

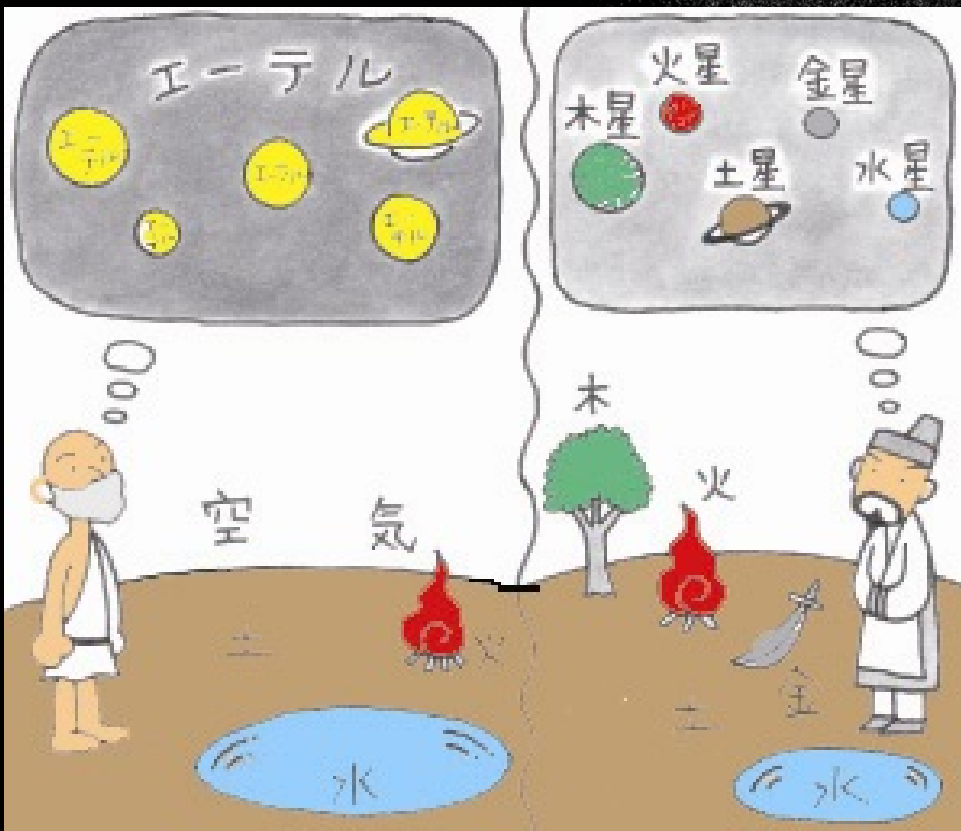
宇宙の階層構造



東邦大学

須藤 靖

2007年5月16日、30日



東邦大学 理学部物理学科
物理学特別講義 II
現代物理学序論

物理学特別講義Ⅱ 現代物理学序論

「宇宙の階層構造」: 目次

I 世界観の階層

II 自然の階層と宇宙の階層

III 物理法則と天体

IV 宇宙の組成

V 人間原理

VI 21世紀の宇宙論

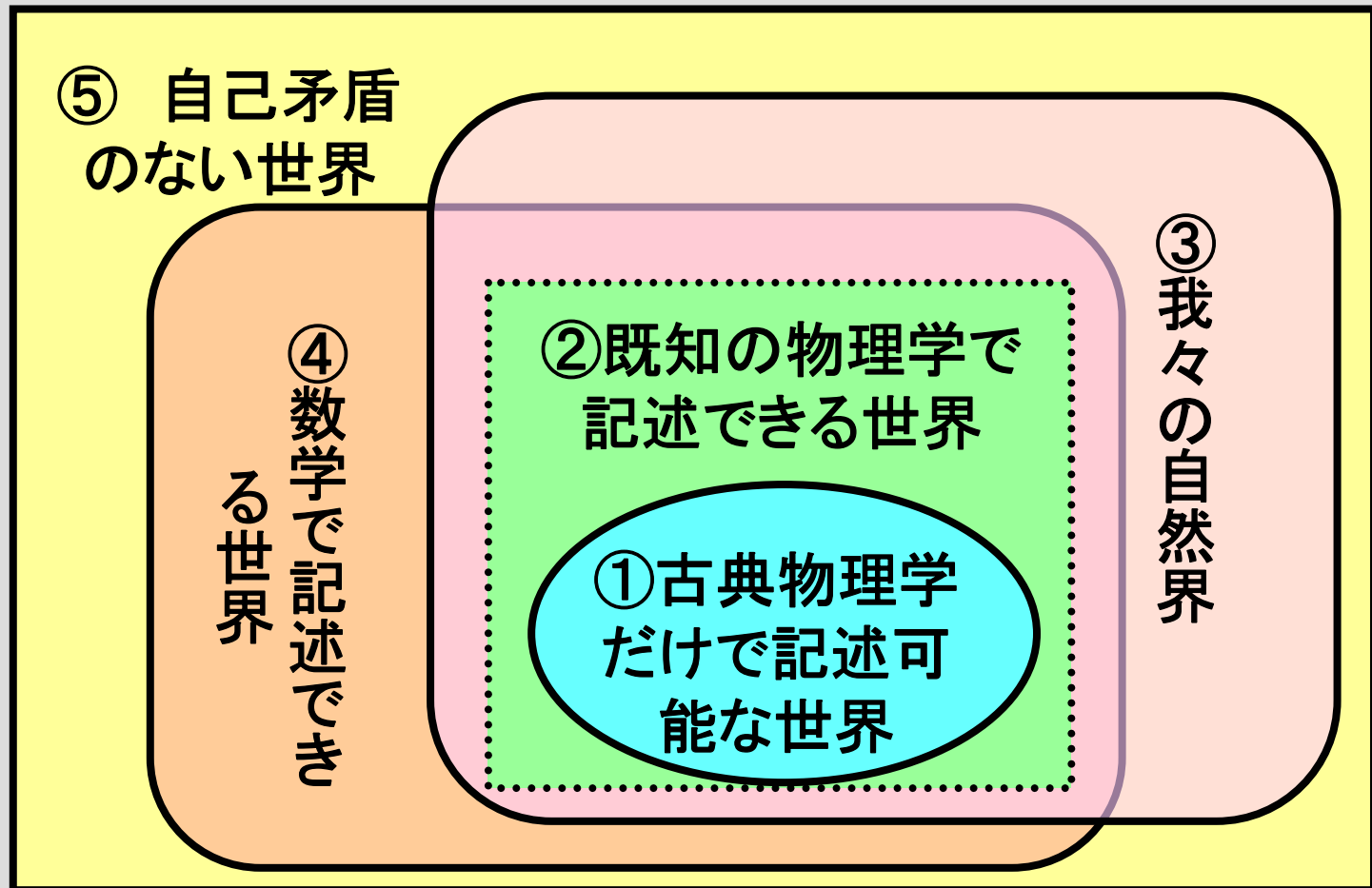
第1講

2007年5月16日 3限目

14:40-16:10

I 世界観の階層

⑥ 自己矛盾に満ちた世界



自然科学を学ぶ意味

- 研究者になることが目的では決してない
- 世の中の不思議さを認識する
- できるかぎり自然を理解する
- 当たり前とされていることでも一度は疑ってみる
 - みんなが言っているからではなく自分で納得する
- 正しいことと間違っていることを見極める
 - 変な人(詐欺師、政治家、官僚、教員)に騙されない
 - 本当に正しいことを理解し納得する
 - 善悪を区別する

森羅万象の起源

- 起源の探究はすべての学問の原動力
 - 日本語の起源：言語学
 - 日本人の起源：文化人類学
 - 生物の起源：分子生物学
 - 人類の起源：人類学
 - 地球の起源：惑星地球科学
 - 物質の起源：物理学
 - 宇宙の起源：宇宙論
- 理解されていないことがいっぱい

物理学と窮理学

■ 物理学 = physics

- 自然学(広義のphysics)
= 自然法則の究明 (natural philosophy)
+ 断片的な事実の集積 (狭義のphysics)
- プリンキピア: Philosophiae naturalis
principia mathematica

■ 窮理学 = natural philosophy

- 17世紀頃英国で思弁的な哲学ではなく、教養として身につけるべき「実験的な自然の哲学」として誕生 (福沢諭吉等は窮理学と訳した)
- 19世紀末頃から実用的な知識の重要性が認識され、physicsに置き換えられた

天文学と窮理学

- **天文学**: astronomy
 - astro (星、天体) + nemein (分布)
- **宇宙**:
 - 「四方上下謂之**宇**、往古來今謂之**宙**」(淮南子、齊俗訓)のように「宇」を空間、「宙」を時間とする説や、「**宇**」を天、「**宙**」を地とする説などがある (三省堂、大辞林)
- **窮理学**:
 - 窮理学とは**天地**万物の性質を見てその働きを知る学問なり (福沢諭吉、学問のすゝめ)

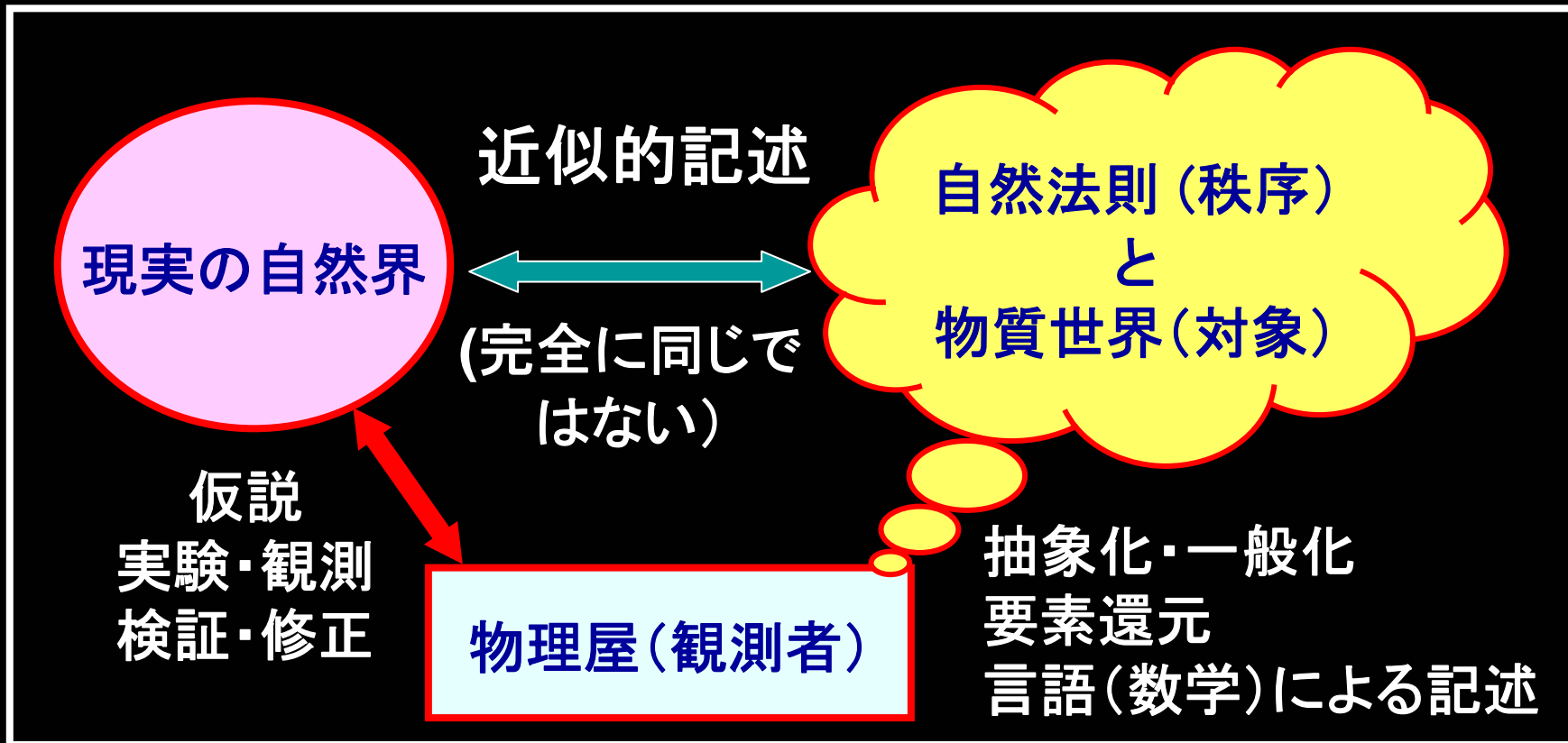
物理教の経典



- 世の中の「本質的なこと」はすべて物理法則からよって「自然に」説明できるはずである
- むろん、実際にわかっていない現象も多い
 - 自由度が多く初期条件を精度よく推定できないために細かいことまではわからないだけ（複雑系）
 - まだ正しい物理法則の理解に至っていないだけ（すべての相互作用の統一⇒究極理論へ）
- 単に我々がまだ未熟者であるだけで、もっと修行を積みればわかるようになるはず
- 「神様」を持ち出す必要はない

物理学の方法論：自然界理解の図式

このループを繰り返しながら近似の精度を高めていくのが科学という営み



↑ ↓ この方法論の妥当性の外部からのチェック ???

第三者機関（同業者、哲学者、納税者、文部科学省？）による検閲

自然科学は常に発展途上

- **物理学(自然科学)は、進歩する**
 - **失敗する(できる)から**であり、失敗が失敗であると明確に認識でき、その**反省**がフィードバックされた結果としてやがて次の成功を生むからである (**falsifiability**)
 - 「自然」あるいは実験・観測事実と矛盾すれば、どれほど論理的にすばらしい美しい理論であってもそれは単なる間違いであり、捨て去らざるを得ない
- **政治・行政・哲学などは(あまり)進歩しない(遅い)**
 - 単に都合のよい部分だけをとってきて一見正しそうな論理をでっちあげる(検証が常にあとづけ)
 - 過去を変えることはできないので、現在の判断が正しかったのか間違っていたのか客観的な検証が困難
 - したがって、成果を検証する、さらに反省する、という当然の習慣がないまま次から次へと同じあやまちを繰り返す
 - 失敗から学ぶ、ということがない

自然科学とえせ科学との違い

■ 自然科学の特徴

- 決して「厳密な」自然像構築のみを追求してはいない
- あくまで近似的描像を更新し続ける行為
- 論理自身は問題なくとも、実験が否定することもある

■ 「正しいのか間違っているのか区別できる」ことこそ自然科学の本質的定義

- “falsifiable” (うそであることを示しうる)
- 間違っているかどうかわからないあいまいな命題は自然科学の対象ではない(神が宇宙を創った)
- 「説明できないこと」の存在は自然科学の出発点

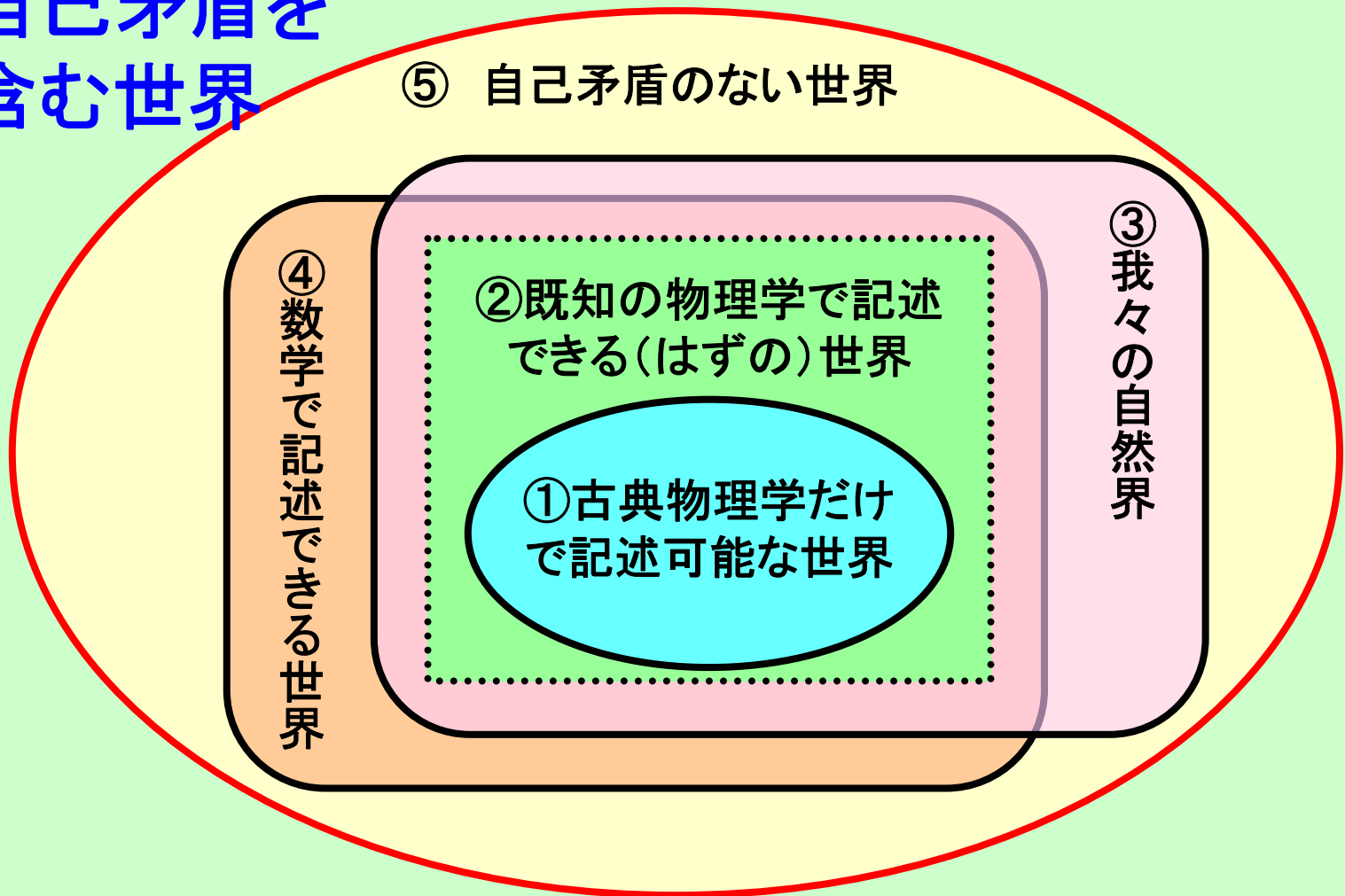
物理学はあくまで自然界の近似的記述法の一つ

- 自然界の記述言語が数学である必然性はない
 - 自然(神様?)が微分方程式を解いて、物体の運動を決定しているとは思えない
 - にもかかわらずこれだけ多くのことが数学によって記述できることは奇跡であるとも言える
 - 現実に「解ける」問題に帰着させるには、本質だけを残した近似が必要
 - 仮にすべての要素を取り込んだ計算が可能だとしても、それでは結局物事の本質を理解できないばかりか、逆に理解から遠ざかるだけ

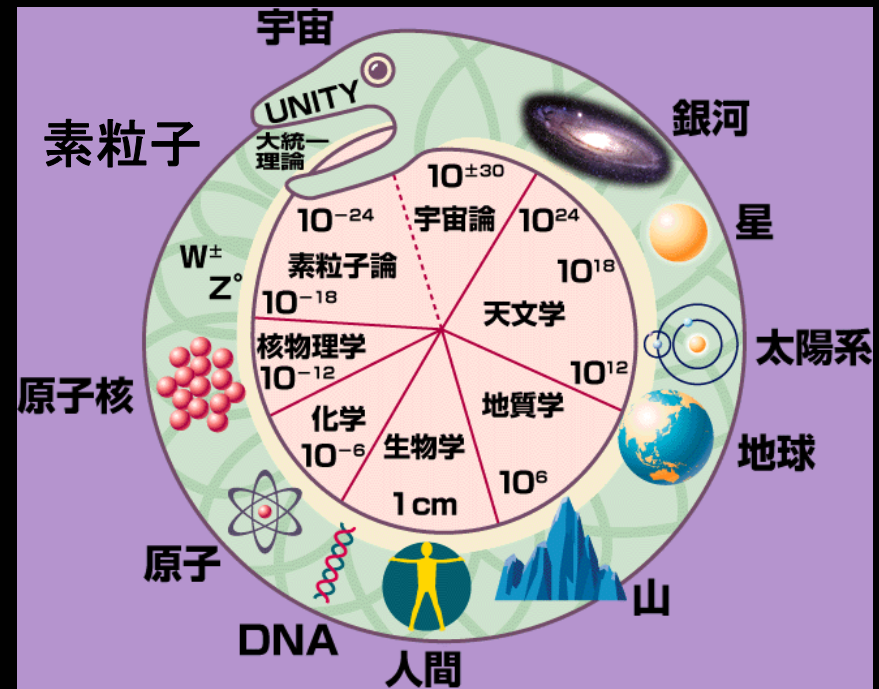
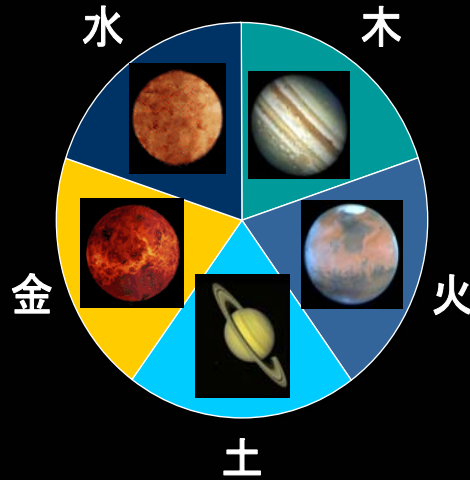
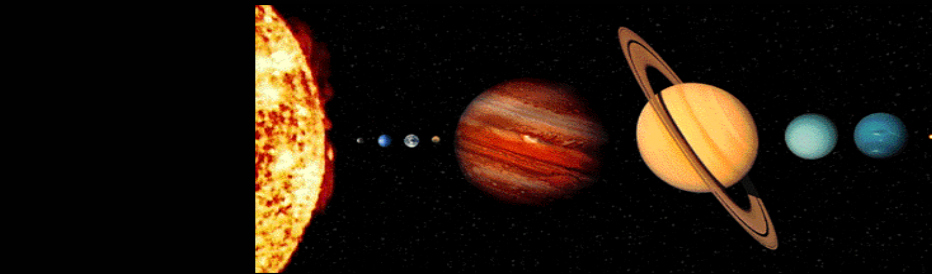
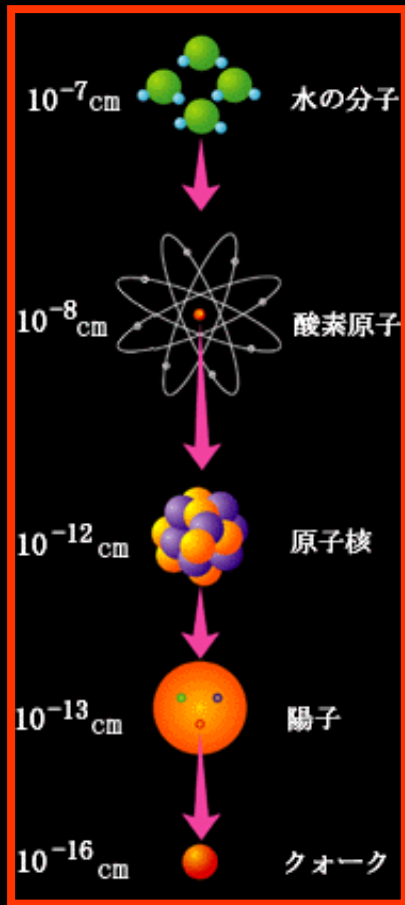
「世界観」の階層構造

ありとあらゆる可能性

自己矛盾を
含む世界



II 自然の階層と宇宙の階層



我々の世界をもっとよく知りたい

■ 微視的世界：物質は何からできているのだろうか？

- ものをどんどん分けていくとどうなるか？
- 分子⇒原子⇒原子核(バリオン)⇒素粒子(クォーク・レプトン)
- もはやこれ以上は分けることのできない最小構成要素が存在
- これ以外の物質(素粒子)は存在しないのか？

■ 巨視的世界：宇宙の果てには何があるのだろうか？

- 地球⇒太陽系⇒星団⇒銀河⇒銀河団⇒宇宙の大構造
- 宇宙の大きさ(=年齢)はどのくらいだろう
- さらに遠く(=過去)の宇宙はどうなっているのだろうか
- 宇宙を占めている物質は、我々がすでに知っている微視的世界の構成要素と同じなのだろうか

