

総合演習

「子どもの未来と教育」

長島雅裕（長崎大学教育学部）

1. 宇宙と地球

4/16 地球から見た宇宙：宇宙観の発展

4/23 現代の宇宙論

5/7 宇宙における地球

5/14 宇宙における生命（JAXA担当）

この4回では、主として宇宙・地球・生命の自然科学的認識について扱います。

質問は積極的に。私が担当する分について時間外に質問したい場合は、6階624号室まで来てください。

アンケート

- 今後の参考にしますので、アンケートにご協力下さい。

0. 地球から見た宇宙

天の川と夏の三大角

1997年 9月10日, 21時18分 (JST)



35mm判一眼レフ用魚眼レンズ (Nikon f=8mm, F2.8/絞り開放), 冷却CCDカメラ (MUTOH CV-16)
露出時間: 赤2分×3, 緑4分×4, 青2分×4, フィルタ: R-60, G-533, B-460, 3色分解撮像カラー合成画像
画像範囲: 対角64°, 観測場所: 乗鞍コロナ観測所

H. Fukushima, M. Ishiguro and J. James 国立天文台 広報普及室

おおぐま座, こぐま座



魚眼レンズ (Nikon f=8mm, F2.8開放) Feb. 13, 1997, 21h50m (JST)
冷却CCDカメラ (MUTOH CV-16)
3色分解撮像カラー合成画像, 木曾観測所にて

H. Fukushima and D. Kinoshita
国立天文台 広報普及室

1. 近代天文学の成立まで

- 人類の発生、二足歩行
- 思考の発達
- 太陽や月の運動、星の（日周）運動の認識
- 神話の世界
- 時間の認識
- 道具としての天文学？
 - 農作業、洪水の予測、時刻
- 宇宙論へ
 - 「宇」は空間、「宙」は時間を意味する

日本の神話・西洋の神話

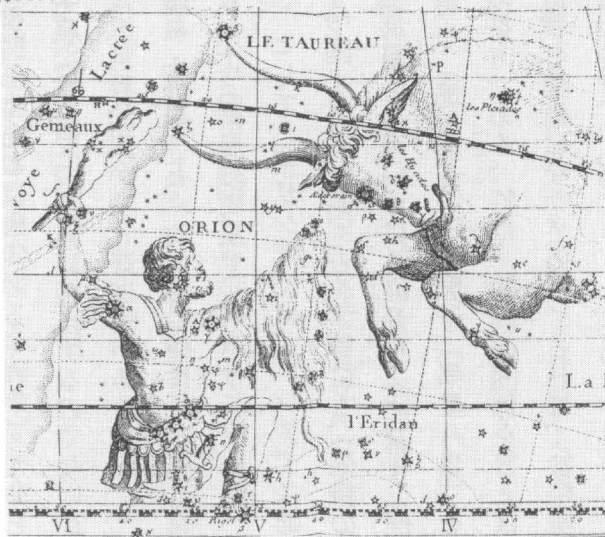
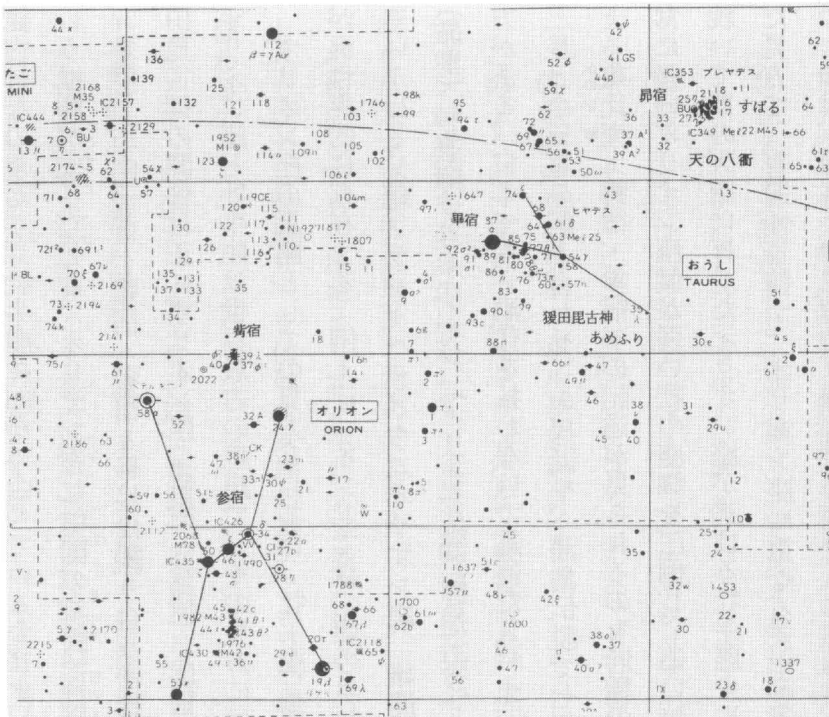


