

2014年度「宇宙と地球と人間」

講義資料 1

1. 古代・中世の宇宙観
2. 天体物理学の黎明期

東京学芸大学 自然科学系 宇宙地球科学分野 助教
西浦 慎悟 (にしうら・しんご)

1. 古代・中世の宇宙観

古代ギリシアの宇宙観

紀元前8世紀頃 ボリス(都市国家)が成立。
紀元前540年頃 ピタゴラスに始まる幾何学の発達。
紀元前450年頃 ゼノンのパラドックス、レウキッポス・デモクリトスの原子論。
→ 現代の自然科学につながる基本概念が生まれ始めていた。

紀元前6世紀頃 アナクシマン드로ス → 「地球は平坦ではない」
南北に旅をすると ・北極星の高度が変わる
・異なる星座が現れる → 地球は円筒形

紀元前4世紀頃 アリストテレス → 「地球は丸い」
・南北に移動すると、北極星の高度が変化する
・月面に落ちる地球の影は、「いつも」円形である
月が太陽の光を反射して輝いている。月食は満月の時にのみ起こる。
→ 月食は太陽の光を地球が遮ることによる

--- アリストテレス以降の人々が見出した、地球球形の根拠 ---

- ・日の出は東の土地の方が早い
- ・船が陸に近づく時、高い山の頂上から見えはじめる

1. 古代・中世の宇宙観

天文学のはじまり

a) 層をつくる

ナイル川の氾濫の時期を知る(古代エジプト:紀元前3000年頃)



太陽のピラミッド
(紀元前2世紀:メキシコ)



ストーンヘンジ
(B.C.3000? ~ B.C.2000年?:イギリス)

現代の国立天文台(三鷹市)の重要な業務

b) 時刻を知る

日時計(古くは紀元前3000年!)



現代の情報通信研究機構(NICT:小金井市)の重要な業務

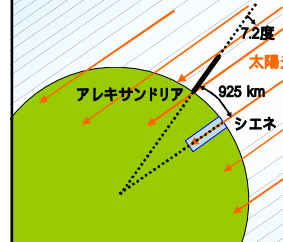
1. 古代・中世の宇宙観

地球の大きさを測定する

紀元前200年頃 エラトステネス → 地球の円周を測る
アレキサンドリア(エジプト)の図書館長

「シエネ(今のアスワン)では夏至の正午に井戸の底に太陽が映る」
シエネ:アレキサンドリアのほぼ真南にある町

「夏至の正午のアレキサンドリアで太陽の高度を測定した」
太陽は天頂から7.2度だけ南にずれていた



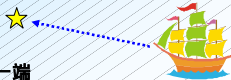
地図や商人・旅人の証言から二つの都市間の距離を925kmと見積もった。
地球を完全な球として、シエネがアレキサンドリアの真南にあると仮定すると...

$$\frac{360^\circ}{7.2^\circ} \times 925\text{km} = 46250\text{km}$$

「理科年表(平成23年度版)」によると...
地球の赤道半径:6378km
地球の円周:40074km

c) 方角を知る

船舶の安全な航行を行うため(15-16世紀のヨーロッパ;大航海時代)



d) 哲学の一端

淮南子(前漢:紀元前2世紀頃)

「往古来今謂之宙、四方上下謂之宇」

(往古来今これ宙という、四方上下これ宇という) → 時間と空間



古代エジプト人の宇宙観



古代インド人の宇宙観



古代バビロニア人の宇宙観

学問としての天文学 → 古代ギリシアまで遡る

1. 古代・中世の宇宙観

天動説と地動説

天動説:地球中心の宇宙像

天動説の根拠:

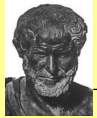
- ・実際に太陽・月・星々が我々の周りを回っているように見える。
- ・地球が動いていれば、その勢いで人間も町も投げ出されるはず。
- ・地球が動いていれば、世界中で同じ方向に凄まじい風が吹くはず。
- ・人が真上に飛び上がれば、地球の回転によって着地位置がズレるはず。

→ 古代ギリシア人は「慣性の法則」を見出してはいなかった。

1. 古代・中世の宇宙観

天動説

エウドクソス、アリストテレス、プトレマイオス(紀元前400～100年頃:ギリシア)



