

新・惑星



50のなぜ



ISEE
宇宙地球環境研究所
Institute for Space-Earth Environmental Research

名古屋大学宇宙地球環境研究所
Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE)

<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/>





近年の惑星科学と、その関連分野の進展は、目覚ましいものがあります。太陽系の惑星をはじめ、衛星、小惑星や彗星などの小天体には様々な探査機が送り込まれ、詳細なデータが取得され、それらの姿が明らかになって来ました。一方、海王星の外側では、太陽系外縁天体が次々と発見され、太陽系の中の新たな世界が明らかになりつつあります。太陽系の外に目を移すと、太陽以外の星を回る太陽系外惑星が多数発見され、はるか遠方の惑星系の姿が見えて来ました。さらに、アルマ望遠鏡などによる原始惑星系円盤の観測は、惑星誕生の現場がどのようなものかを明らかにしつつあります。こうした進展に伴い、従来限られた情報から推測していた惑星形成や地球外生命に関する研究も大きく進展しました。

本書では、こうした新たにわかって来た惑星たちの姿や、今後期待される進展を中心に、惑星科学が切り開きつつある世界を紹介することにいたしました。中高生から一般の方まで、多くの方に惑星に興味を持っていただければ、と思っております。

も く じ

太陽系の惑星

1.	惑星って何？.....	1
2.	誰が見つけた？太陽系の惑星.....	2
3.	組曲「惑星」？.....	3
4.	惑星は酔っ払い運転？.....	4
5.	惑星の交通事故？.....	5
6.	天体を引き裂く力？.....	6
7.	なぜ月は、地球に片側しか向けない？.....	7
8.	太陽系ってオーケストラ？惑星たちの奏でるハーモニー.....	8
9.	惑星は何でできている？.....	10
10.	宇宙でも金鉱探し？.....	11
11.	水惑星って何？.....	12
12.	月にも水がある？.....	13
13.	太陽系遺産ツアー？.....	14
14.	まさか！宇宙でも検疫？.....	16
15.	太陽系第9惑星？.....	17
16.	太陽系の果て？.....	18
17.	地球外生命の探査機？.....	20
18.	どうしてわかった？太陽系の年齢.....	22
19.	暗い太陽のパラドックス？.....	23
20.	太陽系の最後？.....	24

太陽系外惑星

21.	太陽系外惑星？見つけてどうする？.....	25
22.	どこに隠れた？惑星たち.....	27
23.	隠れても無駄だ！そこに居ることぐらいわかる.....	28
24.	重力レンズで惑星を見る？.....	29
25.	巨大惑星の丸焼き？.....	30
26.	太陽系の常識は宇宙の非常識？.....	31

27. 地球の兄貴分？.....	32
28. 小さな赤い太陽？.....	33
29. 惑星ははだか？大気をまとっている？.....	34
30. 太陽系外惑星のオーロラ活動？.....	35
31. 銀河系遺産ツアー？.....	36

惑星の誕生

32. 300 年来の論争、そして「標準モデル」.....	37
33. 塵も積もれば惑星に？.....	38
34. 惑星が引っ越す？.....	39
35. 太陽系でもあった！惑星の引っ越し.....	40
36. 塵が積もると落下する？.....	41
37. 不釣り合いに大きな月はどうやってできた？.....	42
38. 大気はどこからやって来た？.....	43
39. 水はどこからやってきた？.....	44
40. 「惑星のゆりかご」の観測.....	45

地球外生命

41. 永遠のネタ？それとも・・・？.....	46
42. どこに居そう？地球外生命.....	47
43. 火星や氷衛星？.....	48
44. 暑い寒いは何で決まっている？.....	49
45. 気候は安定？それとも暴走する？.....	50
46. ハビタブルゾーンって何？.....	51
47. 「永遠のたそがれ」に地球外生命？.....	52
48. 「お隣さん」まで 4.2 光年？.....	53
49. 地球外生命との通信？.....	54
50. 宇宙のロゼッタストーン？.....	55
51. 我々の先祖はどこで生まれた？.....	56
52. 地球外生命？居るわけないだろう！.....	57
53. これが地球外生命の証拠だ！.....	58

1. 惑星って何？

夜空には、数多くの輝く星があります。それらの多くは、太陽と同じ様にその表面が非常に高い温度で、そのために自ら光を発しています。こうした星を、恒星と呼んでいます。恒星は、非常に大きく重い星です。太陽は恒星の一つで、地球の30万倍もの質量があります。そして、その中心部では核融合反応という水素の様な軽い元素同士がくっついて重い元素に変わる反応が起きており、それによって多くの熱を発生して輝いています。

恒星は、太陽以外は非常に遠くにあり、地球から見るとその動きはほとんどわかりません。一番近い恒星でも4光年以上先にあります。夜空の星の並びには、神話や身近な事物になぞらえて名前が付けられていて、星座と呼ばれています。オリオン座や、おおぐま座、こぐま座、やぎ座などです。これらの星座は、地球が動いているために、東の空から上って西に沈み、季節によって見えたり見えなかったりします。しかし、お互いの位置関係は変わりません。

一方、惑星は太陽や他の恒星の周りをまわる小さな星です。自分では、核融合反応による熱を発生することができず、表面は恒星ほど熱くありません。このため、自分で光も発することができず、太陽などの光を反射して光って見えます。地球も惑星の一つで、太陽の周りをまわっています。地球には、太陽の周りをまわる兄弟の惑星が7つあります。地球を合わせた8つの惑星と、月の様に惑星の周りをまわる衛星、太陽の周りをまわる惑星より小さな小惑星などの星があることもわかっていて、これらを合わせて太陽系と呼んでいます。太陽系の惑星は、内側から水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星の8つです。地球から見ると、惑星は恒星たちの間を動いている様に見えます。



2. 誰が見つけた？太陽系の惑星

太陽系の惑星は、いつごろから知られているのでしょうか？地球以外の7つの惑星のうち水星、金星、火星、木星、土星の5つは地球から見て非常に明るく、望遠鏡を使わなくても見ることができます。歴史的な記録が残っている数千年前よりはるか以前から、人類はその存在に気付いていたと考えられています。

17世紀になると、望遠鏡が発明され、星の観測に利用される様になりました。望遠鏡を使うと、肉眼では見えない様な暗い星まで見える様になります。また、肉眼では恒星も惑星も点にしか見えませんが、望遠鏡で見ると惑星は円盤または三日月の様に見えます。ウィリアム・ハーシェルは、宇宙の構造を調べるために広大な星空の星を数え、星雲のカatalog（表）を作ったイギリスの天文学者です。1781年、ハーシェルはこうした観測の最中、偶然視野に入ってきた青緑色の円盤状の星を発見しました。明るさは、肉眼でぎりぎり見えるか見えないかくらいの暗い星です。これが天王星です。天王星は、望遠鏡によってはじめて見る事が可能となった「発見された惑星」第1号です。

発見後、望遠鏡による観測が行われ、天王星の通り道（軌道）が詳細に調べられました。ところが、ニュートン力学による天王星の予想位置と実際の観測位置には、ずれがあることがわかりました。そこで、このずれは未知の惑星の引力で軌道が乱されたためと考え、この未知の惑星の軌道を求める計算が行われました。この計算は、2人の科学者（フランスのルベリエとイギリスのアダムス）が独立に答えを出し、それに基づいて1846年に新惑星が発見されました。これが海王星です。こうした事情から、海王星は「予言された惑星」と言われています。



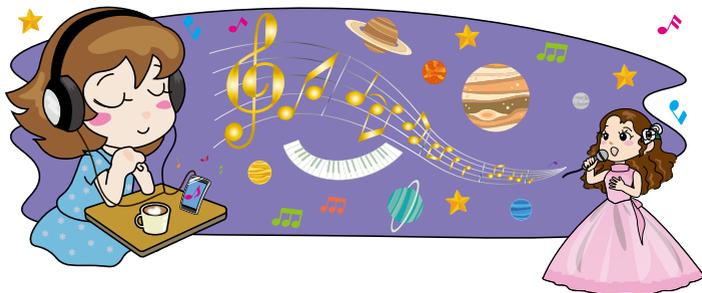
3. 組曲「惑星」？

惑星と言えば、音楽好きの方の中にはホルスト作曲の組曲「惑星」を思い浮かべる方もいるでしょう。ご存じない方も、実際に「木星」や「火星」などを聞くと、きっと「あれか」と思うくらい有名な曲で、聞く機会も多いと思います。「木星」は、いかにも巨大惑星木星または大神ゼウスを連想させる雄大な雰囲気曲です。歌詞をつけて歌っている歌手もいるので、おなじみの方も多いでしょう。「火星」は、今にも火星が現れそうな、あるいは戦争の神アレスによって争いごとが起きそうな、不気味な雰囲気曲です。

この作品は、水星、金星、火星、木星、土星、天王星、海王星の7曲からなっています。地球は入っていません。作曲されたのは、意外にも新しく20世紀の初めです。冥王星発見以前だったために、当初は「冥王星」が入っていませんでした。その後、冥王星が発見され、一時冥王星を追加したCDなどが販売された様ですが、21世紀に入って国際天文連合が、冥王星を惑星の定義から外したことに伴い、その後は従来通りの7曲の構成になっています。

さて、では音楽としてはどうでしょうか？私自身は、音楽が趣味というほどではありませんが、惑星という名前にひかれて買って楽しんでます。先に述べた木星や火星などは、特に気に入っています。名曲と言えるでしょう。一人で、あるいは友達や家族と一緒に聴きながら、雄大な宇宙に思いをはせてみてはいかがでしょうか？

将来、「太陽系外惑星」という曲ができれば、真っ先に購入したいと思います。作曲家の方、ぜひお願いします。



4. 惑星は酔っ払い運転？

惑星は「惑う星」という意味です。確かに、星座の星を背景に東に行ったり、西に行ったりしている様に見えます。昔は、遊星という呼び方もありました。では、惑星は酔っ払いの様にふらふらと動いているのでしょうか？実は、太陽系の惑星は、とても規則正しく太陽の周りをまわっています。あっちに行ったりこっちに行ったりしている様に見えるのは、あくまで地球から見てのことです。では、どんなふう動いているのでしょうか？

惑星の軌道は円に近い楕円で、太陽に近いところでは速く、遠いところではゆっくりとまわっています。地球の場合、2月には太陽に近く、8月には太陽から遠くなります。しかし、その違いはわずかです。そして、各惑星の軌道はほぼ同じ平面内に収まっています。また、惑星のまわる向きはすべて同じで、逆行する惑星はありません。内側の惑星は速く、外側の惑星はゆっくりとまわっています。このため、時々内側の惑星が外側の惑星を追い越します。地球から見ると、時々惑星が逆行している様に見えるのは、このためです。

また、惑星の軌道は適当な間隔で並んでいます。惑星の軌道の間隔は、内側ほど狭く外側では開いていますが、大まかに言って、同じくらいの比率になっています。そして、一番内側の水星の軌道は太陽地球間の距離（1天文単位と言います）の0.39倍、一番外側の海王星は、だいたい30倍です。そして、互いの軌道が交差し、異常に接近することはありません。異常接近が起きると惑星同士が互いに軌道を乱しあってしまい、大きく軌道が変化します。このため、惑星の一方が太陽に落下するかもしれませんし、太陽系を放り出されて宇宙のかなたに行ってしまう可能性もあります。しかし、これまでの計算によれば、太陽の寿命が実質的に尽きてしまうまでの間、そうしたことは起きないということがわかっています。

5. 惑星の交通事故？

人間社会では、毎日の様に交通事故がニュースになります。太陽の周りをまわっている惑星の世界では、衝突事故は起きるのでしょうか？

お行儀よくまわっている惑星同士は、互いに衝突することはありません。しかし、太陽系には惑星以外にも小惑星や彗星などの小天体が多数まわっています。これらは、惑星と違って大きくつぶれた楕円軌道のもの、軌道面が大きく傾いたもの、さらには逆行するものも見つかっています。そして、中には惑星の軌道と交差するものもあります。このため、こうした小天体が惑星に衝突する「事故」も、起きています。

1994年には、シューメーカー・レビー第9彗星が木星に衝突して大爆発が起こり、巨大な火柱が立ち上るのが遠く離れた地球からも観測されました。地球でも、6,600万年前にユカタン半島に小惑星が衝突しました。この「チクシュループ隕石」によって、カリブ海沿岸には高さ約300mの大津波が押し寄せ、世界中に飛び散った火の粉で地上の植生の多くが失われました。さらに、その後起きた気候変動によって、恐竜が絶滅したとされています。最近では、2013年にロシア・チェリャビリンスクに隕石が落下しました。この隕石は、上空で大爆発を起こし、その衝撃で建物に多くの被害をもたらし、割れたガラスなどで多数の人が負傷しました。日本では、2018年9月に愛知県小牧市に隕石が落下し、民家の屋根を突き破りました。けが人が居なかったのは、不幸中の幸いでした。

