

月食

-天体の食ってなんだろう-

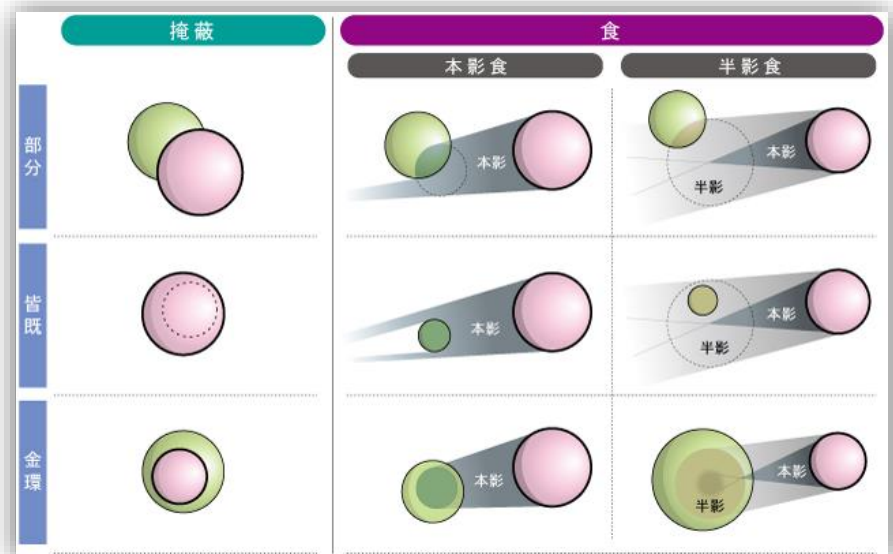
(2021 年作成)

金沢星の会
長 兼弘
kanehiro osa

【食と言うのは、天体が姿を消すように見える現象です。】

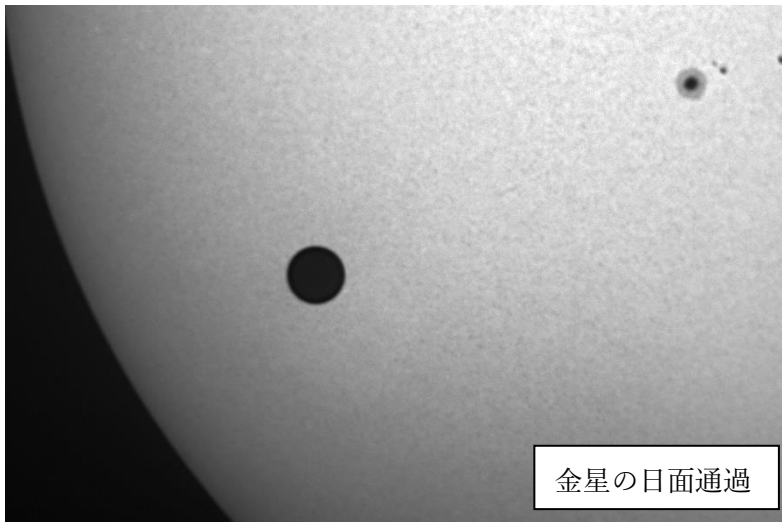
今年(ことし)は5月26日に皆既月食(がいぎげつしよく)と11月19日に部分月食(ぶぶんげつしよく)が見られます。食とは天体(てんたい)が後ろ(うしろ)の他の天体(てんたい)を隠(かく)す現象(げんしょう)で、まるで食べる(た)るように見えることから食(しょく)と呼ん(よ)でいます。