図 26・27

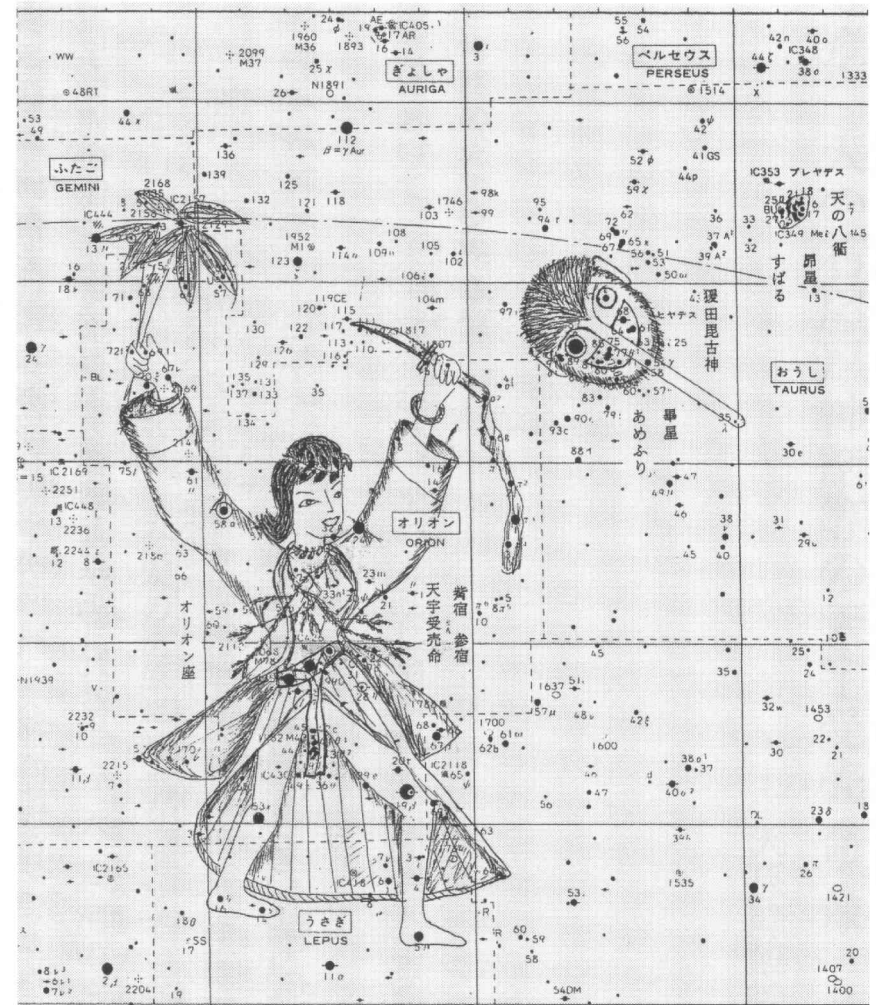


図 31 天孫降臨神話における天宇受売命像の復元と、
猿田毘古神・天の八衢の関係

「星座で読み解く日本神話」勝俣隆

古代の宇宙論：中国

漢代「淮南子（えなんじ）」

- はじめ世界は混沌としていたが、やがてその中から重い物質と軽い物質とが分かれてきて、重いものは固まって地となり、反対に軽いものは上って天となったという。

→日本書紀へ

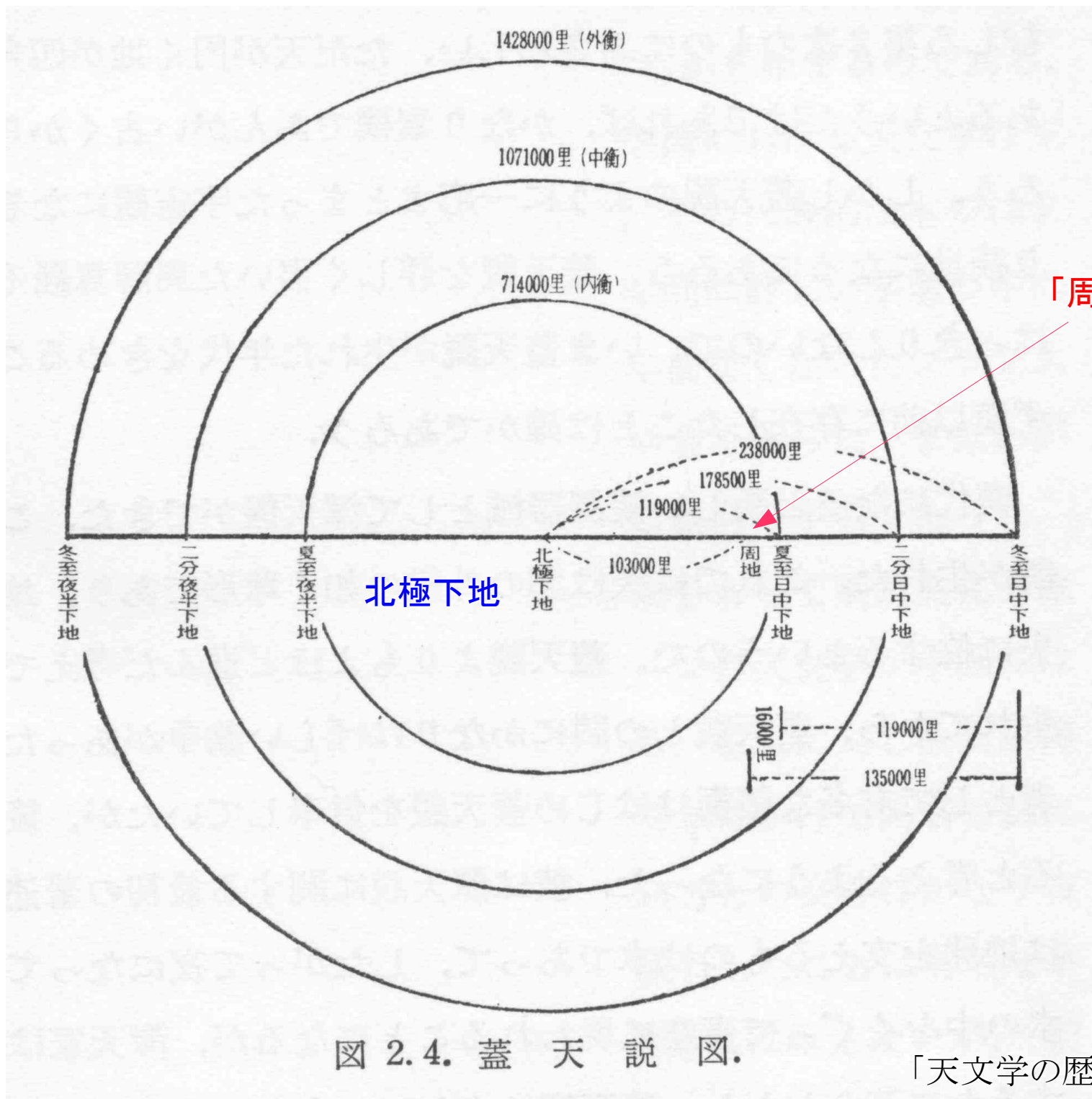
「杞憂」

- 杞国の人が天の落ちることを心配した
- 天が落ちてこないことの説明：地上の四隅に柱があって天を支えている

古代の宇宙論：中国

「蓋天説」

- 天と地はそれぞれ平らで平行
 - 天は円、地は正方形「天円地方」
- 石臼のように天が回転する
- 中国（「周地」）に太陽が近づくと昼になる
- やがて、天は傘のように北極が隆起したものと考えられるようになっていった



「周地」

図 2.4. 蓋天說圖.

「天文学の歴史」藪内清

古代の宇宙論：中国

「渾天説」

- 天は卵の殻のように球形
- 地は卵黄のようにその中央に位置
- 地は水によって支えられている
- 蓋天説よりは進んだ考え
- 渾天説では太陽は夜は水の中をくぐる→蓋天説からの批判
- 3～4世紀ごろに論争はされなくなり、それ以降は天体現象を予報する天体表に関心

古代の宇宙論：インド

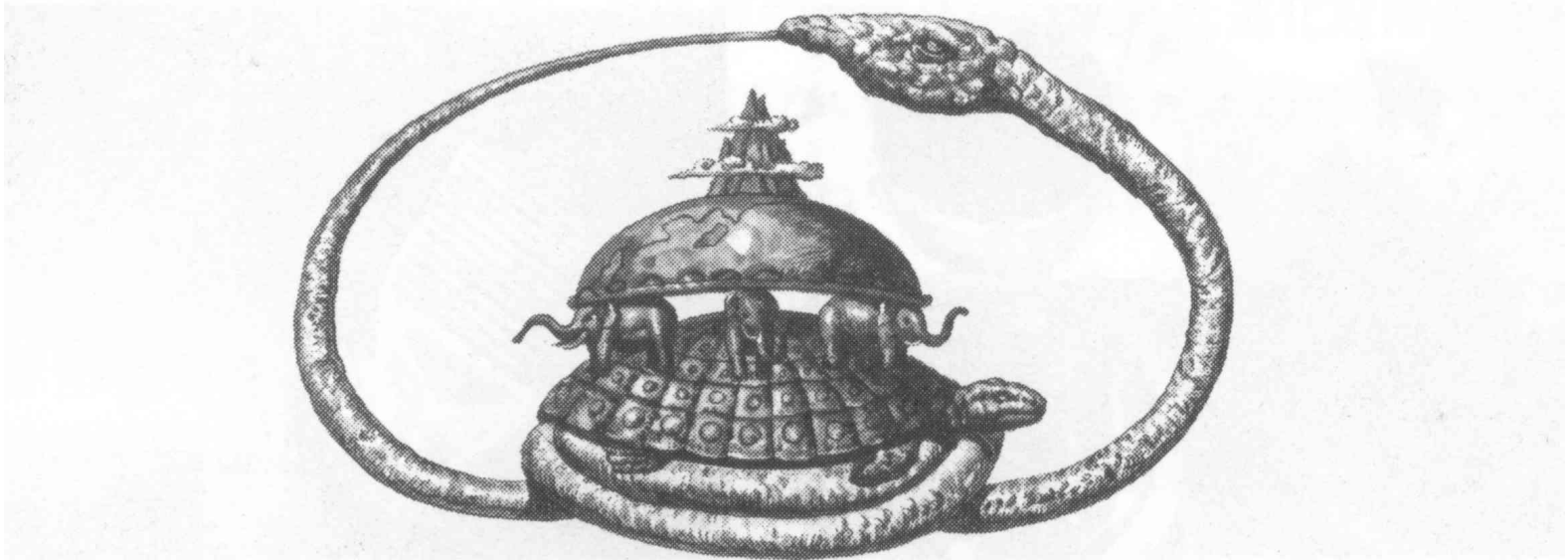


図 1.4 インド人が考えた宇宙図。巨大な亀の上に象が乗り，その上に大地が載っている。大地の中央には神の住む高い山（須弥山）がある。太陽と月は山の山頂付近をめぐり，星をちりばめた天は，巨大な蛇（コブラ）によって支えられている。

古代の宇宙論：ギリシャ

アリストテレス (B. C. 384–322)

天動説を集大成し、
宇宙体系としてまとめる

中心に地球

→火・気・水・土

惑星の外に恒星天球

完全な世界「円」運動



図 1.5 アリストテレスの宇宙体系。

「人類の住む宇宙」岡村定矩・他

古代の宇宙論：ギリシャ

プトレマイオス（2世紀中頃）

現実の惑星の運動を再現するよう、
数学的に整備

惑星の逆行運動を
説明するため、
「周転円」を導入

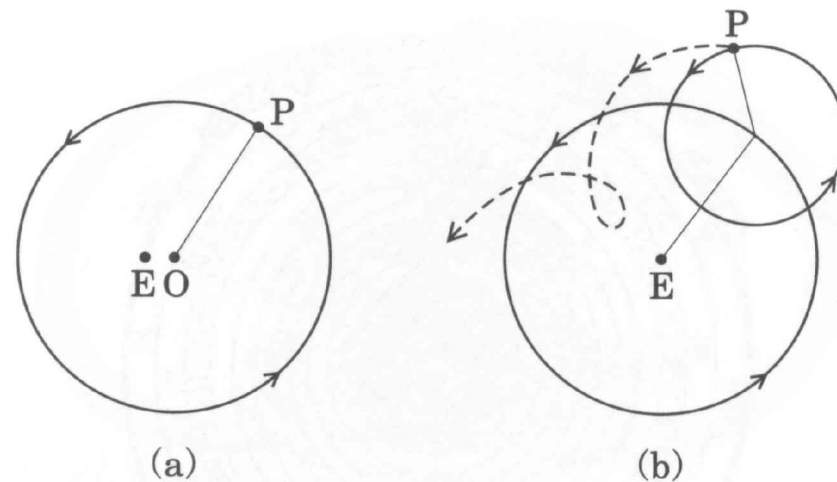


図 1.6 離心円 (a) と周転円 (b) による惑星運動の説明. 記号の E は地球, P は惑星を表わす. 離心円では, 地球は円の中心 O からわずかにずれた位置にあるため, 惑星が円の上を等速運動していても, 地球から見た見かけの速度 (角速度) が一定でなくなる. また, 周転円の導入により逆行運動が説明できた.

