

# 現代宇宙論

第1回

# 宇宙

往古來今謂之宙，四方上下謂之宇

『淮南子 齊俗訓』

宙＝時間，宇＝空間

Universe

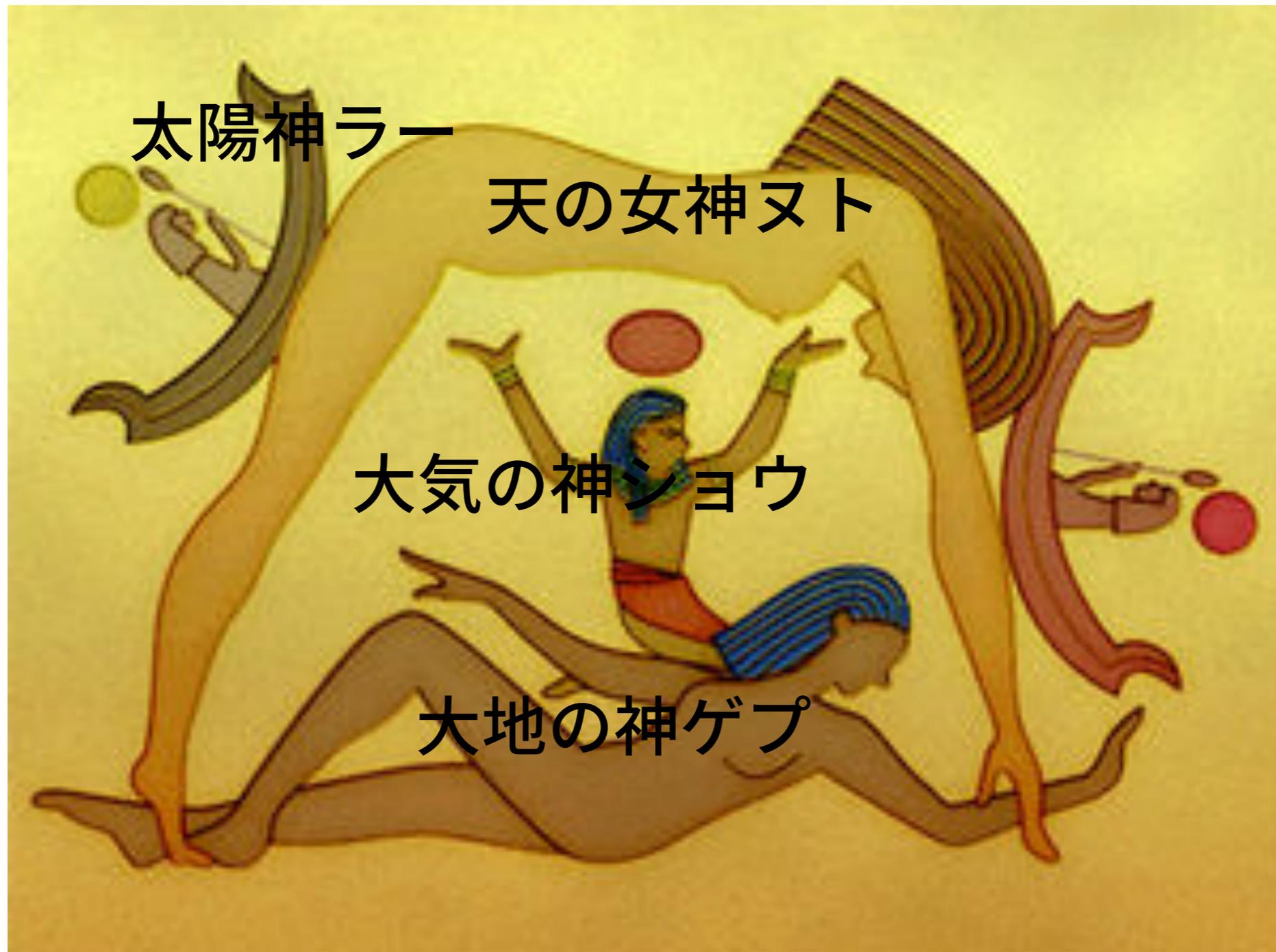
Uni(一つの) + Verse (回転するもの)

Multiverse

Cosmos κόσμος(秩序ある系。カオスの対義語)

ピタゴラス(B.C. 500頃)は確固たる秩序や法則があると考えた

# 宇宙はどう考えられてきたか



<http://rika-net.com>

古代エジプト

# 宇宙はどう考えられてきたか



[yukimura.hep.osaka-cu.ac.jp](http://yukimura.hep.osaka-cu.ac.jp)

古代バビロニア

# 宇宙はどう考えられてきたか

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum.



Peter Apian "Cosmographia" (1539)

古代ギリシャ

# 宇宙はどう考えられてきたか



[SUSY2004のポスター](#)

日本神話の国産み

# 宇宙はどう考えられてきたか

はじめに神は天と地とを創造された。地は形なく、むなし  
く、やみが淵のおもてにあり、神の霊が水のおもてをおおっ  
ていた。神は「光あれ」と言われた。すると光があった。神  
はその光を見て、良しとされた。神はその光とやみとを分け  
られた。神は光を昼と名づけ、やみを夜と名づけられた。夕  
となり、また朝となった。第一日である。

