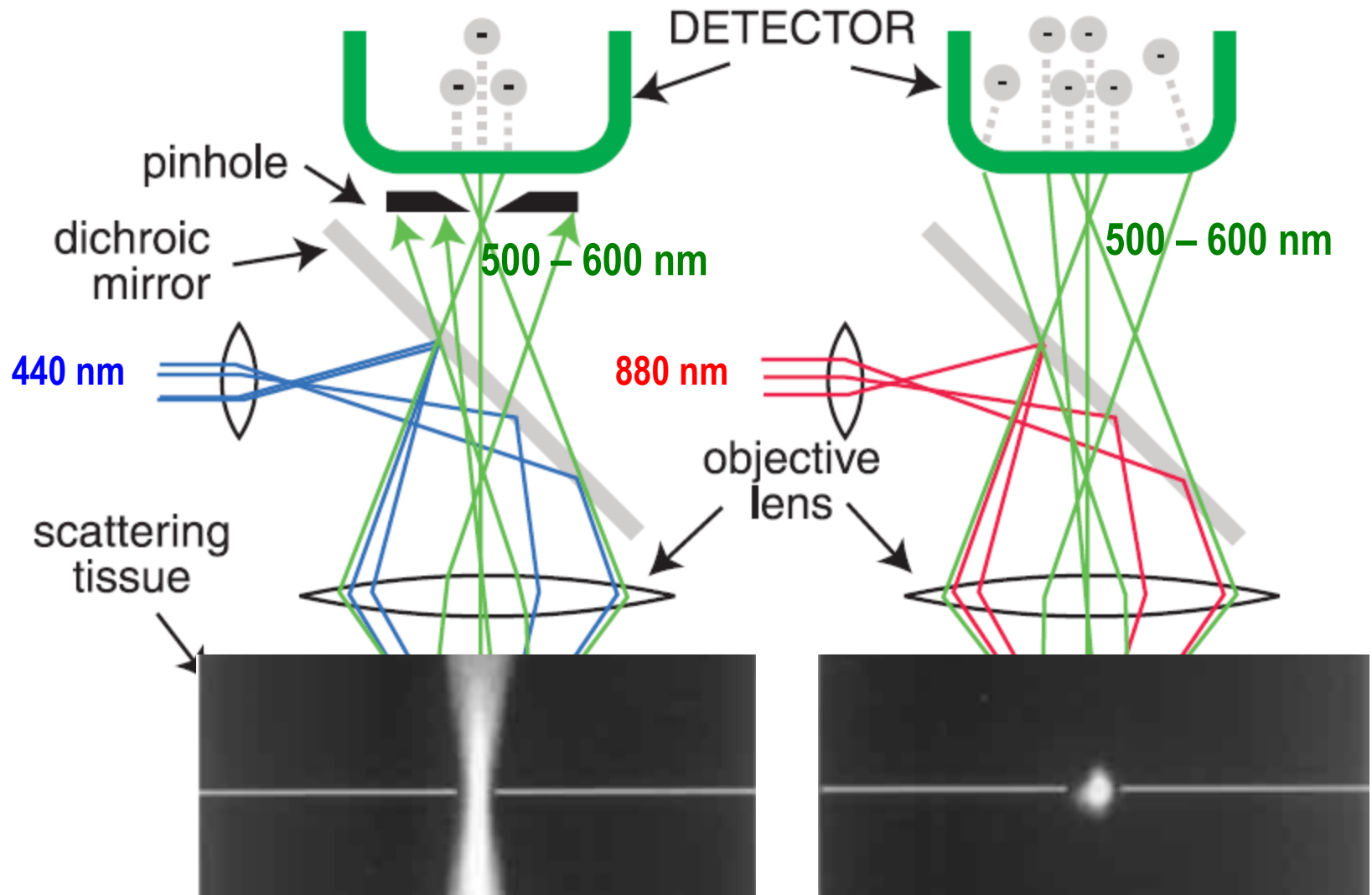
# ねずみの大脳の神経細胞の発達



# 多光子顯微鏡

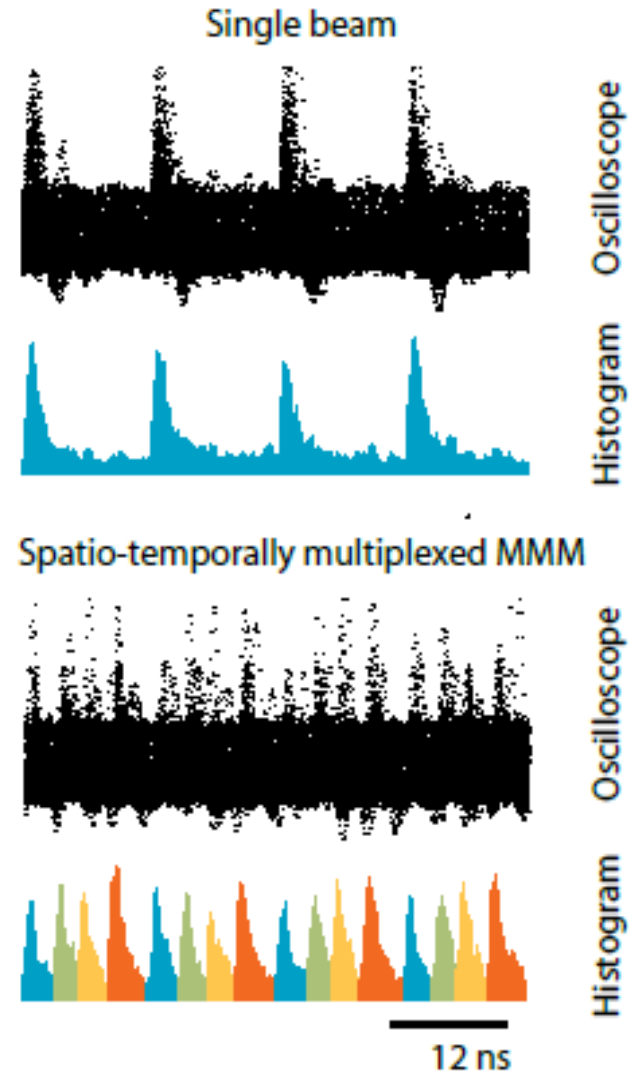
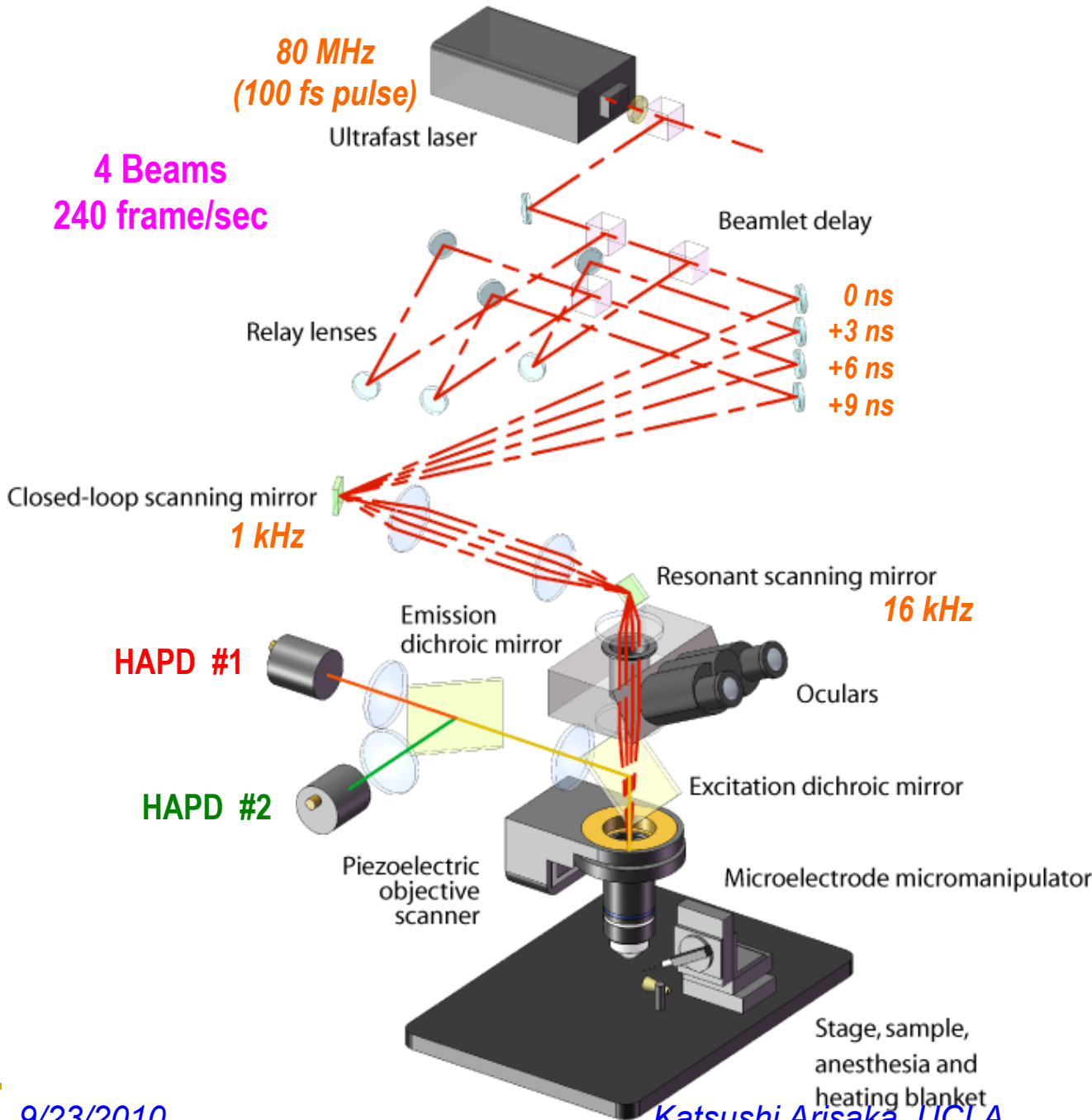
## 共焦點

## 二光子勵起

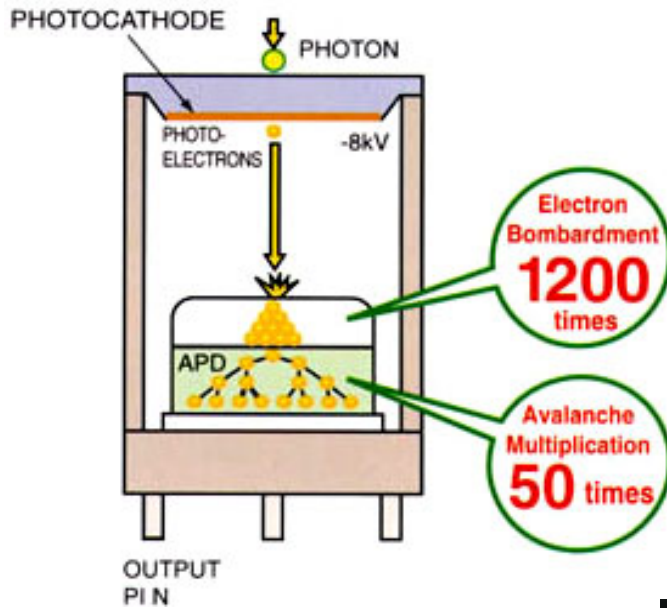


# 超高速二光子励起顯微鏡

Adrian Cheng (Physics)



