

平成21年度 専門性向上研修 理科ⅡA-2
研修資料



(ハッブル宇宙望遠鏡で観た子持ち銀河 M51, NASA)

2009年8月6日(木) 09:00~12:30)

@東京学芸大学 自然科学系研究棟1号館

担当: 西浦慎悟(東京学芸大学・自然科学系・助教)

I 地球と太陽系

1.1 地球と夜空の星々

私達の住む地球は、直径が 12800km、質量が 6.0×10^{24} kg のほぼ球形をした岩石主体の星です(カラー図1)。地球表面の約7割は水からなる海が占め、さらには窒素と酸素を主成分とした大気を持ちます。地球上には 8000m を越える高い山や、10000m よりも深い海溝などがありますが、地球全体から見ればわずかなもので、地球をリンゴの大きさまで縮めると、その表面はリンゴよりも滑らかになります。

地球は太陽のまわりを約1年で一周しています。地球から太陽までの距離は約1億5000万kmで、太陽から出た光(秒速30万km)が地球に届くまで8分20秒かかります。しかし同じこの距離を進むためには、新幹線(時速300km)で57年、徒歩(時速4km)で4280年もの時間がかかります(図2)。天文学では天体までの距離や天体のサイズが非常に大きくなるため、太陽と地球の間の距離を1AU(天文単位)という単位で表わし、距離や大きさを表現するときに使用します。参考までに、光の秒速30万kmという速さはこの宇宙でも最も早く、1秒の間に地球を7回半も回ることができます。



(図2: 太陽から地球までの旅)

夜空に輝く星々は、肉眼で見えるものだけで北半球側で約3500個、南半球側でも約3500個、あわせて全天で7000個あると言われています。これらのほとんど全ては、太陽のように自分で光り輝いています。しかしこの星たちが太陽ほどまぶしくないのは、地球や太陽よりも恐ろしく遠くにあるためです。そしてそのために、数千年程度の時間では空での星々の互いの位置はほとんど変わることがありません。このような星たちは恒星と呼ばれています。太陽は地球に最も近い恒星です。

その一方で、古代から水星(カラー図3)、金星(カラー図4)、火星(カラー図5)、木星(カラー図6)、土星(カラー図7)の五つの明るい星は、短い時間の間に少しずつ空での位置を変えていきます。これらはその動きから惑星と呼ばれるようになりました。地球以外の惑星は、長い間この五つだけと思われてきましたが、18世紀末にウィリアム・ハーシェルによって天王星(カラー図8)、19世紀半ばにルベリエの計算にもとづいてガレが海王星(カラー図9)、そして20世紀初めにトンボーによって冥王星(カラー図10)が発見されましたが、これらは望遠鏡を使わなければ観ることができないほど暗い惑星です。しかし2006年の国際天文学連合(天文学者の国際的な集まり)総会において、冥王星は惑星から準惑星の代表天体とされてしまいました。

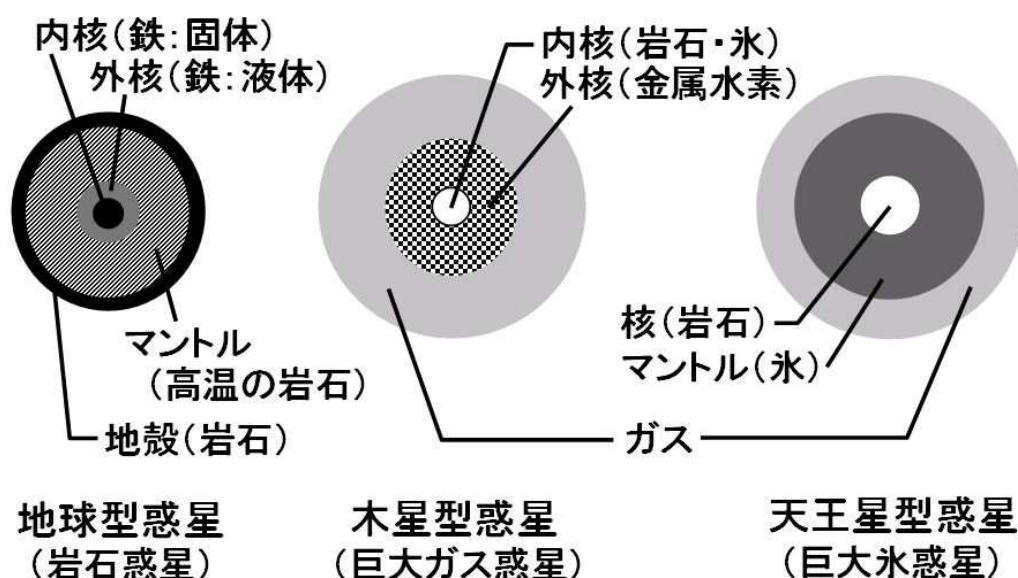
1.2 惑星:地球の仲間たち

今では惑星は、太陽のまわりを回る地球の仲間の星々であり、恒星よりもはるかに近くに存在する天体であることが知られています。そして地球も惑星の一つであることも明らかになっています。惑星は太陽に近い方から、水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星の順番で、ほぼ同じ平面上を同じ向きに回転しています。太陽を中心とするこの惑星のグループを太陽系と呼びます。惑星はその公転軌道によって、地球よりも内側を公転する内惑星と外側を公転する外惑星に分けられます。また公転軌道ではなく、その構造によって地球型惑星、木星型惑星、天王星型惑星に分けられることもあります。

地球型惑星は主な成分が岩石である惑星で岩石惑星とも呼ばれます。太陽系では水星、金星、地球、火星がこれに該当します。地球型惑星には一般にサイズ・質量が小さく、密度が大きいという性質があります。

地球型惑星とは反対に主な構成成分がガスである惑星を木星型惑星(巨大ガス惑星)と呼びます。木星

型惑星はサイズ・質量が大きく、密度が小さいという特徴があり、木星、土星がこれにあたります。以前は天王星と海王星も木星型惑星に分類されていましたが、最新の惑星科学の研究の結果、現在これらは**天王星型惑星(巨大氷惑星)**と呼ばれるようになってきています。**図11**は三つの惑星のタイプの構造の違いを模式的に示したものです。主な太陽系天体の諸量を**表1**に簡単にまとめました。また、太陽から主な太陽系天体までの旅に要する時間を**表2**に示しました。



(図11: 地球型惑星、木星型惑星、天王星型惑星の構造比較)

天体名	太陽からの距離 (太陽・地球間=1)	直径 (地球=1)	質量 (地球=1)	赤道重力 (地球=1)
太陽		109	33.3 万	28.0
水星	0.39	0.38	0.06	0.38
金星	0.72	0.95	0.82	0.91
地球	1.00	1.00	1.00	1.00
月	1.00	0.27	0.01	0.17
火星	1.52	0.53	0.11	0.38
木星	5.20	11.2	318	2.37
土星	9.55	9.45	95.2	0.94
天王星	19.2	4.01	14.5	0.89
海王星	30.1	3.88	17.2	1.11
冥王星	39.5	0.19	0.002	0.06

(表1: 主な太陽系天体の諸量, 平成 19 年理科年表[丸善]より一部抜粋)

	地球	土星	冥王星
太陽からの距離	1 億 5000 万 km 1 AU	14 億 3200 万 km 10 AU	59 億 3100 万 km 40 AU
光(秒速 30 万 km)	8 分 20 秒	1 時間 20 分	5 時間 30 分
新幹線(時速 300km)	57 年	545 年	2250 年
人(時速 4km)	4280 年	4 万 8000 年	17 万年

(表2: 太陽から惑星への旅)

土星には特徴的な輪が存在し、市販製の小型望遠鏡でも十分に観察することができます。この輪の存在に始めて気付いたのが、イタリアの天文学者**ガリレオ・ガリレイ**でした。ガリレオは自作の天体望遠鏡で土星

を観察しましたが、その望遠鏡の性能が足りなかったため、輪の存在を十分に確認することができませんでした。ガリレオは「土星には耳がある」という記録を残しました。ガリレオが発見した”土星の耳”が輪であることを改めて発見したのはオランダの天文学者**ホイヘンス**です。今では、輪を持つ惑星は土星だけではなく、木星、天王星、海王星にも存在することが分かっています。木星の輪は探査機ボイジャー1号によって、天王星の輪はカイパー空中天文台による恒星の掩蔽観測によって、そして海王星の輪は探査機ボイジャー2号によって発見されました。

1.3 月と衛星と太陽系内小天体

太陽系の仲間には、八つの惑星だけではなく、**月(カラー図12)**のように惑星の周りをまわる**衛星**も含まれます。

月は**直径が地球の約1/4、質量が地球の約1/100**で、地球と同じく岩石主体の星です。**地球から月までの距離は約38万km**であり、地球に対する月の公転周期と自転周期が完全に一致しているため、月は常に地球に片方の面しか見せていないことになります。月の表面には「**海**」と呼ばれる平らな黒味を帯びた部分や大小様々な**クレーター**が存在します。クレーターは隕石衝突、海は隕石衝突によって表面にしみ出てきた玄武岩質の溶岩が冷えて固まったものと考えられています。また月の起源には従来、**親子説(分裂説)、兄弟説(共成長説)、他人説(捕獲説)**ありましたが、最近になって火星程度の惑星が地球に衝突し、その破片が集積することによって月が形成されたとする**ジャイアント・インパクト説**が提唱されるようになりました。

木星型惑星や天王星型惑星は、多くの衛星を持っています。木星には63個(2008年現在)、土星には61個(2009年5月現在、さらに3個が確認中)、天王星には27個(2007年現在)、海王星には13個(2009年現在)の衛星が発見されています。反対に地球型惑星で衛星を持つものは地球が1個と火星が2個のみで、その数も僅かです。