こうした危険な小天体を事前に発見するための観測が、世界各国の天文台で行われています。将来は、あらかじめ小天体の軌道を変えることにより、衝突を避けることができるようになるかもしれません。太陽系も交通整理が必要ですね。



6. 天体を引き裂く力？

潮の満ち引きは、月の潮汐力によって起きると言われています。これは、どんな力でしょうか？「それって、万有引力のことでしょう。」と言う方もいるかもしれません。しかし、万有引力は「引く力」です。海水が月の方に引かれて満潮になるのはわかりますが、実際には月と反対側も満潮になります。しかも、地球に及ぼす万有引力は、月より太陽の方がずっと大きいので、万有引力が原因ならば、正午頃に満潮になるはずですが。

実は、月の公転に伴って、地球も月と地球の重心の周りをまわっています。この公転による遠心力と月の引力は、地球全体ではちょうど釣り合っています。一方、月の引力の強さは場所によります。月に近い側では引力は強く、遠い側では弱くなります。そのため、地球には月の側では月の引力が勝り月の方向へ、反対側では遠心力が勝って月の反対方向へと引き裂く様な力が働きます。これが、潮汐力です。引力は引っ張る力、潮汐力は引き裂く力です。

月の様に地球からの距離が近いと、距離による引力の変化率が大きくなって、潮汐力が強く働きます。しかし、太陽の様に距離が遠くなると、近い側も遠い側も引力はあまり違わなくなるので、潮汐力は弱くなります。万有引力が距離の2乗に反比例するのに対して、潮汐力は距離の3乗に反比例します。このため、地球に及ぼす引力は太陽の方が大きいにもかかわらず、潮の満ち引きは主として月の潮汐力で起こります。

こうした潮汐力は、惑星や衛星の変形を引き起こし、潮の満ち引き以外にも様々な影響があります。天体にはたらく潮汐力が、非常に大きくなると、その天体は引き裂かれてばらばらになってしまいます。あの土星の環も、衛星またはほかの小天体が土星の潮汐力でばらばらに破壊され、その破片でできているとされています。

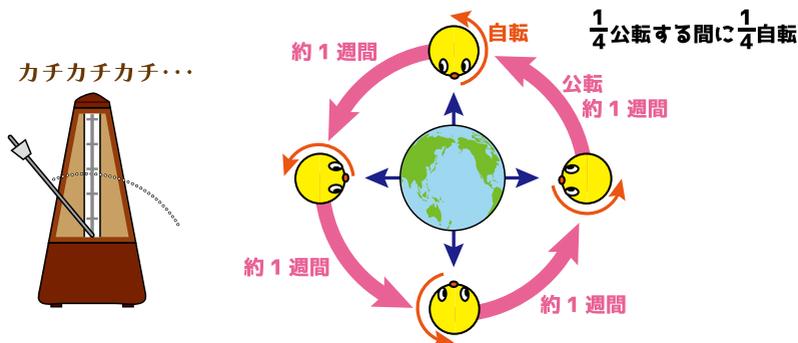


7. なぜ月は、地球に片側しか向けない？

月は地球をまわる衛星です。しかし、その自転周期と公転周期は、完全に一致しており、地球には片側しか見せません。もし、ちょっとしたでも自転周期と公転周期が違っていれば、だんだんと相対位置がずれて、いつかは“裏側”を見ることができるようはずです。実際には、月の軌道が楕円であるために、公転に伴って月は微妙に首を振りまします。しかし、決して裏側を地球に見せることはありません。なぜ、こんなことが起きるのでしょうか？偶然にしては、できすぎですよ。

実は、これには潮汐力が関係していると考えられています。潮汐力には、自転を遅くする作用があります。例えば、地球の場合、月の潮汐作用で膨れ上がった海水の中を、地表が自転していることになり、海水と地面との摩擦で自転がだんだん遅くなっていることが知られています。そして、その反作用で、月はだんだんと遠ざかっています。数億年前には、月はずっと地球に近いところをまわっており、公転周期が短かったことがわかっています。

一方、月は、地球の潮汐力によって、地球の方向に膨れ上がったラグビーボールのような楕円体の形をしています。そこに作用する潮汐力は、向きがずれるとそのずれを引き戻す方向に力が作用し、自転にブレーキをかけてしまいます。その結果、公転と一致するまで減速されたと考えられています。こうした、自転と公転の同期は、月以外でも木星の巨大衛星であるガリレオ衛星など、太陽系の多くの衛星でも起きています。



8. 太陽系ってオーケストラ？惑星たちの奏でるハーモニー

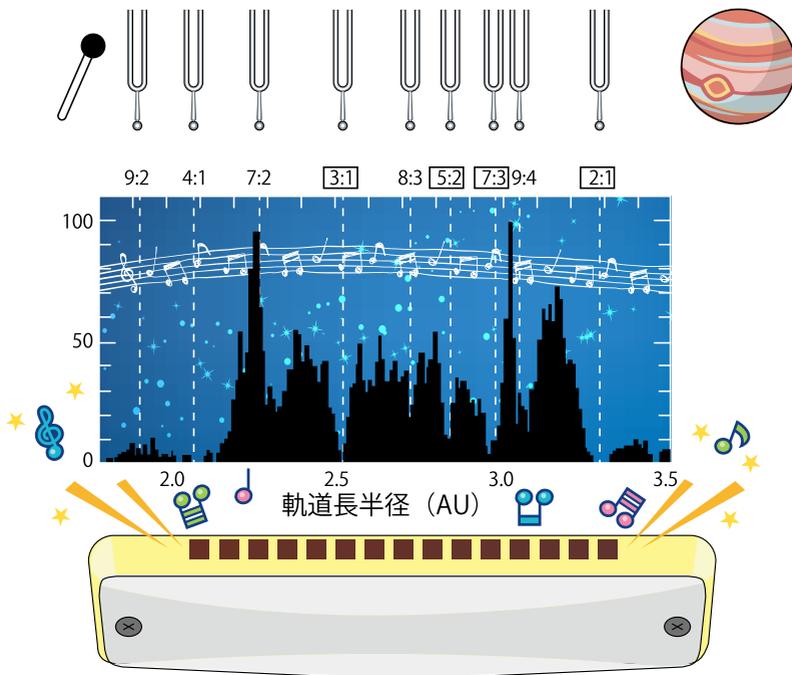
太陽系の天体は、太陽の引力を受けて太陽の周りをまわっています。その一方で、これらの天体は互いに引力を及ぼしあっています。この力は、通常太陽の引力に比べると非常に小さいですが、特定の条件を満たす場合や、非常に長い年月の間にこの影響が蓄積して大きな変化となる場合があります。

振り子や音叉など、周期的な振動をするものに、外から同じ周期または単純な整数比の振動を与えると、振幅が拡大する現象があります。共鳴（または共振）と呼ばれるこの現象は、たとえ外からの振動が小さなものでも、影響が蓄積して結果的に大きな影響を及ぼします。これと同様の現象が、太陽系の惑星や小天体の間でも生じます。小惑星の公転周期の分布を調べると、木星の公転周期と比べて1:2とか2:5の様な単純な整数比のところに、小惑星がほとんどないところがあることが知られています。これは、共鳴によって不安定となった小惑星が弾き飛ばされたからだと考えられています。



土星の環は、細かな粒子でできていますが、土星の衛星の公転周期と単純な整数比になる場所に隙間があることが知られています。これも、共鳴によるものと考えられています。一方、共鳴によって逆に軌道が安定化する例もあり、惑星と小惑星、あるいは惑星と惑星で公転周期が互いに単純な整数比になるものもあります。

さらに長期的には、惑星の軌道は互いに及ぼしあう引力によって、軌道面の回転や楕円軌道のつぶれ具合（離心率）の周期的な変化などが起きることが知られています。その振幅は、一定ではなく増減を繰り返していて、まるで音楽を奏でている様です。こうした軌道の長期変動は、惑星の気候変動の一因ともなっていると考えられています。



9. 惑星は何でできている？

惑星は、何でできているのでしょうか？ご存知の様に、地球の表面は水（海）を除くと、岩石や岩石の破碎された砂や土です。

太陽系の惑星は、大きく3種類に分類されます。内側の軌道をまわる水星、金星、地球、火星は、地球型惑星または岩石惑星と呼ばれています。その中で最大のが地球です。その外側をまわる木星と土星は、木星型惑星、または巨大ガス惑星と呼ばれています。最大の木星は、なんと地球の300倍の質量があります。さらに外側の天王星と海王星は、天王星型、または氷惑星と呼ばれています。これらは、地球の10倍から20倍程度の質量です。では、惑星は違うものでできているのでしょうか？

地球型惑星はその表面が岩石または岩石が砕けた土や砂で覆われています。地球の場合は、表面の大部分（約70%）が水（海）で覆われていますが、陸地と海底は岩石や土でできています。また、内部には鉄やニッケルなどの金属でできた核があると考えられています。一方、木星型惑星には明確な表面はありません。木星や土星は、全体が巨大なガス（水素やヘリウム）の塊となっています。もっとも、これらのガスは、ちょっと内側に行くと、ものすごい高圧になってしまうため、液体金属水素と呼ばれる特殊な状態になっていると考えられています。また、天王星型惑星は、そのほとんどが巨大な氷の塊になっています。

この様に、惑星の分類はその組成を反映しています。それにしても、なぜこんな違いが生じたのでしょうか？こうした組成の違いは、惑星がどうやって生まれたのかを解く重要なカギになると考えられています。



10. 宇宙でも金鉱探し？

はやぶさ2は、小惑星リュウグウの土のサンプルを地球に持ち帰ることを主な目的とした日本の探査機で、2018年に小惑星リュウグウに到着し、岩石のサンプルを採取しました。2020年に地球にサンプルを持ち帰って分析を行っています。リュウグウは、太陽系のごく初期の段階で生まれ、ほぼそのままの状態ではいると考えられており、持ち帰ったサンプルを詳細に分析すれば、太陽系誕生の謎に迫ることができると考えられています。科学的成果に期待しましょう！

ところで、これまでに数十万個の小惑星が発見されています。その中には、地上からの観測による分析から、貴金属やレアメタルなどの資源がたくさんあると考えられているものもあります。そうすると、はやぶさ2の様な探査機をこうした小惑星に送り込み、地球上にはあまりない物質を大量に持ち帰れば、資源の乏しい日本などにとっては産業にも役立ちますし、早い話がお金儲けできないのかとも考えられます。この話は、必ずしも冗談ではなく、一部の関係者の間では真剣に議論されています。

しかし、こうしたことをするための最大の課題は採算性です。仮に、1グラム6,000円くらいの純金を1トン持ち帰ったとしても、60億円にしかありません。はやぶさ2の様な探査機を打ち上げるには、数百億円かかります。そして、はやぶさ2の持ち帰った岩石は、約5gほどです。これでは、お金儲けには程遠い状態です。しかし、将来安価な宇宙ドローンの様なものが実現すれば、小惑星で鉱山探しが活発化し、ゴールドラッシュが起きるかもしれません。あるいは、「小惑星〇〇産の金」を使った指輪やネックレスはプレミアムがついて高値で取引される様になるかも？と言っても、まだだいぶ先の話になりそうですね。お金儲けよりも先に、まずは太陽系誕生の物語に期待しましょう。



11.水惑星って何？

地球は、しばしば水惑星という言い方をされます。これは、どういう意味でしょうか？確かに、地球の表面は大部分が水で覆われています。しかし、表面の水（海）は、せいぜい数kmで、水の量としては、決して多いとは言えません。単にH₂Oという意味では、天王星や海王星の方が多いです。天王星や海王星は、大部分が氷でできています。

地球上の水の特徴は、気体（水蒸気）、液体（水）、固体（氷）の3つの状態が存在し、循環していることにあります。海から蒸発した水蒸気は雲になり、雨や雪となって降り注ぎ、川に流れ込んで、浸食して地形を作り、海に流れ込みます。こうした3つの状態の間を経由した水の循環によって、多様な生態系を育んでいるのが、地球の水惑星たるところです。

火星や金星も、太古には地球の様な水惑星だった時代があったと考えられています。しかし、今では大部分の水を失って残念な状態になっています。水ではありませんが、土星の衛星タイタンには、気体、液体、固体のメタンがあり、地球上の水と同じように循環しているとされています。

近年多数発見されている太陽系外惑星には、多様な生命を育む水惑星の環境を持つものがあるのでしょうか？



12. 月にも水がある？

月は、大気を持っていません。表面は、ほぼ真空中で昼は灼熱、夜は酷寒の世界で、とても水などありそうもありません。しかし、もし月のどこかに水があれば、月旅行の際、大量の水を持ち運ぶ必要がなくなるので、大いに助かります。本当に月には水はないのでしょうか？