ものは何からできているのだろうか？

■ 古代ギリシャの4元説

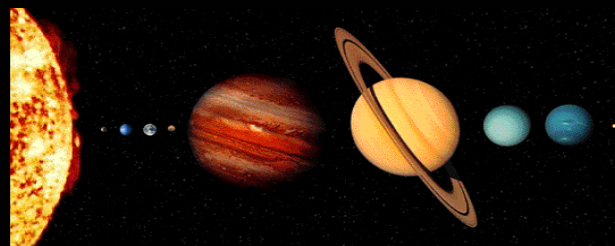
- 空気、土、火、水

■ 中国の五行説

- (木、火、土、金、水) × (陽、陰)
- これが日本で用いられている惑星の名前、さらには曜日の名前の由来

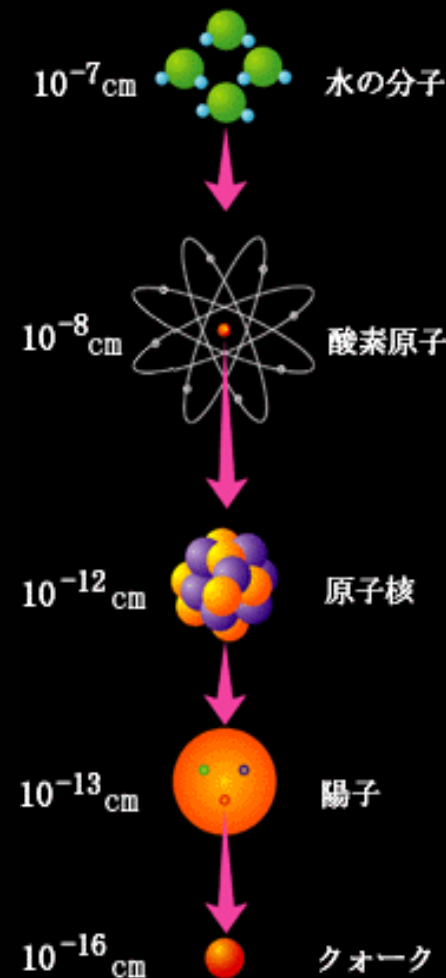
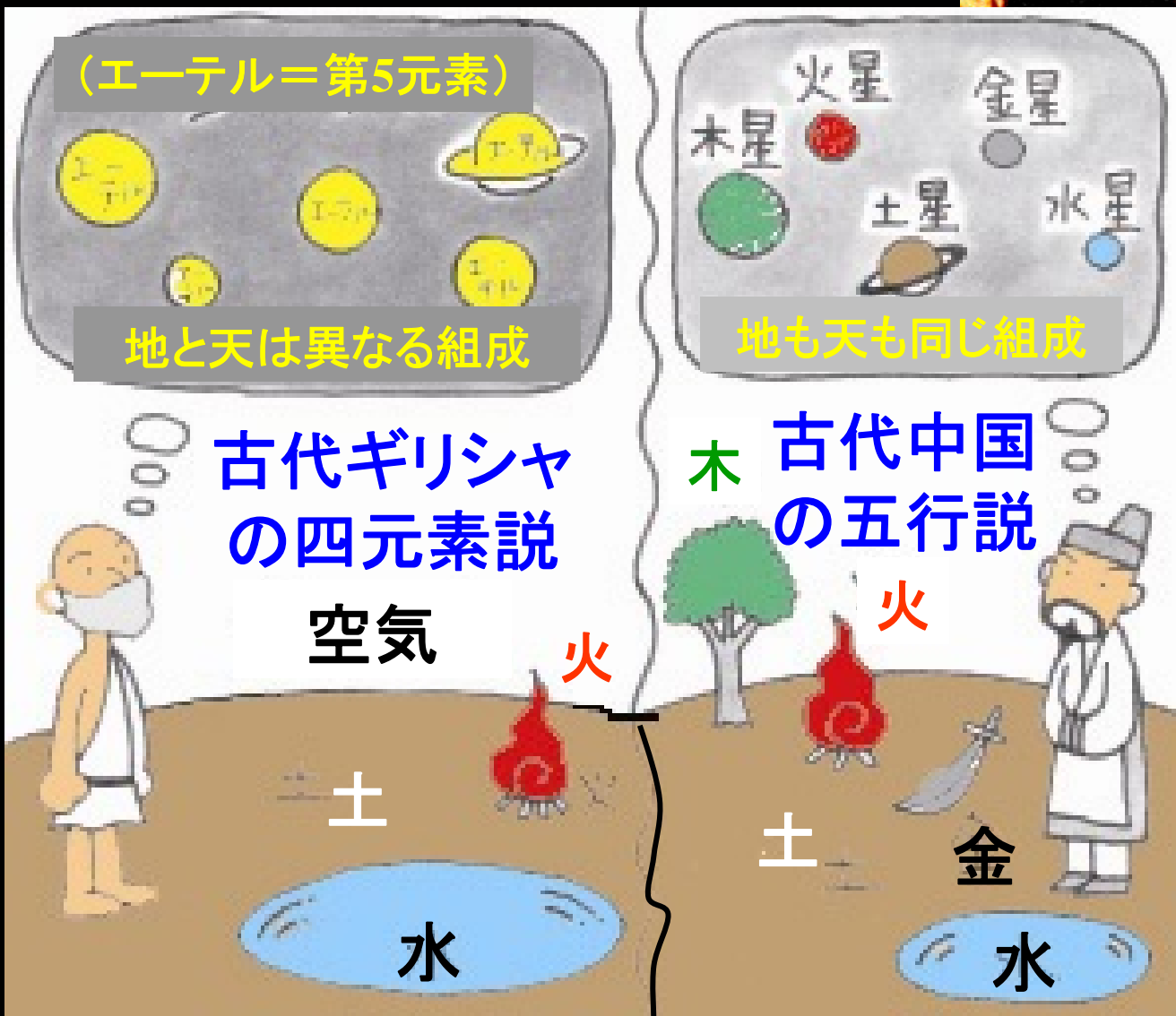
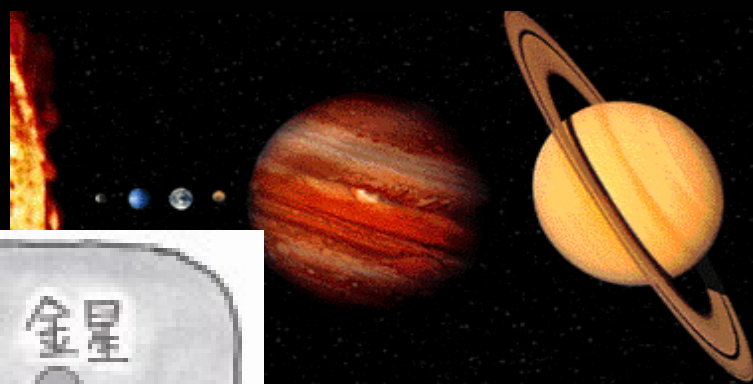
■ 現代物理学

- 分子⇒原子⇒原子核(陽子・中性子; バリオン)
⇒素粒子(電子、ニュートリノ; クォーク・レプトン)



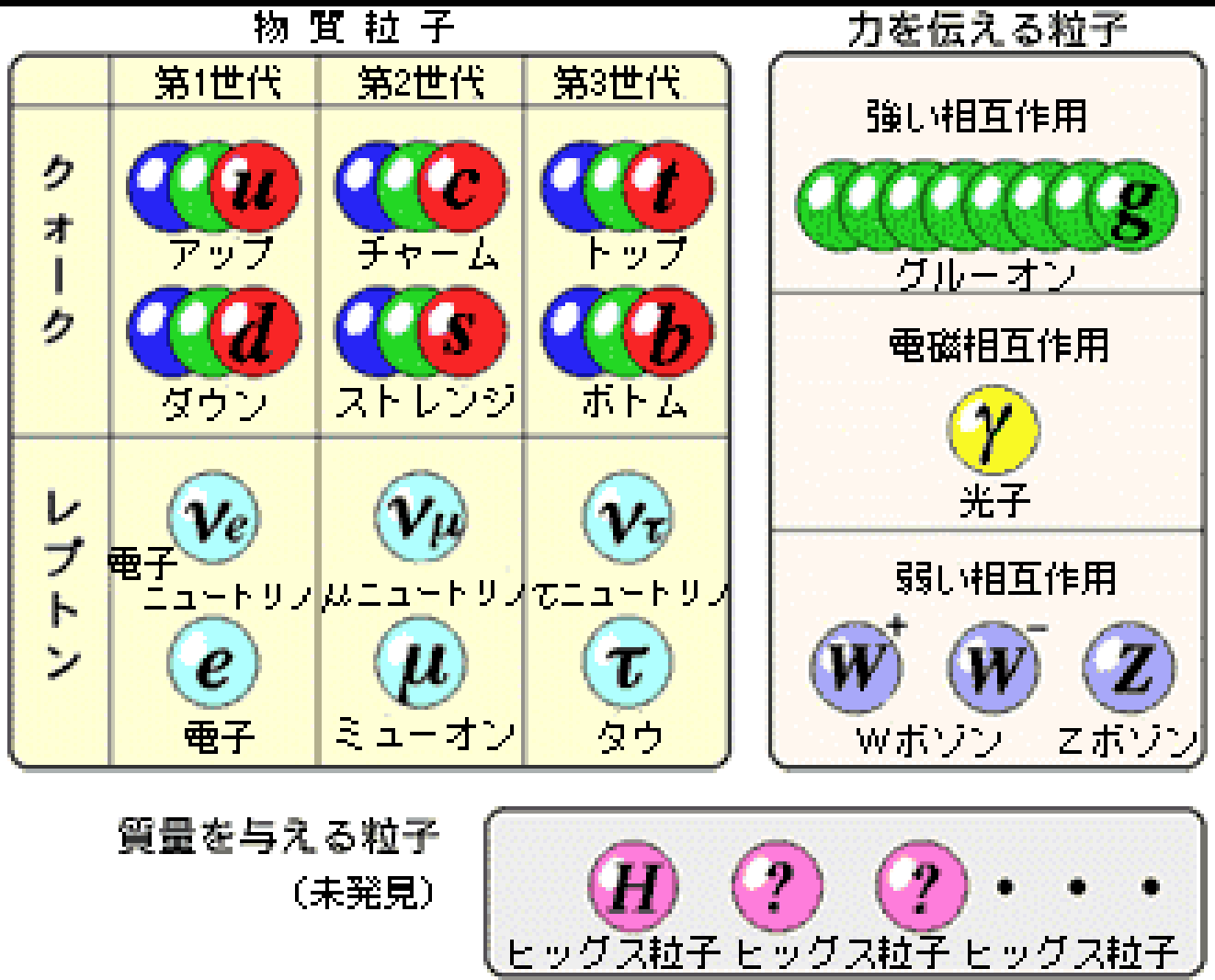
日月火水木金土

自然界に思いをはせる



(いずもりよう:須藤靖「ものの大きさ」図1.1より)

現在の標準素粒子モデルのすべて



実験的にはこれで説明できない事実は知られていない。しかし、理論的には不満足な点が多く、おそらくこの上により究極的な理論があるだろうと予想されている。

宇宙の階層構造

宇宙の大構造

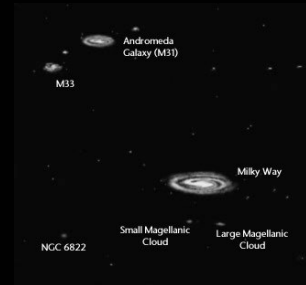
太陽系



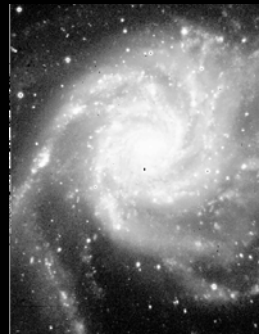
矮小銀河



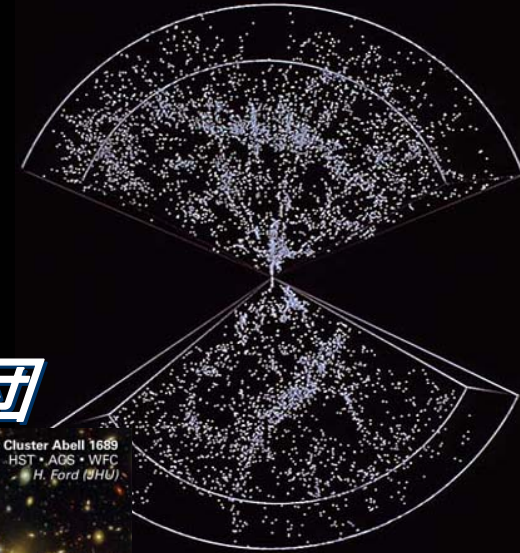
銀河群



銀河



銀河団



星団



10^0 10^1 10^2 10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8

典型的な大きさ [パーセク(〜3.1光年)]

地球

←→ 1万3000km

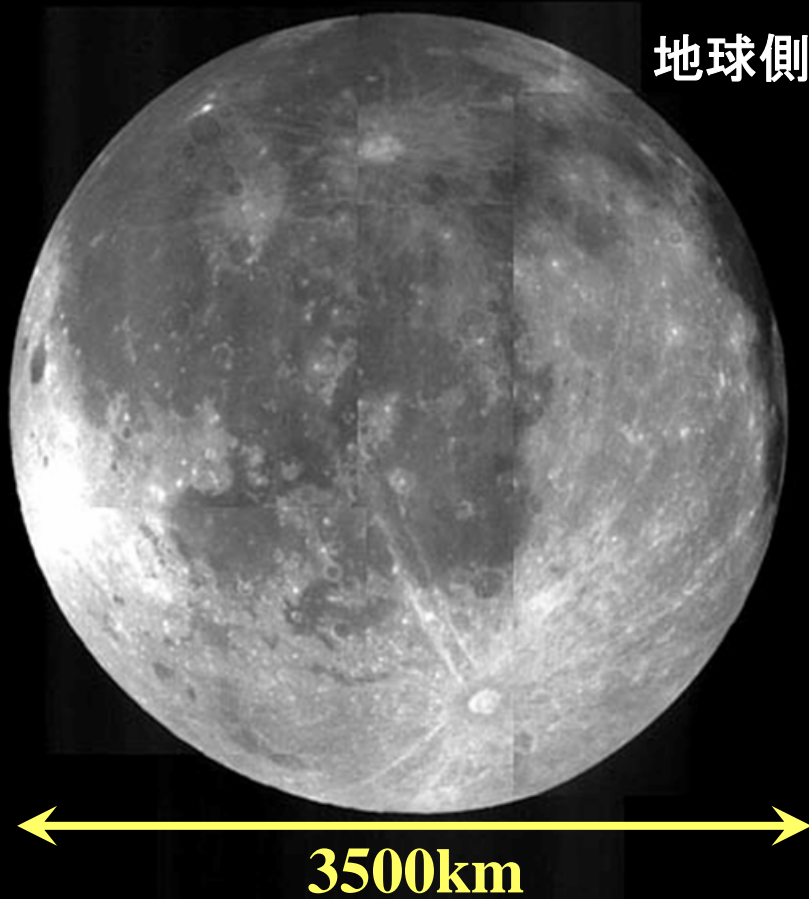


Terra衛星のMODIS検出器のデータ

<http://modarch.gsfc.nasa.gov/>

<http://www.nasa.gov/home/index.html>

月：衛星



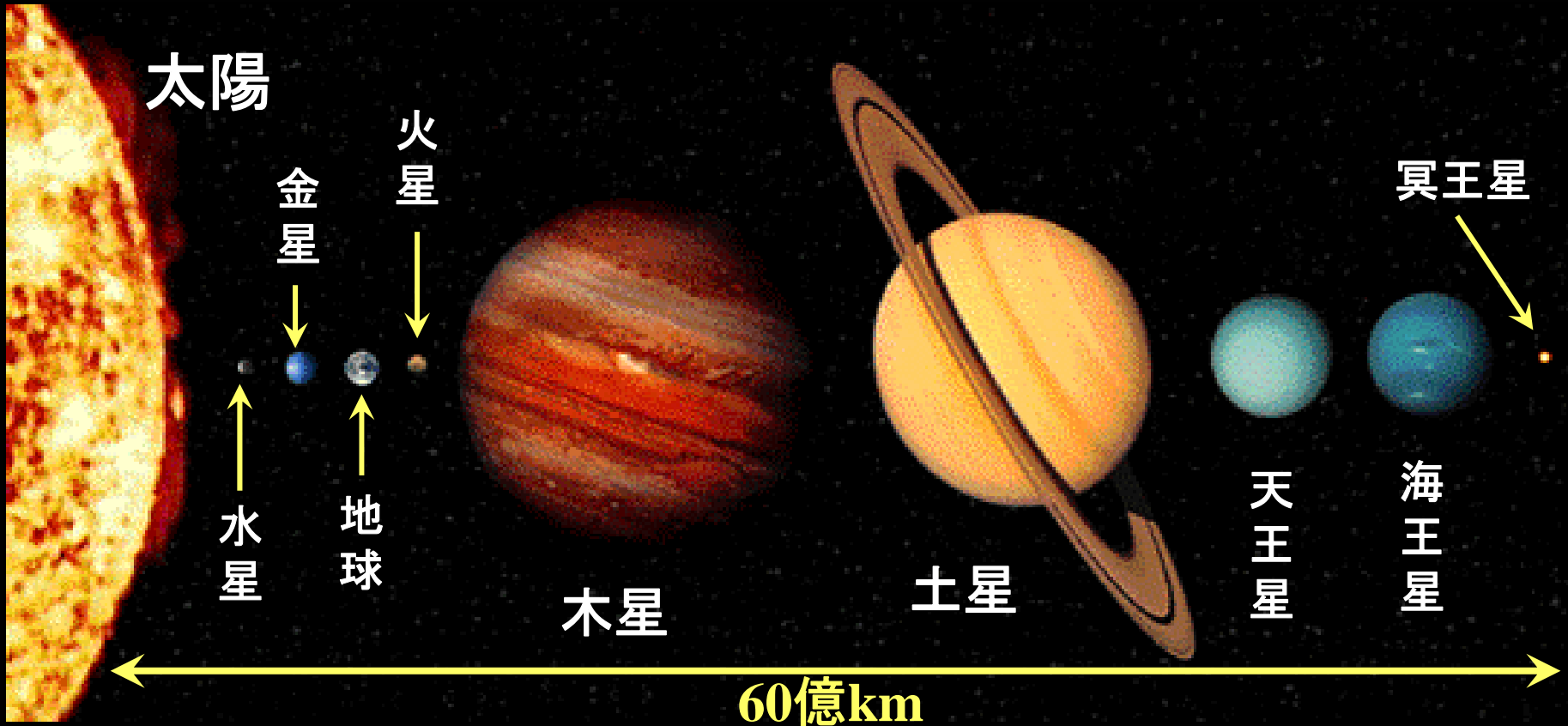
月探査機クレメンタイン 1994年



アポロ16号 1972年

<http://www.nasa.gov/home/index.html>

八~~九~~つの惑星：我が太陽系

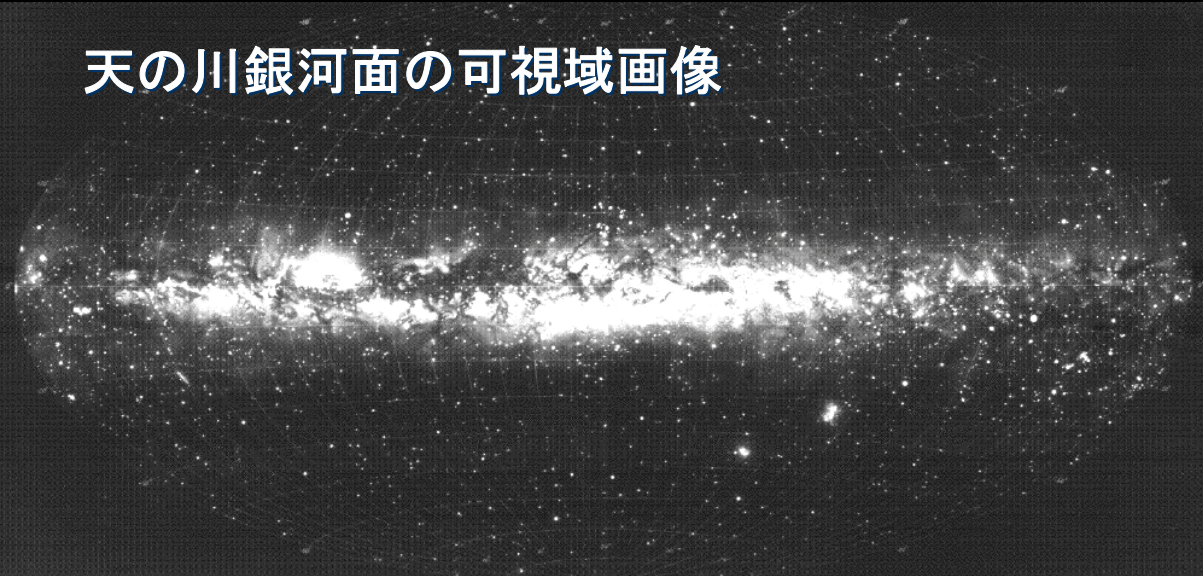


(太陽からの距離は別として、惑星の相対的な大きさはほぼ実際の比の通り)

<http://www.solarviews.com/eng/homepage.htm> © Calvin J. Hamilton

我々の銀河系

天の川銀河面の可視域画像



- 我々の銀河系（天の川）は、星とガス（+暗黒物質）からなる渦巻き銀河で、円盤部の直径は約30kpc

COBE衛星による近赤外線域画像



マゼラン星雲



大マゼラン星雲

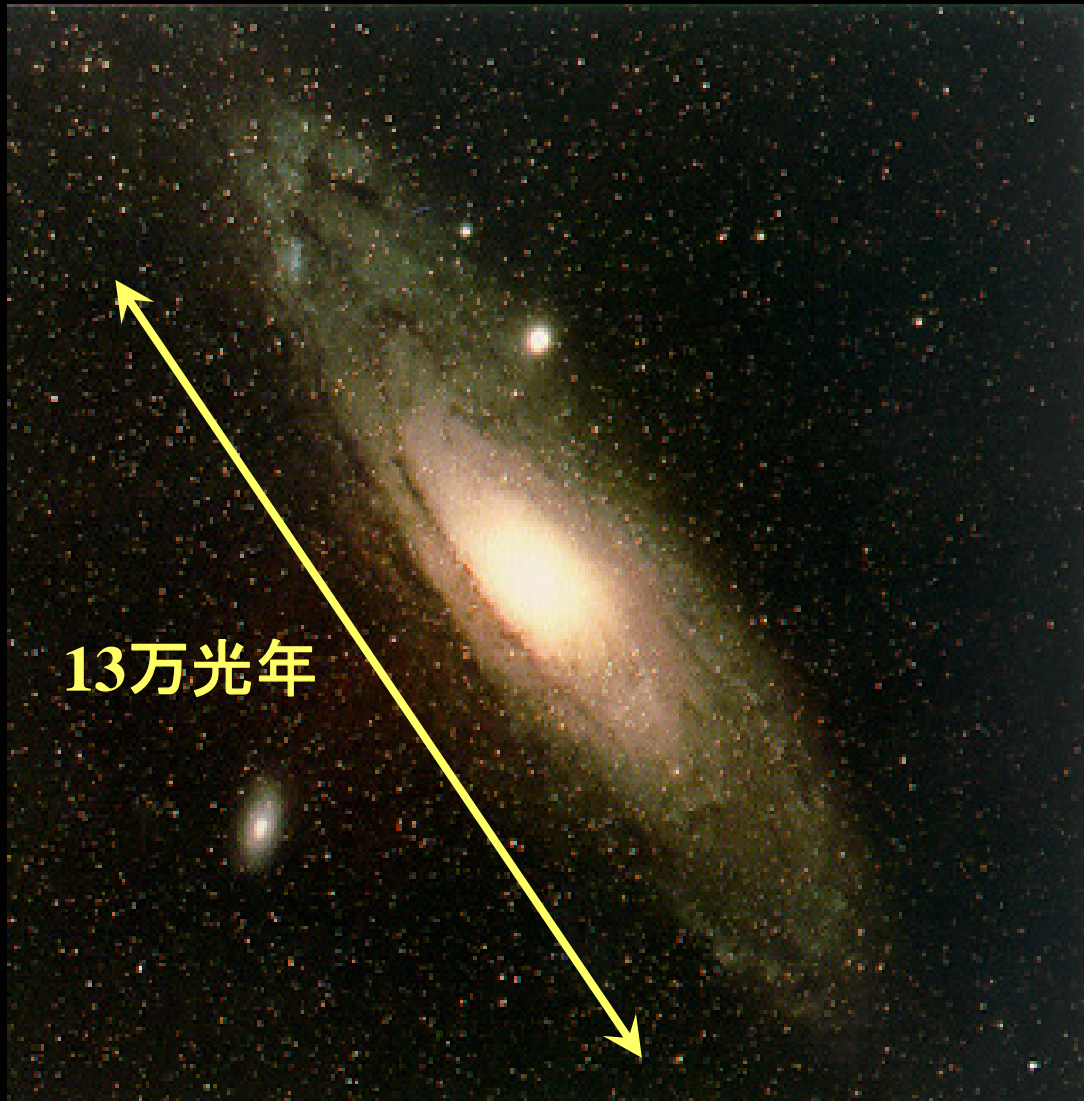
UKS

小マゼラン星雲



UKS 17

アンドロメダ銀河 (M31): 隣の銀河



M83: 近傍の渦巻銀河



M83 © Anglo-Australian Observatory Photo by David Malin

M104: The Sombrero Galaxy



The dust in the disk of this galaxy is seen in silhouette and in reflection against the huge bulge