月(つき)に隠(かく)される星(ほし)、月(つき)が太陽(たいよう)を隠(かく)す日食(にっしよく)がよく知(し)られています。ほかにも惑星(わくせい)や小惑星(しょうわくせい)が星(ほし)を隠(かく)すときや星(ほし)が他の星(ほし)を隠(かく)す、ガス(ガス)が星(ほし)を隠(かく)すこともあります。探査衛星(たんささいせい)が多く打ち上(う)げられるようになり地球(ちきゅう)が太陽(たいよう)を隠(かく)すのも捉(とら)えられるようになりました。最(も)も知(し)られている食(しょく)は、日食(にっしよく)と月食(げつしよく)です。それぞれ部分的(ぶぶんてき)に隠(かく)れて見える部分食(ぶぶんしょく)と完全(かんぜん)に隠(かく)れる皆既食(がいぎしょく)があります。でも月食(げつしよく)は地球(ちきゅう)の影(かげ)に入(はい)ることで起(お)こる現象(げんしょう)です。同じ(おな)ように惑星(わくせい)の衛星(えいせい)が惑星(わくせい)本体(ほんたい)の影(かげ)に入(はい)ることや衛星(えいせい)の影(かげ)に衛星(えいせい)が入(はい)ることがあります。



たとえば、地球(ちきゅう)と太陽(たいよう)の間に惑星(わくせい)の水星(すいせい)や金星(きんせい)が通過(つうか)するのは日面通過(にちめんつうか)と呼ん(よ)でいます。(下画像(したがぞう):金星(きんせい)の日面通過(にちめんつうか)(左)と金環日食(きんかんにっしよく)(右))もちろん惑星(わくせい)は小さいので通過(つうか)するように見えるのですが、月(つき)が通過(つうか)するときに地球(ちきゅう)より十分(じゅうぶん)に離(はな)れていると太陽面(たいようめん)を完全(かんぜん)に隠(かく)さず金環日食(きんかんにっしよく)になります。金環食(きんかんとく)も日面通過(にちめんつうか)と同じです。惑星(わくせい)が通過(つうか)する日面通過(にちめんつうか)も金環日食(きんかんにっしよく)とも言えるわけですが区別(くべつ)して

呼(よ)びます。影(えんべい)による食(しょく)と天体(てんたい)自体(みづか)が隠(かく)す掩蔽(えんぺい)に分(くわ)けて言葉(ことば)として区(く)分(ぶん)していますが、食(しょく)には変(か)わりないので

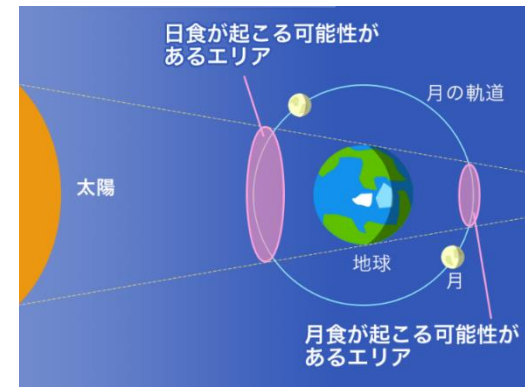


金星の日面通過



金環日食

遠(とお)くにある太陽(たいよう)と同じ(おな)ように輝(かがや)いている星(ほし)を恒星(こうせい)と言(い)いますが、恒星(こうせい)が噴(ふ)き出(だ)したガス(ガス)で恒星(こうせい)の明(あか)るさが変(か)わることや惑星(わくせい)が恒星(こうせい)の明(あか)るさを暗(く)くするように見(み)られます。最近(さいきん)のことでは、オリオン座(おりのざ)のベテルギウス(べてるぎうす)と言う星(ほし)は自分(みづか)が噴(ふ)出したガス(ガス)で暗(く)くなりました。食変光星(しょくへんこうせい)は恒星(こうせい)にある惑星(わくせい)によって起(お)こる減光(げんこう)です。重(じゅう)力(りき)レンズ(レンズ)として捉(とら)えられる現象(げんしょう)も強(つよ)い力(りき)を持(も)つ天体(てんたい)が後(うしろ)にある天体(てんたい)の光(ひかり)を曲(ま)げて起(お)こるので、これ(こ)も食(しょく)と言(い)えるのです。実(じつ)は日(ひ)の入(い)り、日(ひ)の出(で)も地球(ちきゅう)による食(しょく)なのです。人工衛星(じんこうえいせい)が地球(ちきゅう)の影(かげ)に入(はい)る現象(げんしょう)も見(み)られ、太陽(たいよう)や月(つき)の前(まえ)を人工衛星(じんこうえいせい)が通過(つうか)するの(の)も見(み)られます。



