

ブラックホールを通して 紐解く宇宙の歴史

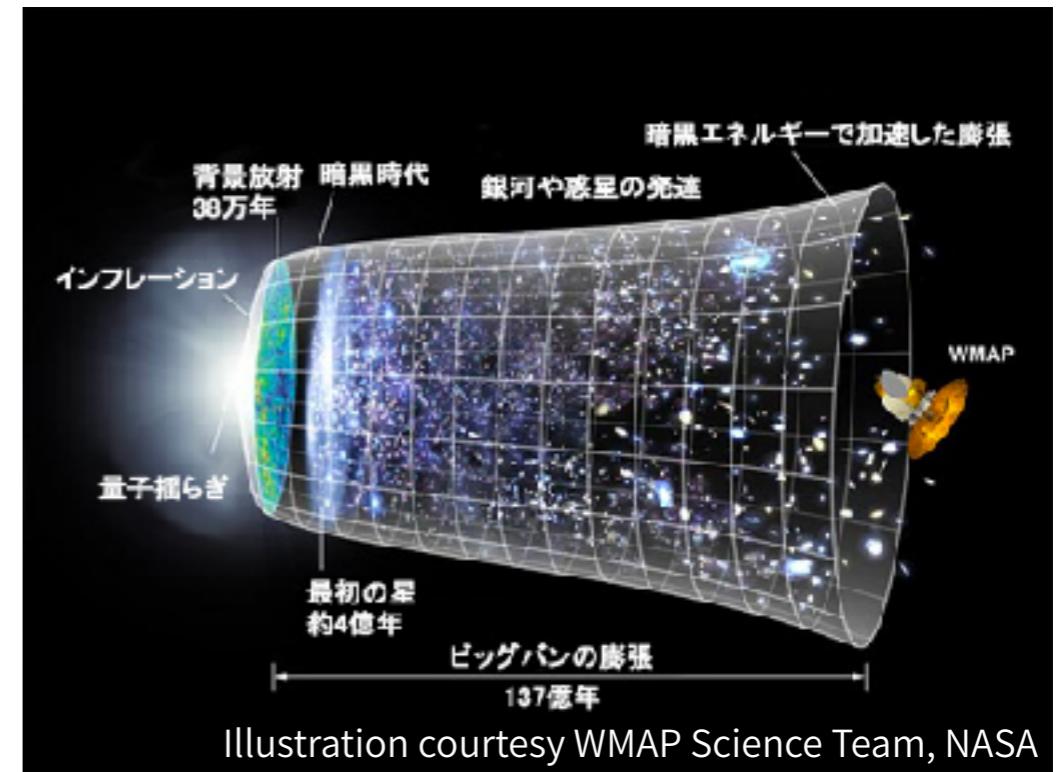
井上 芳幸 (理化学研究所)

一般相対性理論の予言

ブラックホール



膨張宇宙



星の進化の終末

天体物理

Astrophysics

ビッグバンの根幹

宇宙論

Cosmology

Einstein 静的宇宙モデル

- 時間変化しない静的な宇宙

- 重力(引力)を打ち消す万有斥力項の導入

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

- 膨張宇宙の発見(ハッブル 1929)

- 宇宙項を導入したことを「人生最大の失敗」と言った(らしい)

Friedmann 方程式

- ・ アインシュタイン方程式を宇宙全体に適用

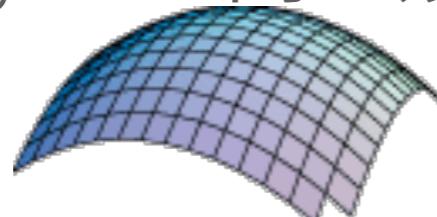
$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$



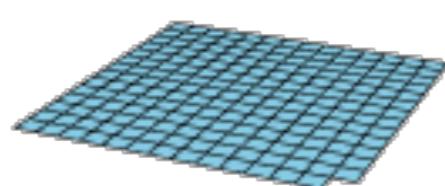
宇宙の膨張率 空間曲率 物質密度

- a : 宇宙の大きさ

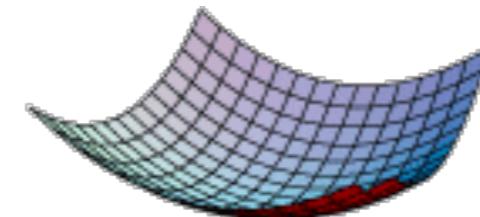
- $K = \pm 1, 0$: 空間の幾何学的性質



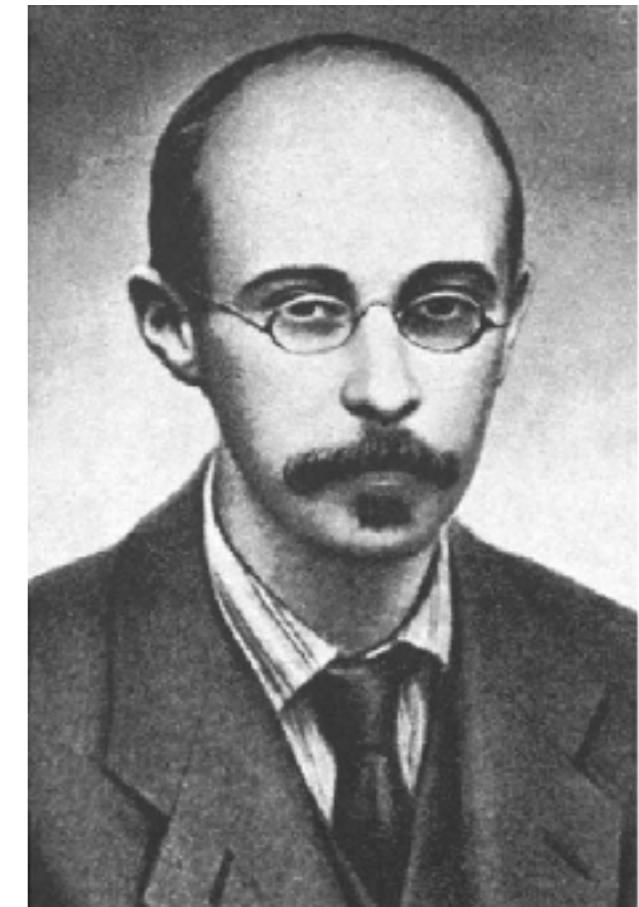
閉じた宇宙



平坦な宇宙

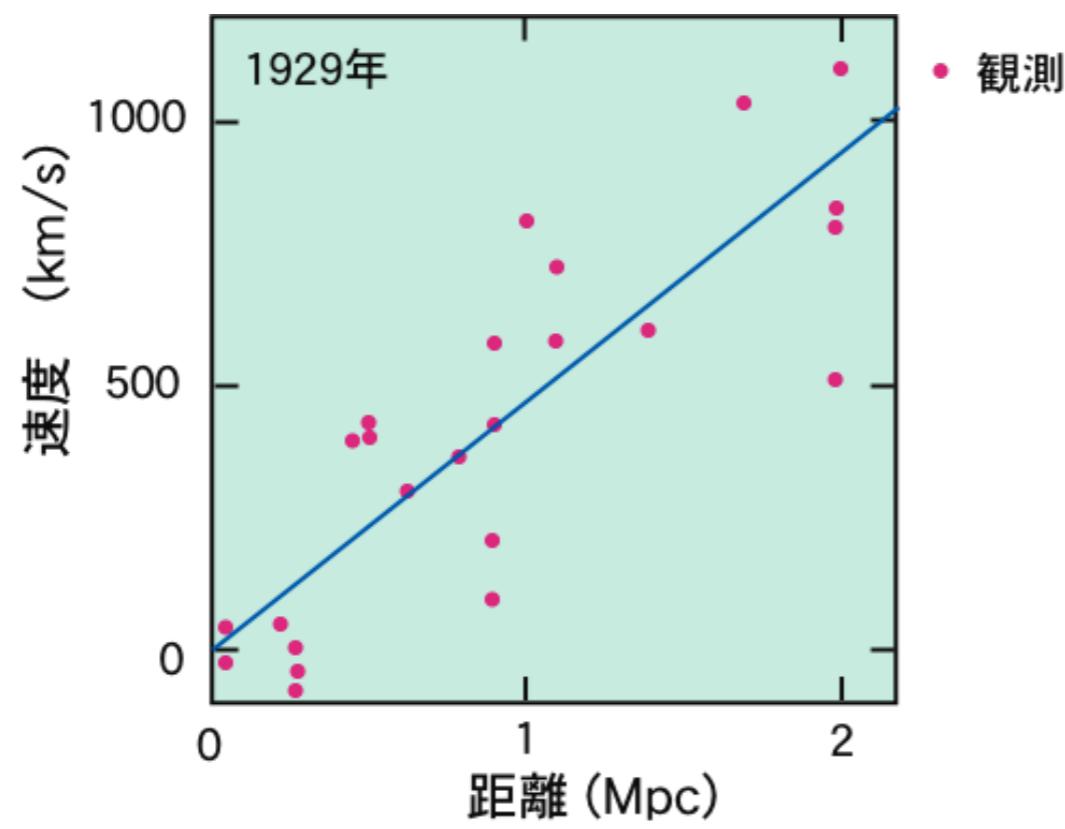


開いた宇宙



膨張する宇宙

- 銀河が距離に比例して遠ざかっていく(ハッブル 1929)
 - 宇宙膨張の証拠
 - 後退速度 = $H \times$ 距離



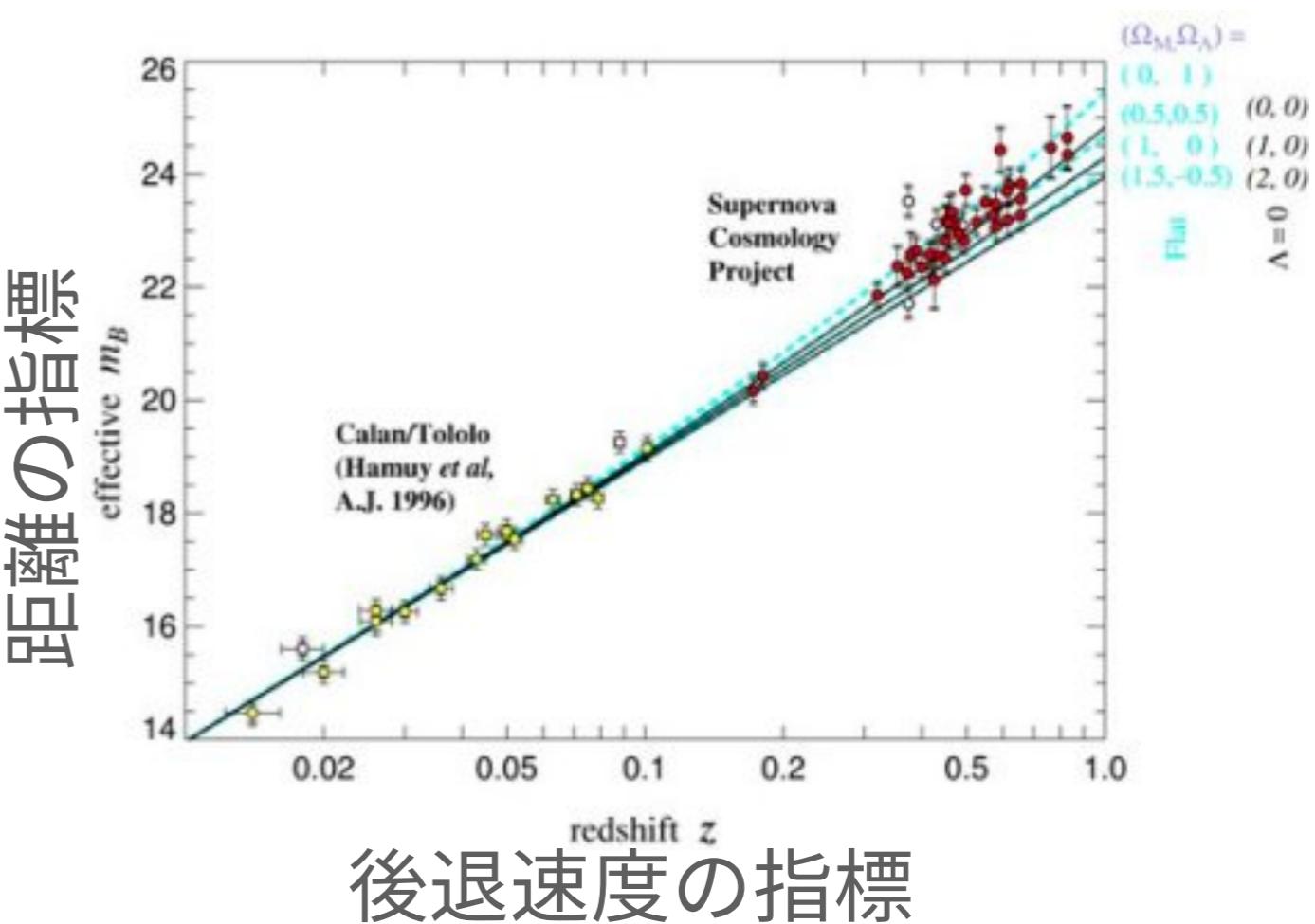
Mpc = 326万光年

$$H_0 = 464 \text{ km/s/Mpc}$$



加速する宇宙膨張

- 標準光源：Ia型超新星
- 遠方の超新星をみると、宇宙が加速膨張している
- パールムッター、シュミット、リース 2011 ノーベル賞



宇宙の基本構成要素

宇宙と素粒子：ウロボロス

大規模構造

銀河団

銀河

クオーク

原子核

原子
分子

DNA

微生物

人間

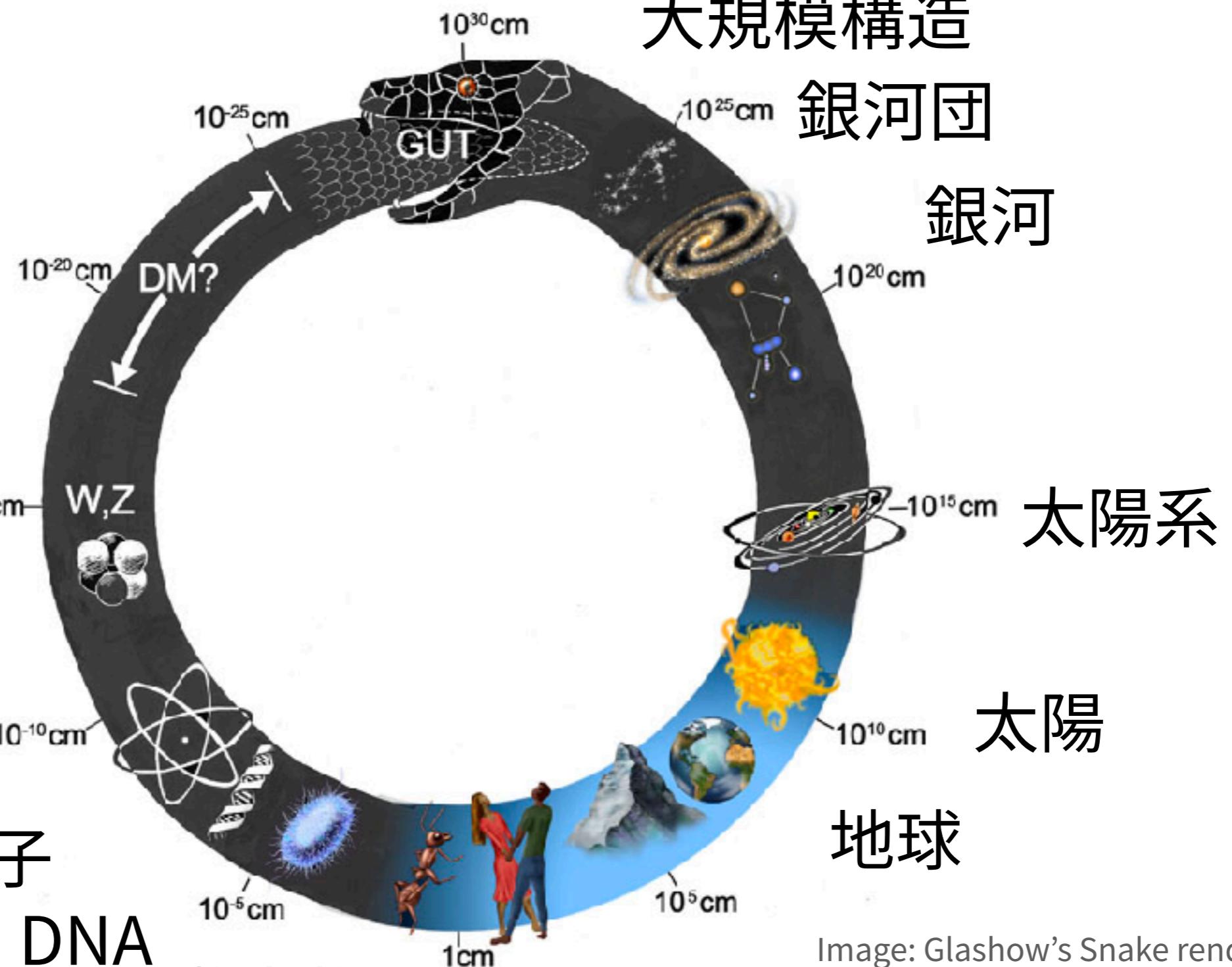
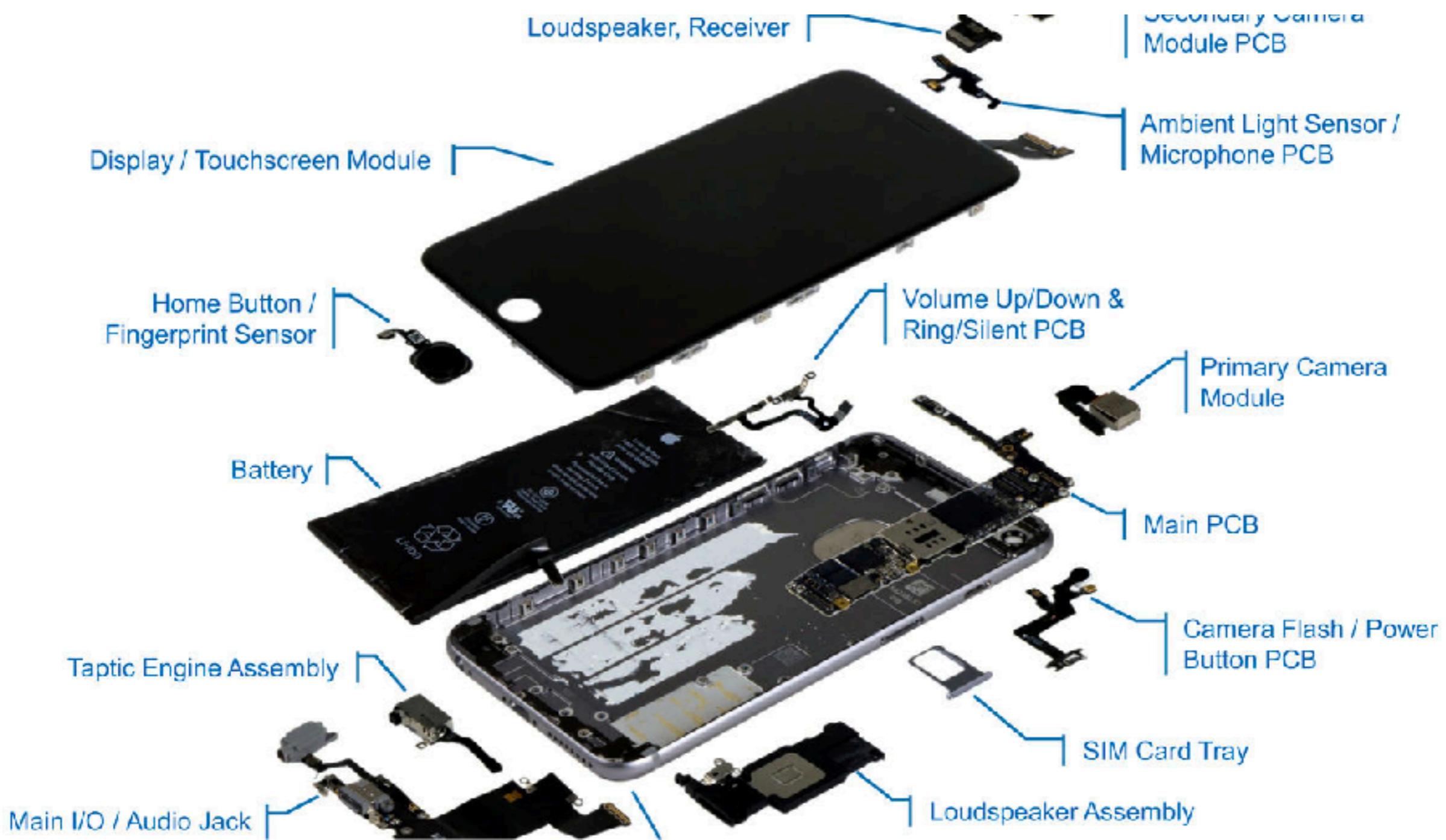