木星の衛星の中でも最も大きな四つの衛星(**カラー図13**)は、ガリレオ・ガリレイが400年前に自作の望遠鏡で発見したことにちなんで、**ガリレオ四衛星**と呼ばれています。ガリレオ四衛星は”地球以外の天体(木星)の周りを回る星”を発見したことで、ガリレオに天動説への疑念を抱かせる切欠の一つになったと伝えられています。また、ガリレオ四衛星の一つ**イオ**には多くの火山が見つかっており(**カラー図14**)、この衛星が活動していることが判明しました。また**エウロパ**は分厚い氷に包まれた衛星ですが、その下には海が広がっていると考えられています。さらに最近の研究からは**ガニメデ**や**カリスト**の地下にも海が存在している可能性が指摘されています。

土星の衛星**タイタン(カラー図15)**には、窒素を主成分としたメタンやエタンを含む濃密な大気が存在が確認されています。そしてこの大気の下にはメタンの海が広がっていると考えられています。

このような衛星の火山活動や海の存在は、太陽系の惑星・衛星の地質構造がどのように形成され、変化してきたのかを知る上で重要な情報を与えてくれると期待されており、さらに海の存在は、地球における生命発生の必要条件であると考えられているため、地球外生命存在の可能性が期待されます。

1.4 太陽系内小天体

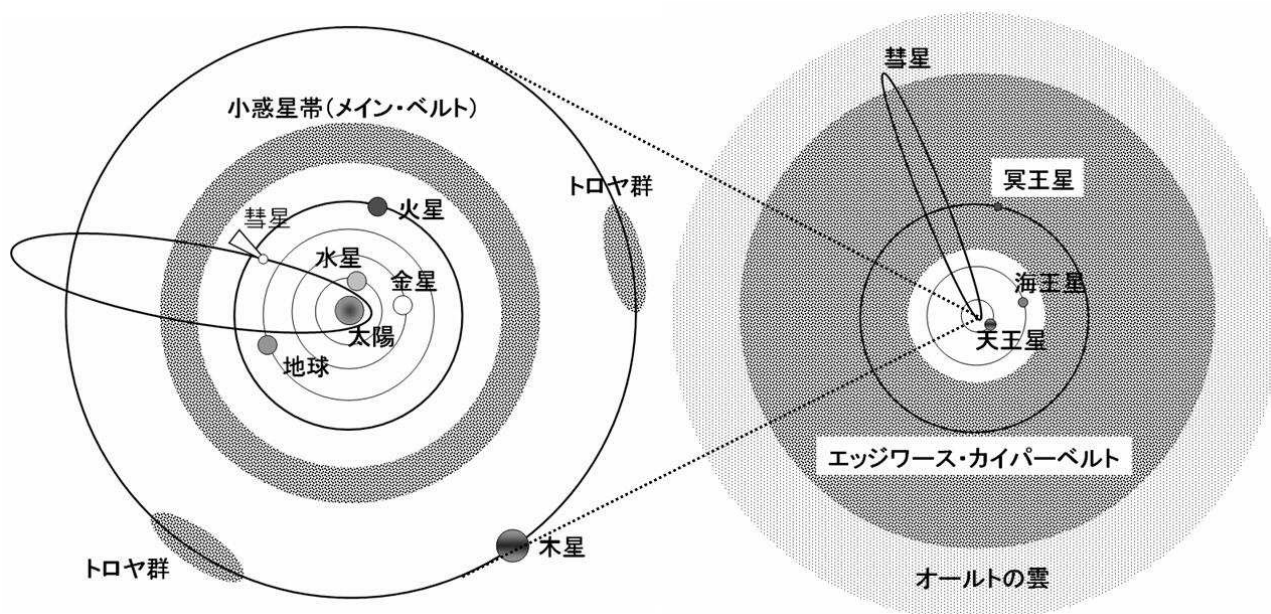
衛星に加えて、主に火星と木星の間に無数に存在する**小惑星**、細長い楕円軌道を描いて太陽系の外縁部から飛来する**彗星(「ほうき星」とも呼ばれる)**、そして地球の引力にひかれて落ちてくる微小な天体である**隕石**や**流星**も太陽系の仲間です。このような微小な天体をまとめて**太陽系内小天体**と呼ぶことがあります。

火星と木星の間には、直径1000km以下の小惑星が無数に分布しており、この領域は**小惑星帯(アステロイドベルト)**と呼ばれます。**カラー図16**はハッブル宇宙望遠鏡が撮影した小惑星帯最大(直径952km)の**ケレス**です。以前は、これら小惑星帯の小惑星達は、元々一つの惑星だったものが何らかの要因で破壊されたものだと思われていました。しかし、小惑星帯の小惑星全ての質量を足し合わせても、惑星規模に達しないことなどから、今では反対に、太陽系の形成過程で、惑星にまで成長し切れなかった微惑星の集積である、と考えられています。さらに火星と木星の間以外にも小惑星が集まっている領域が見つかり、混同をさけるために、最近ではアステロイドベルトを**メインベルト**と呼ぶことが多くなっているようです。特に木星軌道上で、太陽、木星と共に正三角形を描く2地点に多くの小惑星が存在しており、これらは**太陽・木星系のラグランジュ・ポイント(太陽・木星からの重力と遠心力が釣り合う場所)のうちのL₄、L₅にあたります(図17左)**。同じような小惑星の集積場所は、海王星軌道上にも見つかっています。

1992年以降、海王星の外側に多数の**微惑星**が発見されるようになりました。今では太陽から数

10 から数 100 天文単位の距離には微惑星が円盤状に広がった領域(エッジワース・カイパーベルト：図 17 右)が存在すると考えられています。そしてこれら微惑星は太陽系が形成される時に、取り残された天体だと言われています。そしてさらに、太陽から 2 万から 10 万天文単位の距離には微惑星が球殻上に集まったオールの雲(図 17 右)が存在する可能性も指摘されています。これら海王星の外側に分布する多くの天体は、まとめて太陽系外縁天体と呼ばれています。

太陽系外縁天体の中には、冥王星に匹敵するようなサイズのものも少なくなく、数年前から冥王星を惑星に分類することに反対する天文学者が増えてきました。そして 2003 年にはついに、冥王星(直径 2300~2400km)よりも大きなサイズの太陽系外縁天体エリス(直径 2400~3000km)が発見され、これを切欠として冥王星は惑星から準惑星に分類されることとなります。つまり海王星の外側には、冥王星クラスの天体が多数存在しているという、従来とは大きく異なる太陽系の姿が見えてきたのです。



(図17: 太陽系の概念図, [左]小惑星の分布, [右]太陽系外縁部の構造)

一部の彗星(カラー図 18)は木星軌道からやって来ますが、多くの彗星はエッジワース・カイパーベルトやオールの雲からやって来ます。そこで彗星には、太陽系外縁部から太陽系の太古の情報を運んで来ていることが期待されます。また彗星はその軌道上に大量のチリをばら撒きます。地球がこれと交差する場所にやって来ると、このチリが大量に地球上に降り注ぐことで流星群(カラー図 19)が観察されることとなります。主な流星群が出現する日がほぼ決まっているのは、このためです。主な流星群を表 2 に記しました。

流星群名	極大日	親天体
しぶんぎ座流星群	01 月 03-04 日	?
みずがめ座 η 流星群	05 月 04-05 日	ハレー彗星
ペルセウス座流星群	10 月 08-09 日	スィフト・タートル彗星
しし座流星群	11 月 17-18 日	テンペル・タートル彗星
ふたご座流星群	12 月 12-14 日	パエトン(小惑星)

(表2 : 主な流星群, 平成21年理科年表[丸善]より一部抜粋)

II 天の川銀河と宇宙

2.1 恒星の世界から天の川銀河へ

太陽は直径が地球の約109倍、質量が約33万倍もある恒星です。地球からの距離は約1億5千万kmもあり、光(秒速30万km)でも8分20秒かかります。表面温度は約6000度ですが、中心温度は100万度以上にもなり、4つの水素原子(H)から1つのヘリウム原子(He)を作り出す核融合反応によって輝いています(式1)。この原理は水素爆弾(原子爆弾の原理は核分裂反応で、これとは異なる)と全く同じものです。



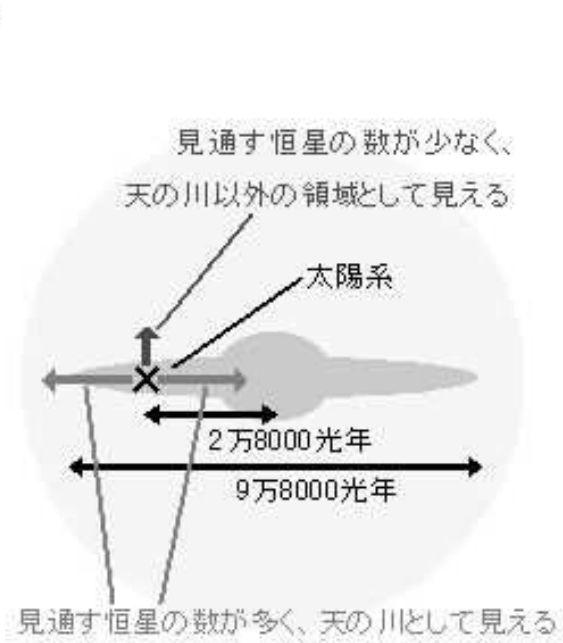
太陽表面には黒点がしばしば現れます。黒点は温度が約4000度と周囲よりも低いために暗く見えており、同時に強力な磁場が生じている場所であることも分かっています。黒点の出現頻度は、太陽の活動性と密接に関連しており、太陽が活発な時には黒点も頻繁に出現します。さらに太陽の活動性は11年周期で増減することが知られています。