アリストテレス

月

永遠に変化しない世界

常に変わり続ける世界

地上

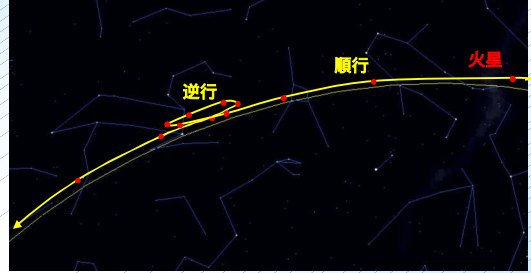
後世のキリスト教神学者が喜んで受け入れた。



プトレマイオスとその宇宙観

1. 古代・中世の宇宙観

- ・ほとんど全ての星は互いの位置関係を変化させない '恒星'
- ・太陽・月の他に恒星に対して数個の動く明るい星がある
水星・金星・火星・木星・土星 これらは動きが極めて特殊(逆行)
これらは'惑星(planets)',と呼ばれた



1. 古代・中世の宇宙観

地動説: 太陽中心の宇宙観

アリストタルコス、アルキメデス
(紀元前260年頃:ギリシア)



アリストタルコス

幾何学を用いて太陽の大きさが地球よりもずっと大きいと考えた。

大きい太陽が、小さい地球の周りを回るのは不自然であると、地動説を唱えた。



アルキメデス

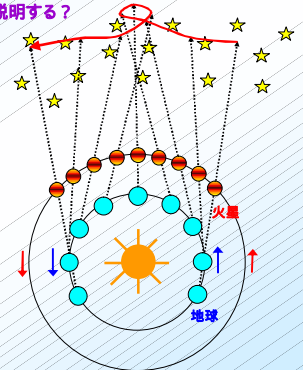
1. 古代・中世の宇宙観

天動説と地動説 惑星の逆行をどう説明する?

地動説の場合

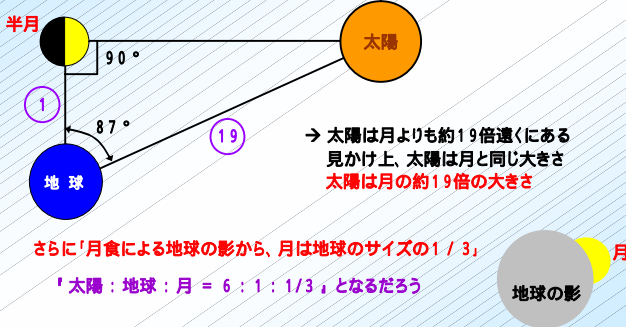
火星・木星・土星は地球の外側を地球より速い速さで回転している。

地球が火星・木星・土星を追い抜くたびに逆行する。



1. 古代・中世の宇宙観

アリストタルコス「半月の時の月・地球と太陽・地球の角度を測定する。」



1. 古代・中世の宇宙観

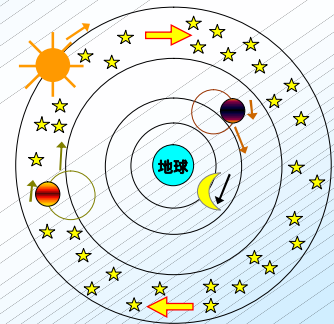
天動説と地動説 惑星の逆行をどう説明する?

天動説の場合

プトレマイオスは周転円を取り入れて、惑星の動きを説明した。

古代ギリシャ人は「万有引力の法則」を見出してはいなかった。


ところが、プトレマイオスの理論は、極めて高い精度で惑星の動きを予測・説明することができた！！



1. 古代・中世の宇宙観

ヘレニズム文化から古代ローマの時代へ

- 古代ギリシア: ボリスの栄枯盛衰(紀元前8世紀~)
ギリシアの一地方: 古代マケドニア帝国が登場
積極的にギリシア文化を取り入れる
紀元前337年頃: 全ギリシアを統一
- アレキサンダー大王の登場(紀元前336年~)
ペルシア、エジプト、インドまでも征服
古代ギリシア文化と古代オリエント文化の融合(ヘレニズム文化)
ギリシア、大都市アレキサンドリア(エジプト)の発展



アレキサンダー大王
(アレクサンドロス3世)
幼年期の家庭教師は
アリストテレス

↓

アレキサンダー大王の死後、古代マケドニア帝国は分裂

1. 古代・中世の宇宙観

ルネサンス(学芸復興)と大航海時代


ルネサンス = イタリアのベネチアから始まり、ヨーロッパ全土へ広がった芸術・学問の大きな変革、(13世紀末~15世紀末)