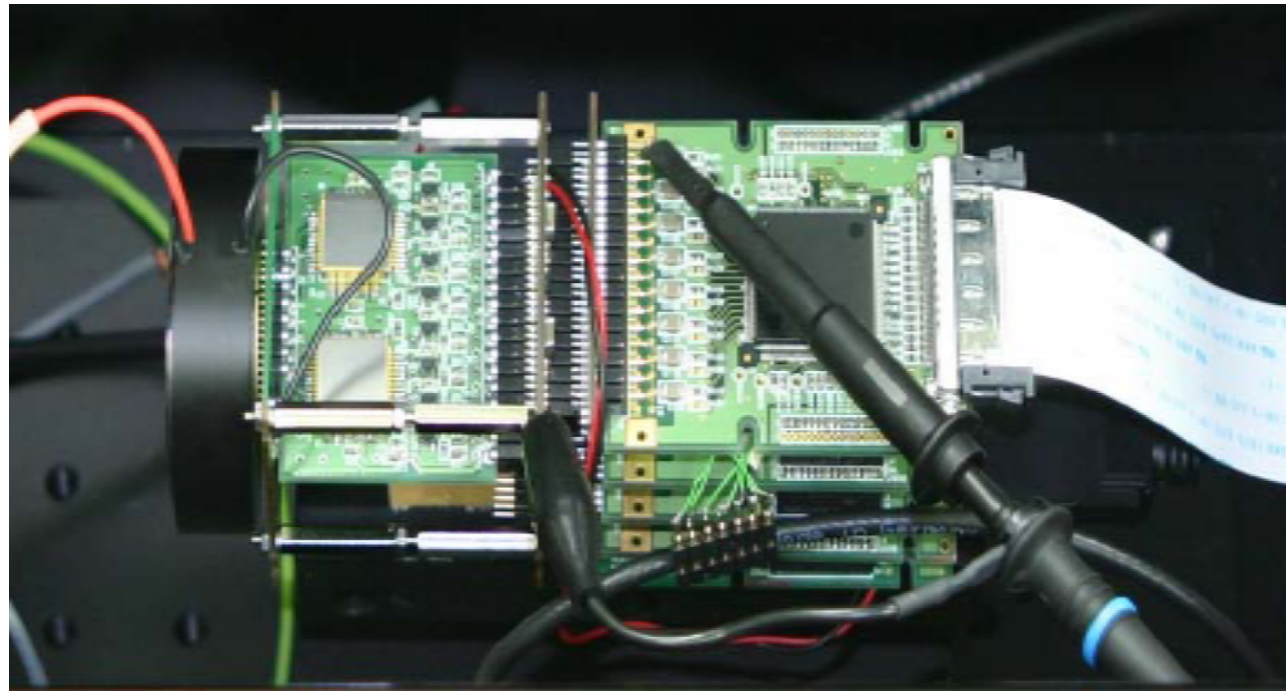
# 浜松ホトニクス Hybrid APD



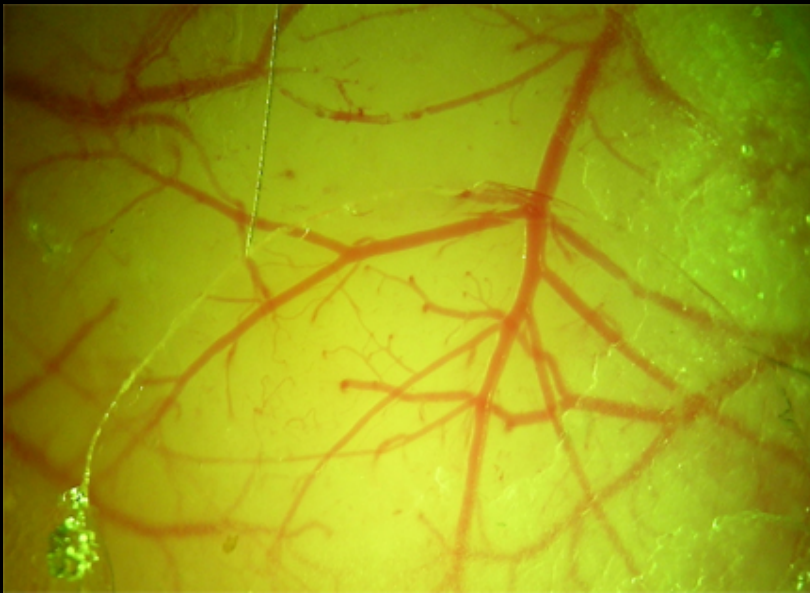
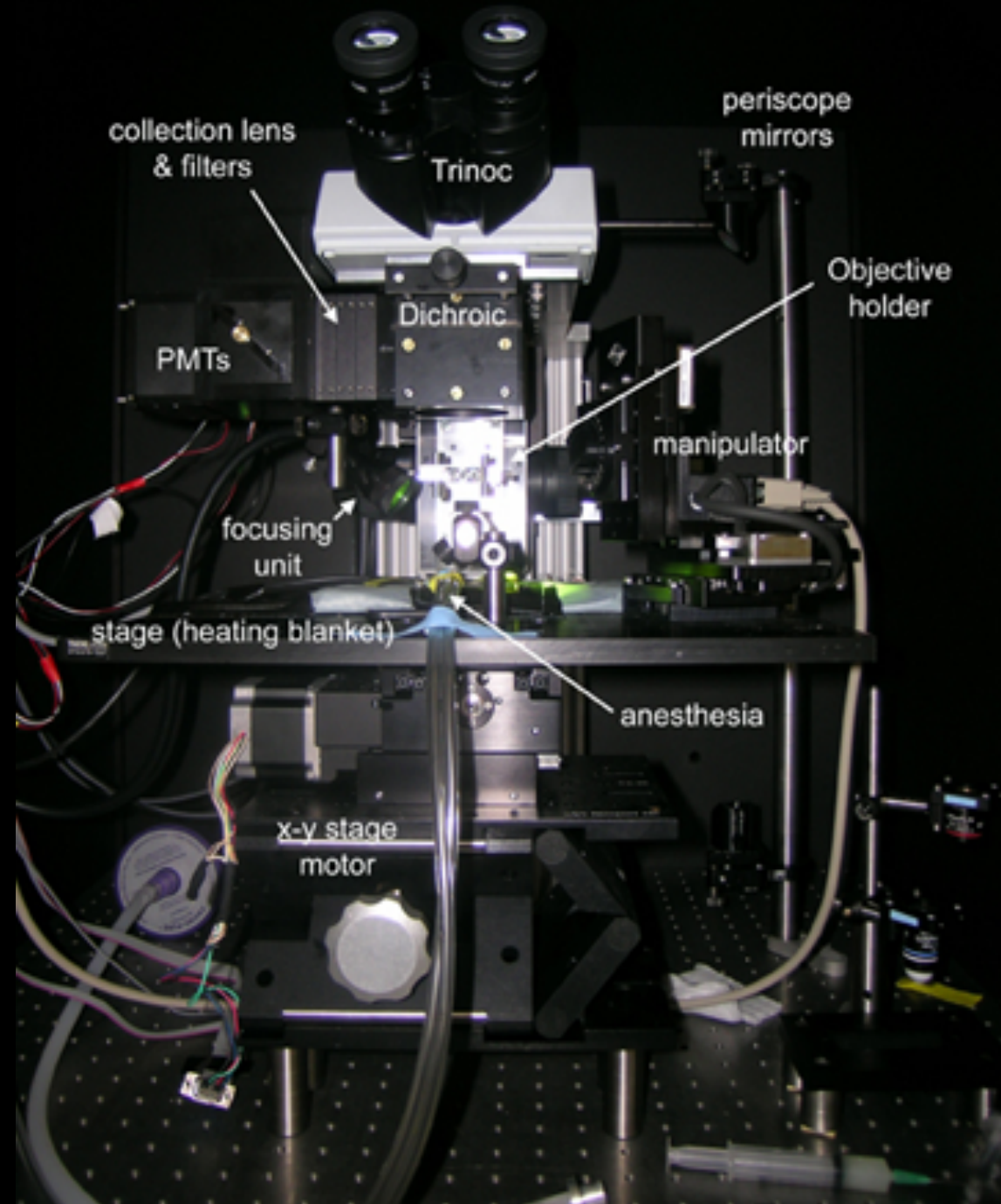
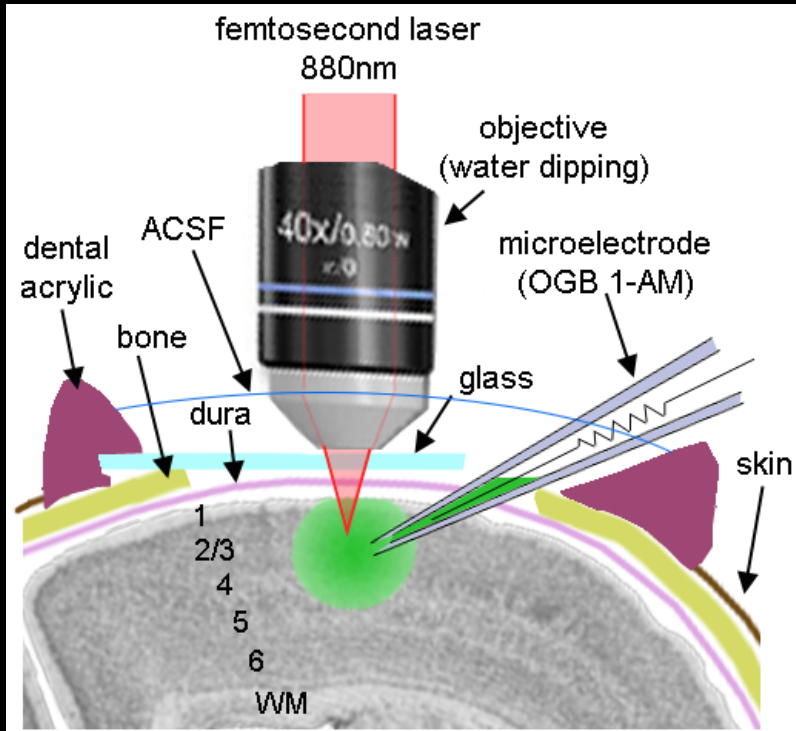
Single Channel  
HAPD

64 Channel HAPD  
+ Readout

Motohiro Suyama  
(Hamamatsu)



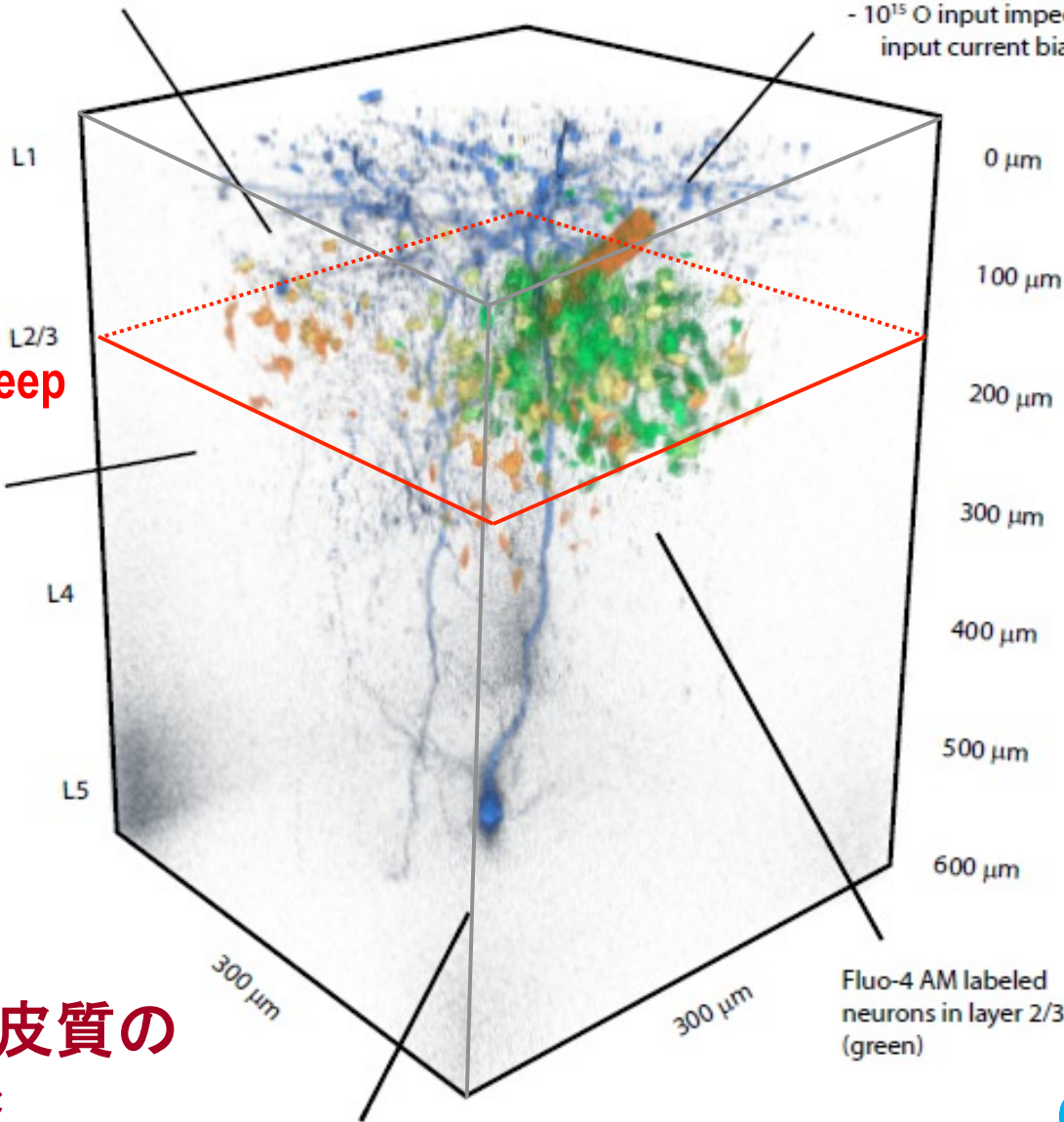
# 生きたネズミの脳神経系の2光子励起撮影



Fluo-4 AM labeled astrocytes are colabeled with sulforhodamine 101 to eliminate background (yellow)

Glass microelectrode for dye injection and electrophysiology

- cell-attached voltage follower
- whole-cell voltage/current clamp
- $10^{15} \Omega$  input impedance,  $< 150 \text{ fA}$  input current bias



*Adrian Cheng  
(Physics)*

*Tiago Goncalves,  
Peyman Golshani,  
Carlos Portera-Cailliau  
(Neurology)*

ネズミの脳皮質の  
神経系

Layer 5 pyramidal neuron soma and apical dendrite from a transgenic animal demonstrates imaging depth (blue)