M104 © Anglo-Australian Observatory Photo by David Malin

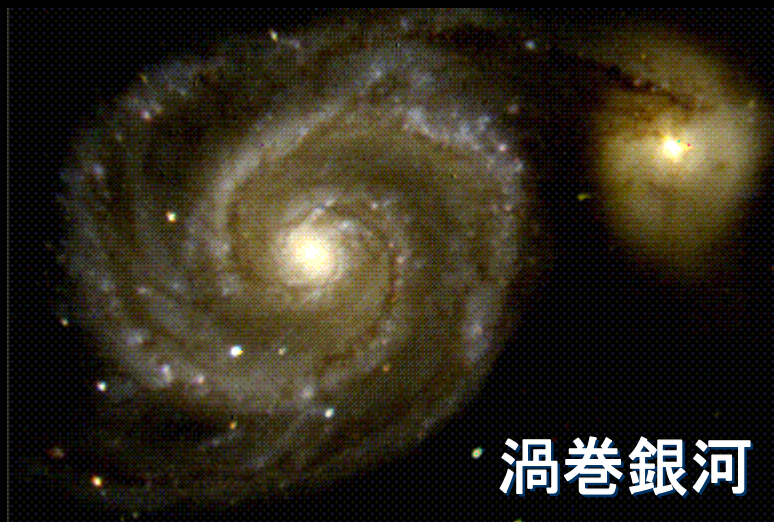
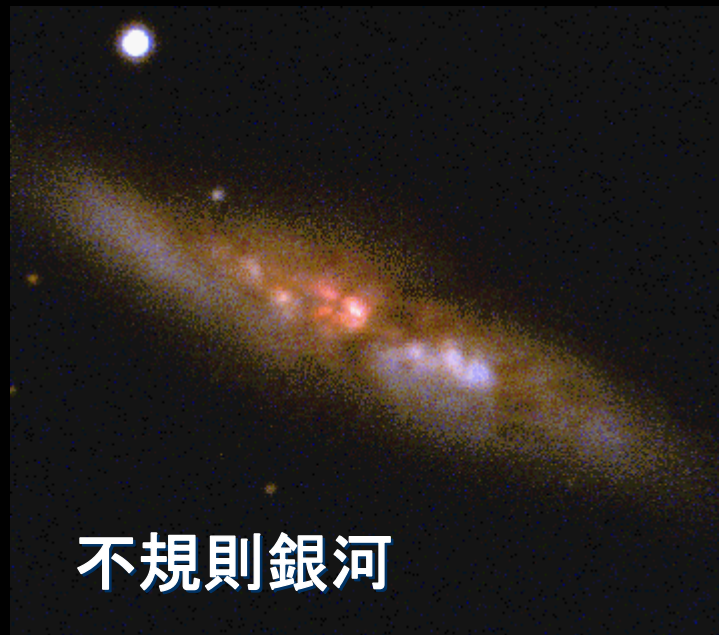
銀河の形態

楕円銀河



AAT 60

不規則銀河



渦巻銀河

銀河の形: ハッブル分類

Sa



Sb



Sc



Sd



楕円銀河



E0



E6



S0

レンズ状銀河

渦巻銀河

棒渦巻銀河



SBa



SBb



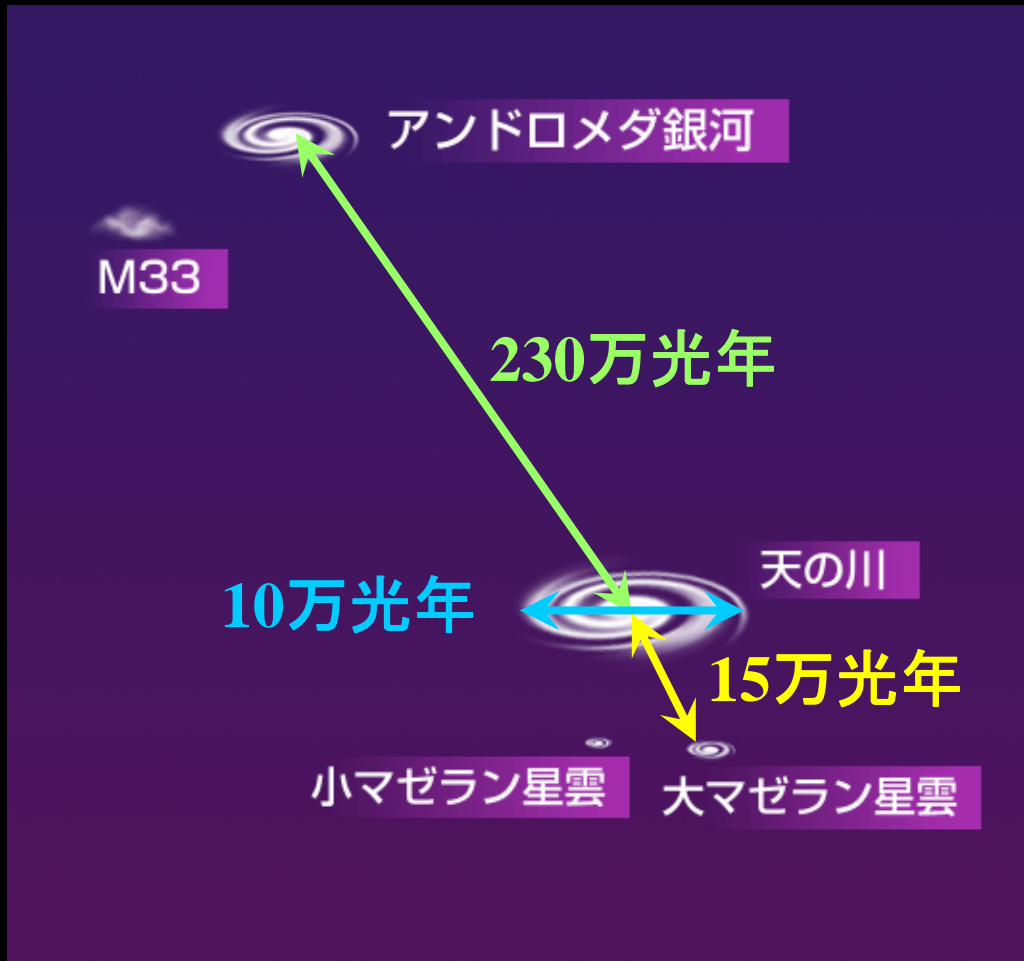
SBc



SBd

<http://skyserver.pha.jhu.edu/jp/>

局所銀河群： 我々のまわりの銀河集団



- 我々の銀河系はアンドロメダ銀河をはじめ30個程度のメンバー銀河とともに、直径600万光年程度の広がりをもつ局所銀河群を形成している

銀河団： 宇宙で最大の自己重力系



- およそ100～1000個の銀河が、直径1000万光年程度の領域に重力的に引き合い、集団化したもの

銀河団エイベル1689
(距離:22億光年)
ハッブル宇宙望遠鏡

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/>

宇宙に構造はあるか？

■ 構造はない

- 局所的な凸凹はあるかもしれないが、大きなスケールにわたって平均してしまえばそれらのパターンは消えさってしまうはず
- 初期に銀河がある分布にしたがっていたとしても、宇宙が膨張するにつれてそれらは薄められてしまい、結局ほとんどランダムな分布に近づくはず

■ 構造はある

- よく理解されていないにせよ宇宙が誕生したときの情報は、現在の銀河分布に何らかの痕跡を残しているに違いない
- 逆に、初期条件には依存せず、銀河同士の重力的相互作用の結果としてある特徴的な分布に落ち着くのではないか

■ 起源と進化、あるいは、初期条件と物理法則、という2つの側面の相対的な重要度

- 宇宙の構造は初期条件をそのまま記憶しているのか、逆にその後の物理過程で普遍的に決まってしまうのか

宇宙の大構造

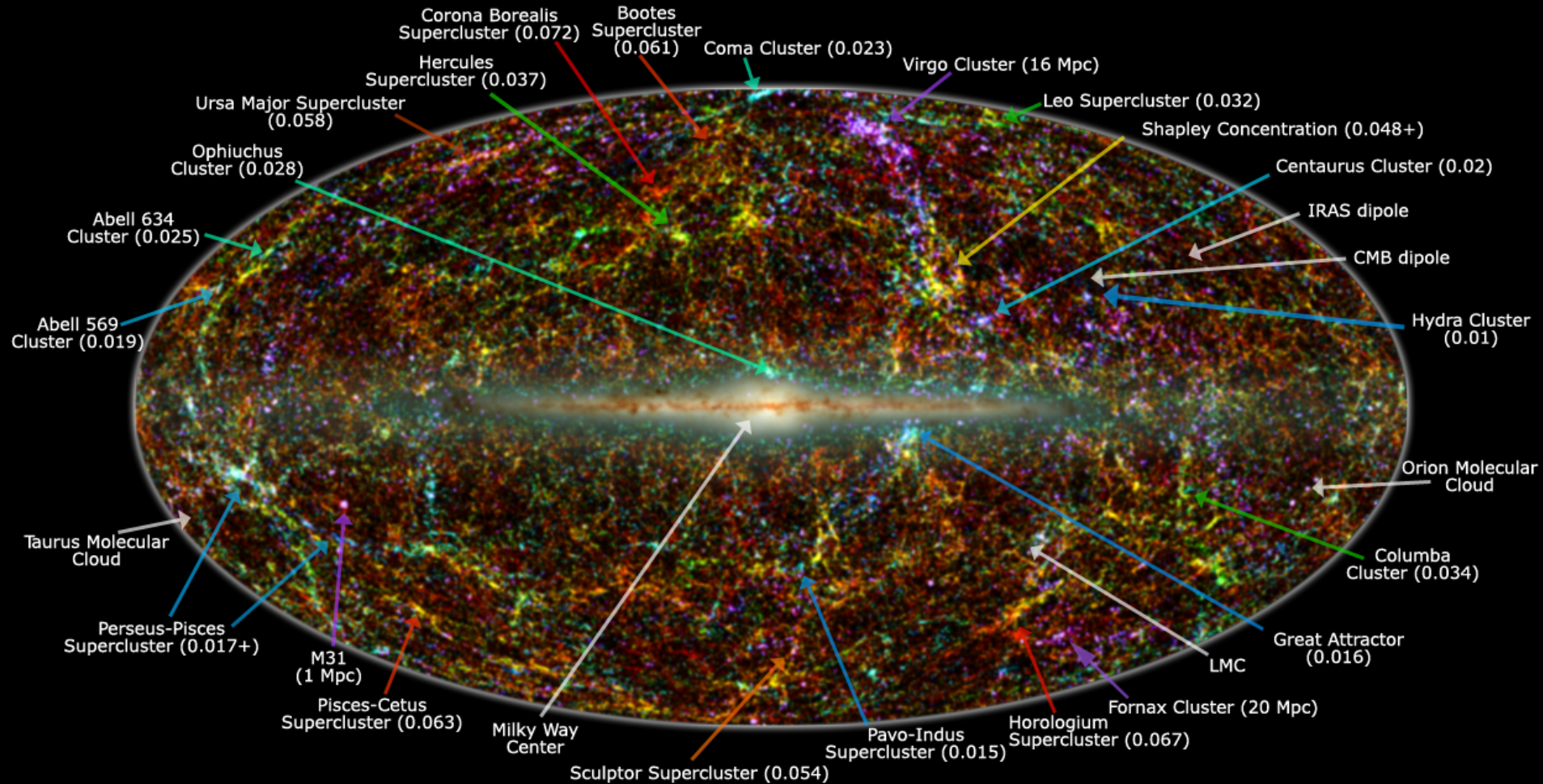


Seldner, Siebers,
Groth, & Peebles,
1977, AJ, 82, 249.

the Lick Galaxy Counts for the Northern Galactic hemisphere

近赤外線で見た近傍宇宙

Large Scale Structure in the Local Universe



Legend: image shows 2MASS galaxies color coded by redshift (Jarrett 2004); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).
Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)

近赤外線で見た銀河団分布

2MASS Local Universe

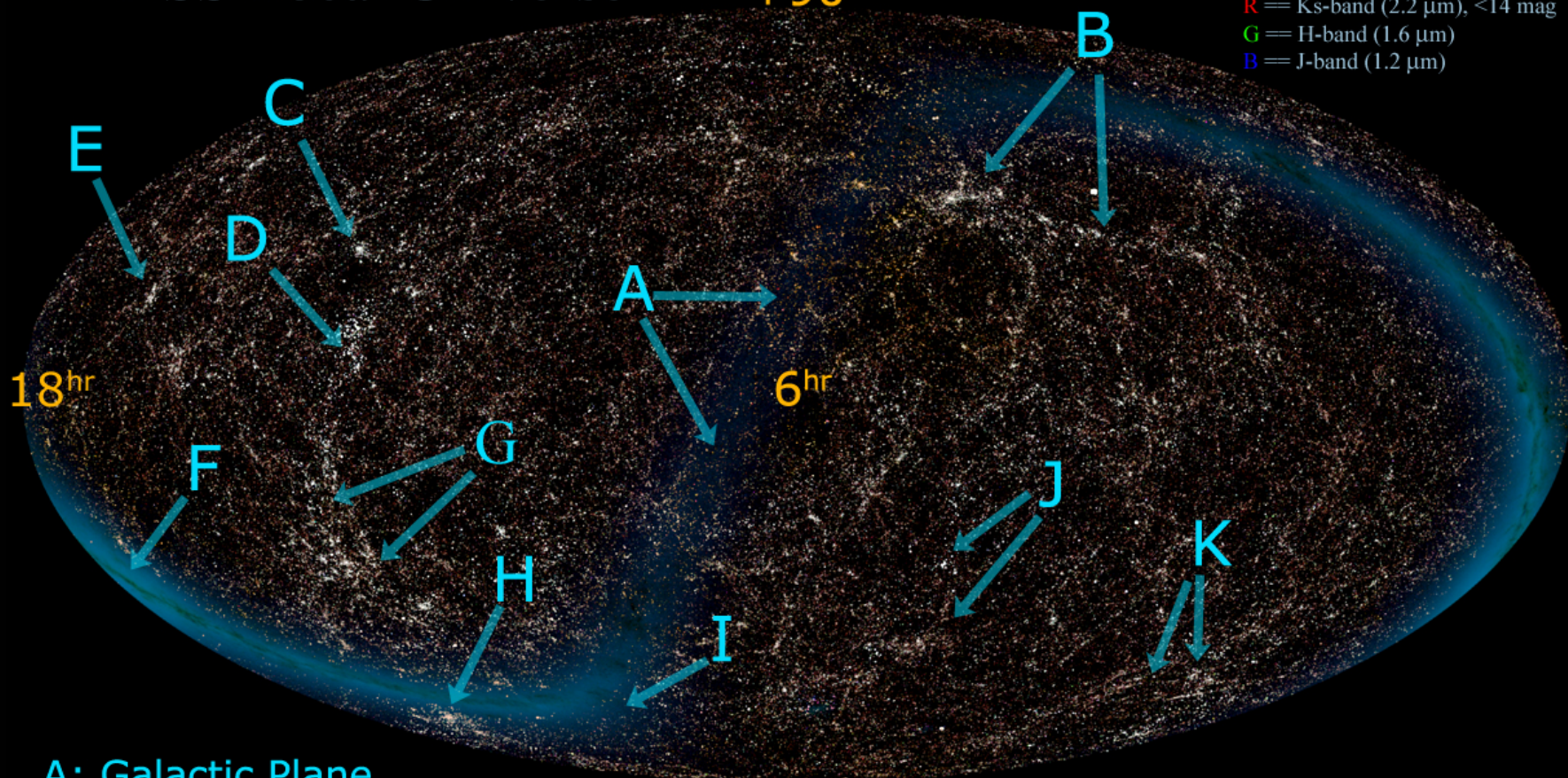
+90°

RGB Channels:

R = Ks-band (2.2 μm), <14 mag

G = H-band (1.6 μm)

B = J-band (1.2 μm)



A: Galactic Plane

B: Perseus-Pisces Supercluster

C: Coma Cluster

D: Virgo Cluster/Local Supercluster

E: Hercules Supercluster

F: Galactic Center

-90°

G: Shapley Concentration/
Hydra-Centaurus Supercluster

H: "Great Attractor"/Abell 3627

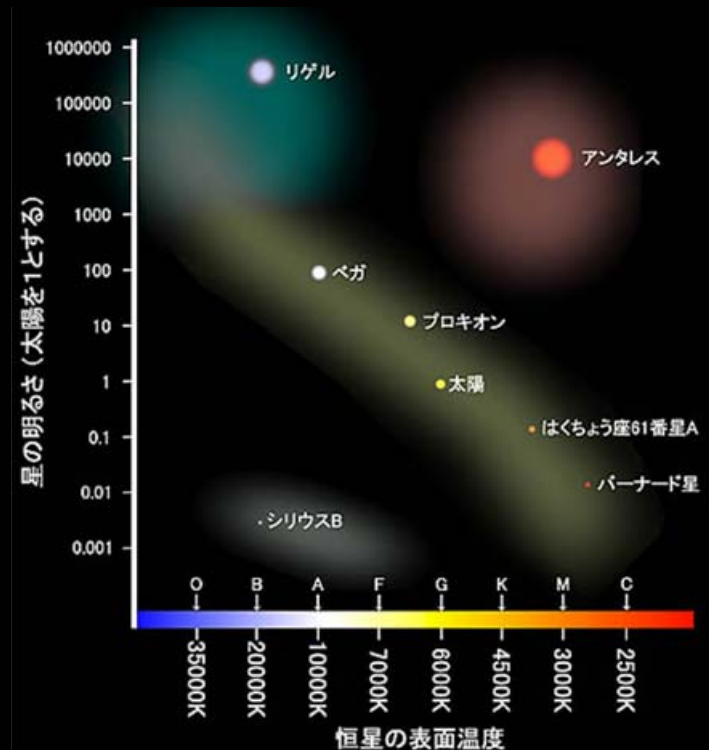
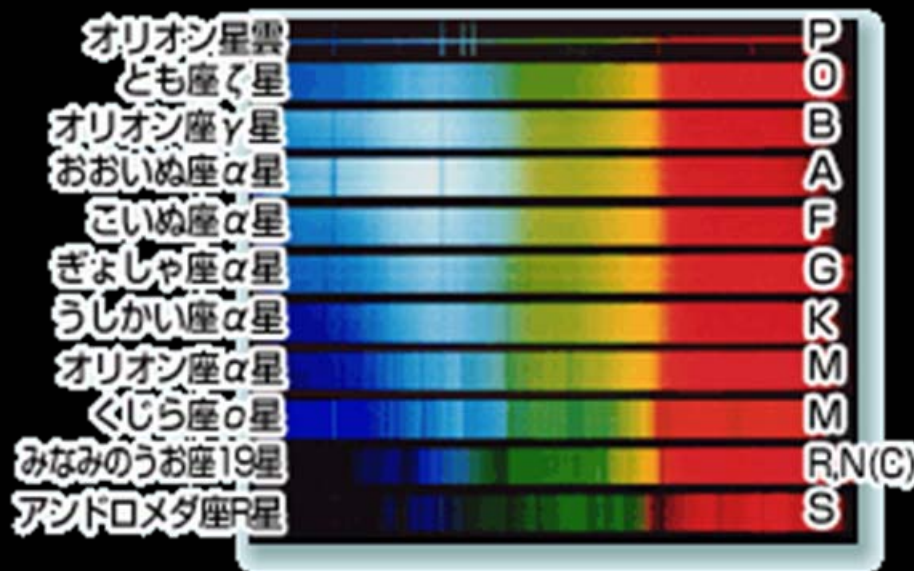
I: "Local Void"

J: Eridanus/Fornax Clusters

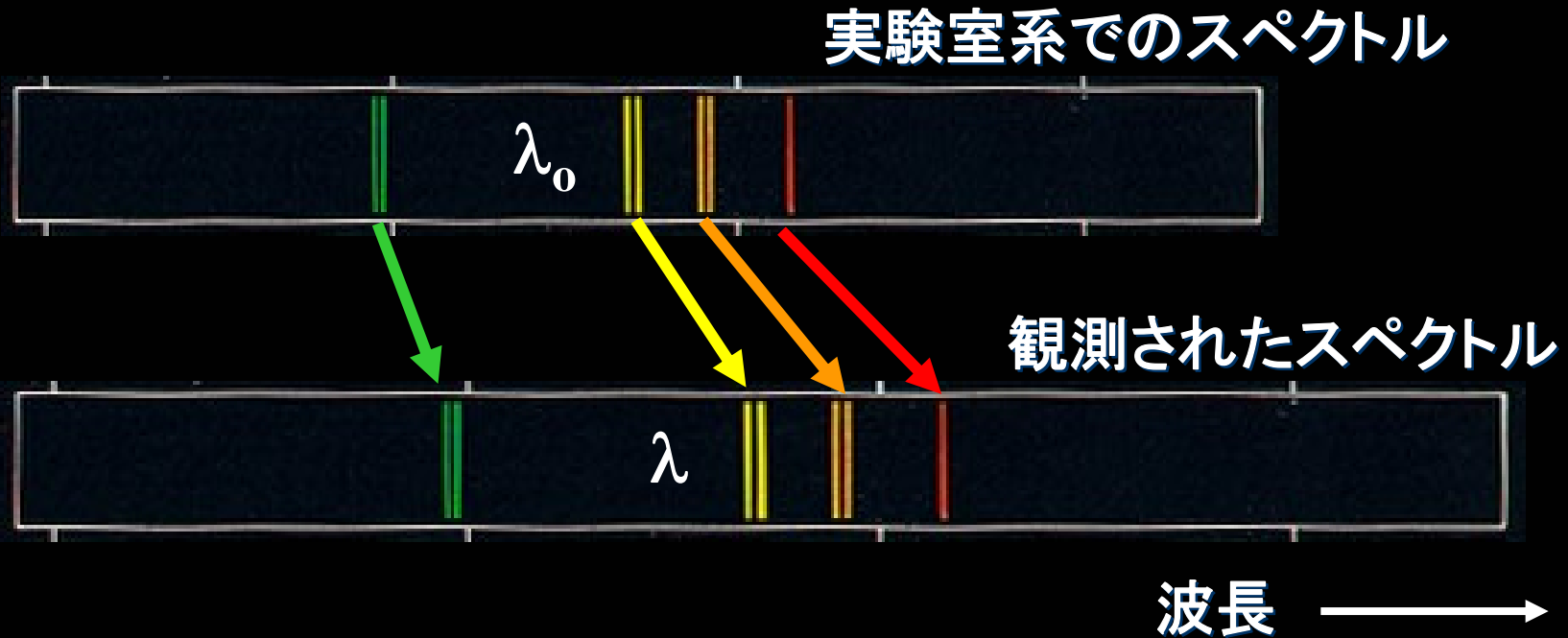
K: Pavo-Indus Supercluster

吸収線と恒星のスペクトル

- 水素原子に限らず、さまざまな元素は特徴的な波長の光を吸収・放出する
- 恒星から放射される光(連続光)は、その大気を通過する途中でさまざまな元素に吸収されて特徴的な吸収線系を示す
 - 星の温度、元素組成の手がかり



