

アストロバイオロジー（宇宙生物学）

**Rosa M. Ros, Beatriz García, Alexandre Costa,
Florian Seitz, Ana Villaescusa, Madelaine Rojas**

International Astronomical Union

Technical University of Catalonia, Spain

ITeDA and National Technological University, Argentina

Escola Secundária de Faro, Portugal

Heidelberg Astronomy House, Germany

Diverciencia, Algeciras, Spain

SENACYT, Panama



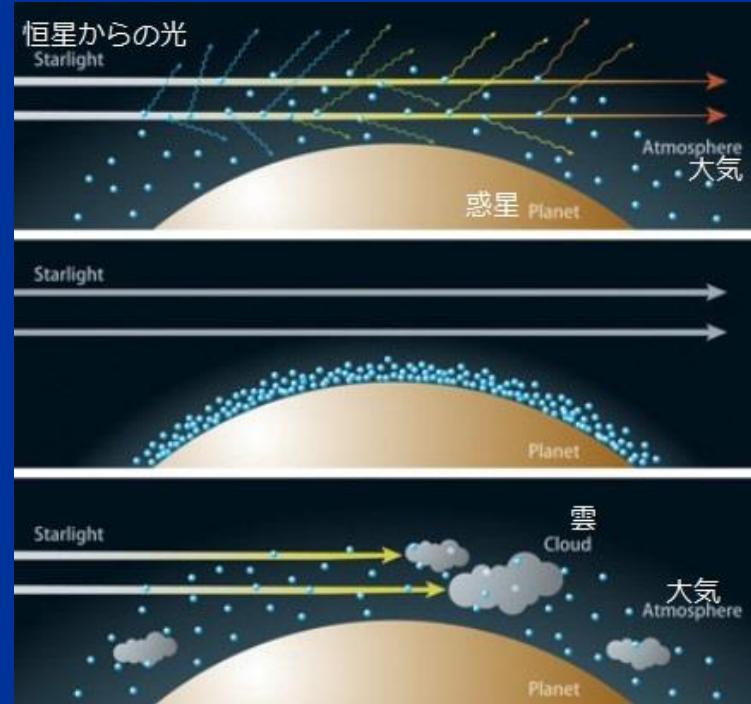
目標

- 元素の周期表にある様々な元素の起源を知る。
- 生物が繁栄するために必要な環境を理解する。
- 地球外で生命が維持されるための方法を考える。



惑星系の形成

星(恒星)の形成の際、その星の近くにあった残りの物質が、惑星系を形成する。星の組成を知る方法と同じようにして、系外惑星の大気の組成を知るために分光観測を行う。



活動1：ガスとダストからの惑星系形成

2グループに分かれよう：

例として、女子がガス、男子がダスト

きれいに2グループに分けられない時は、大きいグループの方にガスを割り当ててください。形成中の惑星系では、質量にしてガスはダストの100倍あります。

参加生徒が物語を聞くと、それに伴って、以下のような行動をするかもしれません。



活動1：ガスとダストからの惑星系形成

物語

大量のガスと少しの
ダストからなる星間
雲があった。

生徒の行動

全体がばらばらの集団なっている。
ガス役の方を多くする。集団の中で、ランダムに手をつな
いで、ネットワークを作る。

星間雲の中心へガス
が集まり始め、ダス
トは周囲を取り巻く。

集団が分かれ始める。ガス役は
中心に集まり、ダスト役は中心
の周りを取り巻く。



活動1：ガスとダストからの惑星系形成

物語

ガスはガスをより集め、
ダストはお互いに集まり合う。

中心では、高密度の不透明な塊が形成され、周囲には、ダストとガスの円盤が形成される。

生徒の行動

生徒は回転し始める。動き、衝突し、揺れ、跳ぶ。激しい動きで、外に飛び出すこともあるだろう。他の生徒が「助ける」。ガスならガス、ダストならダストと、同じ役の生徒がつかんで抱きかかる。