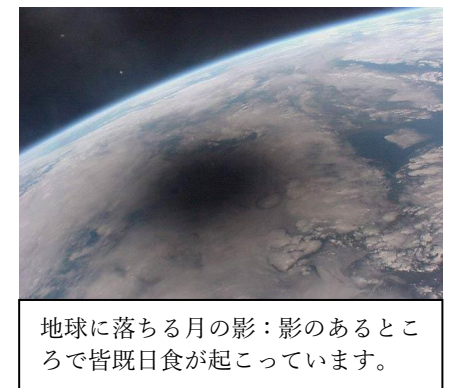
距離(きょり)は近(き)くありません。もっ(も)と細(こ)長い中(なか)で一直線(いちじくせん)の上(う)で起(お)こります。26 日の月食(げつしよく)は半影食(はんえいしょく)中に月(つき)が昇(のぼ)ってきます。月食(げつしよく)が地球(ちきゅう)の影(かげ)に入(はい)ることはわ(わ)かったと思(おも)います。では、そも(そも)も地球(ちきゅう)の影(かげ)はどれ(どれ)ほどの長(なが)さがあ(あ)って月(つき)に届(と)くのでし(ので)ょうか？

太陽(たいよう)から地球(ちきゅう)ま(ま)での距離(きょり)は平均(へいきん)で 149600000 km です。

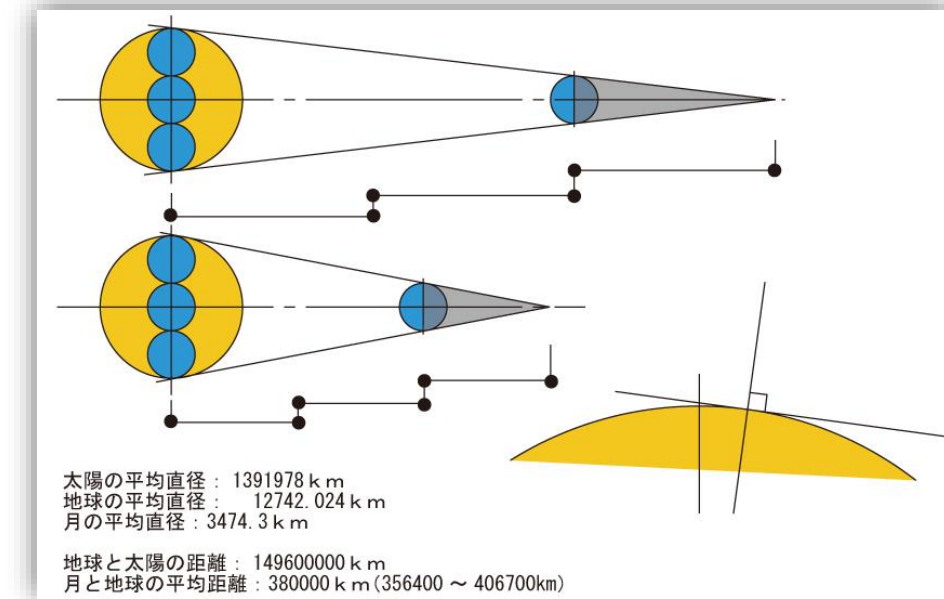
地球(ちきゅう)から月(つき)ま(ま)での平均(へいきん)距離(きょり)は 380000 km(356000~107000 km) です。

