

日本大学文理学部桜麗祭

2005年10月29日

進化する宇宙像



東京大学 大学院
理学系研究科 物理学専攻
須藤 靖



Modern universe
13.7

HDF
1.0

HUDF
0.7 - 0.4

Big bang

Age of the universe (billions of years)

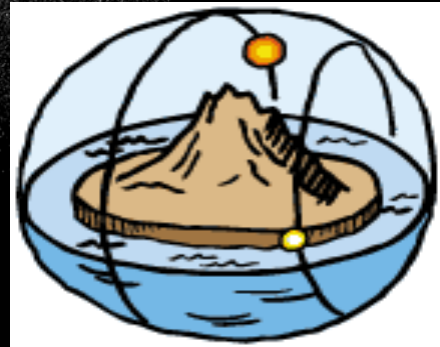
遠くの世界はどうなっているのだろうか？

- 宇宙の果てには何がある？
- 宇宙は何からできている？

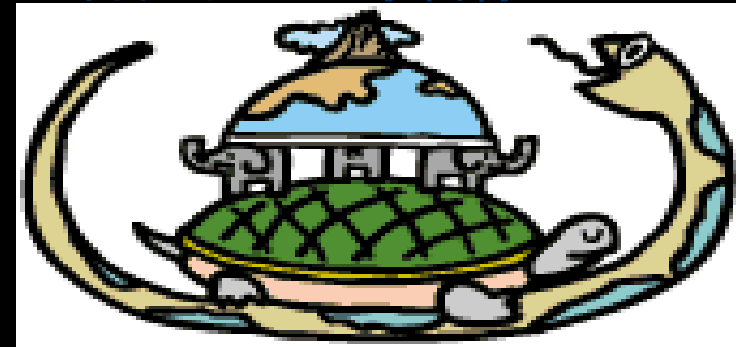
古代エジプトの宇宙像



古代中国の宇宙像

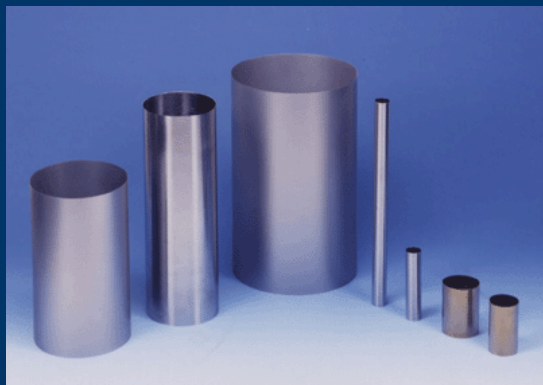
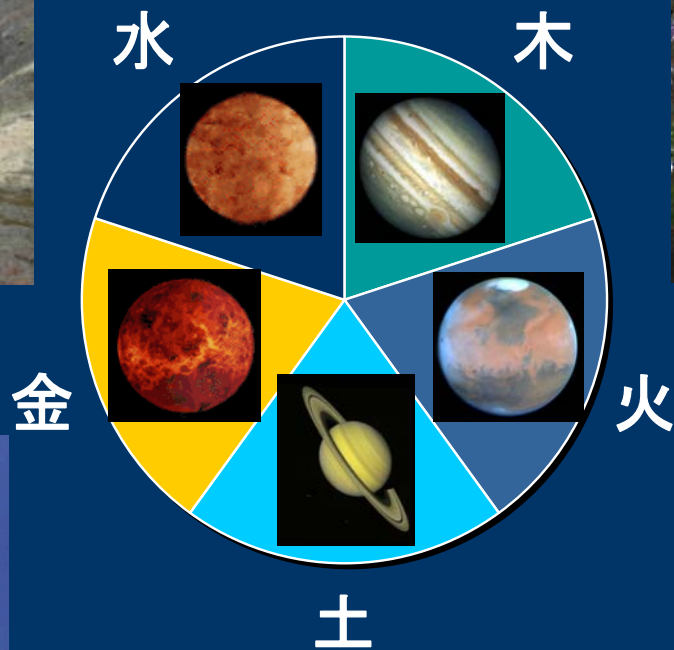


古代インドの宇宙像



<http://www.isas.ac.jp/kids/firstlook/index.html>

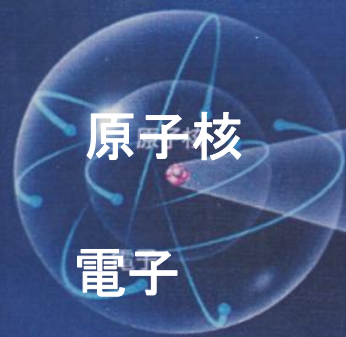
五行説: 古代中国の素粒子論



微視的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？
 - 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(陽子+中性子
=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
 - すでに知られている素粒子以外からなる物
質は本当に存在しないのか？

現代の素粒子論による分類



原子核

電子

原子

原子核

中性子

陽子

バリオン

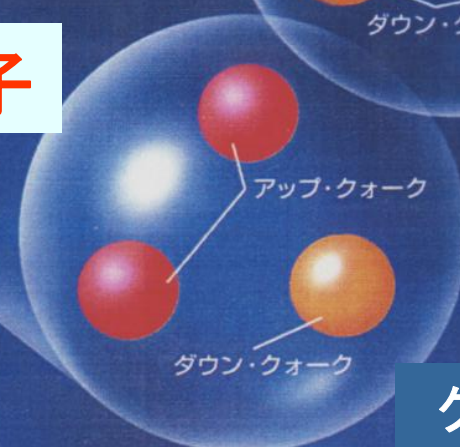
中性子

陽子



アップ・クォーク

ダウン・クォーク



アップ・クォーク

ダウン・クォーク

クォーク

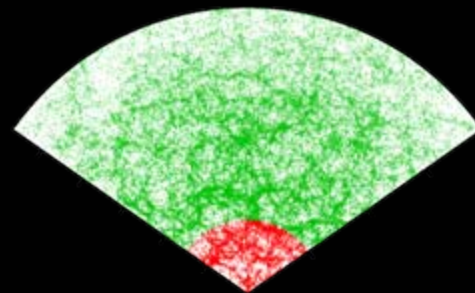
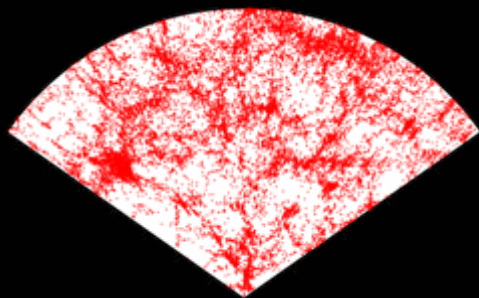
	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	<p>電子 ニュートリノ</p>	<p>ミュー・ ニュートリノ</p>	<p>タウ・ ニュートリノ</p>
	<p>電子</p>	<p>ミュー粒子</p>	<p>タウ粒子</p>
クォーク	<p>ダウン</p>	<p>ストレンジ</p>	<p>ボトム</p>
	<p>アップ</p>	<p>チャーム</p>	<p>トップ</p>