古代の宇宙論：ギリシャ

アリストタルコス (B. C. 310–230頃) 地動説を提唱

- 月が正確な半月のときに太陽との角度 α を測定
- 太陽-地球、地球-月間の距離比を19:1と評価
- 見かけの大きさが同じことから、太陽の大きさは月の19倍、月食時の影の測定から地球は月の3倍程度→太陽のほうが地球より大きい
- 地球が中心というのは不自然

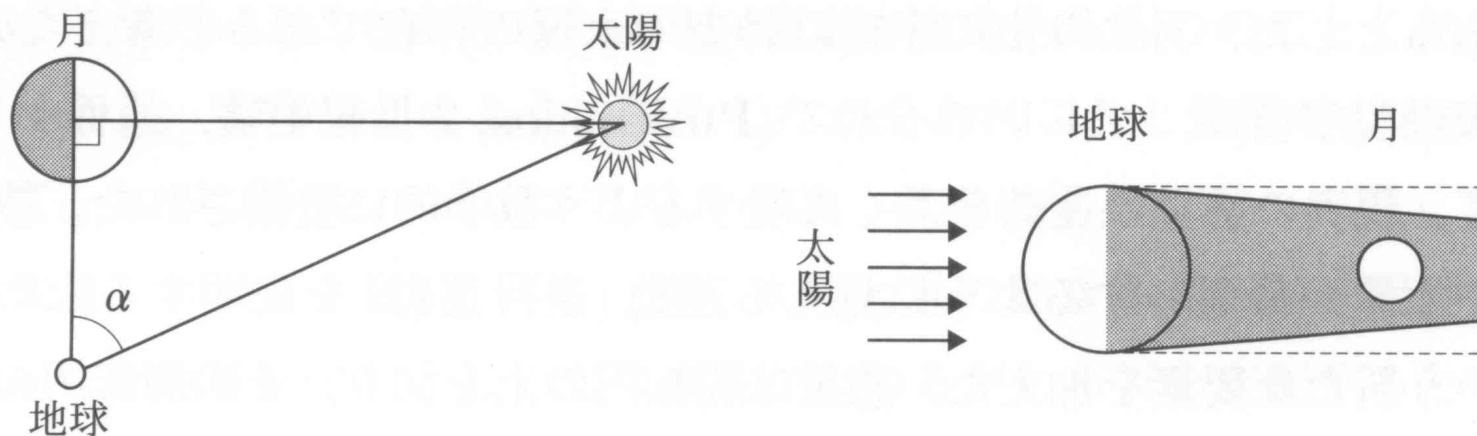


図 1.7 アリストタルコスの図. 「人類の住む宇宙」岡村定矩・他

近代天文学へ:コペルニクスの転回

コペルニクス (1473-1543)

- 測定技術の進歩により、大量の周転円が導入され、軌道上の速度も調節
- 天動説は観測を再現するために複雑化
- 「神が宇宙を創ったのなら、もっと単純で美しい体系のはず」

しかし円運動を仮定
年周視差も測れず
→天動説を覆せず

年周視差:地球の位置が変化すると、恒星の見かけの位置(方向)も変化するはずである。

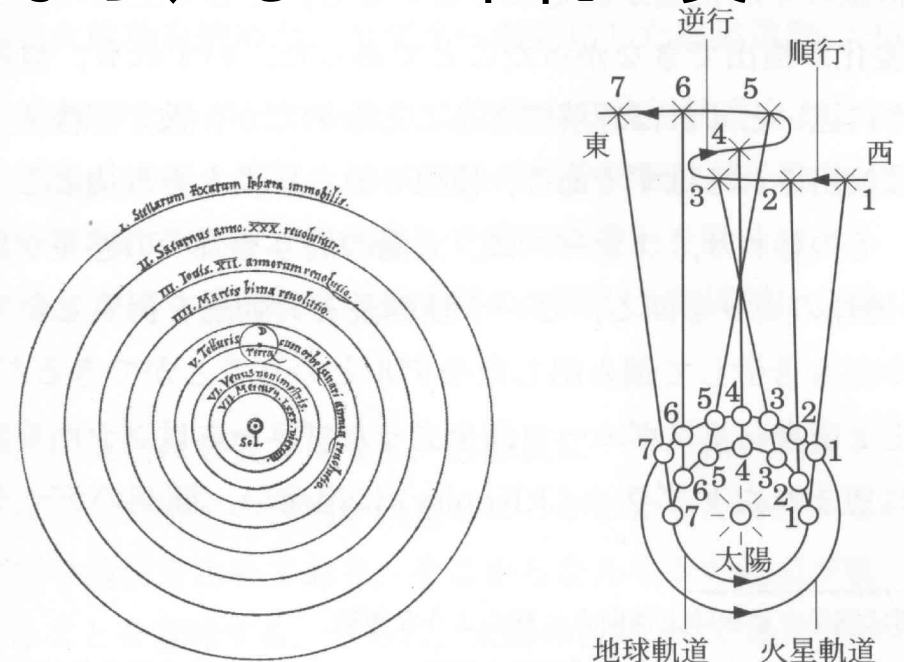
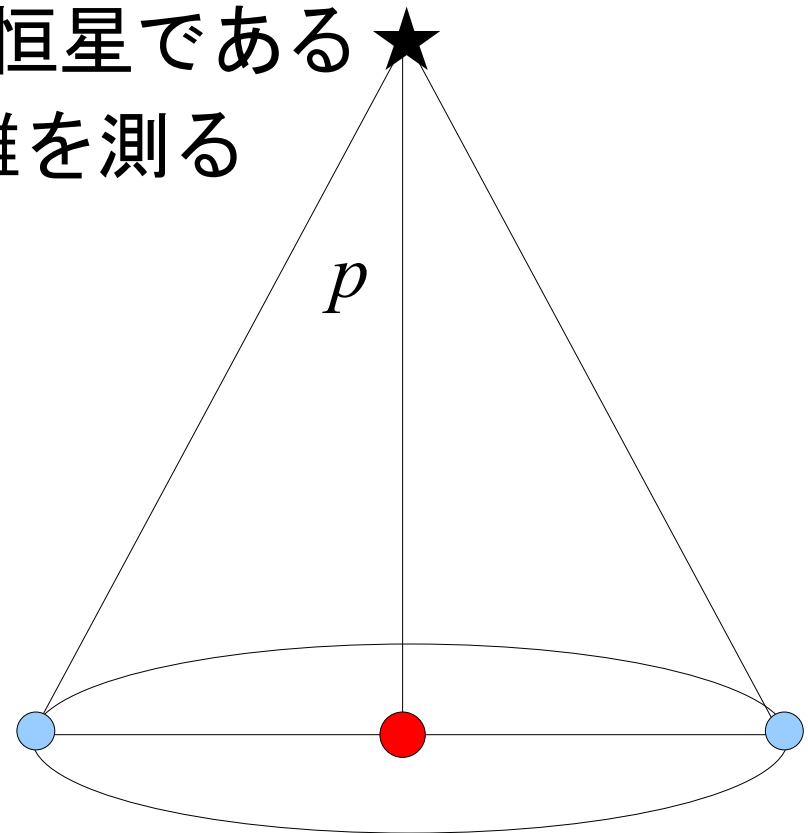


図 1.8 コペルニクスの地動説宇宙の図。

「人類の住む宇宙」岡村定矩・他

年周視差

- 地球は太陽のまわりを公転している
- 半年たつと、近い恒星ほど位置がずれて見えるはずである。
- 太陽-恒星-地球のなす角 p を年周視差と呼ぶ
- p が大きいほど、近くの恒星である★
- これで近くの恒星の距離を測る