聖書 創世記第1章

# 科学的方法による宇宙研究

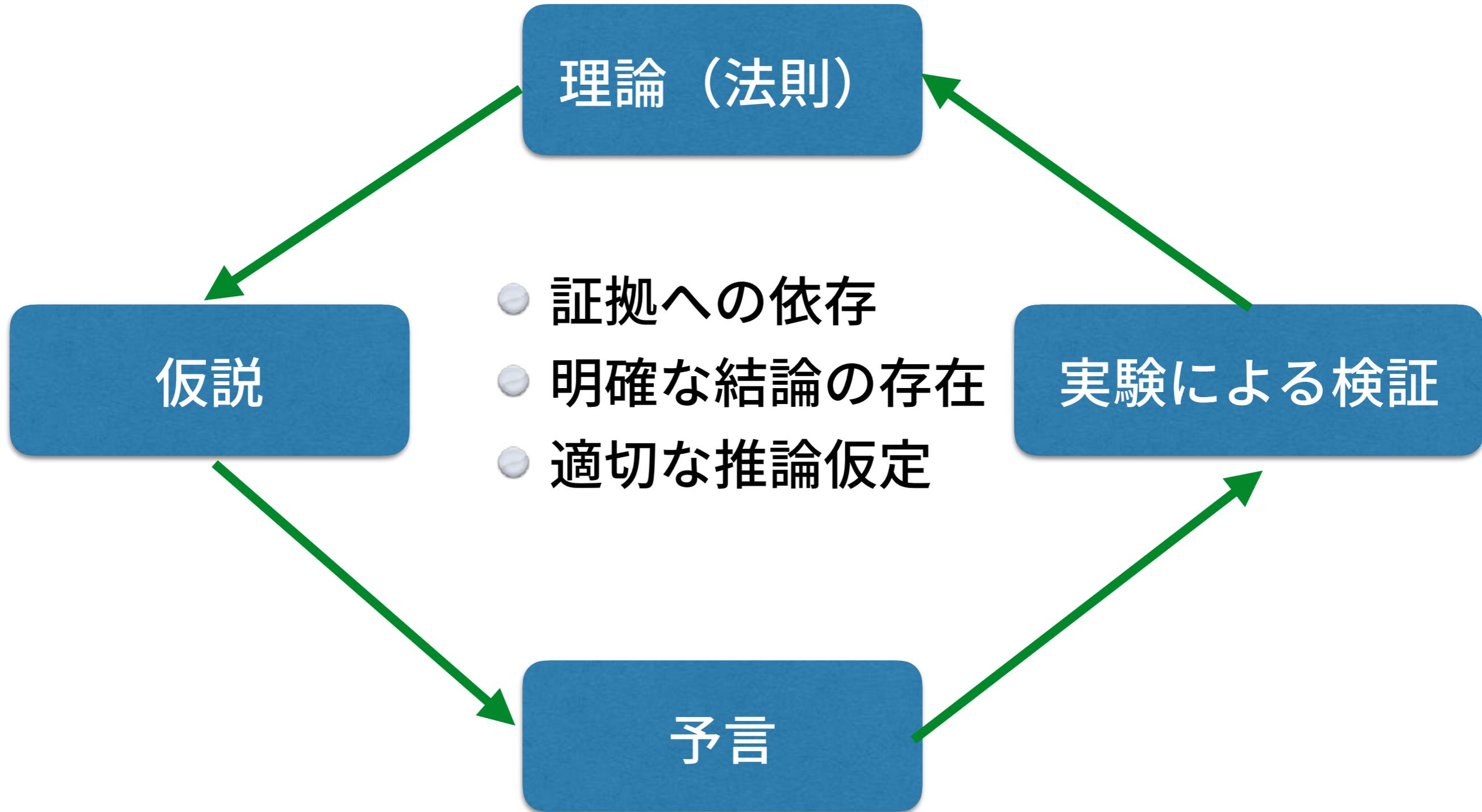
理論（法則）

仮説

実験による検証

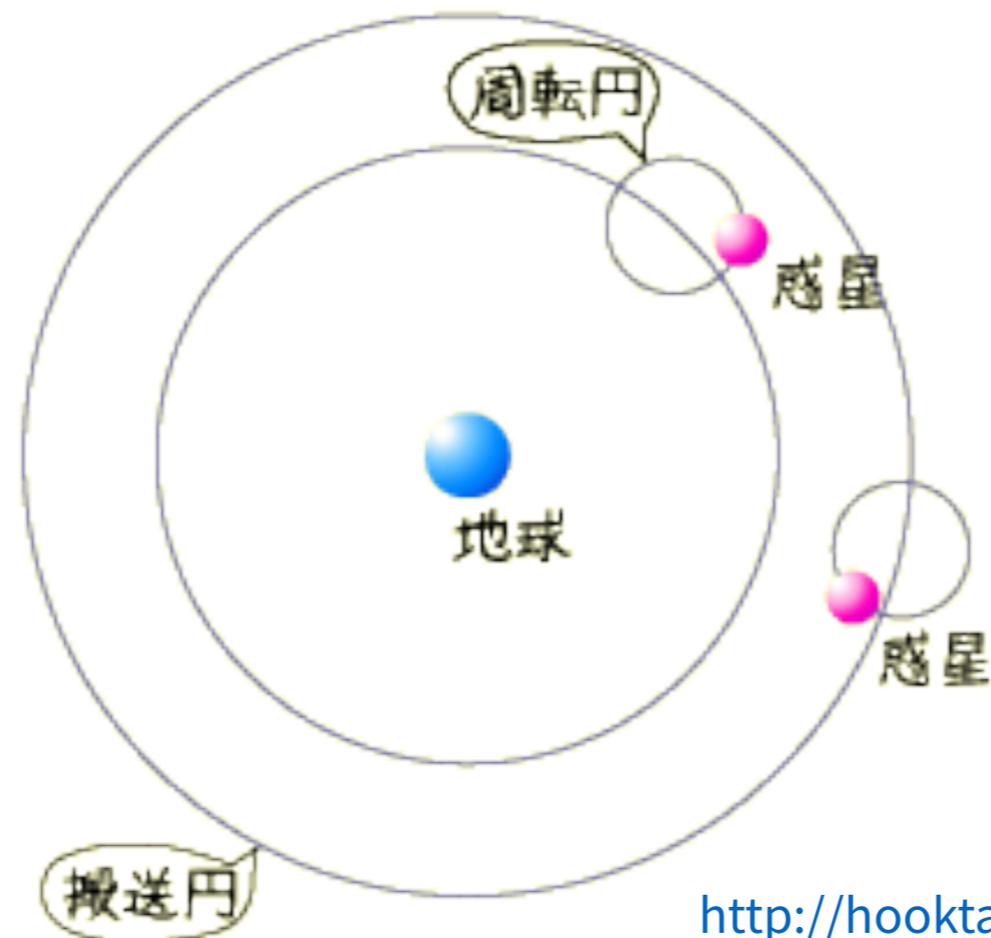
予言

- 証拠への依存
- 明確な結論の存在
- 適切な推論仮定



# 天動説

プトレマイオス以降，16世紀までの宇宙の描像を支配  
惑星の位置予測に誤差。周転円による修正。