最近の研究では、月にも水がありそうだということになっています。といっても、真空中では、液体の水は存在できません。水蒸気はあっても、一瞬で拡散・消滅してしまうでしょう。そうすると、固体（氷）ということになります。しかし、昼間は太陽の熱で氷は昇華してしまい、水蒸気になってしまいます。そうすると水はどこにあるのでしょうか？

月の表面には、小惑星の衝突でできたクレーターが多数あり、月の極地域にも大きなクレーターがあります。極地にある深いクレーターの底には、太陽の光が届かない永遠の闇があると考えられています。こうした永遠の闇のところに、彗星の衝突などによってもたらされた水が、氷の様な形でたまっているのではないかと考えられています。他にも、水の分子が検出されたという話もありますが、使えるほどの量では無さそうです。

月の水は、あてにできるでしょうか？



13. 太陽系遺産ツアー？

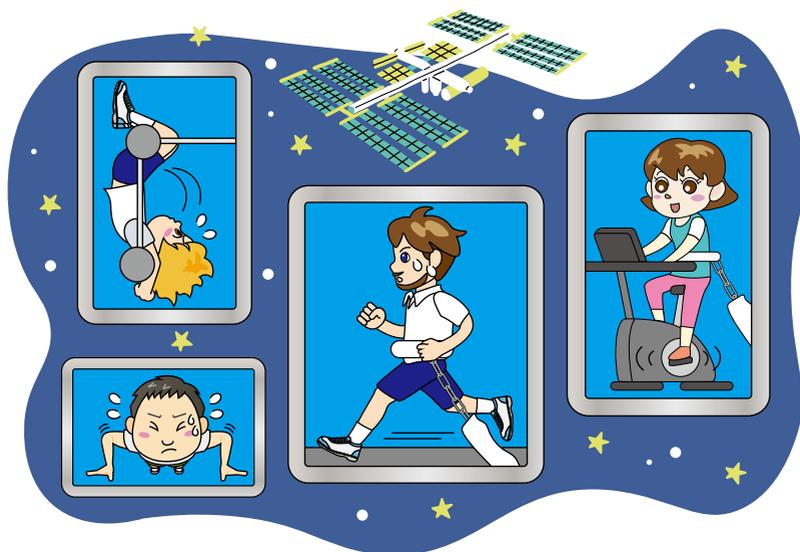
地球上では、ユニークな自然の景観や、歴史的な建造物などが世界遺産に登録され、多くの人が訪れています。今後、人類が宇宙に進出していくと、他の天体の「太陽系遺産ツアー」は、いつ頃可能になるのでしょうか？火星には、太陽系最高のオリンポス山の他にも、太陽系最大のマリネリウス峡谷、氷やドライアイスでできた極冠などがあり、太陽系遺産オンパレードです。他の惑星となると、着陸は難しくなりますが、上空から眺める金星の雲、木星の縞模様と大赤斑、雄大かつ神秘的な土星の環など、近くで見たらさぞ壮観でしょう。衛星のツアーもあれば、木星の衛星イオの火山、土星の衛星タイタンのメタンでできた海や川、氷で覆われた木星の衛星エウロパや土星のエンケラドスなども面白いでしょう。



NASA は 2020 年代に再び月に人を送り込み、2030 年代には火星に人を送り込もうとしています。すでに、半世紀前にアポロ宇宙船が月に行っているのに、月ぐらいならできなくもなさそうですが、火星となると相当困難と言わざるをえません。すでに何度も火星に無人の探査機を送り込んでいるので、技術的にはできそうな気がします。しかし、往復に 2、3 年かかるでしょうから、その間どうやって生きるかだけでも大問題です。これまで、国際宇宙ステーションに半年以上宇宙飛行士が滞在したことはありますが、それよりさらに長期間宇宙で生活しなければいけません。

こうした長期の宇宙滞在は、宇宙飛行士の健康をむしばみ、帰還後自力で立つこともできなくなることが知られています。2 年間も、無重力や火星の弱い重力に慣れた体には、地球の重力は非常に過酷なものでしょう。宇宙に居ても、毎日筋トレが欠かせませんね。

この様に、幾多の困難は予想されますが、今世紀中に一部のツアーはできるようになるのではないのでしょうか？

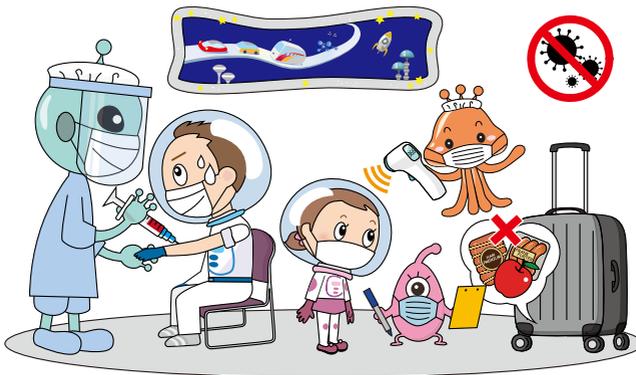


14.まさか！宇宙でも検疫？

地球上では、人々や貨物の往来により、様々な外来生物や細菌、ウイルスなどが世界各地に持ち込まれています。このため、在来種が絶滅することや、新たな感染症が持ち込まれることが問題となっています。最近では、新型コロナウイルス感染症の世界的流行がありました。このため、港や空港では検疫が行われ、外来生物などが入るのを防いでいます。人類の宇宙探査や宇宙旅行は、他の天体の環境破壊を引き起こさないでしょうか？

1967年に打ち上げられ月に到達したサーベイヤー3号のカメラは、その後アポロ12号によって地球に持ち帰られました。しかし、持ち帰った後の検査でこのカメラには、地球上に良くいる細菌が付着していたことが判明しました。このため、探査機に付着していた細菌が月まで生き延び、月の環境を汚染した可能性が指摘されました。宇宙空間は、ほぼ真空で高エネルギー粒子が飛び交う過酷な環境で、通常は生物が長期間生き延びることは難しいですが、その後の探査機は厳重に消毒して打ち上げられることになりました。

もちろん、人間や探査機が地球に戻って来た際にも、もし居れば宇宙の外来生物を持ち込んでしまう危険性があります。このため、宇宙から持ち帰ったものは、「宇宙検疫」が行われ、厳重に管理されます。もし、地球外生命に遭遇しても、お互いのために握手はやめておきましょう。



15. 太陽系第9惑星？

太陽系には8個の惑星があることが知られています。しかし、惑星はこれで「打ち止め」でしょうか？

第9惑星の可能性は、天文学では古くから話題に上っています。19世紀には、水星の軌道運動にニュートン力学では説明のつかない変化があるため、水星の軌道の内側に新惑星があると考えられ、バルカン（鍛冶の神）と名付けられました。皆既日食の際に盛んに探索が行われましたが、結局発見されず、20世紀に入ってこの不思議な運動は相対論的効果で説明できることが明らかとなり、騒ぎは終了しました。

太陽系第9惑星というと、あの数奇な運命をたどった冥王星を思いだす人も多いでしょう。冥王星も海王星と同様予言されていましたが、位置を正確に知ることが難しく、長年の探索の末、1930年に発見され、その後長らく第9惑星とされてきました。しかし、1990年代になると、冥王星の軌道の近くに多数の太陽系外縁天体（エッジワース・カイパーベルト天体）と呼ばれる小天体が発見される様になりました。さらに、冥王星より大きいかもしれない天体が発見される様になり、冥王星を特別扱いする理由がなくなったため、国際天文連合は新たに惑星を定義しなおして、冥王星は惑星の定義から外れました。

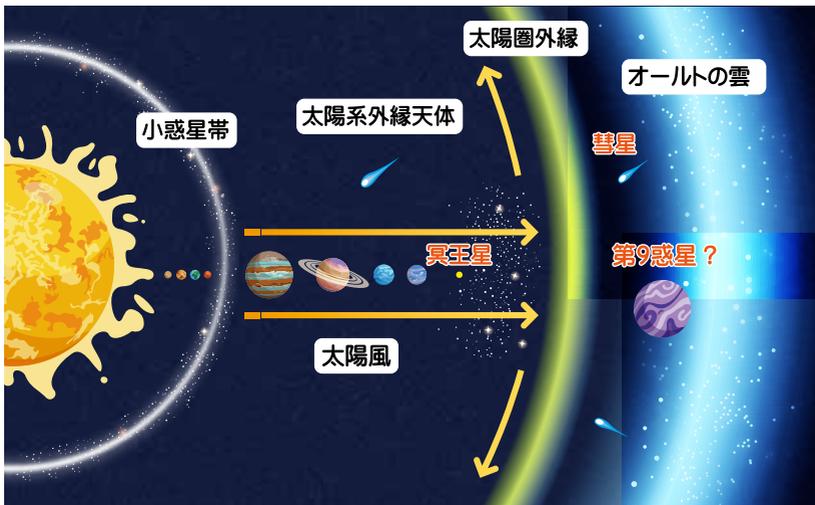
しかし、その後も海王星の外側に太陽系外縁天体が多数発見され、その分布が詳細に調べられる様になりました。その結果、これらの分布が異様に偏っていて、未知の天体の引力でかき乱された可能性が指摘されました。詳細なシミュレーションの結果、地球の10倍程度で質量のつぶれた楕円軌道の惑星が、はるか外側をまわっていればこの分布が説明できるとされ、すばる望遠鏡など多くの望遠鏡を使った大規模な探索が行われました。しかし、まだ見つかっていません。

第9惑星は、本当にあるのでしょうか？

16. 太陽系の果て？

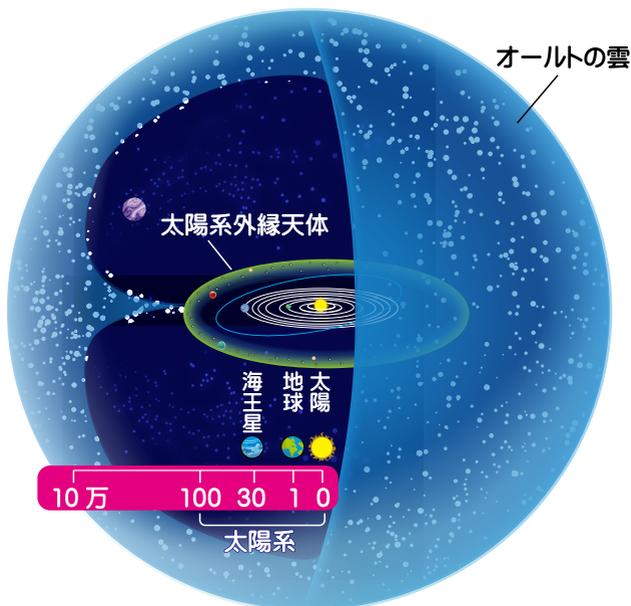
太陽系は、どこまで広がっているのでしょうか？どこかに、外界との境目があるのでしょうか？惑星で一番外側をまわっている海王星は、太陽地球間の距離（1天文単位、約1億5千万km）の約30倍のところをまわっています。しかし、その外側にも冥王星や太陽系外縁天体がまわっています。一番遠いものは、100天文単位より少し遠くにあります。

また、太陽から吹き出したプラズマの流れ（太陽風）は、これらの間を通り抜け、外側まで届いています。プラズマというのは、気体が電離して電子とイオンに分かれた状態です。太陽は、秒速220kmほどの速度で銀河系の中心の周りをまわっているので、噴出した太陽風は最終的に星と星の間にあるガス（星間ガス）と激しく衝突し、衝撃波を形成して行き止まりとなります。これが、だいたい100天文単位で、この内側を太陽圏と呼びます。通常は、この付近が太陽系の外縁とされています。



しかし、実際にはその外側にもまだ何かがあることがわかっています。彗星の多くは太陽圏の外側からやって来ます。こうした彗星は、太陽系の外側に球状の雲の様に分布していて、そこからやって来たと考えられています。この雲の様な「彗星の巣」はオールトの雲と呼ばれています。これがどこまで広がっているかなどは、良くわかっていませんが、だいたい2万天文単位より遠くにある小天体は、近くを通過する恒星の引力ではぎとられるはずで、それより遠方にはもう太陽系のもものは無いと思われています。