ドップラー効果と赤方偏移・後退速度



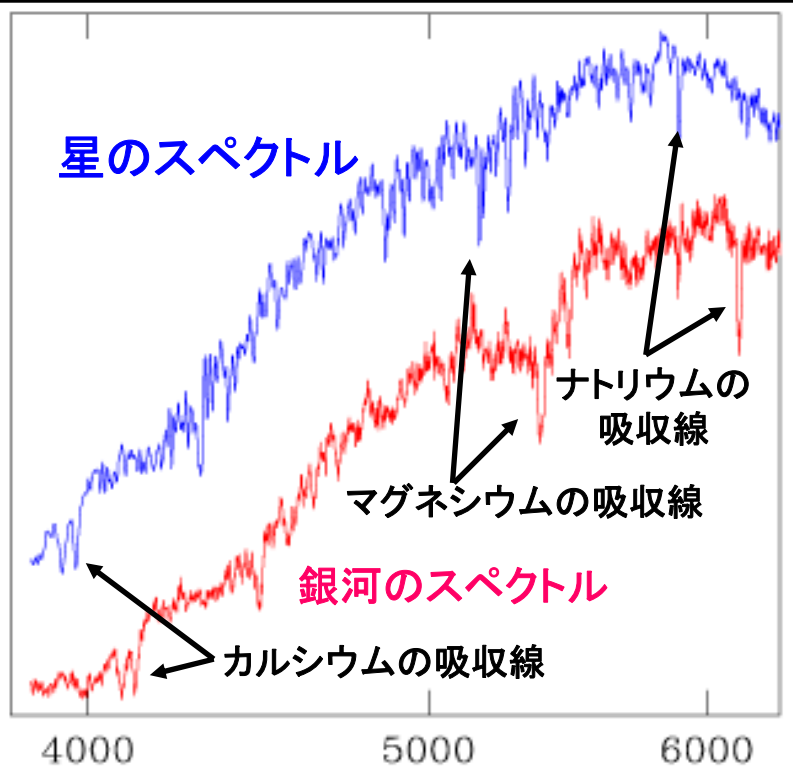
赤方偏移

$$z \equiv \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

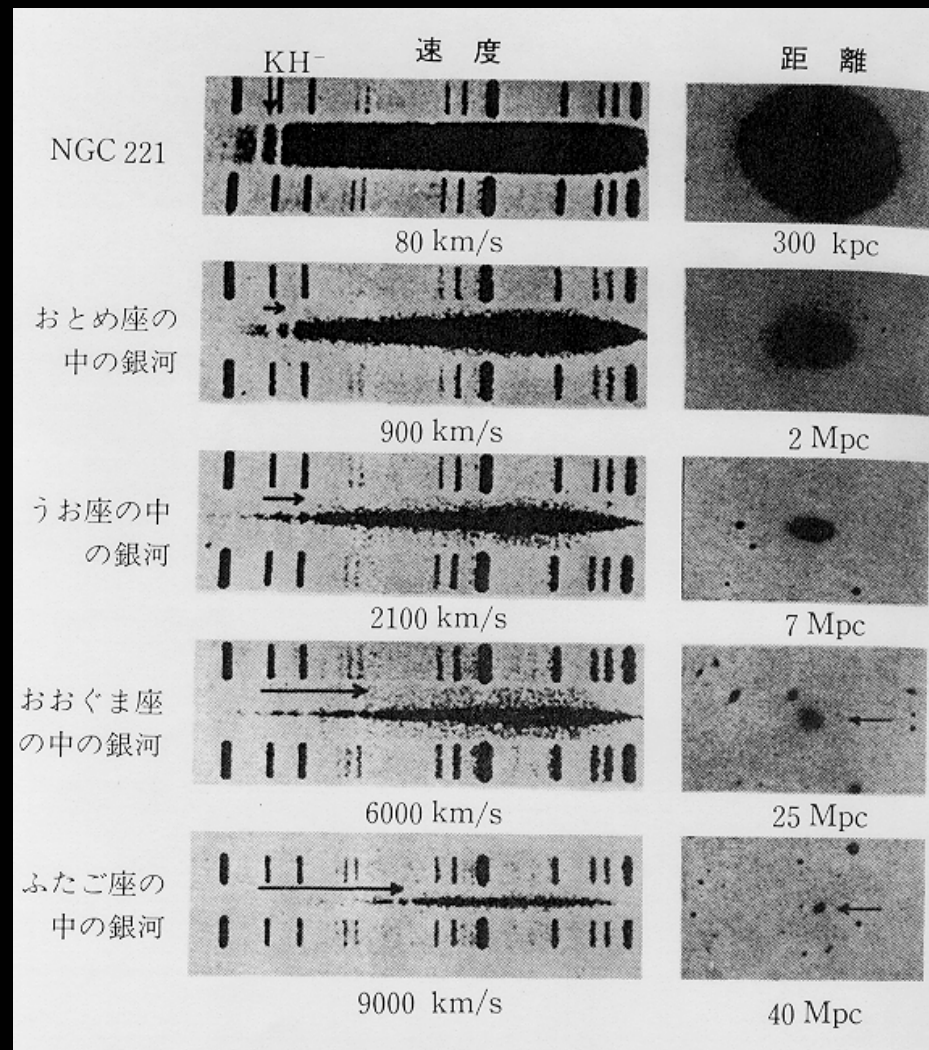
後退速度

銀河の分光観測と後退速度

スペクトル強度



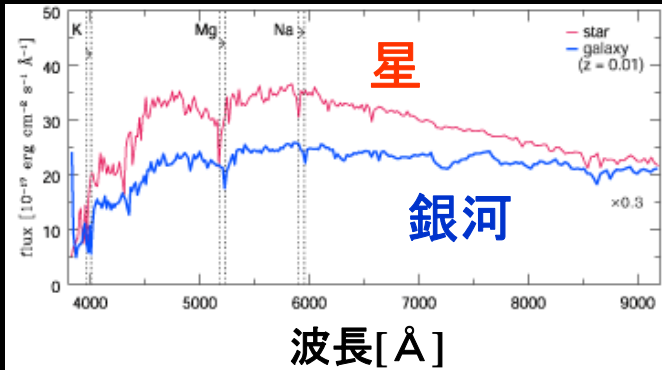
波長 λ [オングストローム]



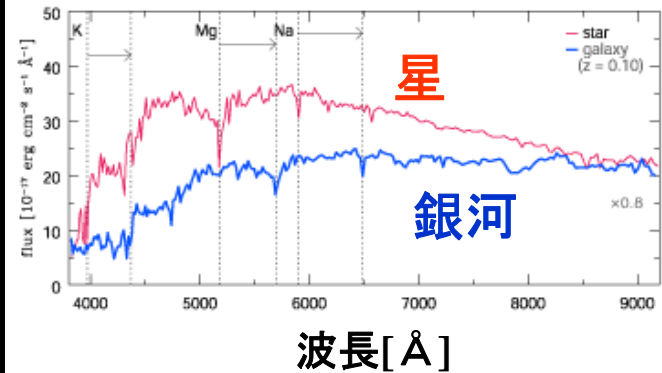
銀河のスペクトルとドップラー効果

スペクトル強度

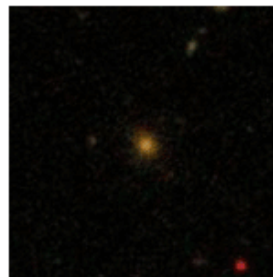
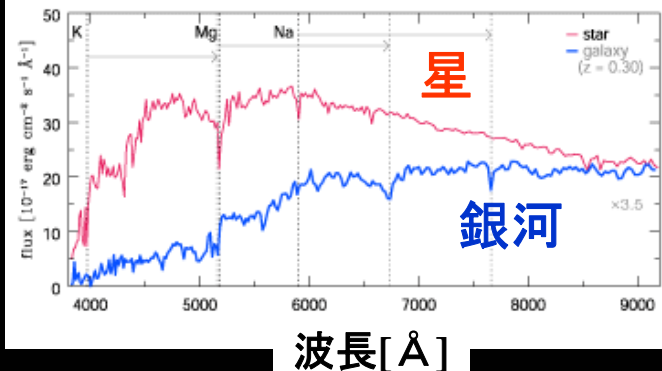
見かけの大きさ



近くの銀河



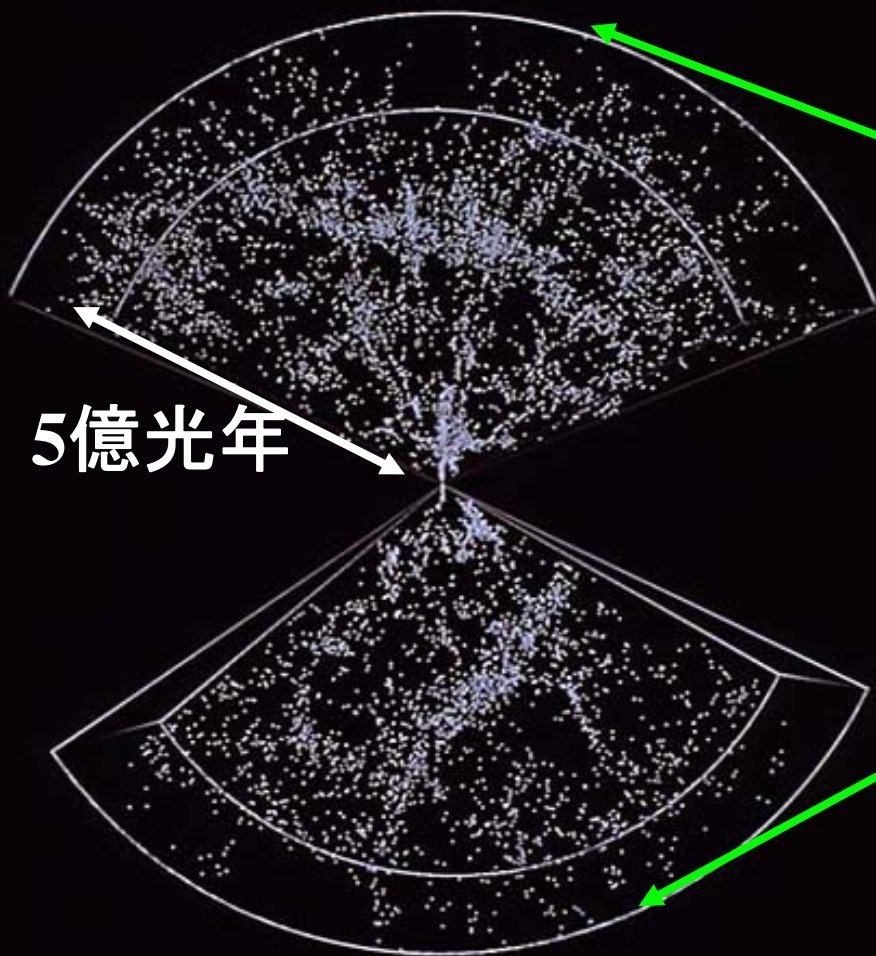
少し遠めの銀河



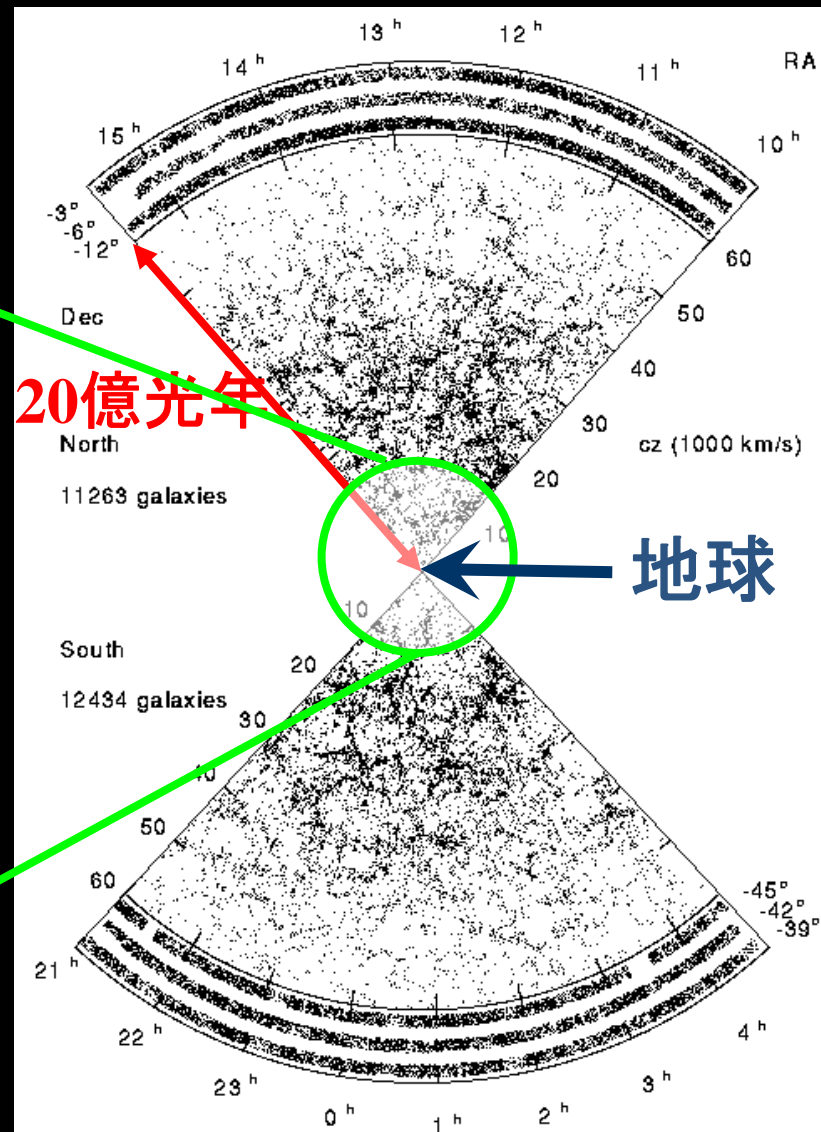
遠めの銀河

- 銀河のスペクトルは基本的にはその中の星のスペクトルの重ね合わせ
- 宇宙膨張のために遠方の銀河ほど吸収線の波長が長いほうにずれる
- これを用いればその銀河が我々から遠ざかっている速度を推定できる

銀河の3次元分布地図



CfA galaxy redshift survey:
Geller, da Costa & Huchra (1992)



Las Campanas redshift survey:
Schectman et al. (1996)

SDSS (スローンデジタルスカイサーベイ) 米国ニューメキシコ州アパッチポイント天文台



NHK教育TV “サイエンスゼロ” 2003年6月11日放映



史上最大の銀河地図作りをめざして： 日米独共同スローンデジタルスカイサーベイ

8千万個の銀河を観測、そのなかの80万個の銀河の3次元地図作り

<http://www.sdss.org/dr1/>

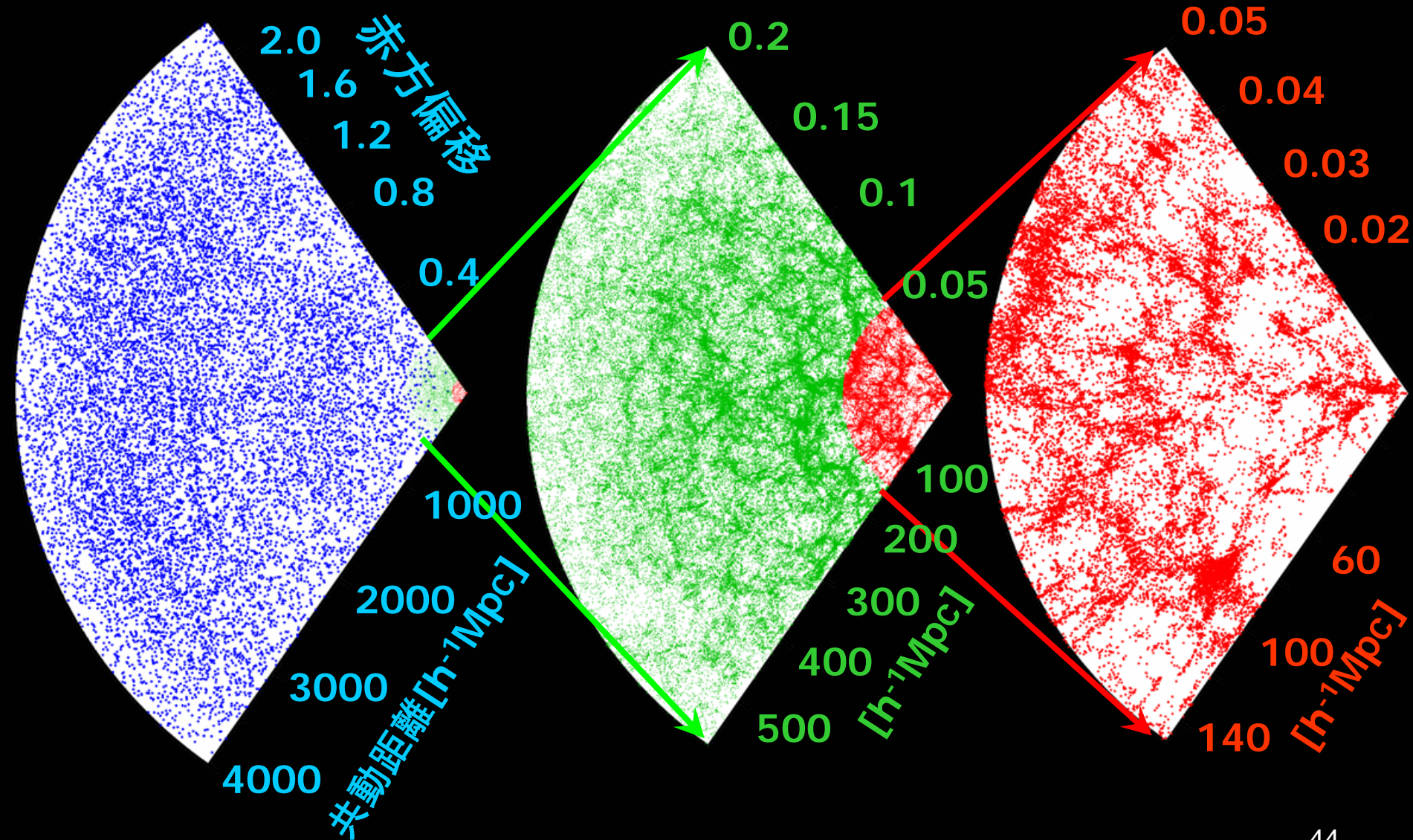


文部科学省

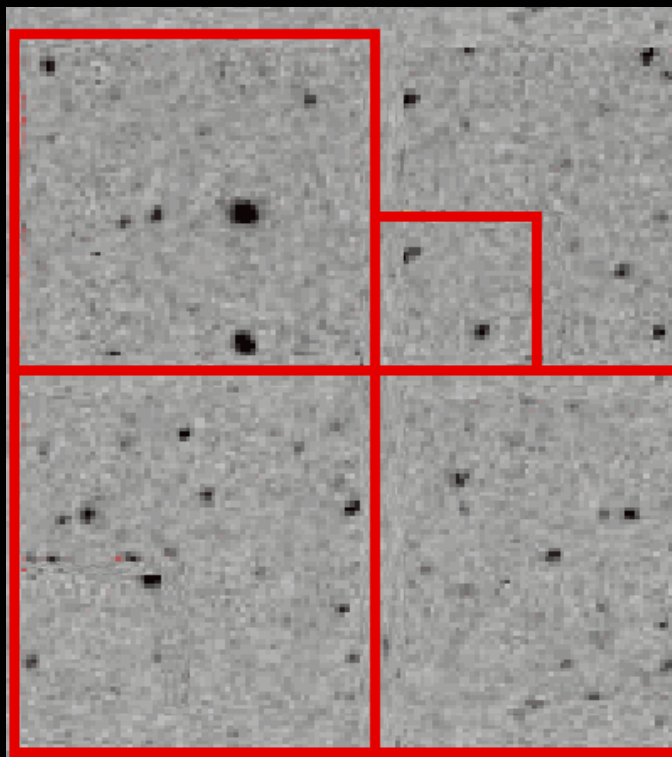
Ministry of Education, Culture,
Sports, Science and Technology

NHK教育 サイエンスZERO 2003年6月11日 0:00 放映

SDSSクエーサーと銀河の宇宙地図



宇宙を見る目 の進歩



地上4m望遠鏡+CCD
100×写真乾板



Hubble Deep Field
ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

HST WFPC2

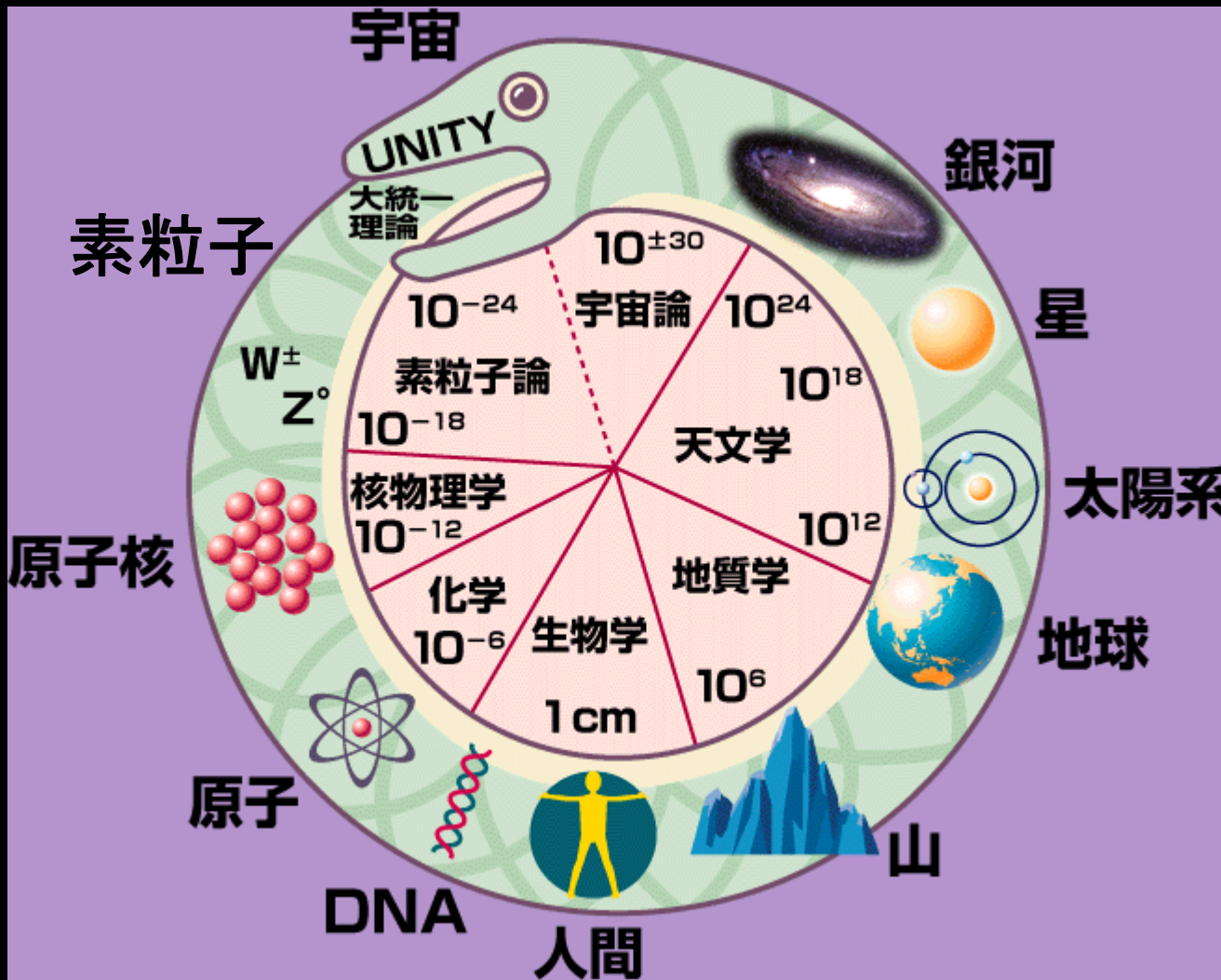
ハッブル宇宙望遠鏡+CCD:1000×
地上望遠鏡

第2講

2007年5月16日 4限目

16:20-17:50

Ⅲ 物理法則と天体



- 宇宙の大きさは約 10^{27} cm, すべての物質を形づくる素粒子の大きさは約 10^{-24} cm
- この約50桁も離れた巨視的世界と微視的世界とは宇宙の進化を通じて結びついている