原子核の周囲を電子がまわって原子をつくる。原子核は陽子と中性子から、陽子と中性子はアップ・クォークとダウン・クォークから構成されている。第2世代と第3世代のクォークとレプトンは、粒子加速器を用いるなどして、高エネルギー状態にならないとあらわれない。われわれの世界の物質は第1世代のクォークとレプトンからできているといえる。

巨視的世界をもっとよく知りたい

- 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か
 - 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、微視的世界を構成する素粒子と同じなのだろうか

宇宙の階層構造



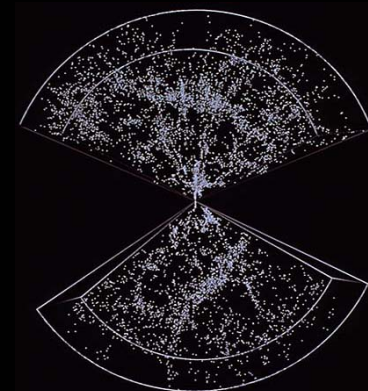
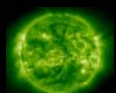
星 星団

銀河

銀河群

銀河団

宇宙の大構造



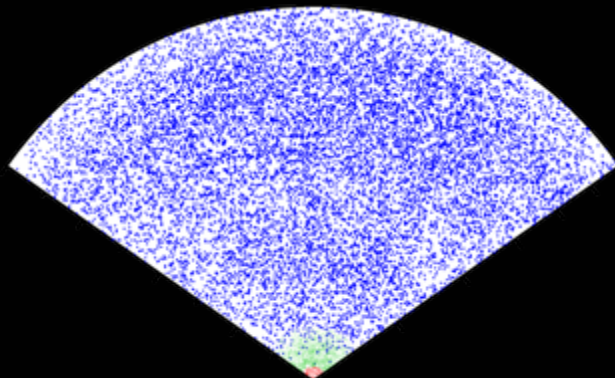
100万km

10光年

10万光年

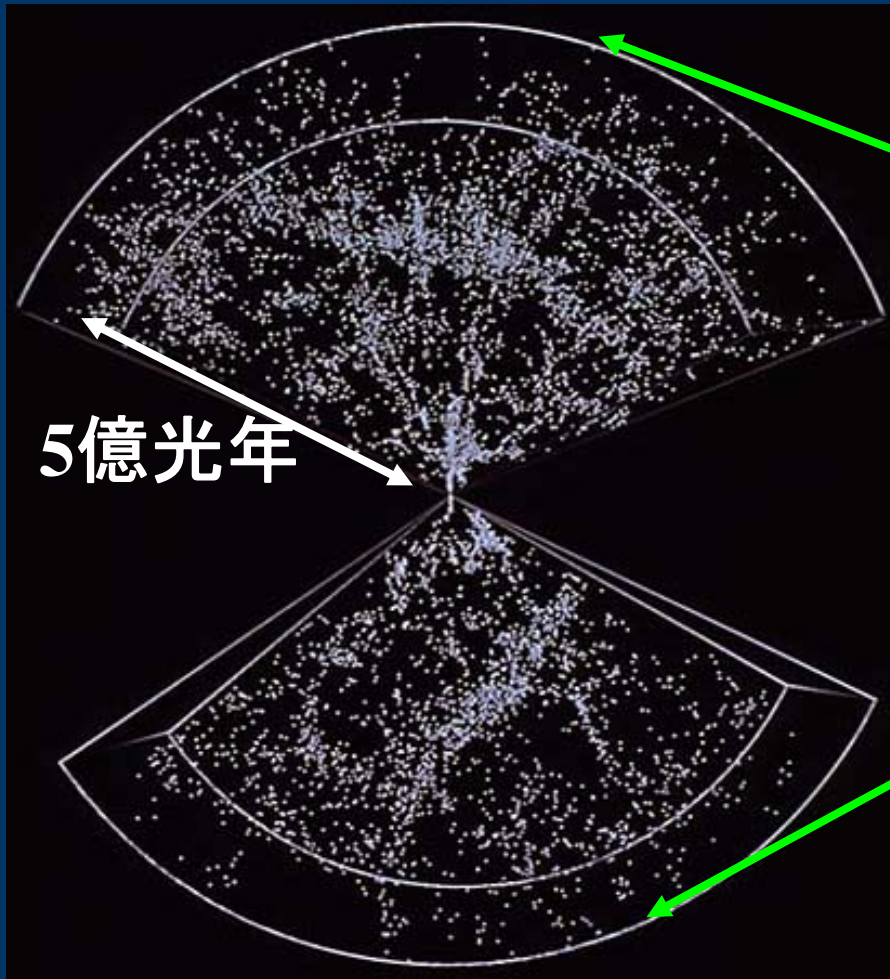
100万光年

10億光年