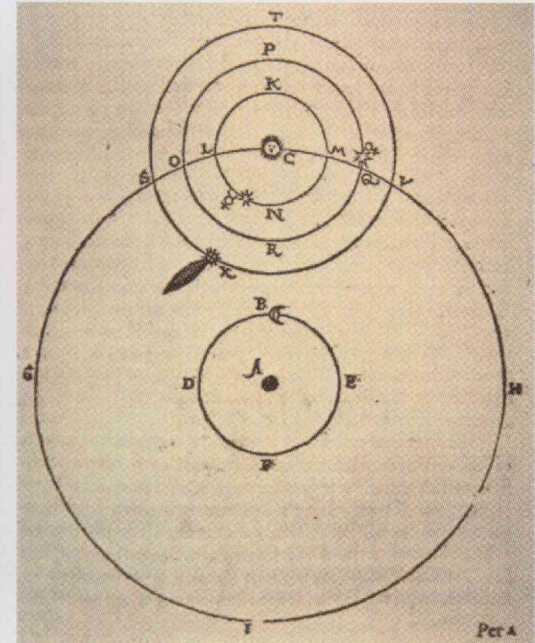
近代天文学へ

ティコ・ブラーエの眼視精密観測

- 20年にわたり、太陽・月・惑星・恒星の詳細な位置観測

しかし、地動説を採用せず

- 年周視差が測定できない
 - 土星の見かけの大きさ変化しない
- 距離が遠いとするならば、説明できるのだが・・・
- 当時の宇宙論では、実際よりもずっと宇宙は小さかった



口絵2

ウラニボルグ(天文台)でティコ・ブラーエの使った四分儀(左)
ティコ・ブラーエの宇宙モデル(右)(p.17)

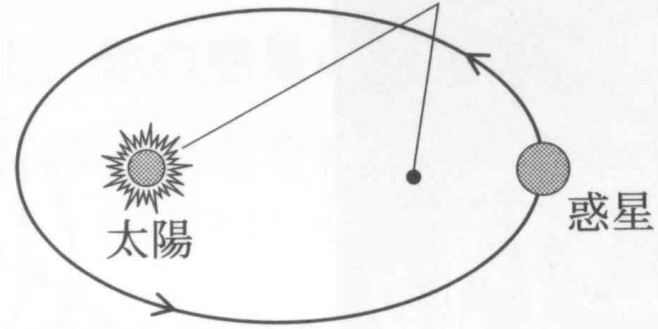
近代天文学へ

ケプラーの三法則の発見

- ティコ・ブラーエのデータの解析
- 天動説から地動説へ
 - 天動説ではデータを説明できない
- しかし、当時の地動説でも説明できない
- 「円」を捨て、「楕円」に
 - 惑星軌道は太陽が一つの焦点に位置する楕円
 - 面積速度一定
 - 軌道長半径の3乗が公転周期の2乗に比例

ケプラーの法則

ケプラーの第1法則 楕円軌道の焦点



ケプラーの第2法則

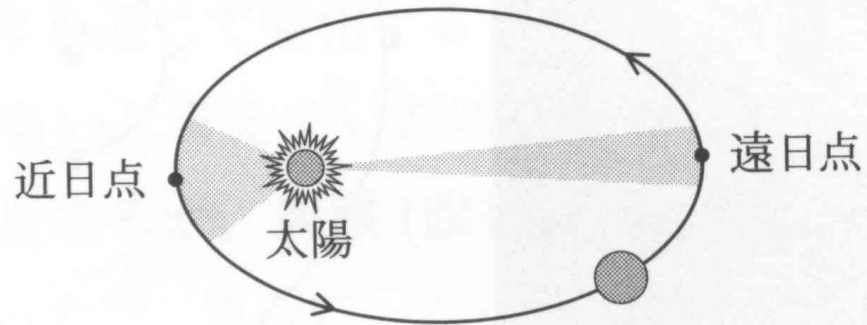


図 1.10 ケプラーの第1法則と第2法則.

近代天文学へ

ガリレオの果たした役割

- 望遠鏡の開発

- 木星の4大衛星の発見
- 木星の周囲をまわっていることを発見
- 地動説のヒント（太陽系モデル）
- 太陽の観測、黒点の移動→キズがあり、自転している
- 月の観測、凸凹がある
- 天上は「完全」ではなかった
- 天の川は恒星の集団→非常に遠いことを示唆

テクノロジーの発達を土台に実証的研究

近代天文学へ

ニュートンの法則

→物理学の誕生

- 慣性の法則

- 物体は、外から力が加わらない限り、静止または等速直前運動を続ける
- 運動方程式 $ma=F$ (質量×加速度=力)
- 作用・反作用の法則

ケプラーの法則をすべて説明可能

万有引力の法則の発見

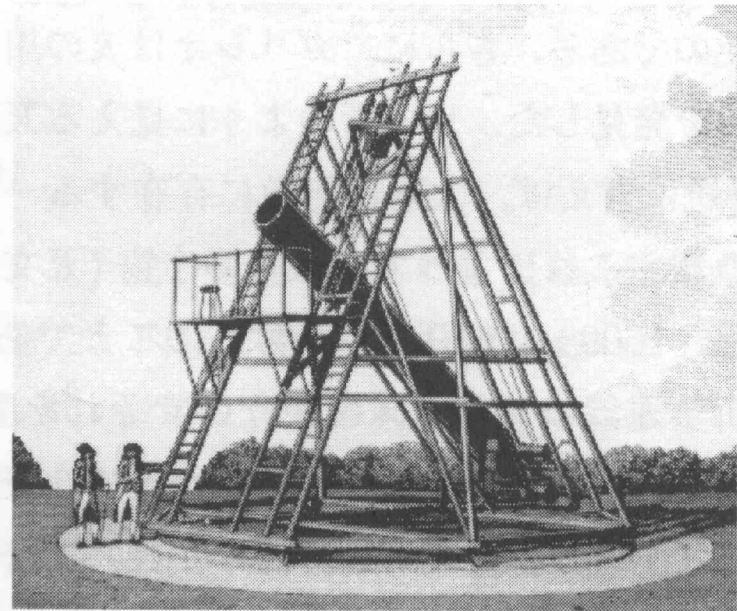
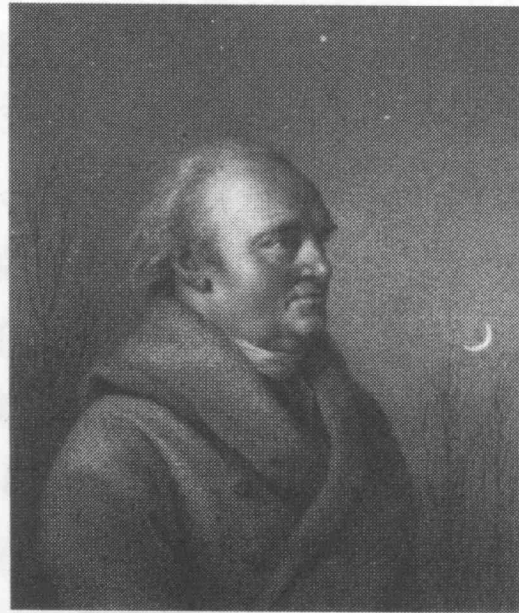
- 質量の積に比例し、距離の自乗に反比例する

$$F = -\frac{GMm}{r^2}$$

現代宇宙論の誕生：観測

ハーシェル(1738-1822)

大型望遠鏡を多数製作し、観測に励んだ



ウィリアム・ハーシェル (左) と彼が使った焦点距離 20 フィートの望遠鏡 (右).

