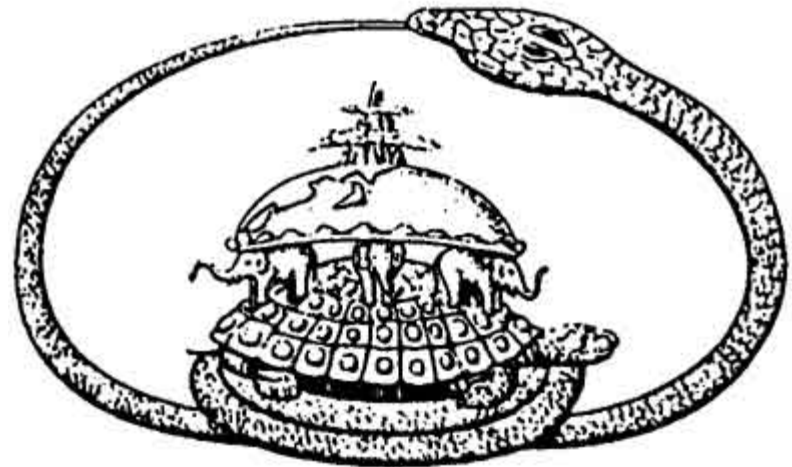


# 宇宙論

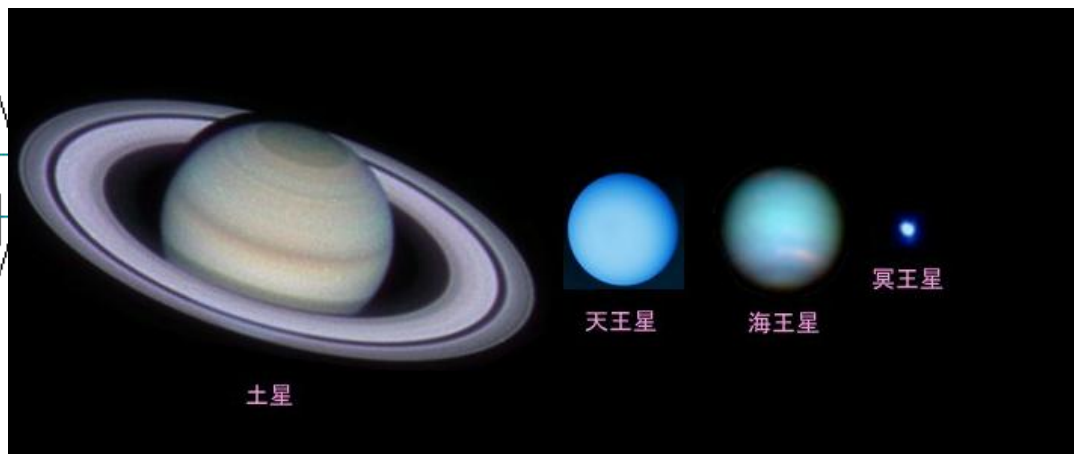
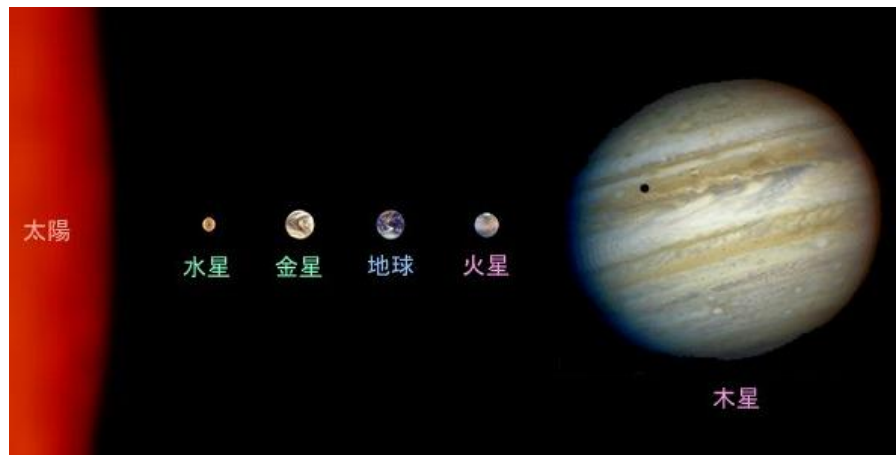
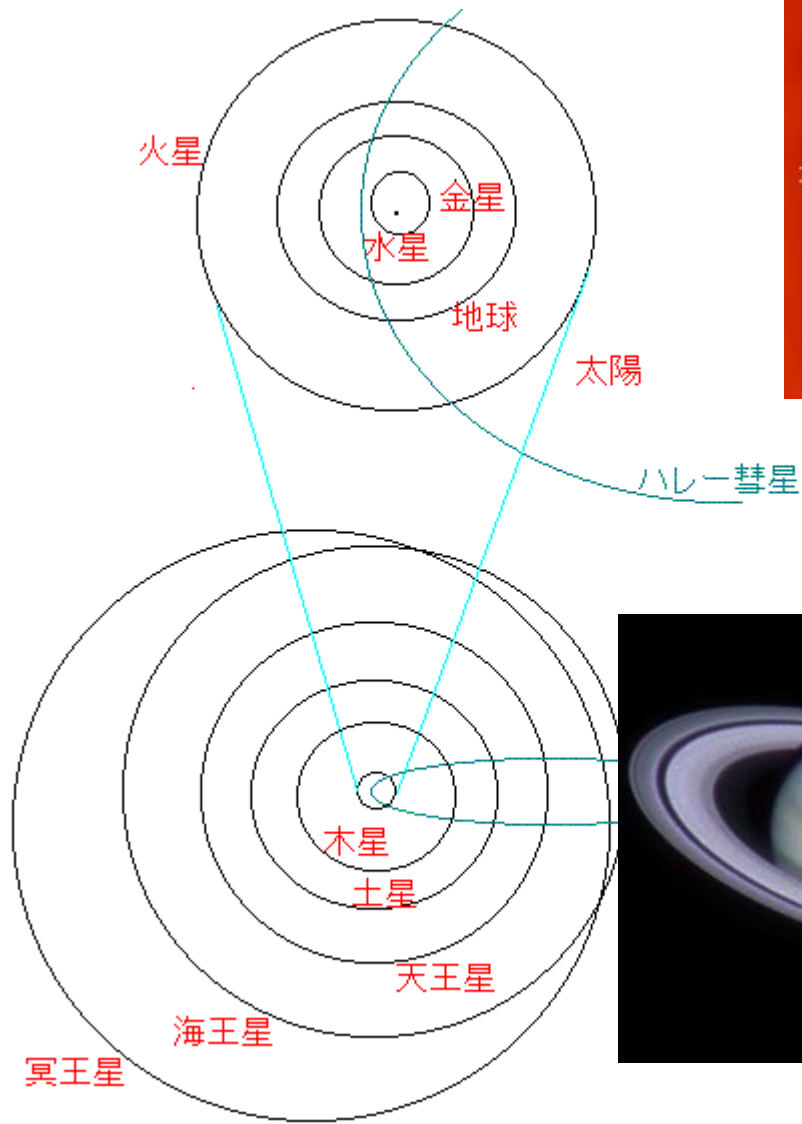