太陽は生まれて100億年で核融合反応の燃料となる水素を使い尽くして寿命を迎えると考えられています。現在の太陽の年齢は50億年であり、寿命の半分に達するものと考えられています。恒星のほとんどは太陽と同様に、その内部で4つの水素原子(H)から1つのヘリウム原子(He)を作り出す核融合反応によって生じるエネルギーで光り輝いています。

太陽の次に私たちに近い恒星はケンタウルス座アルファ星(アルファ・ケンタウリ)です。太陽を出た光がこの星に到着するまでには4.4年もの時間がかかります。天文単位よりも長い距離を表現する必要がある場合、天文学では光が1年で進む距離、約9兆5000億kmを1光年として、これを用います。つまり太陽からアルファ・ケンタウリまでの距離は4.4光年ということになります。さらにアルファ・ケンタウリは太陽とほぼ同じ明るさ・大きさの恒星です。今、太陽とアルファ・ケンタウリを100円玉サイズに縮小すると、太陽とアルファ・ケンタウリの間は650kmにもなります。これは東京から北海道の函館、もしくは広島に相当する距離です(図21)。



(図21: アルファ・ケンタウリまでの距離)



(図22: 天の川銀河の構造)

さらに太陽を含めた2000億個もの恒星は、集まって中心部分が膨らんだ巨大な円盤状の天体を形作っています。この巨大な円盤型の天体を銀河と呼びます(図22)。夏や冬の夜空を飾る天の川(図23)は、私たちが円盤状に集まった銀河の中に住んでいる証拠の一つです。そしてこの宇宙には銀河と呼ばれる天体が何万何億と存在することが分かっています。特に私たちが住む銀河を銀河系または天の川銀河と呼んで、他の無数にある銀河と区別しています。銀河系の直径は約9万8000光年、太陽系は銀河系中心から2万8000光年も離れた位置に存在しています。

銀河系はすぐ横に、小型の銀河である大マゼラン銀河と小マゼラン銀河を伴っています。さらに

銀河系のすぐ隣、230 万光年の場所には、銀河系とほぼ同等の**アンドロメダ銀河(図 24)**が存在します。

2.2 銀河宇宙の世界へ

銀河の約半分は互いに集まって**銀河群**や**銀河団**といった集団を形成しています(カラー図 26, カラー図 27)。

銀河群は銀河が**数 10 個**集まった宇宙の地方都市、銀河団は銀河**数 100 個から数 1000 個**からなる宇宙の大都会です。そしてこの宇宙には銀河群や銀河団が無数に存在しています。その反対に宇宙には、このような銀河がほとんど存在しない広大な空間も見つかっています。何故、宇宙には銀河が集まっている場所と、ほとんど銀河が無い場所があるのでしょうか？またこのような銀河集団とそこで形成・進化する銀河との間には、どのような関係があるのでしょうか？これらは現代天文学研究の重要なテーマの一つです。

また 1930 年頃、ハッブルは”ほとんどすべての銀河が天の川銀河から遠ざかるように運動し”ており、さらにその後退速度 v (km/s) と距離 d (Mpc) は比例関係にあることを見出しました。この関係、

$$v = H_0 \times d \text{ ----- (式 2)}$$

を**ハッブルの法則**といい、この関係式(式 2)の比例定数 H_0 (km/s/Mpc)を**ハッブル定数**と呼びます。ハッブル定数は近似的に宇宙の年齢を表しており、ハッブルの法則は**膨張宇宙**の状況証拠の一つとなっています。

2.3 恒星の一生

天文学関連の書籍や百科事典を鮮やかに彩る様々な星団や星雲の多くは、銀河系の中に存在する天体です。そしてこれらは恒星の一生と密接に関係しています。

全ての恒星は、**非常に濃いガスとチリ**の中で生まれます。このようなガスとチリの塊は、背景からの光を遮るため、**暗黒星雲**として観測されます。暗黒星雲とは、恒星の材料が豊富に揃った場所なのです。**オリオン座の馬頭星雲(カラー図 28)**では、既に若い恒星が輝き始めていますが、その光を手前にある非常に濃いガスとチリが遮って、あたかも馬の頭のように見えています。銀河系にはこのような暗黒星雲がたくさん存在しています。

暗黒星雲の中からたくさんの恒星が次から次へと生まれてきます。質量が大きく、温度の高い恒星は、非常に強力な紫外線を放射します。暗黒星雲のガスやチリは、この紫外線によって**電離(イオン化)**され、その温度や密度によって様々な色の光を放出します。このような色鮮やかな天体は**散光星雲**と呼ばれます(カラー図 29)。散光星雲の特に鮮やかな赤い色は、紫外線を受けて発光している電離水素(水素イオン)ガス、青い色はチリによって反射された恒星の光です。

暗黒星雲や散光星雲などの恒星が誕生する場所は、まとめて**星形成領域**と呼ばれます。オリオン座やおうし座、いて座の方向には、このような星形成領域がたくさん分布しています。

恒星は、やがてその放射エネルギーで周りに残る星雲を吹き飛ばしてしまいます。恒星は集団で誕生するため、星雲が吹き飛ばされた後には、比較的若い恒星の集まりが現れます。このような恒星の集団を**散開星団**と呼びます。**カラー図 30**は散開星団の中でも日本古来から親しまれてきた**プレアデス星団**です。プレアデス星団の周りには薄いガスが存在していますが、これは長い間、吹き飛ばされずに残ったガス星雲だと考えられていました。しかし最新の研究から、プレアデス星団は若い恒星からなる散開星団と、それとは無関係なガス星雲が、今まさに衝突している天体であることが分かってきました。**カラー図 31**はペルセウス座の散開星団 NGC1342 です。この中には様々な恒星が分布していることが分かります。

太陽の 8 倍よりも軽い恒星は、水素を使い尽くすと、今度はヘリウムからベリリウム、炭素、酸素、ネオンと次々に重い元素を合成して輝き続けます。そして同時に大きく膨張して表面温度が下がり、**赤色巨星**へと進化していきます。赤色巨星は、太陽系の中心に置くと火星や木星まで飲み込むほどの巨大な恒星ですが、さらに膨張と収縮を繰り返して、自分自身が持つガスを周りの宇宙空間に断続的に放出します。そして恒星本体は小さく収縮して温度が上がり、**白色矮星(はくしょく**

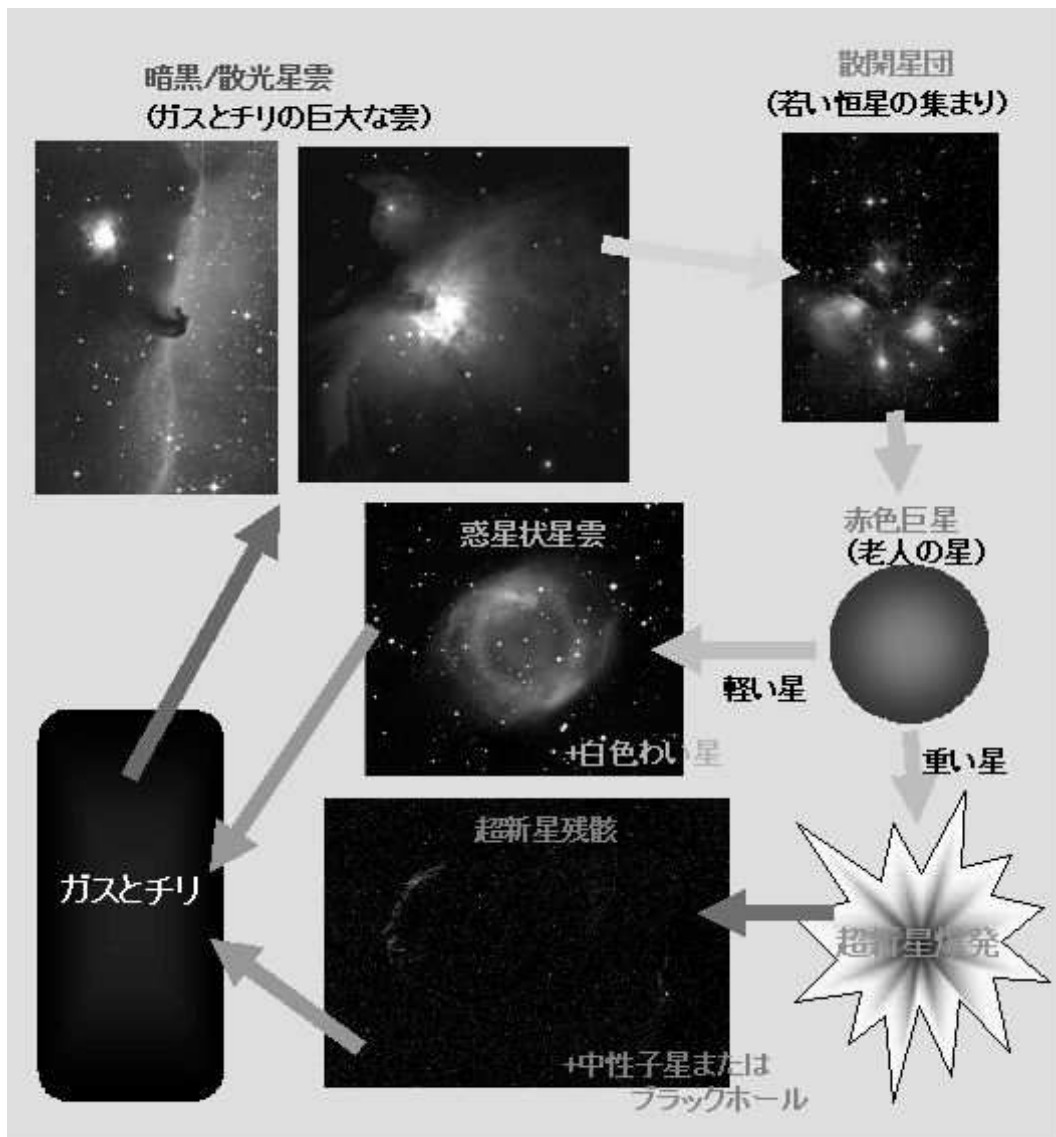
わいせい) になります。

白色矮星はサイズが地球程度の非常に小さな恒星ですが、その密度は 1cm^3 あたり数トンにもなります。そして放出されたガスは、白色矮星から放射された紫外線を受けてイオン化し、様々な色で輝きます。このような天体を惑星状星雲(カラー図 32、33)と呼びます。