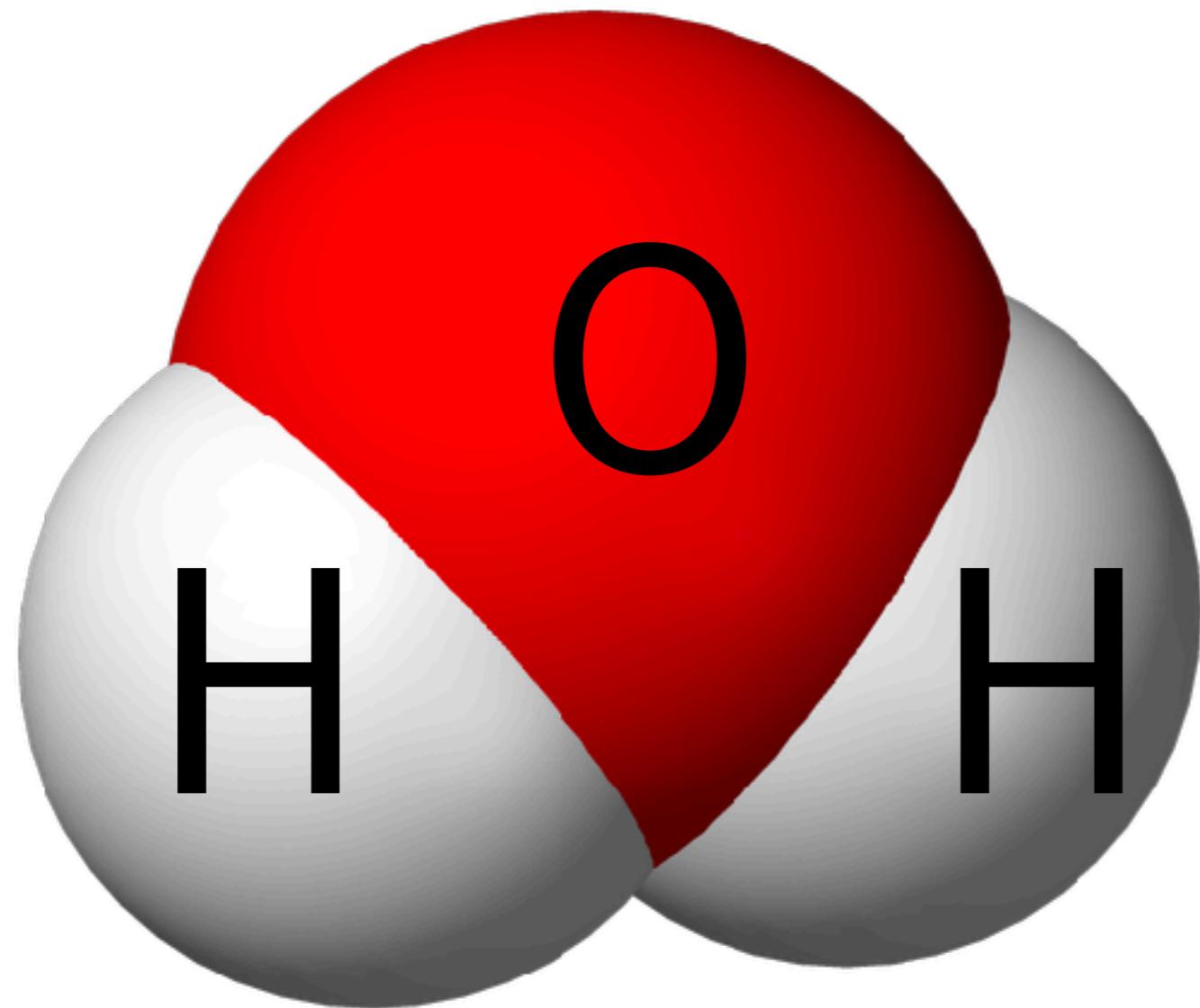
Image: Glashow's Snake rendered by
Nancy Ellen Abrams and Joel R.
Primack, (c) Abrams, Primack 2006

iPhone 6s の構成要素



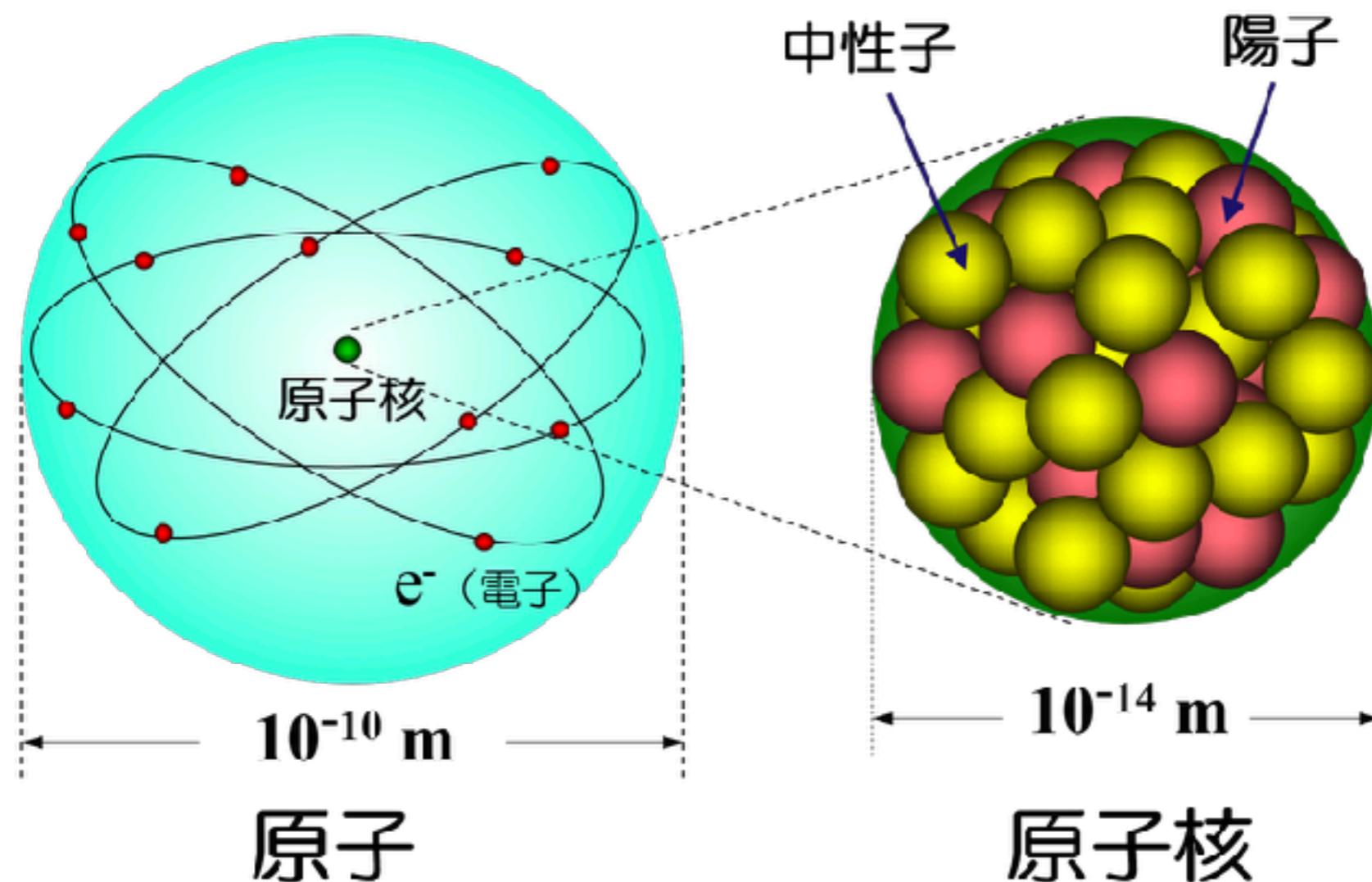
分子

- 分子の構成要素：原子



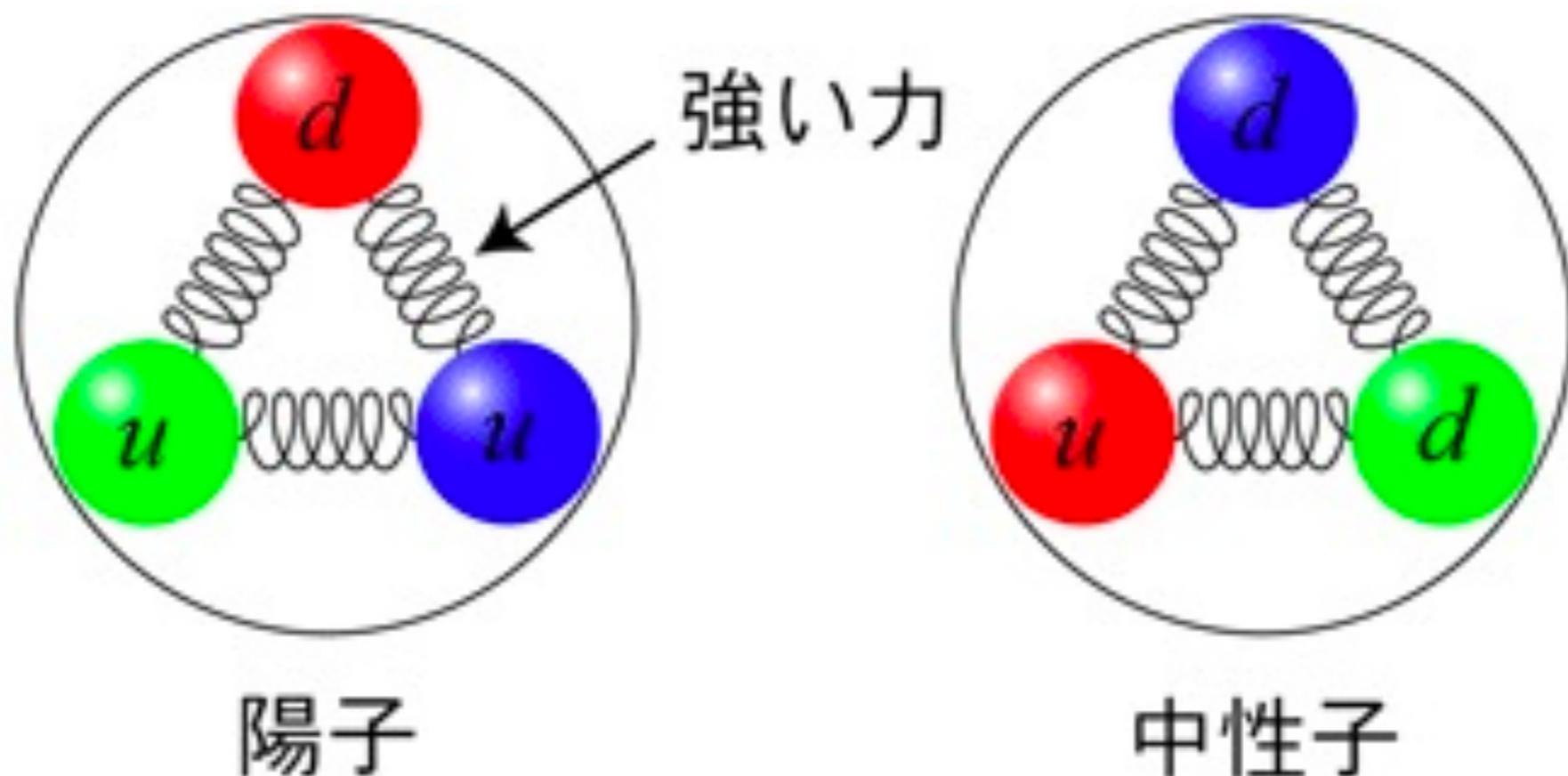
原子・原子核

- 原子の構成要素：原子核・電子
- 原子核の構成要素：陽子・中性子



素粒子

- 陽子・中性子の構成要素：クォーク



宇宙と素粒子：ウロボロス

大規模構造

銀河団

銀河

クオーク

原子核

原子
分子

DNA

微生物

人間

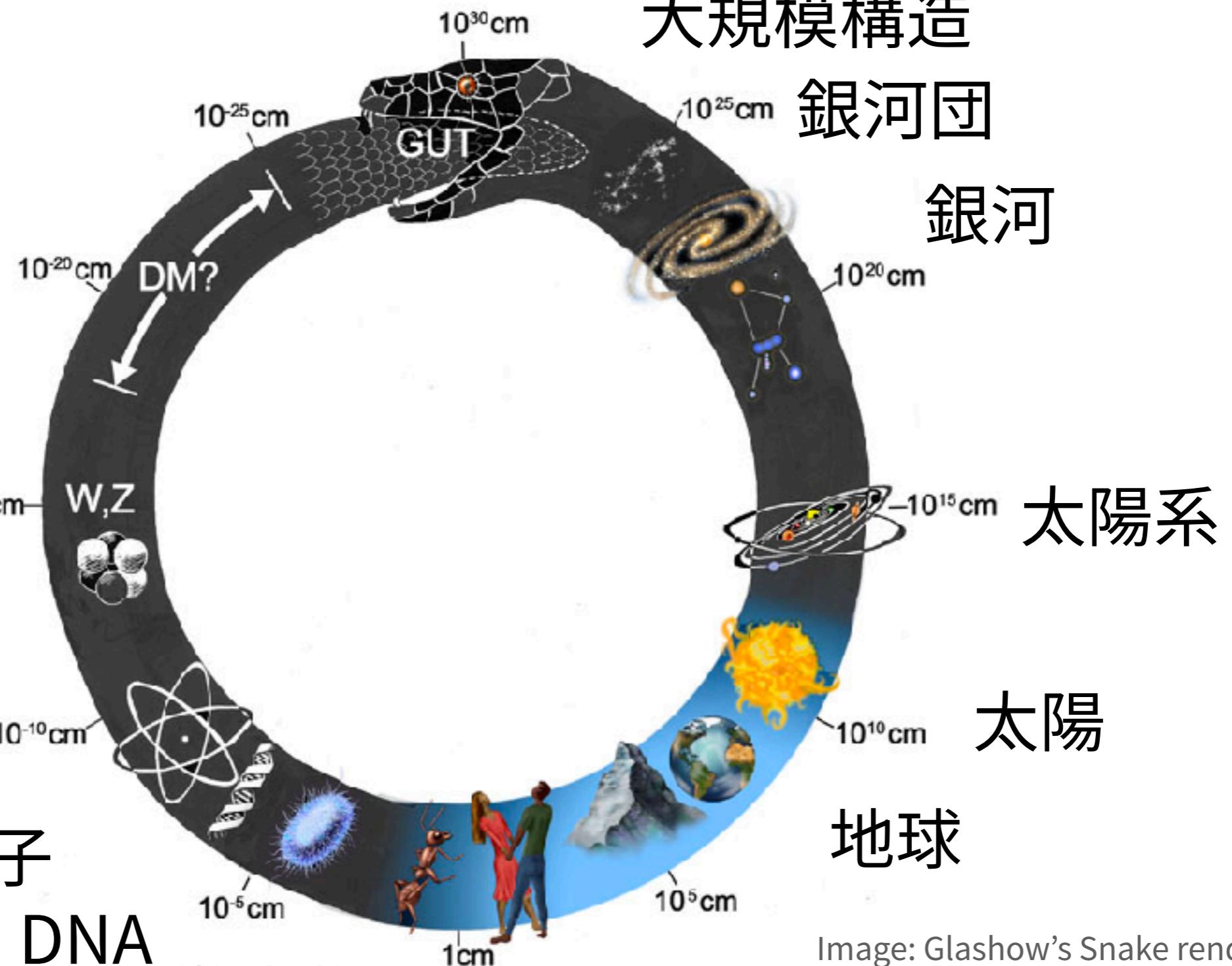
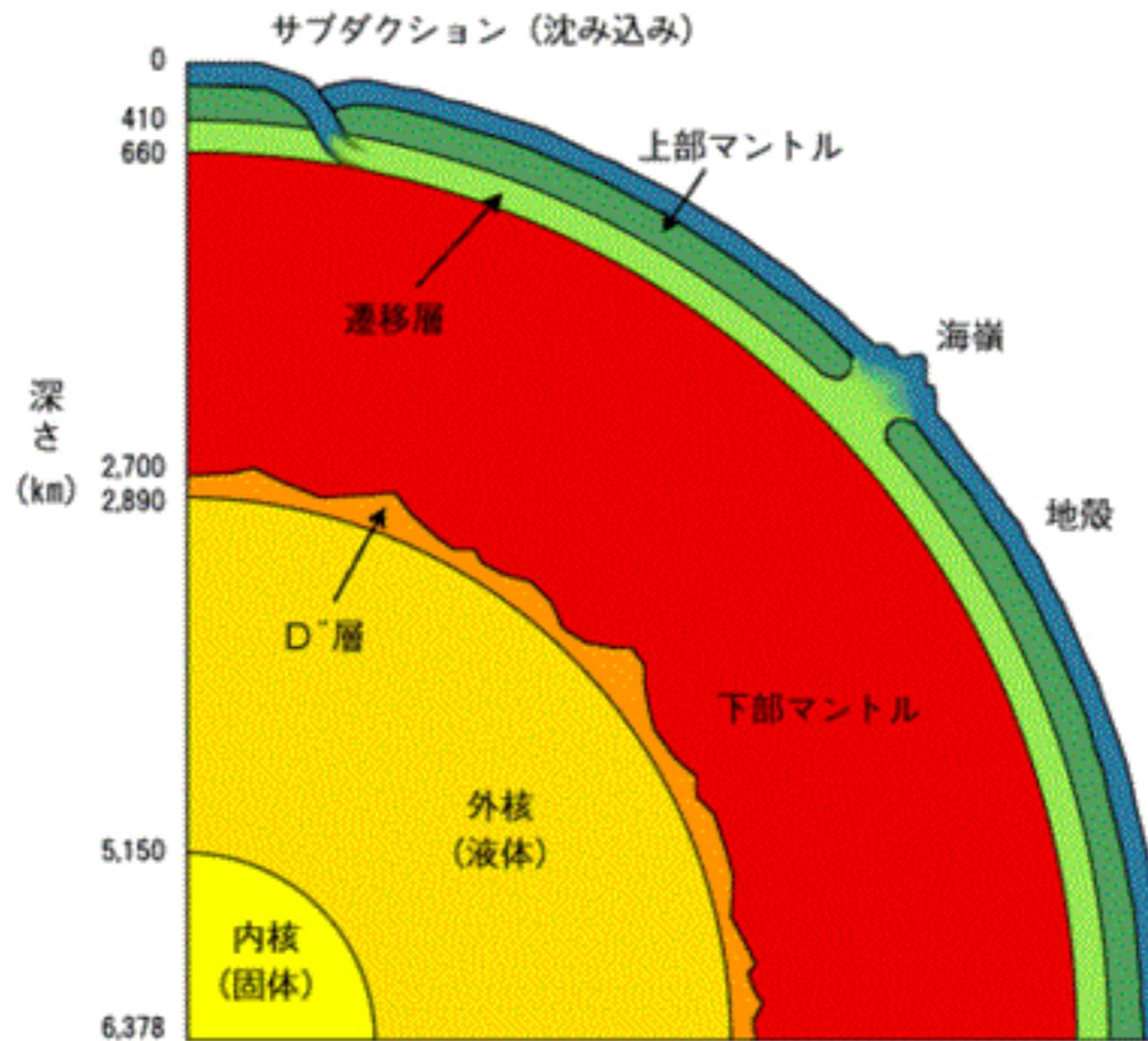