# 天動説から地動説へ

## コペルニクスの地動説

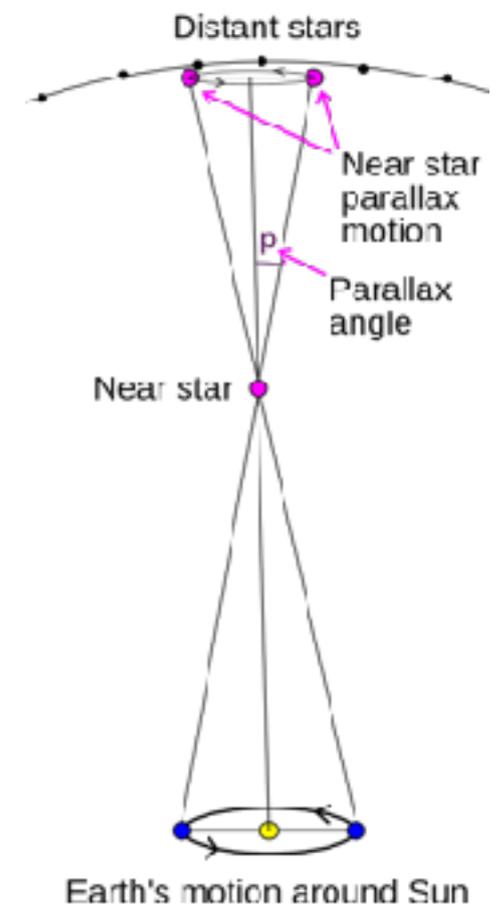
「天体の回転について」 (1543)



<http://spaceinfo.jaxa.jp>

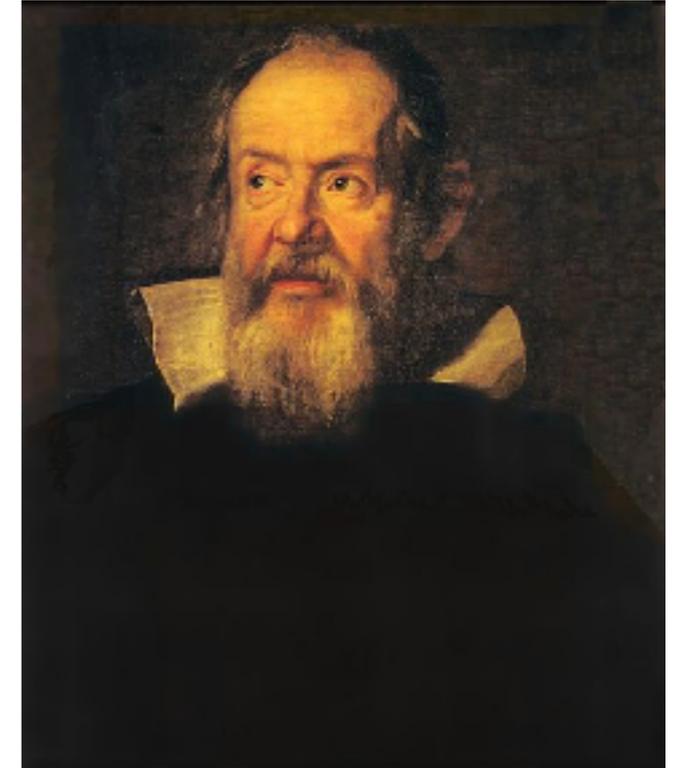
あまり受け入れられなかった

- 実は，宗教的理由よりも，惑星位置の予測精度の問題が大きかった
- 年周視差の問題



# ガリレオ・ガリレイ

(1564-1642)