太陽(たいよう)の平均(へいきん)直径(ていけつ)は 1391978 km です。

地球(ちきゅう)の平均(へいきん)直径(ていけつ)は 12742.024 km です。



地球(ちきゅう)に落ち(お)る月(つき)の影(かげ): 影(かげ)のあるところ(ところ)で皆既日食(がいぎにっしよく)が起(お)こっています。



地球(ちきゅう)の影(かげ)(本影(ほんえい))の長(なが)さは本影(ほんえい)が細(こ)長い円(まる)すい形(かたち)で、その長(なが)さは太陽(たいよう)と地球(ちきゅう)の大きさ(おほきさ)の比(ひ)を距離(きょり)で割(わ)れば解(と)けます。

$$1391978 \text{ km} \div 12745.024 \text{ km} = 109.2430841$$

地球(ちきゅう)の影(かげ)の長(なが)さは、

$$149600000 \text{ km} \div 109.2430841 = 1369423.073 \text{ km} \text{ になります。}$$

月までの距離(公転半径)は 356400 km~406700 kmと変動しますので、一番月が大きく見える近い場合は、1369423.073 km/356000 km=3.846694025 ですので、約1/4 のところを通過することになります。地球の平均直径が 12742.024 kmを月の平均直径 3474.3 kmで割ると 3.667508275 と近い値 になります。



※地球と月の間に地球を並べるとこんな感じです。

月も公転軌道は楕円運動で地球の公転軌道に対して約 5.1 度 傾 いています。月の公転軌道面は約 18.6 年の周期で公転運動とは逆の方向に回転していると言う複雑な動きになっているのです。月の公転周期は約27.32日です。しかし、地球も太陽を公転していますので、月の満ち欠けは約29.5 日となります。月は綺麗な運動を行っていません。常にふらついています。そのため月のいつも見えているところより少し裏側が見られます。このふらつきを秤動(※)と言います。月に限った運動ではありません。質量を持った天体では起こる現象です。それは全に重力の影響を受けているからです。太陽も例外ではないのです。ただ周期が測定できないほど長いか測定する基準がつかめないだけです。

※https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Lunar_libration_with_phase2.gif

月は内部の不均一性や各種の運動から公転周期が長くなっています。地球と重力バランスを保ちながら衛星として公転していますが、その崩れにより年間で約 38 mm離れています。しかし、これも一定ではありません。地球の内部の運動に月の重力が影響して振動しているのです。おまけに昔の月は地球に近かったのです。地球の振動が月との距離に関係しています。この月の後退については現在も研究が続けられています。年間 208 mmで移動を開始し、楕円運動していることからその後は 0.13~278 mmの間で変動しています。それは月面に設置した反射板を利用して計測されています。※最近では反射板に付着した砂埃で少々反射度が低下しています。

月が少しずつ離れると言うことは、地球にかかる引力も弱まることになります。その分、重力バランスの支点も月寄りに移動します。全体の地球圏の体積が大きくなり質量は下がります。結果的に地球の公転は早くなり太陽に近づくことになりますが、月は逆に地球の公転軌道上に留まることになると考えられています。しかし、現実的には太陽の膨張の方が遥かに早く訪れるでしょう。

ここまで説明していると偶然が重なって月食が起こっていると思われます。しかし、よくよく考えてみると偶然なのは「運動の途中」に遭遇しているだけだと言えます。重力のバランスが保てている時間は宇宙の時間から見れば一瞬に過ぎないのです。むしろ天体が対比するバランスや運動の過程をみれば必然的に起こっている現象だとわかります。

月がどのように誕生したのかは未だ解明されていませんが、地球から分離したにせよ地球に接近し

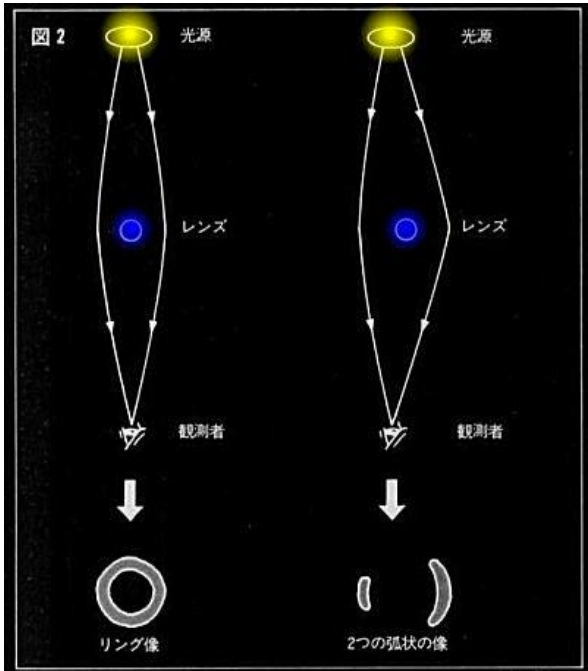
て捉えられたにせよバランスが取れていなければ地球との相互回転は起こらなかった訳です。