Image: Glashow's Snake rendered by
Nancy Ellen Abrams and Joel R.
Primack, (c) Abrams, Primack 2006

地球

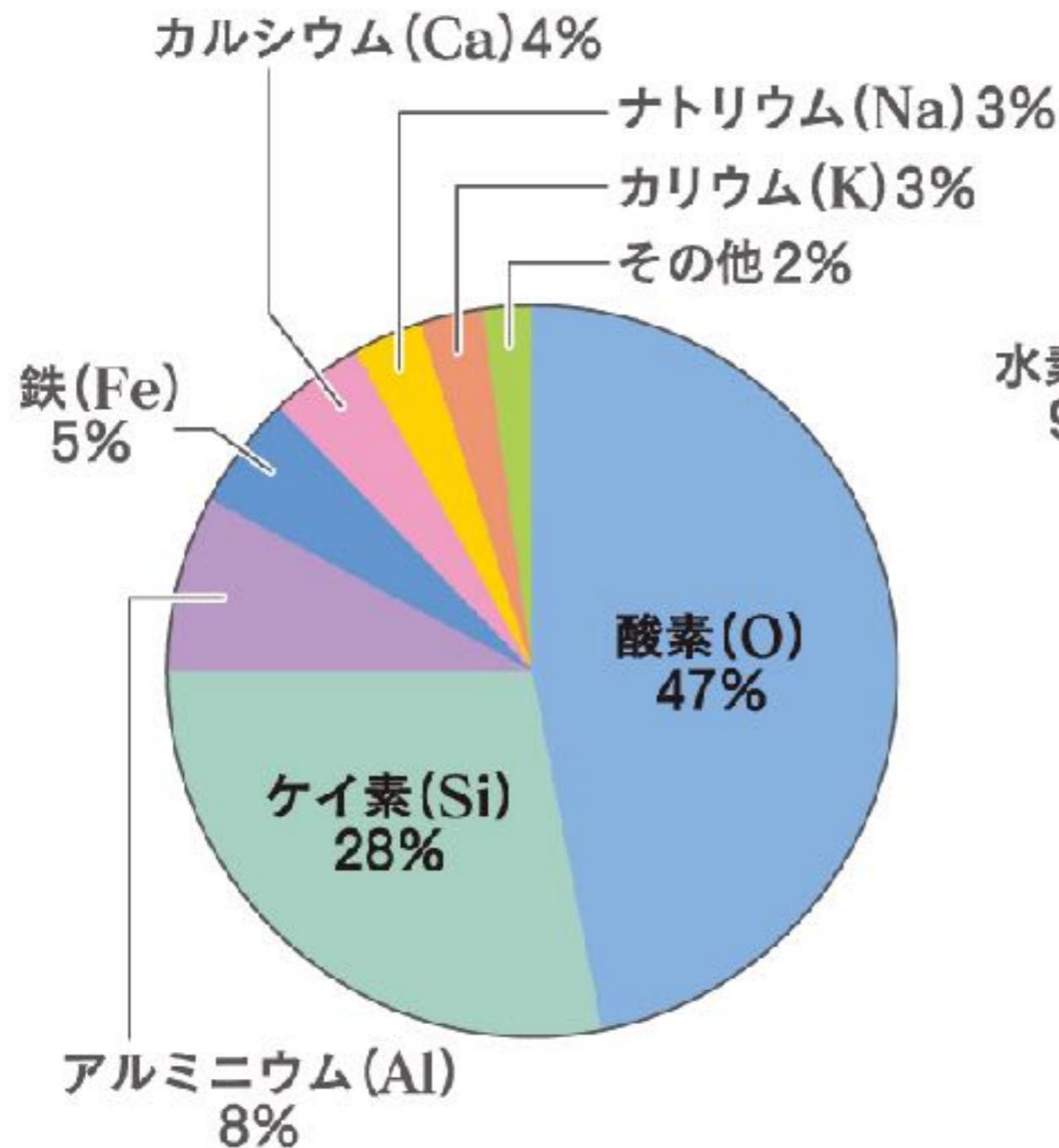


http://home.hiroshima-u.ac.jp/mfukuok/er/ES_MT.html

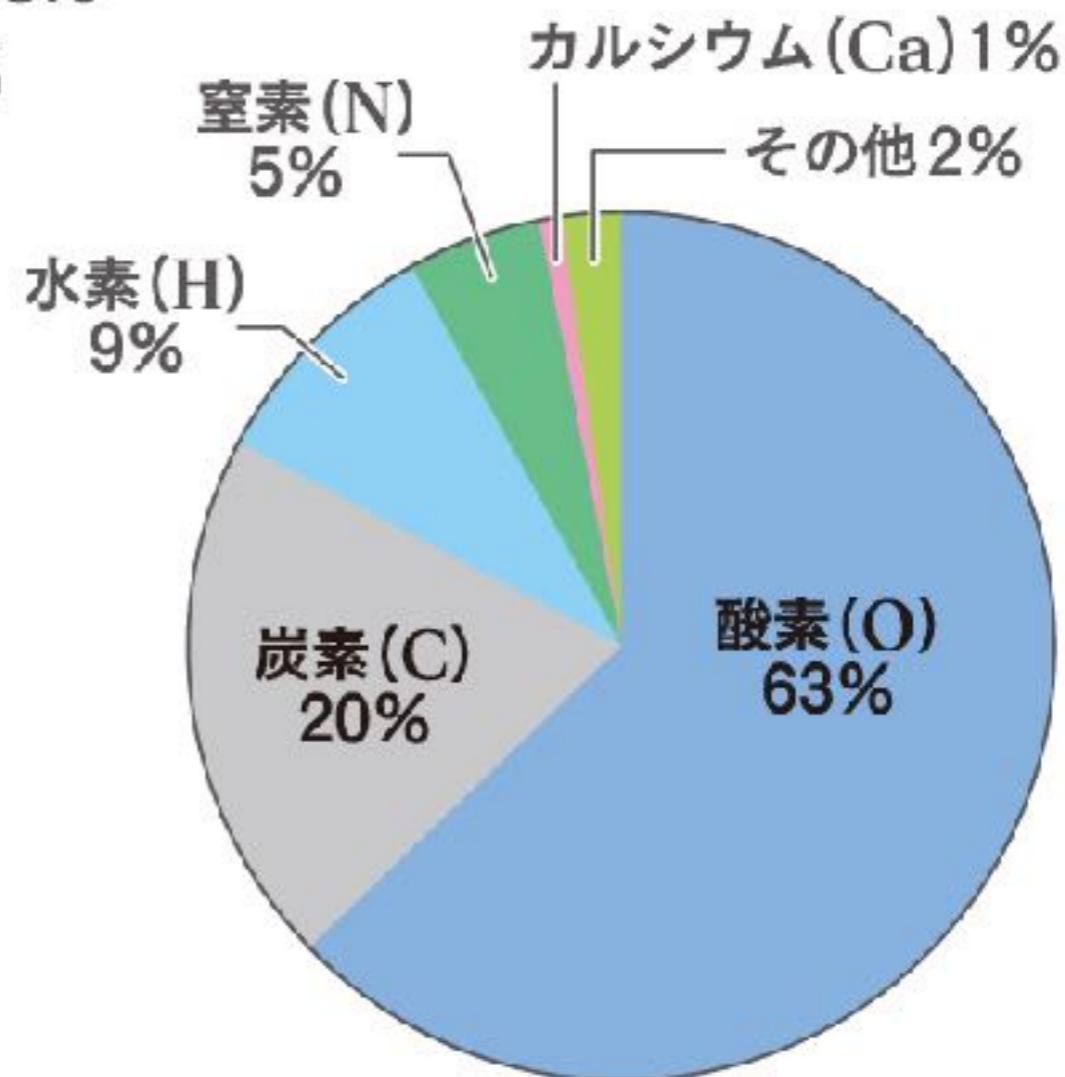
- 我々の住む地殻は地球体積の3%程度

地球・人を構成する元素

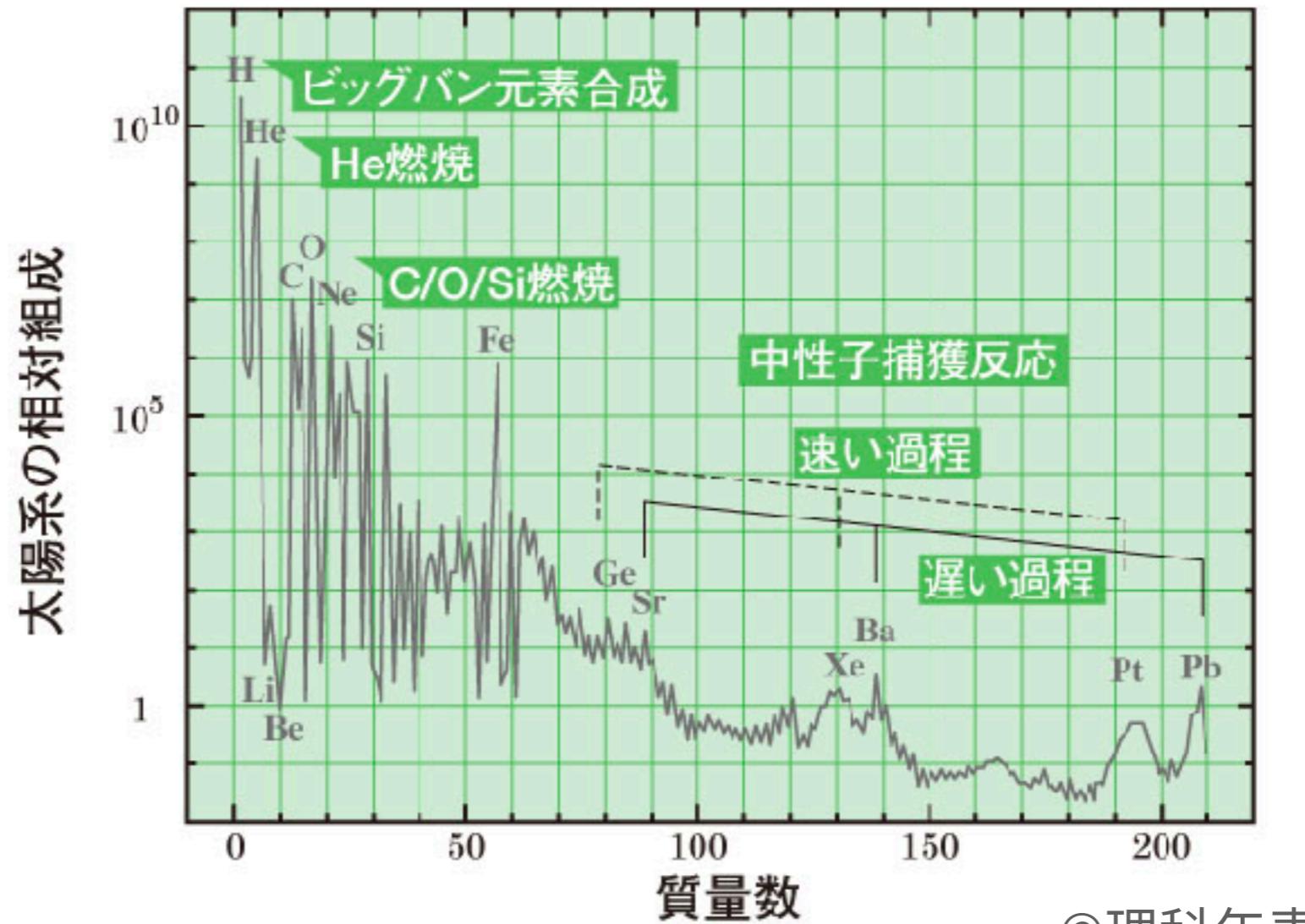
地殻を構成する主な元素



ヒトの体を構成する主な元素

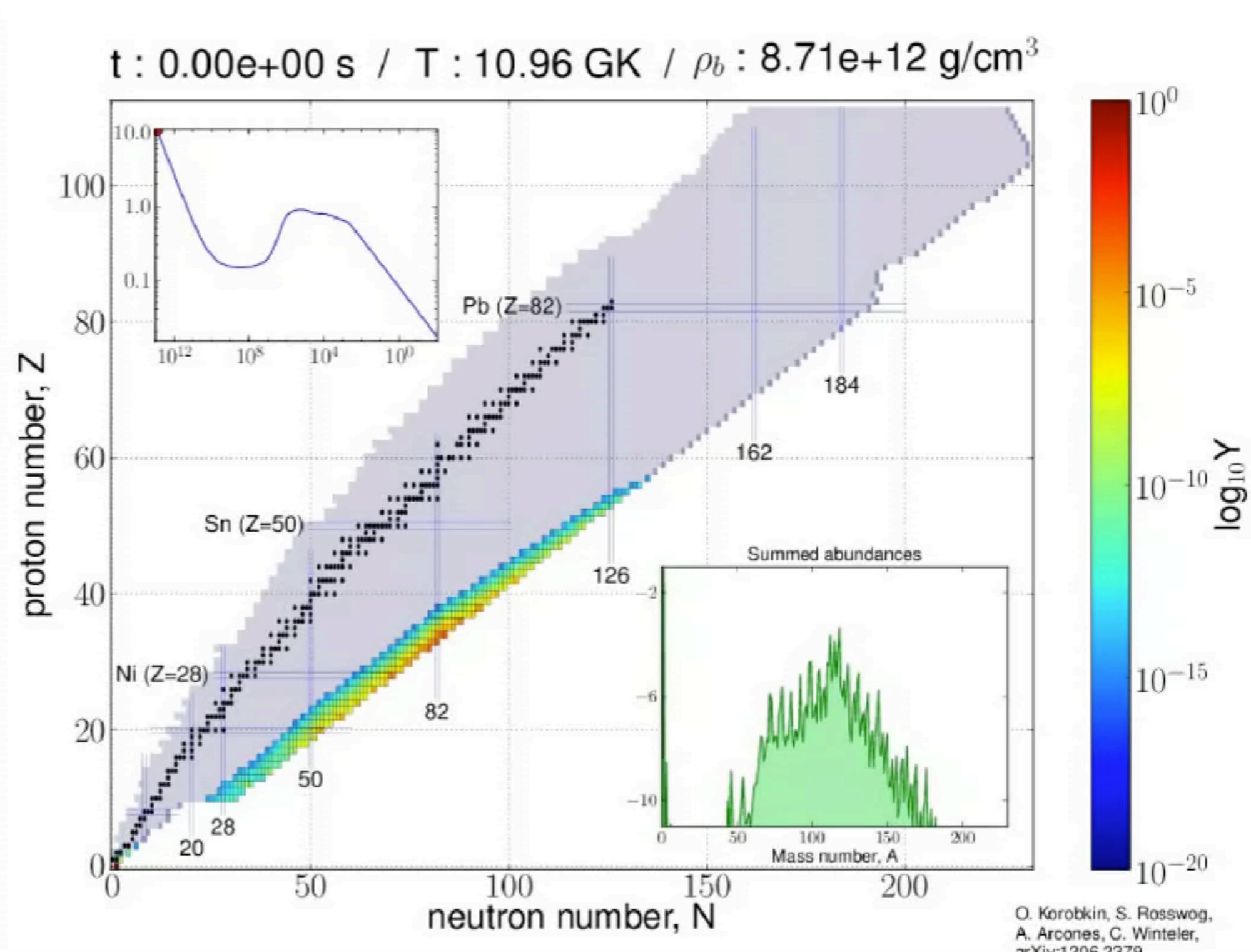


太陽組成



- 軽元素：ビッグバン
- 鉄より軽い元素：星内部・超新星爆発
- 鉄より重い元素：中性星合体・超新星爆発

中性子星合体による元素合成



センター試験地学

地 学 第5問・第6問は、いずれか1問を選択し、解答しなさい。

第6問（選択問題）

宇宙に関する次の問い合わせ(A・B)に答えよ。

(解答番号 ~) (配点 12)