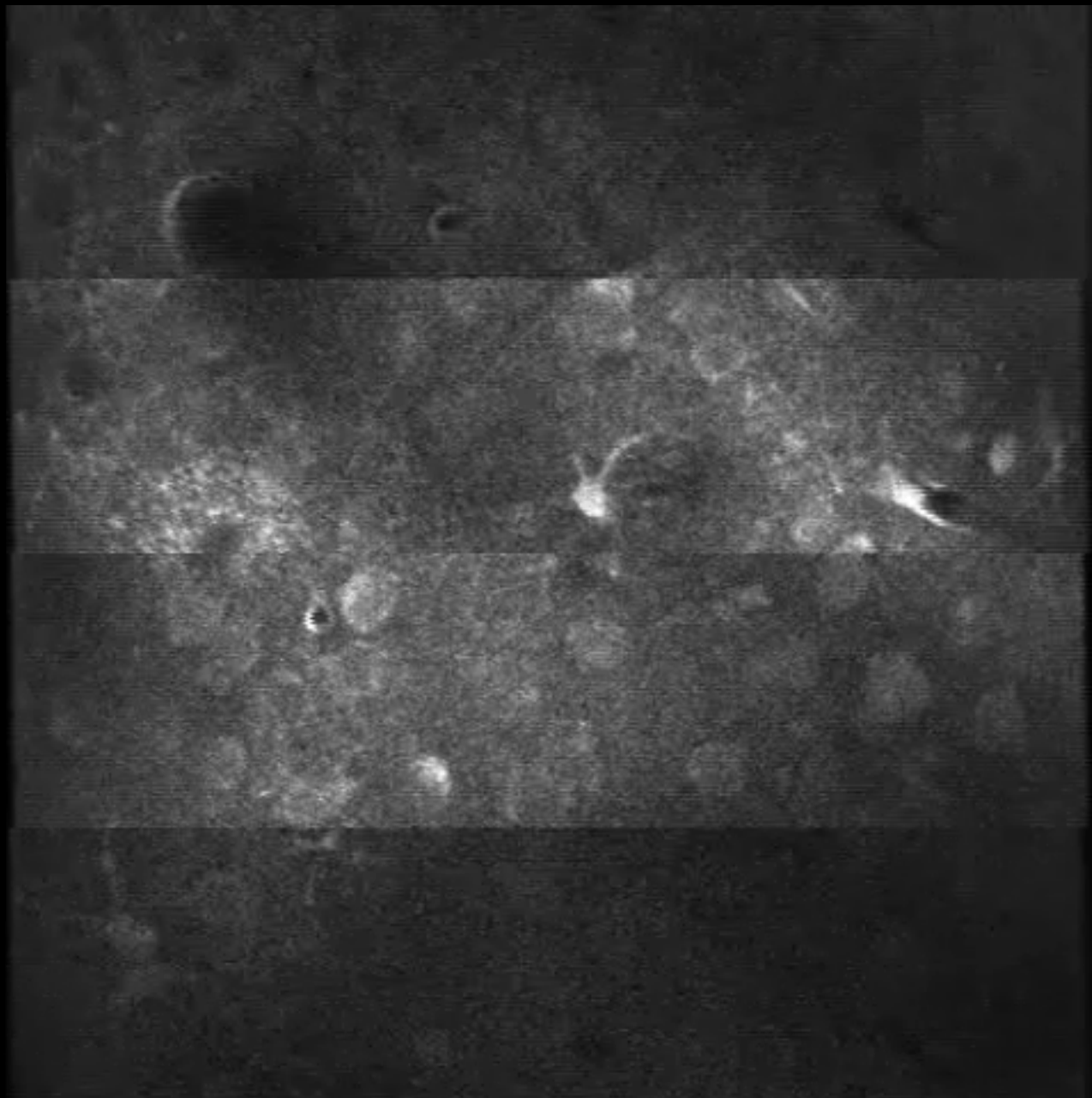
# 生きたネズミの脳神経系の2光子励起撮影

Barrel Cortex  
Layer 2/3

150  $\mu\text{m}$  deep

240 fps  
Raw Data

(x3 faster  
than real)



Beam 1  
(0 ns)

Beam 2  
(+3 ns)

Beam 3  
(+6 ns)

Beam 4  
(+9 ns)

← 300  $\mu\text{m}$  →

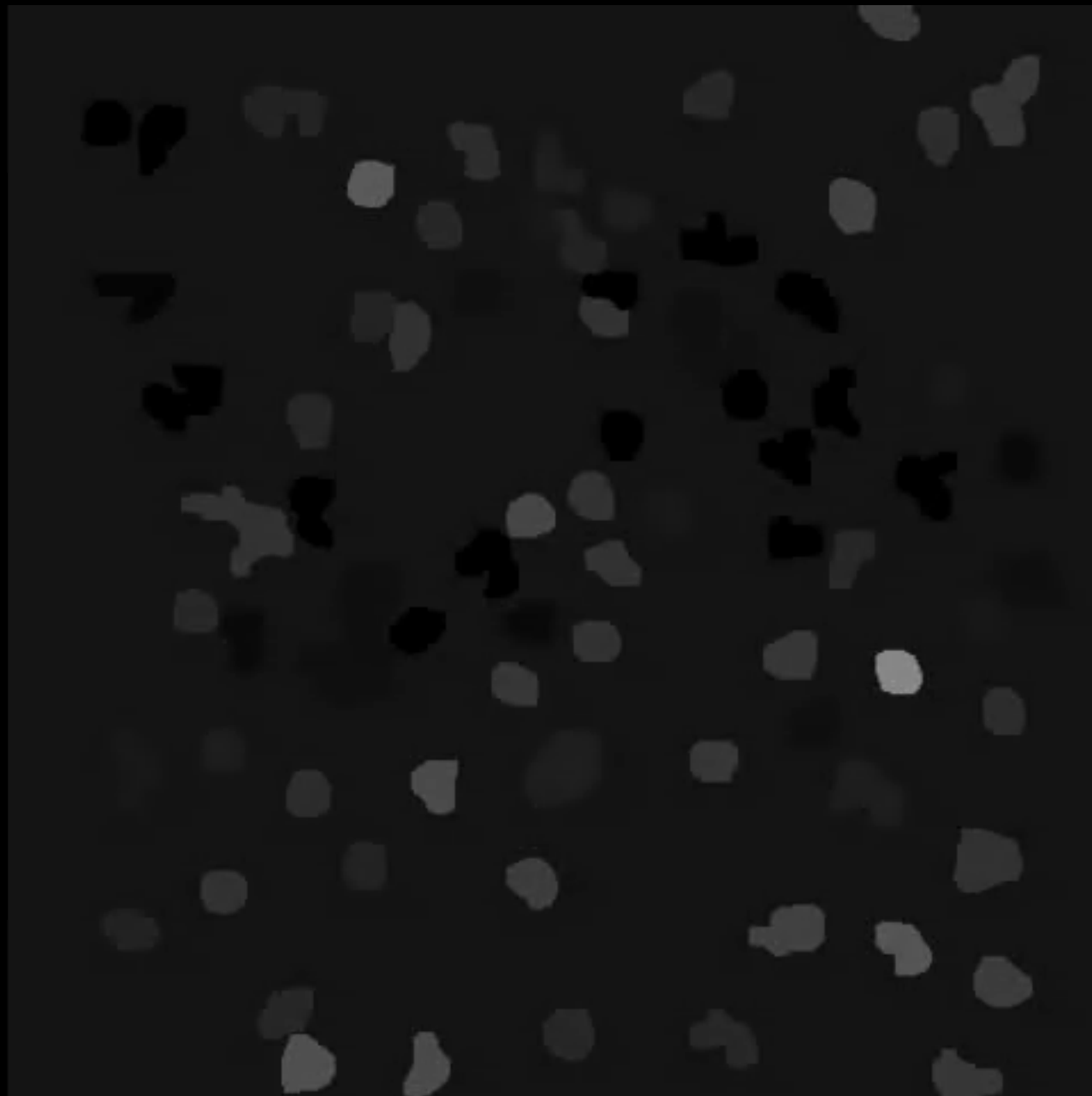
# 生きたネズミの脳神経系の2光子励起撮影

Barrel Cortex  
Layer 2/3

150  $\mu\text{m}$  deep

After averaging

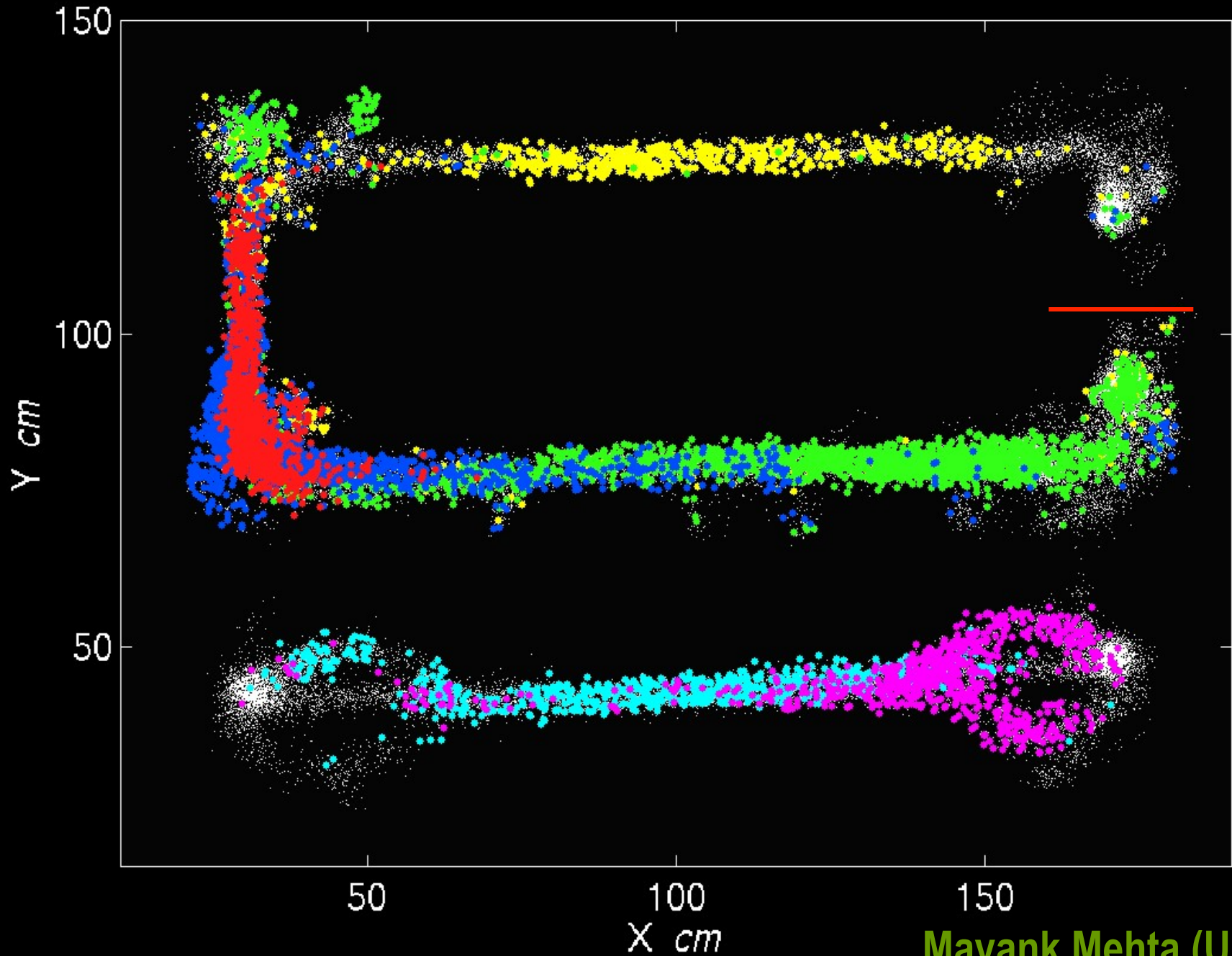
(x3 faster  
than real)



58 neurons  
(~100 billions  
neurons  
in our brain)