Justus Sustermans

★ 初めて望遠鏡を使って天体を観測

★ 金星の満ち欠け

★ 木星の衛星

★ ガリレオ裁判

★ 当時の政治状況，ガリレオの人間関係，聖書解釈権の問題などなど，複雑な状況が絡んだ結果のよく分からない裁判。「科学対宗教」という単純なものではないらしい。

# 天動説から地動説へ

チコブラーエの観測に基づき、ケプラーが惑星運動の法則を見出す

- 惑星は太陽を焦点のひとつとする楕円軌道を描く
- 惑星と太陽とを結ぶ線分が単位時間に描く面積は一定
- 惑星の公転周期の2乗は軌道長半径の3乗に比例

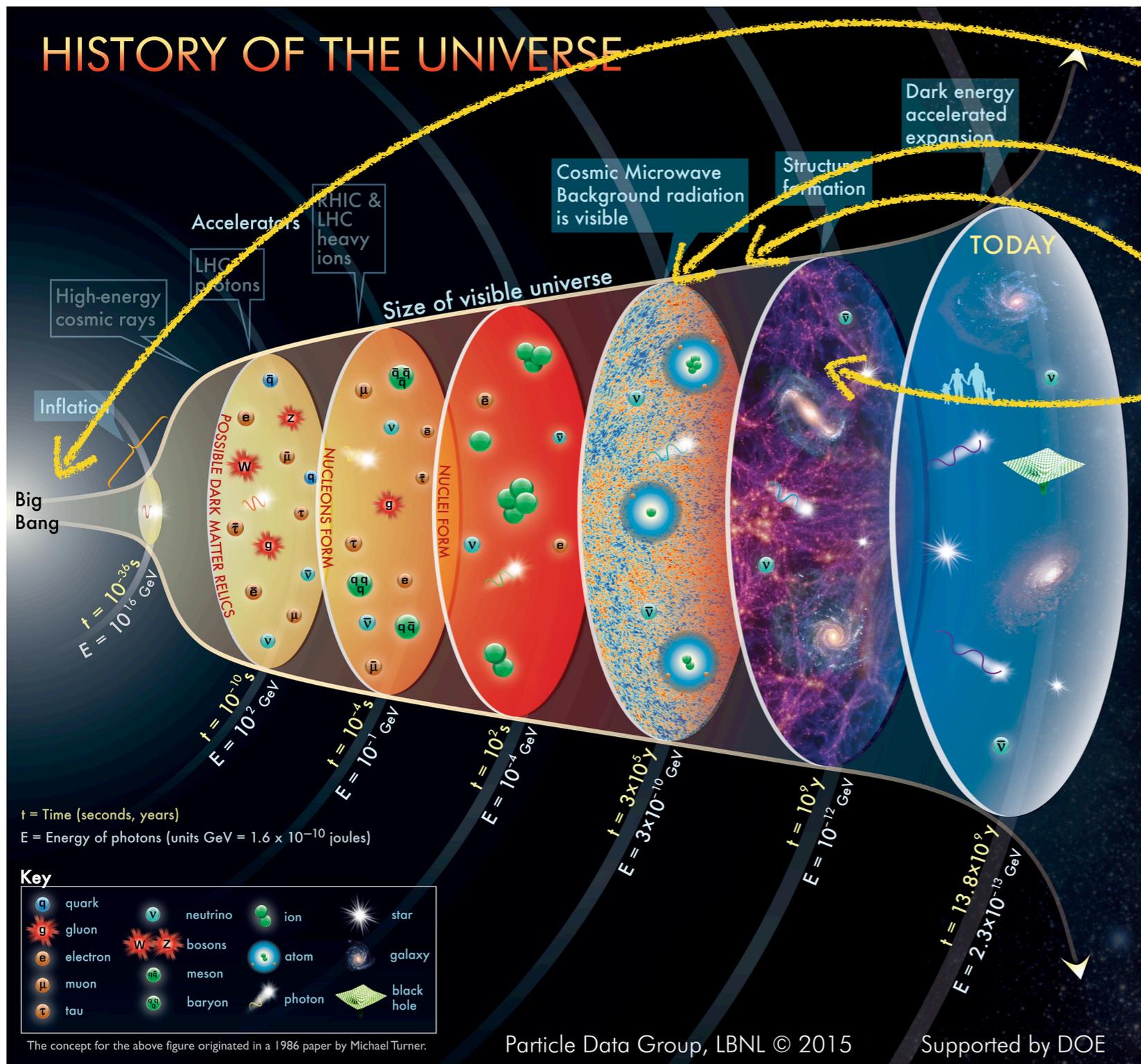


ニュートンによる万有引力の法則発見

# 宇宙論

- ★ 宇宙がどのようなになっているか？宇宙はどのように創成され，発展してきたか？
- ★ 天文学(Astronomy)，天体物理学(Astrophysics)，宇宙論(Cosmology)，素粒子論的宇宙論(Particle cosmology, Astroparticle physics)...
- ★ 物理学の諸法則を応用して宇宙を理解しようと試みる
  - ★ 「宇宙論の基礎法則」がある訳ではない。総合芸術的分野。
- ★ 宇宙の研究から物理学の基礎理論へのフィードバックの可能性
  - ★ ケプラーの法則→万有引力
  - ★ 星内部の元素合成→トリプルアルファ反応にける $^{12}\text{C}$ 共鳴