# 宇宙とは？

「宇」は空間全体をさし、「宙」は時間全体を意味し、「宇宙」で時空(時間と空間)の全体を意味する。

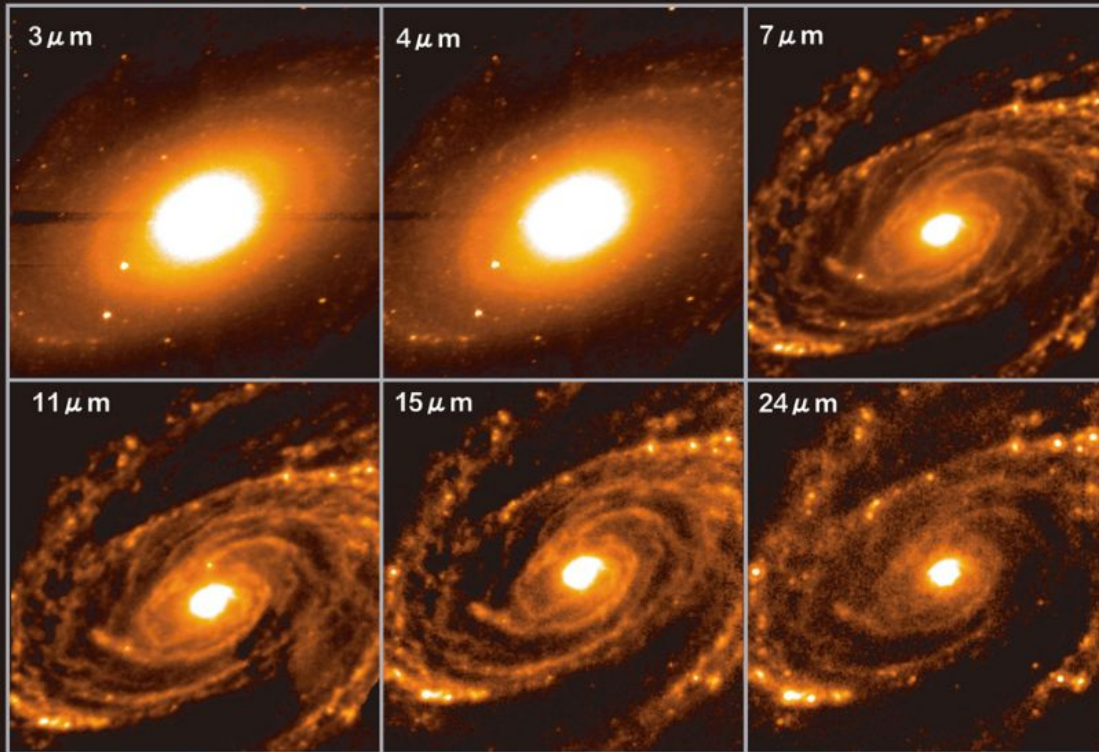


古代インドの「宇宙」





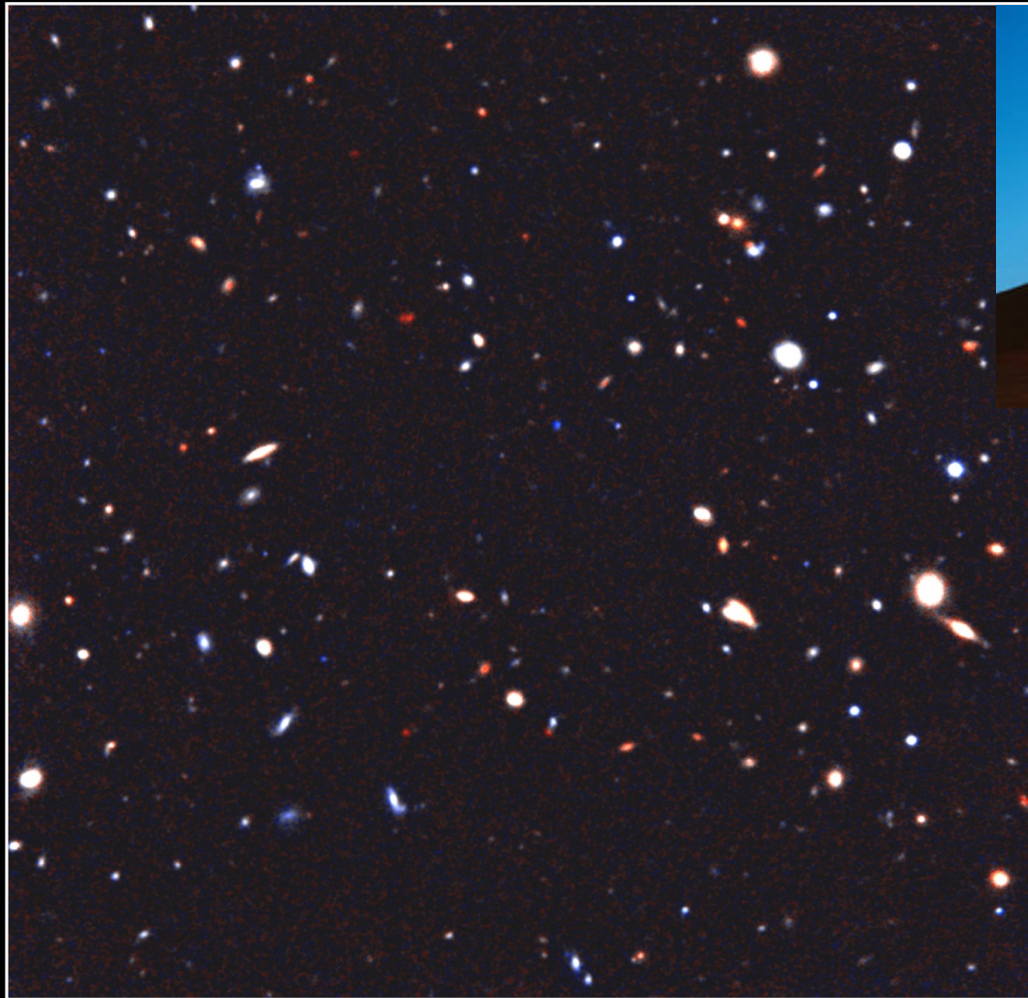
# 渦巻き銀河M81の近・中間赤外線画像



「あかり」近・中間赤外線カメラ



2006年5月22日



すばる望遠鏡・ハワイ島のマウナ・ケア山山頂(標高4205m)にある国立天文台の大型光学赤外線望遠鏡。建設総額は400億円。反射望遠鏡であり、世界最大の一枚鏡(直径8.3m)を主鏡にもつ。



**Subaru Deep Field**

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J, K')