太陽の8倍よりも重い恒星は、核融合反応をどんどん進めて、最終的にはその中心部に鉄を合成します。そして最後に凄まじいまでの大爆発を起こし、自分自身のほとんど全てを吹き飛ばしてしまいます。これを超新星爆発と呼びます。鉄までは元素は恒星の核融合反応で合成されますが、鉄よりも重い元素は超新星爆発のエネルギーで合成され、その爆発で宇宙空間へばら撒かれていきます。そしてその中心部には中性子星やブラックホールなどの超高密度天体が形成されます。

中性子星は、直径が 10km 程度の非常に小さな星ですが、その密度は 1cm^3 あたり 10 億トンにもなります。また中性子星は、強力な磁場を持ち高速で自転しているため、周期的な電波を発するものがあり、このような中性子星はパルサーと呼ばれます。

ブラックホールは、中性子星よりもさらに密度が高く、 1cm^3 あたり数 10 億トン(富士山 50 個分)にもなります。この凄まじい高密度のため、ブラックホールの重力は想像を絶するほど強力なものになっており、一度その重力に捕まったものは、宇宙最速の光でさえも脱出不可能です。



(図36: 恒星の輪廻転生)

超新星爆発で宇宙空間に放出された物質は、その衝撃波のエネルギーでイオン化し、鮮やかな色

で輝き出します。これらは**超新星残骸**と呼ばれます。おうし座のかに星雲は 1054 年に爆発した超新星の残骸です(**カラー図 34**)。この時の超新星爆発は、平安時代の貴族**藤原定家**によって「**明月記**」に記録されていました。かに星雲の中心にはパルサーが見つかっています。また明月記にはかに星雲以外にも、いくつかの超新星爆発の記録が残されています。はくちょう座の網状星雲(**カラー図 35**)はさらに古く、1 万年ほど前に爆発した超新星の残骸であると考えられています。

赤色巨星や超新星爆発によって銀河系内に放出された物質は、やがて別の場所でぶつかり合って、新たな星形成領域を形作ります。そしてそこで次の世代の恒星が生まれます。銀河系の中ではこのような恒星の輪廻転生が繰り返され、そして次から次へと重たい元素が合成されていきます。恒星は元素合成機、銀河系はそれが 2000 億個も集まった巨大な元素製造工場と言えます(**図 36**)。

銀河の内には、散開星団とは異なる星団も存在しています。この星団は、数 10 万から数 100 万個もの恒星が球形に密集しており、その形状から**球状星団**と呼ばれています(**カラー図 37**)。散開星団中の恒星が比較的若い恒星であるのに対して、球状星団を形作る星々は非常に古い恒星で、散開星団が天の川に沿って分布しているのに対して、球状星団は天の川以外の領域にもたくさん分布しています。詳しい研究からは、球状星団は銀河系の円盤部分を覆う球状の空間に広く分布しているといわれています。

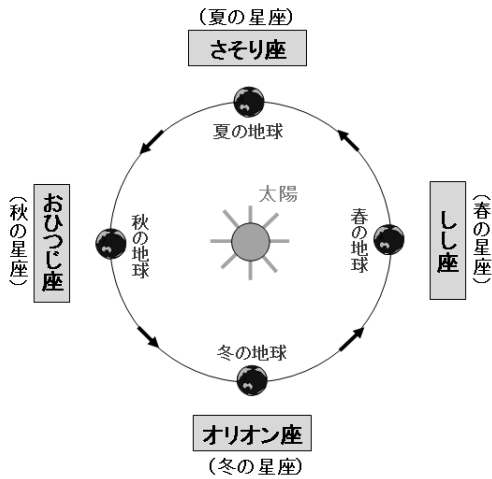
球状星団に属する恒星は、他の恒星に比べて金属量が少ないことが知られています。鉄までの元素合成は恒星内部、それよりも重い元素の合成は超新星爆発によって行われることを考えると、球状星団のもとになったガスやチリは、もともと金属が少ない、つまり銀河系が形成されはじめた頃に誕生した天体であることを示しています。実際に導出された球状星団の恒星の年齢は、別の研究から得られた宇宙の年齢と同程度です。球状星団を調べることで銀河形成の初期の状態にアプローチできると考えられています。

III 地球の公転と自転

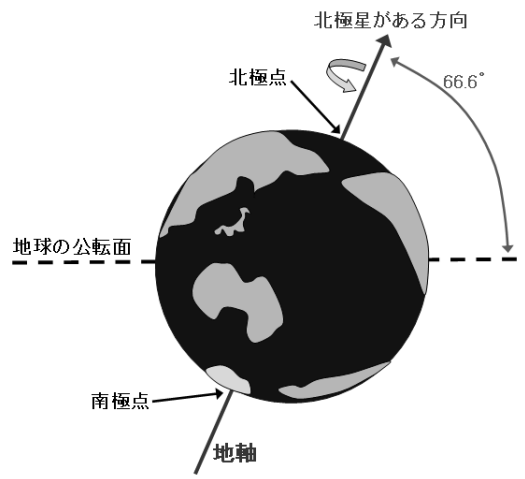
3.1 地球の回転運動

私達が住む地球は、太陽の周りを約 365.242 日かけて一周します。この運動を**地球の公転**といいます。地球の公転運動のため、私たちが観察できる星の位置は、一晚ごとにほんの少しずつ西に移動して行くこととなります。そして1年が経つと、また同じ時刻・同じ位置に同じ星を観察することができるようになります。私たちが季節によって、異なる星座を観察できるのは、地球が太陽の周りを公転しているからなのです(図 38)。このような星の 1 年ごとに繰り返される動きを、**星の年周運動**といいます。また地球の公転周期が 365.242 日であるため、1 年を 365 日とする暦を使い続けると、4 年で約 1 日分が余ってしまいます。そこで 4 年に一度 1 年を 366 日とする**うるう年**を導入することで、この 1 日の余剰を解消することができます。ところがこのままでは、今度は反対に 400 年で 3 日分足りない状態になってしまいます。そこで、現在の暦ではうるう年に加えて、**”西暦年が 100 で割り切れる年はうるう年にしない”**そして**”西暦年が 100 で割り切れても、さらに 400 で割り切れる年はうるう年にする”**という方法で、高い精度の暦が運用されています。

地球の北極から南極まで真っ直ぐに貫く直線を**地軸**といい、地球の公転面に対して約 **66.6 度**だけ傾いています。そして、地球は太陽の周りを公転するだけでなく、地球自身も地軸を中心とした回転運動をしています。これを**地球の自転**といいます(図 39)。地球の自転 1 回転にかかる時間は **23 時間 56 分 04 秒**です。地球の 1 日(=24 時間)は太陽が南中してから、次の日に南中するまでの時間ですから、地球の自転は、一日あたり 4 分だけ余分に回っていることとなります。先ほど“星の位置が一晚に少しずつ西に移動していく”という話をしましたが、これはまさしく地球が一日あたり 4 分ぶんだけ余分に自転しているためです。ただしこの星の位置のズレは、非常にわずかなため、夜空を見上げるだけの簡単な観察では、数 10 日から数週間の間をあけないと分からないでしょう。その結果として、同じ星を翌日の同じ時刻に観察すれば、前日とほぼ同じ位置で見つけることができます。このように星の 1 日ごとに繰り返される動きを、**星の日周運動**といいます。また、**地球の自転の回転方向は西から東に向けて**、つまり地球の北極側からみて反時計回りの方向です。そのため、地球上にいる私たちには、太陽や星が東の空から昇って西の空に沈むように見えます。



(図 38: 地球の公転運動と季節の星座)



(図 39: 地軸の傾きと地球の自転運動)

3.2 星の日周運動と年周運動

前節でも述べたように、天体の日周運動や年周運動は、地球の自転と公転によって生じる見かけの動きです。特に地軸の北極側の先には、明るい星、**北極星**が位置しています。そのため、北極星の位置は一年を通してほとんど変わりません。また地軸の南極側の先には、南極星となるような明るい星はありません。

さて日周運動では、見かけ上、星は地軸を中心に約 1 日(=24 時間)かけて空を一周(360°)します。すると、1 時間あたりの星の移動角度は、

$$360^\circ \div 24 \text{ 時間} = 15^\circ / 1 \text{ 時間} \text{ ---- (式 3)}$$

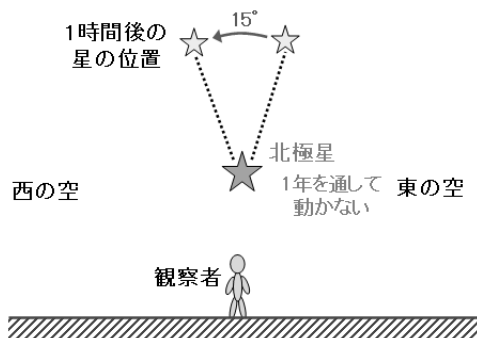
となります。つまり星は地軸を中心に 1 時間あたり 15° だけ東から西に向けて移動することとなります。