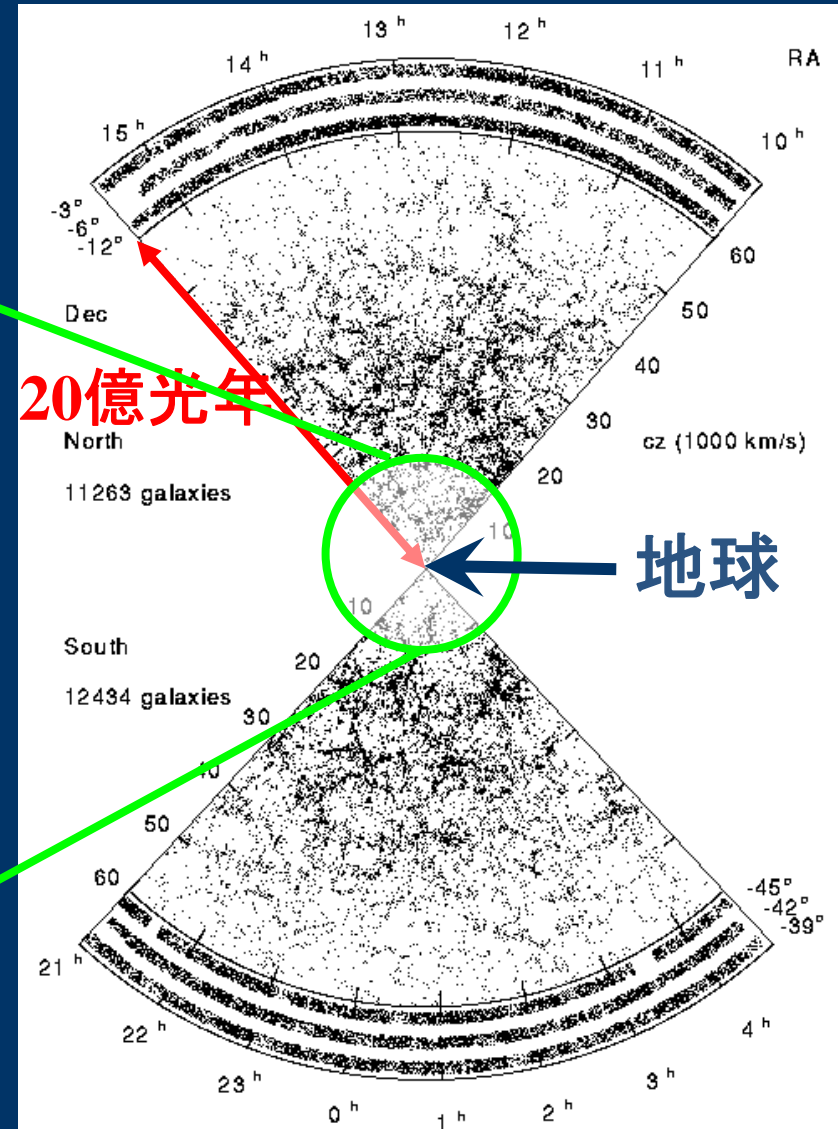
典型的大きさ

銀河の3次元分布地図



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

進化する宇宙像



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

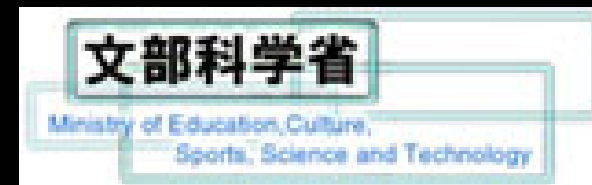
進化する宇宙像



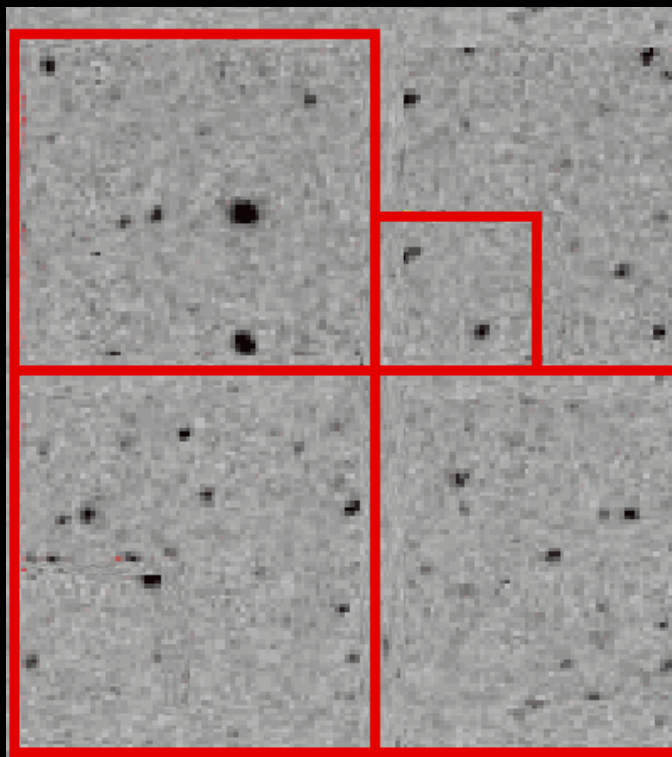
史上最大の銀河地図作りをめざして： 日米独共同スローンデジタルスカイサーベイ

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/>

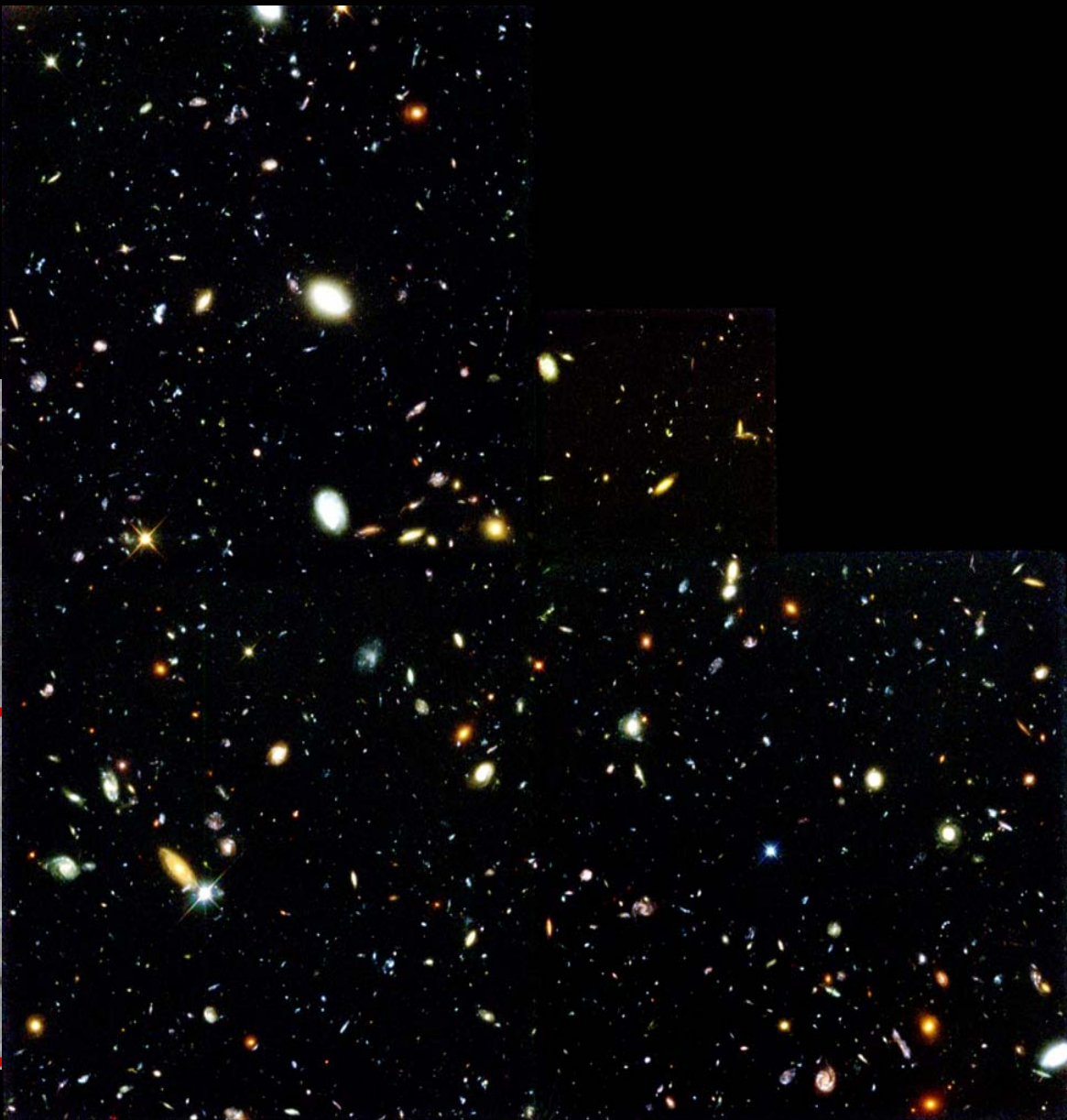


宇宙を見る “目”の進歩



地上4m望遠鏡+CCD
100×写真乾板

進化する宇宙像

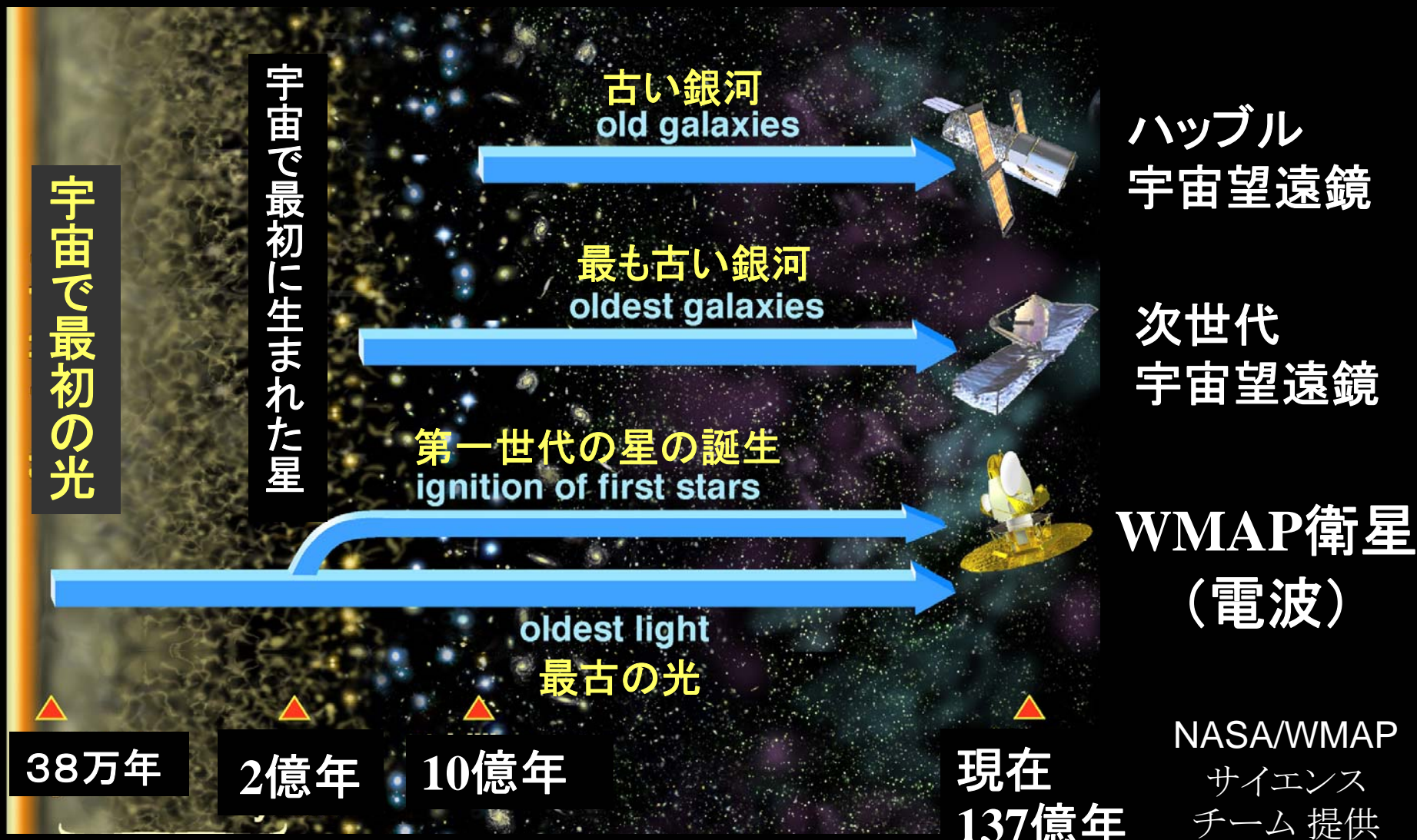


Hubble Deep Field
ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