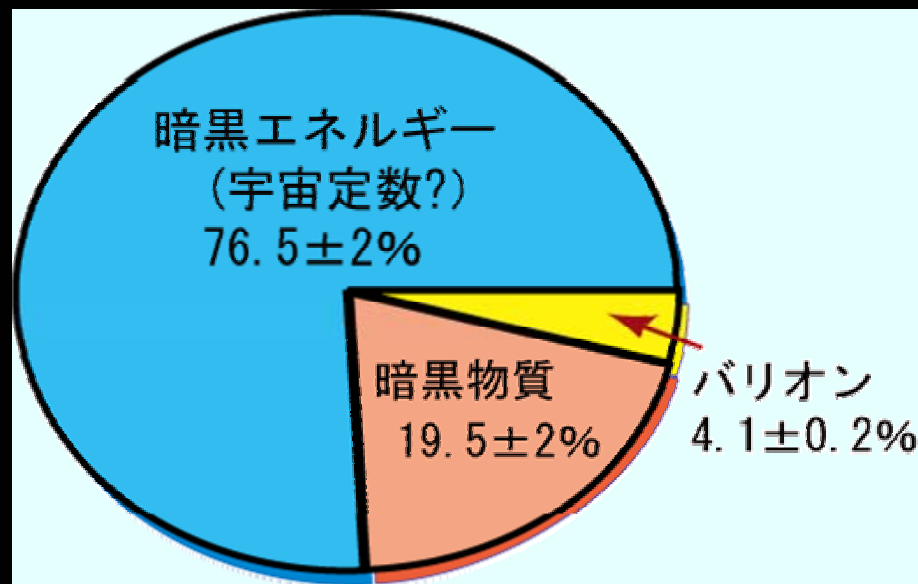
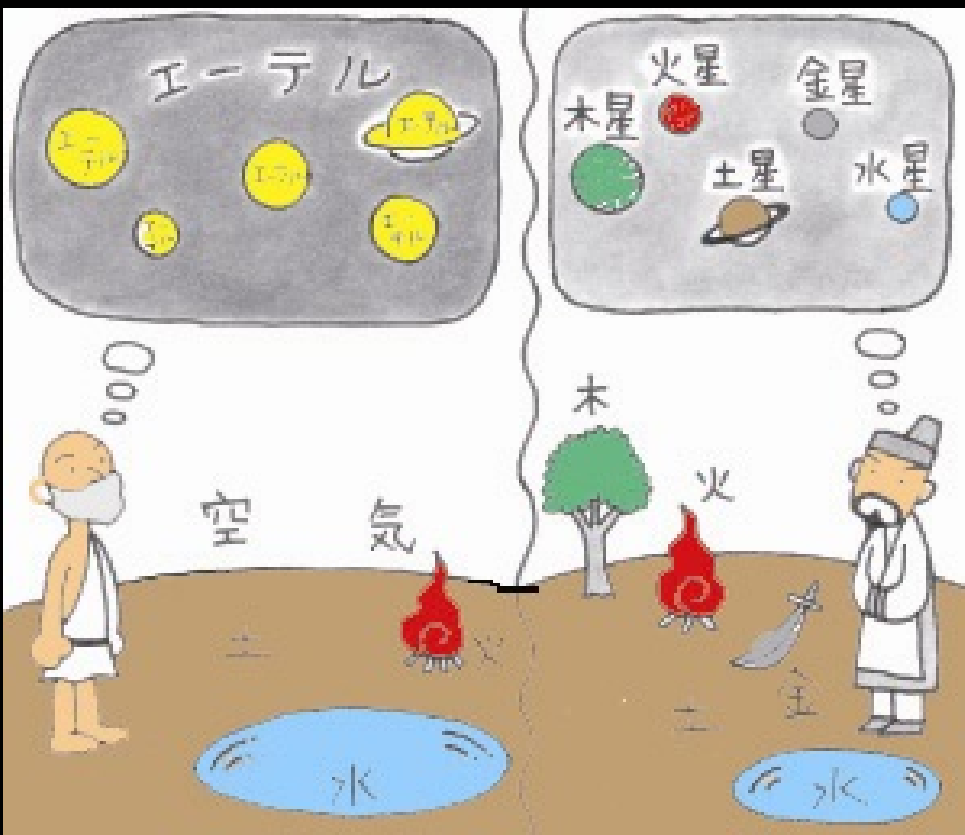
シeldon グラショー 著 ‘Interaction’ のなかの図をもとに作成

第3講

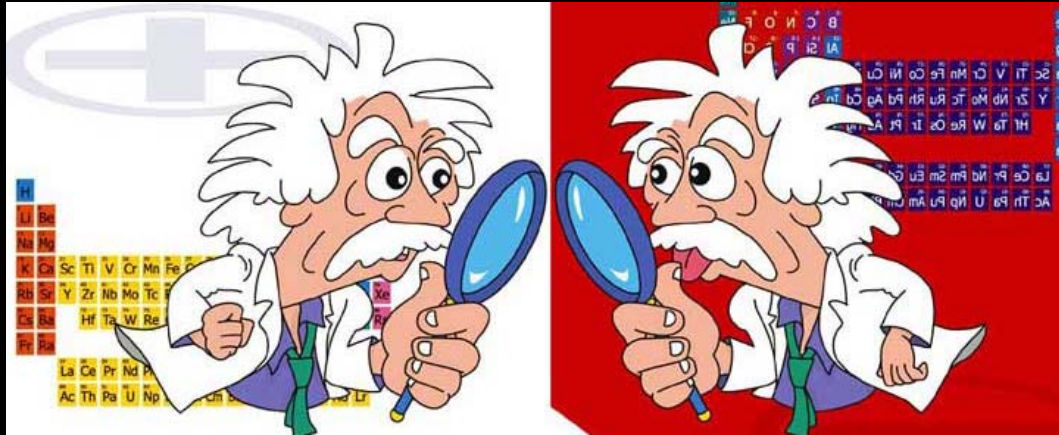
2007年5月30日 3限目

14:40-16:10

IV 宇宙の組成



宇宙は元素だけでできているか？

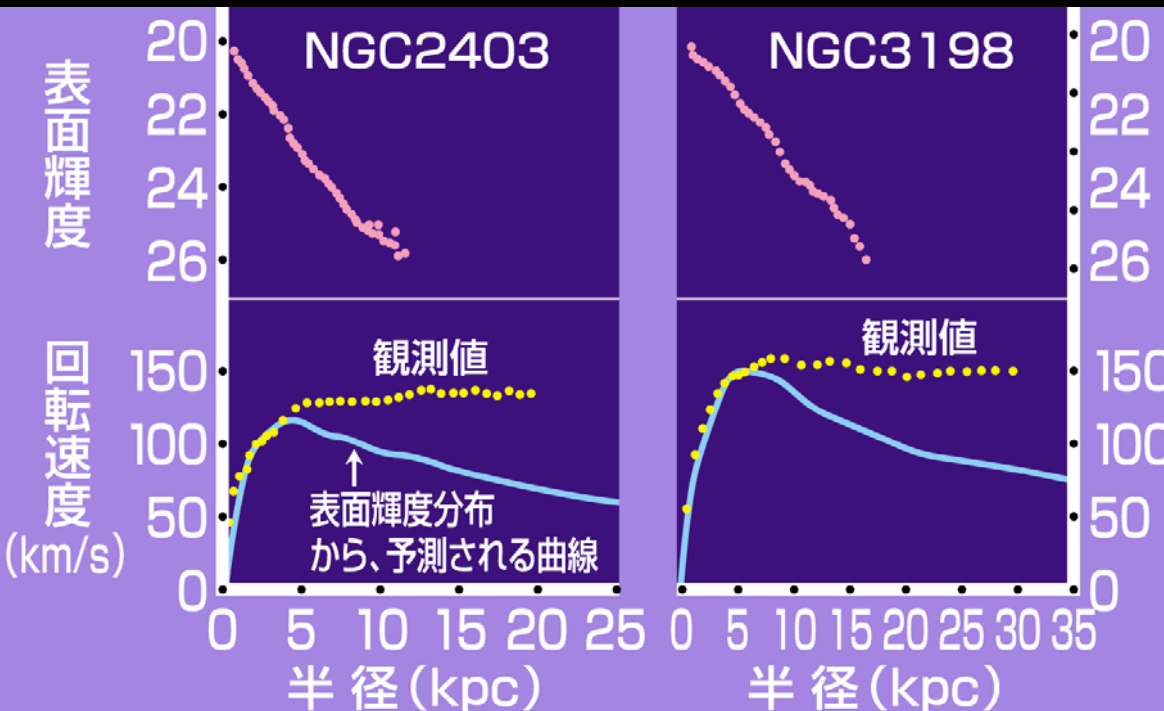


- 宇宙論における最も基本的な質問の一つ
- 20世紀天文学観測の予想外の大発見
 - 宇宙には大量のダークマターが存在
 - 実はさらに大量のダークエネルギーが存在
 - 宇宙はダーク成分に支配されている

銀河に付随したダークマター

- 銀河の平坦な回転曲線⇒ダークマターの存在

van Albada & Sancisi (1986)



銀河の中心から r の距離を円運動する質量 m の星の運動方程式

$$m \frac{v^2(r)}{r} = \frac{GmM(<r)}{r^2}$$

$$\Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{GM(<r)}{r}}$$

$$v(r) = \text{const.} \rightarrow M(<r) \propto r$$

渦巻き銀河では、円盤半径の2倍以上の領域まで(見えない)質量が広がって分布している

暗黒物質ハロー
(ダークハロー)

銀河団に付随したダークマター

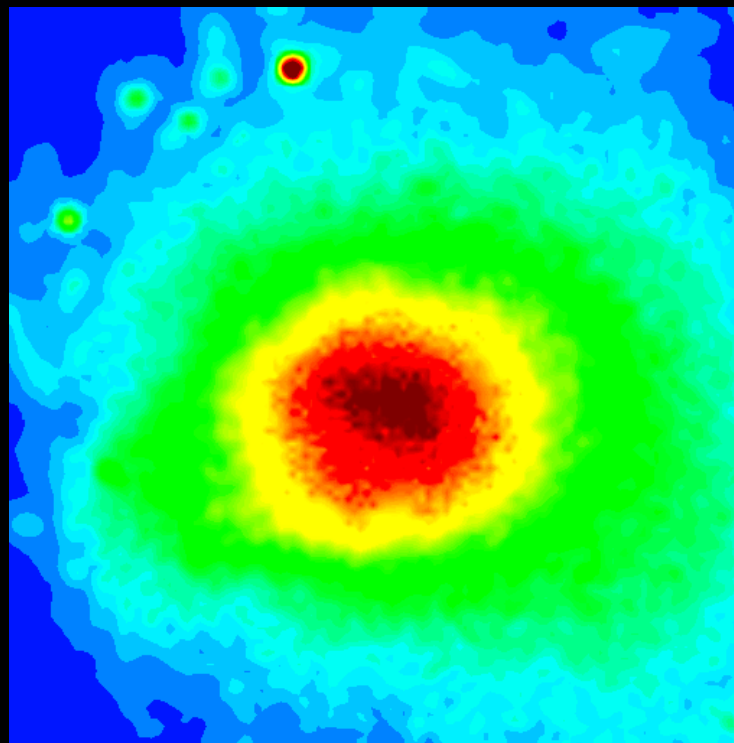
- 銀河団は、銀河、高温ガス、暗黒物質の3成分からなる
- 銀河団の暗黒物質は、星と高温ガスの総質量の約10倍程度

可視光でみた銀河分布



$1h^{-1}\text{Mpc}$

X線でみた高温ガス分布



NASA/GSFC S.L.Snowden氏提供

ダークマターの候補

■ 天文学的ダークマター

- 重力レンズの観測により銀河系ハローの暗黒物質の一部は小質量天体であることがわかっている
- 宇宙のダークマターのすべてを説明することはできない(ビッグバン元素合成からの制限)

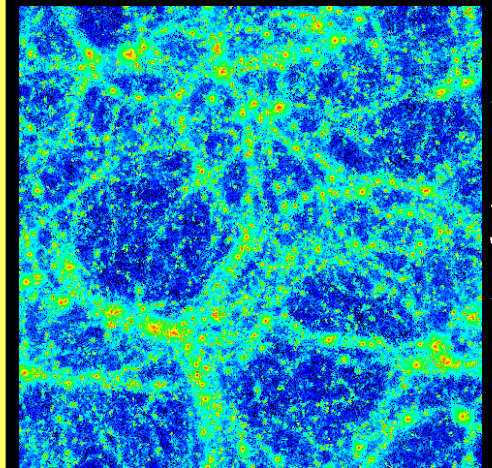
■ 素粒子論的ダークマター

- ニュートリノ以外のダークマター粒子(冷たいダークマター: **Cold Dark Matter**)が必要
- 理論モデルは数多く提案されているが直接的な実験・観測からの裏づけはない

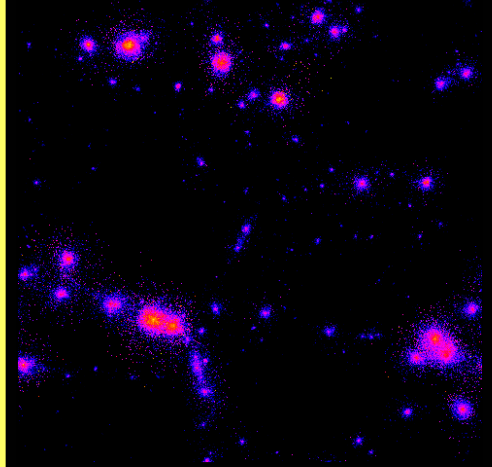
宇宙のダークマター

- 独立な数多くの宇宙観測データがその存在を支持
 - WMAP衛星、銀河の質量密度プロファイル、銀河団からのX線放射強度、銀河の3次元分布、など
- 宇宙の重力(質量)の大半を支配する
 - 宇宙の構造の起源はダークマターの重力
- すでに知られている物質(バリオン)がただ光っていないだけでは説明できない
 - その正体はまだわかっていない
 - ダークマターの直接検出実験は21世紀物理学に残された大きな課題
- 未知の新しい物理学を開拓する鍵

数値シミュレーションによるダークマター分布と明るいバリオンガス分布の比較例



ダークマター



明るいバリオンガス

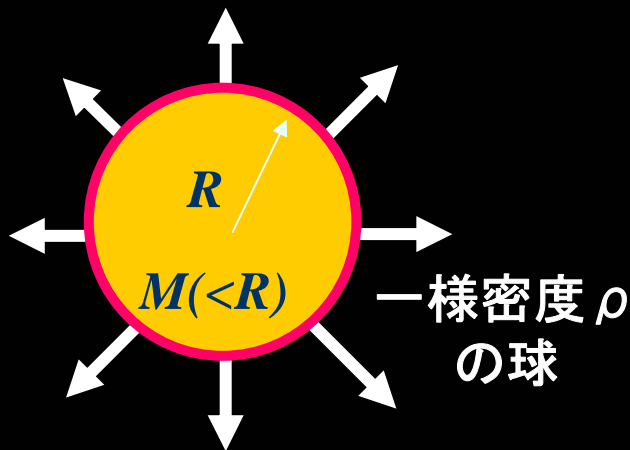
膨張宇宙の運動方程式

■ ニュートン力学による球殻の運動方程式

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{GM(<R)}{R^2} = -\frac{G}{R^2} \left(\frac{4\pi}{3} \rho R^3 \right) = -\frac{4\pi G}{3} \rho R$$

■ 一般相対論による宇宙膨張の方程式もほぼ同じ

- 質量密度 ρ のみならず圧力 p もまた重力源となる
- 万有斥力に対応する「宇宙定数」(Λ)が存在し得る

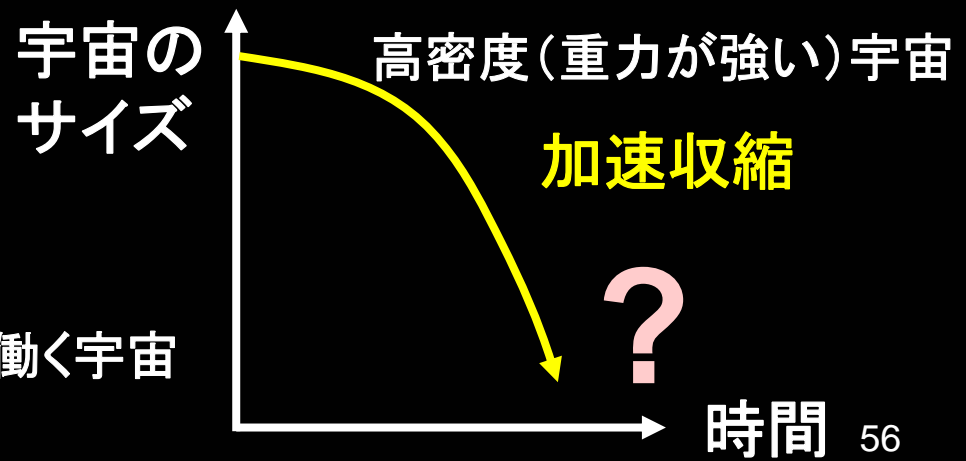
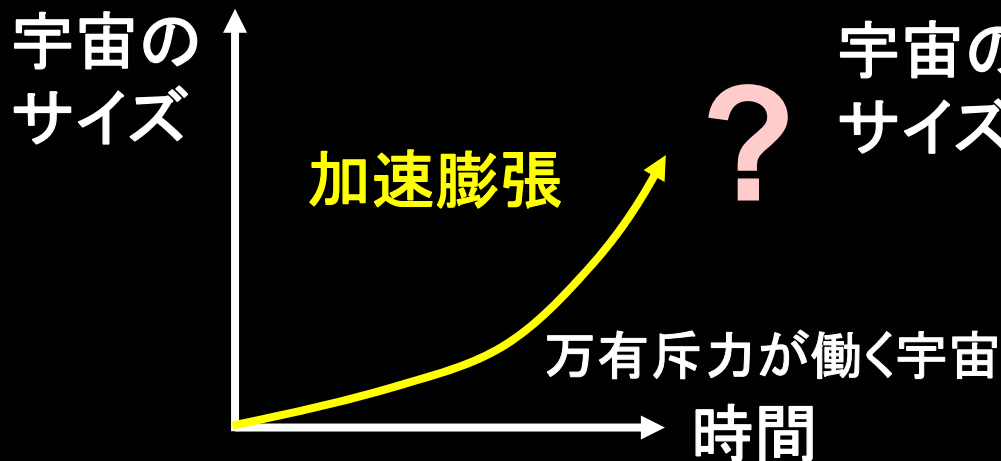
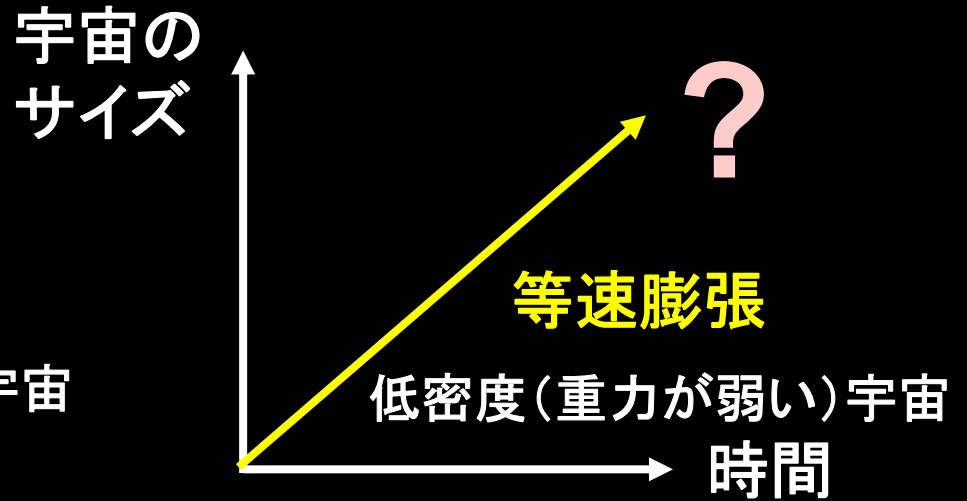
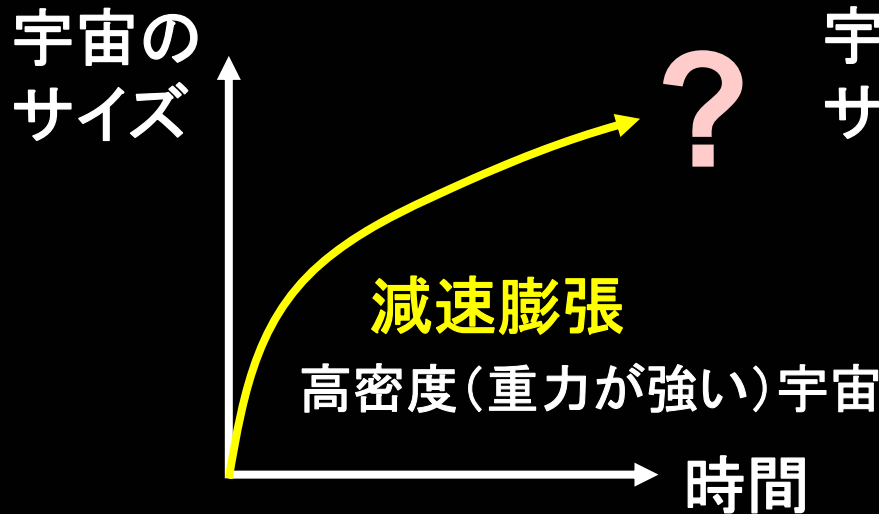


$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

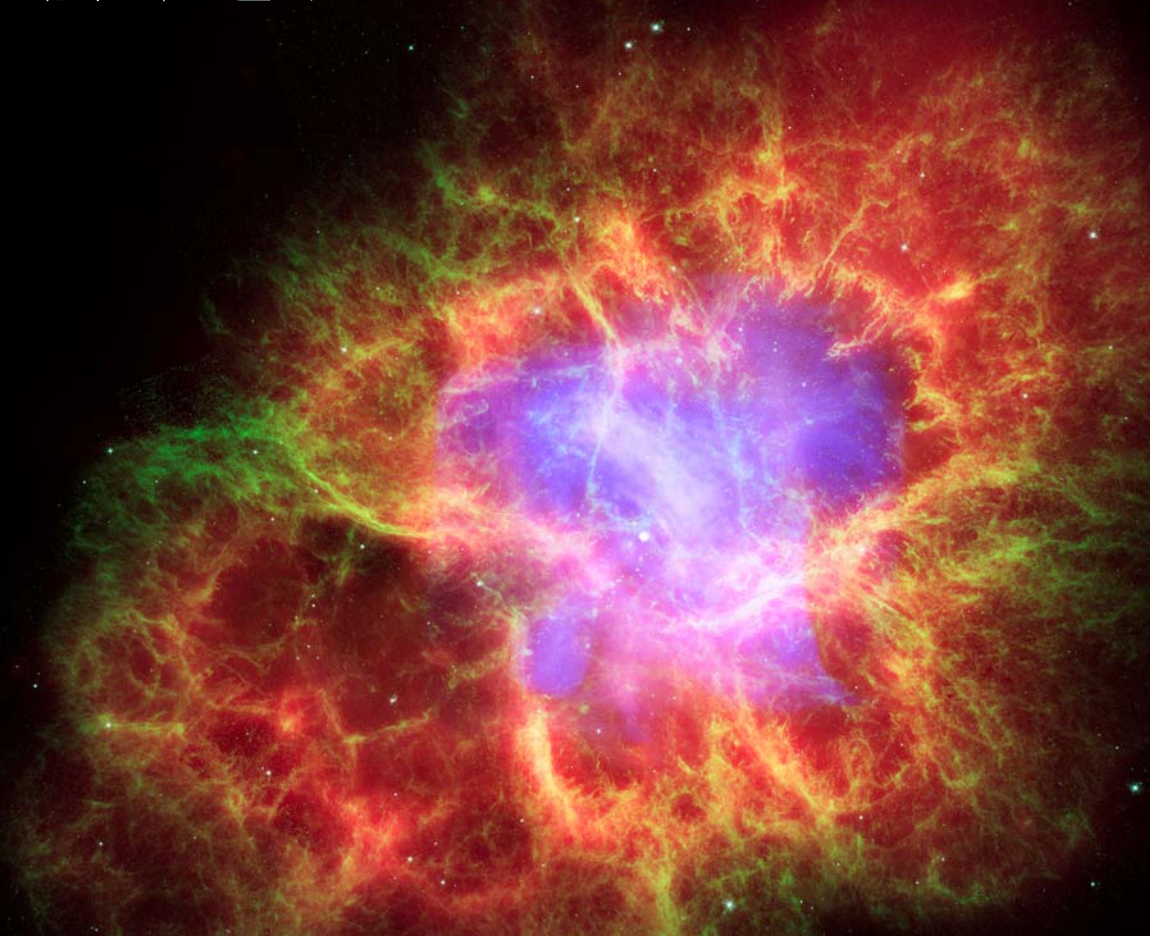
フリードマン方程式

宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 宇宙の構造と進化の観測を通じて、宇宙の組成を決定する ⇒ 宇宙の未来もわかる