September 16, 1999

Copyright© 1999 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved



# ハッブル宇宙望遠鏡



# 基本的な仮定

- 一様等方宇宙
  - ...宇宙に特別の場所や方向はない
  - ...「天動説」の全面否定
- 物理法則は正しい
  - ...考察のベース

# 宇宙は無限か？

一様等方宇宙を前提とすると

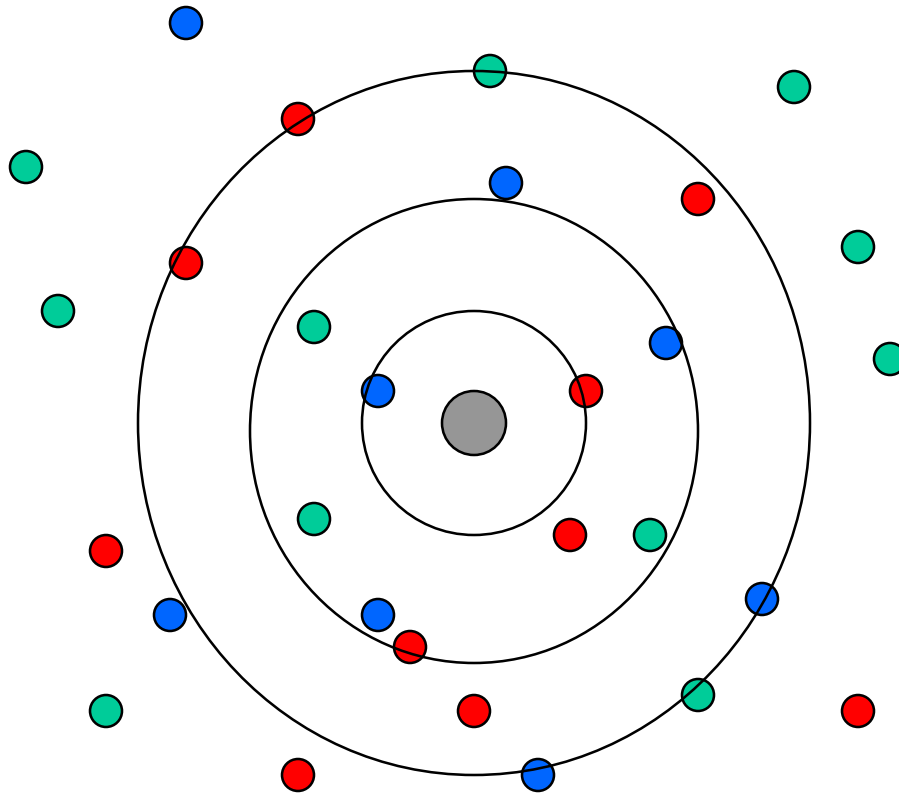
「無限の過去から存在し」

「無限に広い」宇宙は否定される

オルバーズのパラドックス



# 星の数と距離の関係



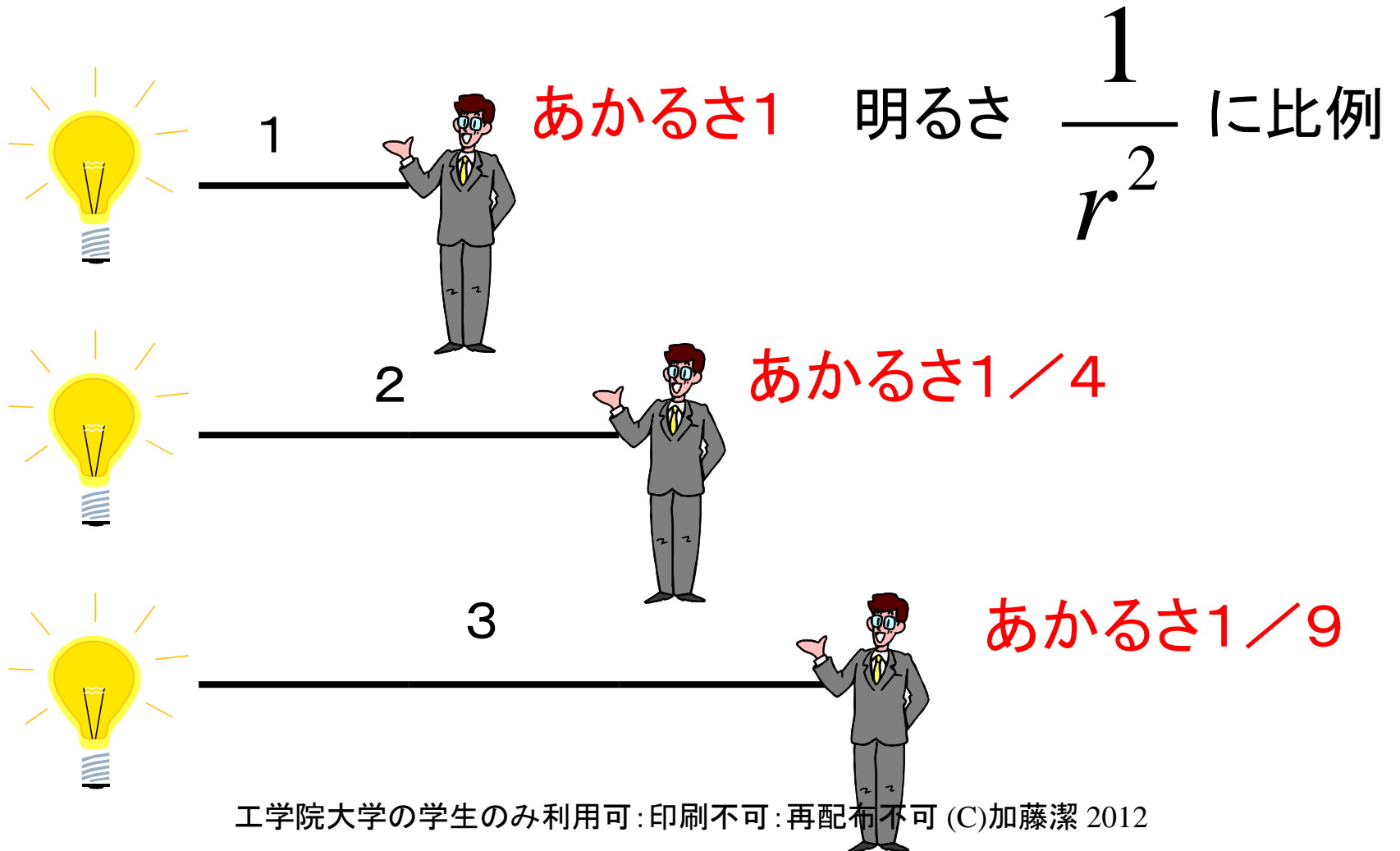
球の表面積

$$4\pi r^2$$

距離 $r$ の星の数

$$r^2 \text{ に比例}$$

# 星の距離と明るさの関係



# オルバースのパラドックス

| 距離 | 個数 | 明るさ           | その領域からの明るさの合計              |
|----|----|---------------|----------------------------|
| 1  | 1  | 1             | $1 \times 1 = 1$           |
| 2  | 4  | $\frac{1}{4}$ | $4 \times \frac{1}{4} = 1$ |
| 3  | 9  | $\frac{1}{9}$ | $9 \times \frac{1}{9} = 1$ |
| ⋮  | ⋮  | ⋮             | ⋮                          |
| ⋮  | ⋮  | ⋮             | ⋮                          |
| ⋮  | ⋮  | ⋮             | ⋮                          |
|    |    |               | 合計 $\infty$                |

「無限の過去から存在し」

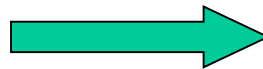
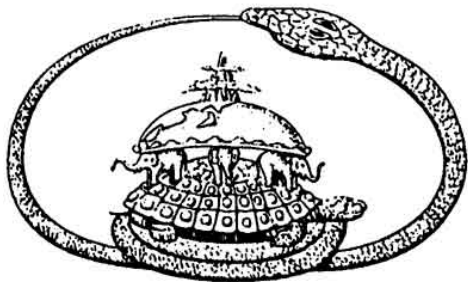
「無限に広い」宇宙

→空の明るさは無限大

# 空想・神話から科学へ

宇宙は有限の広がり, 有限の寿命がある?

⇒ **宇宙の始まりを研究しよう!**



$$F = ma$$
$$\int E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int q dV$$

# 膨張する宇宙

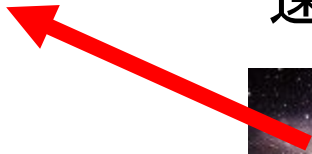
ドップラー効果：赤方偏移

ハッブルの法則

天体の後退速度...距離に比例

$$v = H_0 r$$

遠い: 速い



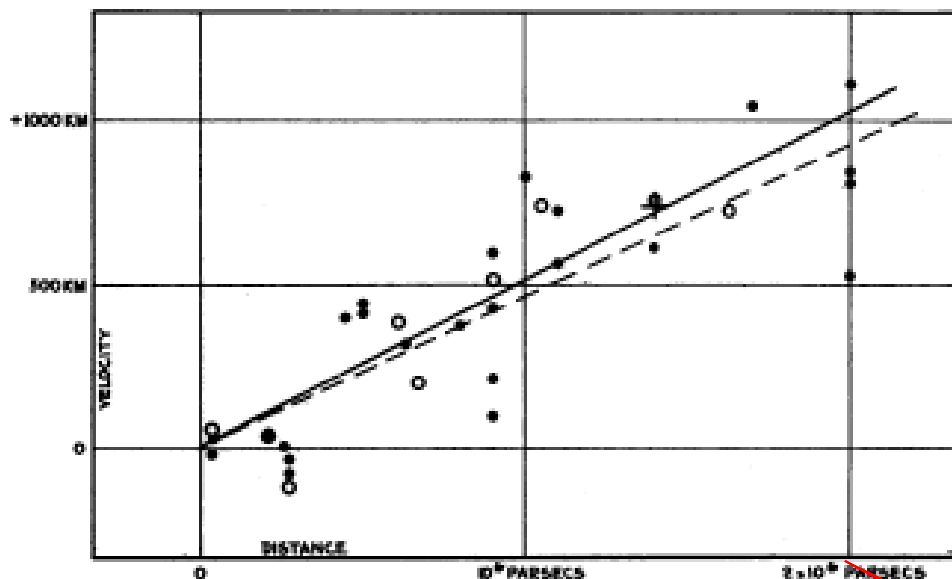
近い: 遅い



$$v = H_0 r$$



速度



距離



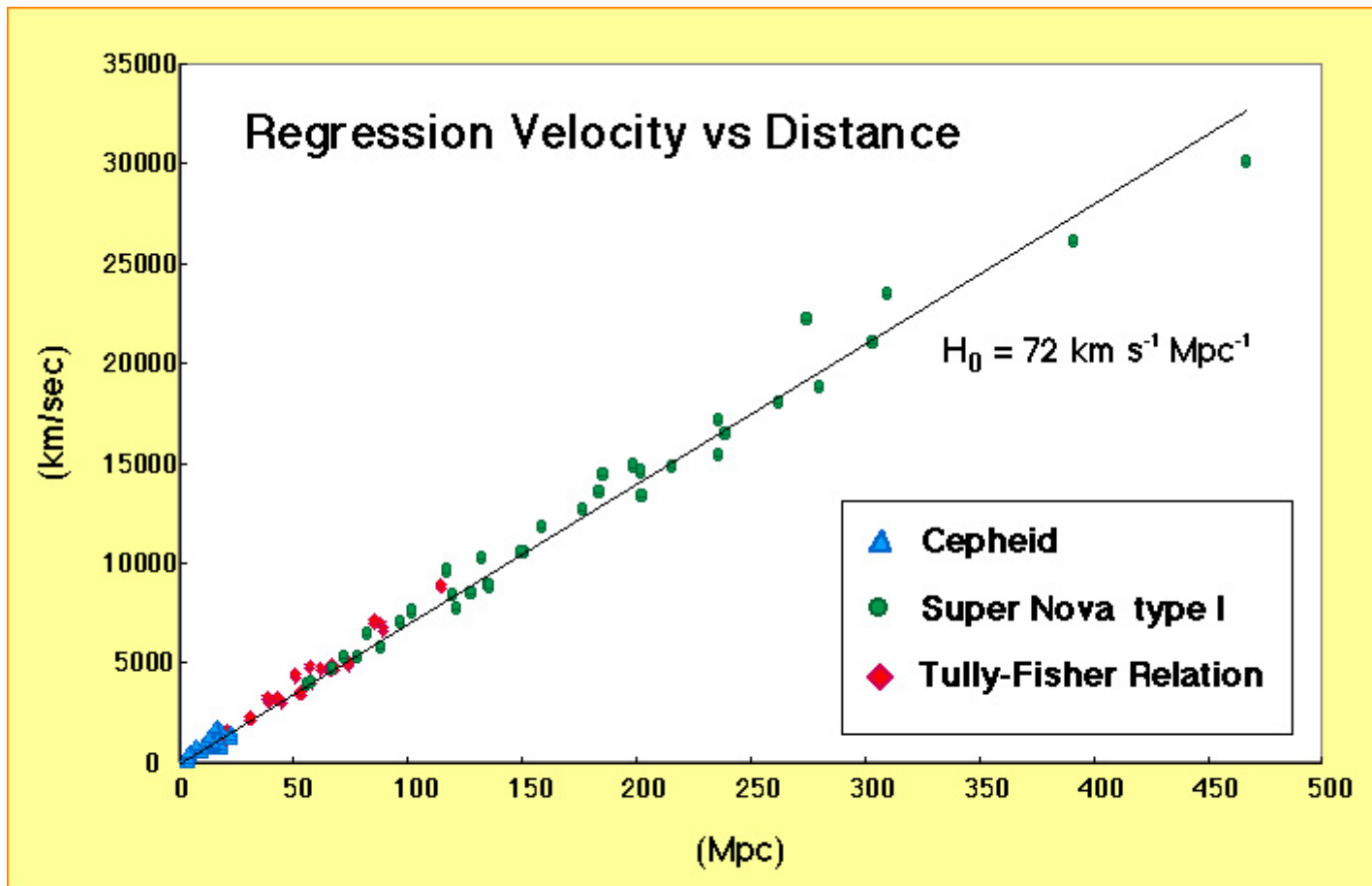
FIGURE 1  
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