A 宇宙の構成要素に関する次の文章を読み、下の問い合わせ(問1・問2)に答えよ。

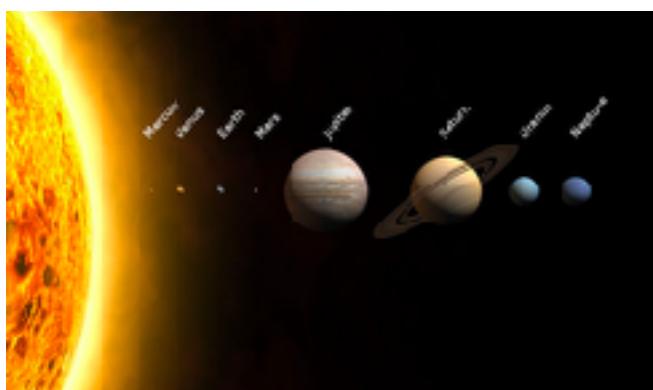
宇宙は、恒星や星間物質など電磁波で直接観測できる物質(通常の物質)のか、直接には観測できない構成要素(ダークマター、ダークエネルギー)からなると考えられている。(a)通常の物質は、水素とヘリウム、それ以外の重い元素から構成されている。

問1 上の文章中の下線部(a)に関連して、宇宙の元素について述べた文として最も適当なものを、次の①~④のうちから一つ選べ。

- ① 炭素、酸素の一部は、ビッグバンによりつくられた。
- ② 超新星爆発によって、鉄より重い元素がつくられた。
- ③ 種族Ⅱの星は、種族Ⅰの星にくらべて重い元素の割合が多い。
- ④ ヘリウムの大部分は、恒星内部の核融合によりつくられた。

宇宙の階層構造

太陽系



星団



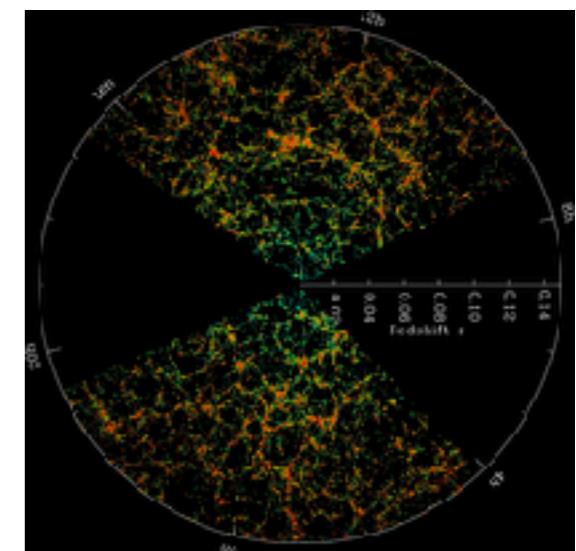
矮小銀河



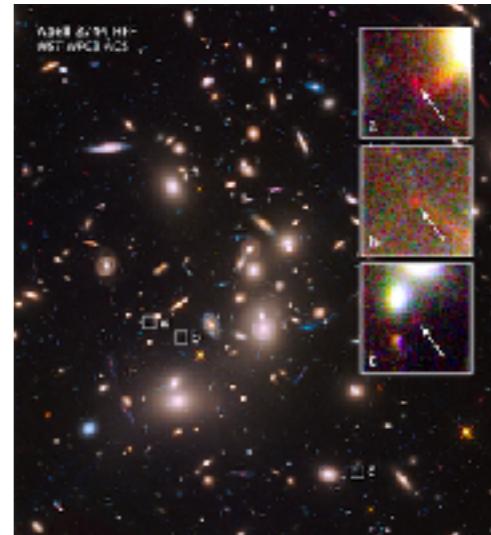
銀河群



大規模構造



銀河団



銀河



10^0

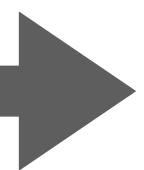
10^2

10^4

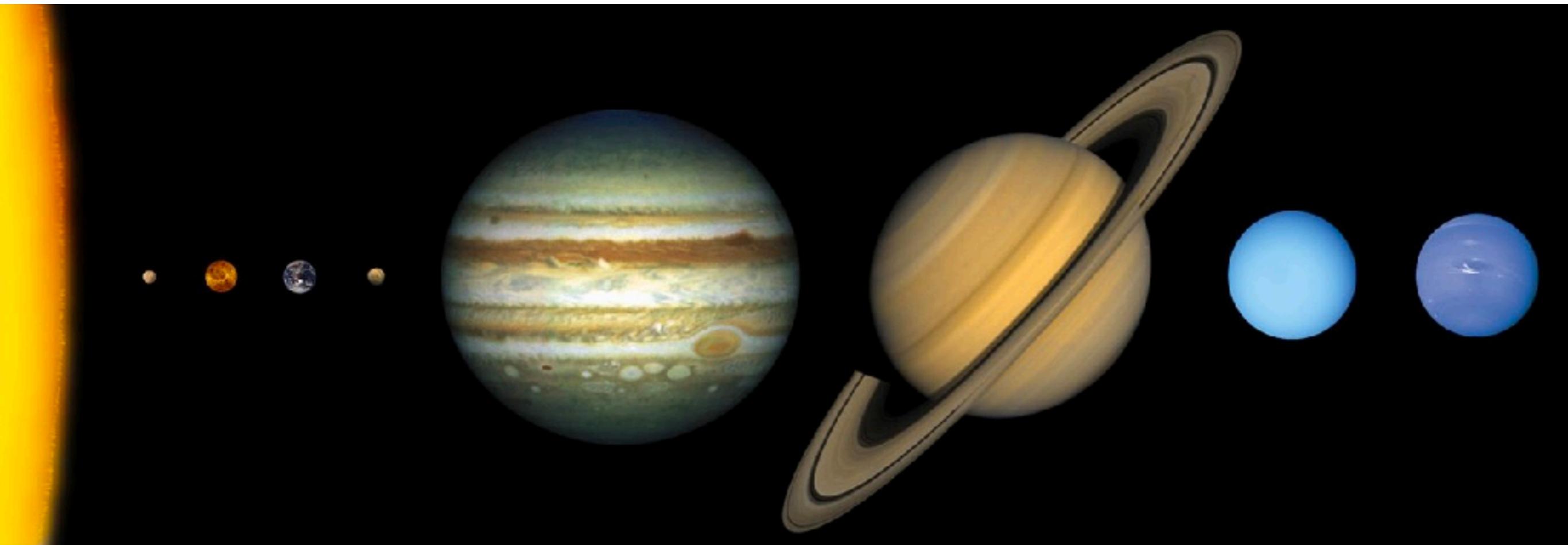
10^6

10^8

典型的な大きさ(parsec ~ 3光年)



太陽系



- 太陽、水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星
- 冥王星は準惑星

銀河

The Hubble Tuning Fork Diagram

Galaxy Morphological Classification

Ellipticals



Lenticulars



Spirals

Sa (Disk Gal)
Sb (Barred Disk Gal)

M104
M83
M106

Sc

Barred Spirals

SBa M85
SBB M109
SBC NGC1365

Irregulars - Peculiars



All images taken with the Faulkes Telescopes

College C.Perceret's astronomy workshop 2012
<http://col21-perceret.ac-dijon.fr/col-astro>



- 質量は $10^6\text{-}10^{12} M_{\odot}$
- 漶巻銀河は星形成活動を示す
 - 若い銀河
- 楕円銀河は星形成活動をあまりしていない
 - 古い銀河
- 銀河形態進化は課題の一つ

銀河団

- 明るい銀河を100個程度以上含む銀河の集団
 - 自己重力系として宇宙最大の構造
 - 矮小銀河まで含めると、1つの銀河団には典型的に千個以上の銀河
 - 質量の大部分はダークマター
 - 数千万度以上のプラズマガスを抱える



Abell 1656
Coma Cluster

Data: 2003/03/09 Exp. = 300sec B-band

2003/03/09 Exp. = 300sec V-band

2003/03/09 Exp. = 180sec R-band

Observers: M. Komori, H. Nakajima, T. Sameshima

Y. Sato (GS2003 members), H. Fujiwara, Y. Mori
(U-Tokyo), M. Yoneda (Tohoku Univ.)

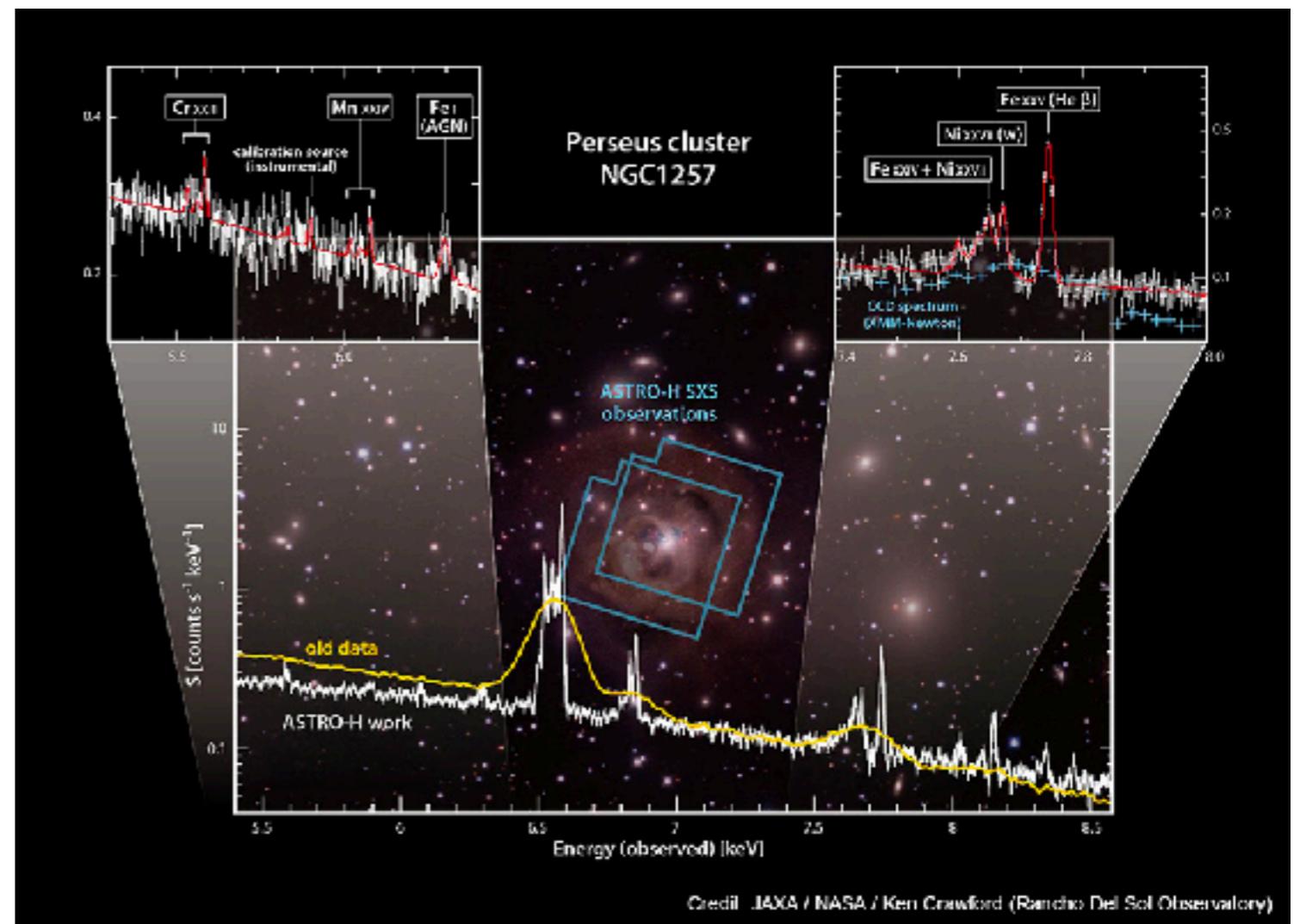
S. Nishiura (Kiso)

Kiso Observatory
The University of Tokyo



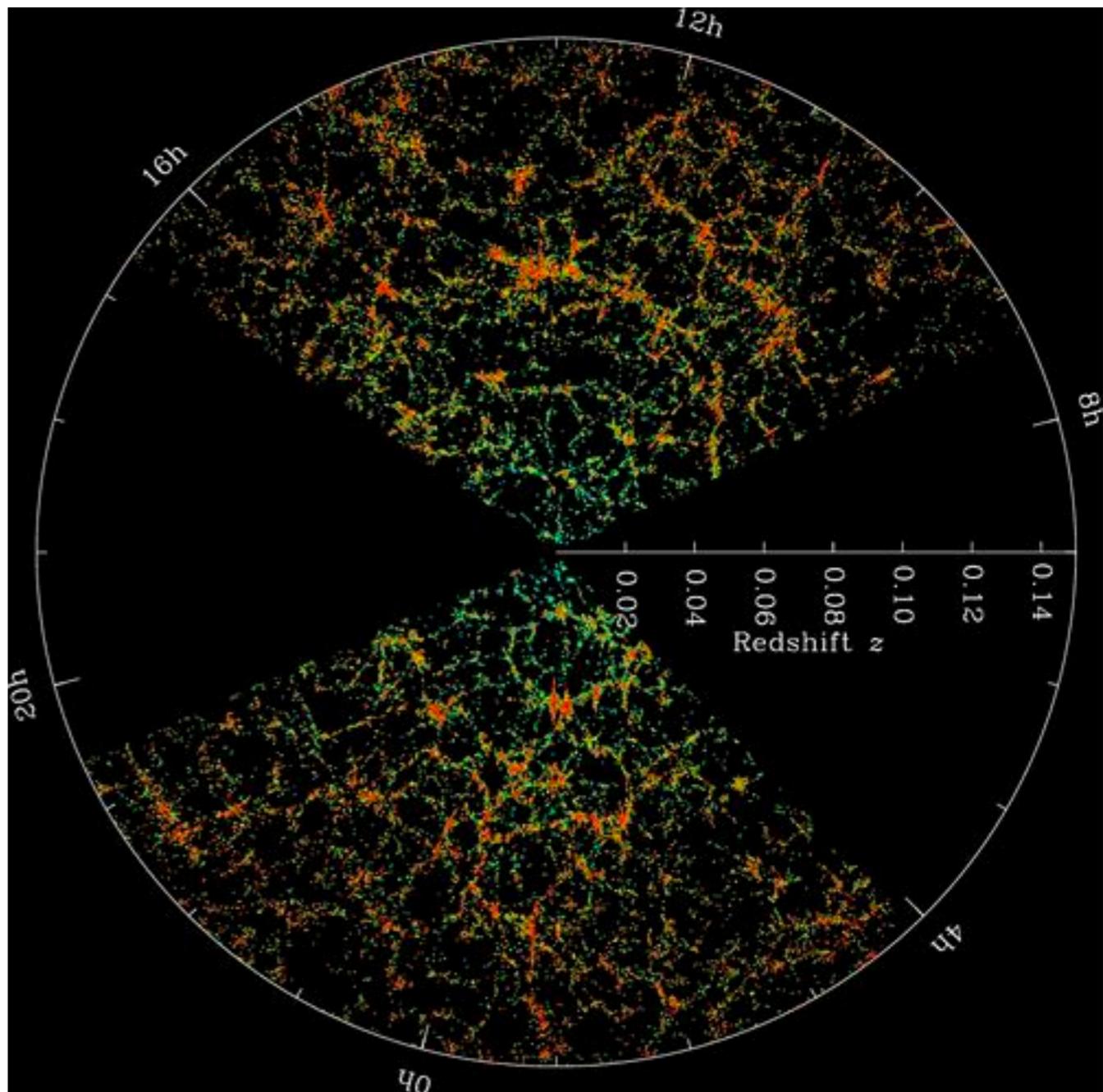
ひとみ衛星による銀河団観測

- JAXA ひとみX線衛星で銀河団をこれまでにない分光精度で観測
 - 予想以上に静かな環境
 - 銀河団も太陽も同じ化学組成



大規模構造

- 銀河密度の高い部分：フィラメント
- 銀河密度の低い部分：ボイド
- 一つのボイドの大きさは数10メガパーセク（数10 Mpc=1億光年）にも及ぶ。
- 微小な量子ゆらぎが、インフレーションによって空間的に何十桁も拡大し、その後の時間経過と共に大規模構造に成長

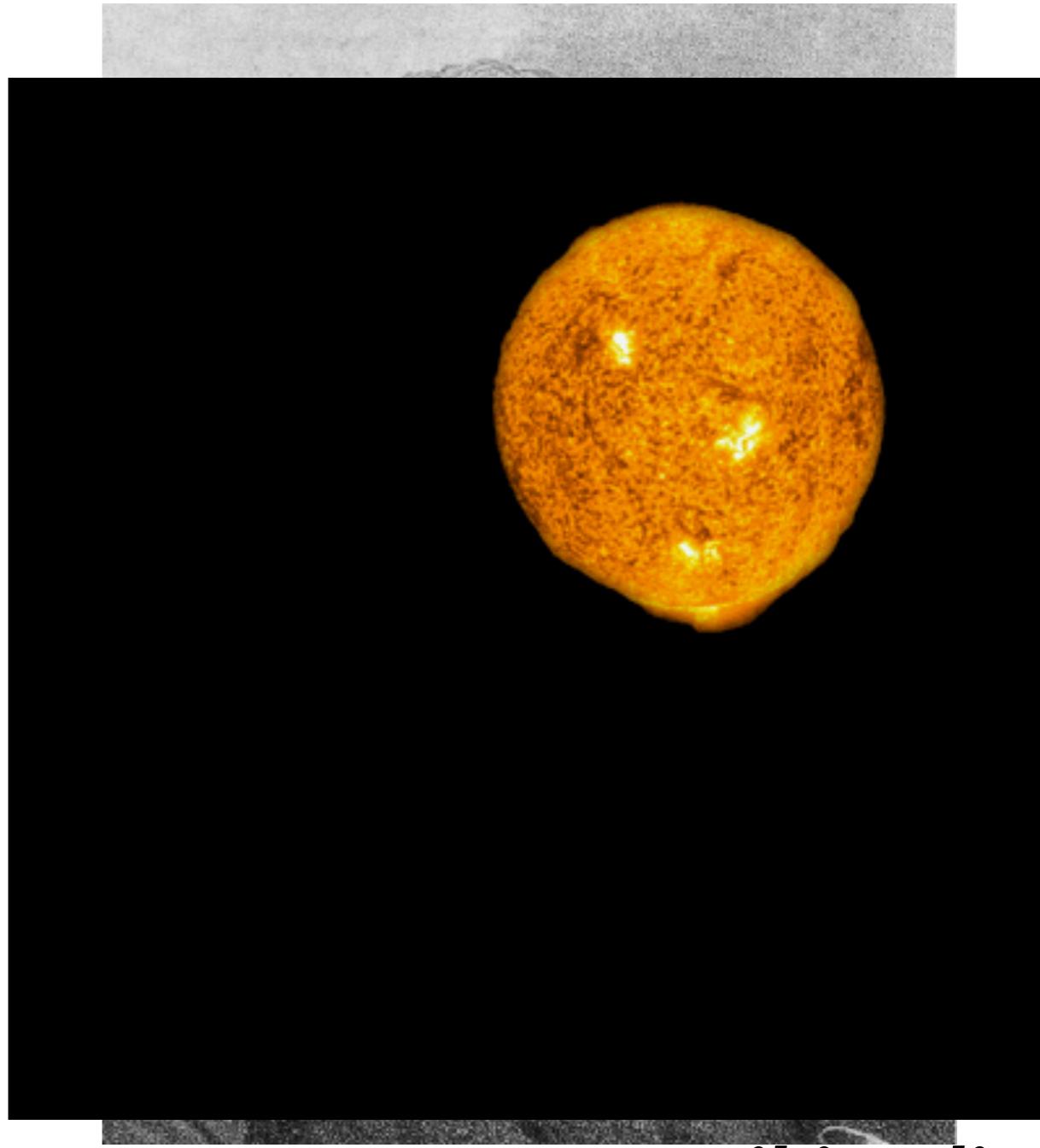


宇宙の構造形成シミュレーション

<http://www.illustris-project.org/media/>

オルバースのパラドックス

- オルバース (1758-1840)
- なぜ夜空は暗い？
 - 宇宙が無限に広がり、無限に星があれば、空は太陽と同程度に明るいはず
 - 太陽の明るさ L (erg/s)
 - 距離 d (cm)
 - サイズ r (cm)
 - 単位立体角あたりの明るさは？