HST WFPC2

ハッブル宇宙望遠鏡+CCD:1000×
地上望遠鏡

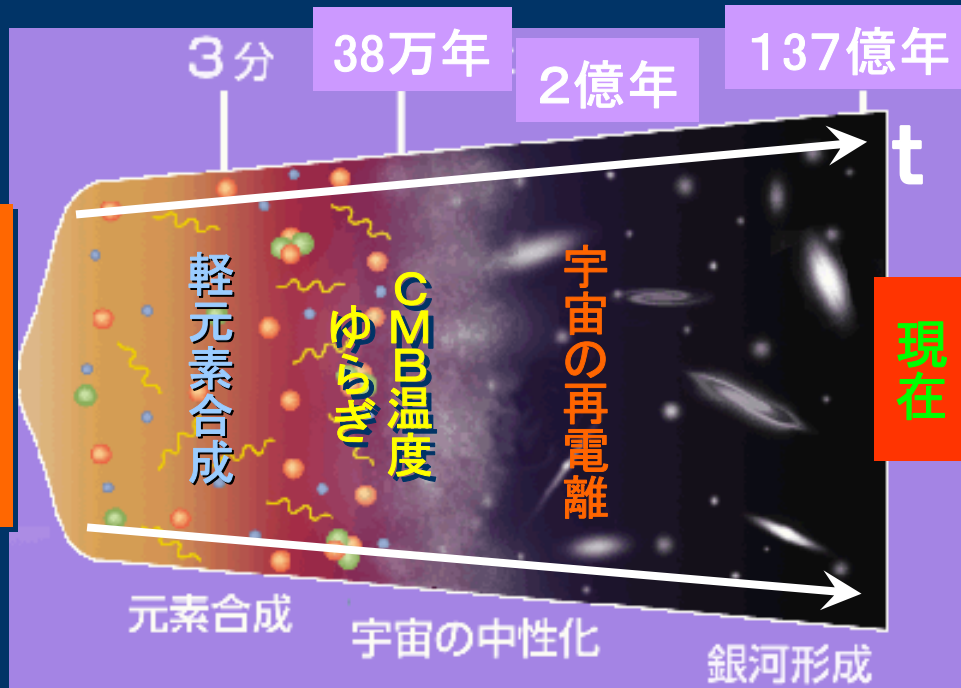
衛星によってさらなる宇宙の果てを見る



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

宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB)

CMBは、晴れ上がり直後の宇宙を満たしていた電磁波の名残り
(今から137億年前の宇宙の光の化石)



CMB:

Cosmic Microwave Background

■ 宇宙の晴れ上がり

- 誕生後約38万年で温度が3000度程度に下がった宇宙で、電子と陽子が結合して水素原子となる
- この宇宙の中性化により、宇宙は電磁波に対して透明となる

量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

銀河の形成

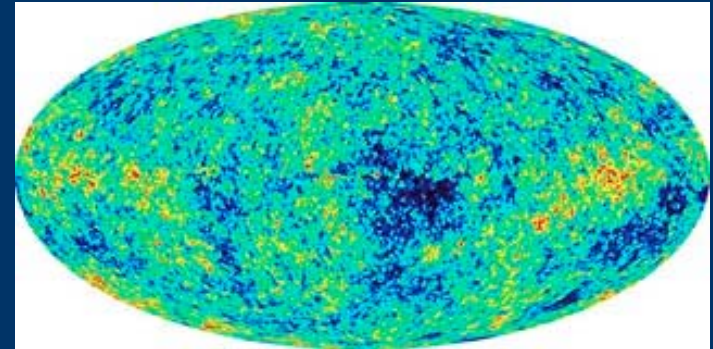
銀河団の形成

宇宙の大構造

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