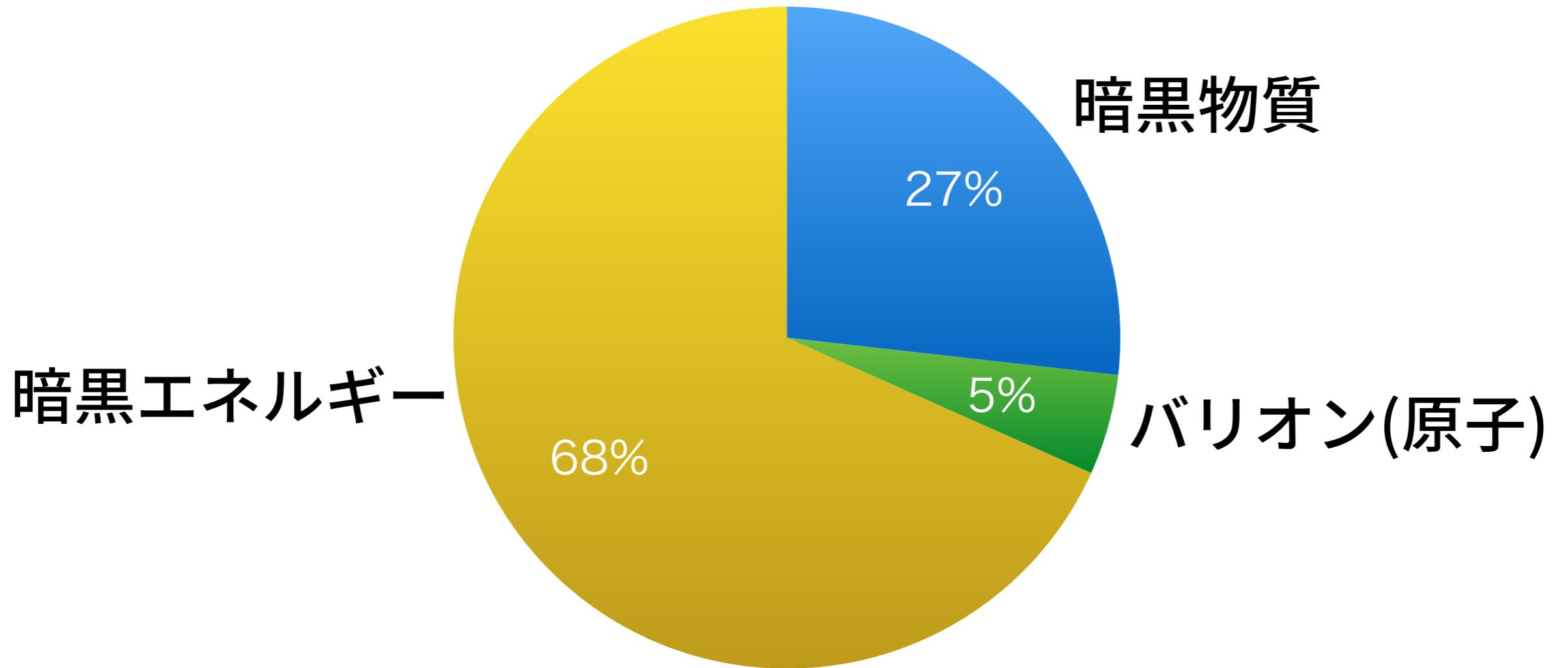
# 宇宙の歴史概観



- 宇宙の誕生
- 宇宙の晴れ上がり
- 宇宙の再電離
- 星と銀河の形成
- 太陽と太陽系の形成
- ...

詳細はこれから1セメスターかけて学びます。

# 宇宙の組成



# この授業の目標

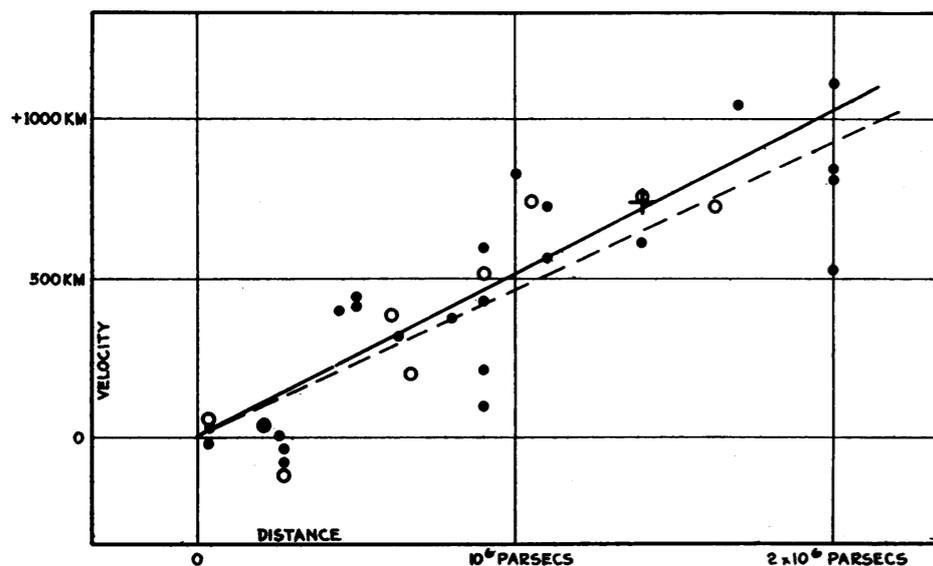
- ★ ビッグバン宇宙論の基礎を理解する
  - ★ 宇宙の熱史的な理解と、その過程にある重要イベントの理解（宇宙の晴れ上がり、再電離等）
  - ★ ビッグバン宇宙論を支える観測的根拠は何か？
- ★ 膨張宇宙におけるボルツマン方程式を扱えるようになる
  - ★ 具体目標：暗黒物質の残存量を計算できるようになる
- ★ 標準宇宙論における問題点の整理

# 膨張宇宙の観測

## ハッブルの法則

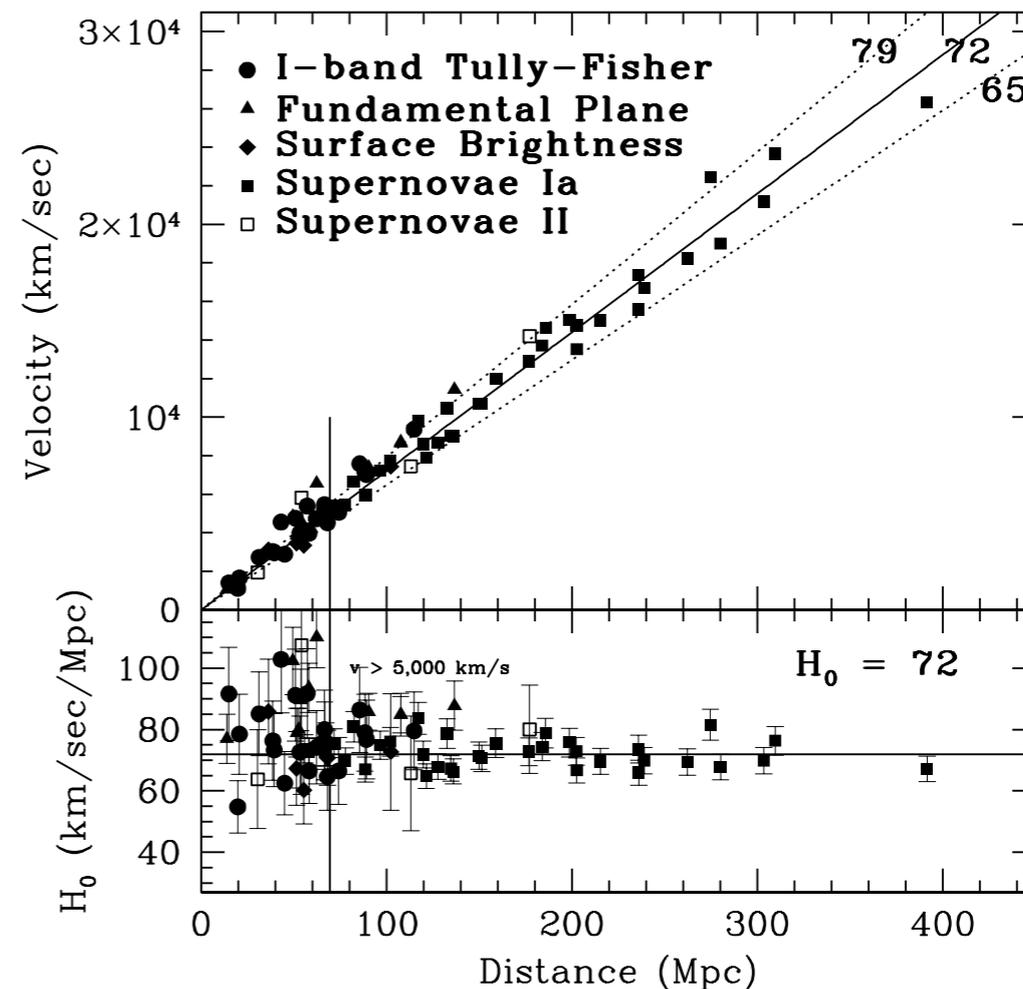
- 遠方銀河ほど後退速度が大きい  $v = Hr$
- これらの性質は観測している銀河の方向によらない