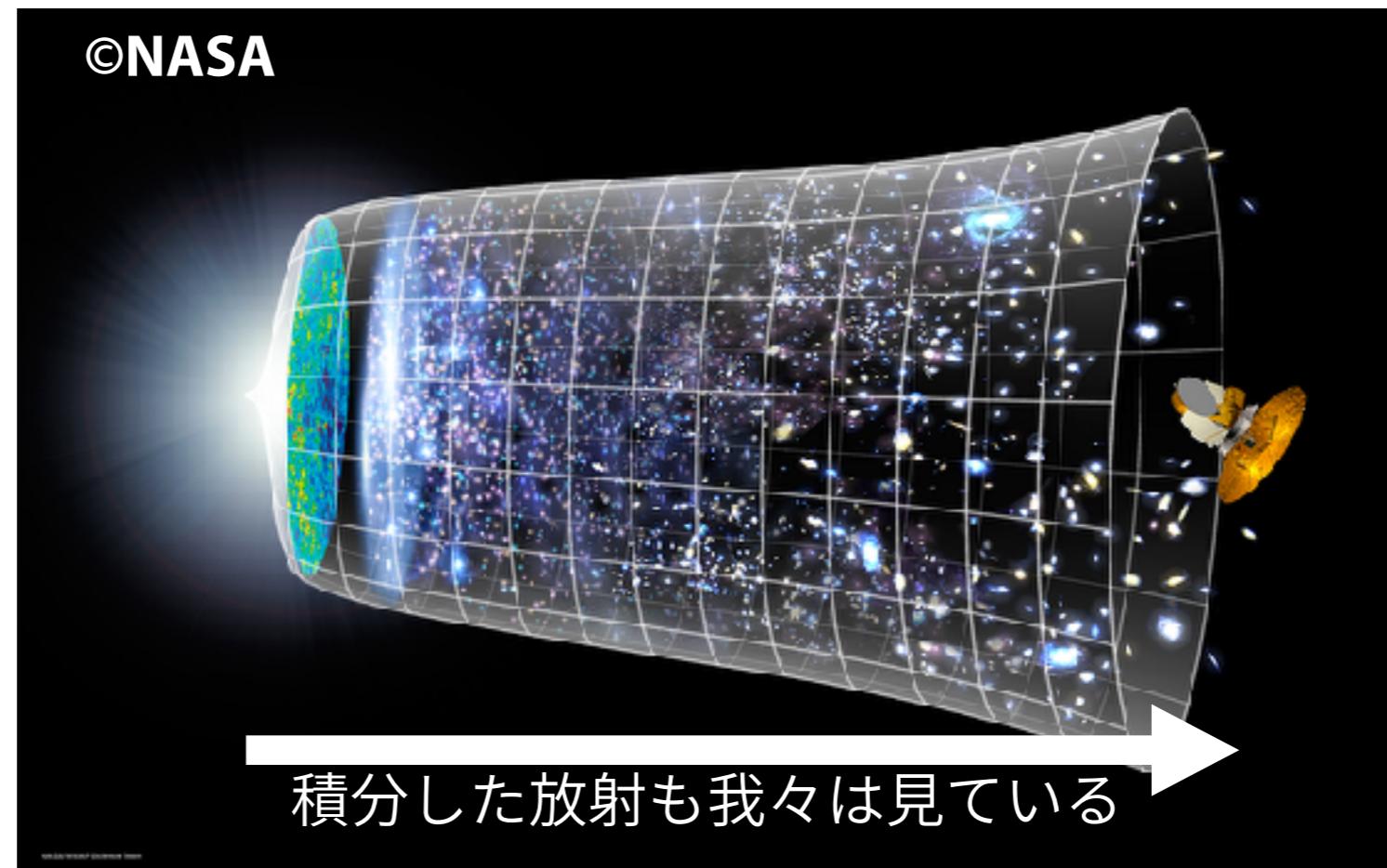


本当に夜空は暗い？

- No.
- 宇宙はほぼ等方に微弱な放射で満ちている
 - 宇宙背景放射

宇宙背景放射：宇宙を紐解く鍵

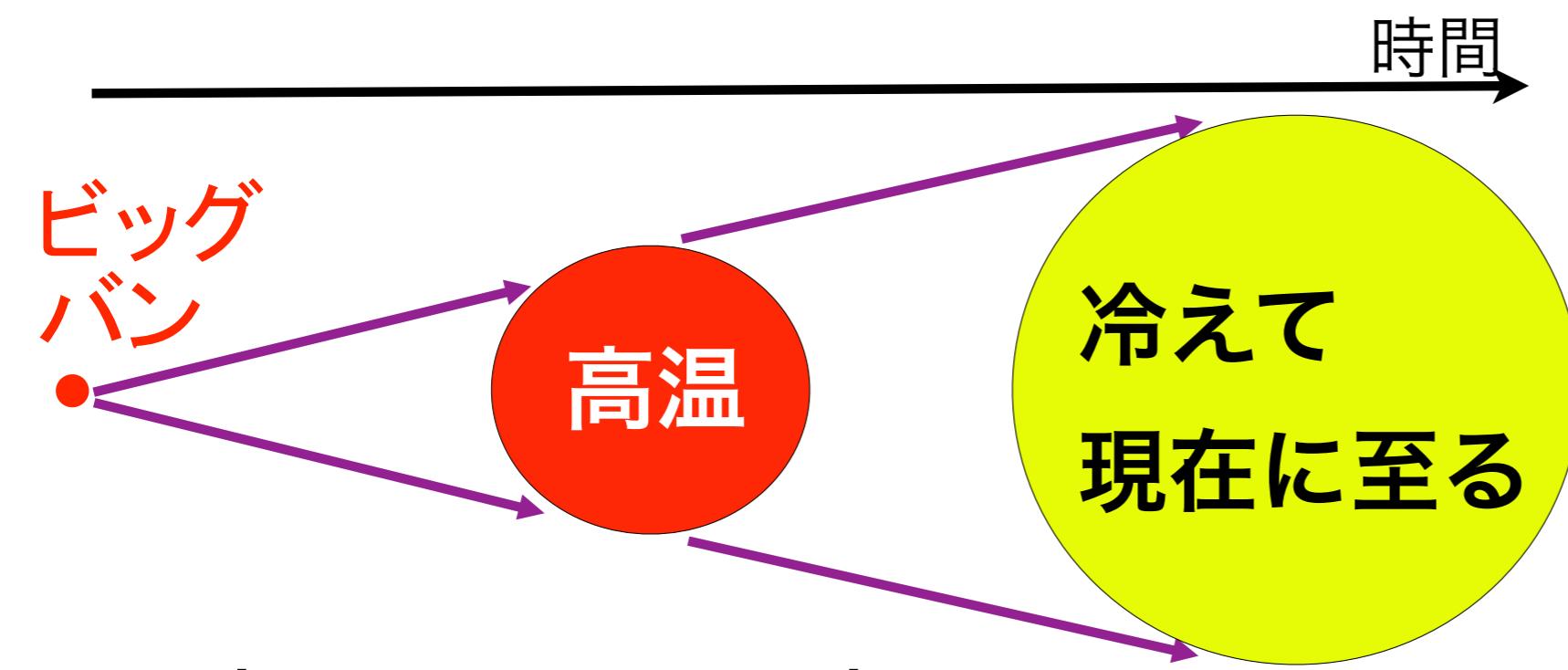
宇宙の歴史



- ほぼ等方な放射 = 宇宙背景放射が存在
 - 宇宙背景放射とは宇宙開闢から現在までの宇宙史の積分
 - 宇宙背景放射が宇宙・天体の進化史を紐解く鍵

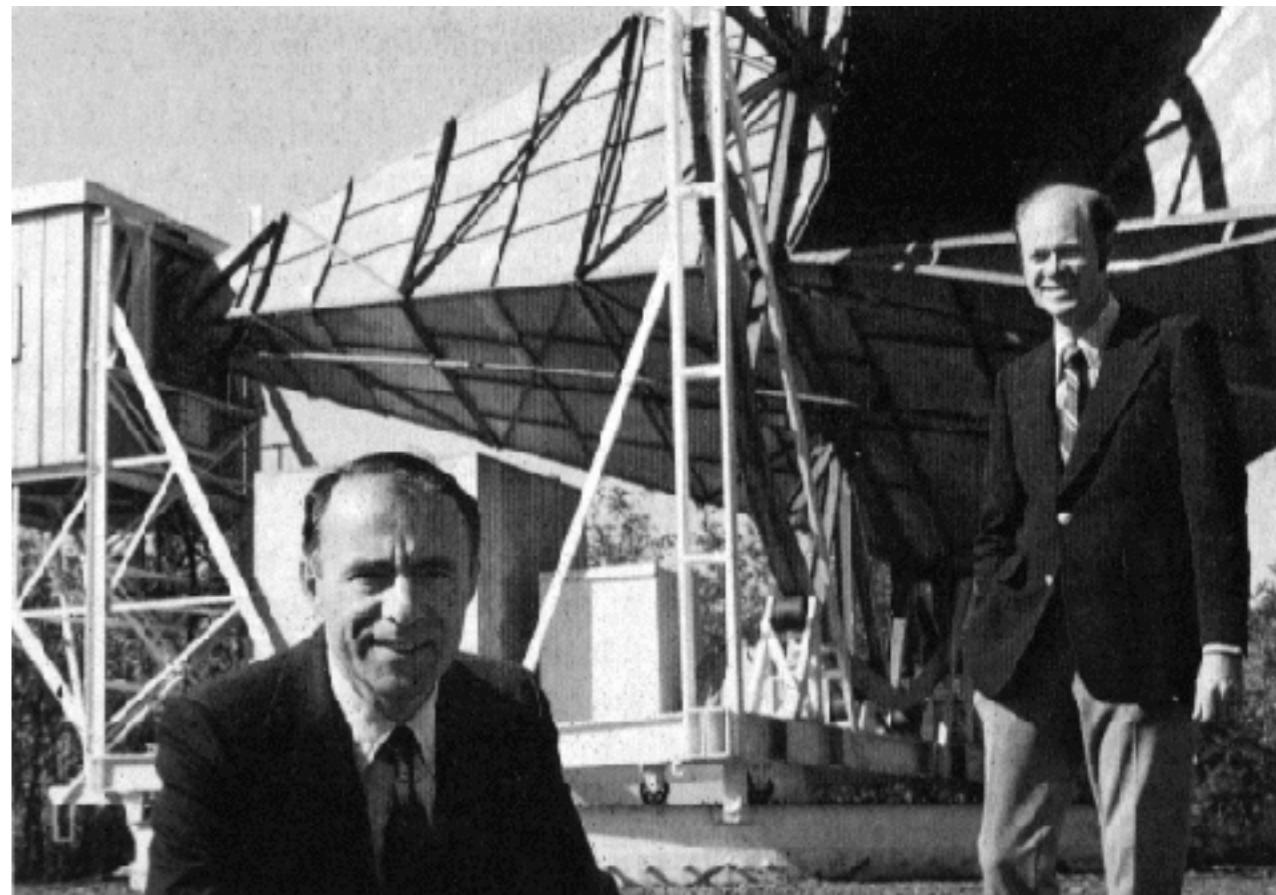
Gamov 火の玉宇宙

- 宇宙膨張→過去は高温高圧
 - original: ルメトール 1927
 - 熱い宇宙の痕跡：宇宙背景放射
 - 予想は 5 K (-268°C)



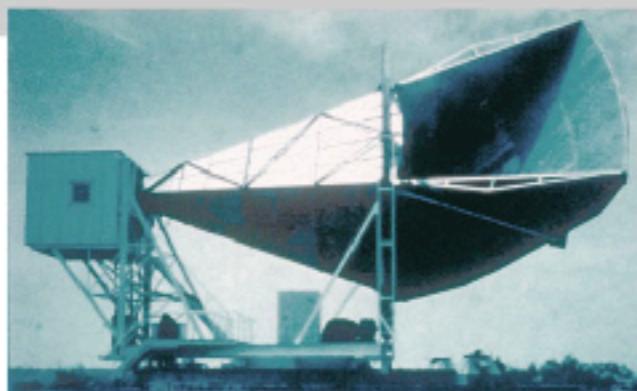
宇宙マイクロ波背景放射

- 1964年 ペンジアスとウィルソンが3Kの等方な放射発見
 - 1978年 ノーベル賞
- もともとは電波アンテナの高感度化が目的
- 説明の付かないノイズ
 - 宇宙マイクロ波背景放射
- 鳩の糞もノイズ源の候補だったらしい