宇宙の果ての超新星が 宇宙の加速膨張を明らかにした



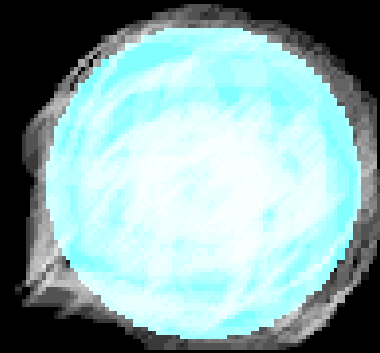
かに星雲

1054年に起こったⅡ型超新星爆発の残骸

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/nebula/2005/37/image/b/>

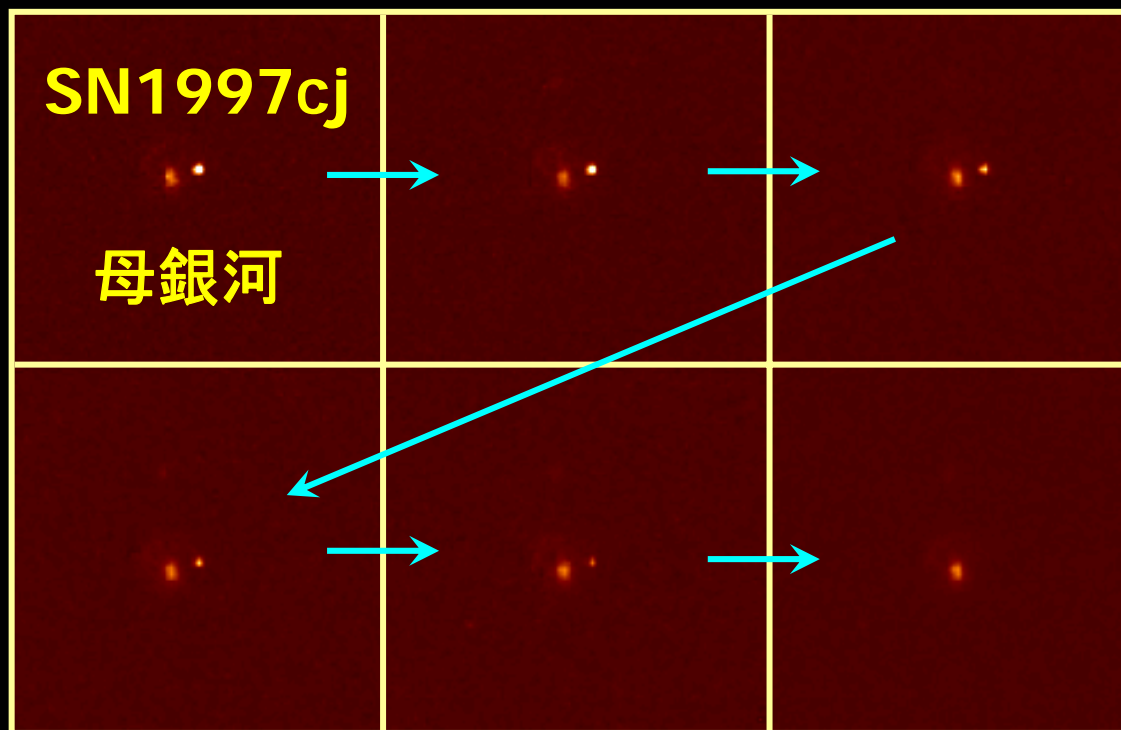
Ia型超新星

- 白色矮星と、核燃料を使い尽くしつつある星とからなる**連星系**の**進化の最終段階**
- 連星系の星の一方の白色矮星に、もうひとつの星から物質が次々と流れこむ
 - 白色矮星(電子の縮退圧で自己重力を支える)には、安定に存在できる最大質量がある
 - チャンドラセカル質量(約1.4太陽質量)
 - これを越えると不安定となり爆発を起こす

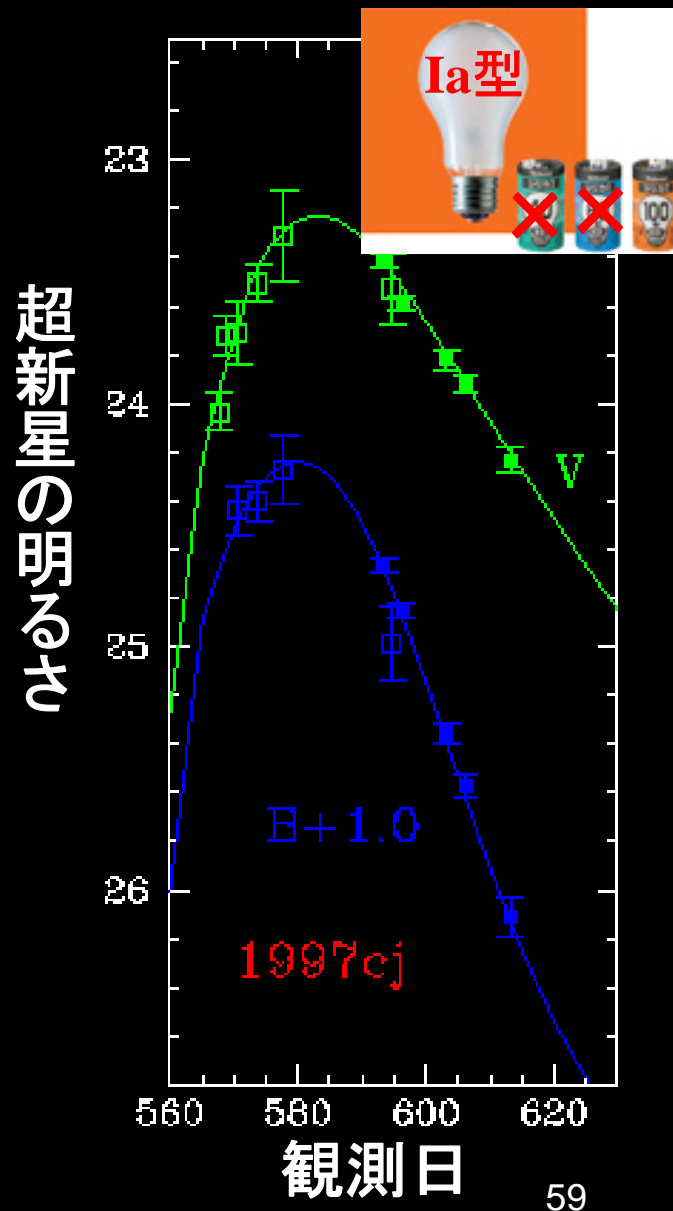


Ia型超新星の光度曲線の測定

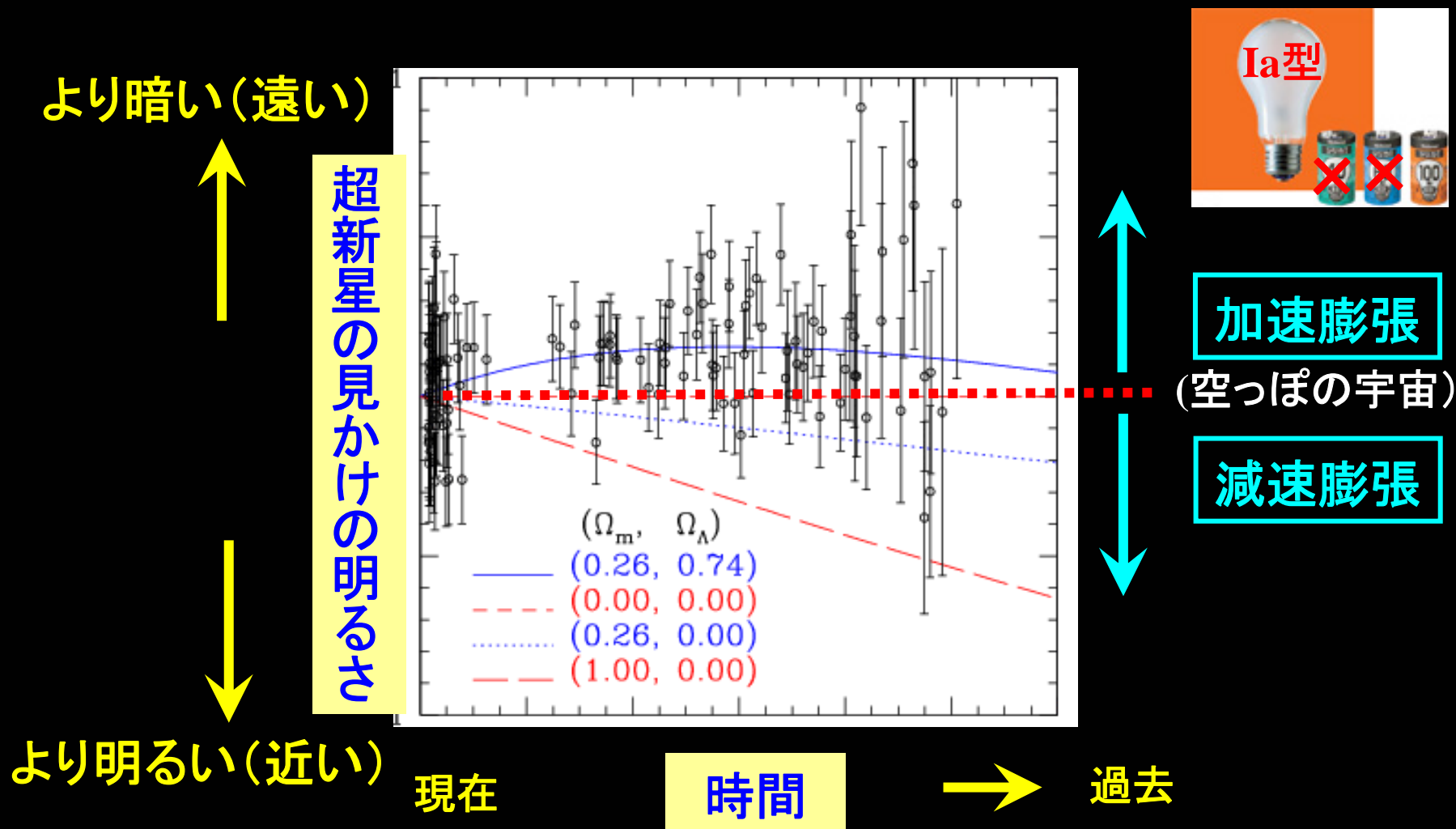
- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



ハッブル宇宙望遠鏡による観測



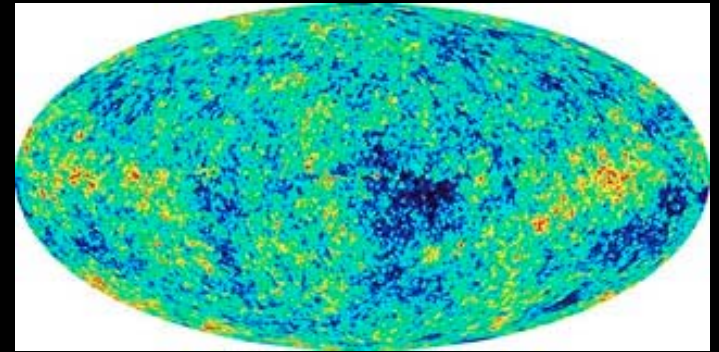
超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見



- 宇宙は加速膨張をしていた！ (1998年)₆₀

137億年前の古文書の解読方法

- 暗号化された状態の古文書
 - 宇宙マイクロ波全天温度地図



- 暗号を解く鍵

- 球面調和関数展開

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

- 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

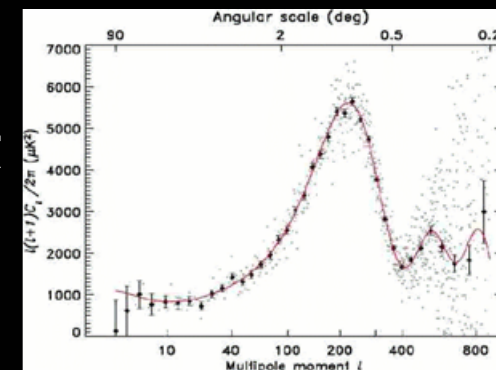
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

- この古文書の意味を理解するための文法

- 冷たい暗黒物質モデルの理論予言

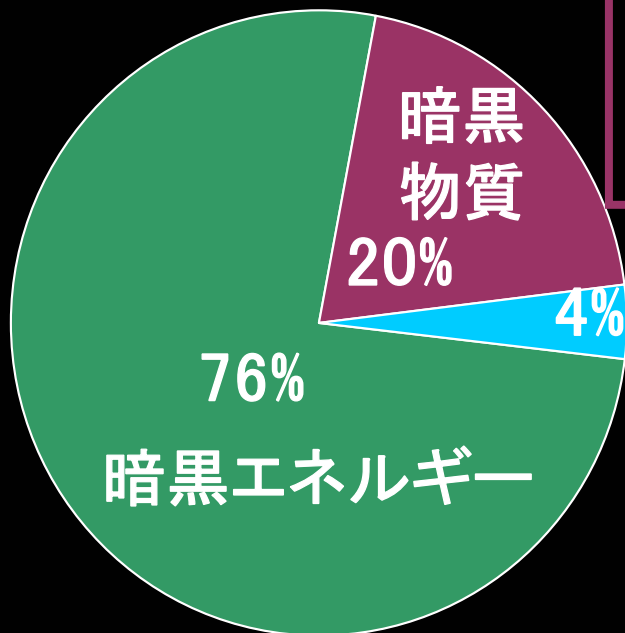
- 隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



宇宙は何からできている？

宇宙の組成



- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量をもつ
- 未知の素粒子が正体？

通常物質 (バリオン=通常元素)

- 宇宙空間を一様に満たしているエネルギーが宇宙の主成分！
- 万有斥力(負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？

- 元素をつくっているもの(主に、陽子と中性子)
- 現時点で知られている物質(の質量)は実質的にはすべてバリオン

宇宙のダークエネルギー

- ダークマターとは異なり、空間を一様に満たす
 - 例えば、本来何もないはずの真空自体が持っているエネルギーのように、宇宙全体を一様に満たしている
- 実効的に「万有斥力」
 - 1917年にアインシュタインが(全く異なる理由から)導入した宇宙定数に対応
- ダークエネルギーは、未知の物理学を探る重要な道しるべかもしれない
 - なぜ $\Omega_A = 0$ でないのか？
 - なぜ、 $\Omega_{DM} \doteq \Omega_A \doteq \Omega_b$ が成り立っているのか

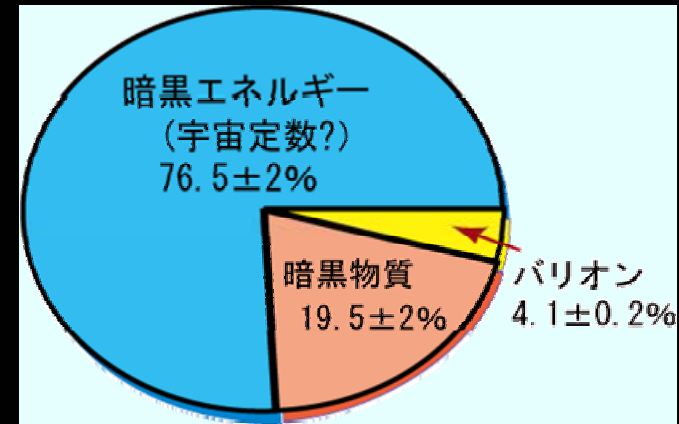
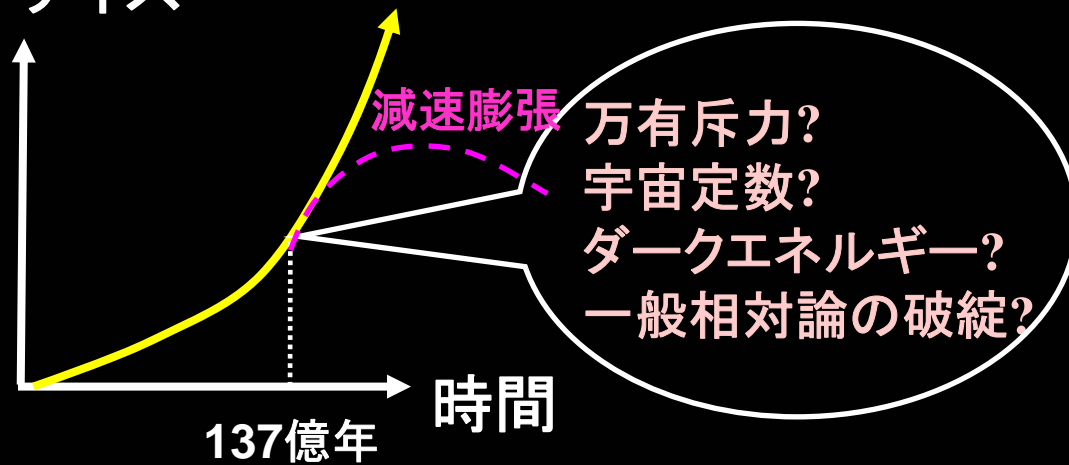
宇宙膨張の未来とダークエネルギー

- 宇宙は膨張している(ハッブルの法則、1929年)
- 将来はどうなるか?
 - 宇宙膨張の加速度の符号を観測する
- 負の加速度、つまり減速する?
 - 重力は常に引力なのであたりまえ
 - やがて密度が十分小さくなり、加速度が0の等速膨張
 - 膨張が遅くなりやがて収縮に転ずる
- 正の加速度、つまり膨張がさらに加速する?
 - 引力である重力を打ち消すような「万有斥力」が必要
 - 普通の物質ではあり得ない、つまり非常識な可能性
 - にもかかわらず観測的に証明されている
 - 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(暗黒エネルギー)の存在

宇宙の組成とダークエネルギー

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



Science誌が選んだ
breakthrough of the year
1998年 宇宙の加速膨張
2003年 ダークエネルギー

- **宇宙の加速膨張の発見(1998年)**
 - 重力は引力なので必ず減速膨張
 - 重力を打ち消すような「万有斥力」が必要
- **加速膨張の原因は何か?**
 - 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
 - アインシュタインの宇宙定数(1917年)?
 - 「真空」がもつエネルギー?
 - 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻
- **いずれも未知の物理学を切り拓く鍵**



仏教的宇宙史観：四劫と億劫

- **四劫：世界の成立から破滅に至るサイクル**
 - **成劫**：世界の成立から、人間が住み、地獄から色界天までが成立する期間
 - **住劫**：人類が世界に安穩に存在する期間
 - **壊劫**：世界の破滅に至る期間
 - **空劫**：次の世界が成立するまでの何も無い期間
- **一劫は43億2000万年に対応する(別の解釈もあるが)**
 - **宇宙の年齢137億年**から考えると、現在は壊劫の終わりから空劫の初めに対応！
 - 物事が「**億劫**」だ、とは、43垓年(4.3×10^{21} 年) かかるほど大変という途方もない意味なので注意！

第4講

2007年5月30日 4限目

16:20-17:50

レベル2 マルチバース

インフレーション理論からは、レベル1よりも精巧な泡が膨らみ、空間の中には別の泡があり、私たちの泡の並行宇宙の存在が浮かび上がってくる。私たちのレベル1マルチバースとは別の泡の中で、泡の中の水滴のようなイメージだ。こうチバース（私たちの宇宙とそれに隣接する空間領域）は泡のようだが、異なる泡では量子場が異なるため、他のなもので、これがより大きなほとんど空っぽの空間に埋め込まれ、泡とは異なった特性が生まれる。

V人間原理

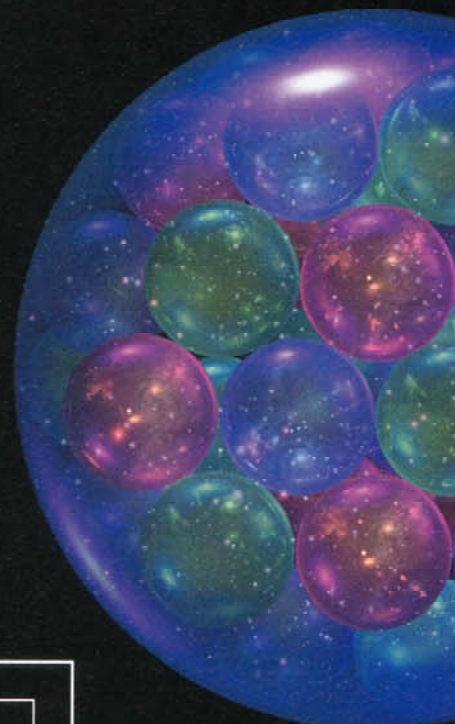


私たちの
レベル1
マルチバース



並行して存在する
レベル1
マルチバース

何もない空間
(膨張している)



並行して存在する
レベル1

泡の生成

異なる種類の量子（インフレーション）の場が空間の急激



自然界における必然と偶然

- 生命の誕生・進化を議論する場合、必然性と偶然性（物理法則と初期条件あるいは外的要因と言い換えても良い）の役割はある程度分離して議論できる
 - 星内部での元素合成と超新星爆発による元素循環
 - その原材料から化学進化によって生命原材料物質が生成
 - これらの物質から（具体的な過程は不明だが）生命が誕生
 - 深海熱水噴出孔？地球外宇宙塵上？
 - 自然淘汰・適者生存
 - 地球の存在、小天体大衝突、気候変動
- 一方、宇宙の誕生の場合には両者の関係は自明ではない
 - 何が初期条件で何が物理法則？

↑必然

偶然↓

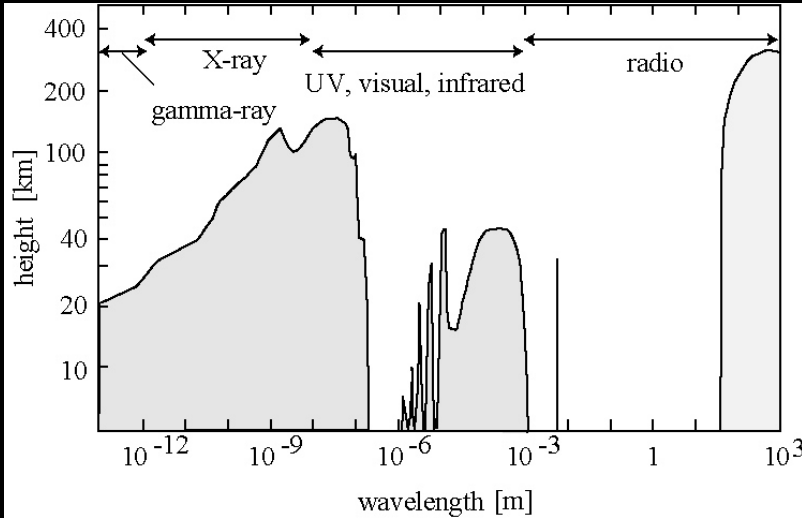
メタ宇宙原理から人間原理へ

- 天文学・宇宙論の歴史は、我々の存在が唯一絶対なものではなく普遍的・自然な存在であることを証明する方向に進んできた
- とすれば、我々の宇宙が唯一無二のものであるという考え方は、時代に逆行しているのではないか？
 - メタ宇宙原理(今回私が仮に名づけただけ):我々が存在する宇宙は決して唯一絶対的なものではなく無限に存在するものなかの一例にしか過ぎない
 - universeという概念から multiverse (M.J.Rees)へ
- 生物学のみならず、宇宙そのものに対しても自然淘汰・適者生存という考え方が浸透しつつある
 - では、「適」とは何に対して適なのか？ ⇒ 人間原理