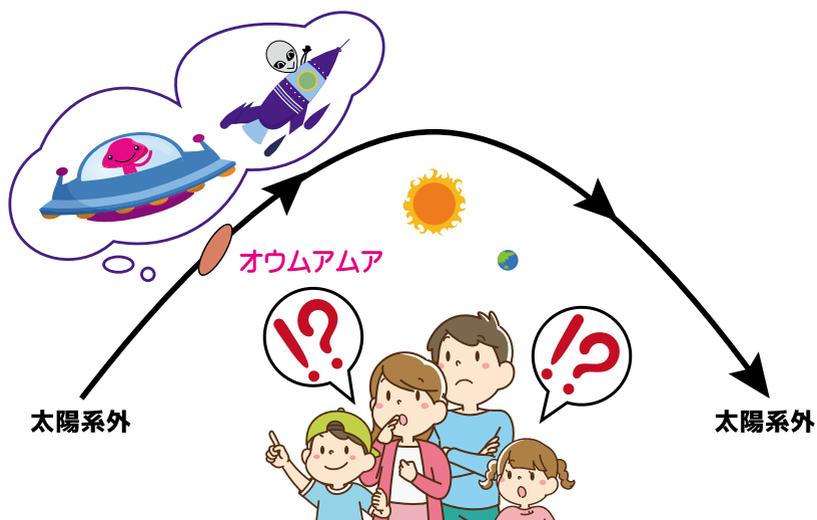
では、彗星の正体は何でしょうか？太陽系誕生の頃、岩石や氷でできた塵同士がくっついて、微惑星と呼ばれる数kmくらいの天体が形成されたと考えられています。これらのうち、あるものは互にくっついて惑星の種となり、残りは弾き飛ばされてオールトの雲を形成したと考えられています。彗星には、オールトの雲からの彗星が、木星などの巨大惑星に捕獲され、低い軌道をまわっている短周期彗星があります。



17. 地球外生命の探査機？

地球から打ち上げられ、太陽圏を飛び出した人工の探査機は、バイオニア 10、11 号、ボイジャー 1、2 号などがあります。では、太陽系の外から何か探査機の様なものが、太陽系内に飛来したことはあるのでしょうか？

遠方から太陽の近くまでやって来る天体としては、彗星が知られています。彗星の多くは、オールトの雲からやって来るとされています。地球から観測していると、その軌道は非常につぶれた楕円です。太陽系の外側からやって来る天体は、双曲線軌道を描いているはずですが、稀に、双曲線軌道の彗星が発見されますが、これらは惑星の引力で一時的に加速されたものとされています。しかし、2017 年にハワイ・ハレアカラ山頂のパンスタース望遠鏡は、不思議な小天体を発見しました。発見された天体は、太陽系の外からやってきて水星の軌道の内側まで太陽に接近し、再び宇宙のかなたに飛び去る双曲線軌道でした。そのため、オウムアムア（ハワイ語で「遠方からの使者」）と名付けられました。



しかもこの天体は、長さ数 100m の細長い針の様な形をしていました。そのうえ、太陽を離れる際不自然な加速が観測されたことから、オウムアムアはエイリアンが送り込んだ探査機かもしれない、という“まじめな”論文も出るなど話題となりました。

しかし、その後の研究によれば、オウムアムアは、彗星や太陽系外縁天体の様な起源・組成と考えると良さそうで、エイリアンの作ったものとは考えにくくなりました。パンスターズ望遠鏡は、地球に衝突する可能性のある危険な小惑星を発見することを主な目的とした広視野の望遠鏡で、2008 年に観測を開始しています。これほど大規模な探索は、パンスターズ以前はなされていませんでしたので、オウムアムアの様な天体は、これまで見落とされていたのかもしれませんが。この様な天体は、これまでに人も人知れずやってきていたのでしょうか？

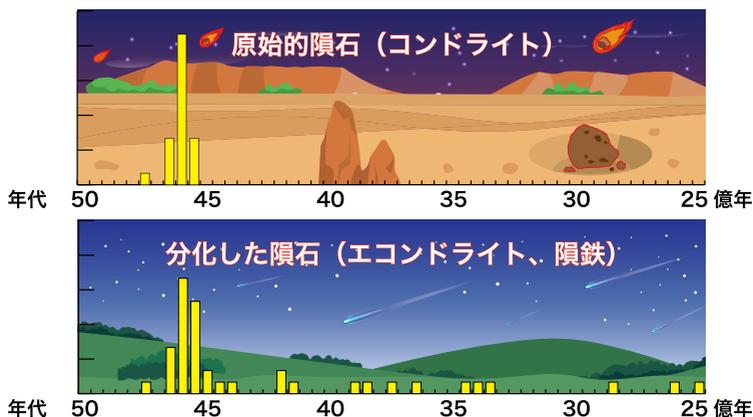


18. どうしてわかった？太陽系の年齢

太陽系の惑星は、いつ生まれたのでしょうか？それを知る手段は、あるのでしょうか？通常、岩石の年代は放射性同位元素を利用して測定します。では、地球上の岩石の放射能を調べれば、地球がいつ生まれたかわかるのでしょうか？現実には、地殻変動などによって古い岩石は失われ、地球誕生当時の岩石は残っていません。そうすると、太陽系誕生当時の岩石は、どこを探せば見つかるのでしょうか？

隕石というのは、太陽の周りをまわっていた小さな天体が地球大気に入射して、燃え尽きずに落下したものです。隕石の多くは、非常に長い間太陽の周りをまわっている間に、他の隕石や小天体などと衝突して、一旦溶けたあと冷えて固まる際に別な岩石になってしまいます。このため、それ以前の状態を記憶していません。しかし、衝突を免れて、原始太陽系の状態を保持したまま地球に落下するものが、稀にあります。炭素質（C型）コンドライトと呼ばれるこうした隕石は、年代測定をすると他の隕石より古く、46億年付近になることから、太陽系は46億年前に誕生したと考えられています。

はやぶさ2が行ってきた小惑星リュウグウも、組成が炭素質コンドライトに似ており、太陽系誕生の状態を保持していることが期待されています。無事サンプルを持ち帰ることができたので、太陽系誕生の謎の解明が進むかもしれません。



19. 暗い太陽のパラドックス？

哲学や科学には、「そんなばかな」と言いたくなる様なパラドックスと呼ばれる変な話がたくさんあります。有名なものとしては、「アキレスと亀」のゼノンのパラドックス、「クレタ人はうそつきだ」のエピメニデスのパラドックス、「夜空はなぜ暗い」のオルバースのパラドックスなどです。地球惑星科学では、有名な暗い太陽のパラドックスというのがあります。間違い探しをしてみましょう。

46億年前に誕生した地球には、その後生命が誕生します。この時期は、遅くとも35億年前であることが、地質学的な研究からわかっています。この時期地球はどのような環境だったのでしょうか？温暖だったのでしょうか？それとも寒冷だったのでしょうか？

ヒントとなるのは、誕生直後の太陽の明るさがどのくらいだったかということです。太陽が輝いているのは、中心付近の核融合反応で大量の熱が生成されているからです。太陽で核融合反応がどのように進行するかは、詳しい理論的な研究が行われ、標準太陽模型と呼ばれる理論が確立しています。この理論は、同じような他の恒星の観測とも良く合うことから、ほぼ正しいと考えられています。この理論によれば、誕生直後の太陽は、現在より20%くらい暗く、地球上の温度は非常に低く地球は氷で覆われていたはずですが、生命の誕生どころではありません。ところが、地質学的には、今から38億年前にはすでに液体の水でできた海が存在していたという証拠があります。「そんなばかな..」ですよ。どこが間違っているのでしょうか？

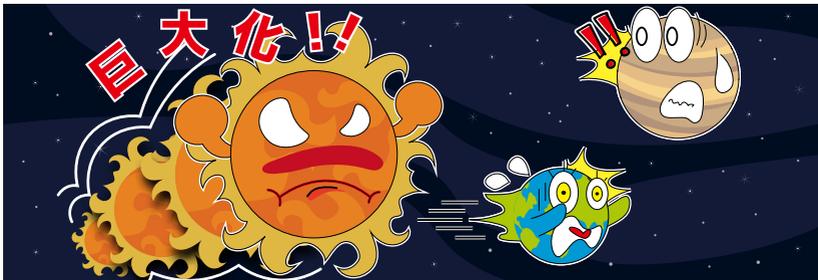
この問題については、様々な仮説が提唱されました。今のところ当時の地球大気には二酸化炭素などの温暖化ガスが大量に含まれていて、その温室効果で温暖な気候だったとする説が有力です。

20. 太陽系の最後？

始めがあれば、終わりがあるのが世の常です。我々が住む太陽系に、最後の日はやって来るのでしょうか？もちろん、気候変動などの環境悪化によって、地球に住めなくなることはあり得ますが、そうした問題がすべて克服されたとして、我々が太陽系には居られなくなることはあるのでしょうか？太陽系の最後として、一番考えられるのは、太陽の寿命です。太陽が超新星爆発したら、実質的に太陽系は終わりでしょう。そういうことは、あり得るのでしょうか？これまでの太陽や恒星などの研究からは、太陽程度の質量の星の場合、超新星爆発はしないとされています。

では、今後太陽はどうなるのでしょうか？標準太陽模型などの研究から、太陽は今後だんだんと明るさを増し、さらに膨れ上がって数十億年後には、赤色巨星と呼ばれる非常に大きな星になるとされています。約70億年後、太陽は最も大きくなり、その頃にはだいたい地球の軌道あたりまで大きくなるとされています。地球が飲み込まれるかどうかについては、専門家の見解は分かれている様です。しかし、いずれにしろ、それよりずっと以前から地球には居られなくなるでしょう。多分、火星も相当環境が悪化していて、木星や土星の衛星くらいしか移住できる場所は無いでしょう。

その後、太陽は縮小に転じて、白色矮星と呼ばれる小さな暗い星になってしまい、ほとんど生ける屍として実質的に終わりを迎えます。人類が他の惑星系に移住するのに、十分な余裕があるのでしょうか？



21. 太陽系外惑星？見つけてどうする？

1990年代に、最初の太陽系外惑星（太陽以外の星をまわる惑星）が発見されるまで、こうした他の惑星系は、想像上のものでしかありませんでした。時代は変わり、これまでもすでに数千個の太陽系外惑星が発見されています。しかし、それらの多くは直接その姿を捉えたわけではなく、間接的にその存在を確認しただけです。一方、太陽系の中には、地球を含めて8つの惑星と、小惑星や衛星などの小さな天体があります。こうした太陽系内の天体は、直接望遠鏡などで見ることができ、近くまで探査機を飛ばしたり着陸したりして、詳細に表面や大気の様子を観測することができます。なぜわざわざ太陽系外惑星を探すのでしょうか？

太陽系内探査の目的の一つに、他の天体に生物がいるかどうかというものがあります。しかし、これまでのところ、地球以外の天体に生命の存在を明確に示す証拠は見つかっていません。もちろん、今まで見つからなかったというだけで、太陽系の他の天体に生命は居ないと結論づけることはできません。しかし、火星にしろ、木星や土星の氷衛星にしろ、生物が居るとしても、極めて限定的と思われる。一方、宇宙に目を移すと、我々の銀河だけでも数千億個の星があり、その周りには様々な惑星があることが期待できます。もしかするとその中にあるかもしれない「第2第3の地球」を見つめることが、太陽系外惑星を探す一つの理由です。

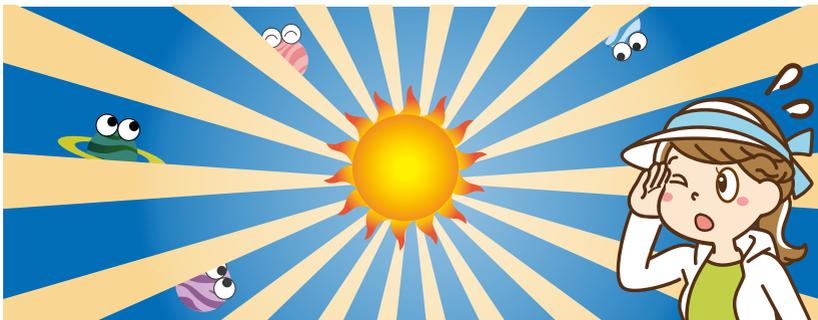
また、太陽系の惑星は誕生してから46億年たった現在の姿しか見ることはできません。もちろん、古い岩石も残っていて、それらを分析すれば原始地球の様子などを知ることは可能です。しかし、46億年前に太陽系がどの様に誕生したのか知るには、太陽系だけで大丈夫でしょうか？宇宙を見渡せば、様々な段階にある、多様な惑星系が見つかるはず。惑星系誕生の現場も、見ることもできるかもしれません。

22. どこに隠れた？惑星たち

太陽系外惑星を発見するのは、どのくらい難しいのでしょうか？たとえば、10 光年先から太陽の周りをまわる地球を見たらどうなるのでしょうか？

近くに太陽が無ければ、10 光年先から地球と同じ明るさの星を観測することは、すばる望遠鏡くらいの望遠鏡ならば可能です。では、太陽があった場合はどうでしょうか？すばる望遠鏡くらいの分解能があれば、太陽と地球くらい離れた 2 つの星は、分離可能です。もちろん、大気中では大気のゆらぎによって星像が悪化します。しかし、すばる望遠鏡などの大きな望遠鏡では、大気のゆらぎを補正する補償光学系と呼ばれる装置があります。ということは、すばる望遠鏡で 10 光年離れた地球の様な惑星を発見できるのでしょうか？