地球の北半球に位置する日本では、この“地軸を中心に”という部分は“北極星を中心に”という言葉に置き換えることができます。日本で北の夜空を見上げると、星々が北極星を中心に1時間で15°だけ、反時計回りに回転しているのが観察できます(図40)。

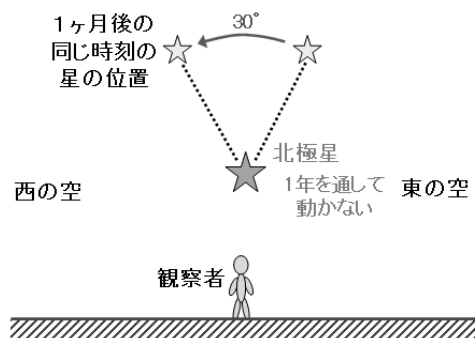
また年周運動では、見かけ上、星は北極星を中心に約1年(=12ヶ月)かけて空を一周(360°)します。すると、同じ時刻に観察するのであれば、1ヶ月あたりの星の移動角度は、

$$360^\circ \div 12 \text{ヶ月} = 30^\circ / 1 \text{ヶ月} \text{ ----- (式4)}$$

となり、同じ時刻に観察すると、星は北極星を中心に1ヶ月あたり30°だけ東から西へ向けて移動することになります。同じ時刻に北の夜空を長い間観察し続ければ、星々が北極星を中心に、1ヶ月あたり30°だけ反時計回りに回転しているのが分かります(図41)。



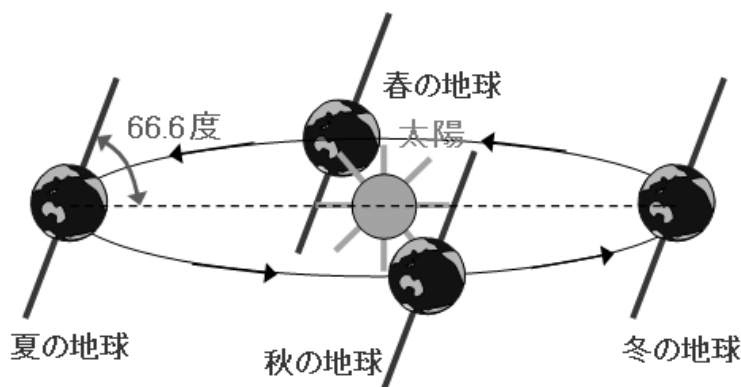
(図40: 日本の北の夜空における星の日周運動)



(図41: 日本の北の夜空における星の年周運動)

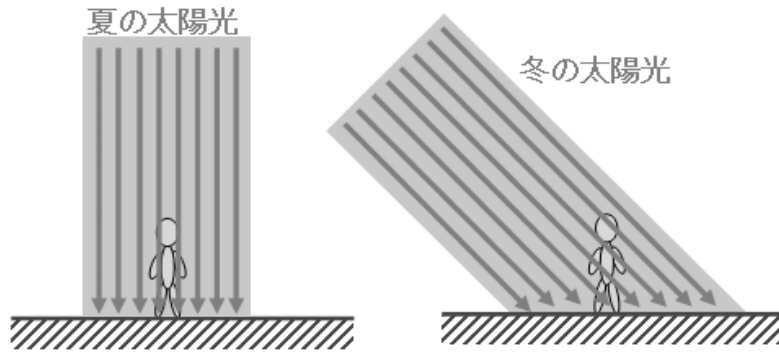
3.3 地球の公転運動と四季

地球の公転運動は、地軸の傾きの角度と方向を変えずに行われます(図42)。このおかげで、日本では1年間の間に気温や湿度などが大きく変わり、多彩な四季の変化が生まれています。



(図42: 地球の公転と地軸の傾き)

地軸が傾いているため、特に日本では、冬の太陽に比べて、夏の太陽はかなり高い位置に上がります。すると同じ量の太陽光が暖める地面の面積は、冬より夏の方が狭くなります。その結果、日本の夏の地面は、冬に比べてずっと暑くなり、気候もそれに伴って暑い季節になる訳です(図43)。赤道直下の場所では、一年を通して太陽が高い位置にあがるため、年中暑い気候になります。また反対に極に近い場所では、一年を通して太陽が低い位置にしか上がらないため、年中寒い気候になります。



(図 43 : 夏と冬の太陽高度の違い)

3.4 地球の公転運動と年周光行差

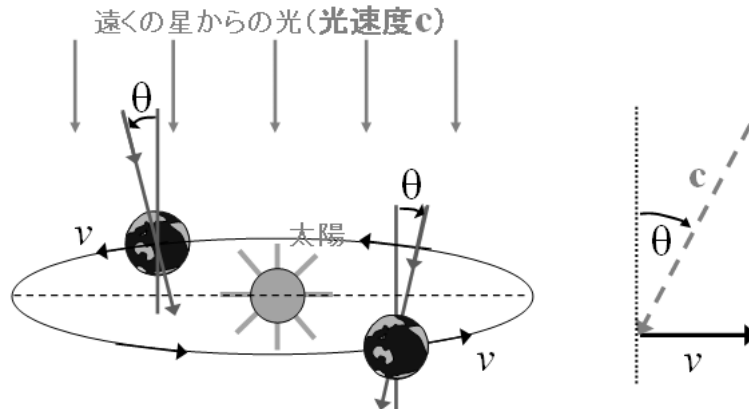
真上から雨が降っている時、車や電車に乗って速いスピードで移動していると、雨は真上からではなく、斜め前方上から降って来るように観察されます。同様のことが地球の公転運動についても起こります。つまり公転面に対して垂直方向にある星の光は、地球の公転方向にすこし傾いた方向からやって来るように観察されます。このずれを年周光行差といいます(図 44)。実際に観測される角度は、ある時点での星の観測位置と半年後の星の観測位置のずれ 2θ です。勿論この観測を行うためには精密な機器が必要となります。そして観測の結果、この角度のずれ 2θ は、 $41.3''$ であることが確認されています。地球の公転運動の速度を v 、光速を c とすると、

$$\sin \theta = v / c \text{ ----- (式 5)}$$

となるため、式3を変形、数値を代入して、

$$v = c \sin \theta = (2.99792458 \times 10^8 \text{ km/s}) \times \sin (41.3'' / 2) = 29.8 \text{ km/s} \text{ ----- (式 6)}$$

となり、地球の公転速度が約 29.8km/s であることが分かります。



(図 44: 地球の公転と年周光行差)

さらに地球が円運動していると考えて、地球と太陽の間の距離を a (km/s)とします。すると、地球は 29.8km/s の速さで、1年(=3.15 × 10⁷ 秒)かけて、 $2\pi a$ km の円周を一周りすることになるので、

$$2\pi a = 29.8 \text{ (km/s)} \times 3.15 \times 10^7 \text{ (s)} \text{ ----- (式 7)}$$

となります。これを a について解くと、太陽と地球の間の距離 1.49×10^8 km を得ることができます。ここではこれ以上話を進めませんが、太陽と地球の間の距離が分かれば、後は三角測量の応用で星までの距離を求めることができます。

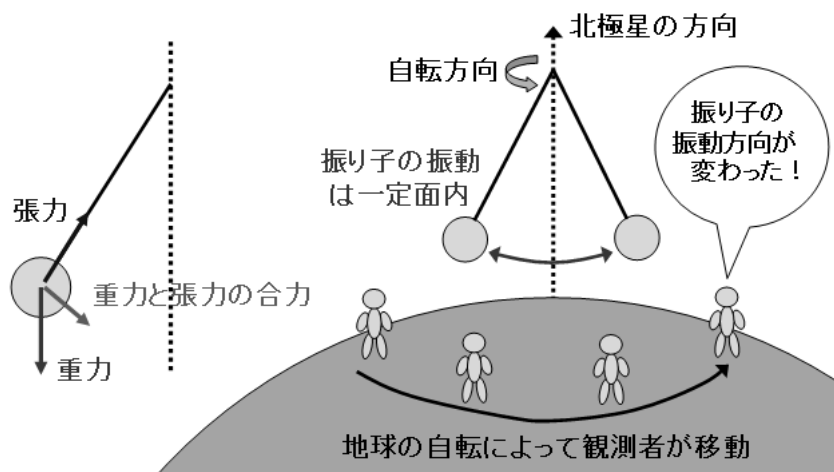
3.5 地球の自転運動とフーコー振り子

地球が自転している直接的な証拠を初めて示したのは、フランスの物理学者フーコー(J. Foucault)です。

長いひもの先に重いおもりを付けた振り子をつくります。この時、おもりに働く力は空気抵抗な

どを無視すれば、鉛直下向きに**重力**、そしてひもが張られた方向に働く**張力**の二つだけです。重力と張力の合力は、つねに振り子の運動の中心を向いており、これが振り子の往復運動を生み出します(図 45)。

振り子にはこれ以外の力は働いていません。ですから太陽から見た振り子の振動運動は、つねに同じ方向を行ったり来たりしているだけなのです。ところが地球は一日に 360° の自転をしています。今、振り子を北極点に置き、観測者がその振り子をずっと観察し続けることにすると、観測者は地球と一緒に一日で 360° 地軸の周りを西から東の方向へ一周します。しかし、太陽に対する振り子の振動方向は変わらないので、観測者から見れば、振り子の振動方向(正確には振動面)が一日で東から西に向かって一回転したように観察されます。この場合、観測者には、振り子を時計回りに回転運動させるような力が働いているように見えます。この見かけの力を**コリオリの力**といいます。



(図 45: 振り子の原理とフーコー振り子)