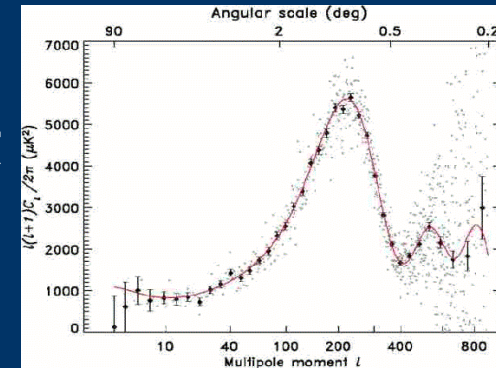
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

■ 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

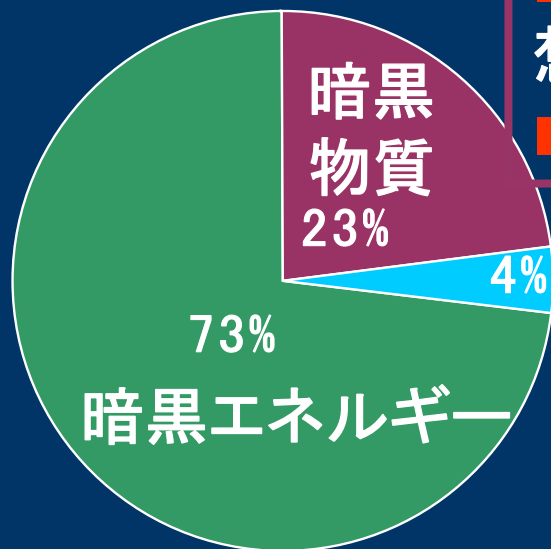
■ 隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



解読結果：我々の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？

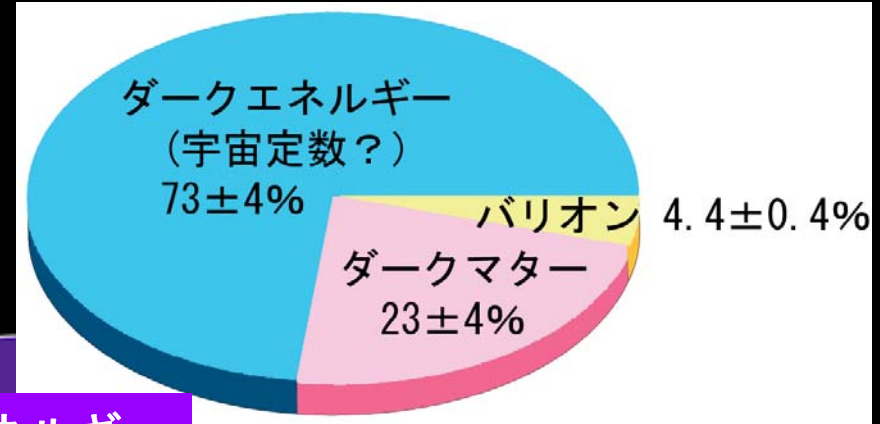
通常物質 (バリオン)

- 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

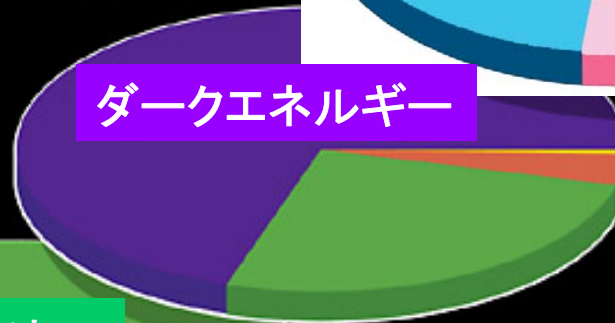
- 宇宙空間を一様に満たしているエネルギーが宇宙の主成分！
- 万有斥力(負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？