しかし、実際には太陽の明るさは、地球の 10 億倍以上です。こうした主星の光芒に邪魔されて、惑星を発見するのは、非常に難しくなります。真昼に太陽の近くの星を見ようとする様なものです。この場合、まず考えられるのは、黒いマスクで主星の像を覆って、光を遮ることです。ところが、光には影にまわりこもうとする性質（回折）があります。主星と惑星は、非常に大きな明るさの違いがあるので、主星の光がわずかでも入り込むと、その光に隠れて惑星は見えなくなります。太陽系外惑星の直接観測は、ほとんど「できっこない」という状況です。しかし、科学者たちは様々な手法を駆使して見えない惑星たちを発見して来ました。



23. 隠れても無駄だ！そこに居ることぐらいわかる

例えば物陰に隠れていても、夕日で影が長く伸びていれば、そこに居ることがバレてしまいます。それと同じように、見えない太陽系外惑星もその存在を間接的に突き止めることができます。そうした方法がいろいろ考案されました。

1992年、パルサーと呼ばれる規則的な電波を発する特殊な星の周りをまわる太陽系外惑星が発見されました。惑星の公転に伴い、主星も重心の周りをまわるので、電波のタイミングがずれます。パルサーは、この電波のタイミングのずれを利用して発見されたものです。しかし、パルサーは、すでに死んだ星と考えられ、その周りをまわる惑星も、太陽系の様な普通の惑星とは考えにくいので、あまり注目されませんでした。

1995年には、視線速度法と呼ばれるスペクトルを利用した方法で、太陽の様な普通の星をまわる太陽系外惑星が発見されました。主星自身も、惑星の公転につれて重心の周りをまわりますが、この運動によって観測者に近づいたり遠ざかったりします。この速度の変化によって、主星からの光が近づく際には青い（波長の短い）方に、遠ざかる際には赤い（波長の長い）方にずれます。この方法で最初に発見された惑星の場合、だいたい新幹線のぞみの速度くらいの視線速度の変化がありました。2019年には、この方法で最初に太陽系外惑星を発見した、マイヨールとケローに、ノーベル物理学賞が与えられました。

その後さらに、日食の様に惑星が主星の一部を隠す現象を利用した方法が成功しました。惑星の軌道面が地球の方を向いていた場合、惑星が周期的に主星の手前を通過します。この際、主星の光が遮られ、少し暗く見えます。この方法は、トランジット法と呼ばれています。

24. 重力レンズで惑星を見る？

重力レンズというのは、星の様な質量を持った天体がレンズの様な働きをすることです。重力レンズによってゆがんだ画像が見えたり、暗い星が明るく見えたりします。この重力レンズを利用したユニークな方法でも、太陽系外惑星が発見されています。

現在使われている重力レンズを使って惑星を発見する方法は、惑星自身のレンズ効果を利用します。遠方の星を観測していると、稀に手前を別の星が通過することがあります。このとき、手前の星のレンズ効果で遠方の星がいつもより明るく見えます。もし、手前の星に惑星が無ければ、ピークの前後で対称なきれいな山型の明るさの変化が観測されます。一方、惑星があった場合は、惑星によるレンズ効果が加わり、この形が崩れます。これによって惑星の存在がわかるというもので、マイクロレンズ法と呼ばれています。この方法の特長は、他の手法に比べて小型の望遠鏡、比較的安価な機材で観測可能だということです。アマチュアもこの観測に貢献しています。2004年に日本・ニュージーランドのグループによってはじめて成功して以来、約100個の惑星がこの方法で発見されています。

もう一つ、重力レンズを使った方法として、太陽の重力レンズ効果を拡大鏡として使って、遠方の惑星の表面の様子を観測する方法も提案されています。この場合、太陽自身がじゃまになるので、太陽から550天文単位(約800億km)以上離れたところから観測する必要があります。太陽の重力レンズ効果で、ドーナツ型に大きく歪んだ惑星の像が見えるはずですが、これが成功すれば、100光年先の惑星の大陸の形くらいはわかりそうです。しかし、太陽から遠く離れたところに大きな望遠鏡を積んだ探査機を飛ばす必要があり、実現には100年以上かかりそうです。

25. 巨大惑星の丸焼き？

初期に発見された太陽系外惑星の多くは、「ホットジュピター（灼熱の木星）」と呼ばれています。これは、どんな惑星でしょうか？

1995年に視線速度法で発見された太陽系外惑星は、極めて衝撃的なものでした。それまで、太陽の様な星に付随する惑星系は、きっと太陽系に似ているだろうと多くの人が考えていました。おそらく、最初に発見される太陽系外惑星は、木星の様に主星から離れた軌道を、10年くらいの周期でまわる巨大惑星だろうと思っていました。そして、そうした惑星に的を絞った探索を行っていたのです。

ところが、実際に発見された惑星は、太陽系で言えば水星の内側の軌道を4日ほどの周期でまわる、木星くらいの巨大惑星でした。つまり、この惑星は水星以上に高温の灼熱地獄で、しかも木星の様な巨大惑星です。こうした主星のすぐそばをまわる巨大惑星は、ホットジュピターと名付けられましたが、その後もこうした惑星は、続々と発見されました。こうした、ホットジュピターの中には、主星のコロナ（星の外側の気）の中をまわっている様なものもあります。ホットジュピターの多くは、表面温度が1,000度以上と考えられています。

こうしたホットジュピターは、木星と同じような水素ガスを主成分とするガス惑星と考えられ、高温のため蒸発しつつあると考えられています。実際に、彗星の様に水素ガスの尾をたなびかせているホットジュピターも発見されています。

26. 太陽系の常識は宇宙の非常識？

実際に太陽系外惑星が発見されるまで、私達は太陽系の8個の惑星しか知りませんでした。そして、惑星というものはそういうものだと思っていました。円に近く、同一平面上に適当な間隔で並んだ規則的な軌道、内側から小さな地球型惑星、その外側に巨大な木星型惑星、そしてさらに外側に天王星型惑星という葉巻型の構造などがその特徴と考えられました。いわば、それが常識だと考えていました。

しかし、実際に太陽系外惑星が発見される様になると、その多くはホットジュピターの様な主星に近接した巨大惑星であり、彗星の様なつぶれた楕円軌道を描くエキセントリックプラネットも発見されました。当然の成り行きとして、これまでの常識は間違っていたのではないか、という説が生まれました。太陽系は、宇宙では極めて特殊で非常識な惑星系なのかもしれない、というわけです。

しかし、見つかった惑星の大部分がホットジュピターだからと言って、宇宙ではホットジュピターが多いと思うのは、間違いです。惑星の中でも、地球の様な小さなものは発見が難しく、ホットジュピターの様な主星に近接した巨大惑星は、大きな視線速度を生じるので発見しやすいということがあります。そのため、発見しやすいホットジュピターから見つかったと考えられます。その後、発見数が増え、統計的な解析ができる様になると、ホットジュピターの様な惑星は、実際にはむしろ少数であると考えられる様になりました。しかし、まだ宇宙の常識がわかったわけではありません。我々の知識は宇宙のほんの一部に限られていて、しかも偏っています。

27.地球の兄貴分？

太陽系内で最大の地球型惑星は地球です。では、太陽系外ではどうでしょうか？

太陽系外惑星が見つかる様になっても、最初のうち見つかるのは巨大惑星ばかりでした。しかし、年々感度が良くなり、だんだんと小さな惑星が見つかる様になって来ました。と言っても、地球の様な小さなものはなかなか見つかりませんでした。しかし、海王星と地球の間くらい、質量で言うと地球の数倍くらいのもものが続々と発見される様になりました。この様な惑星は、太陽系にはありません。そこで、こうした惑星を「スーパーアース」と呼ぶ様になりました。

スーパーアースは、引力でガスを大量に取り込んで巨大な木星型惑星になるには軽すぎるので、岩石でできた硬い地面を持った地球型惑星または、氷の塊である天王星型惑星と考えられています。こうした惑星が、主星から適当な距離にあって、表面温度が地球と同じ程度ならば、生命が存在する可能性もあり、地球外生命の期待が高まりました。しかし、視線速度法やトランジット法で発見されるスーパーアースは主星に近すぎ、マイクロレンズ法で発見されるスーパーアースは主星から遠すぎて、適当な温度の惑星は、当初なかなか発見されませんでした。

その後、赤色矮星の周りに表面温度が地球に近いと思われるスーパーアースが発見される様になり、注目を集めています。



28. 小さな赤い太陽？

現在天文学者が注目しているのは、赤色矮星（M型矮星とも呼ばれる）をまわる惑星です。赤色矮星は、太陽より軽く表面温度は太陽より低く、赤い色をしています。星の半径も小さく、放射が比較的弱く暗いので明るい星ほど良く見えませんが、宇宙では最もありふれた星とされています。なぜ、こんな星が注目を浴びているのでしょうか？実は、「第2第3の地球」が発見できるかもしれないからです。

観測技術の進歩した今日でも、地球程度の小さな惑星を発見するのは至難の業です。視線速度法では、軽い惑星は主星を振りまわして視線速度の変化を引き起こす力が弱く、検出が難しくなります。また、主星から遠い惑星は、主星に及ぼす引力が弱くなるので、大きな視線速度を生じません。トランジット法では、小さな惑星は主星を覆い隠す面積が小さく、わずかな減光しか生じません。また、主星の前面を通過する確率も低くなるので、見つかる可能性も低くなります。しかも、これらの手法で発見される惑星の多くは、主星に近接した「灼熱の惑星」で、生物は住めそうにありません。

これに対して赤色矮星は、主星が軽いので軽い惑星でも比較的大きな視線速度が期待でき、主星自身が小さいのでトランジットの際の減光も大きくなります。また、主星の放射が弱いため、内側の軌道の惑星でも表面温度はそれほど高くなり、生物が住める惑星が見つかる可能性が高いというわけです。

現在、赤色矮星をまわる惑星の探索が精力的に行われていて、地球に近い環境と思われる惑星も見つかっています。

29. 惑星ははだか？大気をまとっている？

太陽系外惑星にも、地球の様に大気や水はあるのでしょうか？もしあれば、「もしかすると生物も、…」なんて妄想がわきます。しかし、その存在を発見するだけでも大変な太陽系外惑星の大気の確認を確かめるのは、考えただけでもとても大変です。しかし、こうした困難を克服して、これまでにいくつかの太陽系外惑星に大気が存在が確認されています。

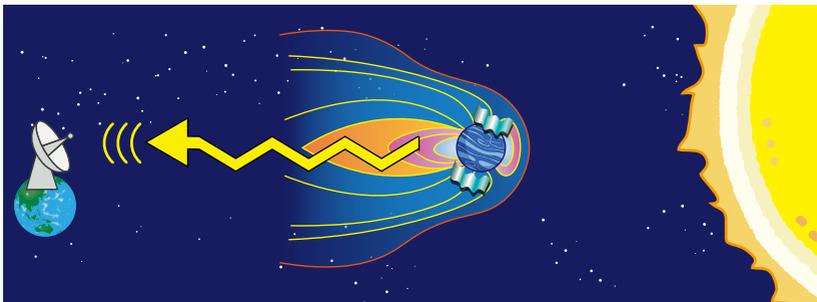
物質には、その物質特有の波長の光を放出したり吸収したりする性質があります。分光器という、プリズムの様に光を波長ごとに分解する装置を使うと、その物質の特有の波長のところに、黒い線（吸収線）や明るい線（輝線）が現れます。この性質を使うわけです。しかし、太陽系外惑星からの反射光は非常に暗く、その光を分光器にかけることは、困難です。そこで考え出されたのが、トランジット（惑星が主星の手前を通過すること）を利用して、主星の光が惑星の大気を通過して生じる吸収を観測することです。

この方法を使っても、大気の確認ができるのは、一部の主星に近接した惑星に限られています。これまでのところ、こうした惑星に水素や二酸化炭素などの大気が存在することはわかっていますが、地球の様に窒素や酸素などの大気を持つ惑星は、確認されていません。しかし、今後観測技術が進歩すれば、様々な太陽系外惑星の大気の様子がわかって来ると期待されます。

30. 太陽系外惑星のオーロラ活動？

地球には地磁気がありますが、金星と火星を除いた他の太陽系の惑星も固有の磁場を持っています。太陽からは太陽風（プラズマの風）が吹き付けていますが、惑星のそばでは磁場のエネルギー密度が太陽風の圧力を上まわり、太陽風の侵入を防ぎ大気の流出を妨げています。こうした惑星の周りの磁場が卓越した空間のことを磁気圏と呼びます。一方、活発な太陽活動によって変動する太陽風と惑星磁場は、激しく相互作用して、極地にオーロラを生成するとともに、電波を放出しています。特に、太陽系最大の惑星である木星は、地球と比べてはるかに強力な磁場を持っており、オーロラ活動とともに強い電波を放出していることでも知られています。では、太陽系外惑星でも同様のことは起きているのでしょうか？