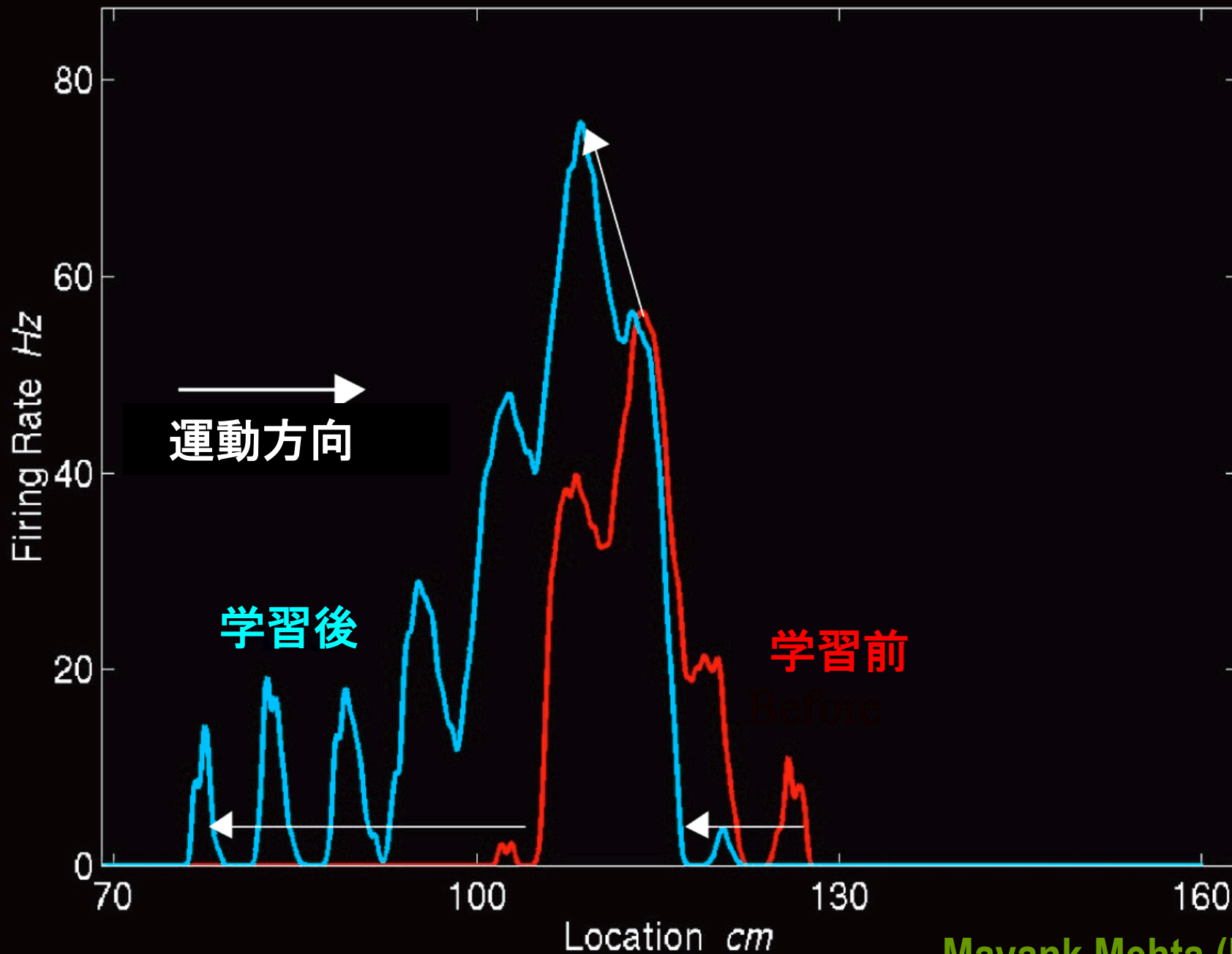
← 300  $\mu\text{m}$  →

# 海馬による迷路内の位置の認識



Mayank Mehta (UCLA)

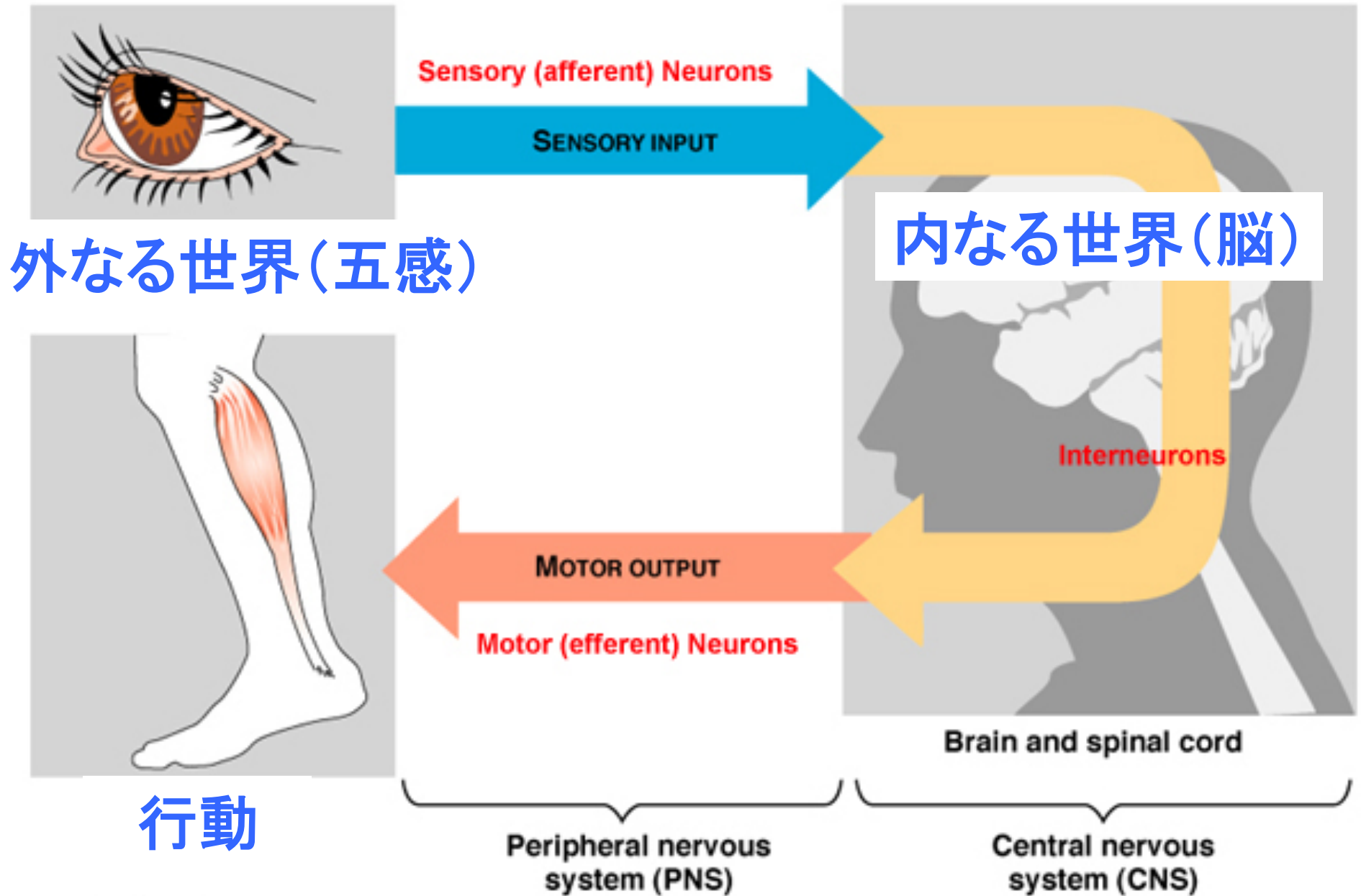
# 海馬による迷路内の位置の学習と記憶



# 脳の機能と生命の進化の関係

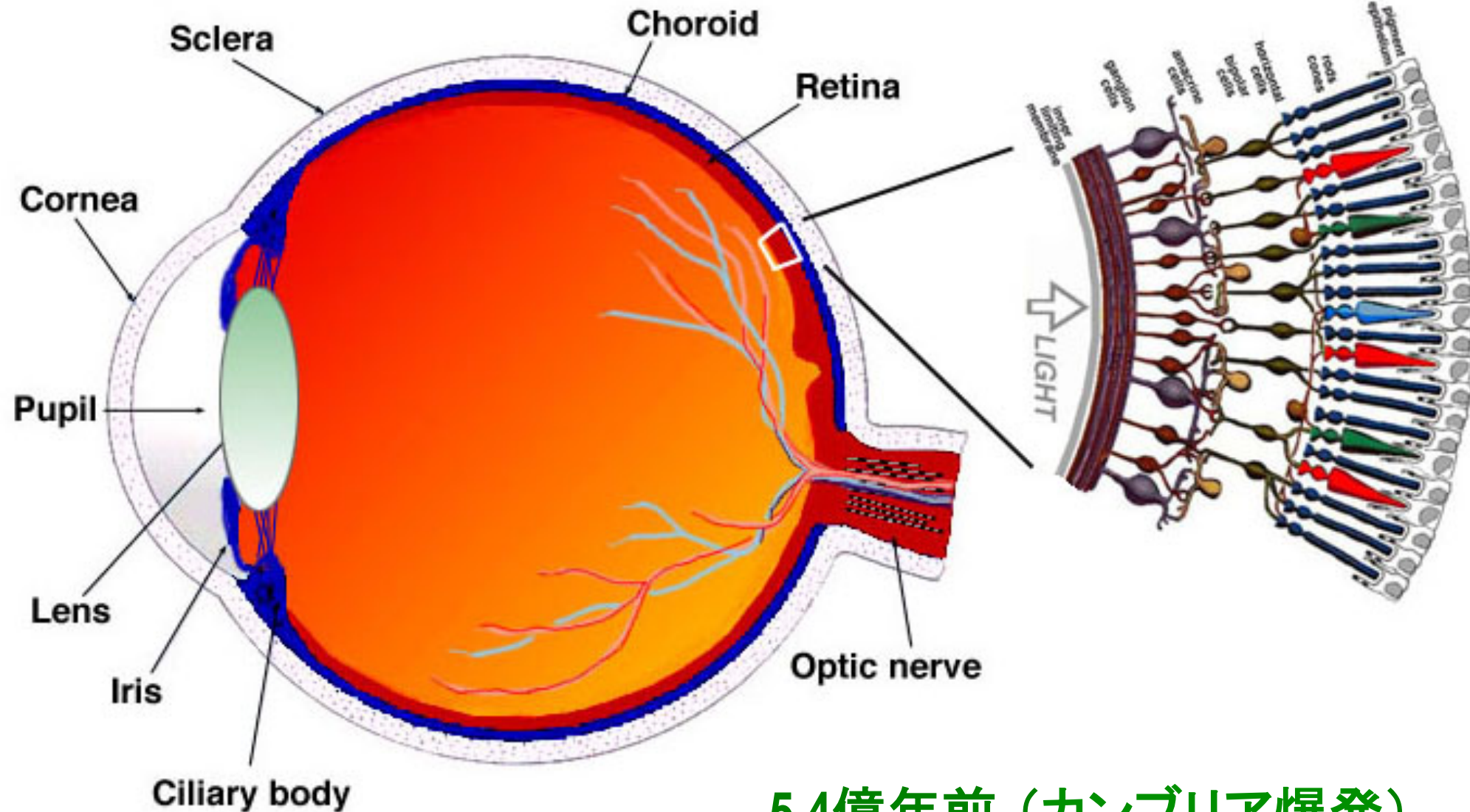
- **脳はより正確な判断をより早くするのが目的**
  - より早く獲物にありつく。
  - より早く敵から逃げる。
  - より早く(より優れた)相手を求める。
  
- **脳はその瞬間、最良の判断を一つのみ下す。**
  
- **脳の機能は、生命の進化そのもの**
  - 自発的対称性の破れ

# 外なる世界と内なる世界



# 人間の目の構造

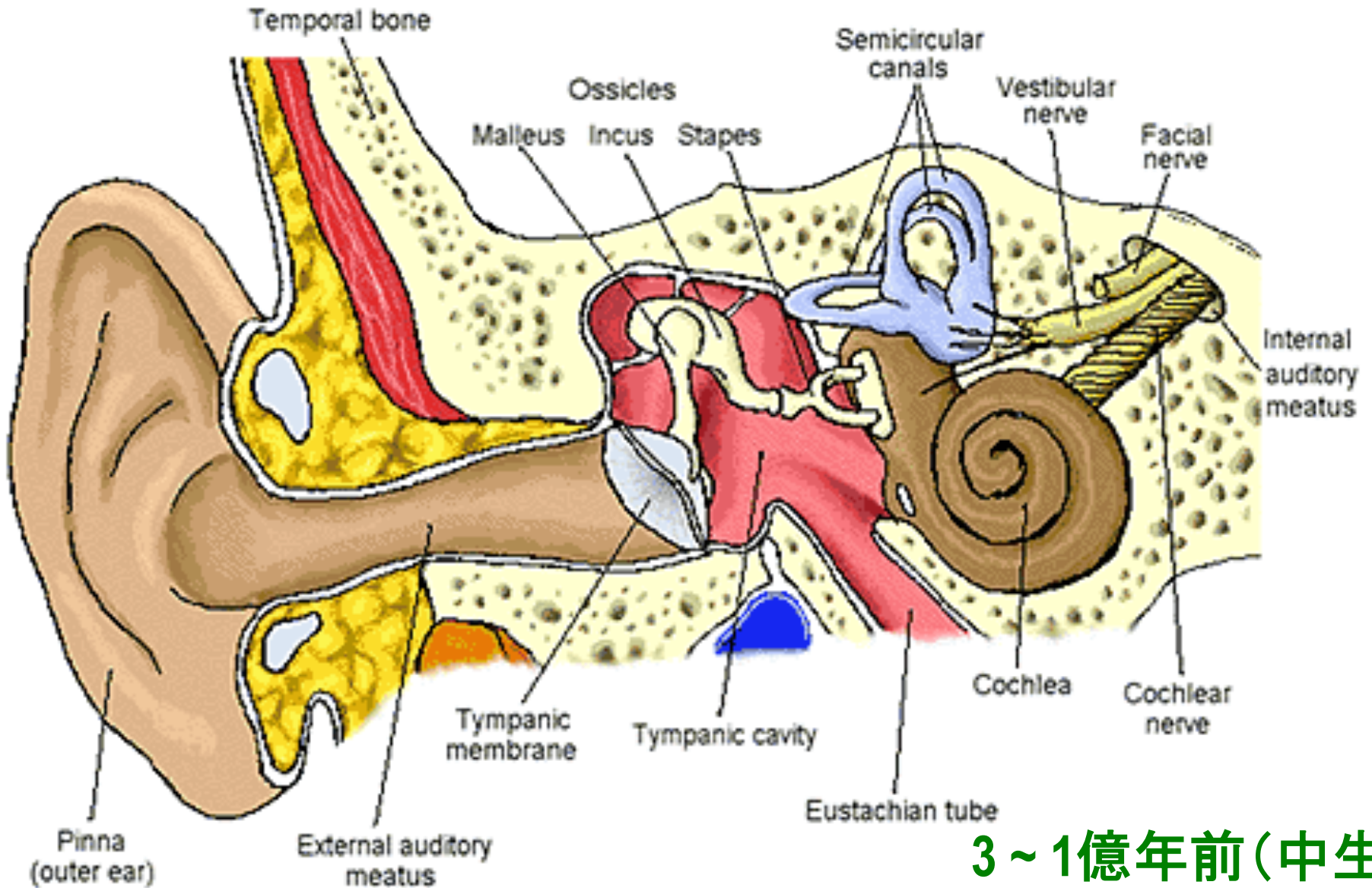
一億個の視細胞



5.4億年前 (カンブリア爆発)