【月食を観察することで、何が判るのか？】

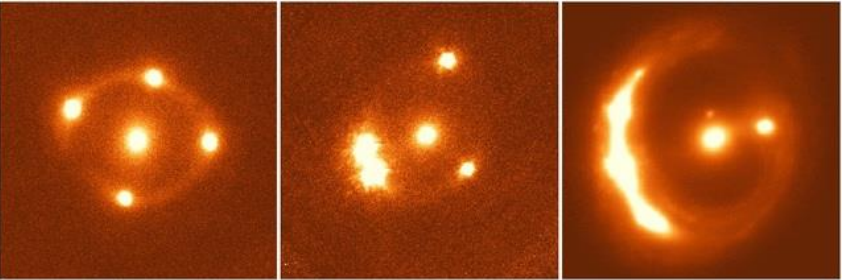
現在の地球環境を調べる手掛かりになります。月は太陽の光を反射して輝いています。反射しているという事は、月の表面で吸収されなかった光の事です。草や木の葉が緑色なのは太陽光から成長に必要な赤外線と紫外線を吸収して不必要な緑線を反射しているからです。これと同じ考えで、半影食と皆既食の色調から月の本来持っているスペクトルを引き算すると地球大気の変動が判ります。本影に混じるものに地球大気物質吸収された太陽光が判るからです。また散光している範囲を調べることで地球緯度での汚れの分布も判明します。

月面の部分輝度を調べることで、月の地質の光の吸収度がわかります。物質の表面の粗さや組成、粒子の質も調べられます。隕石の衝突で出来たクレーターと月の内部から噴出した火山性のクレーターでは異なったスペクトルが検出されます。普段より月食の方が検出には有利になるのです。

他の現象として月が暗くなることを利用して、多くの恒星食によって月の運動や表面形状(山・谷)も計測できます。そして、月食時間内では恒星は近いものでもほとんど平行光として捉えられますので、時間経過から地球のふらつきも計測できます。それは計測している時間内には地球の自転・公転のそれぞれの離角が絶えず変化しているので、詳細な位置計測が可能なのです。月も公転に自転・秤動角(歳差)と太陽を基準とした運動が重なるので詳細な動きが捉えられます。



現代の天体観測では、重力の強い天体が後方にある天体の光を曲げる現象「重力レンズ」を利用して、相互の質量を計測が行われています。宇宙の誕生時に迫る遠くの天体の観測です。レンズと言うだけに運動も拡大して観察されます。非常に遠くにあるのですが、予想していたより運動は早いことが判っています。