現代宇宙論の誕生：観測

恒星計数 (star counts)

- 星の明るさごとの個数をかぞえる
- もし星の真の明るさが同じなら、暗い星が多く見える方向には星が遠くまで分布していることになる
- 当時の観測限界のため、得られた「天の川」の大きさは小さい

★しかし、この手法は銀河の構造を解明するために現代でも使われている

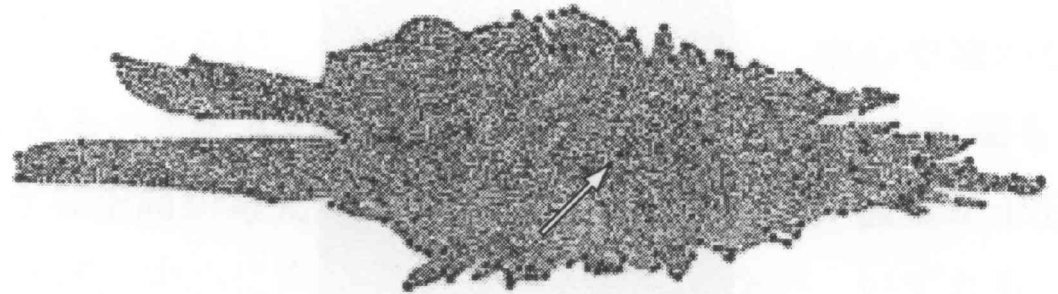


図 1.14 ハーシェルの宇宙モデル。薄い円盤状の恒星の集団を、太陽を含む面で切った断面図。太陽は中央やや右にあるわずかに太い点 (矢印の先)。左右に延びている方向が天の川方向である。左側の亀裂は、天の川の吸収帯の影響である。

現代宇宙論の誕生：銀河宇宙へ

- ある種の変光星（セファイド型、RRライリ型など）は、変光周期と絶対光度の間に関係があることが判明
- 年周視差でゼロ点を決定し、遠くの変光星の距離を測る
- 遠くの星雲に含まれる変光星を観測し、星雲の距離を測る
- 星雲は、天の川銀河の外にあった！
- 宇宙は、天の川銀河のような「銀河」が集まってできている

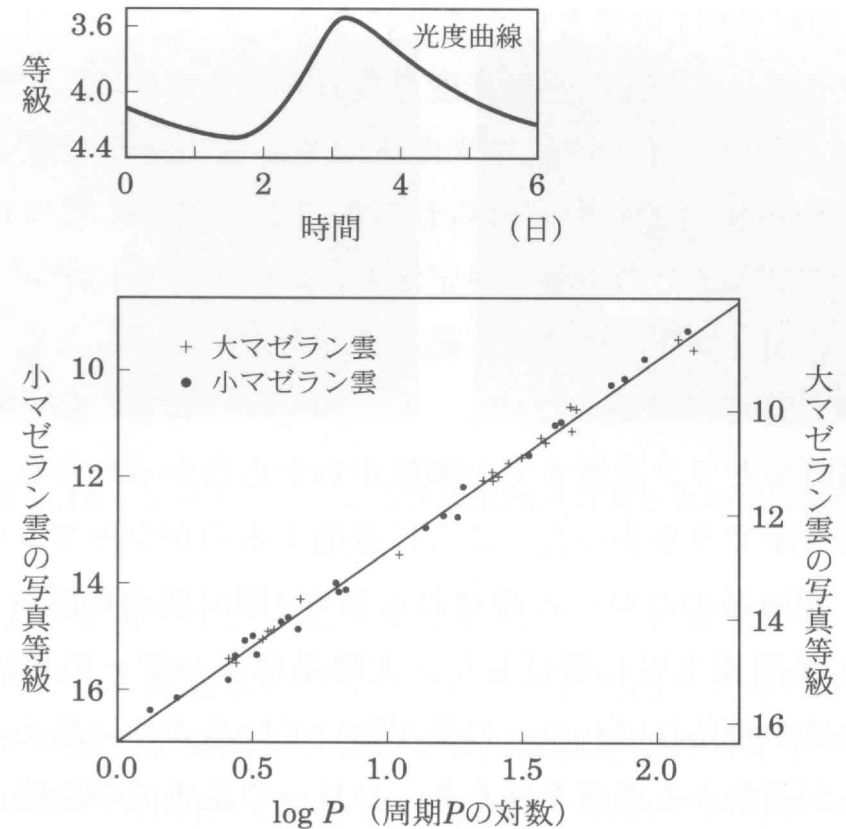
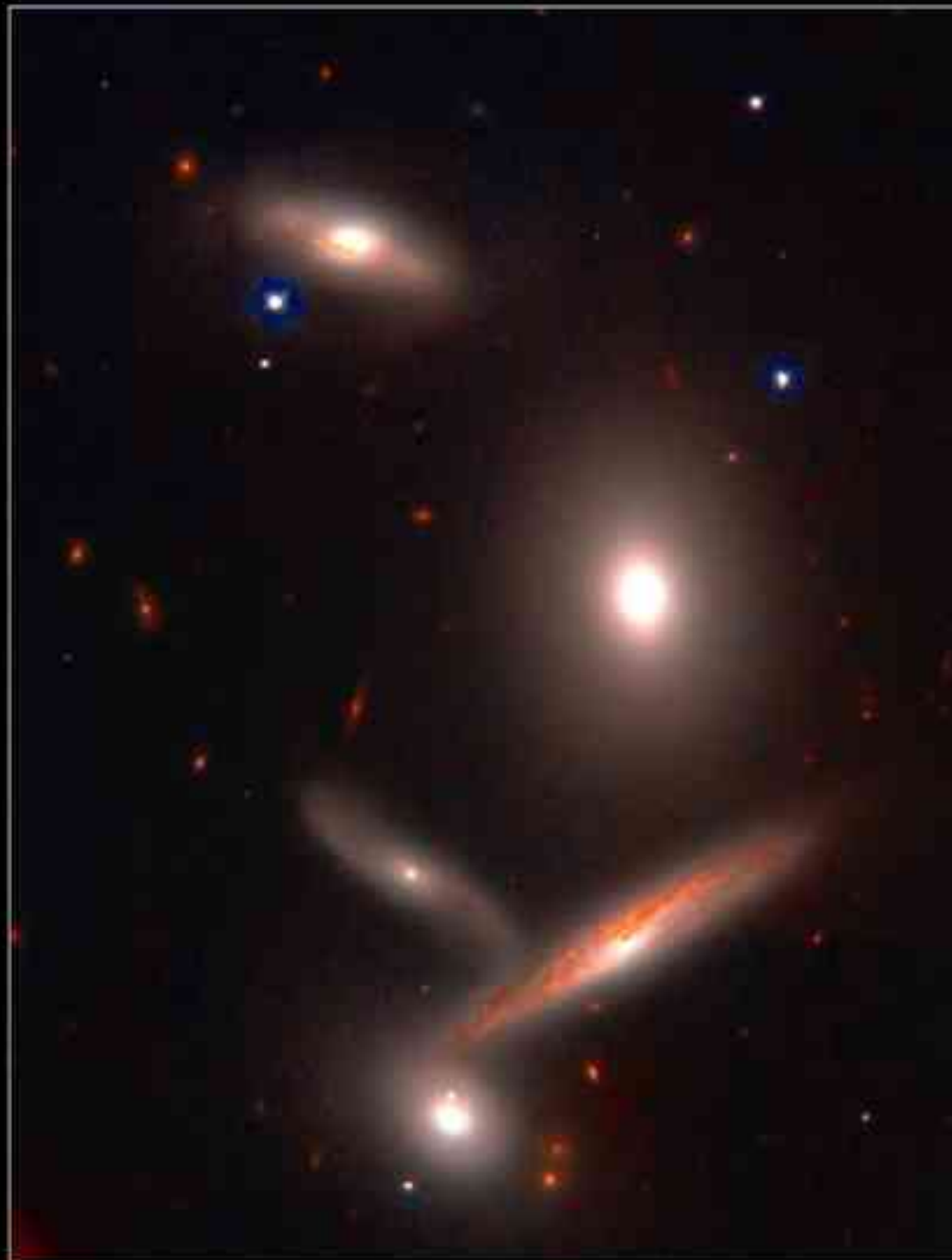


図 1.15 セファイドの光度変化と周期・等級の関係図。

宇宙には様々な形
の銀河がある



Hickson Compact Group 40

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J & K)

January 28, 1999

ビッグバン宇宙論へ

Edwin Hubble

- 1929年、多くの銀河の距離と速度を観測し、「遠い銀河ほど速く遠ざかっている」ことを発見
- ハッブルの法則
- $v=Hr$, H : Hubble定数, v : 後退速度, r : 距離
- 一見、我々が宇宙の中心にいるように思える
- 宇宙自体が膨張していると考ええると、自然に説明できる
 - 誰から見ても、自分を中心に遠ざかっていく