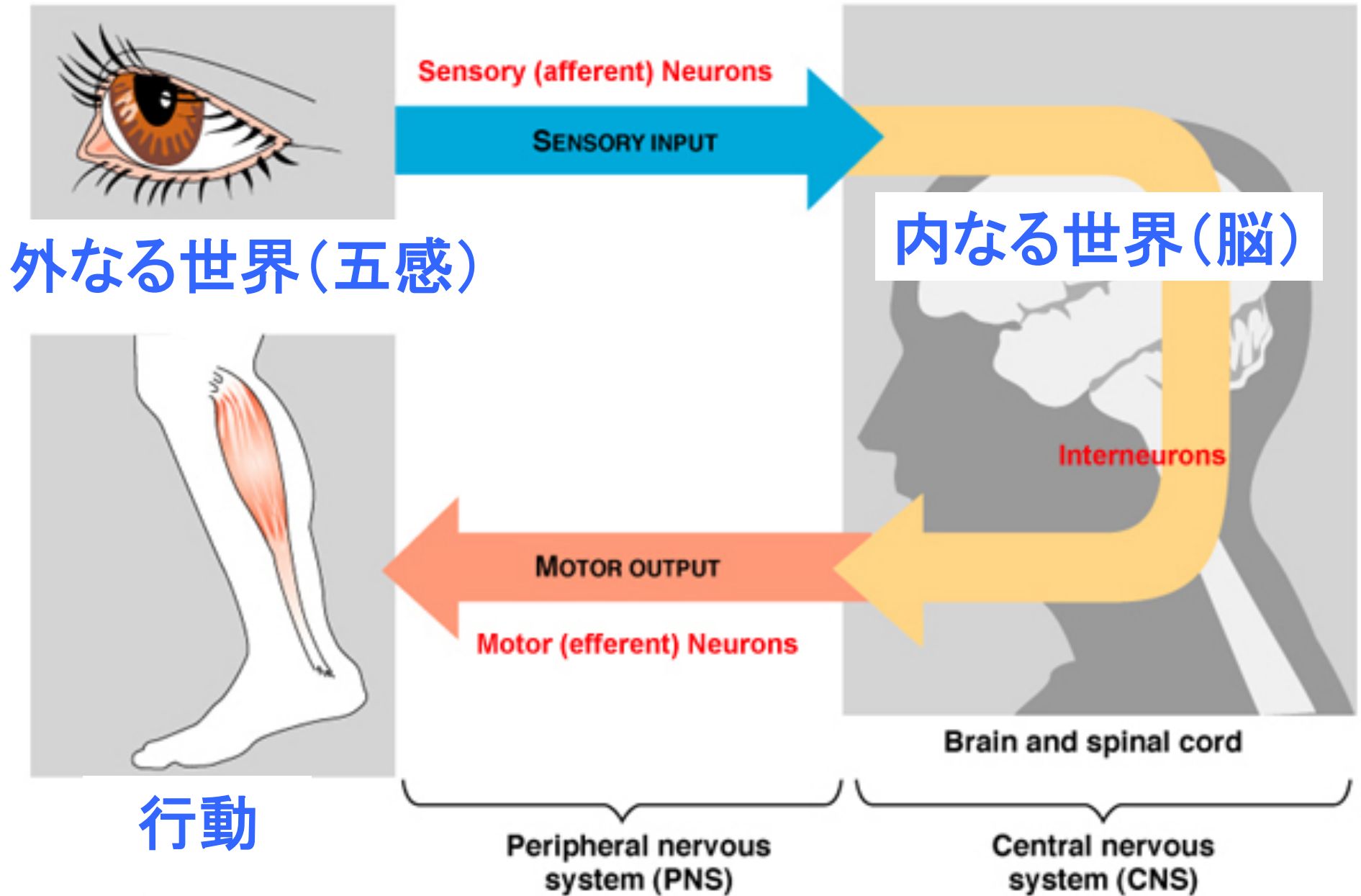
# 人間の耳の構造

一万個の聴覚有毛細胞



3 ~ 1億年前(中生代)

# 外なる世界と内なる世界

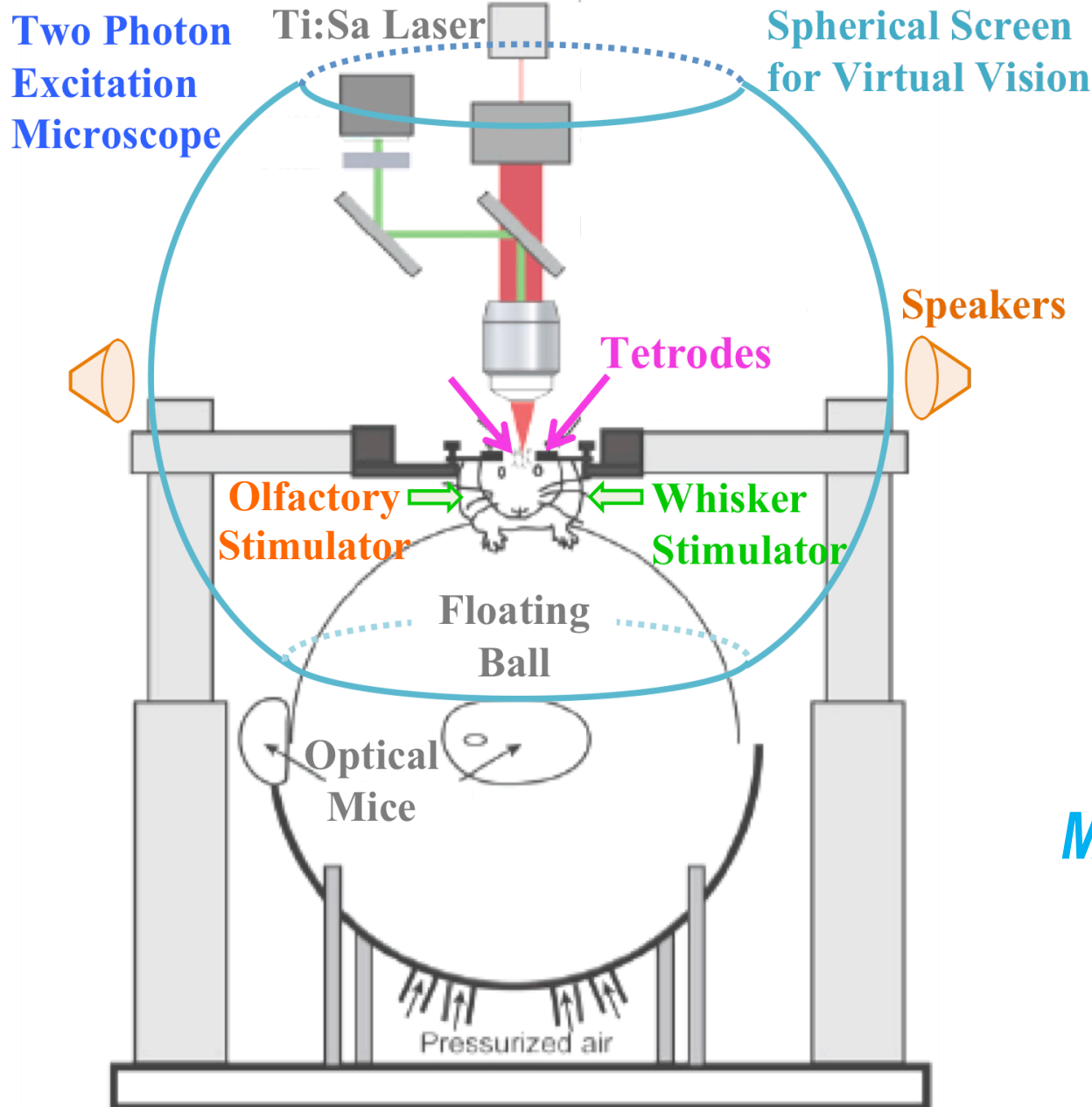


# Virtual Reality の迷路を走るネズミ



*David Tank (Princeton)*

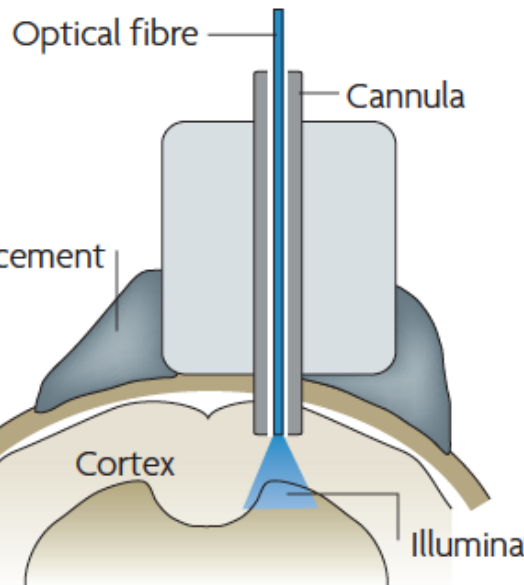
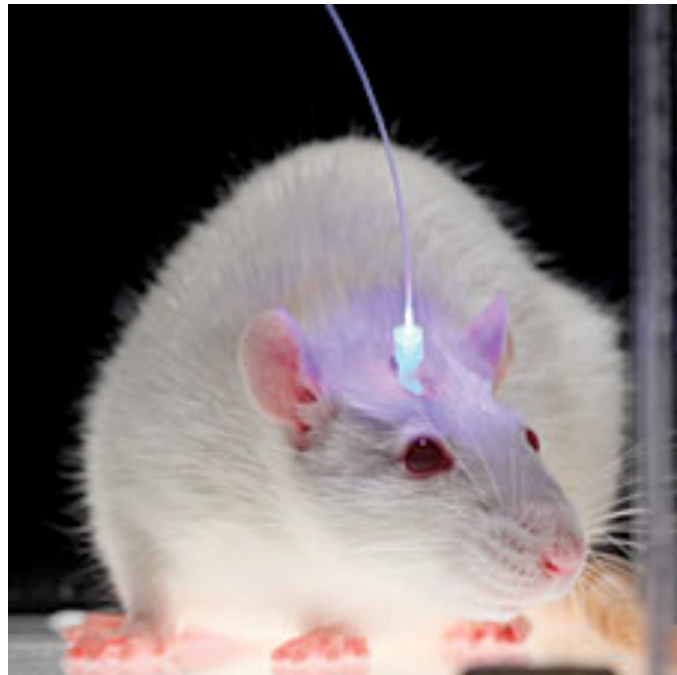
# UCLA でのVirtual Reality実験