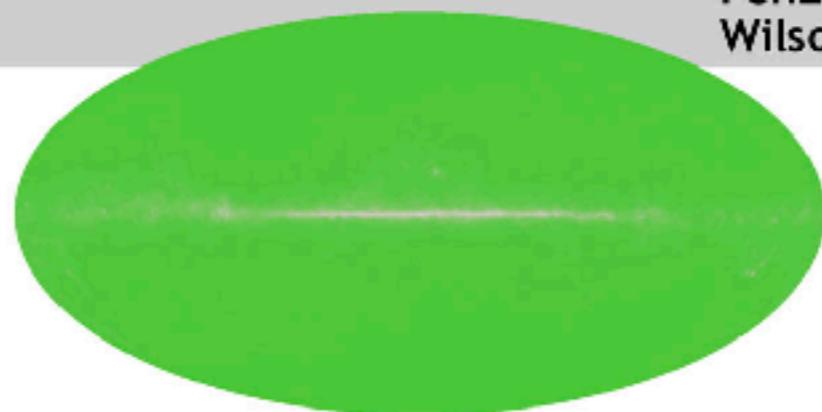


宇宙マイクロ波背景放射の観測

1965



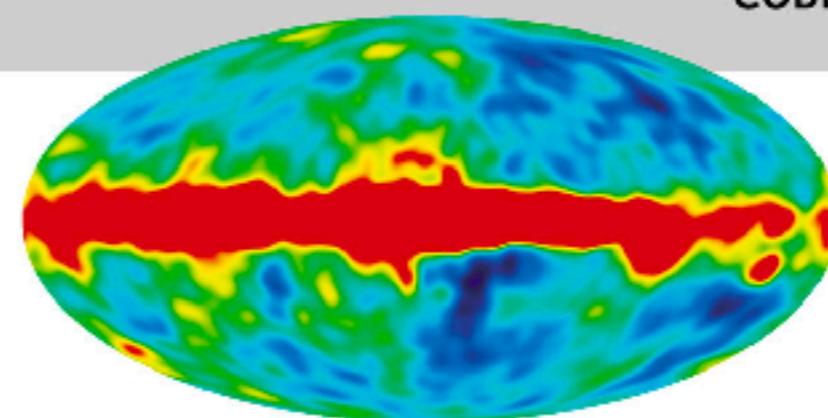
Penzias and Wilson



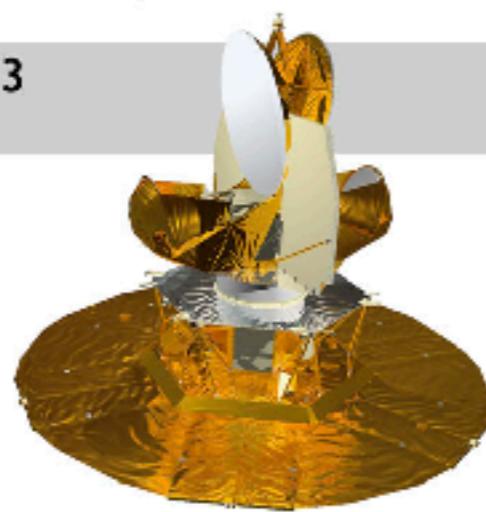
1992



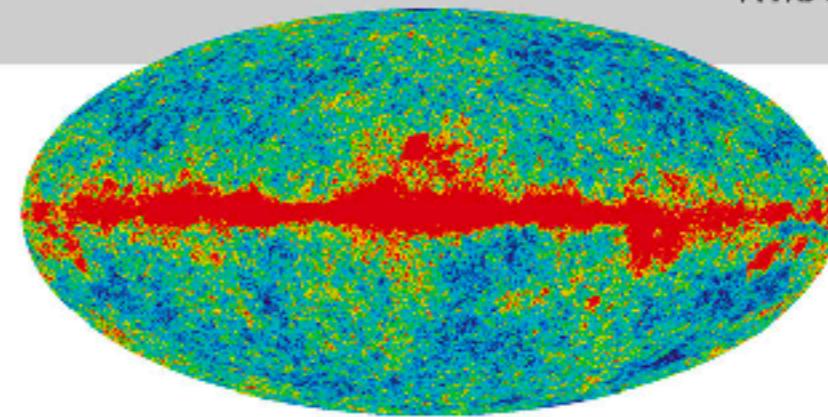
COBE



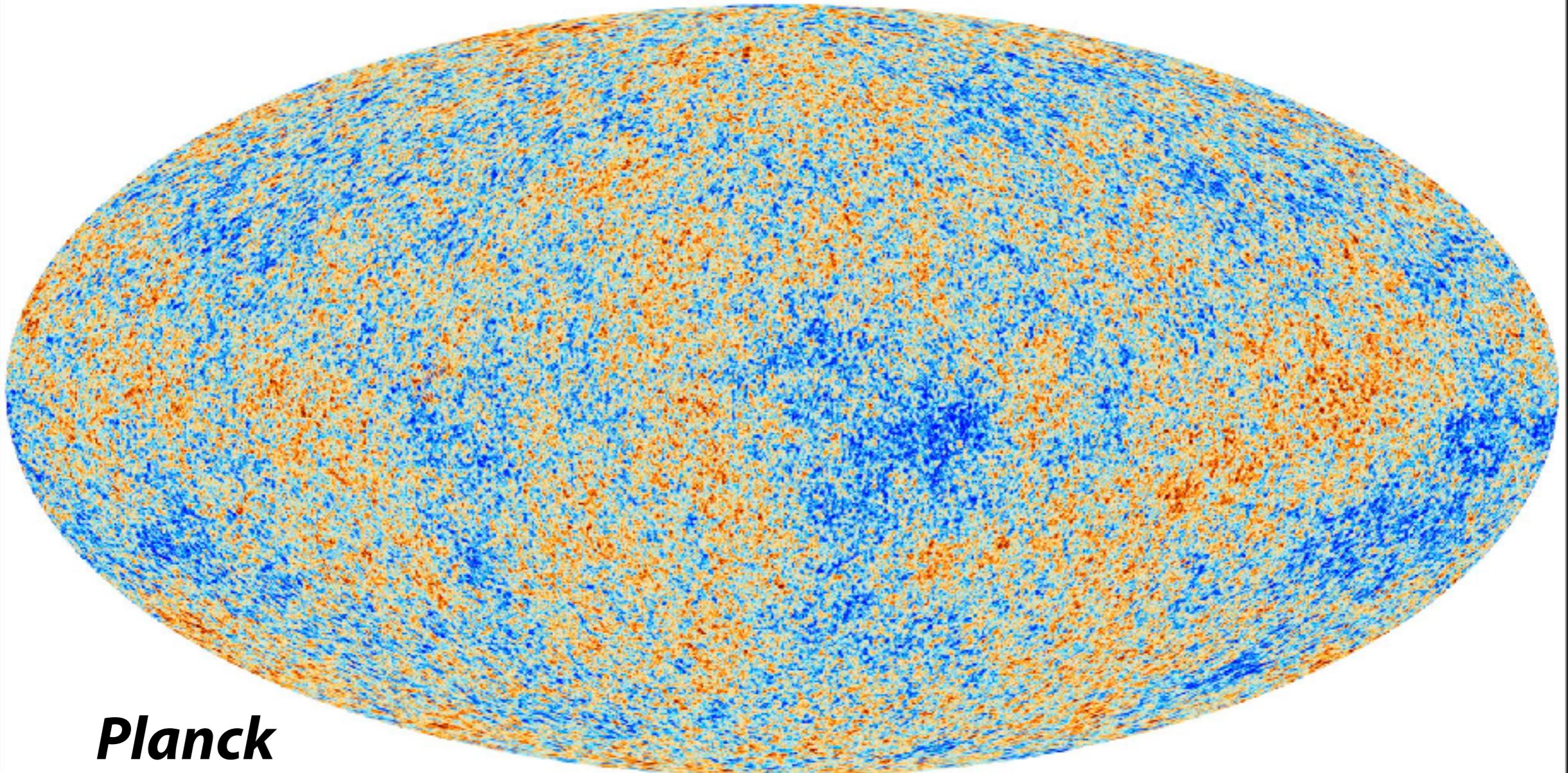
2003



WMAP



最新の観測

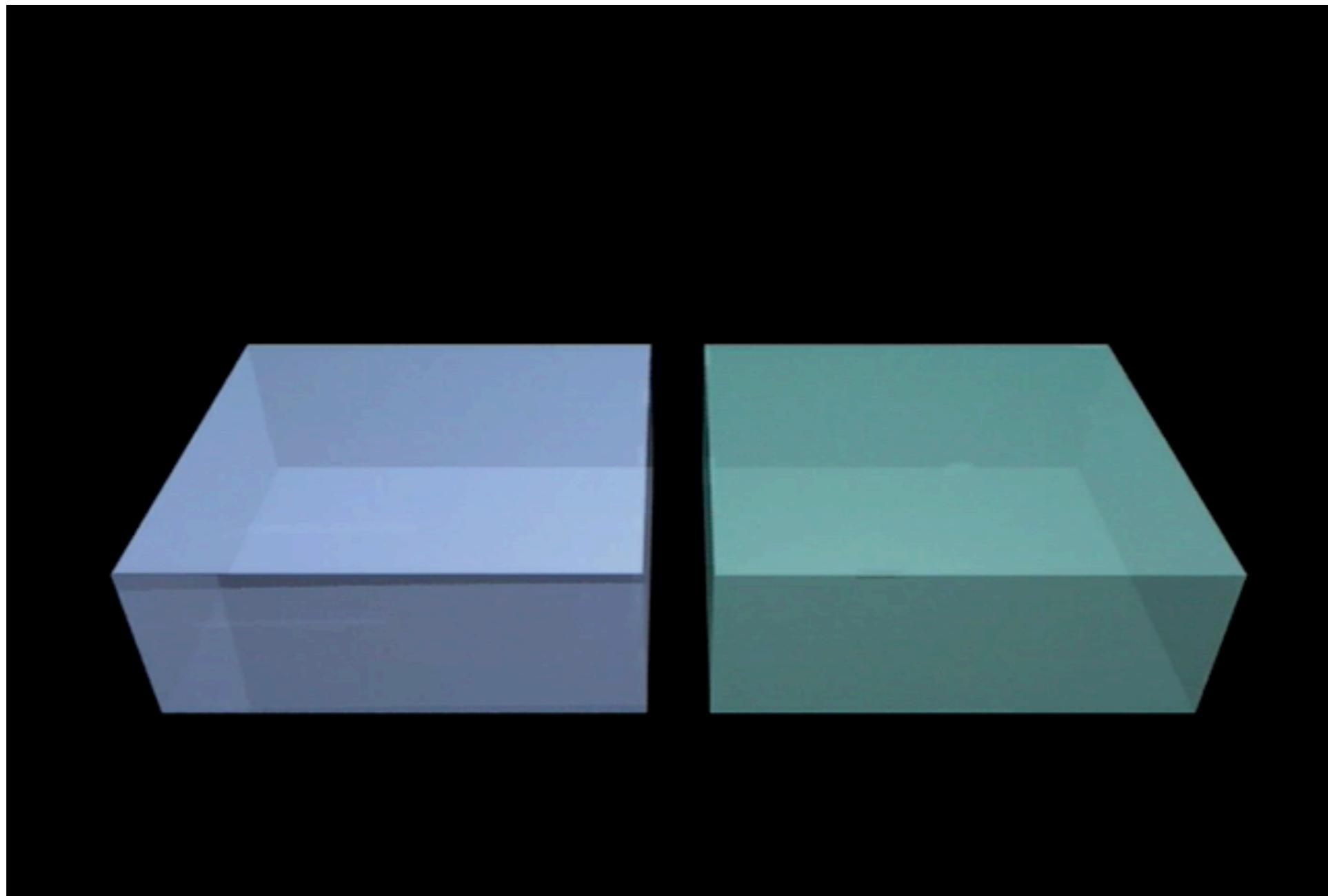


The Planck one-year all-sky survey

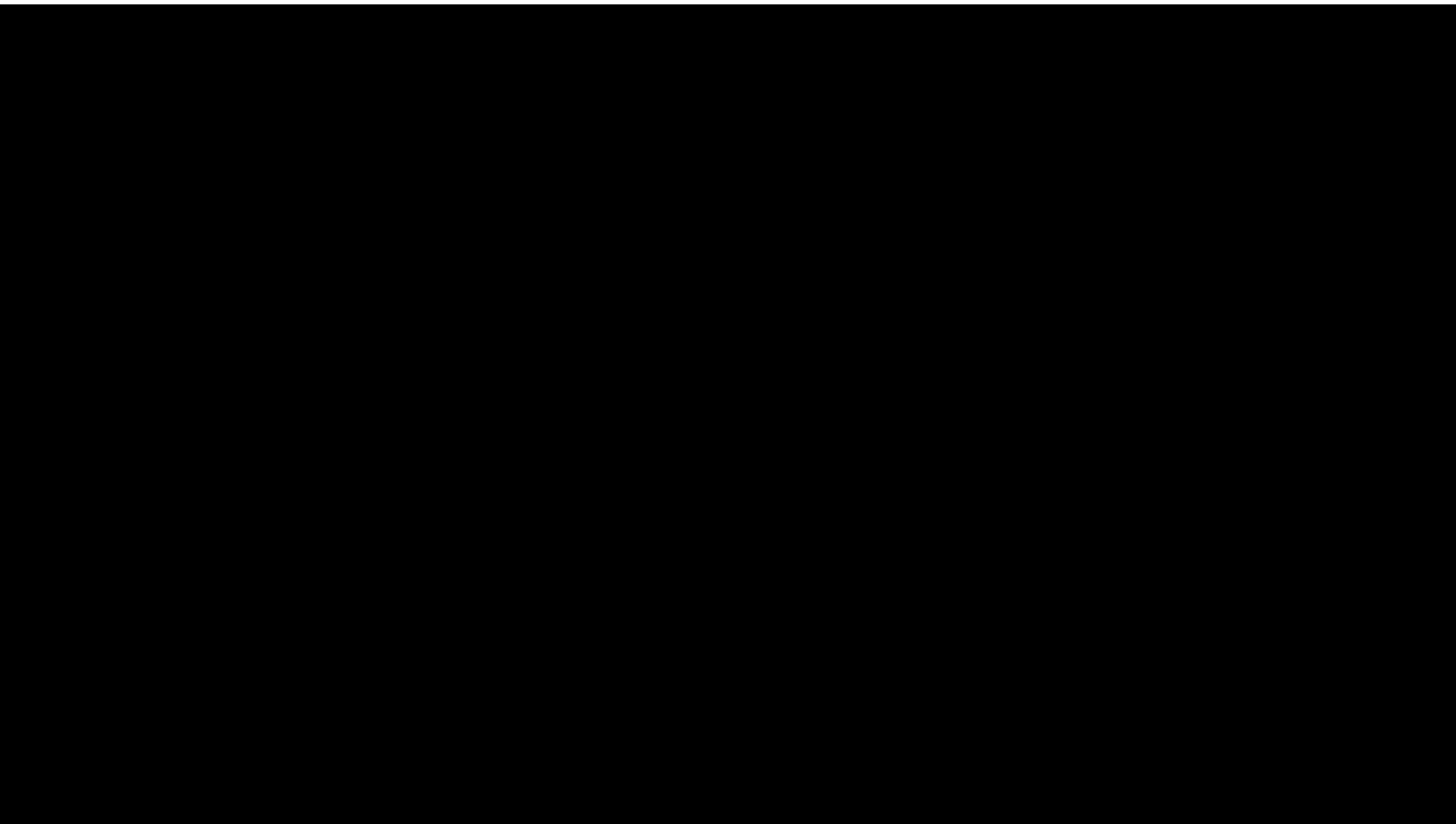


[c] ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

宇宙背景放射の揺らぎ

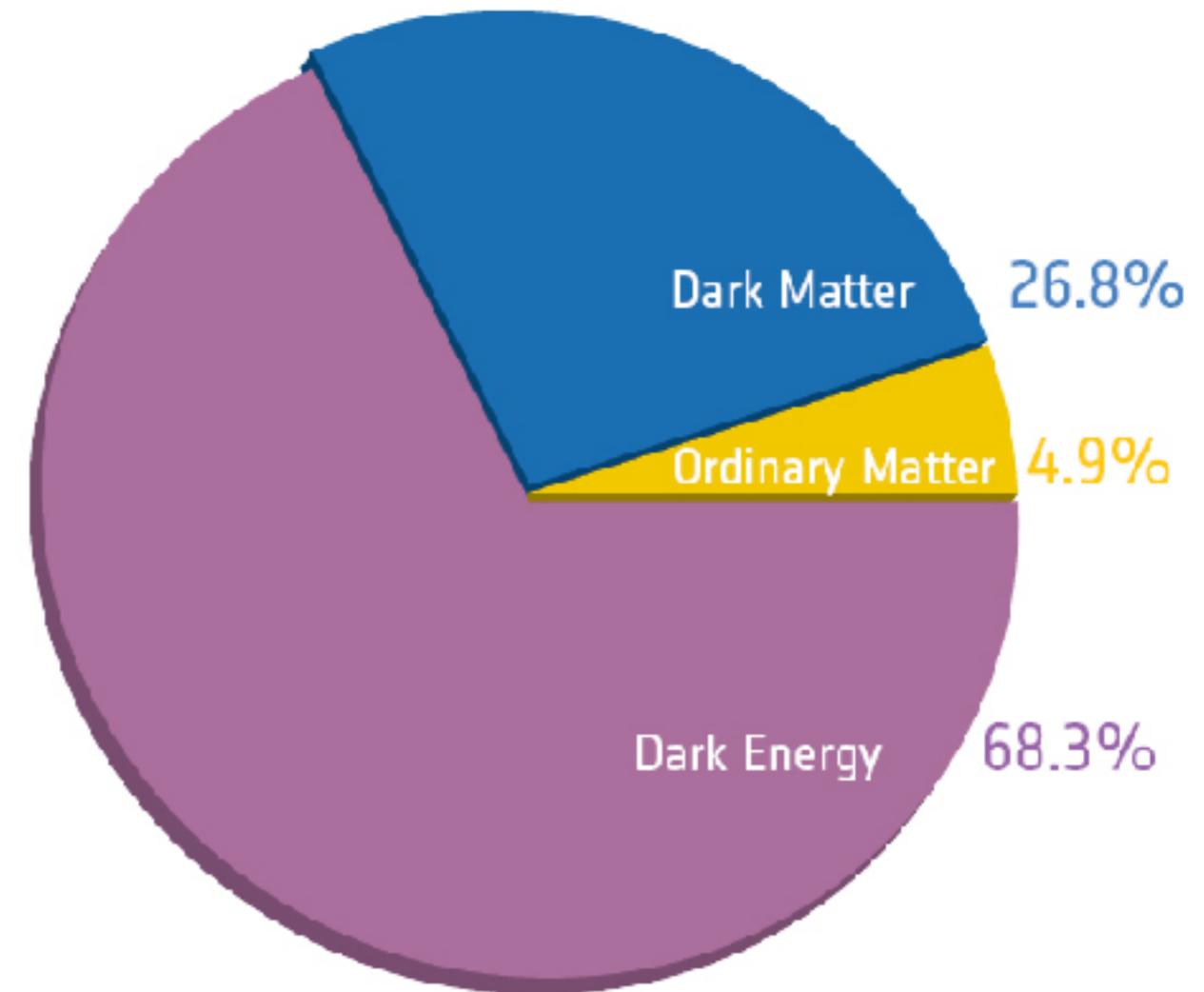


宇宙背景放射の揺らぎ



宇宙の構成要素

- 通常の物質：4.9 %
- 暗黒物質：26.8%
- 暗黒エネルギー：68.3%

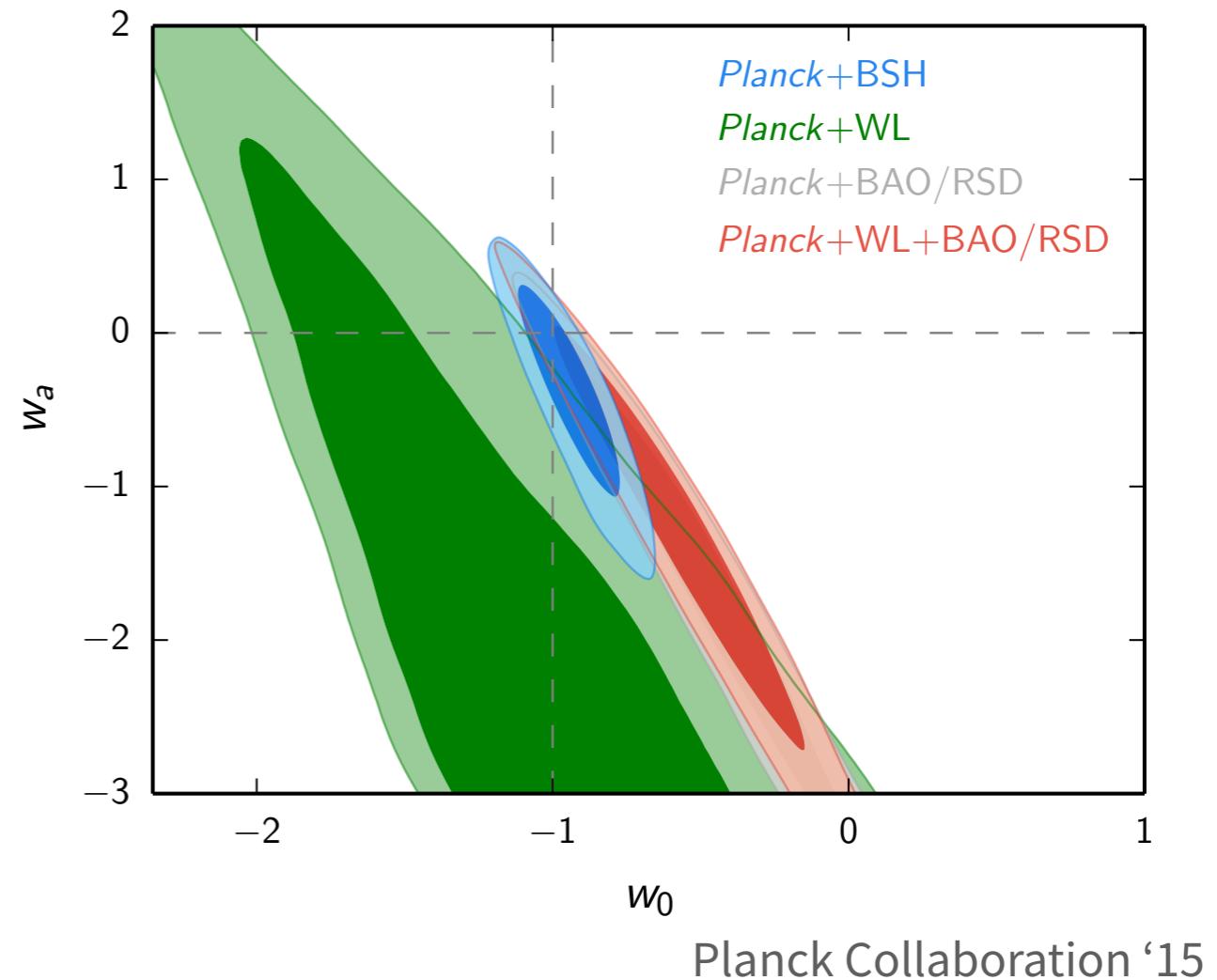


ダークエネルギー

- 現在の宇宙のエネルギーの~70%を占める
- 正体不明。現代物理学最大の課題の一つ。
- 宇宙に実行的に斥力を及ぼす⇒加速膨張の原因
- 状態方程式(圧力と密度の関係)
 - $p = w \rho$
 - 加速膨張のためには $w < -1/3$