コリオリの力の大きさは、地球上の緯度 ϕ によって変わります。そのために、振り子の振動面の回転角速度 ω も緯度によって変わり、

$$\omega = \omega_0 \sin \phi \text{ (}^\circ \text{/s)} \text{ ---- (式 8)}$$

と表わせます。ここで ω_0 は地球の回転角速度(360° /23 時間 56 分 04 秒)を表わします。東京学芸大学の位置は、北緯 $35^\circ 42' 07''$ なので、フーコー振り子の振動面の回転角速度は、1 時間あたり 8.78° になります。

1851 年、フーコーは、パリのパンテオン寺院の天井から、重さ 28kg 重のおもりを 67m のひもでつるして巨大な振り子をつくり、これを振ることで地球の自転を直接的に証明してみせました。

注) 台風の巨大な渦巻もコリオリの力で発生します。また振り子を南極点に置くことで、コリオリの力の働く方向が、北半球と南半球で反対向きになることが分かります。特に赤道上では振り子の振動面は全く回転しません。さらにコリオリの力によって、風呂や流し台の吸い込み口にできる渦の回転方向が北半球と南半球で異なる、という話があります。が、このように小さなサイズでは吸い込み口の形や水を流し始めた位置の影響の方が大きく、観察される渦の回転方向は五分五分になります。この話は既に科学的な都市伝説となっているので気をつけましょう。

IV 実験・教具・話題など

現場の学校教員の方々からは、小・中・高等学校の理科では特に天文分野の指導が難しい、という声が聞かれます。私見ですが、この原因は i) 元々、教員養成系大学・学部において、天文学を学べる場所が少ない、という学校教員側の要因と、ii) 平面的にしか観察できない天体の動きや形を、立体的に理解しなければならず、特に小・中学生ではこの能力が発達途上にある、という児童・生徒側の要因、そして iii) 夜間の観察が学校教育現場ではほぼ不可能であるため、暗記とパターン解法の学習に頼らざるを得ない、という現場環境の問題が複合して生じている、と考えられます。ここでは、ありがちなものですが、現場で利用できそうな簡単な教材や話題を幾つか紹介します。

4.1 実験：月・金星の満ち欠け

月は地球の衛星で、直径は地球の約 $1/4$ 、重さは地球の約 $1/100$ です。地球から月までの距離は約 **38万4400km**、地球を發した光は **1分17秒**ほどで月に到着します。月の自転周期と、地球の周りを回る公転周期が一致しているため、月はいつも地球と同じ面を向けていることとなります。このため、探査機が月の裏側の写真を取るまでは、月の裏側には森や海があって生物がいると信じる人々もいました。

金星は地球の一つ内側を公転している惑星です。サイズは地球より一回り小さい程度で、その表面は非常にぶ厚い大気につつまれています。この大気のほとんどは二酸化炭素 (CO_2) で、地表には硫酸の雨が降っています。この姿は太古の地球と同じであると言われていています。金星は地球に対して、太陽と反対側には行けないため、地球から満ち欠けのない金星をみることは不可能です。なお金星の満ち欠けを發見したのはガリレオ・ガリレイで、当時は地動説を支持する有力な現象の一つでした。

材料：ピンポン玉、電気スタンド

場所：暗くした実験室・教室。

内容：太陽・地球・月（金星）の位置関係と満ち欠けの関連性を体感する（**カラー図 46**）。

発展：・電気スタンドを使う代わりに、半球部分だけを黒マジックで黒く塗ったピンポン玉を使うと満ち欠けはより鮮明になる。ただし光源は複数持ち込まない方がよい。

・デモ実験の場合は、バレーボールなど前面真っ白なものを月に見立てるのが良い。サッカーボールやバスケットボールは表面の模様で分かり難くなる。

・光を当てたバレーボールを輪になって囲み、それぞれの位置からどのように見えるかを報告・確認し合う。

4.2 教具：星座早見盤

材料：星座早見盤（意外と種類があるので購入時は注意すること）（**カラー図 47**）

場所：天体観察や観望会を行い野外、教室・実験室。

内容：天体位置の時間変化。季節によって見える星座の違いを擬似的に体験。ただし、太陽と地球、各星座の位置関係については何も言及していないので、この点には注意する。

発展：・特に、天の川と各種天体が盤面に記入されている星座早見盤を使い、天の川と各種天体の分布を調べることで、私たちが住む銀河系の構造に関する示唆を与えることが出来る。

・流星群(後述)のアナウンスの際にも有用。

欠点：月や惑星などについては、星座早見盤ではフォローしきれない。

4.3 話題：流星群

彗星は細長い楕円軌道を描いて、太陽の周りを回っている太陽系の仲間の星です。有名なハレー彗星は、76年かけて太陽を一周します。彗星の本体は巨大な氷とチリの塊で、これが太陽に近づくことで溶け出し、長い尾を形成します。そして彗星は常にその通り道の上に、たくさんのチりをばら撒いています。そしてそのばら撒かれたチりの中に、地球が入っていくと、たくさんのチりが地球の万有引力に引かれて落ちてきます。これが流星群です。特に有名な流星群については**表2**を

参考にしてください。月夜や街中でなければ、暗い流星でも肉眼で観察することができるでしょう。流星群に冠される星座の名称は、流星の多くがその星座の方向から飛んでくるように見えることに由来しています。流星が出現する中心点を**輻射点**といますが、実際の流星観察では輻射点方向にこだわる必要はありません。

4.4 話題：日食・月食

『理科年表』や『天文年鑑』には数年先までの日食・月食の情報が詳細に記されています。先頃の日食(2009年7月22日の日食)のように、大きく報道されたり、科学雑誌に掲載されるので、詳しい情報には困らないでしょう。ですが特に日食の観察には、専用の器具を使用するようにしましょう。目を傷めてしまいます。ススをつけたガラスや黒い下敷きなどは、以前は普通に使用されていましたが、最近では赤外線が素通しになるために視細胞に再生不可能なダメージを与えることが知られています。

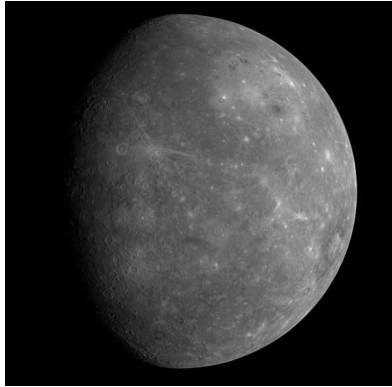
4.5 話題：銀河鉄道の夜

宮沢賢治の小説「銀河鉄道の夜」に登場する銀河鉄道は、はくちょう座（北十字）から天の川に沿って南十字までを結ぶ鉄道として描かれています。星座早見盤をはくちょう座（北十字）から南十字星まで辿ってみると、琴座、はくちょう座のアルビレオ（はくちょう座ベータ星）やさそり座の一等星アンタレス（赤色巨星）、ケンタウルス座など、銀河鉄道の夜に登場するモチーフが連なっていることが分かります。また南十字座のそばにある石炭袋という暗黒星雲なども登場します。

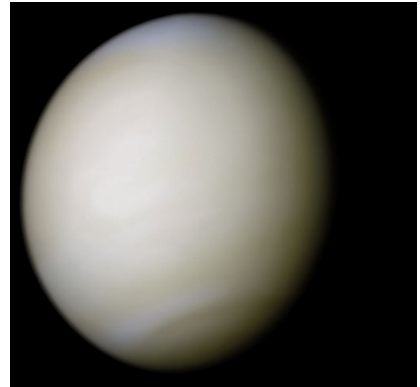
【カラー図】



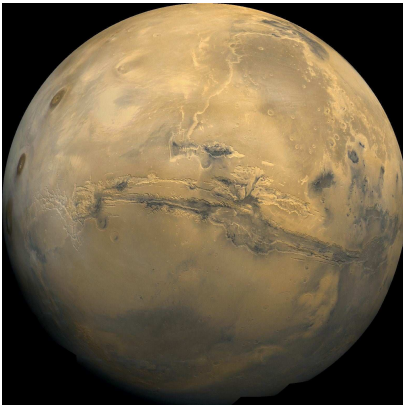
(図1: 地球, アポロ17号より撮影, NASA)



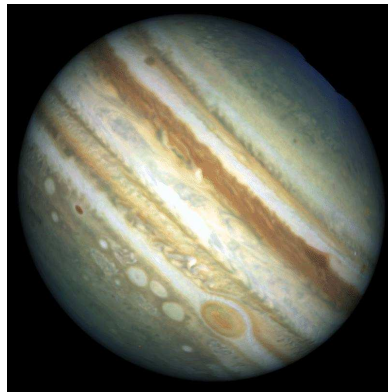
(図3: 水星, メッセンジャー, NASA)



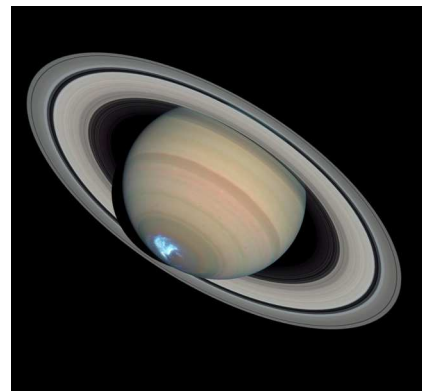
(図4: 金星, マリナー10号, NASA)



(図5: 火星, ヴァイキング1号, NASA)



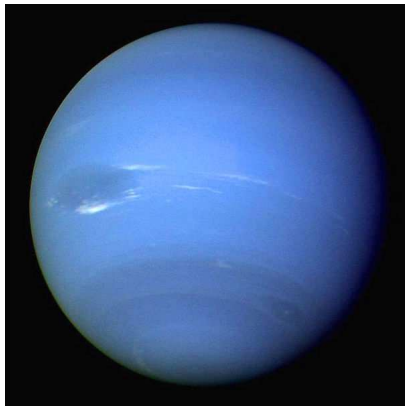
(図6: 木星, HST, NASA)