大航海時代 = ヨーロッパ人が世界中を航海した時代。その目的は商業・新航路開拓・奴隷・香辛料・布教活動など様々。

15世紀末: コロンブスによるアメリカ大陸発見
→ 丸い地球の再発見

1572年、1604年: 超新星の出現
→ 天空が不変で無い可能性

プトレマイオスの理論による星の運行に大きなズレが出て来た
→ 天動説への不信感




コロンブス

1. 古代・中世の宇宙観

古代ローマ帝国の台頭

紀元前753年~ 王政ローマ(イタリア中部?): 神話・伝承
紀元前510年~ 共和政ローマ
紀元前272年: イタリア半島を統一
紀元前148年: マケドニアをローマ属領とする

ユリウス・カエサル(軍人・政治家)
紀元前45年: ユリウス暦(1年=365日)を制定
古代ローマ暦は太陽暦(月の満ち欠けを基準とした暦)の一つで、1年を355日としていた。
紀元前44年暗殺



ユリウス・カエサル

後継者のオクタウィアヌスが初代ローマ皇帝となる
紀元前27年~ 帝政ローマ
313年: コンスタンティヌス1世、キリスト教を公認。
380年: テオドシウス1世、キリスト教を国教とする。
476年: 西ローマ帝国滅亡、1453年: 東ローマ帝国滅亡

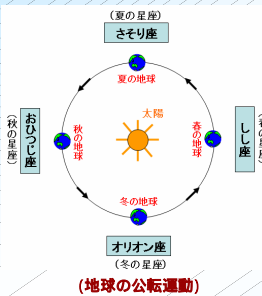
1. 古代・中世の宇宙観

グレゴリオ暦の制定

ローマ教皇グレゴリウス13世が1582年に制定。カトリック国を中心に広がった。現在、世界中で使われる暦の多くは、この暦に基づいている。

地球の公転周期 = 1年 = 365.2422日
ユリウス暦では1年 = 365.25日

「1年 = 365日」として4年経つと
→ $0.2422 \times 4日 = 0.9688日$ で約1日不足
→ 4年に1回閏年を設ける(ルール1)



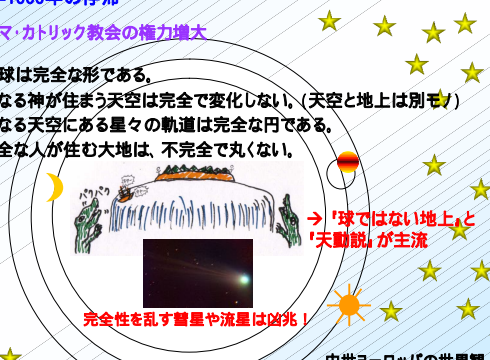
(夏)の星座: さそり座
夏の地球
太陽
秋の地球
春の地球
冬の地球
オリオン座 (冬の星座)
地球の公転運動

1. 古代・中世の宇宙観

西洋科学1000年の停滞

ローマ・カトリック教会の権力増大

円や球は完全な形である。
完全なる神が住まう天空は完全で変化しない。(天空と地上は別モノ)
完全なる天空にある星々の軌道は完全な円である。
不完全な人が住む大地は、不完全で丸くない。



→ '球ではない地上'と
'天動説'が主流

完全性を乱す彗星や流星は凶兆!

中世ヨーロッパの世界観


1. 古代・中世の宇宙観

「1年 = 365日 + 4年に1回の閏年」で400年経つと
→ 4年で1日 - 0.9688日 = 0.0312日、
 $0.0312日 \times (400/4) = 3.12日$ で約3日余り → 3回閏年を無くす
→ 西暦の年数が100で割り切れる年は閏年にしない(ルール2)

400年間に100で割り切れる年は4回くる
→ 1回だけ閏年にする

→ 西暦の年数が100で割り切れても、さらに400で割り切れる年は閏年にする(ルール3)

この方法では3224年間で1日の誤差が生じない。



(グレゴリウス13世)

2. 天体物理学の黎明期

万有引力の法則

ニュートンが、ケプラーの法則をもとに導出した。

惑星の運動を理解するために、**微積分法**を独自に開発・発展させた。同時期の**ライプニッツ**もニュートンとは独立に微積分法を確立した。

太陽と地球の間の距離を1として理論を構築した。(天文単位)
ただし万有引力定数Gの値は不明だった。

ハレーは万有引力の法則にもとづいて、1682年に現れた**彗星**が、1758年から1759年に再来すると予言。
→ 1758年クリスマスに**彗星**が再来！

ハレー(イギリス)