言い換えれば新しい望遠鏡を手に入れた訳です。地球

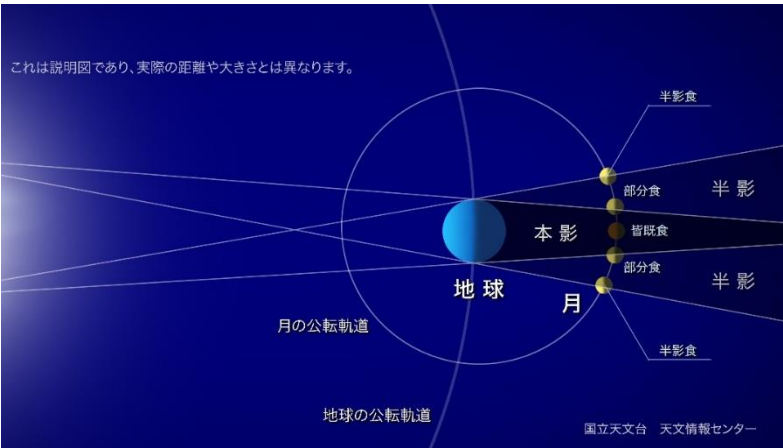
に大きな望遠鏡を設置して観測してもその性能には限界があるのですが、重力レンズを観察することで、望遠鏡の性能以上の遠くの天体が調べられるのです。原理は左の図に示した通りで写真は右、レンズと示しているのが重力の強い天体です。これも食を利用していることがお分かりでしょう。恒星による重力レンズ効果は重力マイクロレンズ現象と呼んでいます。アインシュタインの一般相対性理論の実証実験として 1919 年 5 月 29 日に起こった皆既日食では、太陽に非常に近くに見える恒星の位置計測で太

陽重力によって空間が曲がって見える現象をとらえました。また重力マイクロレンズ現象では光源星の光を集光されることで増光現象が観測されます。2017 年 11 月 1 日に日本のアマチュアによっても偶然ですが観測されました。これにより重力レンズを引き起こした恒星のまわりに惑星が存在することが明らかになりました。※kojima-1



ここで月食に話を戻します。月食は地球の影を撮影する絶好のチャンスです。皆既月食なら影の全体を捉えることが出来ます。半影食から出来る限り周辺を多く撮影すると左に示した画像が得られます。全天から見れば狭い範囲であることが判ります。しかし、月の後方に地球の影はまだ3倍以上も伸びている訳です。もし仮にその影の中に小天体があっても暗くて見つからない可能性があるのです。

地球と月の運動速度差に一致した後方の天体は地球に近づいてきても見えません。そして月食に入るところに月の西側に突然現れる訳です。その後、月の裏側に隠れ月に接近します。月の引力で月の東側から地球に向かうことになります。その天体の大きさは小さければ地球の大気に入ったところで、大気摩擦で分解しますが、10m もの大きさになると分解したところでも大変危険な物です。100m もあれば街の一つが消滅する大惨事になります。だいたいですが数世紀に一度の落下があります。半影の中に小天体が隠れていないかも観察対象になります。運悪く直径が 10 kmの天体が潜んでいたら地球規模の大惨事になりますが、10 kmもあれば月食になるより前に見つけれられます。微妙なのは 100m前後の天体になります。そのような天体を見つける観測も行われます。もちろん皆既月食中に月食ではなく周辺を撮影するのです。暗い天体を観察する絶好のチャンスでもあるのです。でも何も無いことが一番の成果となります。