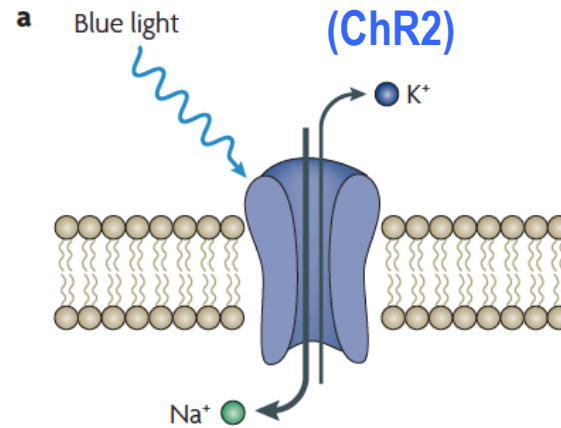
*Mayank Mehta  
(Physics)*

# 光による脳神経の刺激

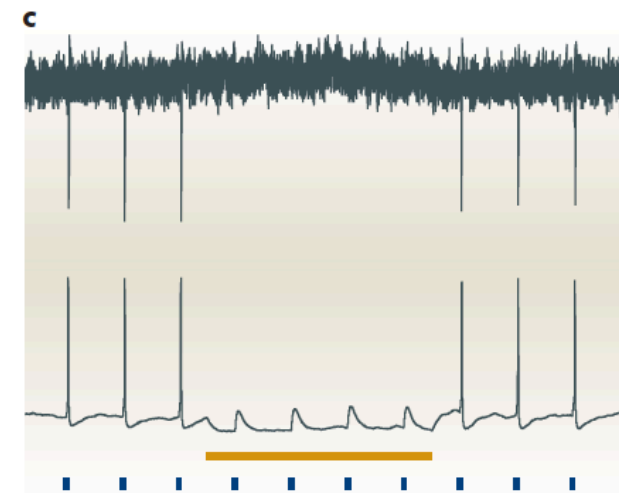
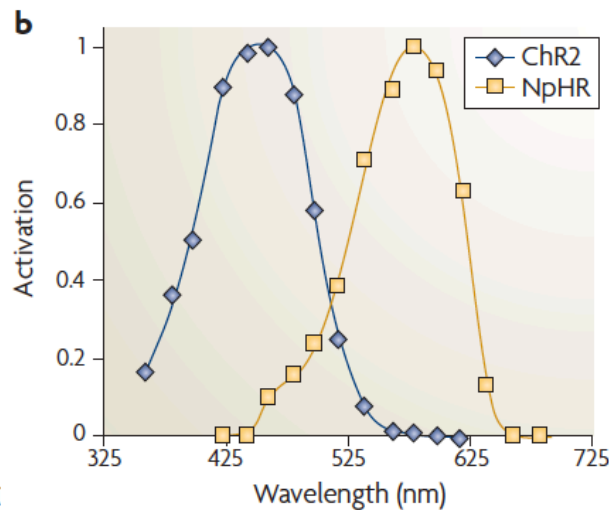
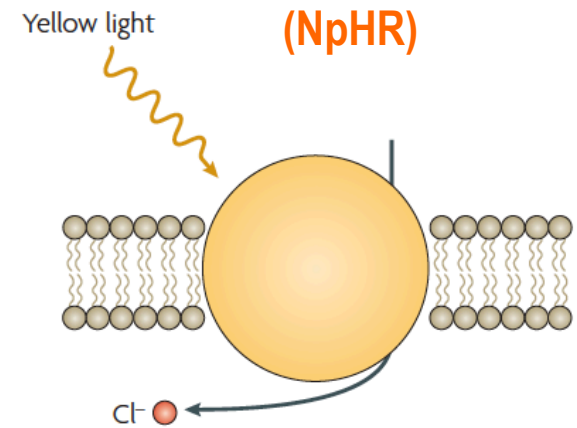
Karl Deisseroth (Stanford)



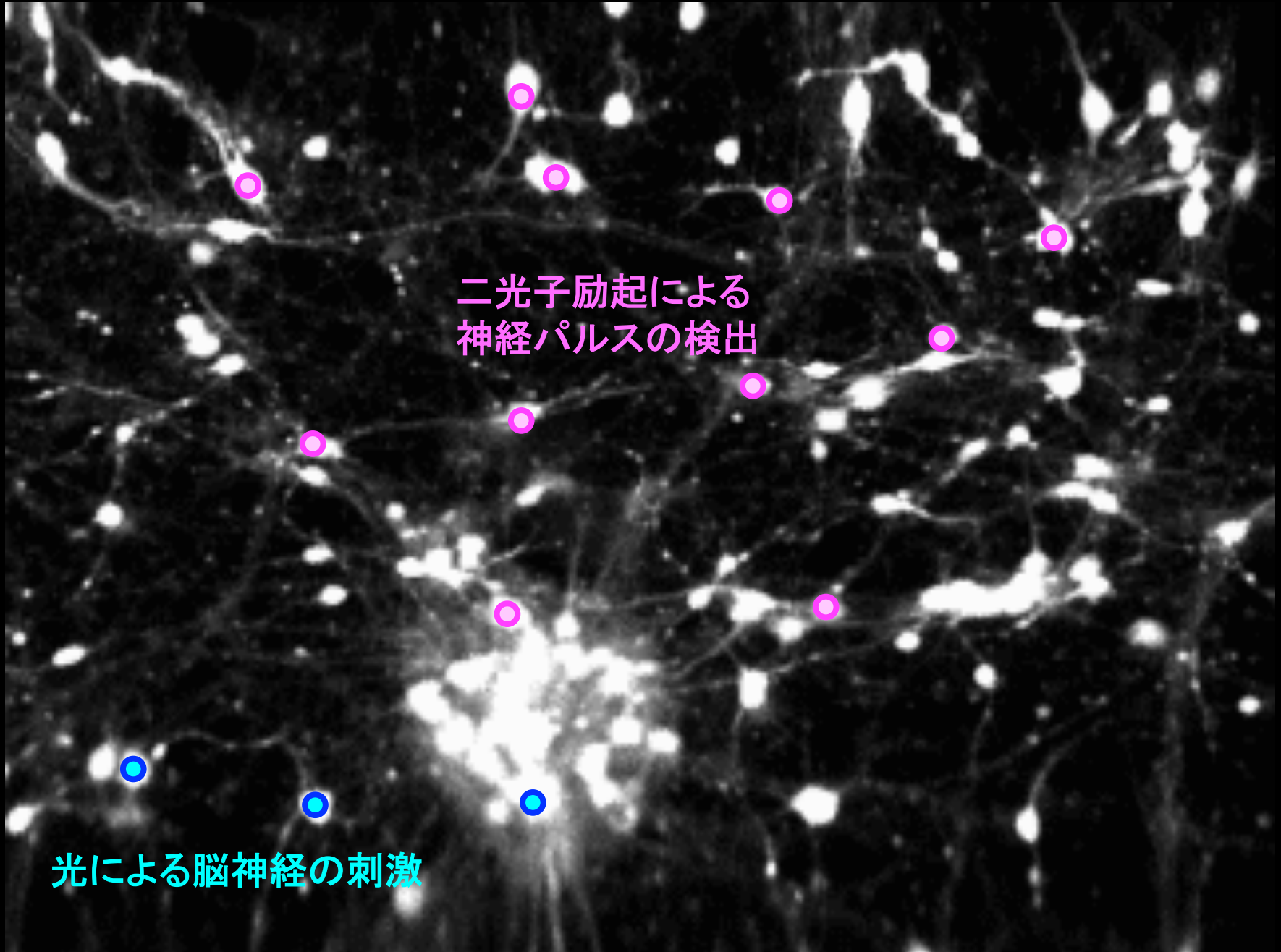
Excitation by  
Channelrhodopsin-2  
(ChR2)



Inhibition by  
Halorhodopsin  
(NpHR)



# 培養したネズミの脳神経系の顕微鏡ビデオ



# 外なる世界と内なる世界

- 外なる世界: 五感 → Virtual Reality による刺激
  - 視覚
  - 聴覚
  - 味覚
  - 嗅覚
  - 触覚
- 内なる世界(脳) → 光による刺激(二光子励起)
  - 脳神経回路
- 内なる世界(脳)と外なる世界を直接につなぐ
  - 外界の時空間の、内なる認識

# 「意識」の起源

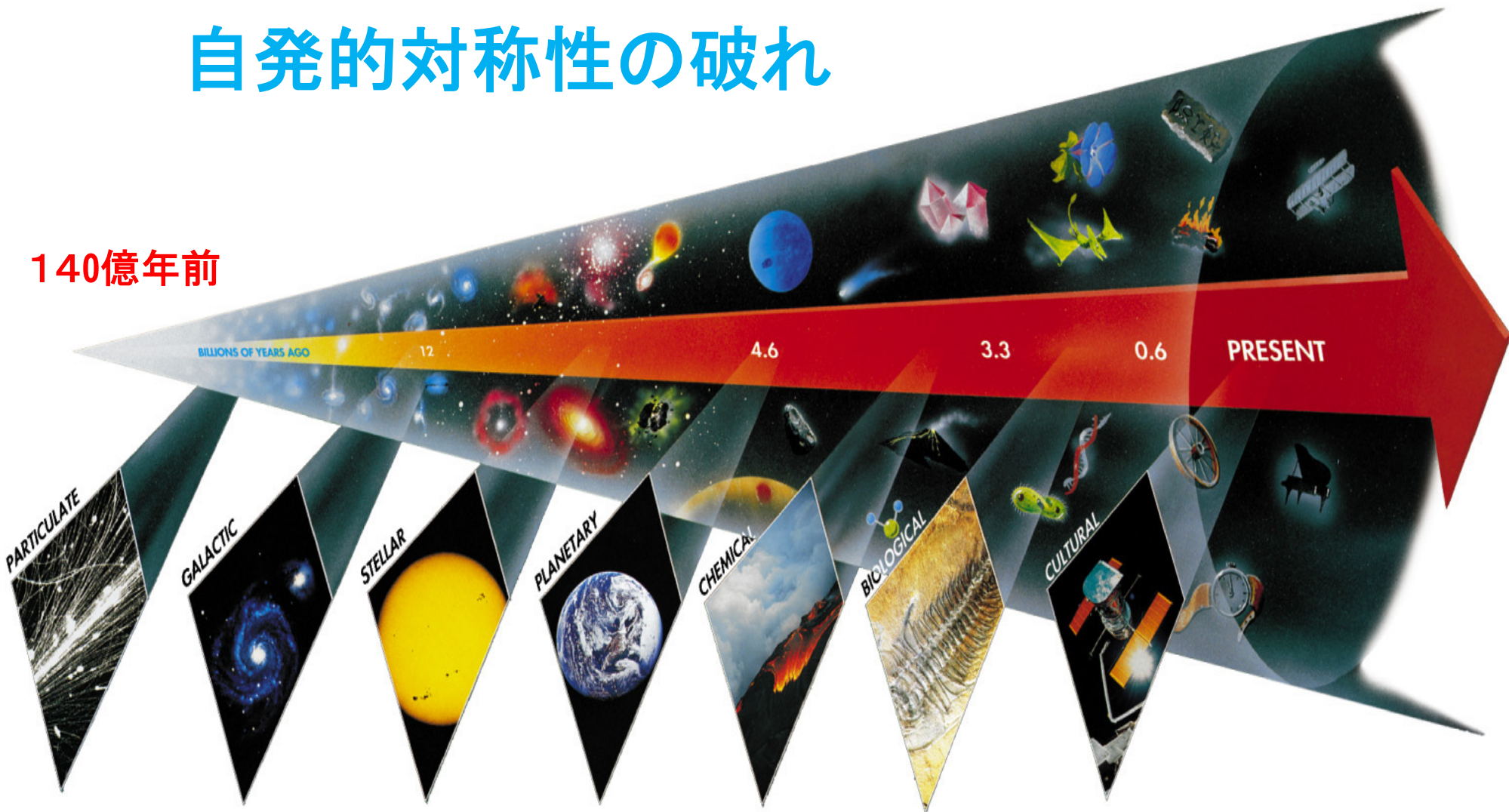
- 人の脳は無意識下に、数限りない並列演算を行っている。
  - 画像処理
  - 音、言語の認識
  - 時空の認識
  - ...
- 「意識」とは、無意識に行っている脳の並列演算の結果として、決断を下した後の「残像」に過ぎない。
  - 言語、論理的思考は、実は過去の残像
  - 言葉の内容は、話した後で初めて意識される。
  - 音楽の演奏中は、すぐ次のフレーズしか浮かばない。

