



アポロ17号による地球の写真 credit: NASA

https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_329.html

東京大学理学系研究科 鈴木昭宏





講義のアウトライン

- ・ 第1回: 天文学への導入と様々な時間・空間スケールの天体
- 第2回: 電磁波による宇宙の観測
- 第3回:太陽系内天体と天体の運動
- 第4回: 天体の距離、明るさ、色
- 第5回: 恒星] -恒星のエネルギー源と核反応-





2

講義のアウトライン

- ・ 第6回: 恒星2-恒星の分類と進化-
- ・ 第7回: 星の誕生と星間物質
- ・ 第8回:銀河1-銀河系の構成要素-
- ・ 第9回: 銀河2-銀河の分類と進化-
- ・第10回: 超新星爆発と元素の起源

講義のアウトライン

- 第11回: 白色矮星、中性子星、ブラックホール
- ・ 第12回: ニュートリノ天文学と高エネルギー天体
- ・ 第13回: 重力波天文学と中性子星・ブラックホール
- 第14回: 宇宙膨張の発見と宇宙の歴史
- 第15回: 系外惑星の世界

第3回: 太陽系内天体と天体の運動

- ・太陽系とその構成要素
- ・惑星の運動とケプラーの法則
- ・天体の運動とその測定



太陽系 (solar system)

- ・1つの恒星(太陽)と8つの惑星からなるシステム
- ・だいたい100au(天文単位:太陽-地球間距離)=1.5x10¹³mの大きさ



Wikipedia より

太陽 (The Sun)

- ・太陽系の中心天体(質量の99.8%)
- . 質量: 1.989 × 10³⁰ [kg]= 太陽質量 M_☉
- . 半径: 696,340 [km]= 太陽半径 R_☉
- . 光度: 3.828 × 10²⁶ [J s⁻¹]= 太陽光度 L_☉
- · 寿命:約100億年



credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO)



太陽系惑星の分類

- ・惑星: 岩石惑星(地球型)、ガス惑星(木星型)、氷惑星
- ・違いはどこから生まれた?



Wikipedia より



太陽系惑星の分類

- ・惑星: 岩石惑星(地球型)、ガス惑星(木星型)、氷惑星
- ・違いはどこから生まれた?

	密度	磁場	環	衛星
岩石惑星	大きい (3.93-5.51 g cm ⁻³)	金星・火星になし	すべてになし	最大2個
ガス・氷惑星	小さい (0.69-1.64 g cm ⁻³)	すべてにあり	すべてにあり	8個以上

シリーズ現代の天文学「太陽系と惑星」より

太陽系惑星の分類

- ・惑星: 岩石惑星(地球型)、ガス惑星(木星型)、氷惑星
- ・準惑星: 冥王星、ケレス、エリスなど
- ・小惑星帯:火星と木星の間
- エッジワース・カイパーベルト
- オールトの



- 半径 6378 km, 質量 1M⊕=5.974x10²⁴kg
- 自転周期 0.9973日, 公転周期 1.00004年
- ・大気成分: N₂(78%) O₂(21%) + H₂O, Ar
- ・プレートテクトニクス: 様々な地質活動(例: 地 震,火山)
- ・一つの衛星(月: 0.0123M⊕)

現代の天文学シリーズ「太陽系と惑星」参照

x10²⁴kg 0004年 0, Ar

アポロ17号による地球の写真 credit: NASA https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_329.html



- 半径 6378 km, 質量 1M⊕=5.974x10²⁴kg
- 自転周期 0.9973日, 公転周期 1.00004年
- ・水が液体として存在
- ・我々人類の故郷
- ・ 生命は地球だけに存在するのか?