太陽系外惑星の場合、今のところ磁場を測定する方法が無く、オーロラを観測する手段もありません。しかし、ホットジュピターは木星と同様に強力な磁場を持っていると考えられます。また、主星に近接しているため、太陽風に相当する恒星風の密度が非常に高く、ホットジュピターの磁場と激しく相互作用して、木星よりはるかに強力な電波を出していることが期待されます。2020年に、ホットジュピターの一つから、それらしい電波が検出されたとの報告がありました。まだ確認に至っていませんが、確認されれば太陽系外惑星の新たな観測手段となり、惑星磁気圏やオーロラ活動などについて新しいことがわかって来るかもしれません。



31. 銀河系遺産ツアー？

いつの日か、人類は地球と太陽系外惑星との間を行き来することができるのでしょうか？これまで、パイオニア、ボイジャーなどの探査機が太陽圏を越えて星間空間に送り込まれました。しかし、一番近い恒星でさえその 1000 倍以上の距離があります。単純に計算しても、到達するには何万年もかかります。

探査機を他の恒星に送り込む計画としては、「車いすの天才科学者」スティーブン・ホーキング博士なども参加したスターショット計画があります。小さな帆を宇宙に揚げて、地球から強力なレーザー光を当てて、光の圧力を使って光の速度の 20 % くらいまで加速しようというものです。しかし、この計画でも切手くらいの大きさの帆を一番近い恒星プロキシマに送り込むのに、約 20 年かかってしまいます。これでは、宇宙旅行になりませんね。

最後に考えられるのは、ハリウッド映画の「コンタクト」や「インターステラー」にも登場する時空の間をつなぐトンネルであるワームホールを利用する方法です。しかし、現実にもそういったものが存在するかどうかもわかっていません。

太陽系外にどんな風光明媚な場所があるのか、価値ある建造物があるのかもわかっていないので、気が早すぎたかもしれません。しかし、遠い将来太陽系の環境が悪化して住むのが難しくなった時には、映画「インターステラー」の様に、他の惑星系への移住を考えなくてはいけなくなるでしょう。



32.300 年来の論争、そして「標準モデル」

我々の住む地球の様な惑星は、どうやって生まれたのでしょうか？
いわば、我々のルーツを探るこの問題は古くから論争の的でした。
近代的な惑星形成の仮説は、18世紀に作られたカント・ラプラスの
星雲説までさかのぼります。この理論では、太陽系は巨大なガスで
できた円盤で、回転しながら冷えて固まって惑星となり、中心に集
まったガスは太陽になったというものです。しかし、この理論通り
に惑星ができたとすると、太陽はもっと速く自転していなくてはな
らず、つじつまが合わないという指摘がなされました。

その後も、様々な学説が作られました。代表的なものとしては、
20世紀前半に作られた潮汐説があります。この説では、太陽のすぐ
そばを通過した別な恒星の潮汐力によって、太陽からガスが引き出
され、冷えて固まって惑星になったというものです。しかし、太陽
からガスが引き出されたとしても、高温のガスが冷えて固まること
は無いことがわかり、この説も難しいことがわかりました。その他
にも様々な仮説が登場しましたが、それぞれ問題点が指摘されました。

20世紀後半になると、星がどうやって生まれたかという星形成の
研究が進みました。そしてそれを手掛かりに、今日コア集積モデル
または標準モデルと呼ばれている理論が日本の林忠四郎、ソビエト
連邦（当時）のサフロノフらによって作られました。

33.塵も積もれば惑星に？

林、サフロノフらのモデルとはどんなものだったのでしょうか？
彼らは、恒星が生まれる過程で、生まれたばかりの星である原始星の周りには、原始惑星系円盤というガス円盤ができると考えました。このガス円盤の中では、ガスと一緒に大量の塵が原始星の周りをまわっています。塵の成分は、原始星に近い温度の高いところでは、主として岩石がくだけた砂の様なものと考えられます。一方、原始星から遠いところでは、温度が低いために水が凍って、雪の様なものが主体となり、塵の量は一気に増えると考えられます。それらが、原始星の周りをまわりながら互いに衝突・合体を繰り返して、数kmくらいのサイズの微惑星が生まれ、それらがさらに合体してより大きな原始惑星が生まれ、さらに惑星へと成長したというものです。

このモデルによれば、内側には岩石でできた地球型惑星が生まれます。その外側には氷の巨大な塊である原始惑星が生長し、周りの円盤ガスを大量に吸い込んだ木星型惑星が生成します。そして、そのさらに外側には成長が遅かったために木星型になりきれなかった氷の塊である天王星型惑星ができます。こうして、うまく太陽系の惑星の性質を説明できます。その後、スーパーコンピューターによるシミュレーションがさかんに行われ、太陽系の惑星の誕生の様子をきれいに再現できる様になりました。

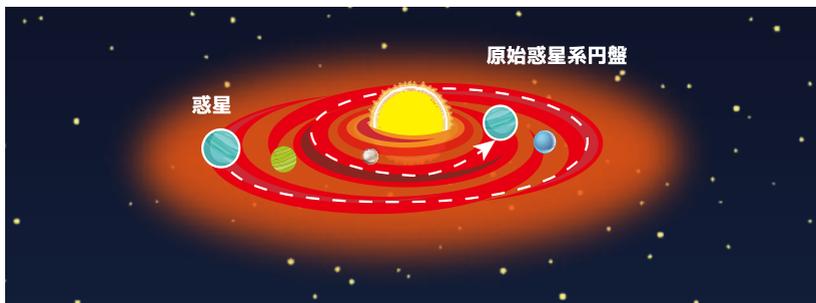
これで惑星の起源は解明されたのでしょうか？

34. 惑星が引越す？

標準モデルは、うまく太陽系の惑星を説明できました。しかし、太陽系外惑星では、はなはだ具合の悪いことがわかりました。初期に発見された太陽系外惑星には、主星に極めて近接した巨大惑星（ホットジュピター）が多く含まれていました。なぜ、主星のすぐそばにこの様な惑星があるのでしょうか？太陽系には、この様な惑星はありません。標準モデルでは、この様な近距離では、水は水蒸気となるため、巨大惑星を作るのに十分な量の塵がないはずです。

そこで考え出されたのは、ホットジュピターは、外側の軌道で生まれ、それから主星の近くまで落下した、というものです。何か、こじつけみたいですね。惑星の軌道は、通常非常に安定しています。惑星同士の軌道が交差していて、大接近が起これば軌道は大きく変化しますが、通常はそんなことは起きません。しかし、まだ原始惑星系円盤が残っていた時代には、ガスと惑星の相互作用で惑星の軌道が大きく変化したと考えられています。木星型惑星は、巨大な氷の塊の原始惑星ができると、周りのガスを大量に吸い込みますが、その際に原始星の方へと引きずられるというわけです。実際に、スーパーコンピューターを使ったシミュレーションも行われ、今ではこうした「惑星の引越し」は、ほとんど常識となっています。そうすると、惑星系の今の姿が、そのまま生まれた時の状態を反映しているとは限らなくなります。

ところで、太陽系ではどうだったのでしょうか？ホットジュピターが無いのだから、惑星の引越しは無かった？



35. 太陽系でもあった！惑星の引っ越し

ホットジュピターは、外側の軌道で生まれ内側に落下したとされています。では、ホットジュピターの無い太陽系では、惑星は生まれた時の軌道をそのまま保持しているのでしょうか？実は、太陽系でも惑星の引っ越しがあったことがわかりました。

1990年代から、海王星の外側に次々と太陽系外縁天体が発見されました。発見数の増加とともに、その軌道の分布に、外側に跳ね飛ばされたり、共鳴軌道に捕獲されて引きずられたりした様な特徴があることが明らかとなりました。これは、太陽系ができて間もないころ、海王星の軌道が外側にふくらんで、その間にある小天体を共鳴軌道の網にからめとる様にして引きずったり、すぐ近くの小天体を跳ね飛ばしたりしたものと考えられています。こうしたことから、海王星の軌道が外側へ移動したことは、間違いないと考えられています。ホットジュピターの時とは逆に、海王星は外側に移動したことになりますが、理論上は惑星は内側にも外側にも動きうるということがわかっています。その他の太陽系の惑星については、これまでのところ移動したという証拠は見つかっていません。

こうした、誕生直後の惑星の移動は、様々な惑星系で広く起きていたと考えられます。惑星の誕生も移動も、原始惑星系円盤の質量や質量分布などによって大きく違いそうです。

36.塵が積もると落下する？

標準モデルは、太陽系の様子や様々な太陽系外惑星を説明できることがわかってきました。では、これで本当に惑星形成は理解できたと言えるのでしょうか？

実は、標準モデルは非常に複雑なプロセスで、まだ完全に理解できたとはとても言えません。ちょっと考えてみても、塵同士が衝突しても、くっつくとは限らないですよ？原始惑星系円盤内では、塵は弾丸以上の速度で飛び交っているのです。衝突したら木っ端みじんに破壊されてしまいそうに思えます。実際は、条件によって、くっつく場合も破壊される場合もあります。このため、シミュレーション以外にも、室内での衝突実験なども行って、実際のプロセスを研究しています。

さらに、原始惑星系円盤内では、ガスと塵や惑星と一緒にまわっています。その間の摩擦によっては、塵が運動エネルギーを失って、中心の原始星に落下するかもしれませんし、せっかくできた惑星も、落下してしまうおそれがあります。これでは、本当に惑星ができるとは限りません。こういった問題を解決すべく、様々な研究が行われています。

そして、発見された惑星系や、様々な観測事実をきちんと説明できることが重要となります。実際に発見された惑星系は、非常に多様性に富んでいます。これらを説明するには、いろいろ条件を変えてシミュレーションをする必要があります。一方、観測手法によって得意不得意があって、発見された惑星の分布には大きな偏りがあります。このため、本当の惑星の分布を知ることが難しくなっています。こうした、理論・観測の双方の問題点を解決して、両者を比較する必要があります。

この様に、方向性が定まったとは言え、惑星誕生の理解にはなお多くの問題があります。

37. 不釣り合いに大きな月はどうやってできた？

木星型や天王星型の惑星には、多くの衛星があります。これらの惑星の巨大衛星は、惑星の周りにガスと塵の円盤（周惑星円盤）ができて、その中から生まれたとされています。一方、地球型惑星では衛星は稀です。水星にも金星にも衛星はありません。火星には2つの小さな衛星がありますが、小惑星を捕獲したという説と、別の天体が衝突して火星から放出されたという2つの説があります。これらの説を検証するべく、日本が探査機を送って、サンプルを採取して調べることが計画されています。それに対して、地球には半径1,700kmくらい（地球の約27%）の巨大な月があります。惑星との半径の比では、2位のトリトン（海王星の5.5%）を大きく引き離して太陽系第1位です。巨大衛星である月は、どの様にして生まれたのでしょうか？

これまでの研究では、他の天体が地球に衝突して、地球とその天体の破片（衝突の際の熱で溶けた溶岩の様なもの）が地球の周りに放り上げられ、それが重力でくっついて月になったとする説が有力です。ばらばらに破碎されて宇宙に放り上げられた破片が、またくっついてしまうとは、ちょっと信じがたいことですが、実際にスーパーコンピューターによるシミュレーションも行われ、月の生成を再現することに成功しています。

月が生まれる際に衝突した天体は、小惑星などではなく、より大きな原始惑星（惑星の卵）だったと考えられます。この様な巨大な天体衝突は、太陽系誕生の直後には何度か起きていたと考えられています。太陽系の惑星の多くは、公転と同じ向きに自転していますが、天王星の自転軸は横向きになっており、金星は逆まわりになっています。こうした自転軸のずれや、逆回転も巨大な天体衝突によるものと考えられています。

38. 大気はどこからやって来た？

我々は、必要不可欠なのに普段その存在を忘れている人や物を「空気の様な存在」などと言います。その存在さえ普段は忘れている大気ですが、どうやって生まれたのでしょうか？

太陽系の惑星の大気については、これまでに詳しく調べられています。それによると、木星型惑星と天王星型惑星の主成分は、水素です。原始惑星系円盤のガスの主成分は、水素なので、木星型惑星と天王星型惑星の大気は、原始惑星系円盤のガスを吸い込んだものと考えられます。一方、地球型惑星では、大気を持たない水星は別として、大気の主成分は二酸化炭素です。これは、地球型惑星は質量が軽いので円盤ガスを取り込むことができず、惑星ができた後、地中から噴出したガスが大気を形成したためと考えられています。しかし、なぜか地球の大気は窒素と酸素が主成分です。