# まとめ 科学の行方

# 宇宙進化の7段階

## 自発的対称性の破れ

140億年前



単純

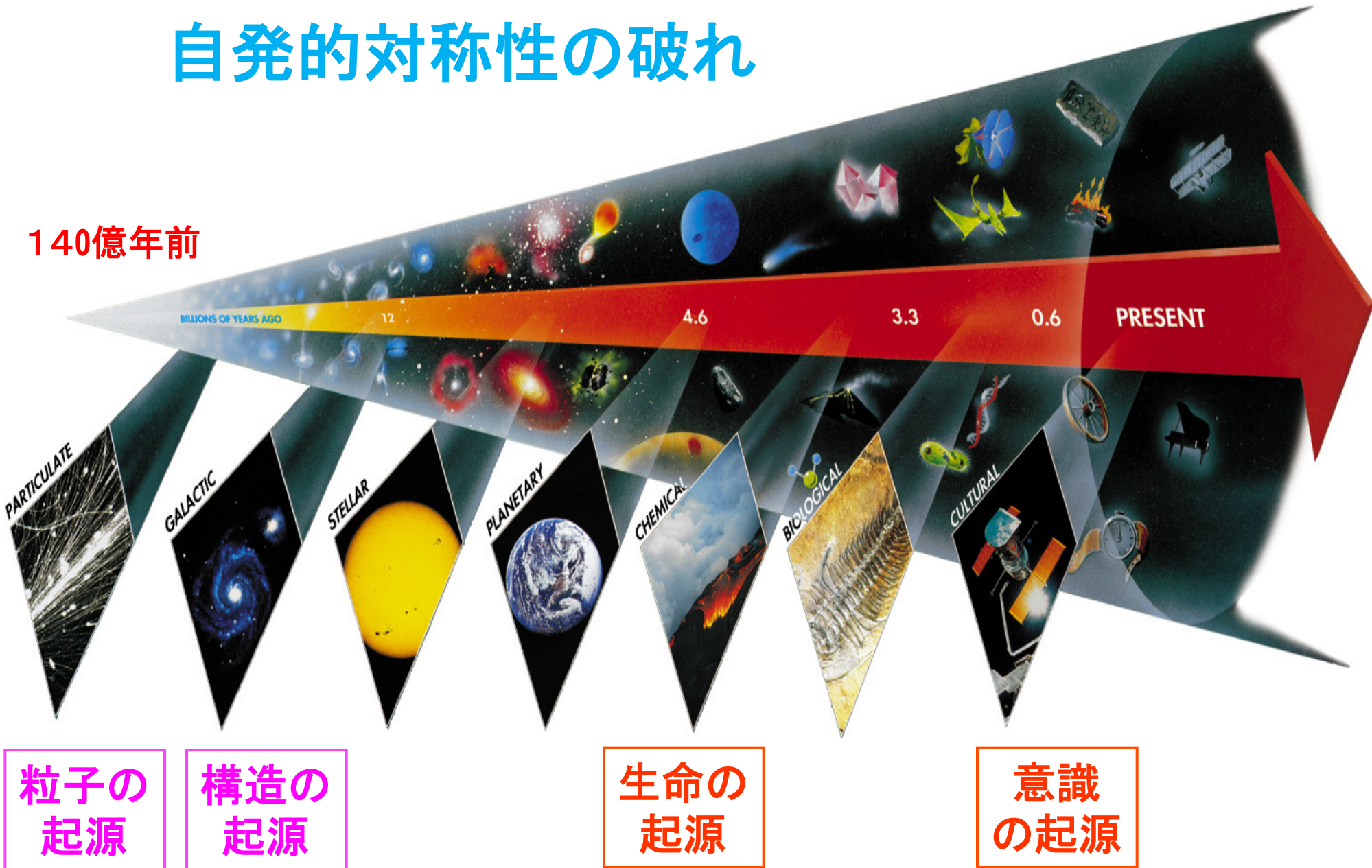


秩序だった複雑系

# 宇宙進化の7段階

## 自発的対称性の破れ

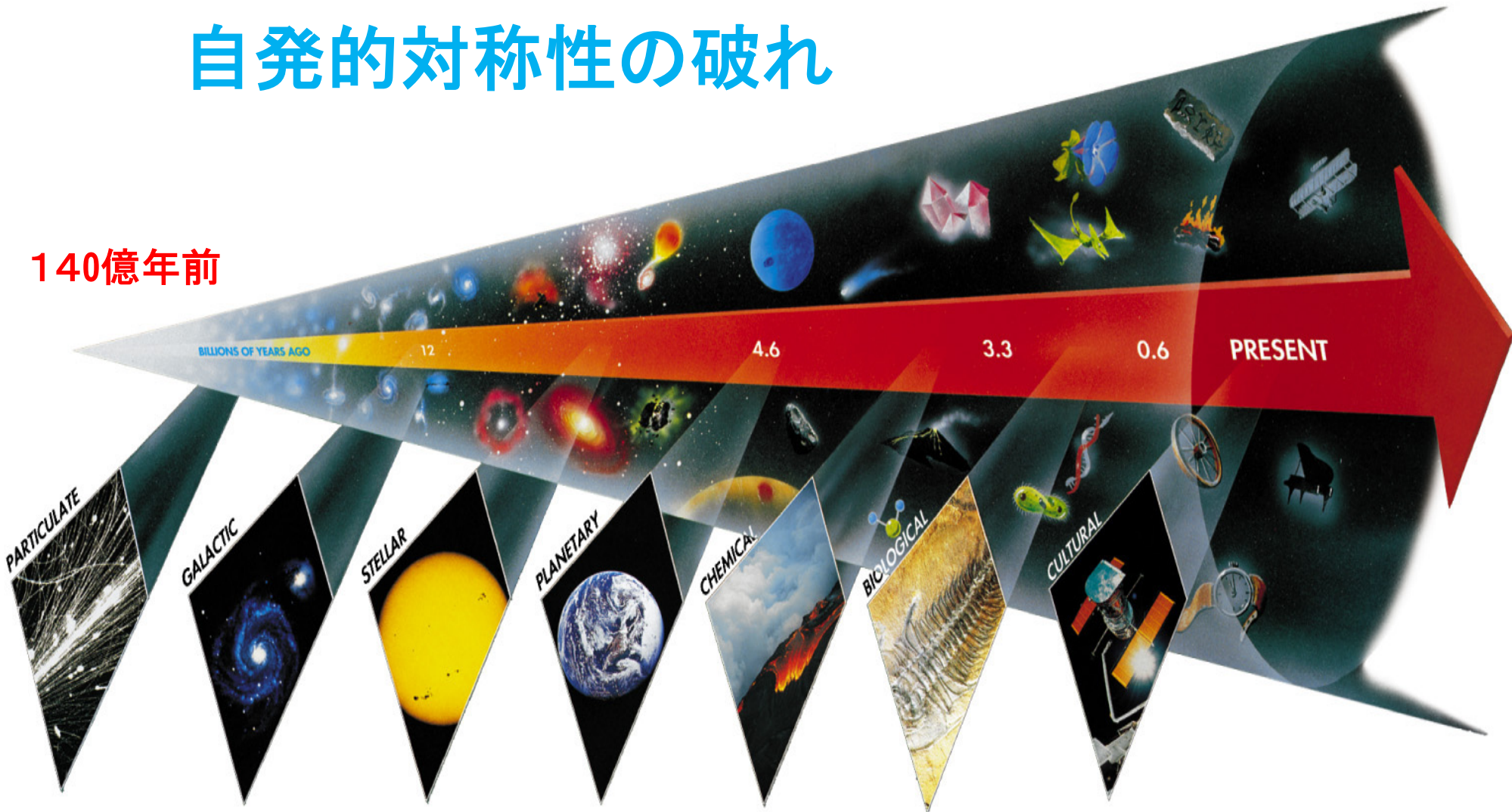
140億年前



# 宇宙進化の7段階

## 自発的対称性の破れ

140億年前



加速器

望遠鏡

顕微鏡

# 生命とは何か

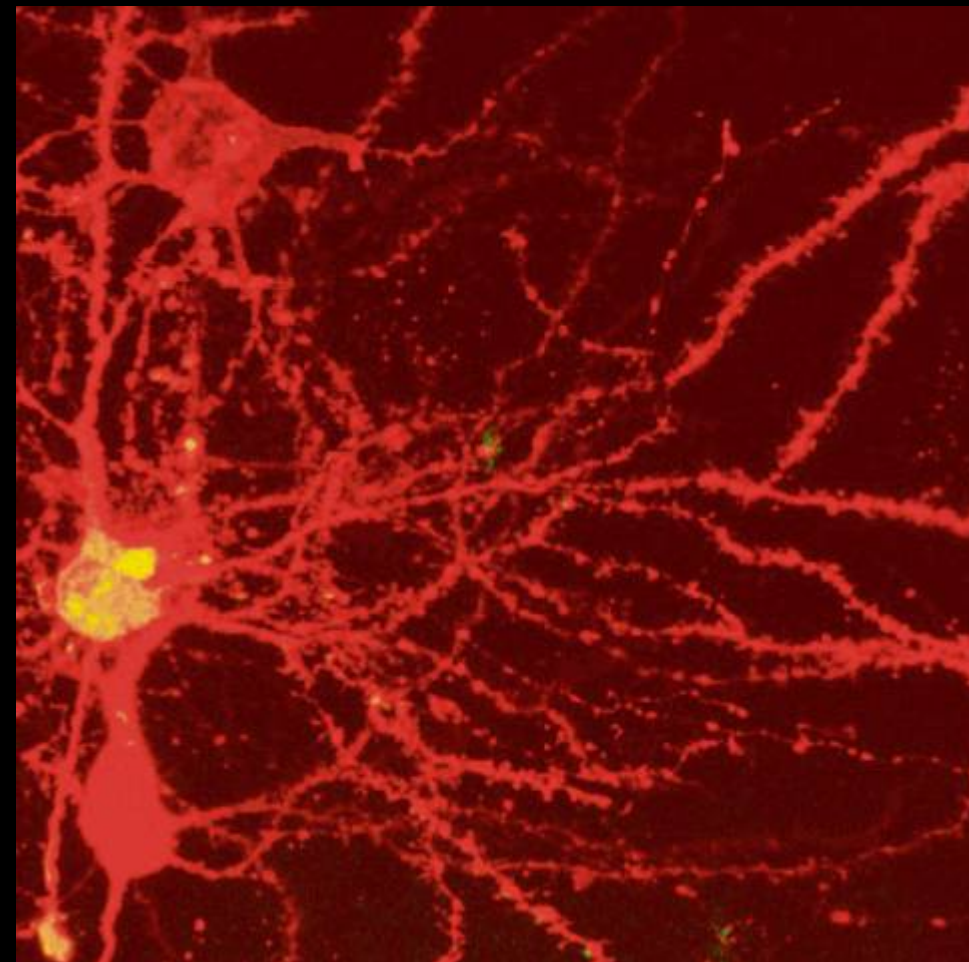
## ➤ 強く相互作用する複雑系

- 一つの細胞内に、数万種類のタンパク質がひしめいている。
- 一つの生命体は、百兆個 ( $10^{14}$ ) もの細胞が寄り集まってできている。

## ➤ 秩序だった自発的対称性の破れ

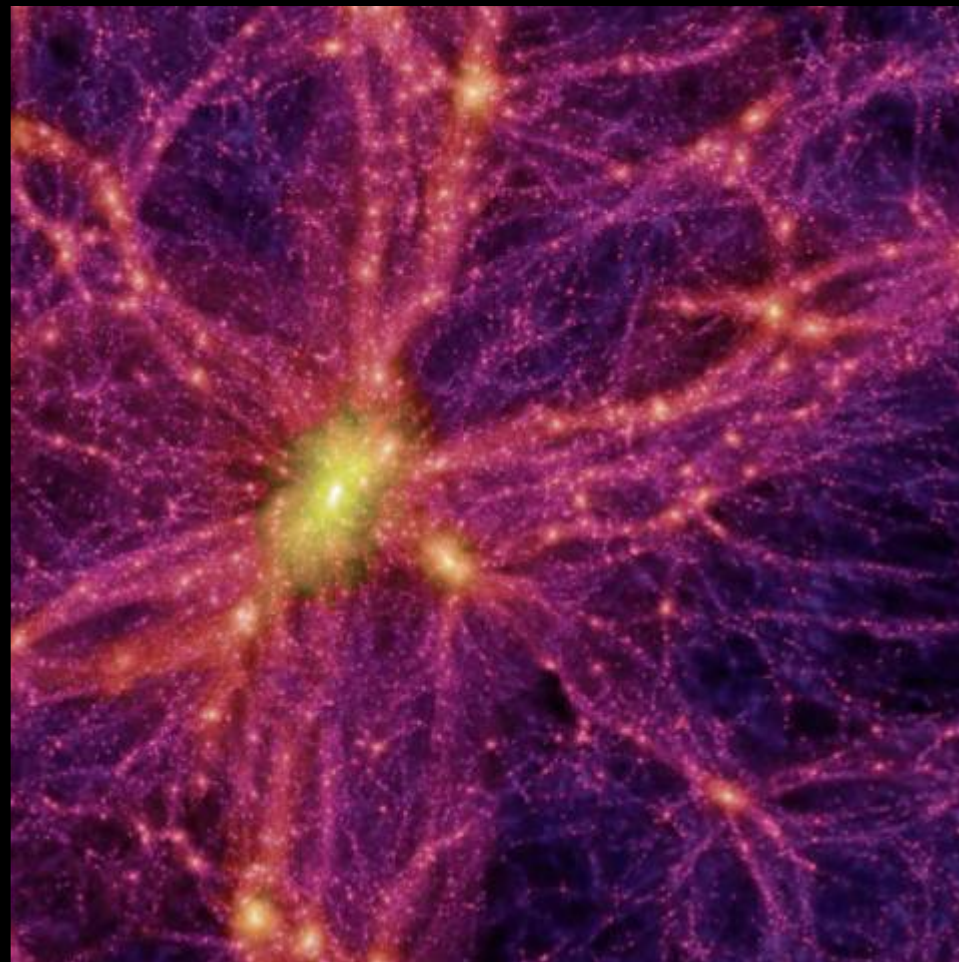
- 生命の進化過程
- 受精卵からの成長過程
- 後天的な学習過程

# 脳



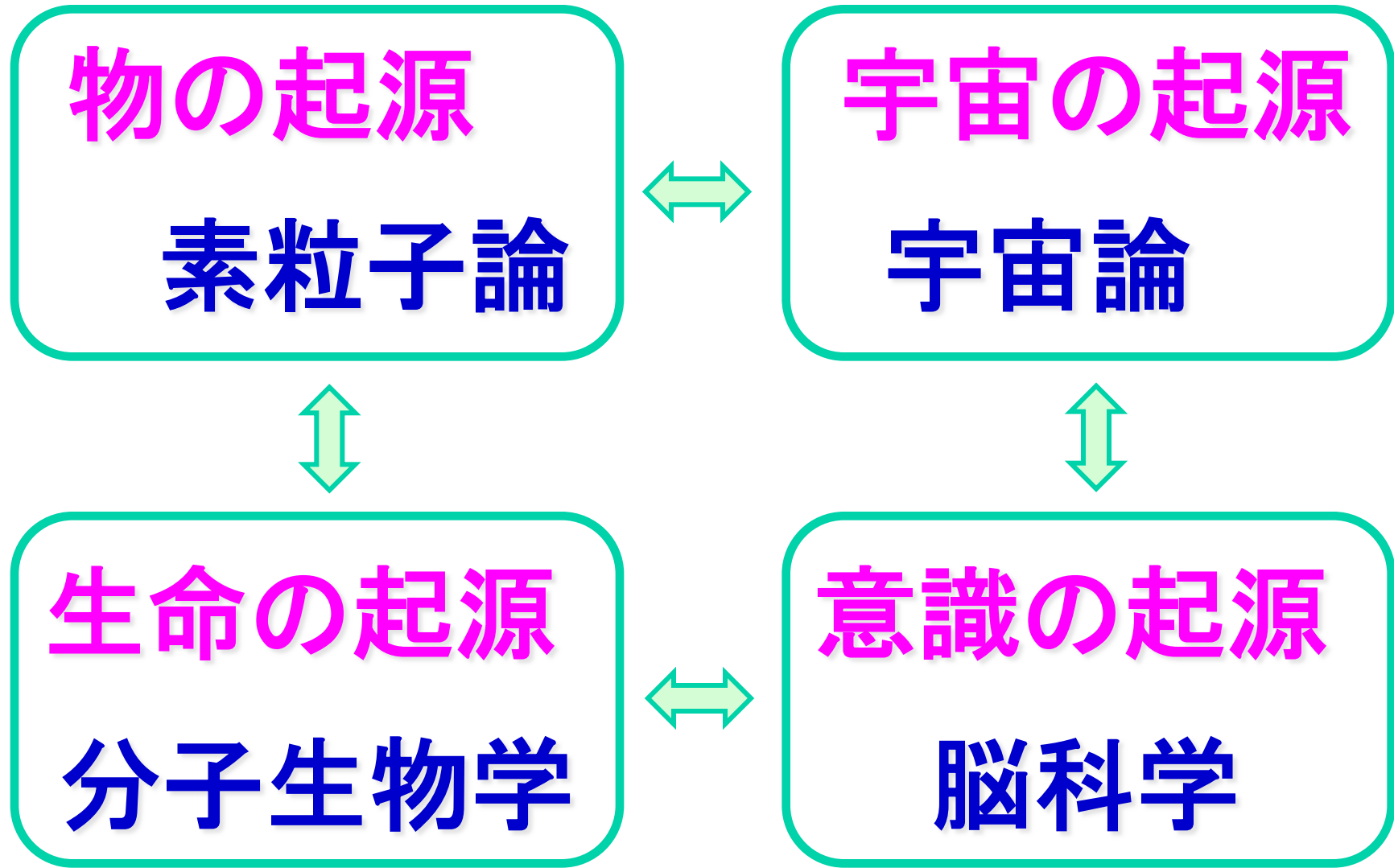
一千億のニューロン

# 宇宙



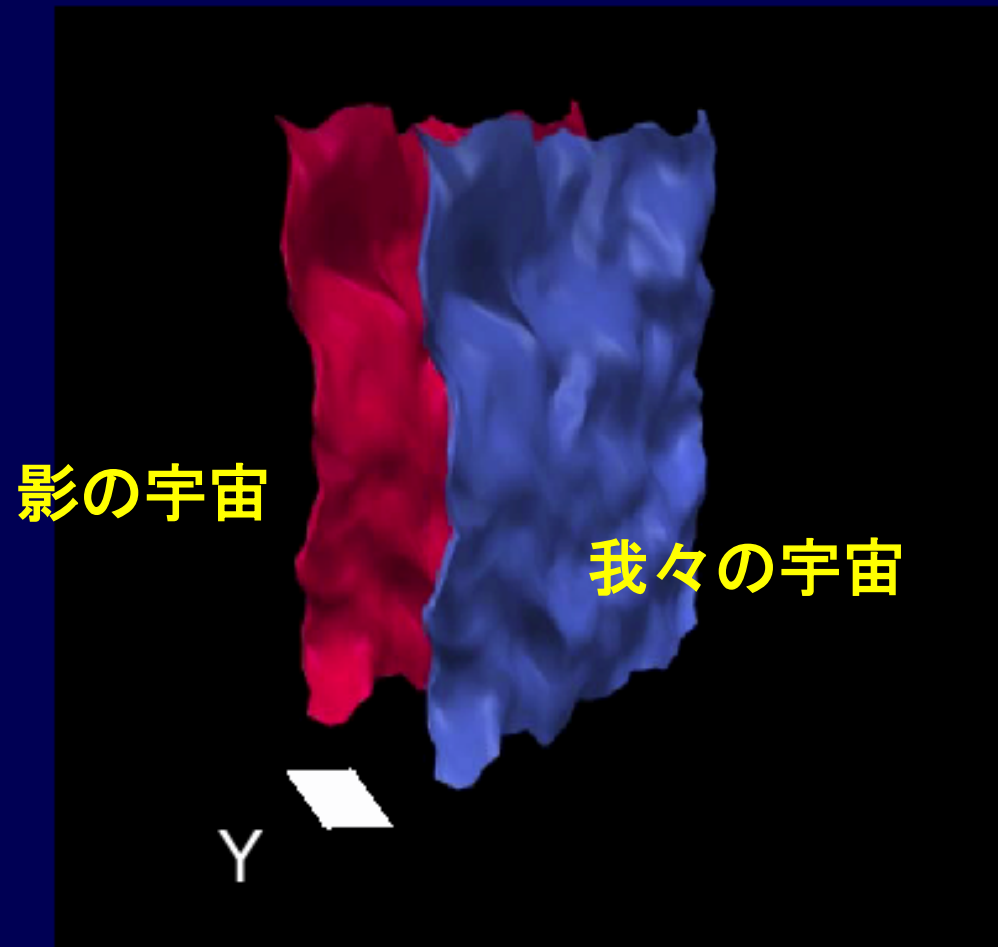
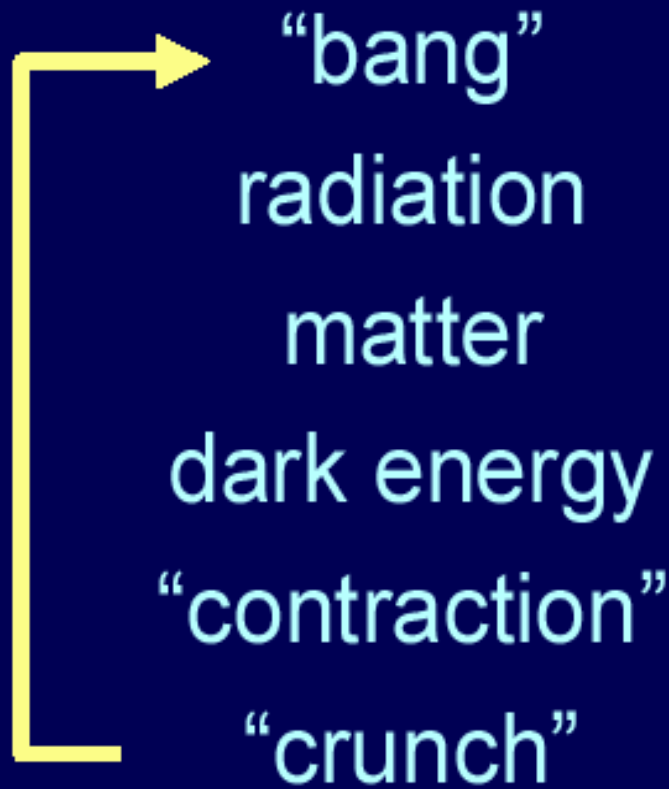
一千億の銀河

# 四大科学



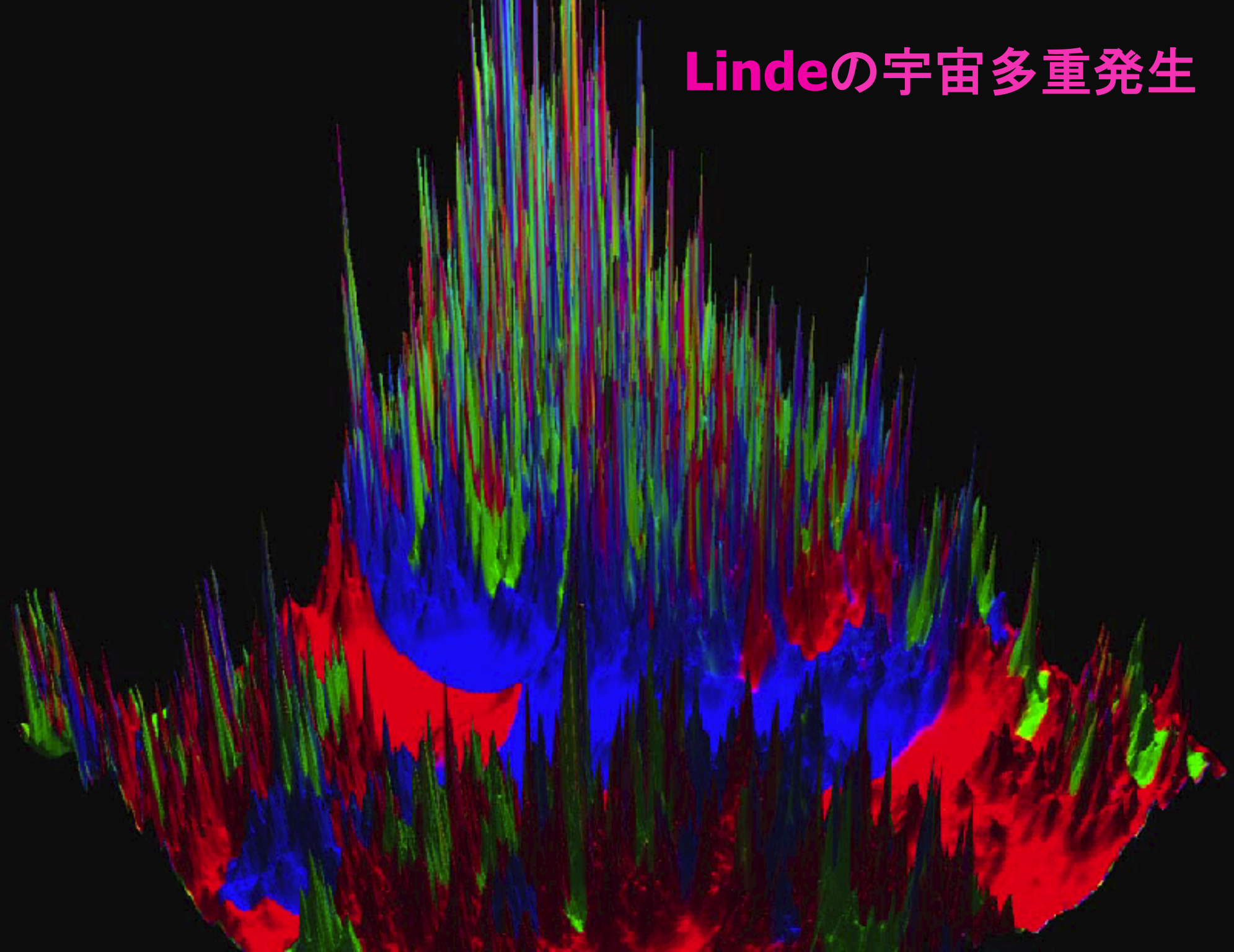
# Cyclic Model

M theory



そもそも宇宙は、我々の  
住む宇宙だけなのか？