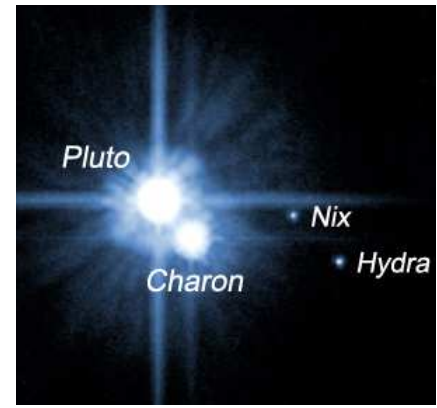
(図7: 土星, HST, NASA)



(図8: 天王星, ボイジャー2号, NASA)



(図9: 海王星, ボイジャー2号, NASA)



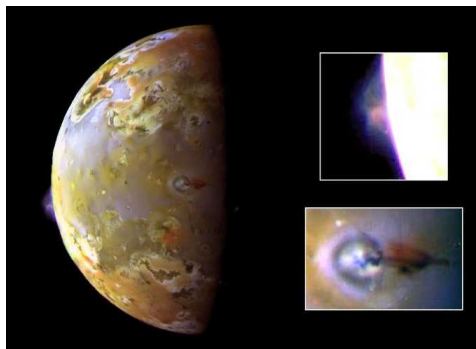
(図10: 冥王星とその衛星, HST, NASA)



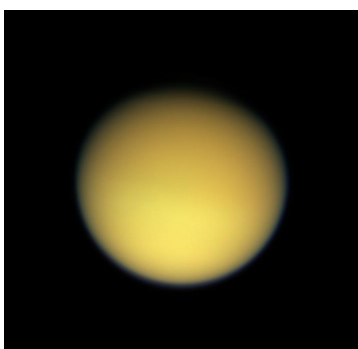
(図12: 満月, 東京大学木曽観測所)



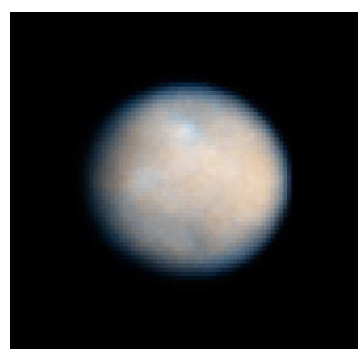
(図13: ガリレオ四衛星[イオ, エウロパ, ガニメデ, カリスト], ガリレオ探査機, NASA)



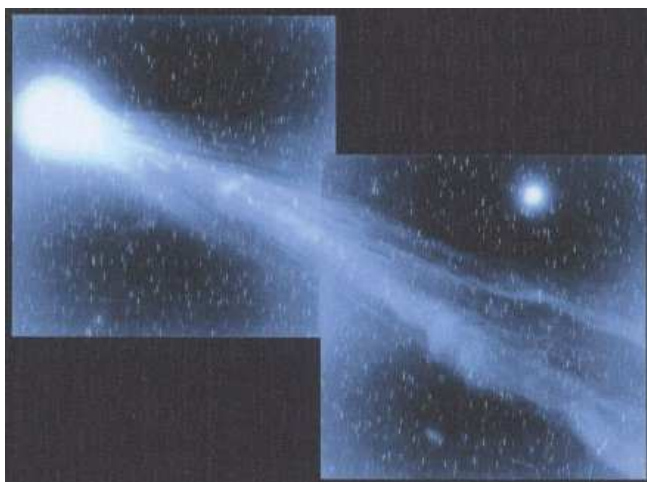
(図14: イオの火山活動, HST, NASA)



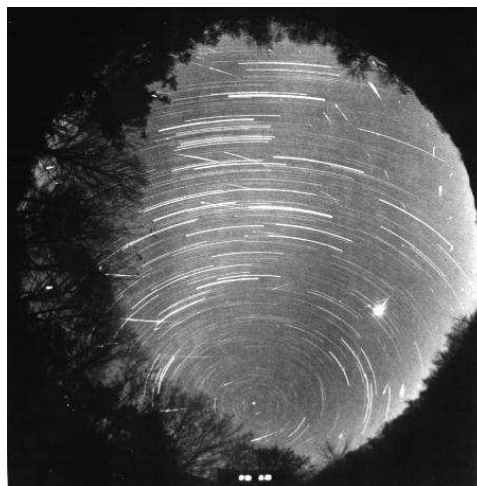
(図15: タイタン, カッシーニ, NASA)



(図16: 小惑星ケレス, HST, NASA)



(図18: 百武彗星, 東大木曾観測所)



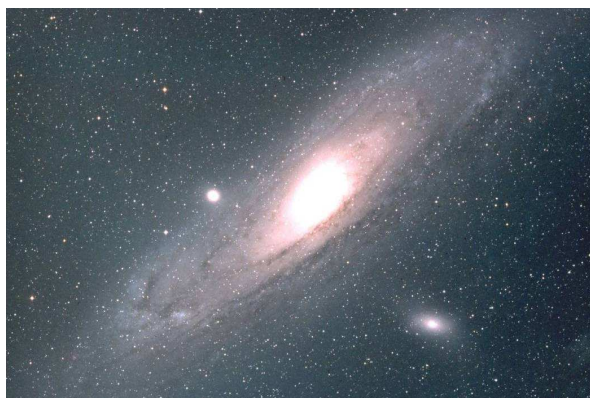
(図19: 2001年のしし座流星群, 東大木曾観測所)



(図20: 太陽, SOHO 衛星, NASA)



(図23: 天の川, 東大木曾観測所)



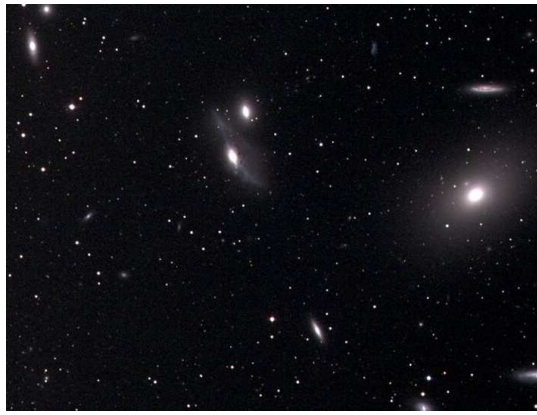
(図24: アンドロメダ銀河, 東大木曾観測所)



(図25: 子連れ銀河M51, 東大木曾観測所)



(図26: 銀河群ステファンの五つ子, 東大木曾観測所)



(図27: おとめ座銀河団, 東大木曾観測所)



(図28: オリオン座馬頭星雲, 東大木曾観測所)



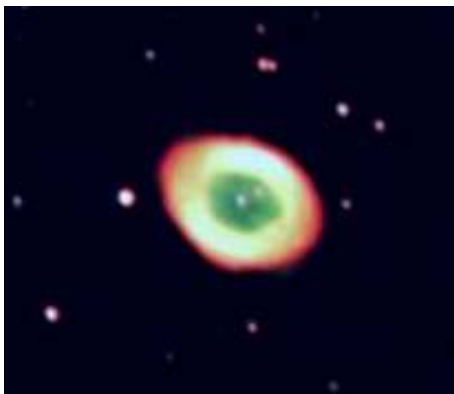
(図29: いて座三裂星雲, 東大木曾観測所)



(図30: おうし座プレアデス星団, 東大木曾観測所)



(図31: ペルセウス座 NGC1342, 東大木曾観測所)



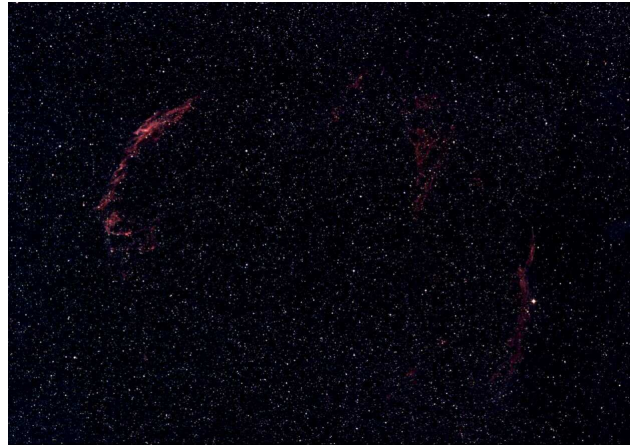
(図32: こと座リング状星雲, 東大木曾観測所)



(図33: こぎつね座三あれい状星雲, 東大木曾観測所)



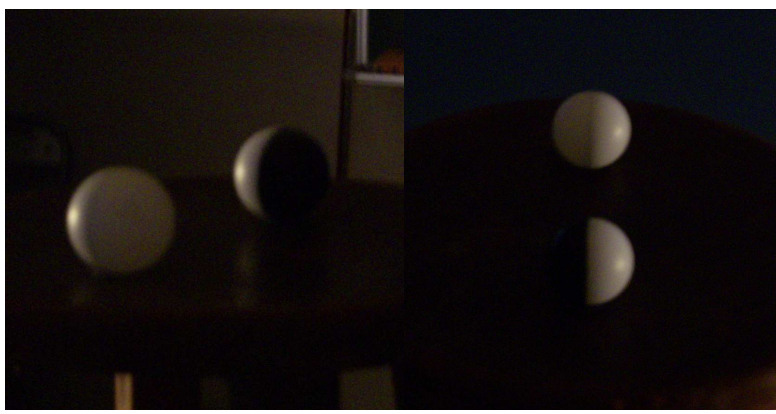
(図34: おうし座かに星雲, 東大木曾観測所)