ハッブル定数



Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Edwin Hubble, Proceedings of the National Academy of Sciences, 15, 168, 1929



Freedman, et al., APJ 553,47 (2001)

$$H_0 = 72 \pm 8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

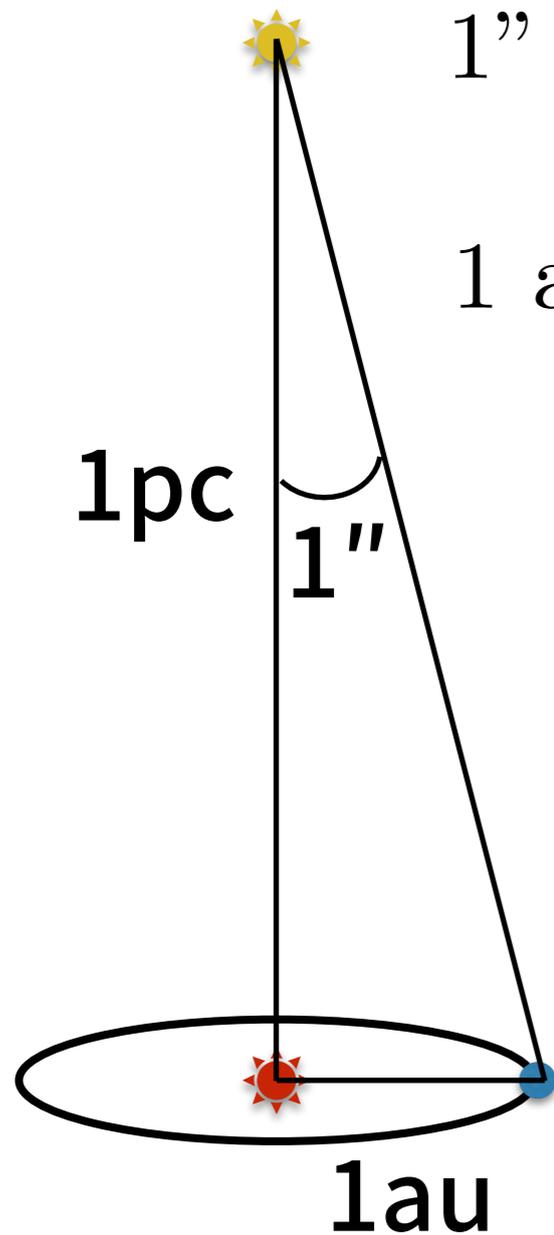
# パーセク

pc(パーセク) とは：

距離の単位。年周視差が1秒角になる距離を1pcという。

$$1'' = 1^\circ / 3600 = \frac{\pi}{648000} \simeq 4.85 \times 10^{-6}$$

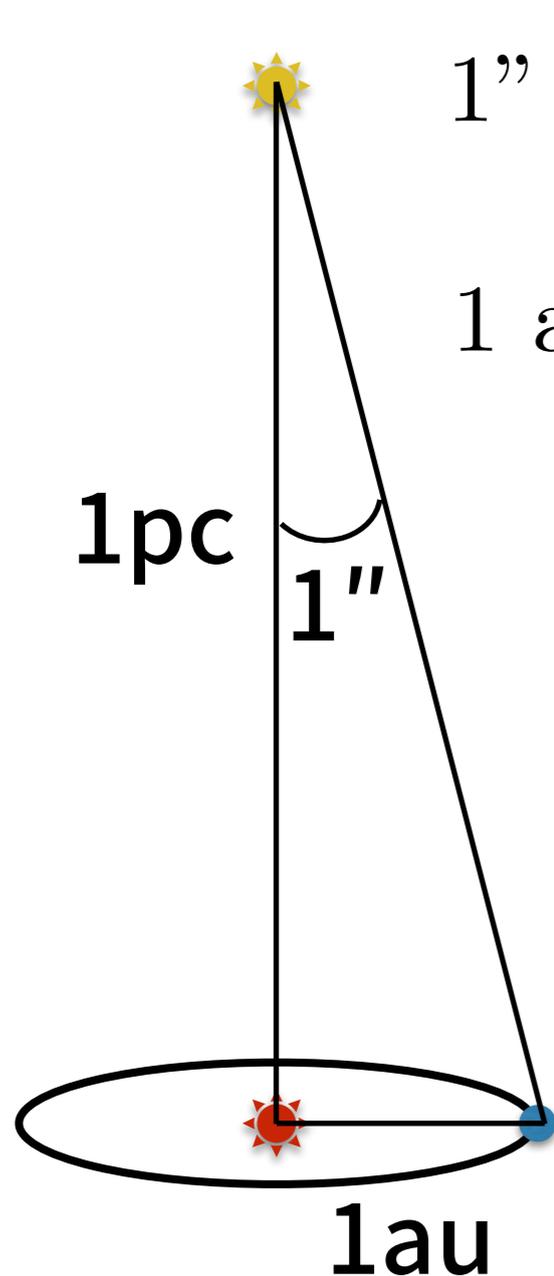
$$1 \text{ au} = 149597870700 \text{ m} \simeq 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$$