現代の天文学シリーズ「太陽系と惑星」参照

x10²⁴kg 0004年



アポロ17号による地球の写真 credit: NASA https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_329.html



- 月の形成
- 捕獲說, 共成長說, 分裂說, 巨大衝突說, …
- ・現在では巨大衝突説(ジャイアントインパクト) が有力
- ・ 惑星形成末期の原始惑星同士の衝突
- ・地球サイズ+火星サイズ

現代の天文学シリーズ「太陽系と惑星」参照



ジャイアントインパクトによる月形成シミュレーション Canup 2004, Icarus, 168, 433

- 月の形成
- 捕獲說, 共成長說, 分裂說, 巨大衝突說, …
- ・現在では巨大衝突説(ジャイアントインパクト) が有力
- ・ 惑星形成末期の原始惑星同士の衝突
- ・地球サイズ+火星サイズ

現代の天文学シリーズ「太陽系と惑星」参照



ジャイアントインパクトによる月形成シミュレーション Canup 2004, Icarus, 168, 433

水星 (Mercury)

- ・半径 2440km, 質量 0.05527M⊕(地球質量)
- · 自転周期 58.65日, 公転周期 0.241年
- 大気成分: Na, K (非常に薄い)
- ・月と似たようなクレーター(大気が薄い)
- ・磁場の存在: 金属中心核の存在を示唆

現代の天文学シリーズ「太陽系と惑星」参照





探査機メッセンジャーによる水星表面の様子 credit: NASA/JPL

金星 (Venus)

- ・半径 6052 km, 質量 0.815 M⊕
- · 自転周期 243日, 公転周期 0.6152年
- ・高温大気: 730K(460°C), 92気圧
- 大気成分: ほぼCO₂(96%), H₂SO₄の厚い雲
- ・プレートテクトニクスの痕跡がない
- ・スーパーローテーション:4日で自転する雲,未 だ原因は未解明

現代の天文学シリーズ「太陽系と惑星」参照



探査機マゼランによる金星表面の様子 credit: NASA/JPL

火星 (Mars)

- ・半径 6779km, 質量 0.1074M⊕
- · 自転周期 1.0260日, 公転周期 1.88089年
- ・薄い大気:約0.006気圧
- ・大気成分: ほぼCO₂(95%)
- ・現在はプレートテクトニクスがない
- ・過去の活動性:水の流れた痕跡

現代の天文学シリーズ「太陽系と惑星」参照



探査機ロゼッタによる火星表面の様子 ESA & MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM/DASP/IDA



火星 (Mars)

- ・火星探査キュリオシティー
- 2018年、火星探査機キュリオシテ ィーが南極域に水の層と思われる ものを確認
- 高い塩分濃度によって液体の水と して存在?



キュリオシティによる火星探査 ESA & MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM/DASP/IDA



Perseverance Roverにより火星探査

- ・NASAによる火星探査ミッション「Mars2020」
- 何が火星の環境を形作ってきたのかを明らかにする

https://mars.nasa.gov/mars2020/multimedia/images/



・火星へのlandingに成功. 探査車Perseveranceが鮮明な画像を送ってきた.

木星 (Jupiter)

- ・半径 71492km, 重量 317.83M⊕
- · 自転周期 0.414日, 公転周期 11.8622年
- ・ ガス+中心核(岩石+氷)
- ・大気成分: ほぼ水素とヘリウム
- ・大気活動:特徴的な縞模様と大赤斑(100年以 上存続)

現代の天文学シリーズ「太陽系と惑星」参照



カッシーニ探省機による不星表面の様子 credit: NASA/JPL/University of Arizona https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02873



土星 (Saturn)

- ・半径 60268 km, 質量 95.16M⊕
- · 自転周期 0.444日, 公転周期 29.4578年
- ・ ガス+中心核(岩石+氷)
- ・特徴的な環構造: 起源については不明な点が多 い(衛星集積過程の結果?衛星破壊の結果?)

現代の天文学シリーズ「太陽系と惑星」参照



ハッブル宇宙望遠鏡による土星の写真 credit: NASA, ESA, A. Simon (GSFC), M.H. Wong (UC Berkeley) and the OPAL Team https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/ saturns-rings-shine-in-hubbles-latest-portrait





天王星(Uranus)と 海王星(Neptune)

- ・半径 25559km, 質量 14.54M⊕
- 自転周期 0.718日, 公転周期 84.0223年
- ・半径 24764km, 重量 17.15M⊕
- · 自転周期 0.671日, 公転周期 164.774年
- 氷惑星
- ・CH4(メタン)氷の雲を持つ