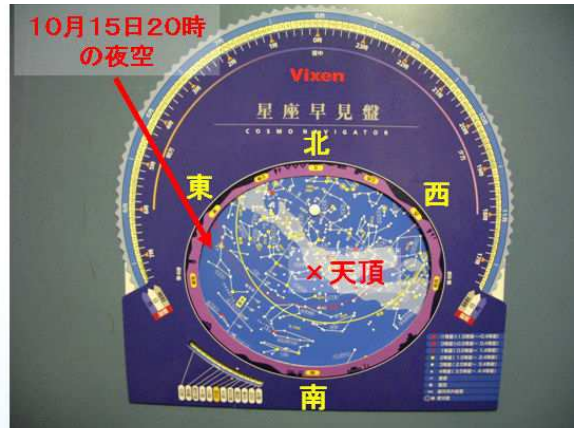
(図35: はくちょう座網状星雲, 東大木曾観測所)



(図37: さそり座M4, 東大木曾観測所)



(図46:ピンポン玉による満ち欠け実験[左]三日月、[右]上限の半月)



(図47: 星座早見盤の使い方)

本テキストを作成する上で、

- ・ 『理科年表平成 19 年版』『理科年表平成 21 年版』(国立天文台編、丸善株式会社)
- ・ 『宇宙が見える星座早見盤』(NPO 法人サイエンス・ステーション, <http://sciencestation.jp>)
- ・ 『新編・銀河鉄道の夜』(宮沢賢治著、新潮社)
- ・ 東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター木曾観測所ホームページ (<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/>)
- ・ アストロアーツ(<http://www.astroarts.co.jp/>)
- ・ NASA ホームページ

を参考にいたしました。

特に NASA および東大木曾観測所ホームページからは多数の画像を引用させていただきました。心から御礼申し上げます。本テキストの執筆・編集・引用については、西浦に全責任があります。

付録 演習

演習 1: 日出・日入の時刻

以下の表 3 は、平成 19 年 6 月 20 日(夏至の頃)の根室、横浜、鹿児島の日出時刻と日入時刻である。三箇所の日出時刻は最大で 1 時間 30 分ほど差があるにもかかわらず、日入時刻は 30 分程度しか差がない。これは何故だろうか？また反対に日入時刻の差に比べて、日入時刻の差の方が大きくなるケースがあるだろうか？あるとすればそれはいつだろうか？説明せよ。

	根室(北海道)	横浜(神奈川)	鹿児島(九州)
6 月 20 日 日出時刻	03 : 37	04 : 26	05 : 13
6 月 20 日 日入時刻	19 : 01	19 : 00	19 : 26

(表3: 各地の日出・日入時刻)

演習 2: 月の高度

日本では冬の満月は南中高度が高く、夏の満月は南中高度が低い。この理由を太陽、地球、月の位置関係と日本の北緯から定性的に説明せよ。

演習 3: ミニチュア太陽系

表 1 を参考にして、太陽・惑星のサイズと惑星間の距離を体感できるようなミニチュアを作成したい。それぞれの天体をどの程度のサイズにして、さらにそれぞれの間の距離をどのくらいに設定するのが現実的か考察せよ。表計算ソフト(MS-Excel, OpenOfficeOrg など)を使うと便利である。

演習 4: 天体の観察時期

8 月(12 月)に、児童にこと座(オリオン座)の一等星ベガ(ベテルギウス)を観察させたい。理科年表と星座早見盤を用いて、8 月(12 月)のどの時期のどの時間帯に観察させるのが適切か考察せよ。なお、日入後の 90 分および日出前の 90 分は薄明であり、観察には向かないことに留意せよ。

演習 5: 宇宙年齢の導出

最新の観測的研究から得られた宇宙年齢は約 137 億年である。今、ハッブル定数が 50km/s/Mpc だった場合、宇宙年齢を導出せよ。ただし、計算を簡単にするために $1\text{Mpc}=3\times 10^{19}\text{km}$ 、 $1\text{年}=3\times 10^7\text{s}$ とする。

日	曜日	東京, 中央標準時			東京, 中央標準時			
		日出	南中	日入	月出	南中	月入	正午月齢
1	土	4h 49m	11h 47m 23s	18h 46m	15h 30m	20h 14m	0h 9m	10.0
2	日	4 49	11 47 19	18 45	16 19	21 5	0 58	11.0
3	月	4 50	11 47 15	18 44	17 3	21 54	1 52	12.0
4	火	4 51	11 47 9	18 43	17 41	22 42	2 49	13.0
5	水	4 52	11 47 4	18 42	18 14	23 27	3 47	14.0
6	木	4 53	11 46 57	18 41	18 43	— —	4 46	15.0 ○
7	金	4 53	11 46 50	18 40	19 10	0 10	5 44	16.0
8	土	4 54	11 46 42	18 39	19 35	0 52	6 42	17.0
9	日	4 55	11 46 34	18 38	20 0	1 33	7 39	18.0
10	月	4 56	11 46 26	18 37	20 26	2 15	8 38	19.0
11	火	4 56	11 46 16	18 36	20 54	2 57	9 38	20.0
12	水	4 57	11 46 6	18 34	21 25	3 42	10 41	21.0
13	木	4 58	11 45 56	18 33	22 3	4 31	11 46	22.0
14	金	4 59	11 45 45	18 32	22 48	5 24	12 53	23.0
15	土	5 0	11 45 33	18 31	23 43	6 22	14 0	24.0
16	日	5 0	11 45 21	18 30	— —	7 23	15 4	25.0
17	月	5 1	11 45 9	18 29	0 48	8 27	16 0	26.0
18	火	5 2	11 44 56	18 27	2 0	9 29	16 49	27.0
19	水	5 3	11 44 42	18 26	3 16	10 29	17 31	28.0
20	木	5 4	11 44 28	18 25	4 31	11 25	18 7	29.0 ●
21	金	5 4	11 44 14	18 24	5 45	12 17	18 39	0.7
22	土	5 5	11 43 59	18 22	6 56	13 8	19 9	1.7
23	日	5 6	11 43 44	18 21	8 5	13 57	19 40	2.7
24	月	5 7	11 43 28	18 20	9 12	14 45	20 11	3.7
25	火	5 7	11 43 12	18 18	10 19	15 35	20 45	4.7
26	水	5 8	11 42 55	18 17	11 23	16 25	21 23	5.7
27	木	5 9	11 42 38	18 16	12 25	17 17	22 5	6.7
28	金	5 10	11 42 20	18 14	13 23	18 8	22 53	7.7
29	土	5 10	11 42 3	18 13	14 15	19 0	23 45	8.7
30	日	5 11	11 41 44	18 12	15 1	19 50	— —	9.7
31	月	5 12	11 41 26	18 10	15 41	20 38	0 41	10.7

(表4:平成21年8月の太陽・月の暦, 平成 21 年理科年表[丸善]より抜粋)

日	曜日	東京, 中央標準時			東京, 中央標準時			
		日出	南中	日入	月出	南中	月入	正午月齢
1	火	6h 32m	11h 29m 59s	16h 28m	15h 17m	22h 45m	5h 9m	14.3
2	水	6 33	11 30 21	16 28	16 10	23 46	6 18	15.3 ○
3	木	6 34	11 30 44	16 28	17 13	— —	7 24	16.3
4	金	6 34	11 31 8	16 28	18 22	0 50	8 25	17.3
5	土	6 35	11 31 32	16 28	19 35	1 53	9 16	18.3
6	日	6 36	11 31 57	16 28	20 48	2 52	10 0	19.3
7	月	6 37	11 32 23	16 28	21 59	3 48	10 37	20.3
8	火	6 38	11 32 49	16 28	23 7	4 39	11 10	21.3
9	水	6 39	11 33 15	16 28	— —	5 28	11 39	22.3
10	木	6 39	11 33 42	16 28	0 13	6 15	12 9	23.3
11	金	6 40	11 34 10	16 28	1 18	7 2	12 38	24.3
12	土	6 41	11 34 37	16 28	2 23	7 50	13 10	25.3
13	日	6 42	11 35 6	16 28	3 27	8 39	13 46	26.3
14	月	6 42	11 35 34	16 29	4 31	9 30	14 26	27.3
15	火	6 43	11 36 3	16 29	5 32	10 23	15 12	28.3
16	水	6 44	11 36 32	16 29	6 28	11 16	16 3	29.3 ●
17	木	6 44	11 37 1	16 30	7 19	12 8	16 58	0.6
18	金	6 45	11 37 31	16 30	8 3	12 58	17 56	1.6
19	土	6 45	11 38 0	16 31	8 41	13 45	18 55	2.6
20	日	6 46	11 38 30	16 31	9 14	14 30	19 52	3.6
21	月	6 47	11 39 0	16 31	9 43	15 13	20 49	4.6
22	火	6 47	11 39 30	16 32	10 9	15 54	21 46	5.6
23	水	6 48	11 40 0	16 32	10 34	16 34	22 42	6.6
24	木	6 48	11 40 30	16 33	10 59	17 15	23 39	7.6
25	金	6 48	11 41 0	16 34	11 25	17 57	— —	8.6
26	土	6 49	11 41 29	16 34	11 54	18 42	0 38	9.6
27	日	6 49	11 41 59	16 35	12 26	19 32	1 40	10.6
28	月	6 50	11 42 28	16 35	13 5	20 26	2 46	11.6
29	火	6 50	11 42 57	16 36	13 53	21 25	3 54	12.6
30	水	6 50	11 43 26	16 37	14 50	22 28	5 2	13.6
31	木	6 50	11 43 55	16 38	15 57	23 33	6 6	14.6

(表5:平成21年12月の太陽・月の暦, 平成 21 年理科年表[丸善]より抜粋)