ダークエネルギーの状態方程式

- w が一定の場合
 - $w = -1.006 \pm 0.045$
Planck Collaboration '15
- $w = w_0 + (1-a) w_a$
 - 今のところ、時間進化しているかは謎

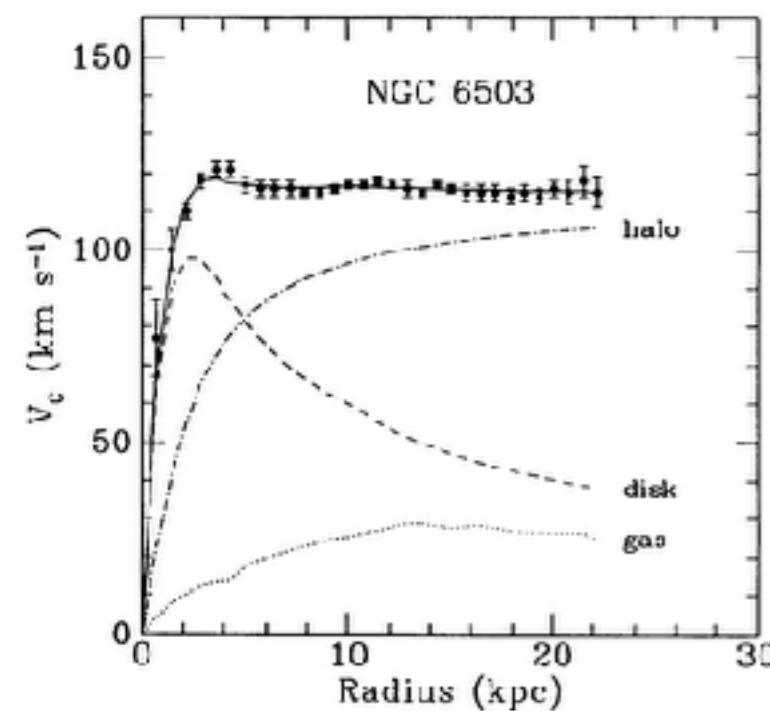


暗黒物質

- 現在の宇宙のエネルギーの25%程度を占める
- 正体不明。現代物理学最大の課題の一つ。
- 質量を持つ ⇒ 重力で相互作用
- 電磁波では観測できない
 - 物質とは重力以外、ほとんど相互作用しない

暗黒物質の証拠

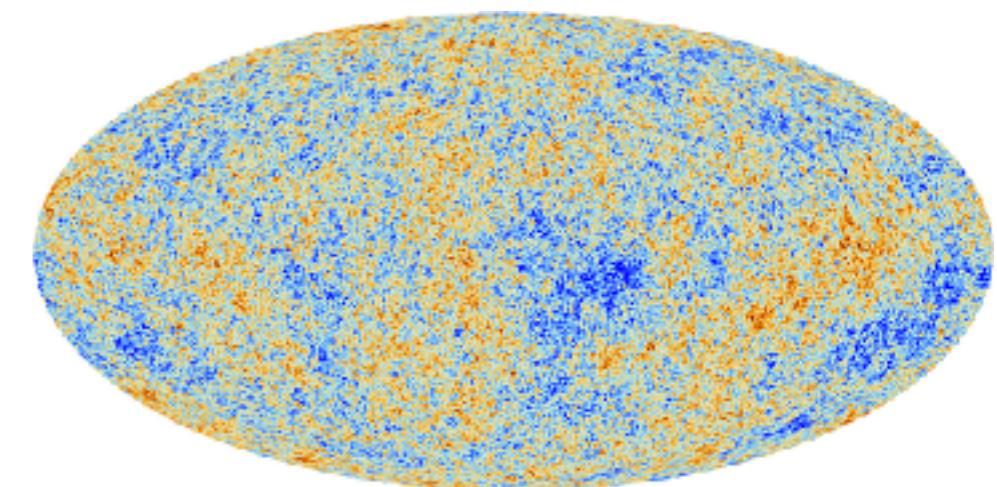
銀河の回転曲線



銀河団衝突

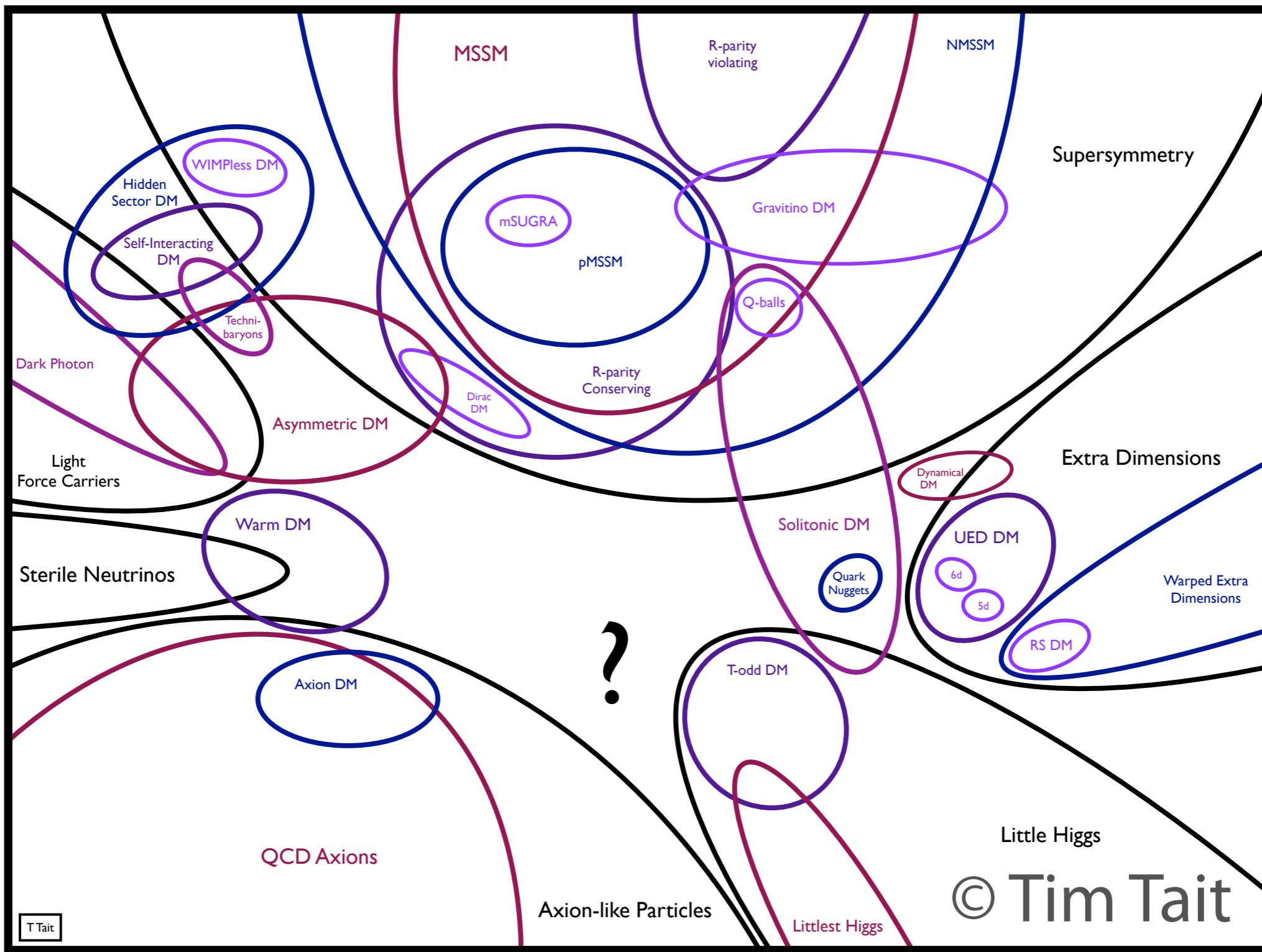


宇宙マイクロ波背景放射

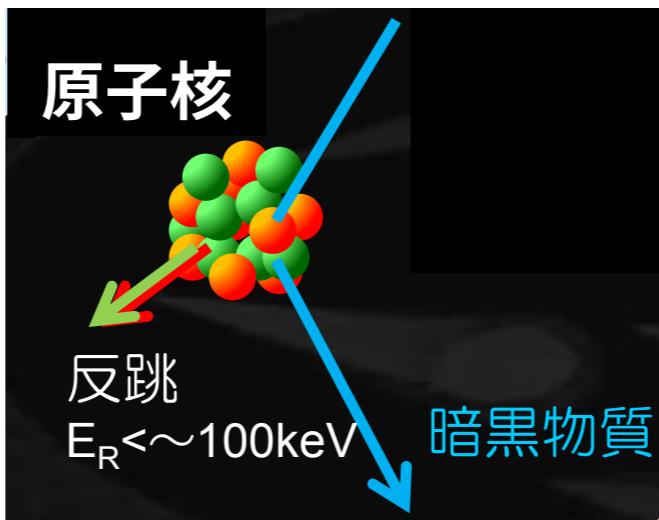


- ・様々なスケールで暗黒物質の存在が示唆される
- ・理論的にも暗黒物質なしには宇宙の構造形成は再現できない

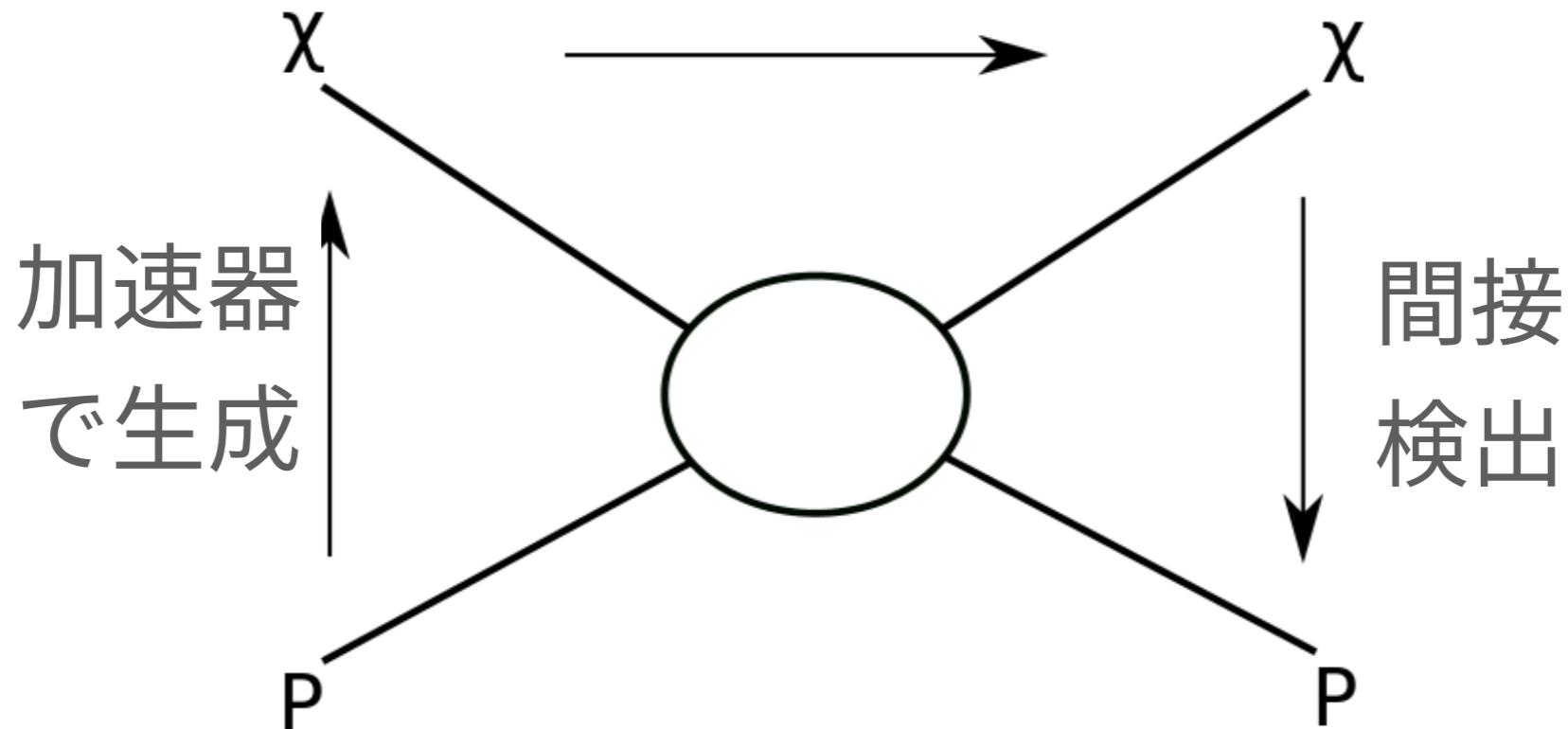
素粒子物理からの暗黒物質候補



暗黒物質の探査

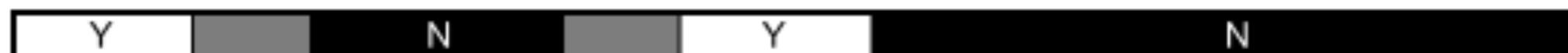


直接検出



光

地球の大気を
透過できるか?



電磁波の種類
波長(m)

電波 10^3 マイクロ波 10^{-2} 赤外線 10^{-5} 可視光 0.5×10^{-6} 紫外線 10^{-8} X線 10^{-10} ガンマ線 10^{-12}

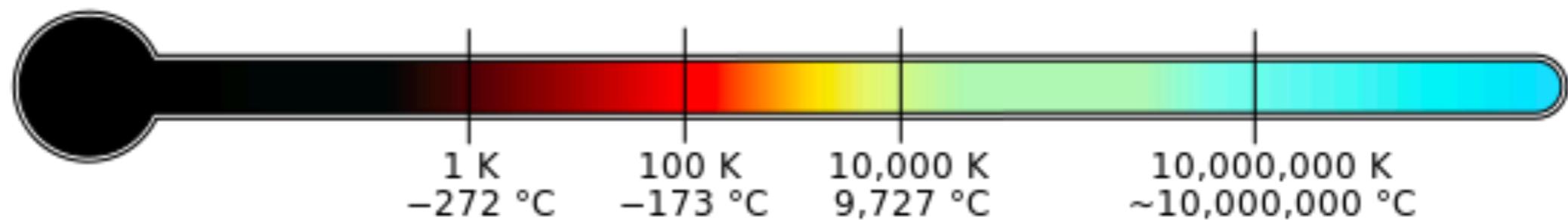
波長の
おおよその大きさ



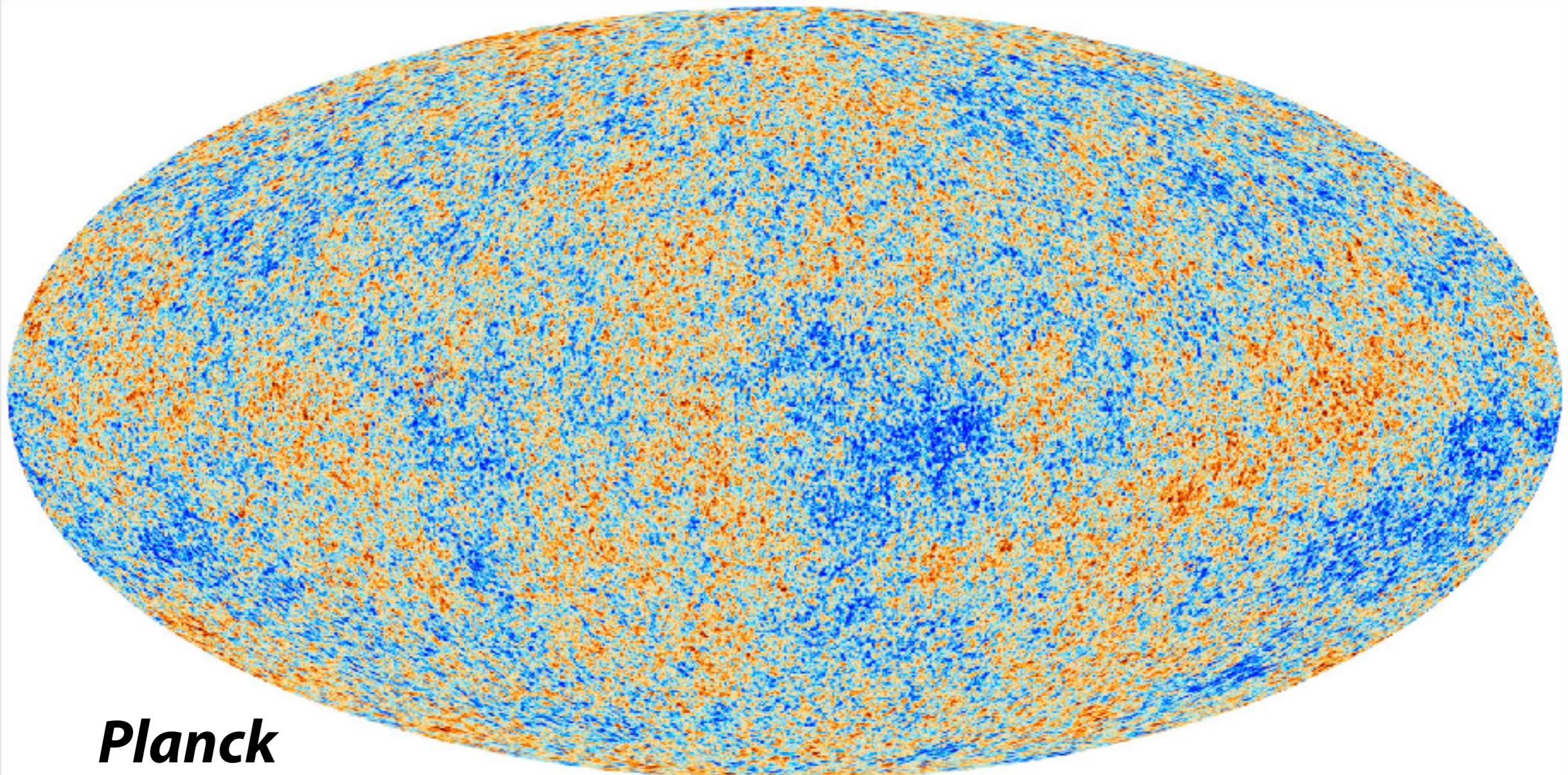
周波数 (Hz)