おそらく、原始地球の大気は金星や火星と同じように二酸化炭素を主成分としていたと考えられています。しかし、二酸化炭素は海水に溶け込んでカルシウムイオンなどと結合して炭酸塩として海底に沈殿し、さらにマントル対流によって地下に潜ったと考えられます。また、生物が発生すると植物の光合成によって、二酸化炭素がさらに植物に取り込まれて地下に潜り、二酸化炭素のほとんどない大気になったと考えられています。現在ある窒素は、おそらく原始大気に含まれていたものの残りです。その後、光合成をする生物によって大量の酸素が大気中に放出され、今日の大気中の酸素を形成したと考えられています。このことを、「地球大気は酸素で汚染された」と言う研究者も居ます。しかし、我々人類にとっては、酸素で汚染された大気の方が住みやすいので、二酸化炭素を放出して原始地球の大気に戻すのはやめましょう。

39. 水はどこからやってきた？

水は生命にとって不可欠とされています。地球上に住む我々にとっては、ありふれたものですが、水が多すぎて陸地が水没するわけでもなく、表面の70%を覆うくらいというちょうど良い量の水がどこからやって来たのでしょうか？

太陽系が誕生した際、原始惑星系円盤の中の水は、太陽に近いところでは水蒸気、遠いところでは氷となっていたと考えられています。その境目を雪線または氷境界と呼びます。だいたい、火星と木星の間、地球の軌道の約2.7倍だったと考えられています。そうすると、地球の付近では水は水蒸気の状態だったことになります。しかし、この水蒸気が岩石に吸収されて地球に取り込まれることは極めて考えにくく、地球が生まれたときには、カラカラの乾燥した状態だったと考えられています。そうすると、水は地球ができた後どこか他からやって来たことになります。

地球ができた後に、水が入って来た可能性としては、彗星や小惑星などの小天体の衝突が考えられます。太陽系ができて間もない頃は、今より多くのこうした天体があって、地球にも多数衝突したことが考えられます。これまで、地球上の水の起源を調べるため水の同位体比を使って調べようという研究が行われています。水は、水素と酸素の化合物ですが、水素の代わりに重水素の付いた水も存在します。彗星や小惑星などの水に、重水がどのくらい含まれているかを測定して、地球の水と比較しようというわけです。これまで、様々な可能性が検討されていますが、まだ結論は出ていない様です。

この様に、地球上の水についても謎が多いですが、宇宙には火星や水星の様なほとんど水の無い陸惑星も、表面が完全に水没陸地の全くない海惑星もあると考えられています。

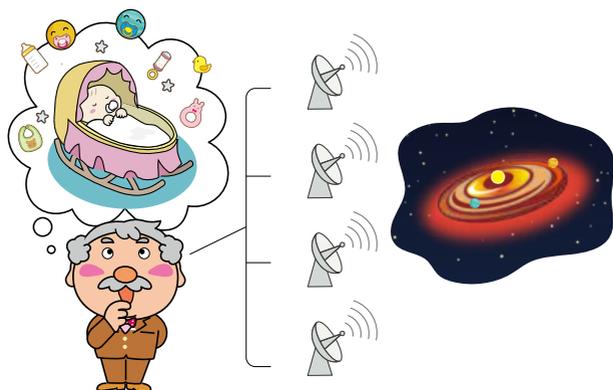
40.「惑星のゆりかご」の観測

惑星が今まさに生まれている現場、それが原始惑星系円盤です。この惑星のゆりかごを見れば、惑星誕生の謎に迫ることができるのではないのでしょうか？主星である原始星は、分子雲と呼ばれるほとんど光を通さないガスの塊の中で、小さな塊が収縮して生まれます。原始星も原始惑星系円盤も、生まれた直後はまだ濃いガスの中にあつて、可視光で見えることは困難です。しかも、原始惑星系円盤は地球から見ると非常に小さく、高分解能の装置を必要とします。

しかし、近年は観測技術の進歩により、原始惑星系円盤を直接見ることができる様になりました。南米チリのアルマ望遠鏡は、多数のアンテナを組み合わせた巨大な電波干渉計です。干渉計は、間隔をあけた複数のアンテナを組み合わせて巨大な一つの電波望遠鏡として高い角度分解能を得る技術です。この技術を使い、透過力の強い電波を利用して、多数の原始惑星系円盤を観測しています。

こうした観測から、原始惑星系円盤の構造は単純な円盤ではなく、多様性に富み、ダイナミックに変動している様子も見てとれます。今後さらに観測が進み、惑星形成の過程が明らかになって来ることが期待されます。

産声をあげる惑星の赤ちゃんたちの姿も、見えるようになるのでしょうか？

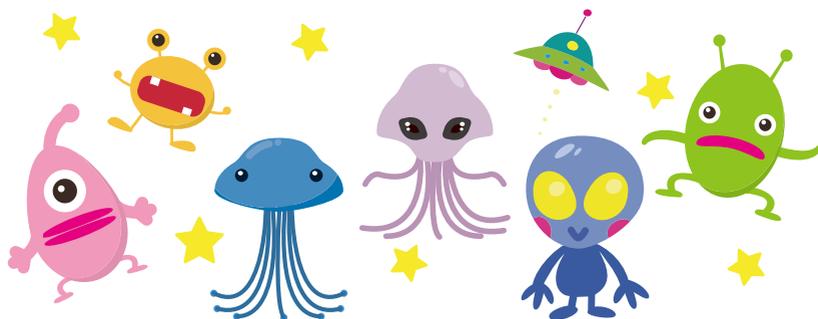


41. 永遠のネタ？それとも・・・？

地球外生命は、昔から様々なSF、映画、アニメなどに取り上げられて来ました。多くの方を感動させた、「E.T.」や「スター・ウォーズ」シリーズをご記憶の方も多いと思います。しかし、科学的に確認された事例は、1件もありません。少し前までは、これを科学として扱うのはちょっと、という状態でした。信じる信じないでは、科学になりません。実証性を重んじる現代科学では、実証できない様なものを扱うのは問題があると考えられます。

科学の世界では、これまでもほとんどネタとしか思われていなかったものが現実となった例が多々あります。例えば、地動説、大陸移動、ブラックホール、ビッグバン、隕石の衝突による恐竜の絶滅、太陽系外惑星などです。そうすると、妄想渦巻く荒唐無稽なSFネタとして我々を楽しませ続けて来た地球外生命も、いずれ「そんな常識！」になってしまうのでしょうか？

地球外生命をめぐる状況は、最近では一変しました。関連学会の分科会にも「アストロバイオロジー(宇宙生物学)」というのができて、活発な議論が繰り広げられています。研究機関の中にもアストロバイオロジーの名を冠するものができています。そして、まだ見つからない地球外生命を科学として研究を行っています。いったい、何が変わったのでしょうか？アストロバイオロジーでは、いかにして地球外生命に取り組んでいるのでしょうか？そして、いつ地球外生命が実証されるのでしょうか？



42. どこに居そう？地球外生命

宇宙空間は、ほぼ真空であり生命が居そうにありません。地球外生命の居そうなところというと、どういふところになるでしょうか？可能性としては、いろいろあるのかも知れませんが、残念ながら生命に関する我々の知識は、地球上の生物に限られています。我々は、宇宙では絶海の孤島に置き去りにされた様な状態で、他の生命体を全く知りませんし、宇宙の常識が何なのかもわかりません。

宇宙の笑いものになるかもしれませんが、我々の予想する生命の存在する惑星の条件は、

十分な大気を有する

固い岩石の表面を有する

液体の水が存在する

の3つです。1の条件を満足するには、惑星はある程度重く、大気を引き留められるくらいの引力が無いといけません。だいたい、地球質量の10分の1以上と考えられています。火星は、ぎりぎりこの条件を満たしそうです。2の条件は、地球型惑星であることを意味します。もし、惑星が地球質量の10倍以上だと、生まれたときに周りにある原始惑星系円盤から、大量の水素ガスが流れ込んで木星型になってしまうと考えられます。そうすると、惑星の質量は地球の10分の1から10倍の間ということになります。3の条件は、表面付近の水が水蒸気でも氷でもない様な適度な温度であることを意味します。このためには、主星から適度な距離に居なければいけません。しかし、この距離は惑星の状態に依存していて、一筋縄では行きません。

43. 火星や氷衛星？

太陽系外を考える前に、もう少し身近な太陽系内の天体に、地球外生命が発見される可能性はあるでしょうか？

探査機による調査が行われるはるか以前から、火星は地球に似た環境にあると考えられ、SFだけでなく、科学者の興味の対象となってきました。ところが、実際に火星に探査機が行くようになって、論争の種となっていた「火星の運河」の様なものは、その存在を否定されました。

しかし、1970年に火星に着陸したバイキング探査機が、火星の土を採取して調べた結果、NASAは生物の存在を証明する結果が得られたと発表し、一大センセーションを巻き起こしました。しかし、この結果は間もなく否定され、騒ぎは収まりました。

その後、1996年には、火星隕石に生命の痕跡が発見されたという発表がありました。火星隕石というのは、火星に小天体が衝突して、火星の岩石を宇宙に放り出し、その岩石が太陽の周りをまわって、最終的に地球に落下したものです。そうした火星隕石のなかに、原始的な生物の痕の様なものが発見された、というものです。しかし、この痕跡の様なものは、別の解釈も可能であるとの指摘があり、まだ論争が続いています。

木星の衛星エウロパや、土星の衛星エンケラドスは、表面が厚い氷で覆われていますが、その下には海(液体の水)があることがわかっています。また、エンケラドスでは、氷の下の熱水によると思われる水蒸気が氷の割れ目から立ちのぼるのが観測されています。こうしたことから、これらの氷衛星の氷の下の海に何か生物が居るので、と期待されています。現時点では、何ともいえませんが、将来の探査機による調査で明らかになるでしょう。

44. 暑い寒いは何で決まっている？

生命存在の重要な条件の一つは、惑星表面の温度です。液体の水が存在できる温度でないといけなると考えられています。では、温度は何で決まっているのでしょうか？

惑星は、自分自身ではあまり熱を発生しません。惑星を温めているのは、主に主星からの放射です。主星からの放射は、一部は惑星の表面や雲で反射され、宇宙空間に逃げて行きます。しかし、残りは惑星に吸収され、主に表面付近が温められます。温められた惑星からは、熱放射によって宇宙空間に熱が逃げて行きます。逃げて行く熱は温度が高くなるほど増すので、主星からの熱と宇宙空間に逃げて行く熱がバランスをとって、惑星の温度はほぼ一定に保たれます。この温度を、平衡温度と呼びます。

平衡温度は、主星からの放射の強さと、惑星による反射・吸収の割合で決まっています。地球の場合、だいたいマイナス18度くらいです。しかし、ご存知の通り地球はそんなに寒くありません。地球の平均気温は、だいたい15度くらいです。この差はなぜ生じるのでしょうか？地球には、大気があります。太陽からの放射は、だいたい可視光から近赤外にピークがあります。このくらいの波長の光に対しては、地球大気はほぼ透明で、ほとんどそのまま表面近くまで到達します。しかし、地球からの放射は、中間赤外から遠赤外にピークがあります。この付近では、大気はかなり不透明で、熱が宇宙に逃げて行くのを妨げています。このため、実際の温度は平衡温度より高くなります。これは、温室効果と呼ばれている現象です。

温室効果がどのくらいあるのかは、大気の状態によります。太陽系外惑星の場合、温室効果がどのくらいあるかはわかりません。このため、平衡温度や適当な仮定を使った推定値が使われます。

45. 気候は安定？それとも暴走する？

生命の存在には、ある程度気候が安定している必要があると考えられます。気候が暴走すると、何百度もの灼熱の惑星になるかも知れませんが、完全に凍結した酷寒の惑星になるかもしれません。そうなっては、生命は危険にさらされます。惑星の気候は、多少の変動はあっても安定しているもののでしょうか？それとも、暴走が起きる様な不安定なものなのでしょうか？

地球の様に、表面が多くの水で覆われている惑星は、気候の暴走が起りやすいことが知られています。実は、水蒸気は最強の温暖化ガスと言われており、大気中の水蒸気が増えると惑星から逃げて行く熱を遮り、温暖化が進みます。そうすると、海水の蒸発が促進され、さらに大気中の水蒸気が増え、温暖化が加速されます。こうして温暖化は暴走し、ついには海水が沸騰して干上がってしまい、惑星は灼熱地獄と化してしまいます。金星が現在の様に灼熱の惑星になったのは、暴走温暖化のためだと考えられています。では、現在進行中の地球温暖化が続くと、地球も金星の様な状態になるのでしょうか？これまでの研究では、どうやら地球はぎりぎり暴走温暖化を免れそうです。