宇宙の組成

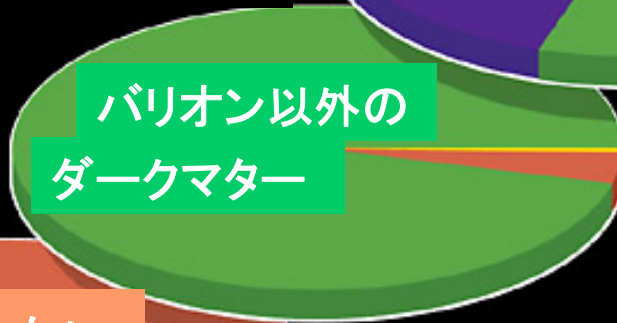
2000年代



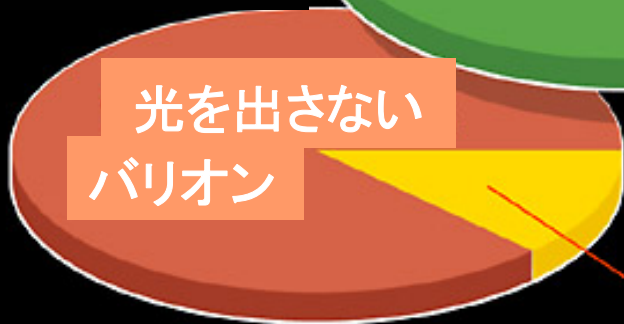
1990年代



1980年代



1970年代



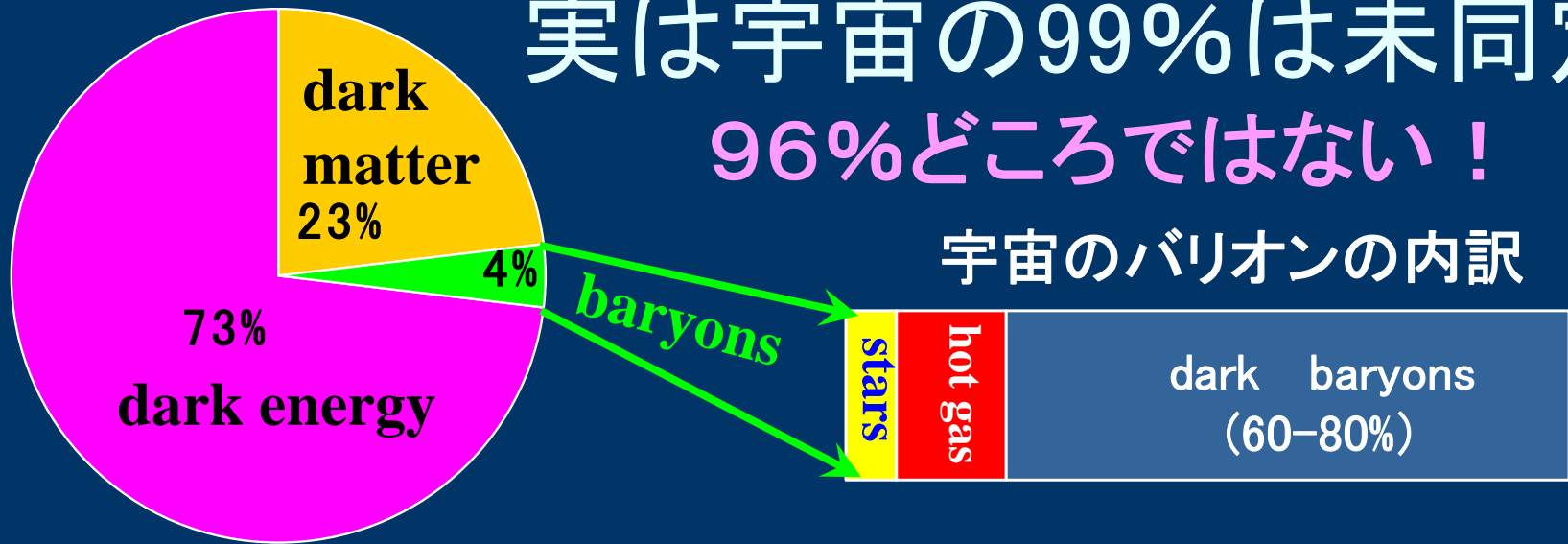
星・銀河(バリオン)

バリオン

- 地上のすべての物質の原子核を構成する粒子(主に、陽子と中性子)