その波長の光を
強く発している
物体の温度



マイクロ波で見た空



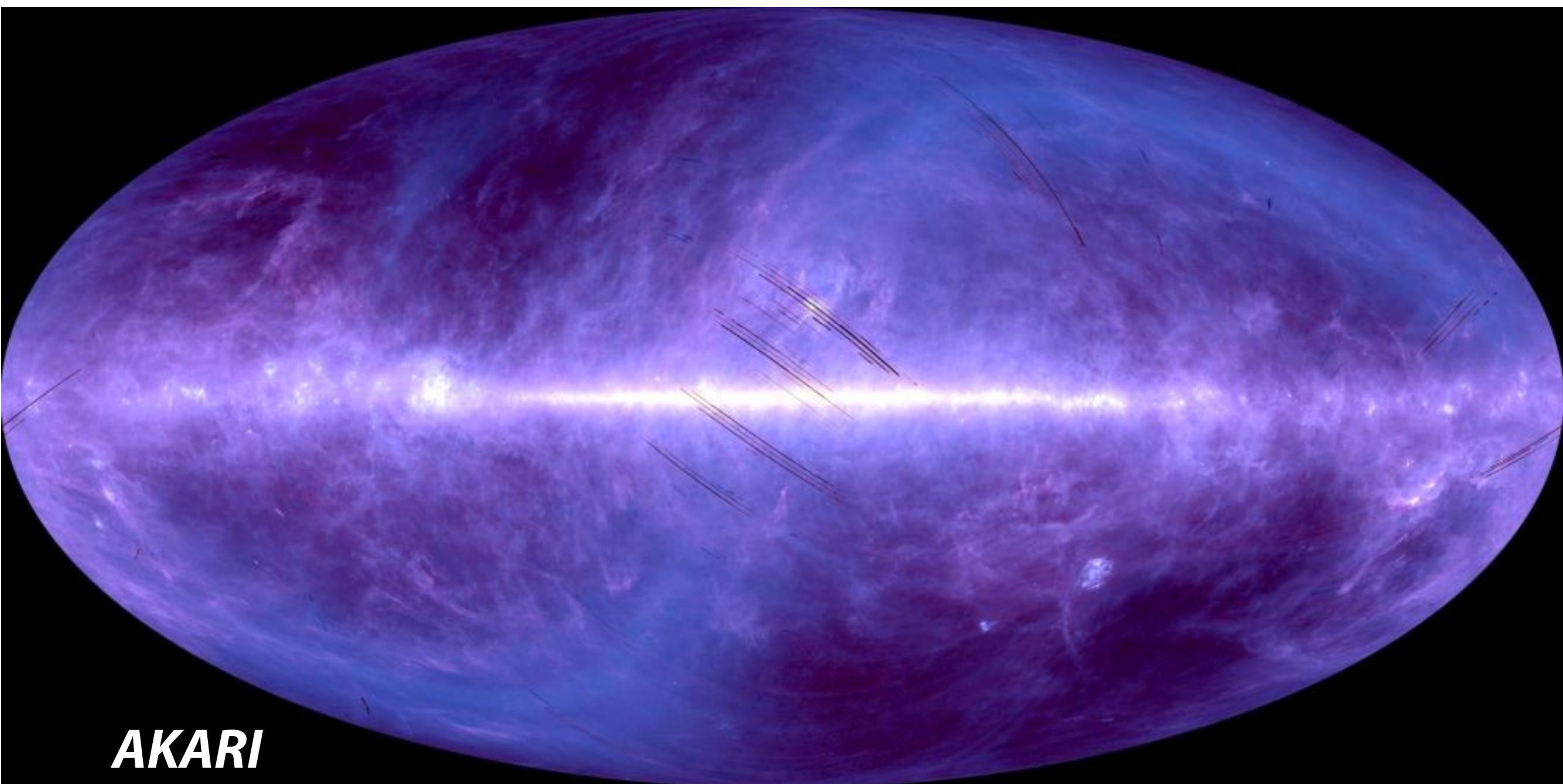
Planck

The Planck one-year all-sky survey



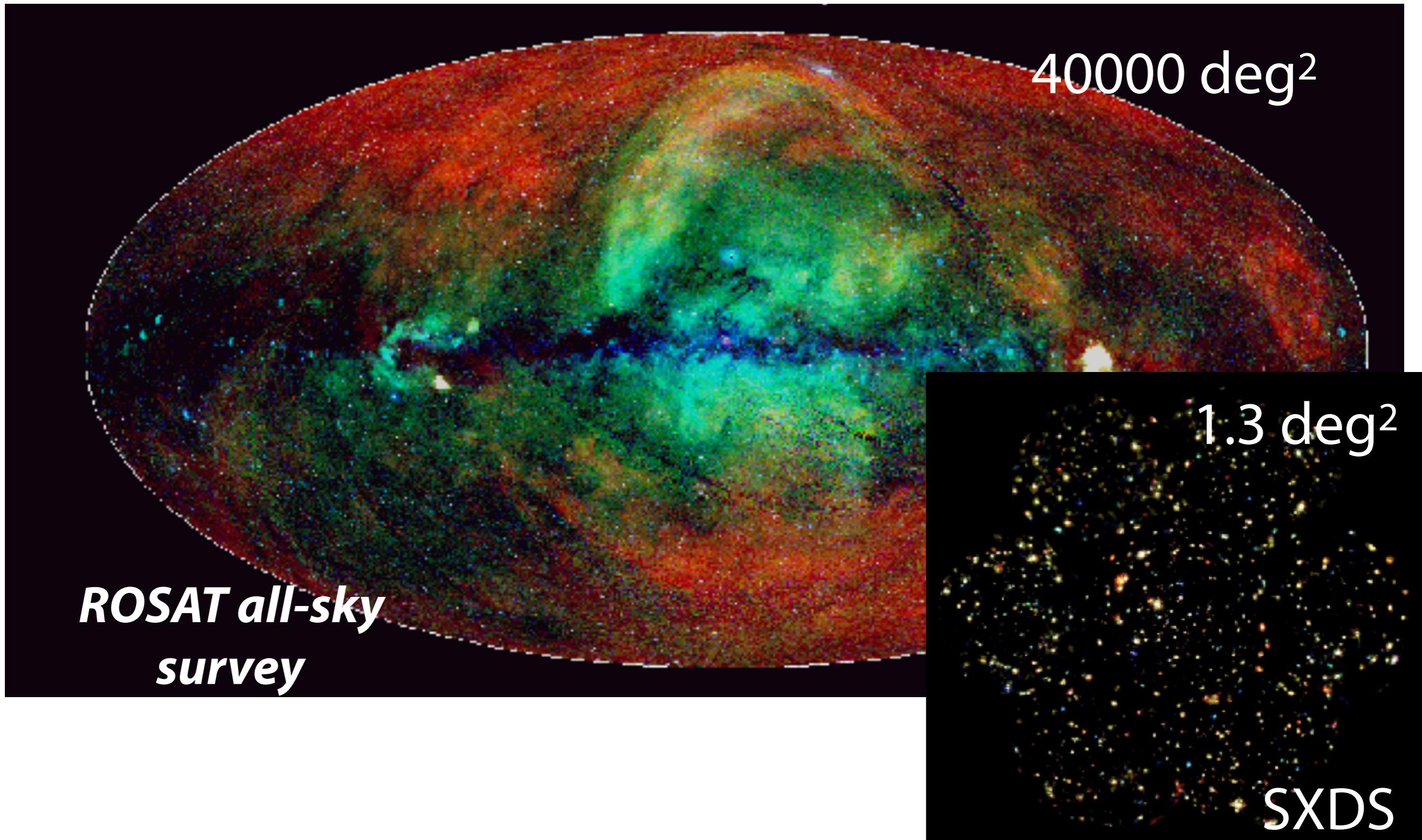
[c] ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

赤外線で見た空

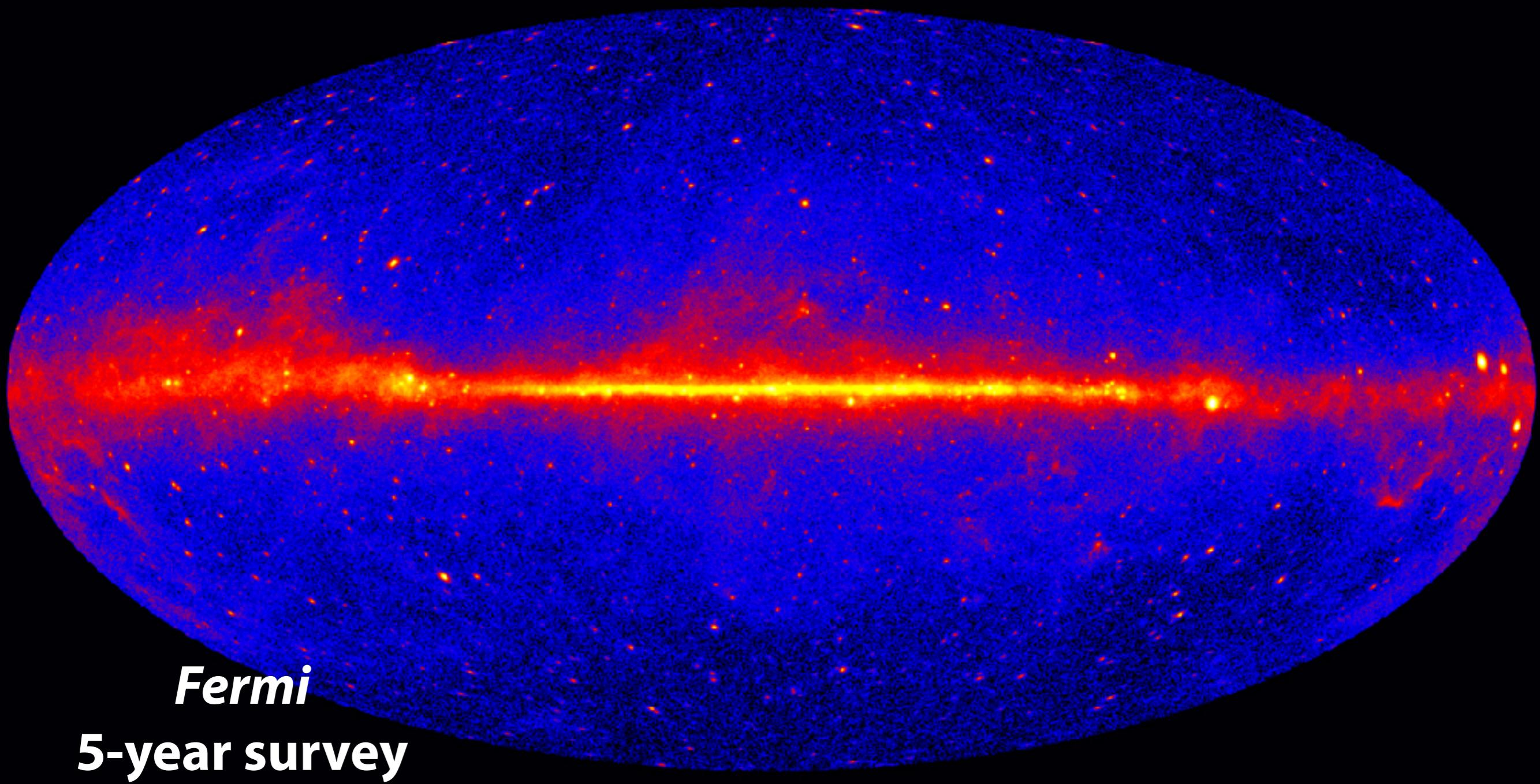


AKARI

X線で見た空

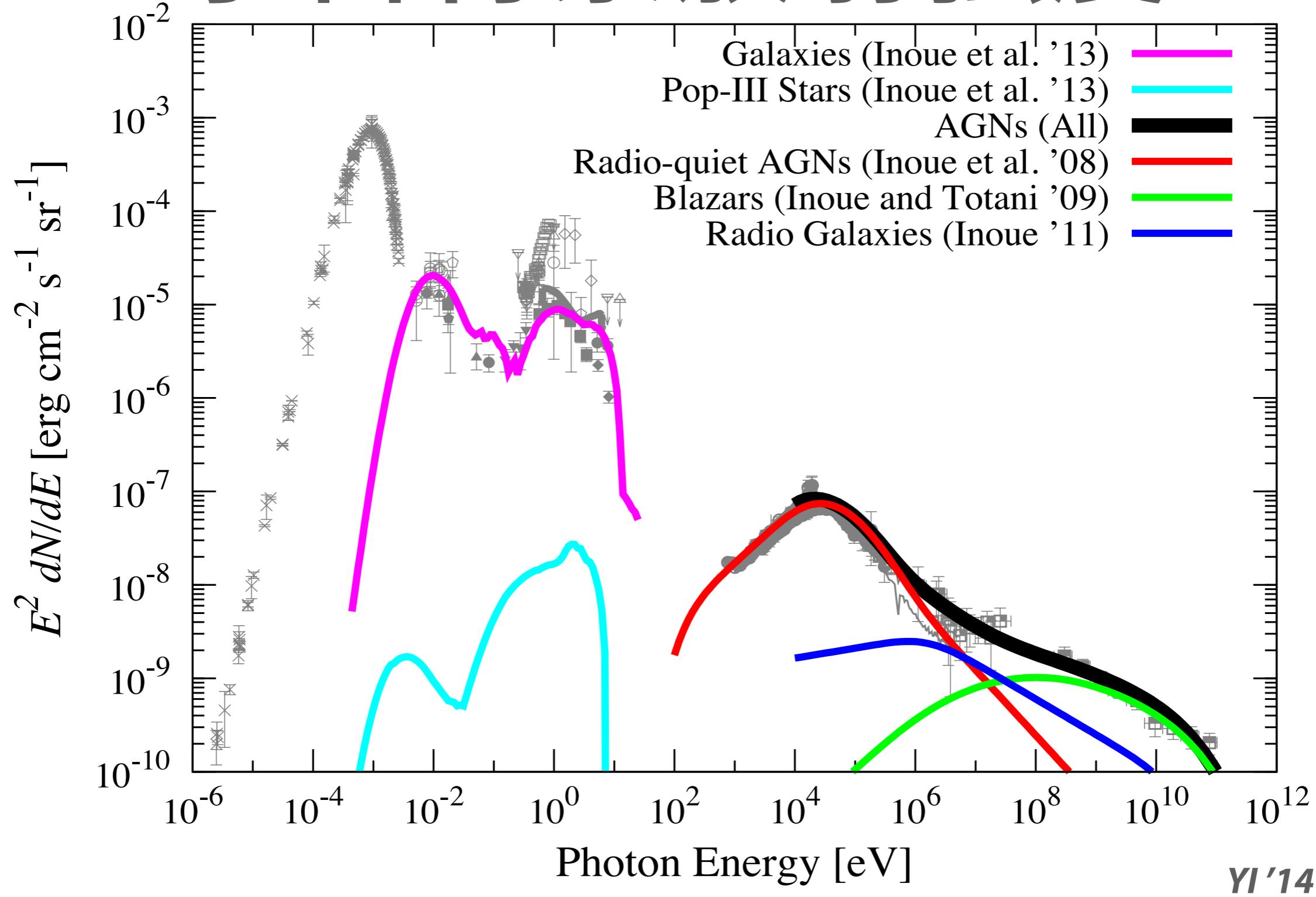


ガンマ線で見た空

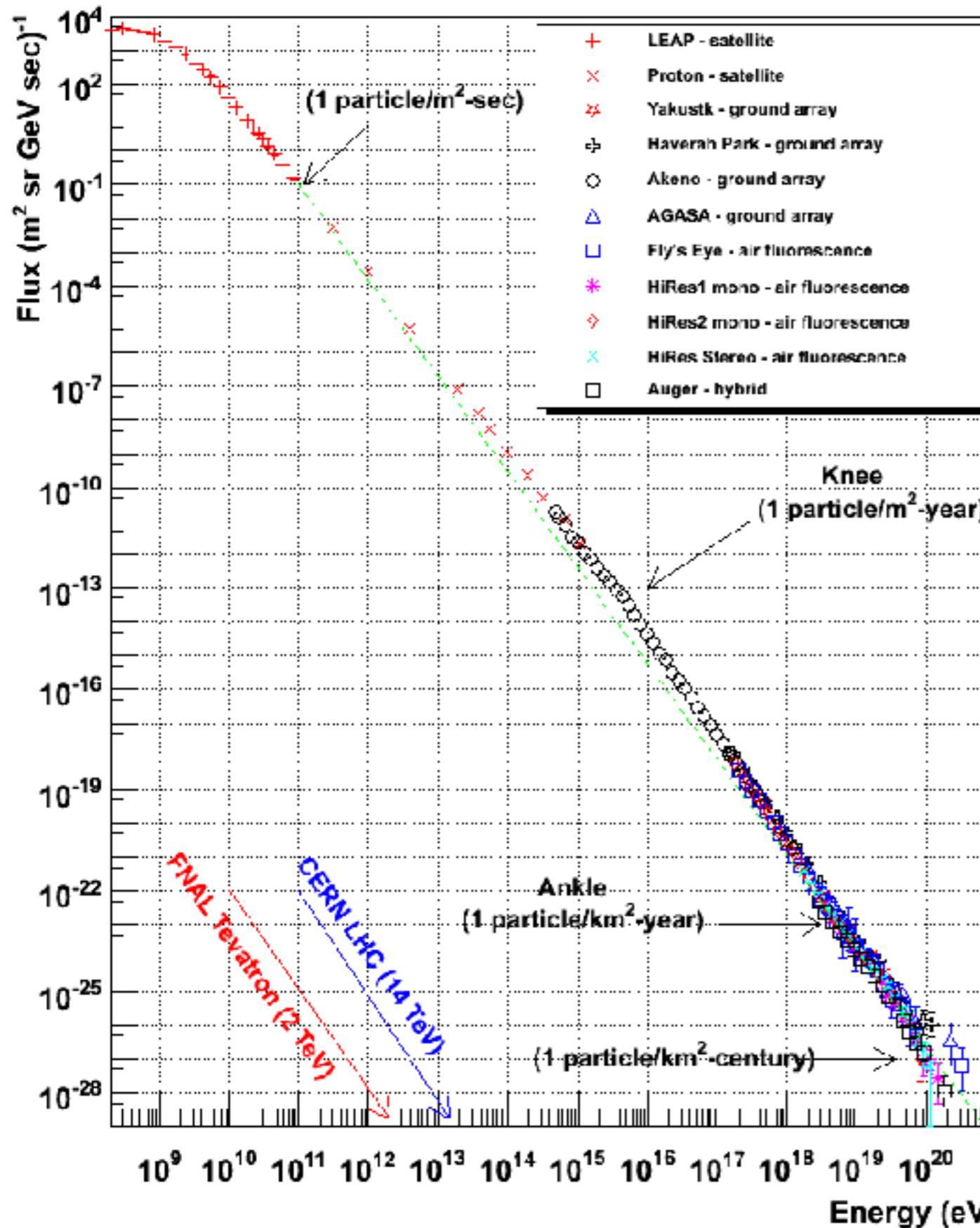


Fermi
5-year survey

宇宙背景放射強度



Cosmic Ray Spectra of Various Experiments



宇宙線

- 宇宙空間を飛び交う高エネルギー粒子
- Victor Hessによる発見
- 10^{20} eV (16 J)まで
- 起源は未だ謎