一方、水が存在は寒冷化の暴走も引き起こします。寒冷化して雪の量が増えると、惑星の表面が白くなって、主星からの光を良く反射する様になります。そのため、惑星が吸収する熱量が減り、ますます寒冷化します。こうして、寒冷化が暴走すると、惑星全体が氷で覆われる「全球凍結（スノーボール）」の状態になります。実は、地球ではこれまで何度か全球凍結が起きています。

水の量の少ない陸惑星の場合、気候は安定しているのでしょうか？

46. ハビタブルゾーンって何？

新たに惑星が発見されると、そこに生物が居るかどうかは興味がわくところです。平衡温度などをもとに推定された、液体の水があってもおかしくない様な表面温度になる領域を、ハビタブルゾーン（居住可能領域）と呼んでいます。生命が存在しうる領域という意味です。

主星からの放射は、主星の質量と主星から惑星までの距離で決まっています。主星は、重いほど放射が強く、軽いほど弱くなります。主星に近いほど惑星の受ける放射は強く、遠いほど弱くなります。反射の割合は、太陽系の惑星を例に仮定します。太陽系の場合、ハビタブルゾーンは金星の軌道のちょっと外側から、だいたい火星の軌道までとされています。一方、太陽の2倍くらいの質量の主星では、だいたい火星と木星の間になり、太陽の3分の1くらいの質量の赤色矮星では、水星の軌道付近がハビタブルゾーンになります。

ハビタブルゾーンは、あくまで一つの目安にすぎません。太陽系外惑星では、表面温度を計算する際、反射・吸収の割合や温室効果は仮定しています。また、表面や大気の状態もわかっていません。これらの見積もりは、研究者によって違ってきます。

ハビタブルゾーンにある太陽系外惑星には、実際に生命が存在するのでしょうか？

47. 「永遠のたそがれ」に地球外生命？

最近では、視線速度法の感度が向上し、トランジット法も衛星を使った大気圏外からの観測で、赤色矮星をまわるスーパーアースがいくつも発見されています。そして、その中には、液体の水が存在しうるハビタブルゾーンにあるものも発見されています。そうすると、当然「生物は居るか？」という話になります。

これらの惑星は、主星のすぐそばをまわっています。そのため、主星からの強い潮汐力を受けて、ちょうど月の様に自転と公転が同期して、片側を常に主星に向けていると考えられます。そうすると、主星に向いた側は永遠の昼、反対側は永遠の夜ということになります。永遠の昼は酷暑、永遠の夜は酷寒と闇で、住むにはちょっと厳しいかもしれませんが、その中間の永遠のたそがれ（または永遠のあけぼの）の領域には、快適な場所があるかもしれません。

しかし、こうした赤色矮星をまわるスーパーアースの環境も生物にとって安住の地ではないかもしれません。赤色矮星は、フレアと呼ばれる爆発現象が頻発する星として知られています。そのすぐそばに居る惑星は、その影響を大きく受けることが考えられます。爆発現象が、惑星の環境にどのような影響を及ぼすのか、まだ良くわかっていませんが、地球が受ける太陽面爆発の影響に比べてけた違いに大きいので、生物の生存にはかなり厳しいかもしれません。



48.「お隣さん」まで 4.2 光年？

これまでの太陽系外惑星探索で、地球外生命が居てもおかしくない様なスーパーアースが、いくつか見つかっています。仮に地球外生命が居るとして、一番近い「お隣さん」は、どこに住んでいるのでしょうか？

これまでの太陽系外惑星探索で発見されたスーパーアースで一番地球に近いものは、なんと地球に最も近い恒星プロキシマ・ケンタウリをまわっています。プロキシマ・ケンタウリは、地球から 4.2 光年離れた赤色矮星です。この星に、地球の 1.3 倍かそれより重い惑星が、主星からわずか 750 万 km のところを周期 11.2 日でまわっています。プロキシマ・ケンタウリは、太陽の 0.12 倍ほどの質量の赤色矮星なので放射も弱く、この距離は、液体の水が存在してもおかしくないハビタブルゾーンの中と考えられます。また、惑星の質量や主星からの距離を考えると、岩石でできた固い地面を持つ地球型惑星と考えられます。

そうすると、宇宙の隣人は意外と近くに居るのかもしれませんが。しかし、近いと言っても 4.2 光年はあまりに遠いです。プロキシマの惑星の友人に SNS でメッセージを送ることができたとしても、返事が返ってくるのは早くても 8.4 年後です。

49. 地球外生命との通信？

ハリウッド映画にもなったカール・セーガンのSF小説「コンタクト」では、宇宙からの謎の電波を受信した主人公エリーが、暗号の解読に成功し宇宙の乗り物の設計図を手に入れ、ベガの惑星へと旅行します。果たして、地球外生命との通信は可能でしょうか？

1960年代のオズマ計画以来、世界のさまざまな研究機関で、SETI(地球外知的生命体探索)の試みが行われて来ました。その多くは、電波望遠鏡のデータの中から、知的生命体が通信を試みていると思われる特徴的な信号を探すものです。電波信号のデータの中から、これはというものを見つけるには、非常に大きな計算処理を必要とするので、家庭や職場でパソコンの使っていない時間帯を利用させてもらうためのSETI@homeというプログラムが配布され、解析に使われたりしました。

これまでのところ、いくつか候補は挙がったのですが、その後の確認は無く、これは確実と思われるものは見つかっていません。しかし、将来確実な信号が見つかった際にはその社会的影響は極めて大きく、その確認と公表は慎重に行う必要があります。そこで、こうした際の公表に至るまでの必要な手続きに関して、国際的なルールが決められました。

果たして、地球外生命体との通信ができる日がやって来るのでしょうか？

50.宇宙のロゼッタストーン？

我々人類が、地球外生命と遭遇ないし通信が出来たとして、果たしてお互いに相手を理解することができるのでしょうか？地球上の人間でさえ、様々な人種が様々な言語を使用しており、同じ民族でも古語となると現代語と大きく違っていて、文字を読むことも話すことも容易ではありません。古代文字の世界では、ナポレオンのエジプト遠征の際に発見されたロゼッタストーンが有名です。この石には、複数の古代文字で碑文が書かれていたために、これを手掛かりに古代文字の解読が進みました。宇宙のロゼッタストーンとなるものは、何かあるのでしょうか？

1970年代に打ち上げられたNASAの探査機パイオニア10号および11号は、木星などの探査のあと、太陽系外へ放出される予定でした。このため、地球外生命へのメッセージとしてこれらの探査機には裸の男女や銀河系内のパルサー（電波を発する星）と地球の位置関係を示す線画を描いた金属板が取り付けられました。これは、カール・セーガンのアイデアだったと言われています。カール・セーガンは、著名な惑星科学者でSF作家としても有名です。その後打ち上げられたボイジャー1号、2号には、地球上の様子を記した画像や音などが収められたレコードが載せられました。

パイオニア10号、11号は、すでに交信が途絶えています。おそらく太陽圏の外に出たものと推定されています。また、ボイジャー1、2号は、まだ交信が続いており、すでに太陽圏を脱出したことが確認されています。果たして、これらの探査機が地球外生命に捕獲されて、宇宙のロゼッタストーンになる日はやってくるのでしょうか？



51.我々の先祖はどこで生まれた？

地球上に最初の生命が現れたのは、約 35 億年前かそれ以前とわかっています。しかし、どこでどの様にして生まれたのでしょうか？

地球上の最初の生命の起源については、様々な仮説が提唱されています。実際に、原始地球で生命が誕生するためには、そのもとなるガスや水以外に、雷や放射線などの高エネルギー現象が必要とされています。この様な高エネルギー現象が無ければ、有機物を作る様な反応は進行しません。こうした高エネルギーを発生させる要因として、海底の熱水の湧いているところや、温泉の間欠泉、隕石の落下など、様々な可能性が指摘されています。

一方で、地球上の生命は、宇宙からやって来たという説もあります。一見ばかげた考えの様にも見えますが、宇宙の観測からは、分子雲などから単純なアミノ酸などが見つかっています。また、火星隕石に原始的な生物の痕跡らしいものが見つかった例があるので、火星で発生した生物が、隕石に乗って地球に飛来したという説もあります。ご先祖様は、地球外生命だったのでしょうか？

しかし、これらはかなり前段階の仮説と言わざるを得ません。そもそも、実証する手段があるかどうかもわかりません。地球上の生命誕生も謎に包まれています。

52.地球外生命？居るわけないだろう！

地球外生命は、本当に居るのでしょうか？生命の生命たるところは、自分自身をコピーして増殖する遺伝情報を持っているということです。環境さえ整えば、こうした生命は自然にわいて出るものなののでしょうか？無菌状態の缶詰の中に自然に微生物がわき出て、中身が腐ってしまう様なことは起きません。最初無機物だけだった原始地球で、どうやって最初の生命が生まれたのでしょうか？

これまで、実験室で原始地球の大気などを再現し、雷や宇宙線照射に見立てた現象を作って、有機物を作る実験も行われています。その結果、単純なアミノ酸程度は作れることがわかっています。アミノ酸は、我々の体を構成する重要な物質なので、ここまで来ればあと一息で生命誕生と思いたいところです。しかし、ここから遺伝情報を担うリボ核酸（RNA）やデオキシリボ核酸（DNA）といった核酸を作ることは、極めて困難とされています。

RNAやDNAは、らせん構造や2重らせん構造といった系統的な構造に組みあがった、複雑かつ精巧な巨大分子です。こうした構造体が、ランダムな化学プロセスで組みあがる確率は、宇宙全体でも有ったか無かったかというくらいです。宇宙ビッグバンの名づけ親として有名な天文学者フレッド・ホイルの言葉を借りれば、「廃品置き場を竜巻が襲って偶然にジャンボジェット機が組みあがる様なものだ。」ということになります。宇宙全体でも稀な、奇跡の様なことが太古の地球で起きてしまったのでしょうか？もし、そうであれば、我々にとって観測可能な近傍宇宙に地球外生命体が居る可能性は、まずないということになります。それとも、こうした構造体を作り上げる未知のプロセスが存在するのでしょうか？

53.これが地球外生命の証拠だ！

ハビタブルゾーンの惑星には、もしかすると実際に液体の水や大気、固い岩石でできた地面があるかもしれません。しかし、これらはいくまで「状況証拠」にすぎません。実際に地球外生命が居ることを科学的に証明するには、直接生命の存在を証明する「物的証拠」が必要となります。一方、いくら生命誕生のシナリオに無理があっても、確証が得られれば地球外生命は客観的事実として受け入れるほかはなくなります。

これまで、科学者はどうすれば遠く離れた探査機から地球上に生物が居ることを証明できるか、などといったテストを行い、遠くから検出可能な生命の兆候を研究して来ました。その結果、いくつかの方法が見つかっています。例えば、植物の葉などに含まれる葉緑素は、赤外線では非常に明るく見えます（レッドエッジと呼ばれています）。また、地球大気に大量に含まれる酸素は、もともと地球大気にあったものではなく、光合成を行う植物によって生み出されたと考えられています。こうした、生物が居ることを示す情報はバイオマーカーと言われています。こうした兆候を捉えるには、何光年も離れた太陽系外惑星の光を主星から分離して観測し、分光などを行う必要があります。

現在、すばる望遠鏡の数倍の口径 (30-40m) の望遠鏡 (TMT や E-ELT) が建設され、観測を開始しようとしています。すばる望遠鏡と同程度の望遠鏡を宇宙に上げる計画もあります。主星の光を遮って、惑星からの光を分離する技術も様々なものが開発されつつあります。宇宙に、大きな折り畳み傘の様なものを打ち上げて、主星を覆い隠すスターシェード計画というものも予定されています。うまく行けば、今世紀前半にも地球外生命の存在が実証されるかもしれません。

SF やアニメの世界が、現実のものになってしまうのでしょうか？ それとも、結局何も見つからず、地球は奇跡の惑星で、我々は広大なこの宇宙で孤独な存在、ということになってしまうのでしょうか？



参考文献

- 成田憲保、「地球は特別な惑星か?」、ブルーバックス、講談社。
井田茂、「異形の惑星」、NHK ブックス。
佐藤勝彦、「宇宙に知的生命体は存在するのか」、ウェッジ。
ジム・アル＝カリーリ、ジョンジョー・マクファデン、「量子力学
で生命の謎を解く」、水谷淳訳、SB クリエイティブ。

新惑星 50 のなぜ +3

発行日	2022年3月18日 初版 第1刷発行
企画・制作	名古屋大学宇宙地球環境研究所 広報委員会
発行	名古屋大学宇宙地球環境研究所 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/
印刷／製本	株式会社 プリントパック 〒617-0003 京都府向日市森本町野田 3-1

新・惑星 
50のなぜ

ISEE

宇宙地球環境研究所

Institute for Space–Earth Environmental Research