2Mpc

ハッブルの論文より: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol.15, (1929) pp. 168-173

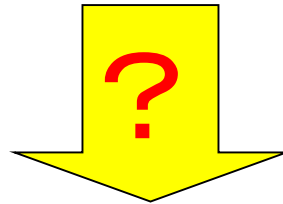




データ出典： Freedman, W. L. et al (2001) *Astrophysical Journal*, **553**, 47-72

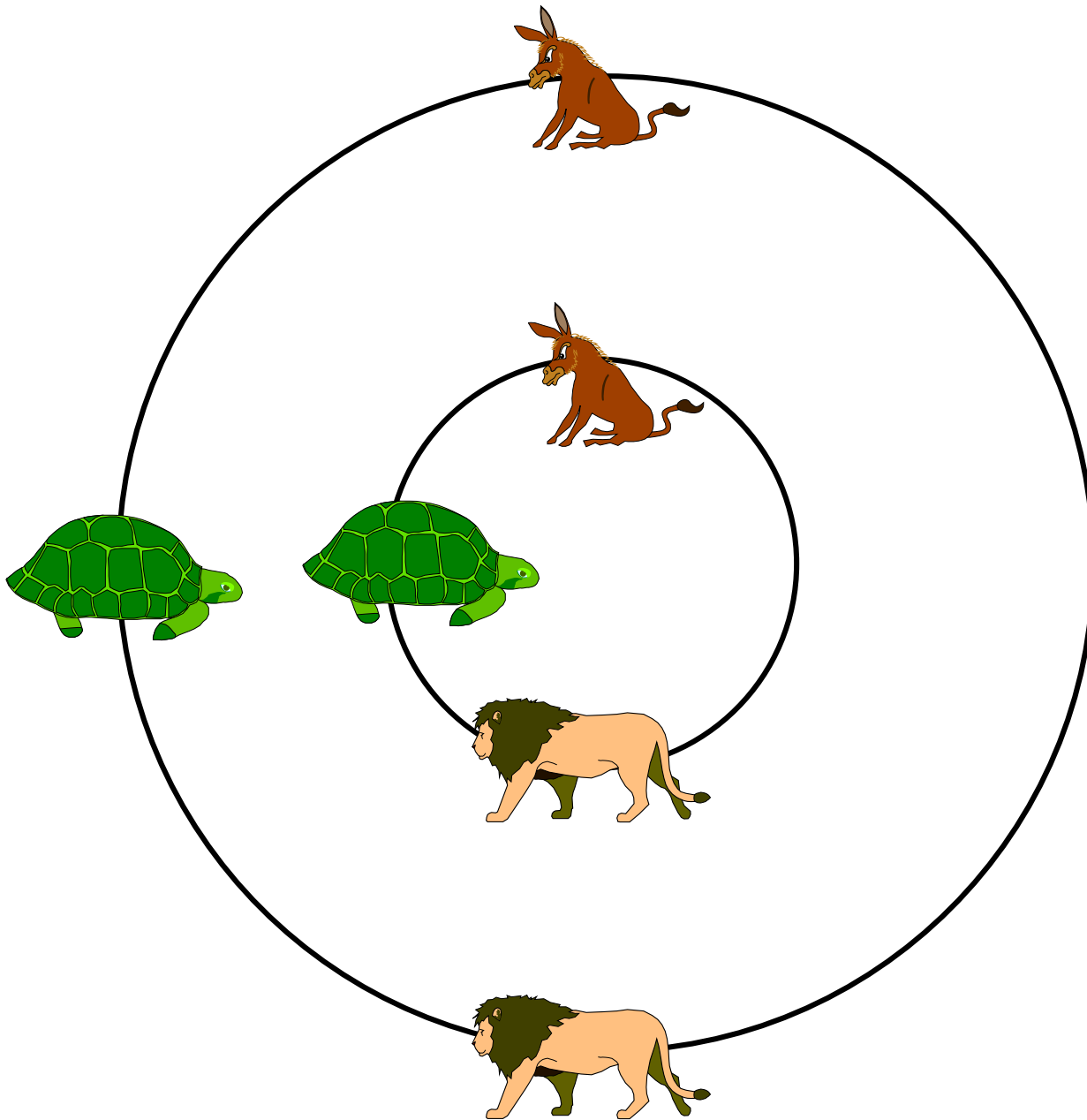
# ハッブルの法則

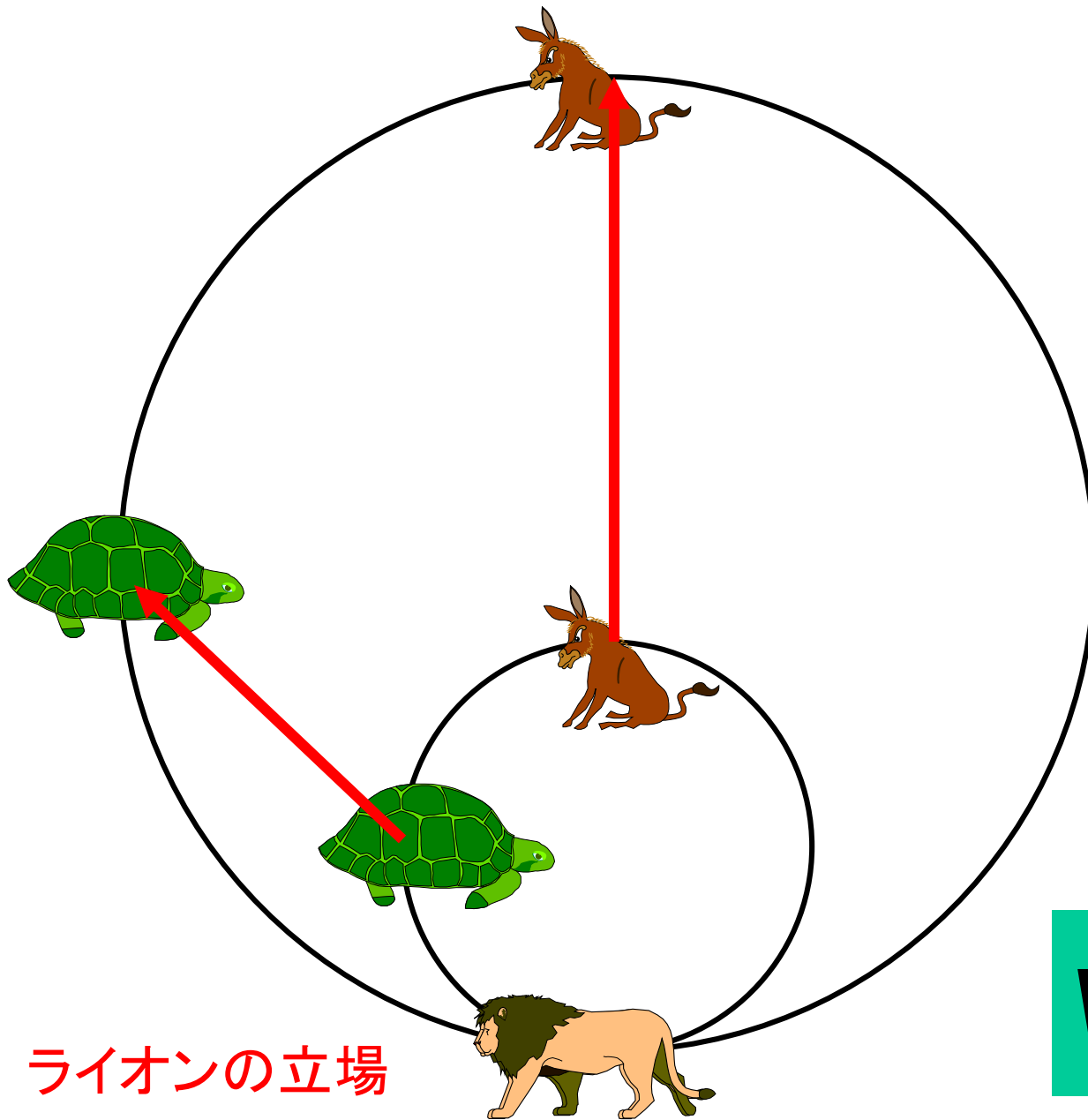
天体の後退速度...距離に比例



宇宙は膨張している

# 膨張する宇宙





カメ:近い

移動小

→速度小

ロバ:遠い

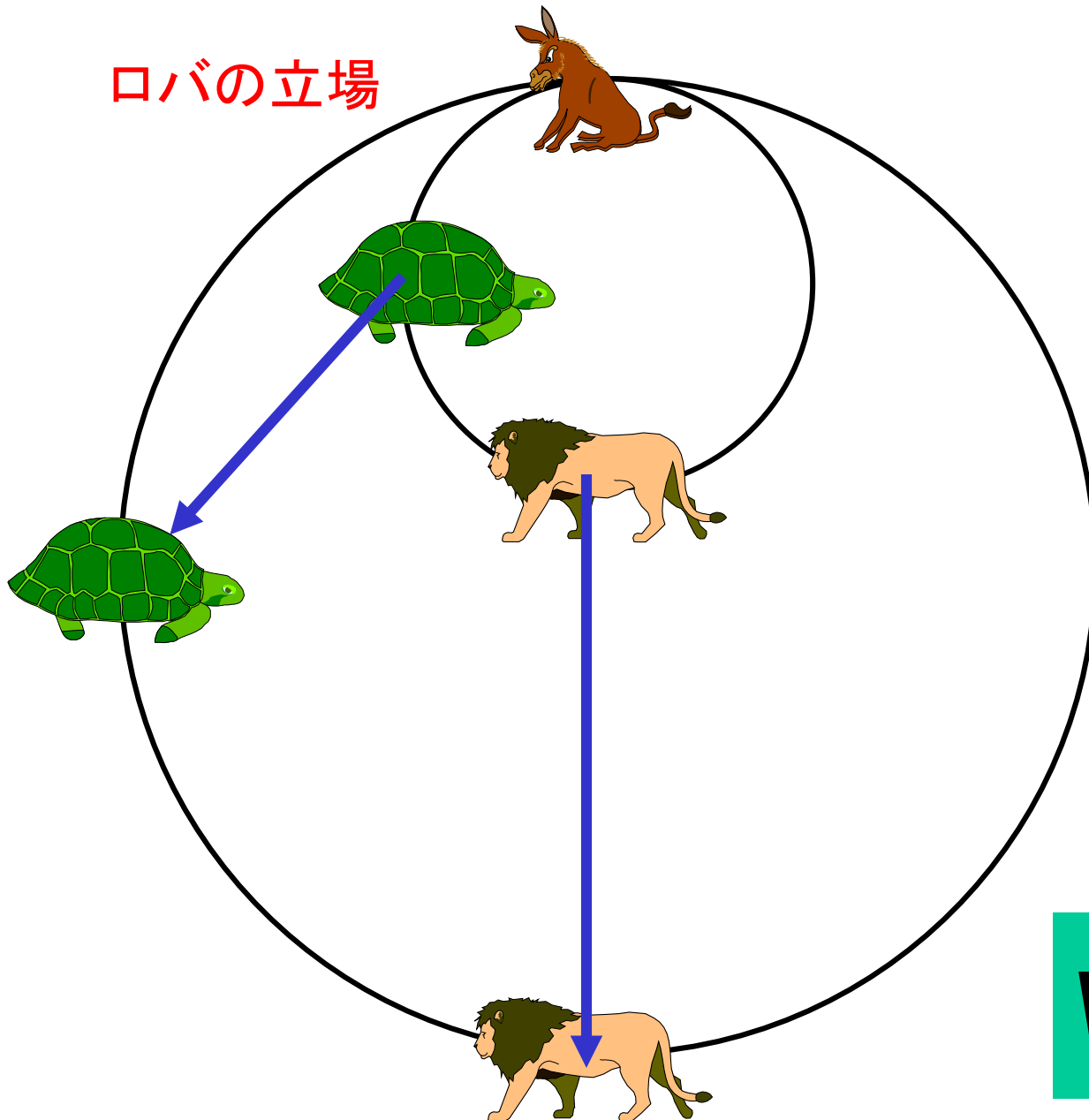
移動大

→速度大

ライオンの立場

$$v = H_0 r$$

# ロバの立場



カメ: 近い

移動小

→ 速度小

ライオン: 遠い

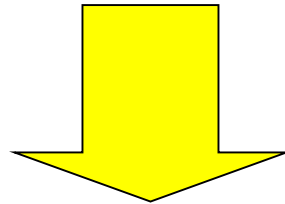
移動大

→ 速度大

$$v = H_0 r$$