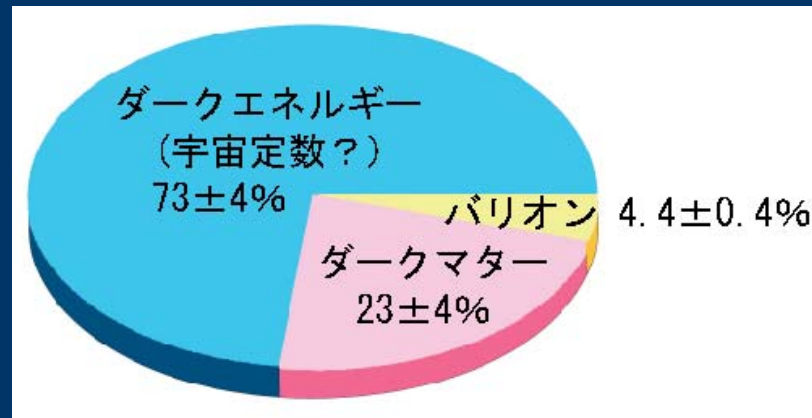
実は宇宙の99%は未同定 96%どころではない！

宇宙のバリオンの内訳



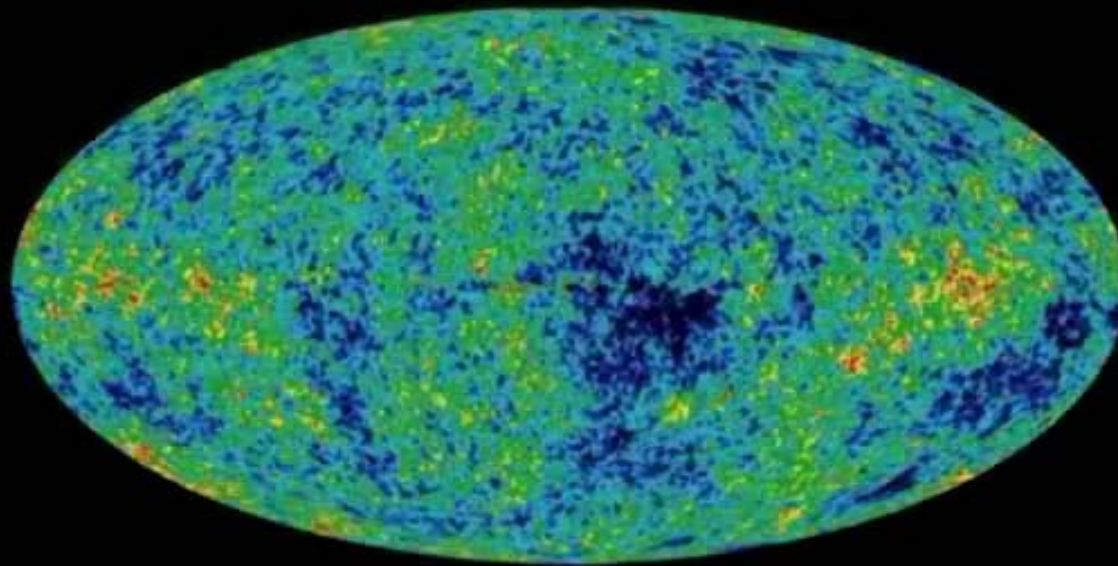
Component	Central	Maximum	Minimum	Grade ^a
Cosmic Baryon Budget: Fukugita, Hogan & Peebles: ApJ 503 (1998) 518				
1. Stars in spheroids	0.0026 h_{70}^{-1}	0.0043 h_{70}^{-1}	0.0014 h_{70}^{-1}	A
2. Stars in disks	0.00086 h_{70}^{-1}	0.00129 h_{70}^{-1}	0.00051 h_{70}^{-1}	A-
3. Stars in irregulars	0.000069 h_{70}^{-1}	0.000116 h_{70}^{-1}	0.000033 h_{70}^{-1}	B
4. Neutral atomic gas	0.00033 h_{70}^{-1}	0.00041 h_{70}^{-1}	0.00025 h_{70}^{-1}	A
5. Molecular gas	0.00030 h_{70}^{-1}	0.00037 h_{70}^{-1}	0.00023 h_{70}^{-1}	A-
6. Plasma in clusters	0.0026 $h_{70}^{-1.5}$	0.0044 $h_{70}^{-1.5}$	0.0014 $h_{70}^{-1.5}$	A
7a. Warm plasma in groups	0.0056 $h_{70}^{-1.5}$	0.0115 $h_{70}^{-1.5}$	0.0029 $h_{70}^{-1.5}$	B
7b. Cool plasma	0.002 h_{70}^{-1}	0.003 h_{70}^{-1}	0.0007 h_{70}^{-1}	C
7'. Plasma in groups	0.014 h_{70}^{-1}	0.030 h_{70}^{-1}	0.0072 h_{70}^{-1}	B
8. Sum (at $h = 70$ and $z \simeq 0$).....	0.021	0.041	0.007	...

まとめ： 研究の進展 によって、ますます謎 が深まってしまった

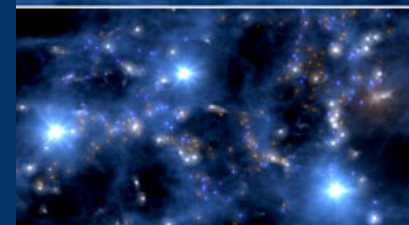
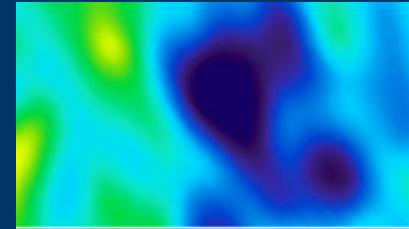


- 20世紀物理学の飛躍的進展は、「通常の物質」の構成要素については極めて深い理解をもたらした
- 一方、20世紀最後の数年間の宇宙観測によって、この「通常の物質」は、宇宙全体のわずか4%でしかないことが判明
 - 宇宙の果てを見ることで微視的世界の新しい階層が明らかとなった
 - 宇宙全体の約23%は暗黒物質、約73%は暗黒エネルギー
- **我々は宇宙の96% (99%?)を全く理解していなかった**
- 暗黒物質の直接検出、暗黒エネルギーの正体の理解は、21世紀科学の単なる一課題にとどまらず、新しい自然法則を探り当てる上での本質的な鍵