# パーセク

pc(パーセク) とは：

距離の単位。年周視差が1秒角になる距離を1pcという。



$$1'' = 1^\circ / 3600 = \frac{\pi}{648000} \simeq 4.85 \times 10^{-6}$$

$$1 \text{ au} = 149597870700 \text{ m} \simeq 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$$

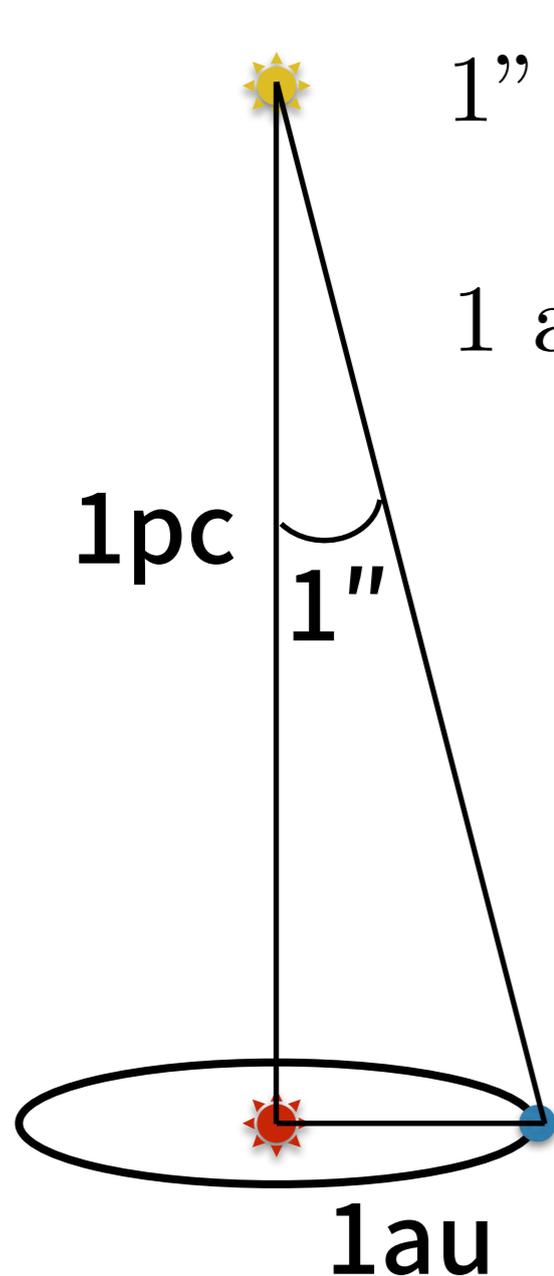
$$1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ au}}{\tan 1''} \simeq 3.09 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ Mpc} \simeq 3.09 \times 10^{22} \text{ m}$$

# パーセク

pc(パーセク) とは：

距離の単位。年周視差が1秒角になる距離を1pcという。



$$1'' = 1^\circ / 3600 = \frac{\pi}{648000} \simeq 4.85 \times 10^{-6}$$

$$1 \text{ au} = 149597870700 \text{ m} \simeq 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ au}}{\tan 1''} \simeq 3.09 \times 10^{16} \text{ m}$$

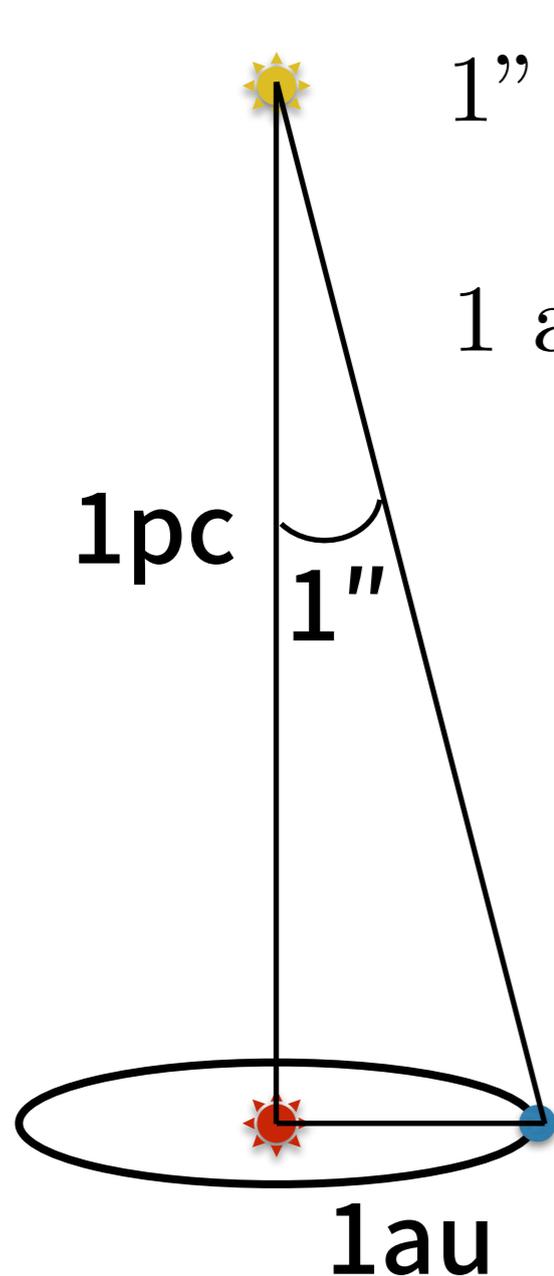
$$1 \text{ Mpc} \simeq 3.09 \times 10^{22} \text{ m}$$