# Lindeの宇宙多重発生



A deep space photograph showing a vast field of galaxies and stars against a dark background. The galaxies are scattered across the frame, some appearing as bright, glowing clouds, others as more distant, faint points of light. The colors range from bright yellow and orange to deep blue and purple. The overall scene is a rich, multi-colored tapestry of cosmic objects.

約1000億の宇宙のひとつに我々はいる。

たまたまその宇宙が、生命誕生の条件を備えた。



なぜ我々は存在するのか？

# まとめ – 四大科学の行方

- 我々人類に至る宇宙の進化過程に於いて、数えきれない「自発的対称性」の破れが必要だった。
- 「生命」とは4次元空間に於ける複雑系。
  - 強い相互作用
  - 秩序だった自発的対称性の破れ
  - その最たる物が人間の脳
  - Virtual Reality により、外なる世界と内なる世界の関係を探る。
- 「高速顕微鏡」でより速い世界を見る事により、生命現象の核心を捉える。
  - 熱雑音に打ち勝つ、秩序だった動きを見る。
  - 4次元空間で、とてつもない情報量の分布を探る。
- 生物学の革命の入り口が見えてきた。
  - 物理法則で生命の複雑系を記述する可能性。

# 参考文献

- クォーク
  - 南部 陽一郎
- 宇宙はわれわれの宇宙だけではなかった
  - 佐藤 勝彦
- ワープする宇宙－5次元時空の謎を解く
  - リサ ランドール
- 生物と無生物のあいだ
  - 福岡 伸一
- 生命とは何か－複雑系生命科学
  - 金子 邦彦
- 神経科学－脳の探求
  - ベアー、コノーズ、パラディーソ