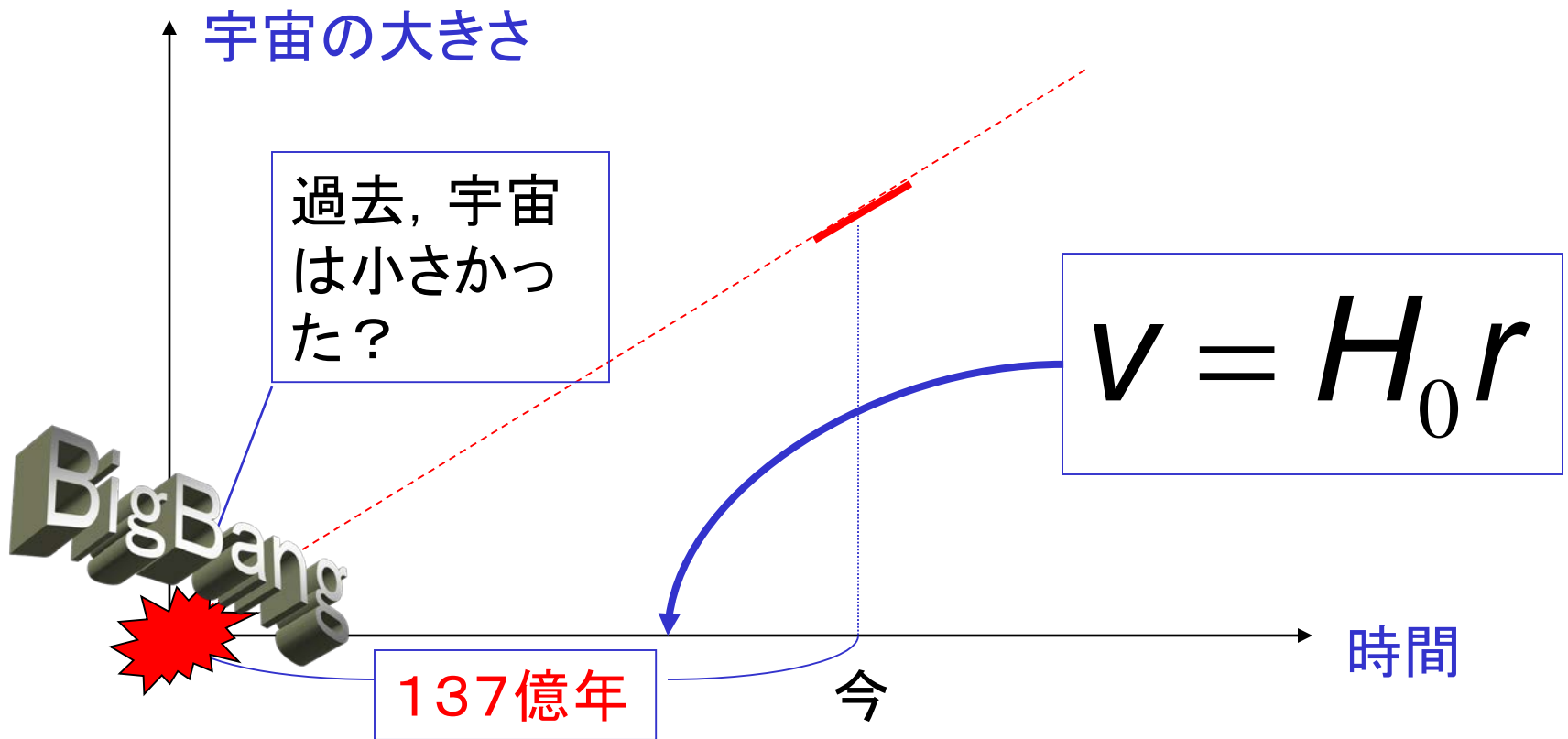
# ハッブルの法則

天体の後退速度...距離に比例



宇宙は膨張している

# 膨張する宇宙





# ビッグバン宇宙論

宇宙は1点における大爆発から生まれた

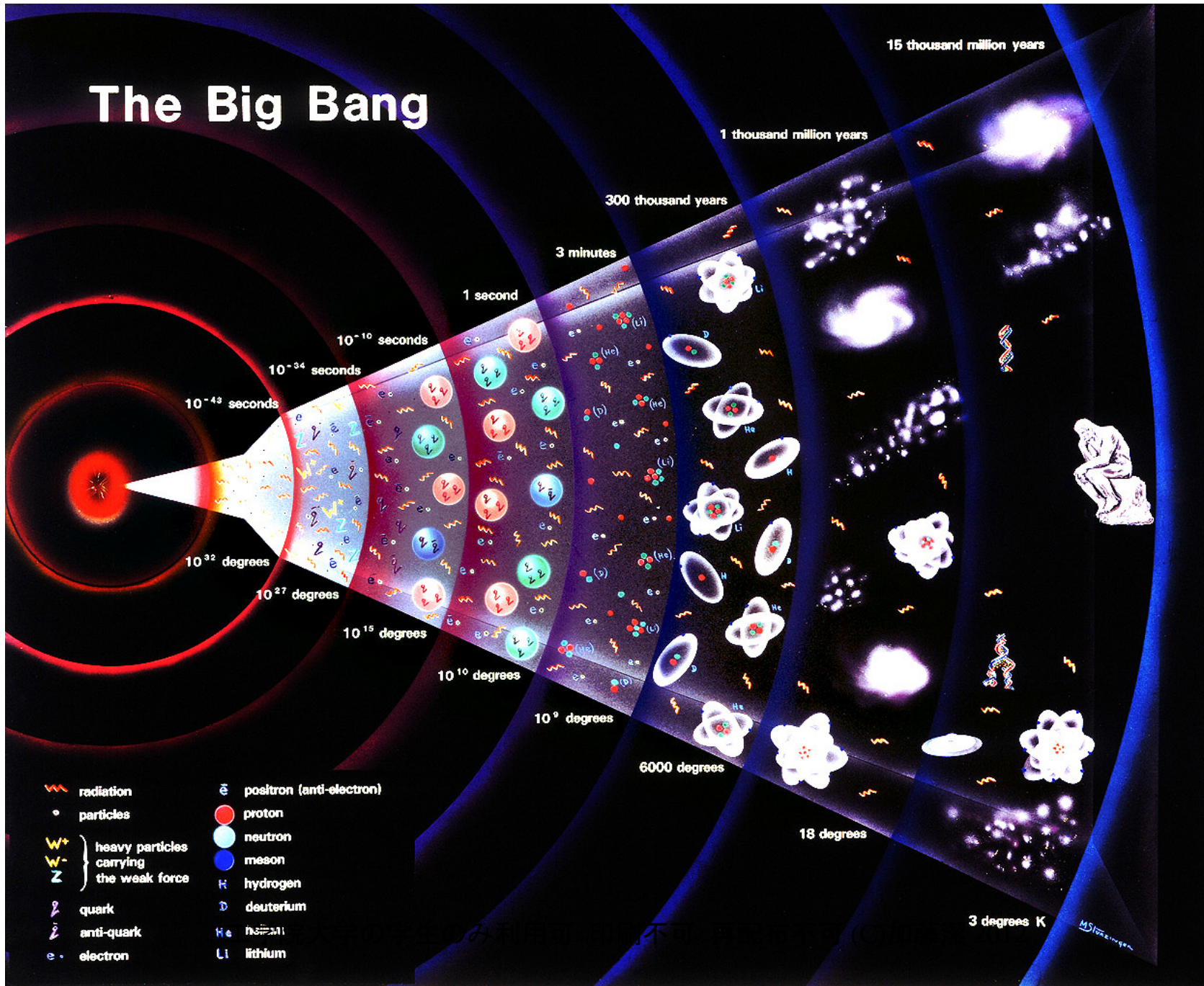
なぜ「生まれた」かは未解決の大問題

超高温・  
高密度の  
火の玉



それが膨張し進化して現在の宇宙となった  
工学院大学の学生のみ利用可：印刷不可：再配布不可 (C)加藤潔 2012

# The Big Bang



15 thousand million years

1 thousand million years

300 thousand years

3 minutes

1 second

$10^{-10}$  seconds

$10^{-34}$  seconds

$10^{-43}$  seconds

$10^{32}$  degrees

$10^{27}$  degrees

$10^{15}$  degrees

$10^{10}$  degrees

$10^9$  degrees

6000 degrees

18 degrees

3 degrees K

- radiation
- particles