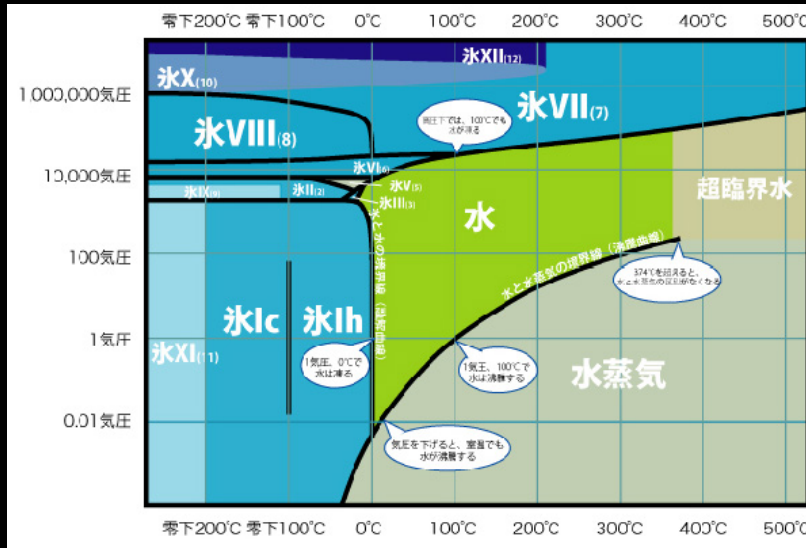
我々の宇宙における不思議な事実

- 無生物から生物が誕生
- 原始生物から意識・文明を持つような人類が誕生
- 宇宙の現在の年齢 \doteq 太陽系の年齢 \doteq 星の年齢 \doteq 生命誕生から知的文明誕生までの所要時間
- 宇宙の大きさは、基本物理定数から決まる値に比べて異常に大きすぎる \doteq 宇宙の密度が低すぎる
- 宇宙の暗黒物質密度 \doteq バリオン密度 \doteq ダークエネルギー(宇宙定数)密度

自然界の絶妙なバランス(1)



天文学への招待(朝倉書店) 図1.2



- 太陽の輻射のピーク付近に対して地球大気が透明であり、かつDNAを破壊する紫外線には不透明。
- 水は例外的に固体の氷のほうが密度が低い。仮に、逆であれば、いったん凍った氷は海や湖の底にどんどん沈んでしまいその後融けることはなかろう。したがって、結局海や湖がすべて凍ってしまい、生命を産みまた循環させることは不可能。
- 男子の出生率は女子に比べて若干高い。これは、男子の方がやや病気に対して弱いからそれを補っているのだというもっともらしい後付けの理屈がある(男は戦争時により危険な立場にあるからというさらにすごい説まで)。
- なぜ成人の男と女の比が1対1である必要があるかは疑問ではあるが、これは生物学的な第一原理から物事を説明することを避けたいかにもダーウィンの説明の典型例で、人間原理もこの延長線上にあるのかも。

ヒトを構成する元素

■ ヒト

- 酸素 63%
- 炭素 20%
- 水素 9%
- 窒素 5%
- カルシウム 1%
- その他 2%

■ 地殻

- 酸素 47%
- ケイ素 28%
- アルミニウム 8%
- 鉄 5%
- カルシウム 4%
- ナトリウム 3%
- カリウム 3%
- その他 2%

「新しい高校生物の教科書」(2006)より

- ヒトは少数の元素からなる
- 炭素の割合が異常に多い
- 炭素の多様な結合性が生命にとって重要

自然界の絶妙なバランス(2)

■ 炭素の多様な結合性が生物の存在の基盤

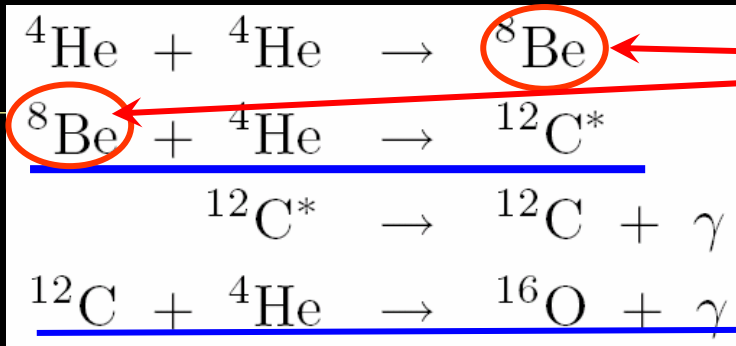
■ Hoyle(1952)は、星のなかで炭素が合成されることを要請して、共鳴状態 $^{12}\text{C}^*$ の存在を予言。その後実験的に確認された。この準位はまさに絶妙で奇跡的な値に微調整されている！(人間原理のはしり)

■ $^8\text{Be}-^4\text{He}$ 系の準位： $^{12}\text{C}^*$ を介して ^{12}C を生成

■ $7.3667\text{MeV} \leq ^{12}\text{C}^*$ の準位： 7.6549MeV

■ $^{12}\text{C}-^4\text{He}$ 系の準位：すべてが ^{16}O になることはない

■ $7.1616\text{MeV} \geq ^{16}\text{O}$ の準位： 7.1187MeV



不安定
(半減期 2×10^{-16} 秒)

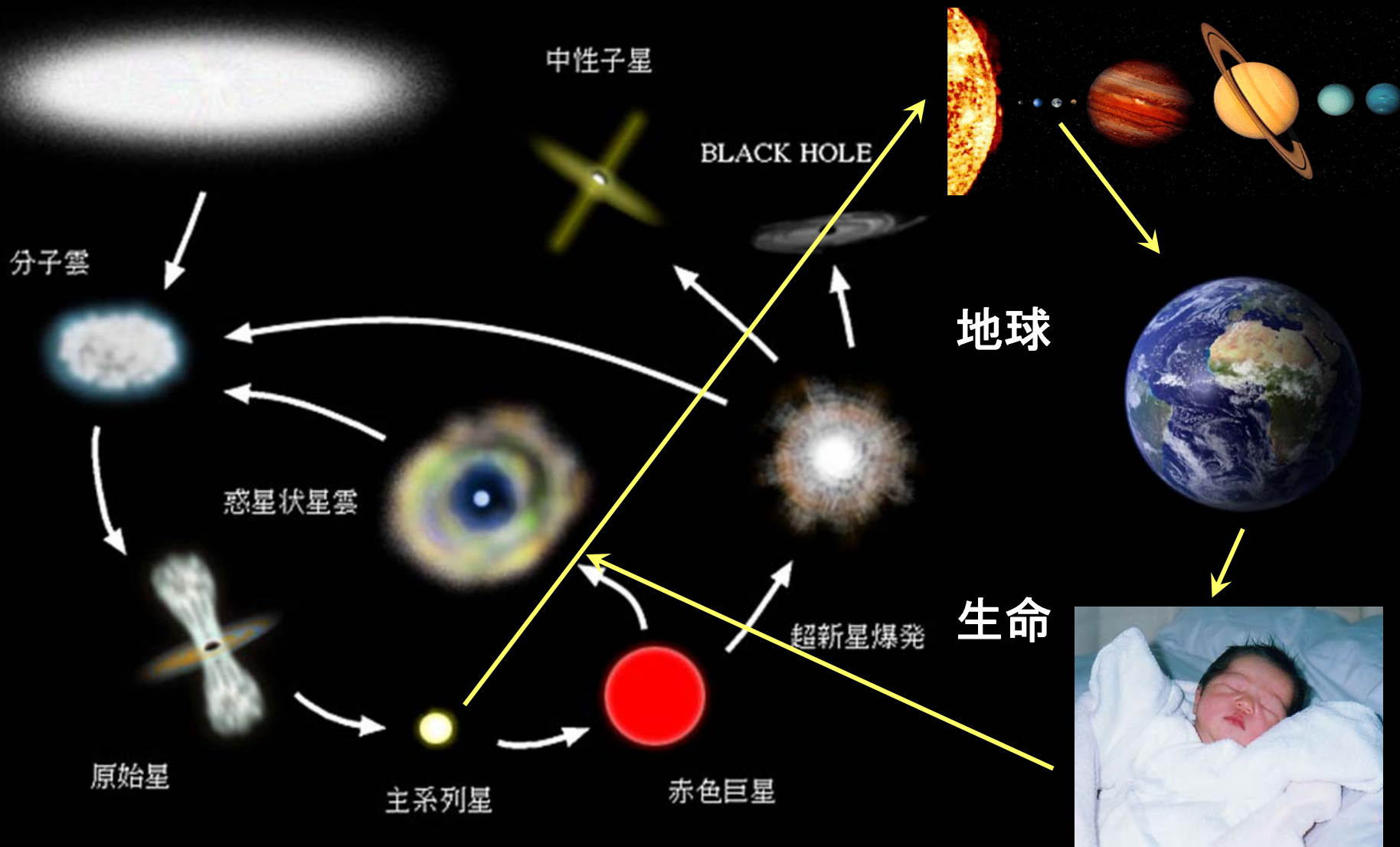
1	1	←	←	←	←
1	H	←	←	←	←
	1.008	←	←	←	←
	水素	←	←	←	←
3	Li				
6.941					
リチウム					
4	Be				
9.012					
ベリリウム					

2	He				
4.003					
ヘリウム					
5	B	6	C	7	N
10.81		12.01		14.01	
ホウ素		炭素		窒素	
8	O	9	F	10	Ne
16.00		19.00		20.18	
酸素		フッ素		ネオン	

ビッグバン、天体形成史、元素循環

BIG BANG

太陽系



自然界の絶妙なバランス(3)

- **強い相互作用の結合定数: α_s**
 - $\alpha_s \uparrow \Rightarrow$ ${}^2\text{He}$ が存在できるとすべての水素がヘリウムになる \Rightarrow 水ができない
 - $\alpha_s \downarrow \Rightarrow$ 水素のみになり高分子ができない
($= e^2 / \hbar c \approx 1/137$)
- **電磁相互作用の結合定数: α_E**
 - $\alpha_E \uparrow \Rightarrow$ 原子核がクーロン斥力で壊れる
 - $\alpha_E \downarrow \Rightarrow$ 高分子ができない
- **弱い相互作用の結合定数: α_W**
 - $\alpha_W \uparrow \Rightarrow$ 中性子のベータ崩壊の寿命 $\downarrow \Rightarrow$ ビッグバン元素合成以前に中性子が消滅し、水素しか残らない
 - $\alpha_W \downarrow \Rightarrow$ 中性子と陽子の質量差1.29MeVよりずっと以前に弱い相互作用が切れる(普通は宇宙の温度が0.7MeVの頃) \Rightarrow 中性子と陽子の個数比は1:1 \Rightarrow ビッグバン元素合成の際すべてがヘリウムになってしまう
- **相互作用定数が極めて限られた範囲にない限り、生物を誕生させることは不可能、すごい偶然?**

ディラックの大数仮説

- 我々の世界にはなぜか、 10^{40} あるいはその2乗といった、言語道断の桁を持つ(意味ありげな?)無次元量が存在する
- さらにそれらは、本来ミクロな物理法則だけで決まるものと、宇宙に関して初めて登場するものの2種類が存在

- 宇宙年齢と古典電子半径の通過時間

$$N_1 \equiv \frac{t_0}{e^2 / m_e c^3} \approx 6 \times 10^{39}$$

- 陽子電子間の電気力と重力の比

$$N_2 \equiv \frac{e^2}{G m_p m_e} \approx 2 \times 10^{39}$$

- これらが独立であるはずがない。つまり、たまたま現在成り立っているのではなく常に成立していると考えるのが自然 ?

(P.Dirac 1937; Nature 137, 323)

$$G(t) \approx \frac{\alpha^2 \hbar^2}{m_p t} \propto \frac{1}{t}$$

(もし他の基本定数が時間変化しなければ)

基本物理「定数」は時間変化する？

- 「現在」が宇宙の歴史においてなんら特別な時期ではないとすれば(コペルニクスの)、物理「定数」は時間変化すると思うほうが自然
- 重力定数の時間変化への上限(連星パルサー)
$$\dot{G}/G = (1.0 \pm 2.3) \times 10^{-11} \text{yr}^{-1} < 0.1/t_0$$
- 微細構造定数については遠方クエーサーの吸収線の観測より有意な時間変化を主張するグループもある
 - Webb et al. PRL82(1999)884, PRL 87(2001)091301
$$\Delta\alpha_E / \alpha_E = (-0.72 \pm 0.18) \times 10^{-5} (0.5 < z < 3.5)$$
- 少なくとも、物理定数に対してすら「神聖にして侵すべからざるもの」というタブー視の風潮は弱まってきた

人間原理の立場

- これらの「偶然」を、(未知の、本当にあるかさえもわからない)究極理論によって自然に説明することなどできるのだろうか？
- すべてのことに「自然」な説明が存在するはずである、というのは物理屋が陥りやすい一種の信仰に過ぎないのでは？
- とすれば、この偶然は「人類(知的文明)が誕生する」宇宙でのみ実現されているだけではないのだろうか？という信仰(人間原理)の自由もまた保障されるべきではないか？

人間原理の算数

- 極度にありえない事象を同等にありえない事象が成り立つ場合の条件付確率として理解してはどうか？
- $P(\text{不思議なこと}) \ll 1$ であるが、 $P(\text{人間の存在})$ もまた $\ll 1$ であるから、「不思議なこと」と「人間の存在」が相関していたならば、その条件付確率 $P(\text{不思議なこと} | \text{人間の存在}) \approx 1$ となることはあり得る

$$P(\text{不思議な事} | \text{人間の存在}) = \frac{P(\text{不思議な事、人間の存在})}{P(\text{人間の存在})} \gg P(\text{不思議な事})$$

- 不思議さが減り、何か心が安らぐような気がする（自然科学かどうかは別として宗教としては本質的）

人間原理

- 我々の宇宙が唯一無二である必然的理由はない
 - (少なくとも) 10^{500} 個以上の因果的に切り離された宇宙が存在する可能性が素粒子論から指摘されている
- これらの宇宙では物理法則が異なっているかもしれない
 - 物理定数(重力定数、光速度、素電荷、プランク定数)さらには宇宙定数の値が違っているかもしれない
- それらのなかで、たまたま人間を生むような偶然が可能となる宇宙が我々の宇宙
 - ほとんどの「当たり前」の宇宙では人間は誕生しない。そこでは、「これが当たり前」と気づいてくれる人間が存在し得ない。
 - 「例外的に珍しい」宇宙でのみ人間が誕生する。そこに「なぜこの宇宙はこのように不思議なのだろうか」と思い悩む人間が存在するのは当然。全宇宙から見れば確かに「珍しい」宇宙。
 - とすれば、人間が生まれるような奇跡・偶然がなぜ起こりえたのか不思議に思う必要は本来ない

Multiverse

人間原理を適用するには
多重宇宙/並行宇宙の存在が大前提

- レベル1: 我々が観測可能な地平線の外の領域に存在
- レベル2: 無限の宇宙の中に島宇宙的にポツリポツリと存在
- レベル3: 量子力学の多世界解釈による宇宙
- レベル4: 数学的論理構造そのものが宇宙の形態として存在(プラトンの)

Level 1: Regions beyond our cosmic horizon

Features: Same laws of physics, different initial conditions

Assumptions: Infinite space, ergodic matter distribution

Evidence:

- Microwave background measurements point to flat, infinite space, large-scale smoothness
- Simplest model

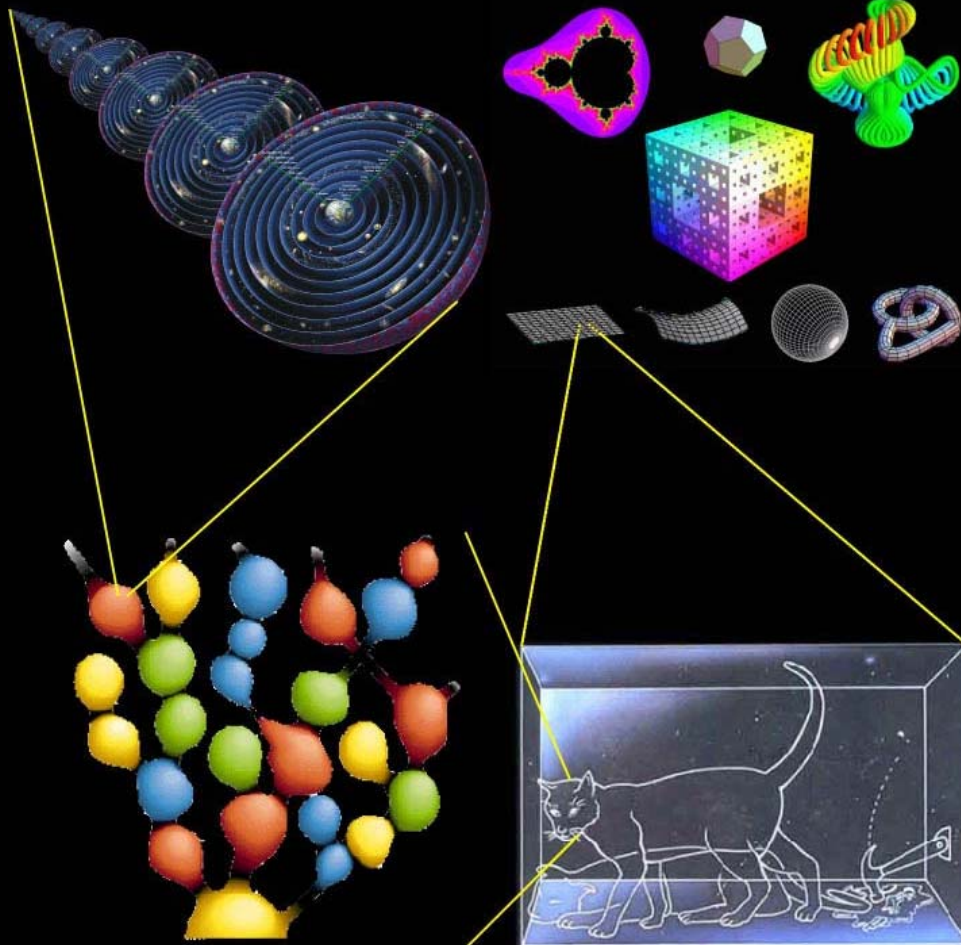
Level 4: Other mathematical structures

Features: Different fundamental equations of physics

Assumption: Mathematical existence = physical existence

Evidence:

- Unreasonable effectiveness of math in physics
- Answers Wheeler/Hawking question: "why these equations, not others"



Level 2: Other post-inflation bubbles

Features: Same fundamental equations of physics, but perhaps different constants, particles and dimensionality

Assumption: Chaotic inflation occurred

Evidence:

- Inflation theory explains flat space, scale-invariant fluctuations, solves horizon problem and monopole problems and can naturally explain such bubbles
- Explains fine-tuned parameters

Level 3: The Many Worlds of Quantum Physics

Features: Same as level 2

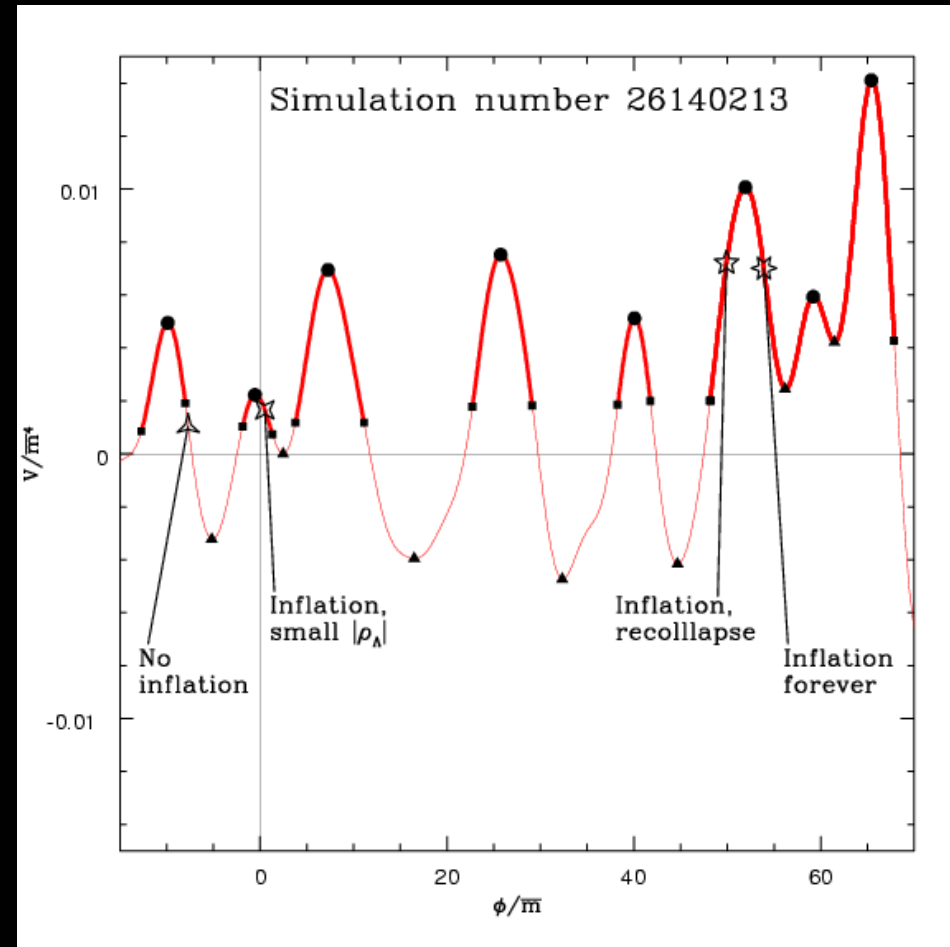
Assumption: Physics unitary

Evidence:

- Experimental support for unitary physics
- AdS/CFT correspondence suggests that even quantum gravity is unitary
- Decoherence experimentally verified
- Mathematically simplest model

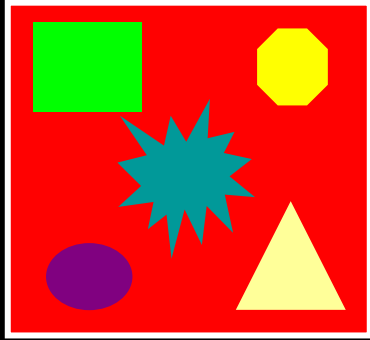
インフレーションシナリオ的多重宇宙

- インフレーションを起こす場はもともと空間各点で任意の値をとっていると考えるのが自然
- またそのポテンシャルエネルギーの形もさまざまなものがあるはず
- しかし、うまく我々の宇宙につながるためにはこれらの微調整が必要
- どれほど小さな領域であろうと、いったんインフレーションを起こしてしまえば、そこが主要な体積を占めるようになる
- 逆に言えば、この考えは多重宇宙と実に相性が良い



Tegmark astro-ph/0410281

インフレーションシナリオ的世界観： 自然淘汰と適者生存



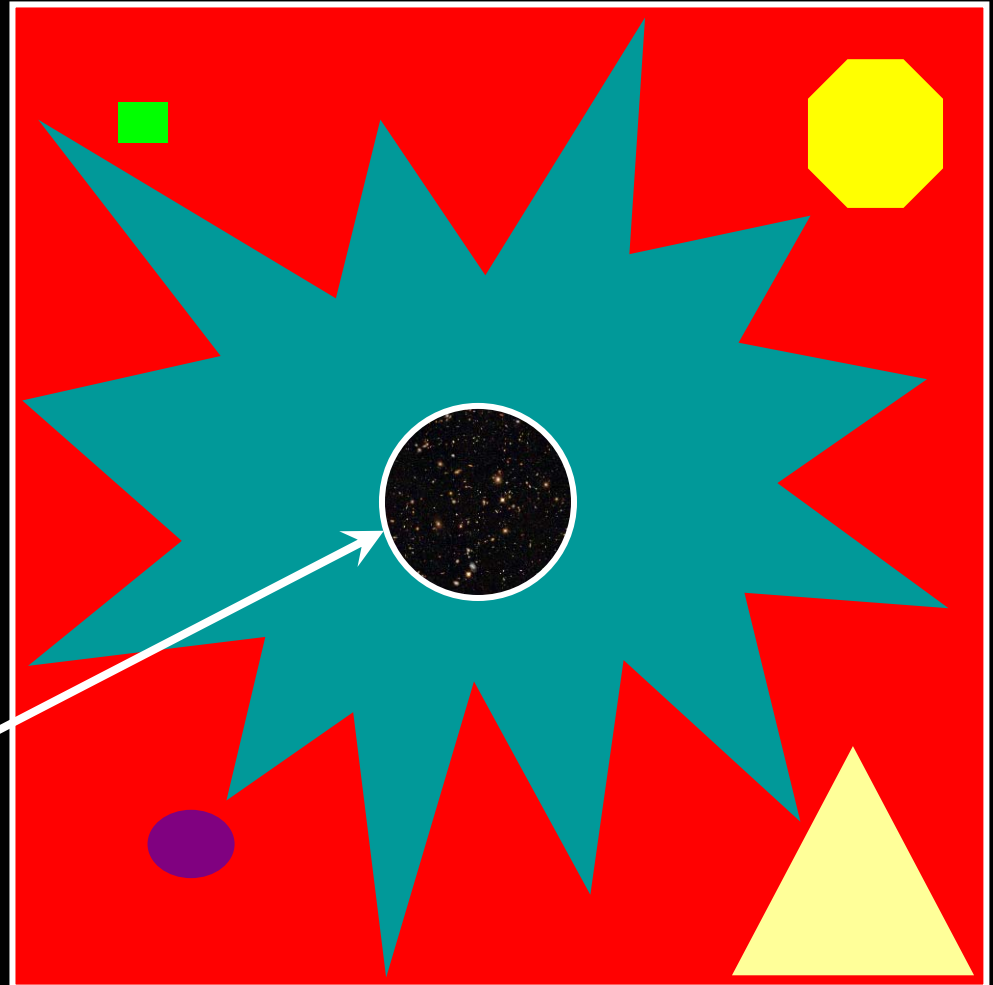
インフレーション前：

空間の異なる領域はそれぞれ異なる初期条件（例えばインフレーションを起こす場の初期値）を持つ



インフレーション後：

適切な初期条件を持った領域だけが指数関数的膨張をし、現在の（我々の）宇宙をつくることのできる



現在の宇宙の地平線
（因果関係を持ちうる
観測可能領域）

レベル2 multiverse

私たちの宇宙

何も無い空間
(膨張している)