現代の天文学シリーズ「太陽系と惑星」参照

ハッブル宇宙望遠鏡による天王星と環の写真 credit: NASA, ESA, and M. Showalter (SETI Institute) https://hubblesite.org/contents/news-releases/ 2007/news-2007-32.html



ヴォイジャー2号による海王星の画像 credit: NASA/JPL-Caltech https://www.nasa.gov/feature/jpl/ 30-years-ago-voyager-2s-historicneptune-flyby





海王星の発見

- ・1781年、ウィリアム・ハーシェルによる天王 星の発見
- ・ニュートン力学(万有引力)による軌道の予想と 合わない動きをしている(木星や土星を考慮し ても合わない)
- ・ 軌道の外側に重力源(摂動源)が存在?(ユルバ ン・ルヴェリエによる予想)
- •1846年、発見



太陽系天体の軌道 credit: 国立天文台 https://www.nao.ac.jp/astro/basic/comet.html



太陽系惑星まとめ

	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
半径[km]	2440	6052	6378	3396	71492	60268	25559	24764
質量[M⊕]	0.05527	0.8150	1.0000	0.1074	317.83	95.16	14.54	17.15
自転周期 [日]	58.65	243.02	0.9973	1.0260	0.414	0.444	0.718	671
公転周期 [年]	0.24085	0.61521	1.00004	1.88089	11.8622	29.4578	84.0223	164.774
軌道長半径 [au]	0.3871	0.7233	1.0000	1.5237	5.2026	9.5549	19.2184	30.1104
離心率e	0.2056	0.0068	0.0167	0.0934	0.0485	0.0555	0.0463	0.0090

地球質量M⊕=5.974x10²⁴ kg 1天文単位(au)=1.50x10¹¹m

シリーズ現代の天文学 「太陽系と惑星」より



第3回: 太陽系内天体と天体の運動

- ・太陽系とその構成要素
- ・惑星の運動とケプラーの法則
- ・天体の運動とその測定



惑星の運動

- ・現在では太陽系惑星や小惑星といった太 陽系内天体は太陽の周りを楕円軌道で周 回していることがしられている
- ・どのようにこの科学的事実に至ったの か?





太陽系天体の軌道 credit: 国立天文台 https://www.nao.ac.jp/astro/basic/comet.html

ヨハネス・ケプラーの発見

- ・師匠ティコ・ブラーエ(Tycho Brahe, 1546-1601) による詳細な天体観測
- ティコの観測データを基にして、惑星の運行に関す る法則を発見した: ケプラーの法則(Kepler's laws)
- ・地動説を決定的なものとした





ヨハネス・ケプラーの発見

- ・師匠ティコ・ブラーエ(Tycho Brahe, 1546-1601) による詳細な天体観測
- ・ティコの観測データを基にして、惑星の運行に関す る法則を発見した: ケプラーの法則(Kepler's laws)
- ・地動説を決定的なものとした





ティコの超新星残骸 (SN 1572)の可視光+X線画像 credit: NASA Chandra X-ray observatory

ヨハネス・ケプラーの発見

- ・師匠ティコ・ブラーエ(Tycho Brahe, 1546-1601) による詳細な天体観測
- ティコの観測データを基にして、惑星の運行に関す る法則を発見した: ケプラーの法則(Kepler's laws)
- ・地動説を決定的なものとした





ケプラーの超新星残骸 (SN 1604)の可視光+X線画像 credit: NASA Chandra X-ray observatory

- ・第1法則 楕円軌道の法則:惑星は太陽を一つ の焦点とする楕円運動を行う.
- <u>第2法則</u> 面積速度一定の法則: 焦点(太陽)を 基点として、惑星が単位時間に掃く面積は一 定である.
- 第3法則 調和の法則:惑星の公転周期Pは軌 道長半径aの3/2乗に比例する.



- ・第1法則 楕円軌道の法則:惑星は太陽を一つ の焦点とする楕円運動を行う.
- <u>第2法則</u> 面積速度一定の法則: 焦点(太陽)を 基点として、惑星が単位時間に掃く面積は一 定である.
- 第3法則 調和の法則:惑星の公転周期Pは軌 道長半径aの3/2乗に比例する.