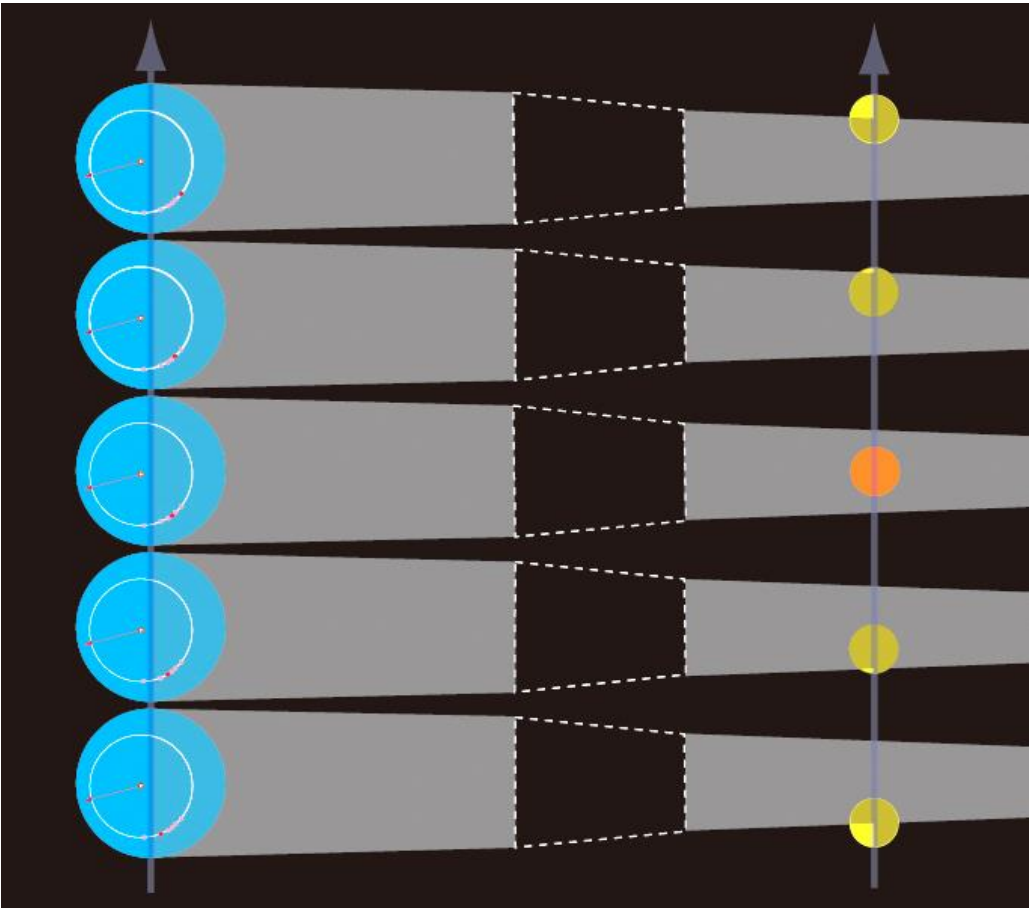
について述べられていますが、それだけでは足りません。軌道の図そのものが小さな円で描かれているところ。それによって月の公転速度が非常に速い図になっているのです。国立天文台でもしかたなく使っているのでしょう。

この図は月食を説明するのに良く使われるものですが、どこかおかしいです。解りますか？

この図が本当なら夕方に半影食が見られるころの月齢は 11 ぐらいです。終わるころには月齢が 19 ぐらいになっています。そして月食時間が 4 時間ほど続く現象になっています。注 釈 が左上にあります。距離や大きさ

月の公転は平均軌道速度で 1023m/s ですが地球を一周するのに約 27.3 日かかります。その間に地球も太陽の周りを 29790m/s で一年かけて回ります。地球の自転速度は赤道で 464m/s で一日かけて回転しています。音の速度を表すマッハでは地球の自転はマッハ 1.4、月の公転はマッハ 3、地球の公転はマッハ 89 です。おまけに太陽も天の川銀河の中心に対して 220000m/s のマッハ 641 で動いているのです。

図を出来る限り正確に描いてみました。



5 月 26 日は夏至の一月ほど前になります。図は地球の北極側から見たものです。

地球の公転方向を示す矢印、月の地球に対する公転は太陽に対しての公転が含まれています。

点線で描かれたところは本来延長される部分を短く表現しています。

地球は青色に示しています。白色の円は日本の緯度を表しています。地軸は 23.4 度傾いていますので、青色の地

球円の中央から外れた位置に軸があります。

- ・軸から矢印で示しているのは夏至にあたる方向です。
- ・赤丸が月食を見ている位置を示しています。

皆既が南中に見えるのはハワイ島辺りになるわけです。日付変更線で起こっていると考えたとハワイ島では 0 時 20 分になります。過去を観察しているように感じますが、実際に月の距離を考えると光でも 1.3 秒かかりますので、やはり過去の現象を見ているのです。宇宙はタイムマシンですね。

(作成者の思い：この解説書は子供さんが自分で調べ学べることと大人の人も勉強になるように作っています。ネット社会では直ぐに検索して納得してしまうことが多いものです。しかし、複数のページを読まねば正しい情報は見つかりません。また、適当な解説が多いものです。そのことをふまえて数値や用語を多く取り入れました。天文学は空間を想像することが大切なのです。)