A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

BY EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

どうやって速度を測るか？
→ドップラー効果

後退速度

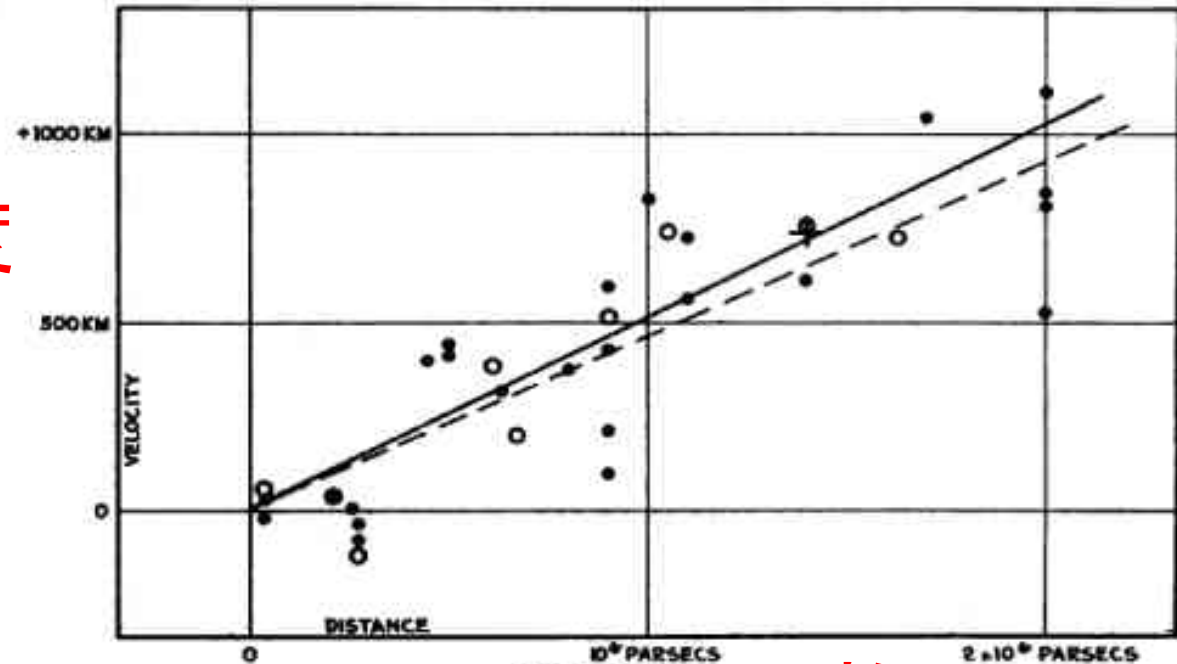


FIGURE 1

距離

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

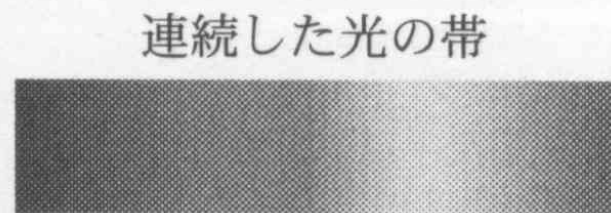
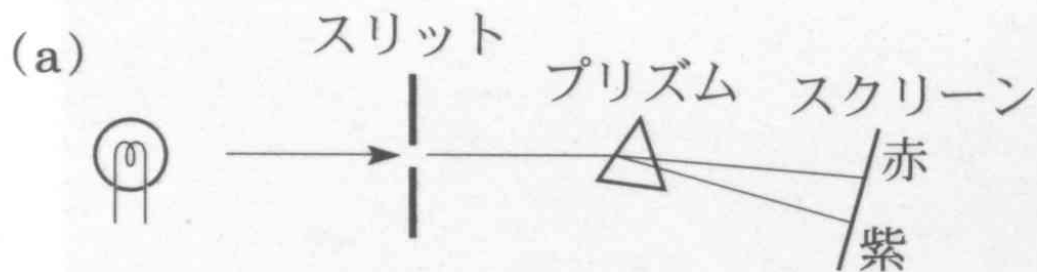
Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution 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.

宇宙膨張の発見

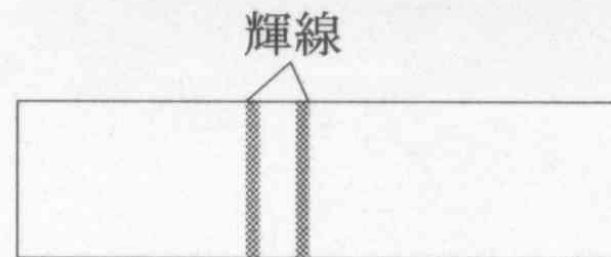
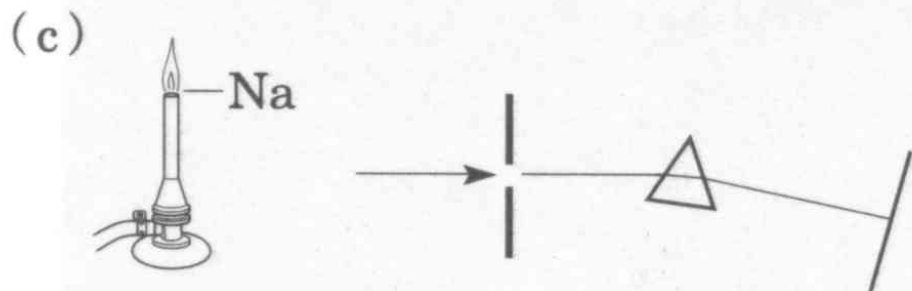
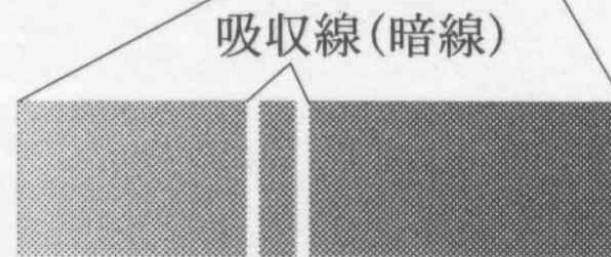
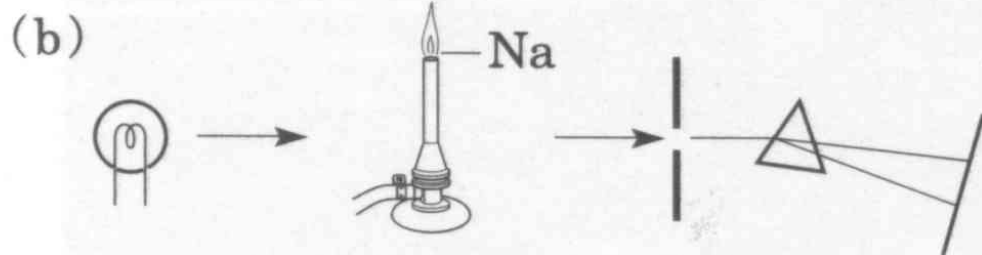
物質には固有の波長の吸収・放射がある
(量子力学的効果)

黒体輻射(温度で色が決まる)

連続スペクトル



線スペクトル



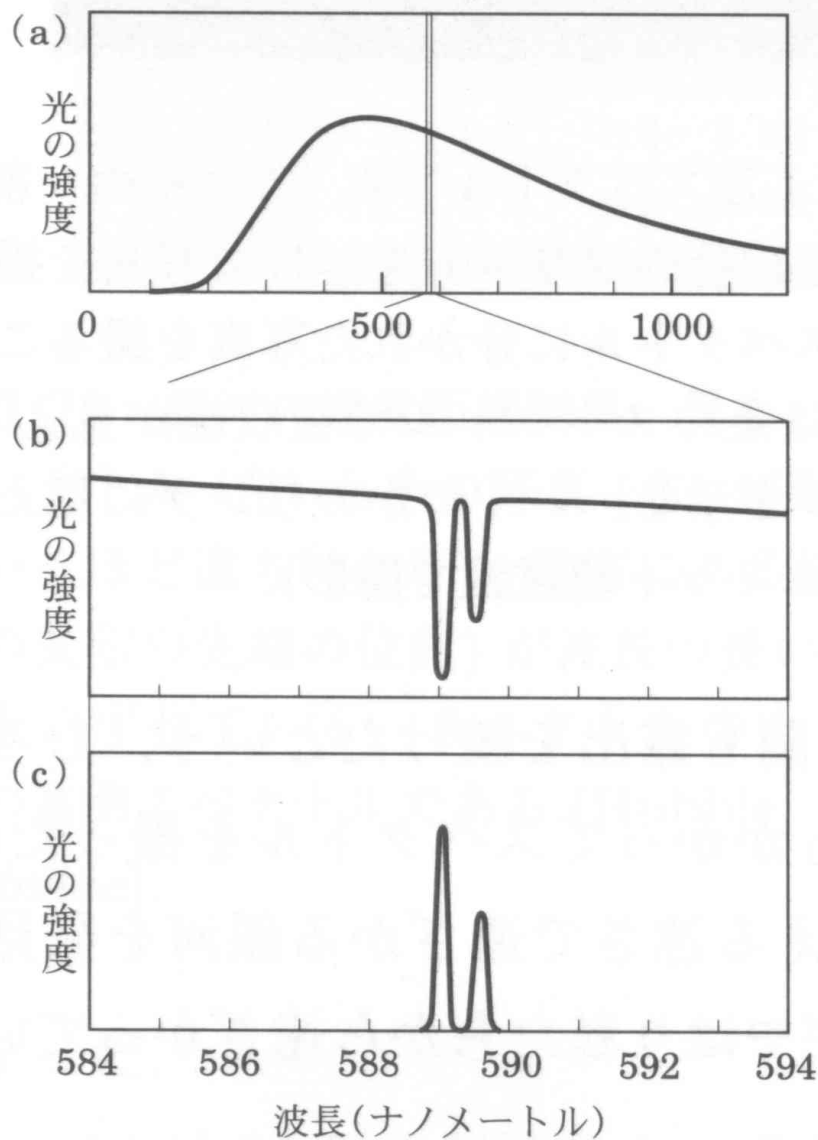


図 1.19 連続スペクトルと線スペクトル. (上) 栗野諭美他『宇宙スペクトル博物館 (可視光編)』(裳華房, 2001) より改変. グラフで表した連続スペクトル (a) と線スペクトル ((b): 吸収線, (c): 輝線). 線スペクトルの横軸は大きく引き延ばされていることに注意.