- ・<u>第1法則</u> 楕円軌道の法則:惑星は太陽を一つの の焦点とする楕円運動を行う.
- <u>第2法則</u> 面積速度一定の法則: 焦点(太陽)を
 基点として、惑星が単位時間に掃く面積は一
 定である.
- <u>第3法則</u> 調和の法則:惑星の公転周期Pは軌 道長半径aの3/2乗に比例する.



- ・第1法則 楕円軌道の法則:惑星は太陽を一つ の焦点とする楕円運動を行う.
- <u>第2法則</u> 面積速度一定の法則: 焦点(太陽)を 基点として、惑星が単位時間に掃く面積は一 定である.
- ・第3法則調和の法則:惑星の公転周期Pは軌 道長半径aの3/2乗に比例する.

 $\frac{P}{a^{3/2}} = Const.$





Google 検索は次の言語でもご利用いただけます: English

シリーズ現代の天文学「太陽系と惑星」付表より

Ē	軌道長半径a [au]	公転周期P [年]	離心率	P²/a³
Ē	0.3871	0.24085	0.2056	
## 1	0.7233	0.61521	0.0068	
浗	1.0000	1.00004	0.0167	
1 1 1	1.5237	1.88089	0.0934	
ЩШ Н	5.2026	11.8622	0.0485	
₩ U	9.5549	29.4578	0.0555	
星	19.2184	84.0223	0.0463	
星	30.1104	164.774	0.0090	





Google 検索は次の言語でもご利用いただけます: English

シリーズ現代の天文学「太陽系と惑星」付表より

Ē	軌道長半径a [au]	公転周期P [年]	離心率	P²/a³
Ē	0.3871	0.24085	0.2056	1.0
ĦU	0.7233	0.61521	0.0068	1.0
浗	1.0000	1.00004	0.0167	1.0
Ē	1.5237	1.88089	0.0934	1.0
Ē	5.2026	11.8622	0.0485	0.9
ЩЩ Ш	9.5549	29.4578	0.0555	0.9
星	19.2184	84.0223	0.0463	0.9
星	30.1104	164.774	0.0090	0.9



ケプラーの法則から万有引力へ

- ・(ケプラーの法則や力学を知らなかったら、)何やら 背後に関係がありそうな気がする
- ・しかし、これは**経験則**:実験や観測から成り立つこ とが知られているが、理論的な説明がない
- このような関係を成り立たせる物理法則は何か?
- ・アイザック・ニュートン (1642-1727): 万有引力 の発見と古典力学の成立



ニュートンの肖像(Wikipediaより) https://en.wikipedia.org/wiki/lsaac_Newton



ケプラーの法則から万有引力へ

- 太陽の質量 M, 地球の質量 m, 太陽-地球間距離 a
- 万有引力の大きさ: $F = G \frac{Mm}{a^2}$
- ・離れた物体に働く重力は質量の積に比例し、距 離の2乗に反比例する(逆二乗側)
- ・このような形の力と力学の方程式(運動方程式)に 従う質点は楕円軌道を描く
- a^3 ・ケプラーの三法則が導かれる



P2



海王星の発見

- ・1781年、ウィリアム・ハーシェルによる天王 星の発見
- ・ニュートン力学(万有引力)による軌道の予想と 合わない動きをしている(木星や土星を考慮し ても合わない)
- ・ 軌道の外側に重力源(摂動源)が存在?(ユルバ ン・ルヴェリエによる予想)
- •1846年、発見



太陽系天体の軌道 credit: 国立天文台 https://www.nao.ac.jp/astro/basic/comet.html



第3回: 太陽系内天体と天体の運動

- ・太陽系とその構成要素
- ・惑星の運動とケプラーの法則
- 天体の運動とその測定



- 太陽系惑星の例で見たように、天体の位 置と運動を調べるのは極めて重要
- ・古典(ニュートン)力学の構築
- ・天体の運動の予測
- ・未知の天体の発見(海王星など)
- 個々の天体についてどんな情報が必要な のか?