天空と大地の現象が同じ法則で表現されることが示された

2. 天体物理学の黎明期

- ケプラーが1631年11月7日の**水星**の太陽面通過を予測
→ **ガッサンディ(フランス)**:観測はできたが、詳しいデータは記録できなかった(担当の助手が逃げた?)。
- ケプラーが1631年12月7日の**金星**の太陽面通過を予測
→ **ガッサンディ**:ケプラーの予測精度が悪く、日面通過は太陽が沈んでからだった。
- 1639年12月4日の**金星**の太陽面通過
→ **ホロックス(イギリス)**:牧師でもあり、太陽面通過は日曜日に起きた。観測はできたが、詳しい記録までは取れなかった。
→ **クラフトリー(イギリス)**:金星の小ささにショックを受け、記録できなかった。

ガッサンディ

→ 水星や金星は当時考えられていたよりも、**ずっと小さい(遠くにある)天体**である。

2. 天体物理学の黎明期

太陽までの距離を測る

ニュートン:太陽と地球の間の距離を1として理論を構築した。(天文単位) → 惑星の運動は高い精度で予測できるようになった。

天体までの絶対的な距離を如何にして測定するのか?

ハレー: '金星の太陽面通過に、三角測量を応用することで地球と太陽の間の距離を測る'ことを後世の研究者に提案(1716年)。

2004年6月8日の金星の太陽面通過

2. 天体物理学の黎明期

- 安全な航海: 経度の測定が必要 → 精密な時計が必要
→ 1700年代中頃: 高精度な時計が発明される(8日間で5秒の狂い)
- ハレーが予測した1761年と1769年の**金星**の太陽面通過 → 国家プロジェクト化

誤差10%以内

メイソン&ディクソン(イギリス): 1761年、アフリカの喜望峯で観測。だが二人の記録は何秒も違っていた。

バングレ(フランス): 1761年、マダガスカルで観測に挑むが、ずっと雨だった。

ル・ジャンティ(フランス): 1761年、インドに向かったが、船がコースを外れ、船上で十分な観測ができなかった。

1769年、インドには着いたが、その当日、曇った。帰国途中船が遭難、流浪を繰り返して11年半振りにようやく帰国。死んだと思われ、妻は他人と再婚し、財産は全て処分されていた。

クック、ソランダー、グリーン(イギリス): 1769年、タヒチで観測を行ったが、三人の観測時刻は、誤差の範囲を超えて大きかった。

クック

2. 天体物理学の黎明期

・精密な地図
・精密な時計

地球上の遠く離れた二箇所できっかり同時に金星を観測しなければならない。

1600年代中頃: カッシーニ & ピカール
三角測量による地図作製(地球全周が誤差200km以内)。

1700年代初め: 振り子時計。船に積むと1日で5~10分も狂ってしまう。
→ 精密かつ耐久性の高い時計が必要

2. 天体物理学の黎明期

1874年(明治7年)の**金星**の日面通過

欧米各国が70ヶ所以上に観測隊を派遣。日本では太陽面通過の全過程が観測可能。
→ フランス、アメリカなどが観測隊を派遣

明治新政府: '何かよくわからないけれど、欧米の進んだ科学技術を吸収するには良い機会のようなだ'

↓

観測隊に便宜を図り、日本人にも観測技術を学ばせた(清水誠)。

長崎・横浜・神戸で観測が行われた。
→ 日本の正確な**経度**が測定された。

現在: 1AU = 1.49597870 × 10⁸km

金星観測記念碑 (兵庫県神戸市・金星台)

金星の太陽面通過観測の記念碑 (神奈川県横浜市)

2. 天体物理学の黎明期

舞台はハレー彗星が戻って来た直後の時代まで遡る

ティティウス・ボーデの法則
 (太陽から惑星までの距離/天文単位) = $0.4 + 0.3 \times 2^n$

1766年 ヨハン・ダニエル・ティティウス
 1772年 ヨハン・ボーデ

惑星	n	法則	観測
水星	-	0.4	0.39
金星	0	0.7	0.72
地球	1	1.0	1.00
火星	2	1.6	1.52
?	3	2.8	?
木星	4	5.2	5.20
土星	5	10.0	9.54
?	6	19.6	?

良く一致している

科学的根拠が無く「単なるパズルである」と批判された。

2. 天体物理学の黎明期

ケンブリッジ天文台

天王星の軌道のズレから新惑星の位置を計算!