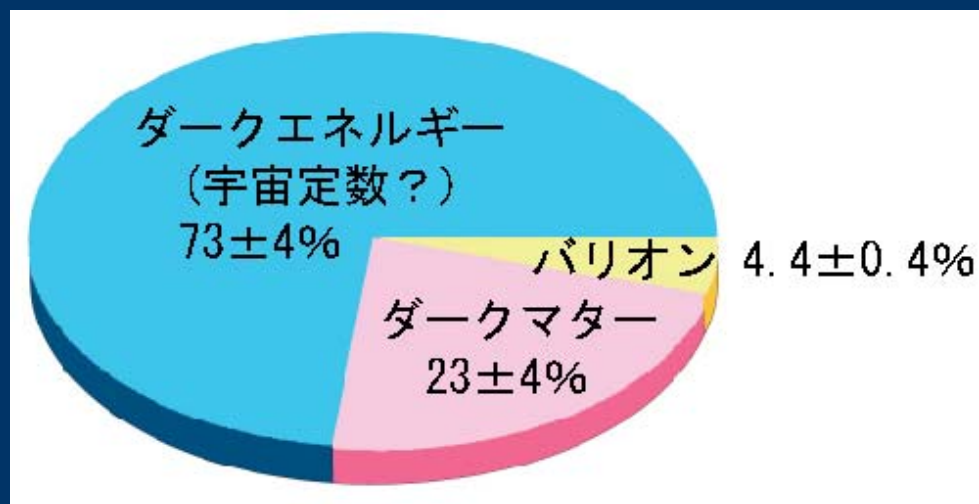
38万歳の宇宙から137億歳の現在へ



NASA/WMAP サイエンスチーム提供



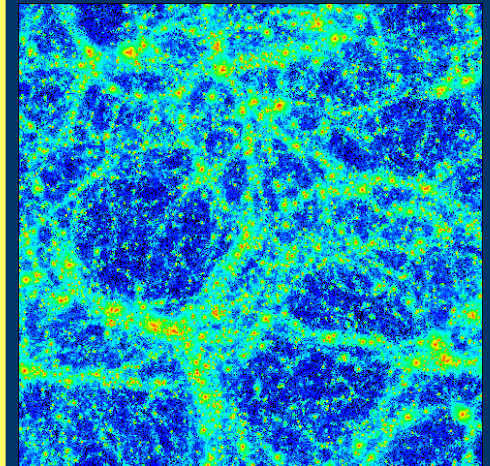
しかし、どこが違うのだろうか？



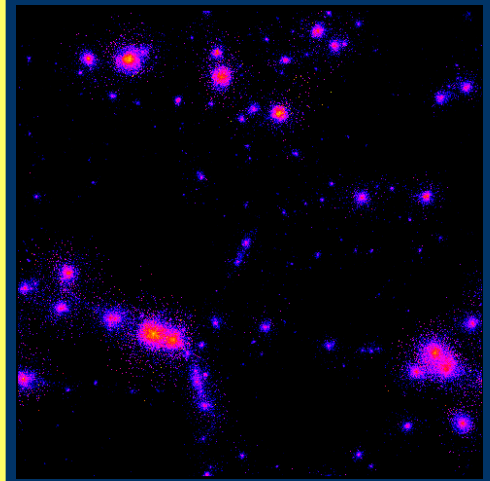
宇宙の暗黒物質

- 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暗黒物質の重力
- 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
 - 暗黒物質の直接検出実験は21世紀物理学に残された大きな課題
- 暗黒物質は、まだ知られていない新しい物理学を開拓する鍵となる

数値シミュレーションによる暗黒物質分布と明るいバリオンガス分布の比較例



暗黒物質

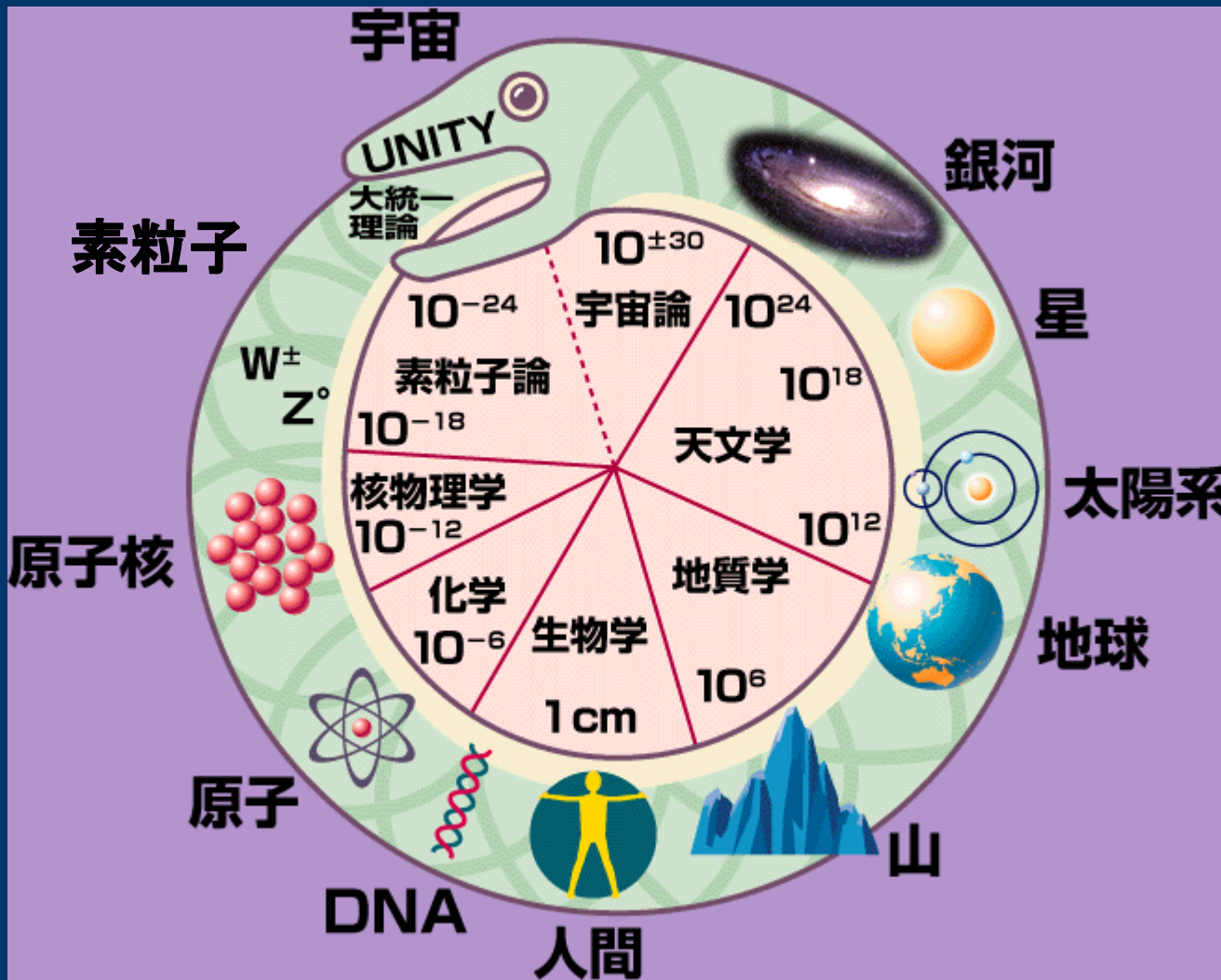


明るいバリオンガス

宇宙の暗黒エネルギー

- ある意味では、現代的な文脈での「エーテル」とも言える
- 暗黒物質とは異なり、ある特定の場所に集中して存在しているようなものではない
 - 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、宇宙全体を一様にみたましている
- その重力は、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
 - 暗黒物質以上にその正体は不明
- 暗黒エネルギーもまた、我々がいまだ理解していない新たな物理学を探る重要な道しるべ(天文学から基礎物理学へ)

自然界の階層：ミクロとマクロをつなぐ



- 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 10^{-24} cm以下
- この約50桁も離れた巨視的世界と微視的世界とが宇宙の研究を通じてより深く理解されつつある

シェルドン グラシヨー 著 ‘Interaction’ のなかの図をもとに作成