- $W^+$  } heavy particles carrying the weak force
- $W^-$  }
- $Z$  }
- quark
- anti-quark
- $e^-$  electron
- $e^+$  positron (anti-electron)
- proton
- neutron
- meson
- $H$  hydrogen
- $D$  deuterium
- $He$  helium
- $Li$  lithium

MSI/Amgen

# ビッグバン宇宙論

## 理論的根拠

...アインシュタインの重力理論

(宇宙の質量の大小→

開いた宇宙, 閉じた宇宙)

...ミクロ世界の理論(素粒子)

# ビッグバン宇宙論

## 観測的根拠

初期の宇宙が熱い火の玉であった痕跡

- 宇宙背景輻射
- 元素合成シナリオ

# 宇宙背景輻射

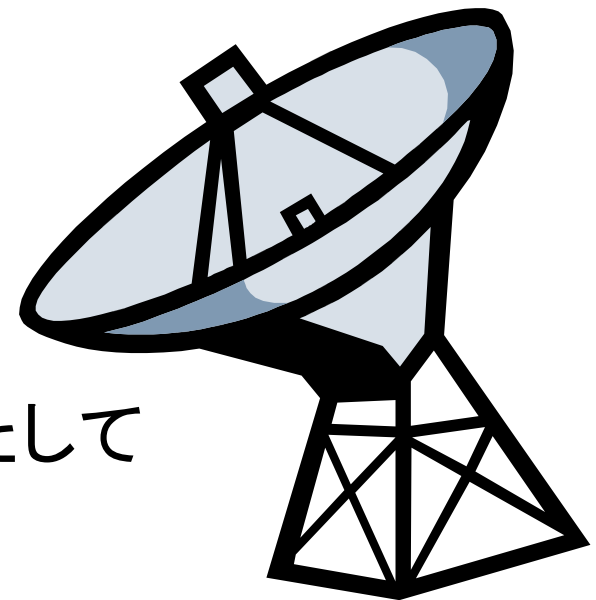
宇宙からの等方的なマイクロ波の観測

解釈

初期の火の玉状態の光子

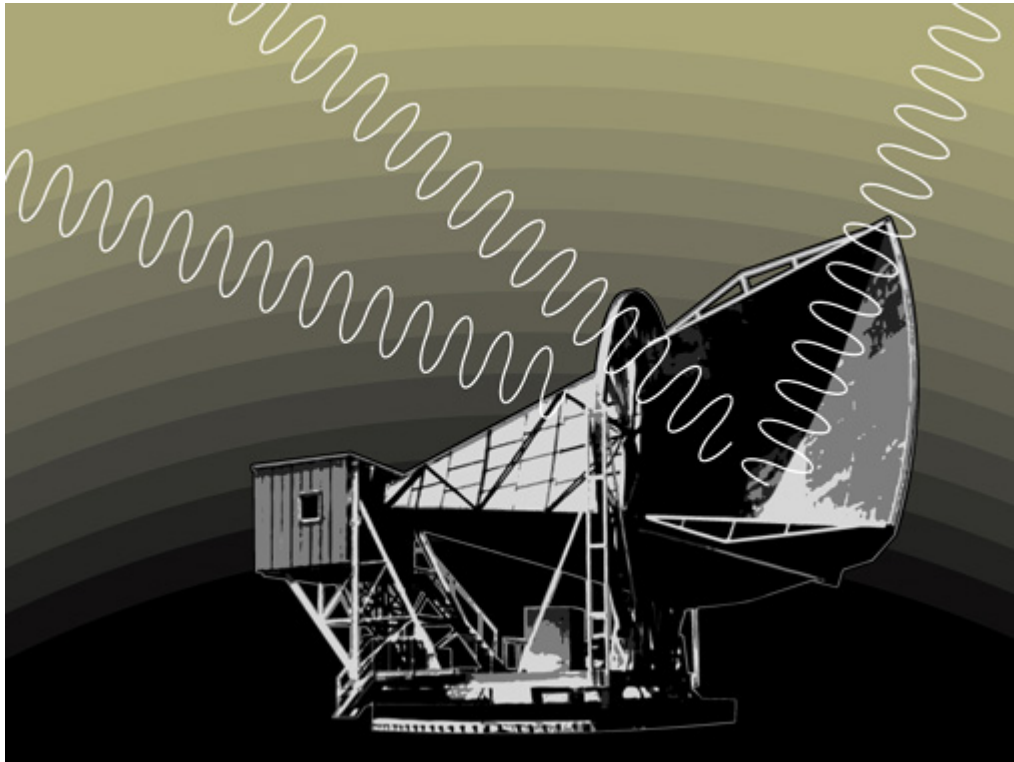
宇宙が膨張→ 温度低下

→ マイクロ波となって宇宙を満たしている  
( $E=hc/\lambda$ )