ベルリン天文台

エアリー(台長) 指示
 アダムス(英) 観測依頼
 ルヴェリエは2年遅(研究開始、予測位置算出は1年遅れ)
 ルヴェリエ(仏) 観測依頼
 エンゲ(台長) 観測
 ガレ(助手) 観測依頼

星図が無かったので、時間を空けて観測することで新惑星を探した。

作成したばかりの星図と見比べることで新惑星を探した。

1846年：ガレ(ドイツ)が海王星を発見
 海王星発見の栄誉は、ルヴェリエ、アダムス、ガレの三名が受けることになった。
 まだ天王星の軌道が計算と合わない → さらなる新惑星(惑星X)の存在を示唆
 海王星の太陽からの距離:30.06AU ボーデの法則のn=7は38.8AU???

2. 天体物理学の黎明期

天王星の発見とニュートン力学の成果

ハーシェル(イギリス)
 望遠鏡で星の分布を調べ、宇宙の姿を探ろうとした。
 望遠鏡を夜空に向け、あらゆる天域の星を数えた。
 掃天観測(サーベイ観測)

1781年：見慣れない星を発見。
 軌道を計算することで土星の外側にある惑星と判明。
 太陽からの距離は19.19天文単位(n=6)

観測される天王星の軌道が計算と合わない → もっと外側の新惑星を示唆

2. 天体物理学の黎明期

さらなる新惑星(惑星X)を求めて!

ローウェル天文台(米)

ローウェルが軌道計算をして位置予測。
 ローウェルの死後はトンボーが引き継いだ。

1930年：トンボー(アメリカ)が冥王星を発見
 太陽系の大きさ当初の4倍!
 しかし、冥王星は小さ過ぎる
 ローウェルが予測した惑星Xではない!

太陽 14億3200万km (9.6AU) → 土星 28億8300万km (19.2AU) → 天王星 59億3100万km (39.5AU) → 冥王星

トンボーの冥王星発見は偶然的な産物。
 ボーデの法則:n=8は67.71AU(破綻)

「太陽を回る九つの惑星」
 20世紀の太陽系像の確立

2. 天体物理学の黎明期

天王星：太陽から19.19天文単位 ← ボーデの法則のn=6(19.6)に一致
 n=3(火星と木星の間、太陽から2.8天文単位)にも注目

1801年1月1日：小惑星ケレスを発見
 ジュゼッペ・ピアッツィ(イタリア)
 パレルモ天文台(シチリア)を設立

ケレス (HST:NASA)

・火星と木星の間
 ・太陽から2.77天文単位

しばらくの間は新しい惑星だと思われていた。
 ・水星の1/5のサイズ、同様の天体が同じ軌道辺りに続々発見される(かつて惑星だった?)
 直径約950km(20世紀中は最大の小惑星だった)
 → 1850年頃にはこれらをまとめて「小惑星」として分類されるようになった。

参考資料と引用文献など:

- 1) ティモシー・フェリス(野本陽代訳 1992年):『銀河の時代 宇宙論博物館(上、下)』、工作舎(下記以外の人物肖像画、コペルニクスの太陽系モデル、ティコの太陽系モデル)
- 2) 中山茂雄(1982年):『天文学史』、恒星社
- 3) 杵島正洋、松本重記、左巻健男編著(2006年):『新しい高校地学の教科書』(ブルーバックスシリーズ)、講談社(ケプラーの法則説明図、ガリレオの木星・金星のスケッチ図)
- 4) 矢野太平(2008年):『知りたいサイエンス』「広がる宇宙地図」、技術評論社
- 5) 駒井仁南子(2007年):『星のきほん』、誠文堂新光社
- 6) 室井恭子、水谷有宏(2008年):『惑星のきほん』、誠文堂新光社
- 7) 岡村定矩(1999年):『銀河系と銀河宇宙』、東京大学出版会
- 8) 東京大学木曾観測所HP(リニア望遠鏡http://www.ica.s.u-tokyo.ac.jp/kisoHP/)
- 9) Wikipedia(画像ファイル:ストーンヘンジ、アリストテレス、アリストタルコス、アレキサンダー大王、ユリウス・カエサル、クック、金星の太陽面通過、金星太陽面通過観測記念碑(神戸・横浜)、ピアッツィ、エアリー、アダムス、ルヴェリエ、エンゲ、ガレ、ローウェル)
- 10) 月、木星とガリレオ四衛星、土星(西浦博彰)