赤方偏移

実際に銀河のスペクトルを取ると、大きく赤方偏移しているものがあつた
→我々から遠ざかっている

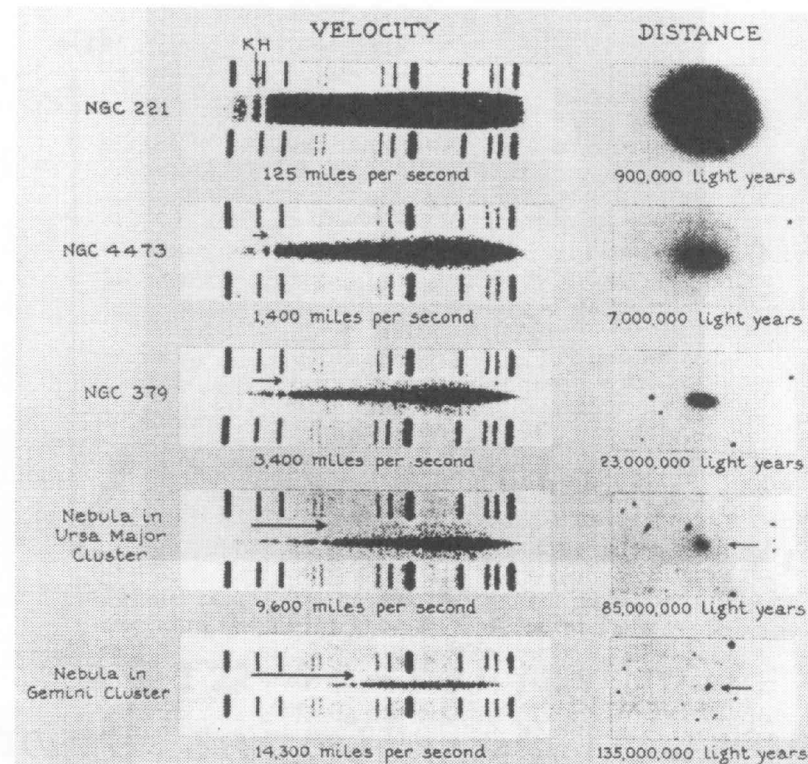
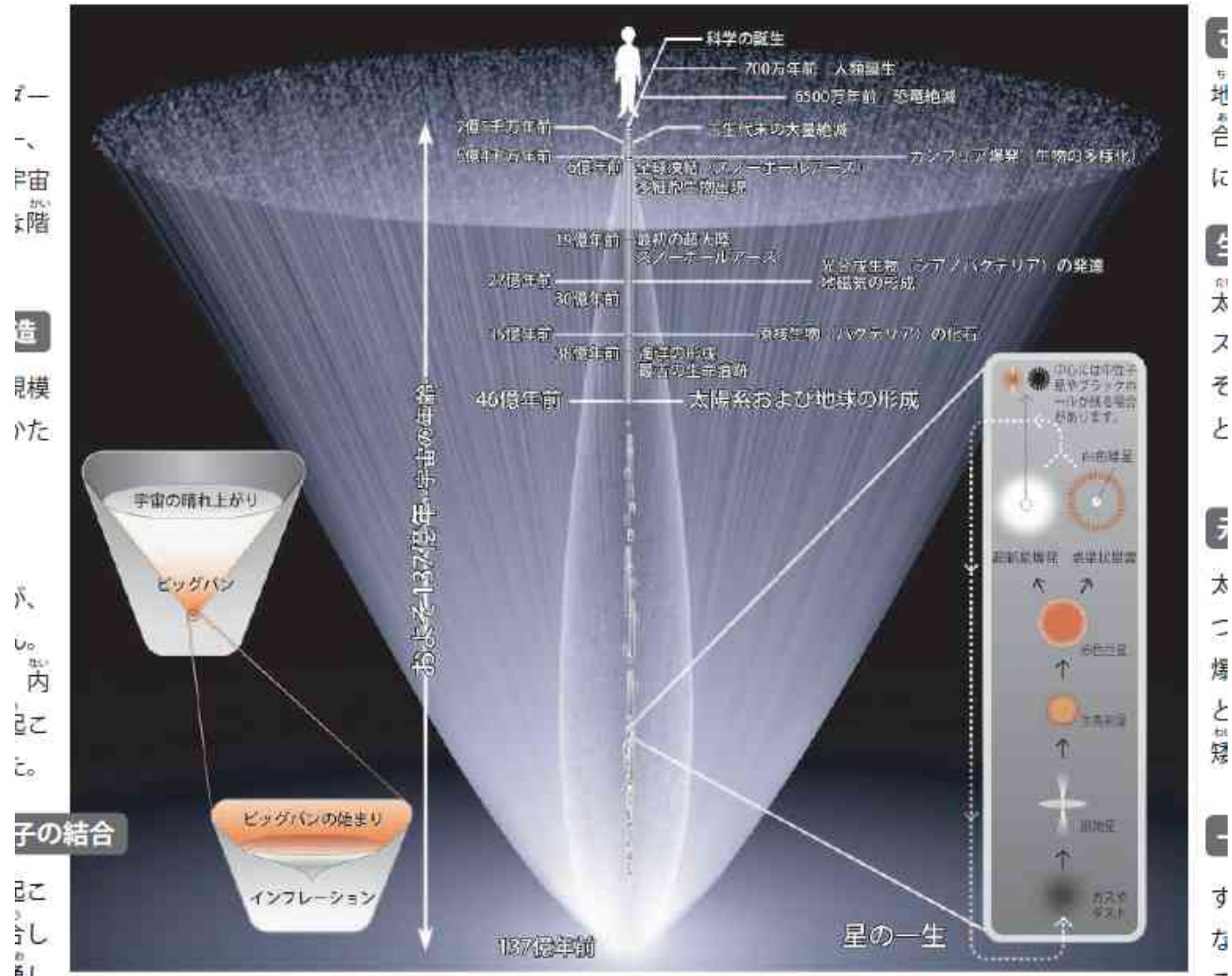


図 1.21 銀河の速度距離関係. 異なる距離にある 5 個の銀河のスペクトル (左) とその写真 (右) が距離の順に示してある (下にいくほど遠方になる). 遠方にある銀河ほど吸収線 (スペクトルの矢印の先端の位置) が波長の長い (赤い) 方 (図の右側) に大きくずれている. スペクトルの上下にある線は, 比較のための基準スペクトルである (Hubble, 1936, *The Realm of the Nebulae*).