1964年，米国ベル研究所のペンジアスとウイルソンが宇宙背景輻射を発見したマイクロ波アンテナ

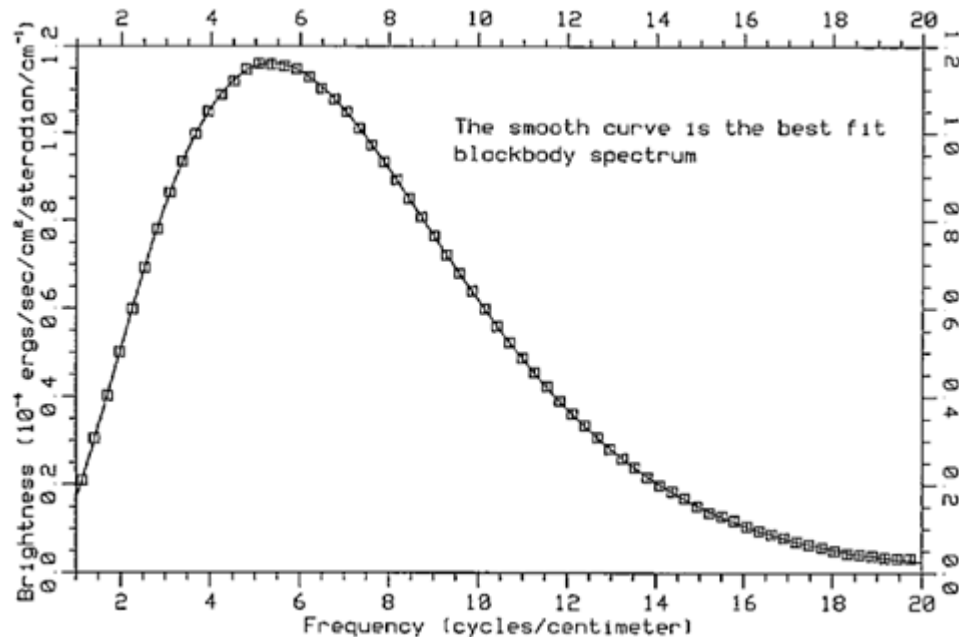


1978年のノーベル物理学賞：  
米国ベル電話研究所のA.A. ペンジアス、R.W. ウイルソン両博士

工学院大学の学生のみ利用可：印刷不可：再配布不可 (C)加藤潔 2012

COBE(Cosmic Background Explorer)衛星は1989年11月18日に打ち上げられ12月より観測開始。以下が測定結果。

理論曲線は2.735 K のプランクの式 (←熱力学より決まる)



2006年度のノーベル物理学賞: 米国NASAゴダード宇宙センターのJ.C. マザー博士とカリフォルニア大バークレー校のG.F. スムート教授

工学院大学の学生のみ利用可: 印刷不可: 再配布不可 (C)加藤潔 2012



# 元素合成シナリオ

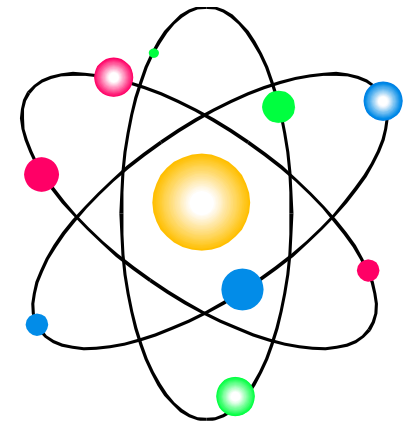
宇宙初期

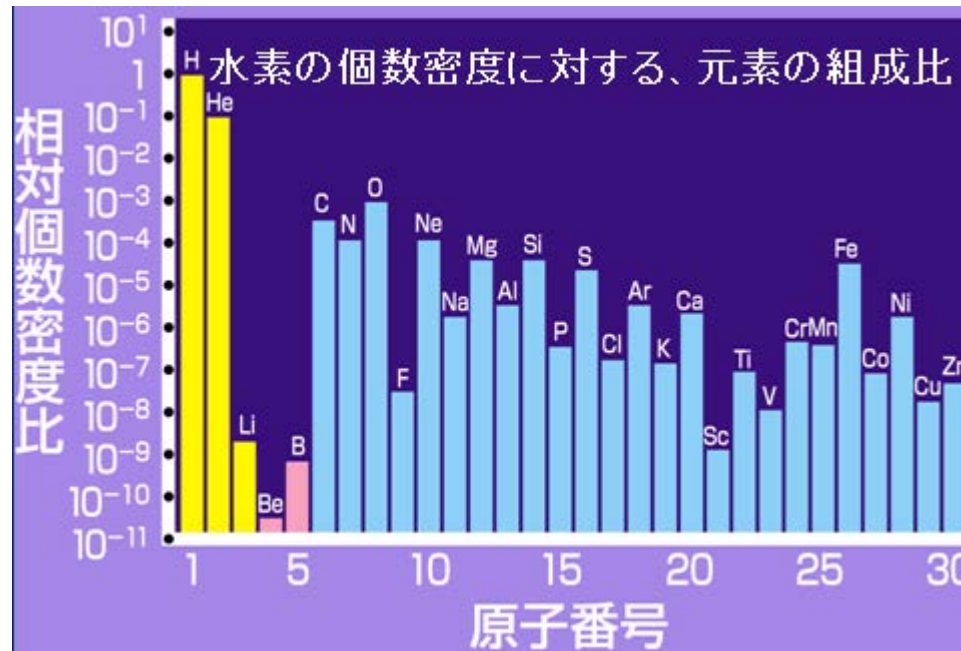
素粒子の火の玉

膨張と共に温度が下がる

素粒子・核理論による元素の存在比  
の予測 (H, He, Li, Be,...)

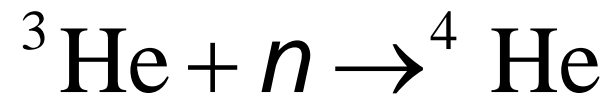
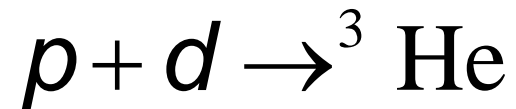
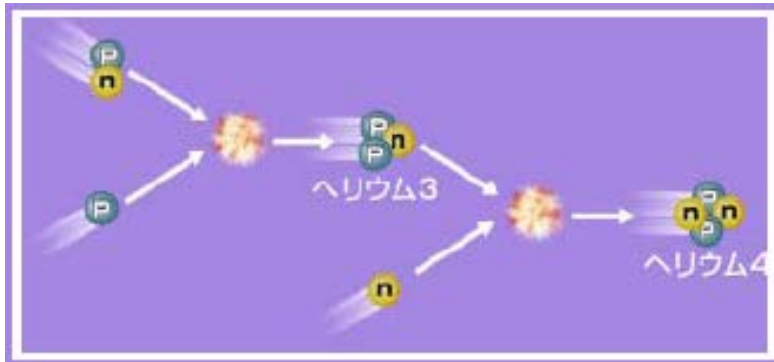
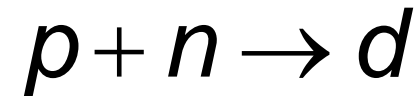
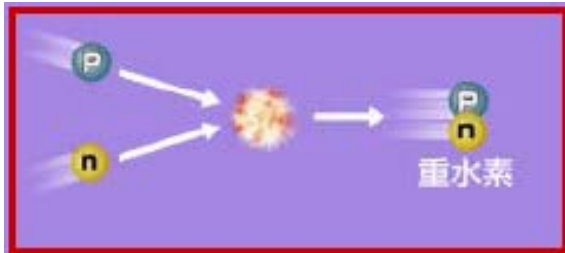
観測値と良く合う