太陽系天体の軌道 credit: 国立天文台 https://www.nao.ac.jp/astro/basic/comet.html



物体のある時点での位置 *r* = (*x*, *y*, *z*)

. その位置での速度 $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$

. 物体に(各方向に)働く力 $\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$

- これらが揃えば、古典力学の運動方程式を解い て、物体の運動(軌道)が分かる
- ・重力の場合、重力源さえ分かっていればFは分かる



太陽系天体の軌道 credit: 国立天文台 https://www.nao.ac.jp/astro/basic/comet.html



- 単純には夜空における星の位置とその変 化を計測すればよい
- 夜空での位置は、ある基準から測った角
 度で表すのが都合が良い
- 例えば、対象とする天体が地平線からどのくらい高い角度にいるか? + 真南からどのくらい西にずれたところにいるか?

東







- ・ただし、地球の自転に伴って1日の間に星 の位置は変化するので補正が必要
- ・さらに地球の公転によって地球(の夜側)か ら観測できる星が異なる (春夏秋冬の星 座)
- ・これらの見かけの効果を取り除いた、(太 陽に対する)系外天体の運動を知りたい

東









- ・天球面:地球を取り囲む仮想的な(無限遠 にある)球面で、その面上に星が張り付い ていると考える
- ・赤道面:地球の赤道を無限遠に広げた面
- ・赤道座標: 春分点を基準としてどのくら いの方角にいるか(赤経) + 赤道面を基準 としてどのくらいの角度か(赤緯)





- ・地球の自転・公転に伴う見かけの運動
- ・公転による年周楕円運動
- それらを補正した上で天球面を動く固有
 運動(proper motion)
- ・歳月をかけてその動きを測定する
- ・恒星が太陽に対してどう運動している
 か?



- 太陽に対する恒星の固有運動を考える
- ・年周楕円運動を取り除く(螺旋の中心をつ なぐ)と、天球面上に投影された恒星の運 動が分かる
- ・ 恒星までの方向(2成分)
- ・視線方向に垂直な角度変化(2成分)
- ・ドップラー法によって視線方向速度(1成 分)







光のドップラー効果

- 動いているものからの電磁波の波長が 動いていないものに対してずれる効果
- ・ 天体の(視線方向に沿った)運動を知る 上で重要な役割を果たす (非相対論極限: v_{los} ≪ *c* = 3 × 10⁸m/s)
- ずれの程度: $\lambda_{obs} = \left(1 + \frac{v_{los}}{c}\right)\lambda = \lambda + \frac{v_{los}}{c}\lambda$
- ・光の速度がどの慣性系でも変わらない ことによって起こる(特殊相対性理論)





光のドップラー効果

- 動いているものからの電磁波の波長が 動いていないものに対してずれる効果
- ・天体の(視線方向に沿った)運動を知る
 上で重要な役割を果たす
- ・観測者へ<u>向かってくる</u>光源・吸収源の 波長は<u>短くなる(青方偏移: blueshift</u>)
- ・観測者から<u>遠ざかる</u>光源・吸収源の波
 長は<u>長くなる(赤方偏移: redshift</u>)



光のドップラー効果

- 動いているものからの電磁波の波長が 動いていないものに対してずれる効果
- ・ 天体の(視線方向に沿った)運動を知る 上で重要な役割を果たす
- ・観測者へ<u>向かってくる</u>光源・吸収源の 波長は<u>短くなる(青方偏移: blueshift</u>)
- 観測者から<u>遠ざかる</u>光源・吸収源の波 \bullet 長は<u>長くなる(赤方偏移: redshift</u>)









- 太陽に対する恒星の固有運動を考える
- ・年周楕円運動を取り除く(螺旋の中心をつ なぐ)と、天球面上に投影された恒星の運 動が分かる
- ・ 恒星までの方向(2成分)
- ・視線方向に垂直な角度変化(2成分)
- ・ドップラー法によって視線方向速度(1成 分)





天体までの距離

- ・ 恒星までの方向(2成分)
- ・視線方向に垂直な角度変化(2成分)
- ・ドップラー法によって視線方向速度(1成 分)
- あとは天体までの距離が分からなければ ならない
- ・どうやって? 実は大変(第4回)



移動距離が短い <u>]</u>/ 角度θ 角度 θ



距離が近い場合