私たちのレベル1 マルチバース

- カオス的インフレーションシナリオに即した多重宇宙の描像
- その中に存在するレベル1 multiverse毎に物理法則が異なっているかも知れない

泡の生成

ある種の量子（インフラトン）の場が空間の急激な膨張を引き起こす。空間の中では、ランダムなゆらぎが存在し、この量子場はなかなか消えずに残る。しかし、ある領域では量子場が弱まり、膨張が緩やかになる。こうした領域が泡になる。

場の強さ

位置

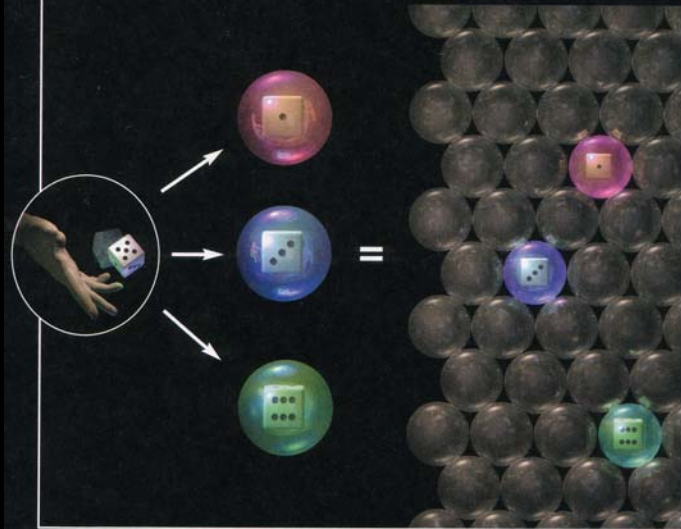
並行して存在するレベル1 マルチバース

inset()

レベル3 multiverse

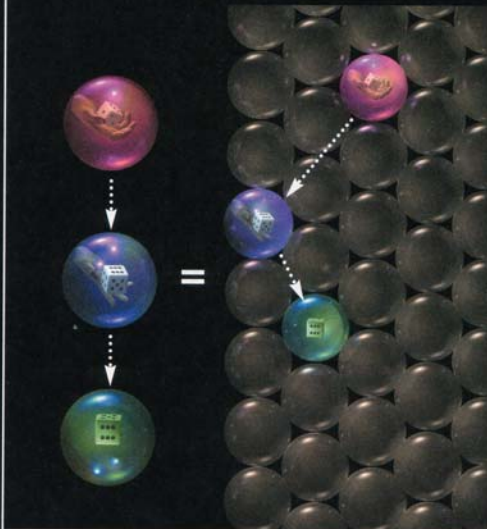
エルゴード性

エルゴード性の原理によると、量子並行宇宙はもっと平凡なタイプの並行宇宙と等価だ。1つの量子宇宙はやがて状態が確定した複数の宇宙に分岐する(左)。しかし、こうして新たに生まれた宇宙は、どこか別の空間(右、図ではレベル1マルチバース)にもとから存在していた並行宇宙と変わらない。さまざまな事象がどんな順序で起きるのかを体現したものが並行宇宙だと考えるのがポイントだ。この考え方はどんなタイプの並行宇宙にも当てはまる。

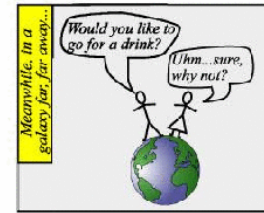


時間の本質

普通、時間は変化を記述するための手段と考えられることが多い。物質はある瞬間にある配置を取り、次の瞬間には別の配置になるという具合だ(左)。しかし、並行宇宙の概念では別の見方ができる。考える物質配列が一連の並行宇宙の中にすべて含まれているなら(右)、時間とはこれらの宇宙に順番をつけるやり方にすぎない。個々の宇宙は静的なもので、変化は幻想ということになる。もっとも、この幻想は興味深いものではあるが。

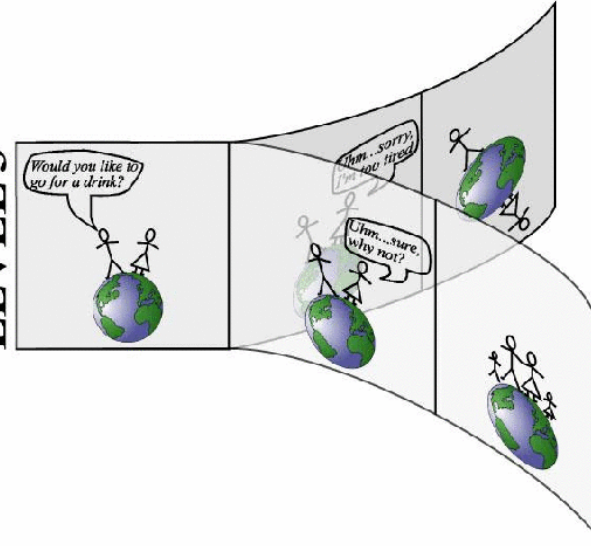


LEVEL 1



Meanwhile, in a galaxy far, far away...

LEVEL 3



日経サイエンス2003年8月号 pp.26-40

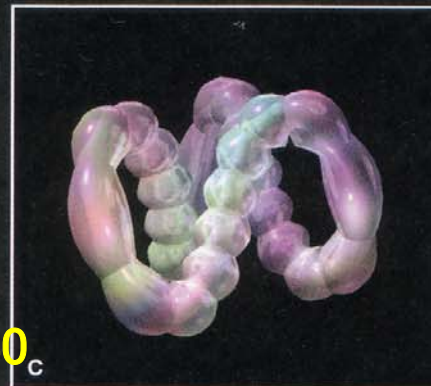
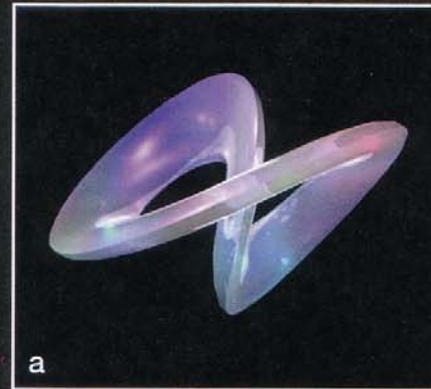
- エベレットによる量子力学の多世界解釈に基づく
- レベル1、レベル2に比べるとずっと概念的で突拍子もない考えのようであるが、この量子力学的解釈を支持する人は多い

レベル4 multiverse

レベル4 マルチバース

究極の並行宇宙はあらゆる可能性を含む。その位置や宇宙論的な特性、量子状態が異なるだけでなく、物理法則まで異なる宇宙の存在が考えられる。これらの宇宙は空間と時間を超えたところにあるので、目に見えるように描くのはまず不可能だ。最良の方法は、抽象的に思い描くこと。宇宙とは、それを支配する物理

法則の数理的構造を表現した「彫刻」のようなものといえる。例えば1つの単純な宇宙を考えよう。地球と月、太陽があり、ニュートン力学に従っているとす。客観的立場の観測者からは、この宇宙は組み紐で覆われた丸い輪のように見える（丸い輪は地球の軌跡、それを覆う組み紐は地球を周回する月の軌跡）。物理法則が異なれば、宇宙の形も異なってくる（a～d）。この考え方に立つと、物理学の根本にかかわるさまざまな問題が解決する。



人間原理は自然科学の枠内か？

■ 究極理論 vs. 人間原理

- 我々の宇宙と物理法則は必然性があり唯一のもの
- 宇宙とそこでの物理法則の「母集団」はかなりブロードな分布をしているが「人間が存在する」という条件によって選択された結果として選ばれた特殊なものが我々の宇宙である
- 真実はおそらくこの中間で、むしろ人間原理的選択効果は究極理論と対峙するものではなくむしろその一部分として包含されるものかもしれない

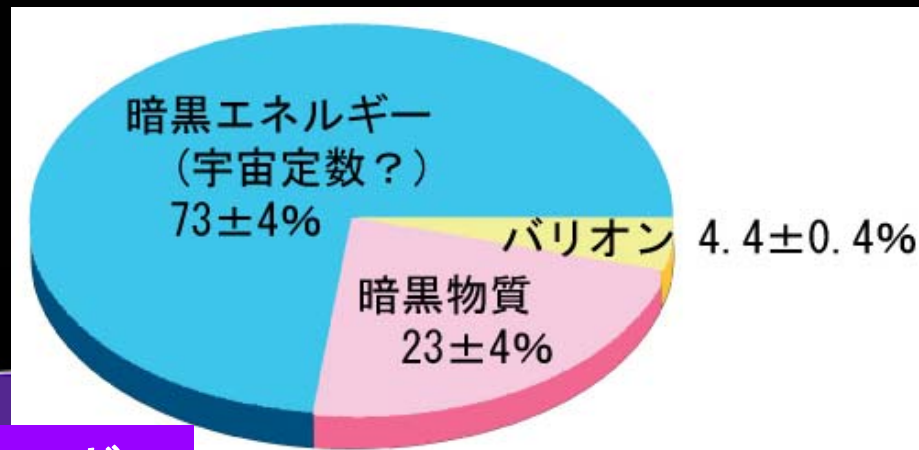
■ 人間原理は多重宇宙/並行宇宙の存在を仮定しているが、レベル1か2程度までであれば、物理学的にみてもさほど奇妙な考えではない

- 一方、人間原理は興味深い考え方ではあるが、検証可能性という見地からはまだ自然科学というより哲学

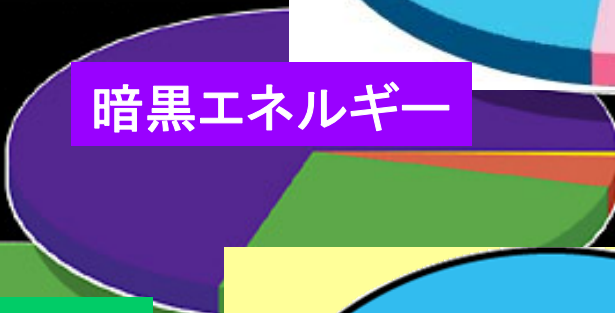
VI 21世紀の 宇宙論

2003年

1990年代

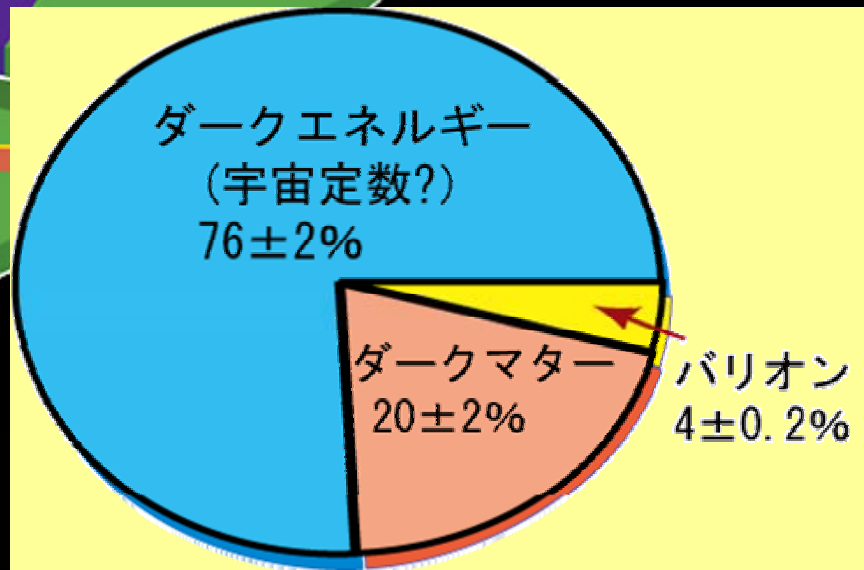
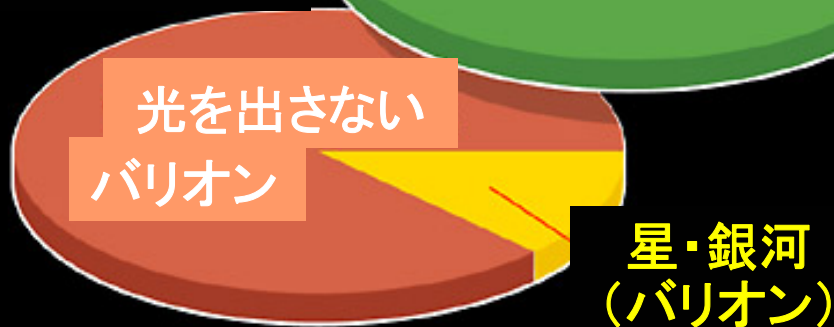


1980年代



バリオン以外の
暗黒物質

1970年代



宇宙観は本当に進歩したか？

古代エジプト



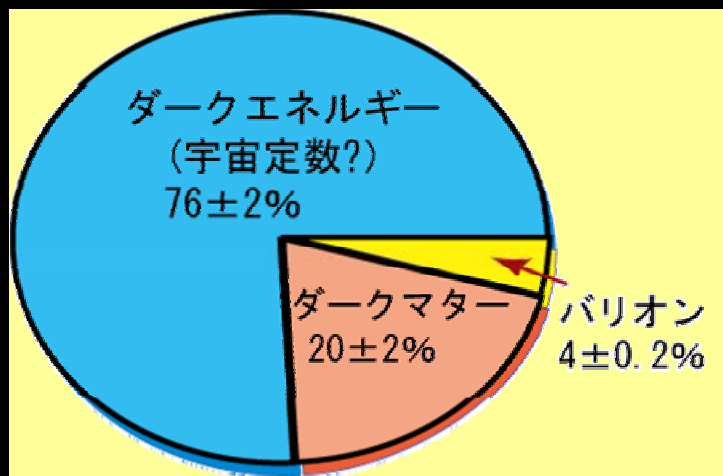
古代中国



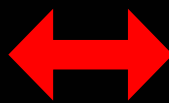
古代インド



2006年



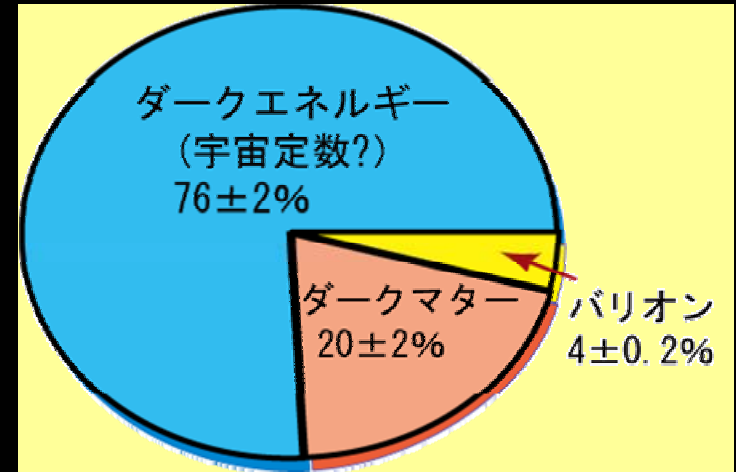
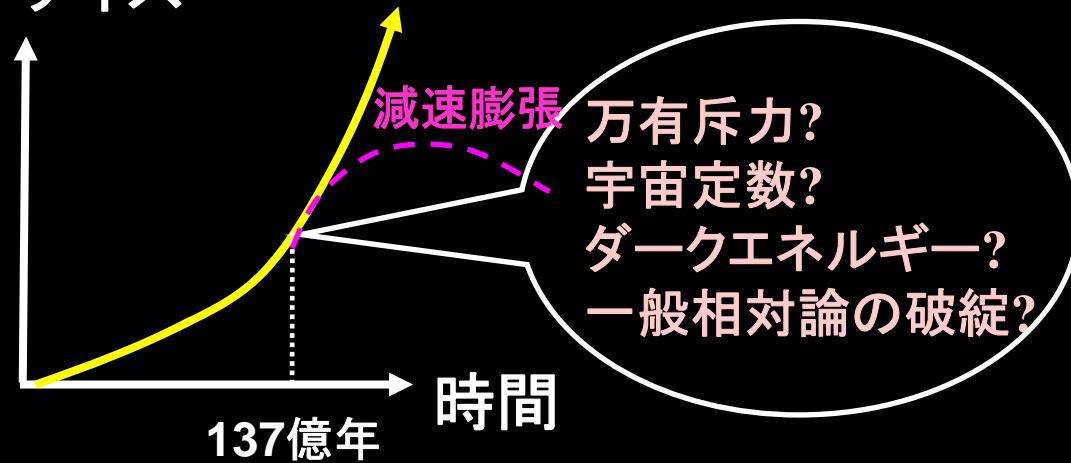
進歩？



ダークエネルギーと21世紀の物理

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



■ 宇宙の加速膨張の原因は何か？

- 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
 - アインシュタインの宇宙定数(1917年)?
 - 「真空」がもつエネルギー? 21世紀のエーテル?

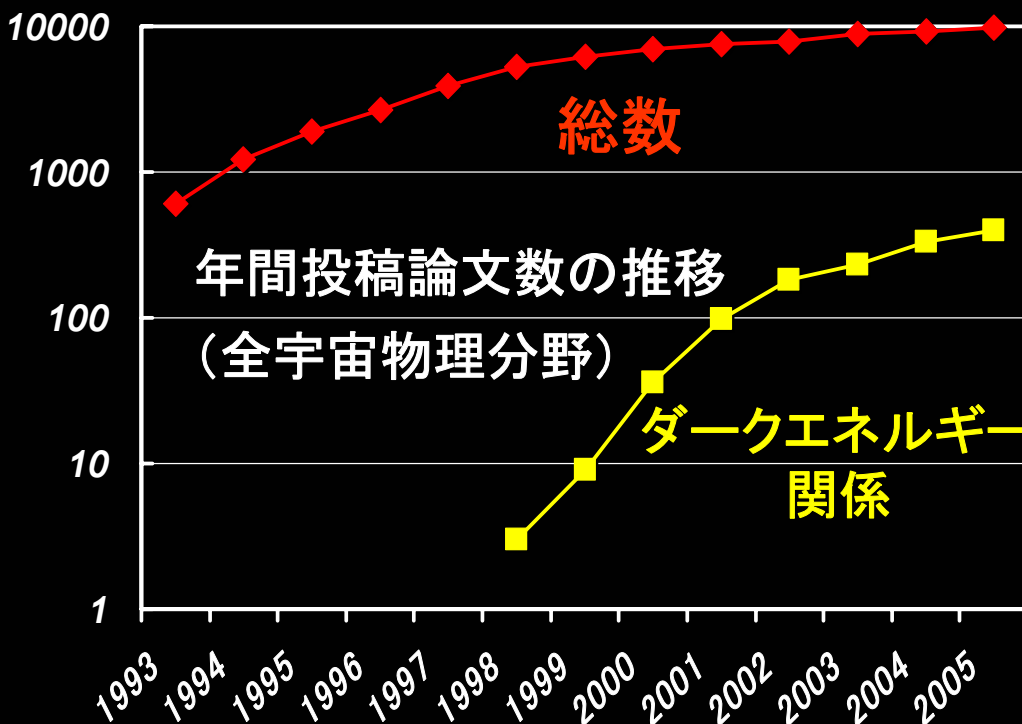
■ 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻

■ いずれであろうと21世紀の物理学を切り拓く鍵

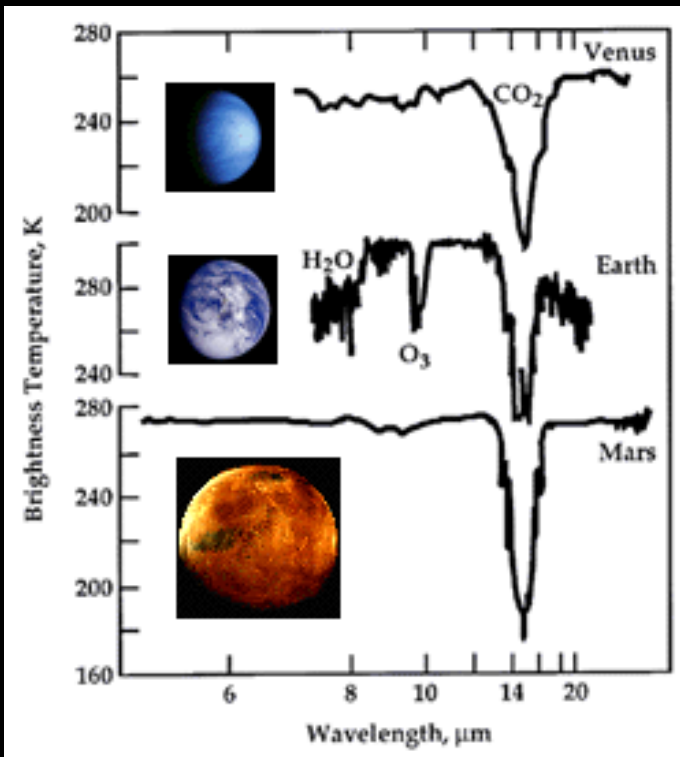
ダークエネルギー研究の意義

- 7割以上を占める宇宙の主要成分の解明
- 新たな物質階層か？一般相対論の限界か？
- 未知の物理学への道を拓く鍵
- 天文学と素粒子物理学の融合

- “Right now, not only for cosmology but for elementary particle theory this is the bone in the throat”
- Steven Weinberg (1979年度ノーベル物理学賞)
- “Would be number one on my list of things to figure out”
- Edward Witten (1990年度フィールズ賞)
- “Maybe the most fundamentally mysterious thing in basic science”
- Frank Wilczek (2004年度ノーベル物理学賞)



太陽系外惑星研究： 今後の10年 “天文学から宇宙生物学へ”



- 木星型ガス惑星： 発見の時代から“characterization”の時代へ
 - 起源、形成、進化の基礎モデル構築
- 地球型惑星の発見へ
- 居住可能惑星の発見へ
 - 水が液体として存在する地球型惑星
- 超精密分光観測の成否が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを中心星から分離する

直接見てくることができない距離にある惑星に生物が存在するかどうかを天文観測だけで検証できるか？ Biomarker を特定できるか？

謎解きはまだまだこれから

- 宇宙の果てをみることで自然界の新たな物質階層が明らかとなった
 - 宇宙の20%はダークマター、76%はダークエネルギー
 - 我々は宇宙の96%の部分を全く理解していなかった
 - 暗黒成分の解明は21世紀科学の大目標
- 10年足らず前に初めて太陽系以外に惑星が存在することが発見された(ただしまだガス惑星のみ)。
 - 第二の地球はあるのか？
 - 地球外生物、地球外知的文明は存在するか？
 - 我々の存在は偶然か、必然か？
 - これらが単なる夢物語やSFではなく、科学的(物理+天文+化学+地学+生物)に議論できる時代になってきた！