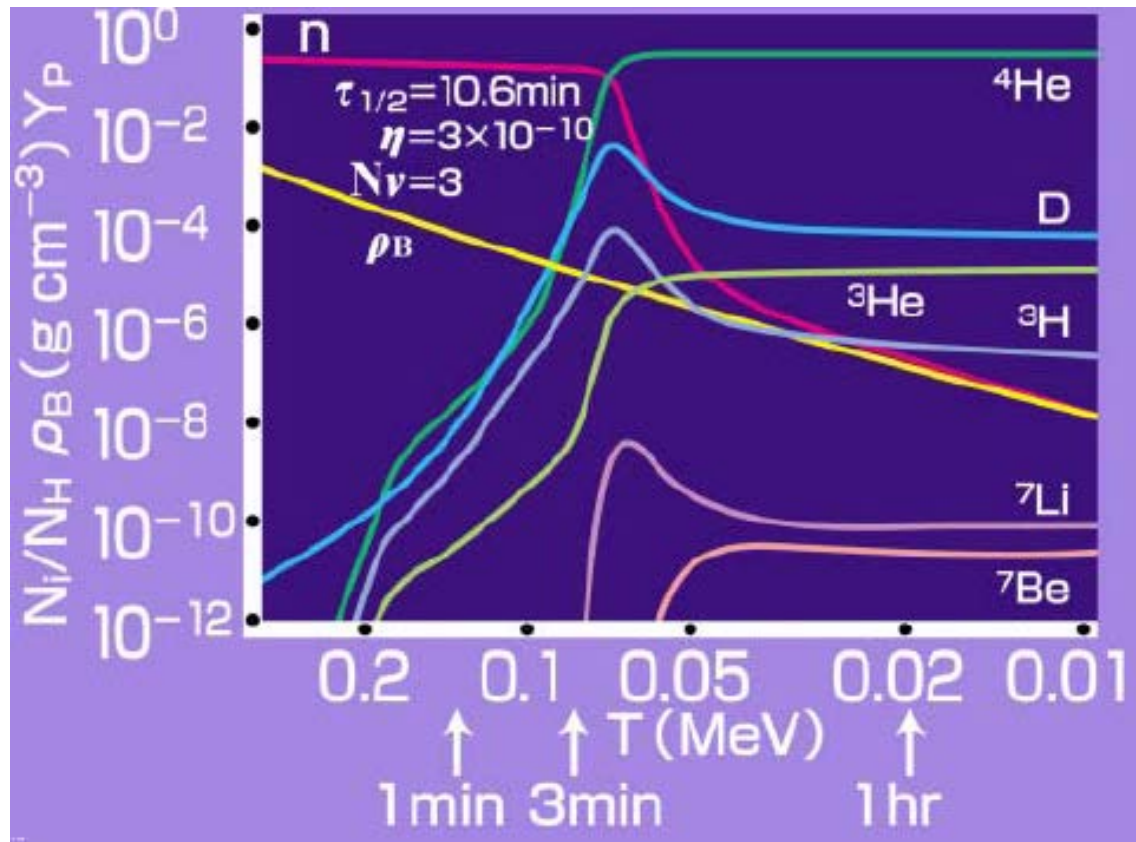


現在の宇宙での各種元素の存在比(水素=1とした)  
ヘリウムは約10%→25%の質量

# 宇宙初期の元素合成反応



# 元素合成：軽い元素



ヘリウム  
の質量存  
在比  
=25%  
が出てくる

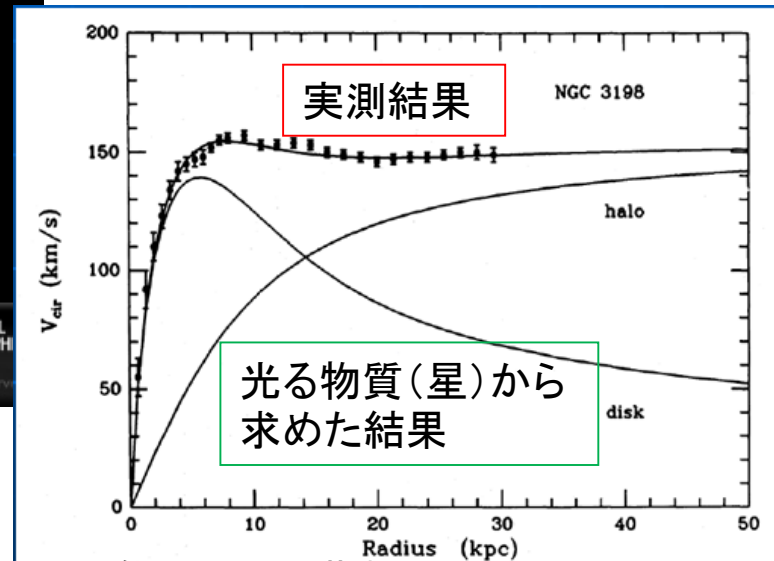
# 銀河の回転曲線



向心力 = 万有引力

$$\frac{mV^2}{R} = G \frac{mM}{R^2}$$

半径Rの内側の質量



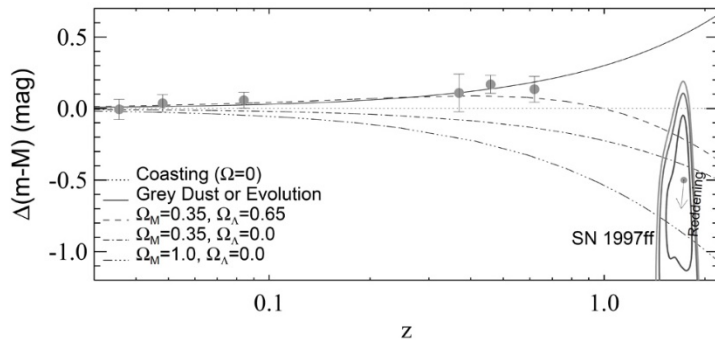
何か見えない物質がある！

工学院大学の学生のみ利用可：印刷不可：再配布不可 (C)加藤潔 2012

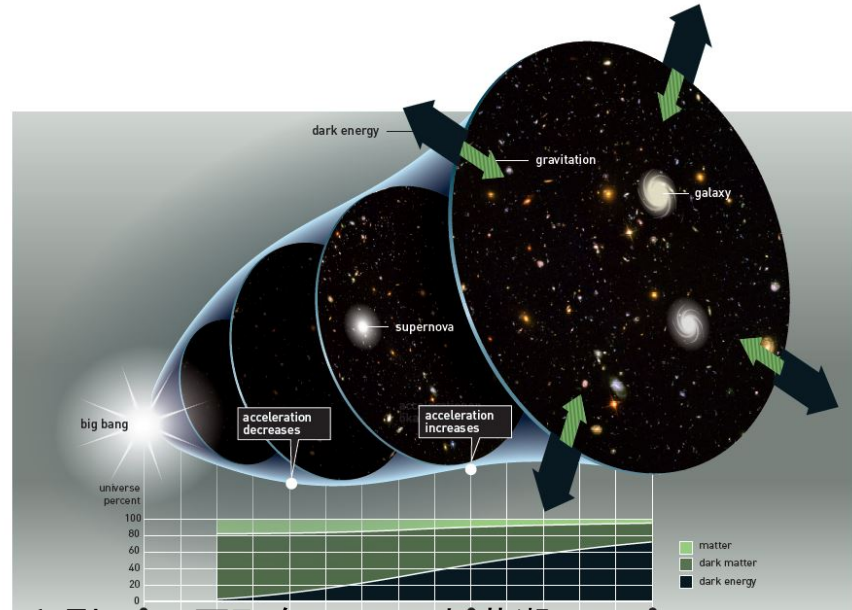
# 宇宙の加速膨張

2011年のノーベル物理学賞

「**遠方の超新星爆発の観測による宇宙の加速膨張の発見**」  
 米カリフォルニア大学バークレー校のサウル・パールムッター教授、オーストラリア国立大学のブライアン・シュミット教授、米ジョン・ホプキンス大学のアダム・リース教授の3氏



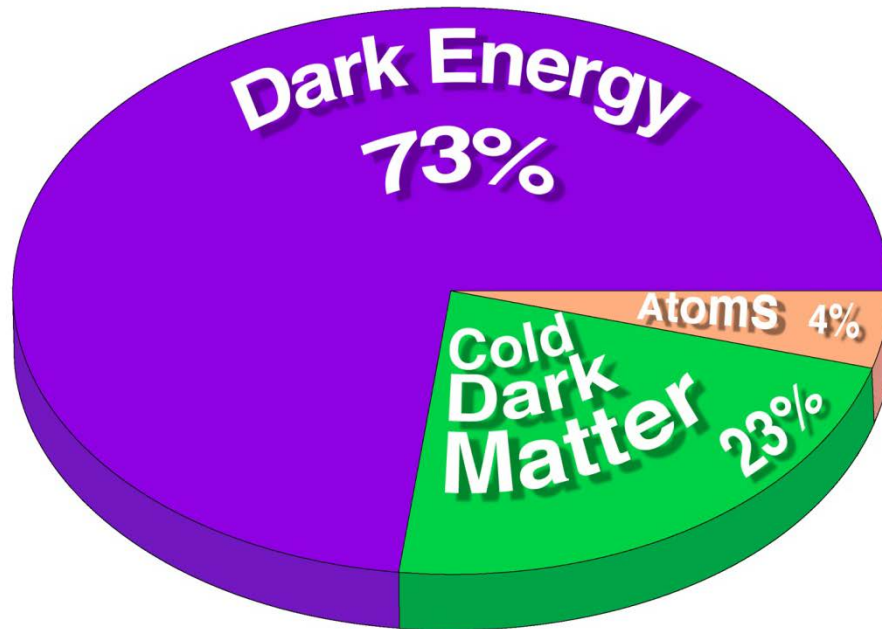
なぜ、加速する？  
 空間に斥力の作用をもつ  
 エネルギーが充ちている



工学院大学の学生のみ利用可:印刷不可 再配布不可 (C)加藤潔 2012 present

Figure 1. The world is growing. The expansion of the Universe began with the Big Bang 14 billion years ago, but slowed down during the first several billion years. Eventually it started to accelerate. The acceleration is believed to be driven by dark energy, which in the beginning constituted only a small part of the Universe. But as matter got diluted by the expansion, the dark energy became more dominant.

# 新たな謎！



衛星による宇宙背景輻射の研究

COBE→WMAP

宇宙を構成するエネルギーの内訳

|              |     |
|--------------|-----|
| 「普通」の物質      | 4%  |
| 暗黒物質(ダークマター) | 23% |
| ダークエネルギー     | 73% |

正体は？

# 宇宙

宇宙

人間

思索と観測・実験

あらたな知見が...