光年単位で換算すると

# パーセク

pc(パーセク) とは：

距離の単位。年周視差が1秒角になる距離を1pcという。



$$1'' = 1^\circ / 3600 = \frac{\pi}{648000} \simeq 4.85 \times 10^{-6}$$

$$1 \text{ au} = 149597870700 \text{ m} \simeq 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ au}}{\tan 1''} \simeq 3.09 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ Mpc} \simeq 3.09 \times 10^{22} \text{ m}$$

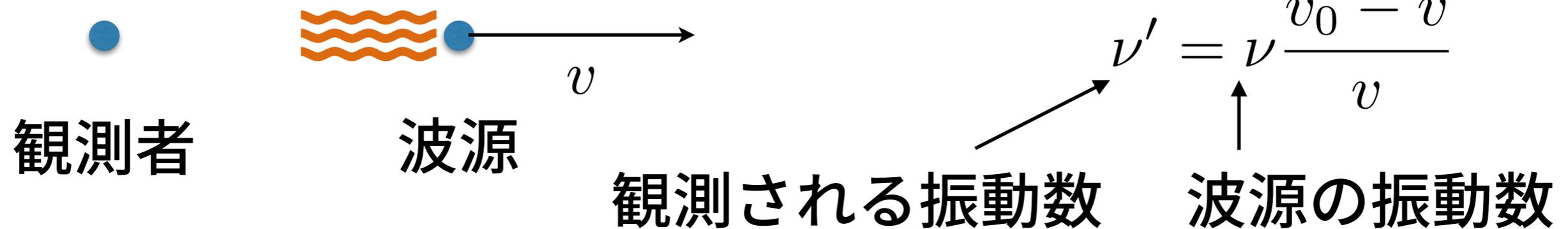
光年単位で換算すると

$$1 \text{ ly} \simeq 9.46 \times 10^{15} \text{ m} \text{ より } 1 \text{ Mpc} \simeq 3.26 \times 10^6 \text{ ly}$$

# 光のドップラー効果

## ドップラー効果の復習

速度 $v$ で遠ざかる波源からの波



光の場合，光速度が誰から見ても $c$ であるから，上式に変更が加わる

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 + (v/c) \cos \theta}$$

観測者から見た光源の遠ざかる方向  
( $90^\circ$ より大きい場合は近づいてくる)

# 赤方偏移

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 + (v/c) \cos \theta} \longrightarrow \lambda' = \lambda \frac{1 + (v/c) \cos \theta}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

遠ざかる光源( $\theta=0$ )からの光は実際より赤く見える  
(波長が長くなる)

赤方偏移パラメータ $z$ を次で定義する

$$1 + z = \frac{\lambda'}{\lambda}$$

光源の速度は $z$ を使って

$$\frac{v}{c} = \frac{2z + z^2}{2 + 2z + z^2}$$

となる。

なお、 $z$ が1より十分小さければ、 $\frac{v}{c} \simeq z$

銀河の後退速度は、星が出す光の暗線スペクトルなどの赤方偏移によって決定する。

# ハッブルの法則の意味

- ★ 静的な宇宙において，天の川銀河だけがある方向に動く場合→赤方偏移に方向性が現れる
- ★ 他の銀河がランダムに動く場合でも同様
- ★ 静的な宇宙における銀河運動による場合  
→天の川銀河が宇宙の中心&かなり特殊な運動を要求
- ★ 天の川銀河が宇宙の1銀河に過ぎないという立場に立つと，別な銀河から見てもハッブルの法則は成り立つ  
→宇宙空間自体が膨張していると考えるのが最も自然

# 自然単位系

いくつかの基本法則に付随する重要な定数に注目する

★ 万有引力の法則 →  $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$

★ 電磁気学，相対論 →  $c = 299792458 \text{ m/s}$

★ 量子力学 →  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05457 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

★ 熱・統計物理学 →  $k_B = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

これらの定数を組み合わせて，長さ，質量，時間，温度の単位を持つ物理量を作ってみる。

# 自然単位系

$$G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$$

$$c = 299792458 \text{ m/s}$$

$$\hbar = 1.05457 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$k_B = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$t_P = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} \simeq 5.39 \times 10^{-44} \text{ s}$$
$$l_P = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \simeq 1.62 \times 10^{-35} \text{ m}$$

これらを時間，長さ，質量，  
温度の単位として単位系を作り  
直すことができる。

$$M_P = \sqrt{\frac{ch}{G}} \simeq 2.18 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

↓  
自然単位系

$$T_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{Gk_B^2}} \simeq 1.42 \times 10^{32} \text{ K}$$

$$G = c = \hbar = k_B = 1$$

# 自然単位系

$$G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$$

$$c = 299792458 \text{ m/s}$$

$$\hbar = 1.05457 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$k_B = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

また，これらの定数を利用することで，例えば長さや時間をエネルギーの単位に換算できる。

例:時間 $t[\text{s}]$ に対し，時間を表す変数 $t'$ を  $t' = t/\hbar$

で定義すると， $t'$ は $\text{J}^{-1}$ 単位の変数になる。さらに

$1 \text{ J} = 6.242 \times 10^{18} \text{ eV}$  であるから，例えば，

$$t'_P = 5.39 \times 10^{-44} \text{ s}/\hbar = 3.19 \text{ GeV}^{-1}$$

同様に，

$$l'_P = \ell_P/(\hbar c) = 1.62 \times 10^{-35} \text{ m}/(\hbar c) = 3.19 \text{ GeV}^{-1}$$

# 単位換算の練習

- ★ プランク質量 $M_P$ は何GeVに対応するか？
- ★ 2.725Kは何eVに対応するか？
- ★  $1/H_0$ は何cmに対応するか？

# 宇宙の歴史概観