膨張宇宙

宇宙はどのように生まれたのか？ 人間の材料はどこから来たのか？



「一家に1枚 宇宙図2007」より

現代宇宙論の誕生：理論

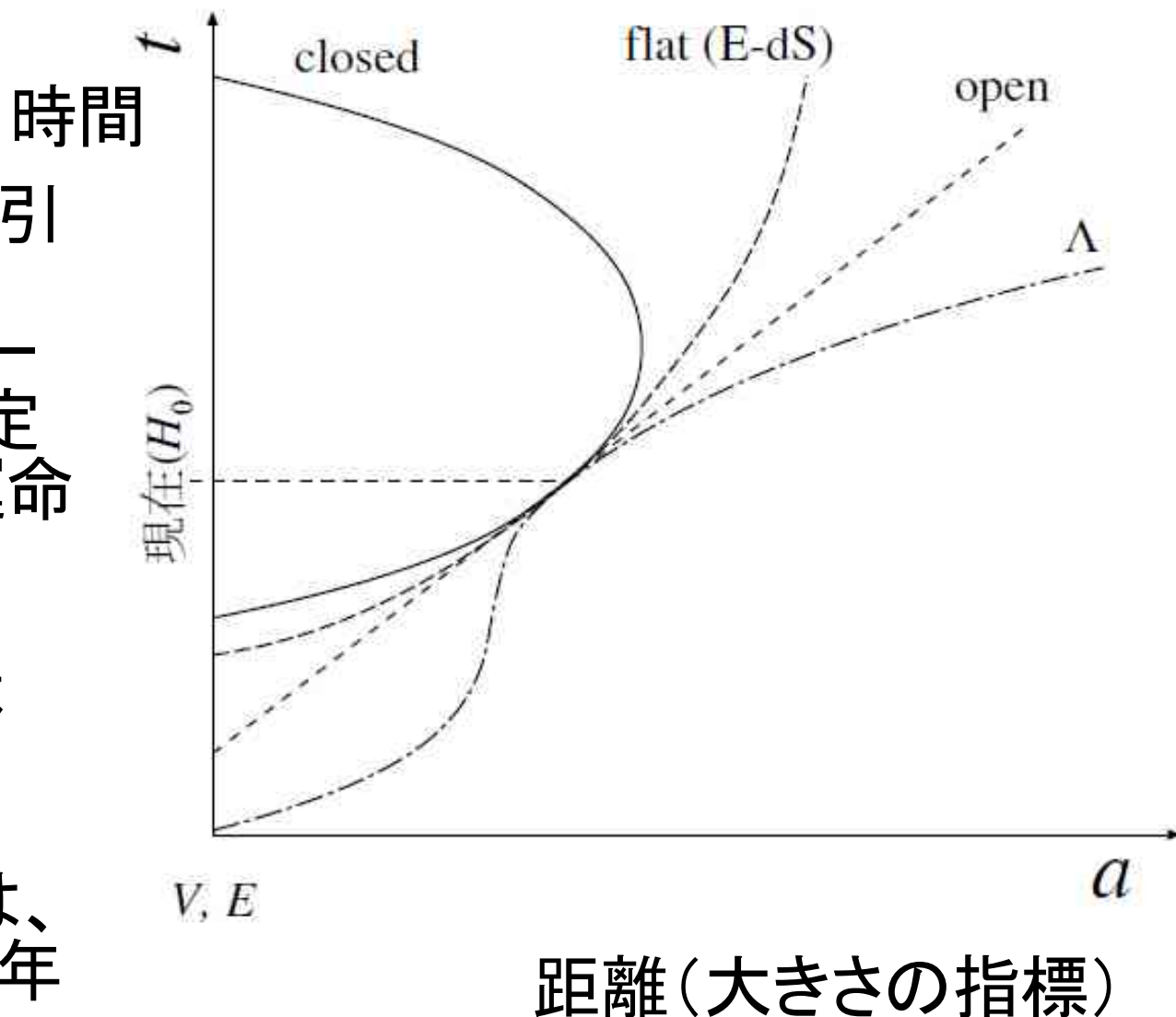
- 1916年、アインシュタインにより一般相対性理論発表
- 一般相対性理論とは、重力についての理論であり、また、時空の幾何学についての理論でもある。重力＝時空の歪み
- 発表直後から、ただちに宇宙に適用し、宇宙がどのように進化するかの研究が始まった
- 宇宙は膨張・収縮する、動的な存在！
- アインシュタイン自身は、一度は静的な宇宙を作るために「宇宙定数」を導入したが、その後撤回。
- しかし、最近の観測では、少しだけある

現代宇宙論の誕生：理論

宇宙内の物質の量(引力:膨張にブレーキ)や、ダークエネルギー(一般化された宇宙定数)によって、多少運命が変わる

宇宙の年齢は、大体 $1/H$ であらわされる

最新の観測結果では、宇宙年齢は約137億年



現代宇宙論

- 宇宙の始まりは？
- インフレーション宇宙？
- 物質の進化？
- 銀河の形成？

このような疑問に挑戦することが
可能になってきた

宇宙はどのように生まれたのか？ 人間の材料はどこから来たのか？

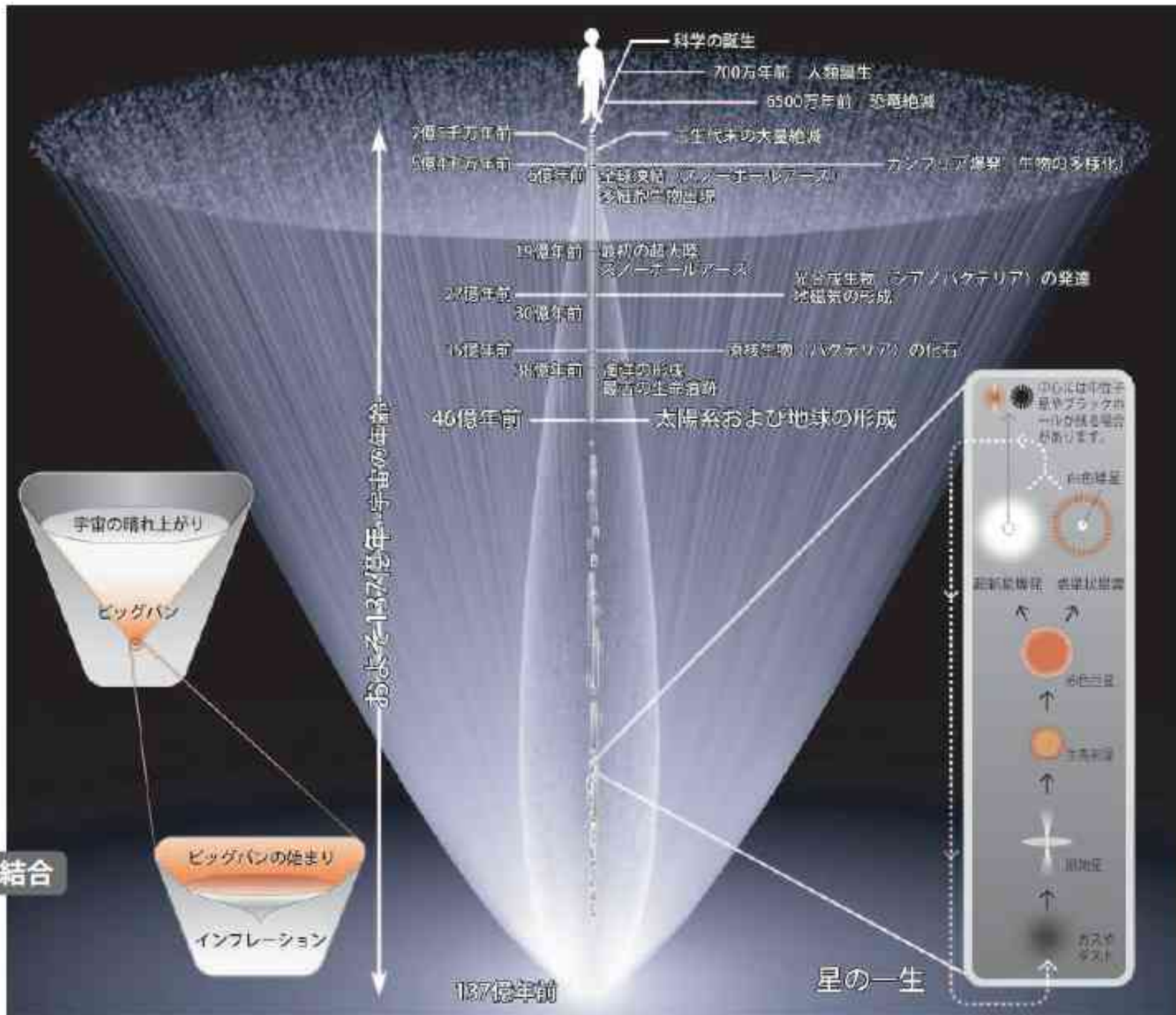
宇宙の階

造り模した

バ、し、内、こ、と。

子の結合

記、こ、う、さ、し、の、あ、い



地球の歴史

生命の歴史

太陽系

宇宙の歴史

星の一生

太陽系と地球

宇宙の歴史

すなわち

宇宙観の進化

- 地上にしばられ、肉眼で観測するしかなかった時代：天動説が自然な結論だった
 - ただし、幾つかの観測事実から、地動説を唱えた人々もいた
- 技術の進歩—四分儀や望遠鏡の発明—が、より詳細なデータをもたらし、実証的な研究を進化させた
- 科学が技術の進歩を促し、技術の進歩が科学の発展に貢献
- さて、現代に生きる「個々の人間」は、どうやって地球が動いていることを知るのだろうか？

次回

- 膨張宇宙（もう少し詳細に）
- 物質の進化（元素の起源）
 - ビッグバン元素合成
 - 超新星爆発による元素合成
- 銀河・星の形成から惑星形成へ