中心へガス役が集まり、周囲に輪になつてダスト役が手を取り合つて取り囲む。ガスはすべて中心に集まるではなく、遠くを取り囲んで回るガスもあるようにする。



活動1：ガスとダストからの惑星系形成



活動1：ガスとダストからの惑星系形成

物語

中心の塊は太陽、あるいは系外惑星系の中心星となっていく。

ダストが集積し、岩となり、微惑星へと成長し、やがて地球型惑星になっていく。

生徒の行動

太陽や中心星が輝き始めるので、その光線はあらゆる方向に放たれる。太陽や中心星が輝き始めたら、あまりつながっていないガス役は外に出ていくことにする。

ダスト役は地球型惑星形成に向けて、いくつかの塊になる。すべてのダスト役が地球型惑星形成に寄与するのではなく、外側にもダスト役を配しておく。



活動1：ガスとダストからの惑星系形成

物語

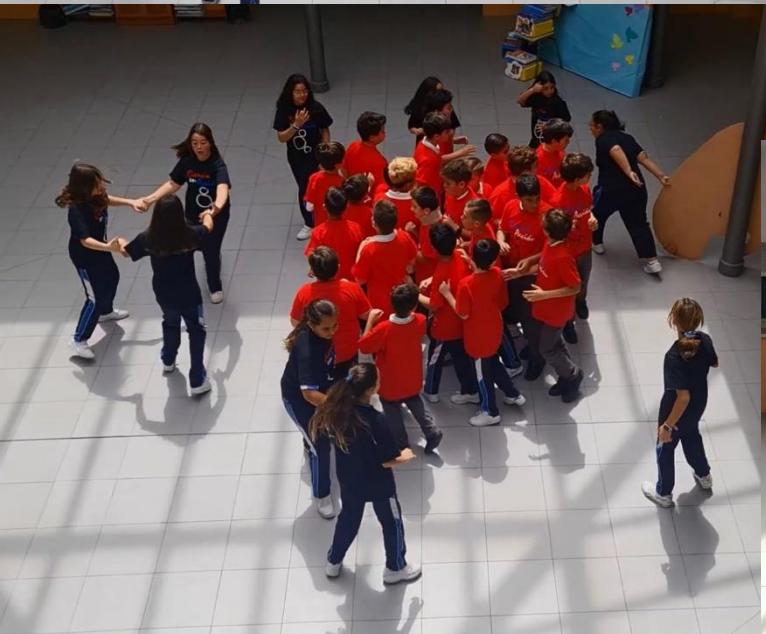
太陽（あるいは中心星）から遠く離れたところで、ガスが集まりやすい環境下、巨大ガス惑星が形成されいく。

生徒の行動

残った多くのガスとわずかのダストで巨大ガス惑星の形成となる。太陽あるいは中心星から遠いところは、低温になっている。それが内側の岩石質の惑星と外側のガス惑星という違いの主たる原因である。



活動1：ガスとダストからの惑星系形成

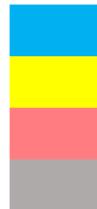


アクティビティ2: エミッショングラフ

分光学は、太陽系外惑星やその大気の化学組成について、ある程度の情報を知ることができます。DVDで電球のスペクトルを可視化できる（内部に含まれる気体の線が見える）



恒星進化の化学的側面



Elements which were produced in the first minutes after the Big Bang

Elements which were forged in the interior of stars

Elements appearing in supernova explosions

Man-made elements in the laboratory

1 H																2 He	
3 Li	4 Be																
11 Na	12 Mg																
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Cb	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fi	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

活動3：元素の周期表による分類

青、黄、赤のかごに、それぞれ分類しよう

指輪：金 Au	ドリルの刃のコーティング：チタン Ti	子ども用風船の中の気体：ヘリウム He	フライパンの素材：ニッケル Ni
軽量ボタン電池：リチウム Li	自動車の点火プラグ：白金 Pt	銅の導線：銅 Cu	ヨウ素液：ヨウ素 I
水筒の水：水素 H	古い調理用フライパン：アルミニウム Al	鉛筆の芯：炭素 C	農業用硫黄：硫黄 S
清涼飲料水の缶：アルミニウム Al	腕時計：チタン Ti	メダル：銀 Ag	パイプ：鉛 Pb
亜鉛合金鉛筆削り：亜鉛 Zn	さびた古い釘：鉄 Fe	温度計：ガリウム Ga	マッチ箱：リン P

ビッグバン直後の数分間で生成された元素（青）

星の内部で合成された元素（黄）

超新星爆発の際に合成された元素（赤）



活動3：元素の周期表による分類

指輪：金 Au	ドリルの刃のコーティング：チタン Ti	子ども用風船の中の気体：ヘリウム He	フライパンの素材：ニッケル Ni
軽量ボタン電池：リチウム Li	自動車の点火プラグ：白金 Pt	銅の導線：銅 Cu	ヨウ素液：ヨウ素 I
水筒の水：水素 H	古い調理用フライパン：アルミニウム Al	鉛筆の芯：炭素 C	農業用硫黄：硫黄 S
清涼飲料水の缶：アルミニウム Al	腕時計：チタン Ti	メダル：銀 Ag	パイプ：鉛 Pb
亜鉛合金鉛筆削り：亜鉛 Zn	さびた古い釘：鉄 Fe	温度計：ガリウム Ga	マッチ箱：リン P



ビッグバン直後の元素（青）
星の内部で合成の元素（黄）
超新星爆発の際の元素（赤）



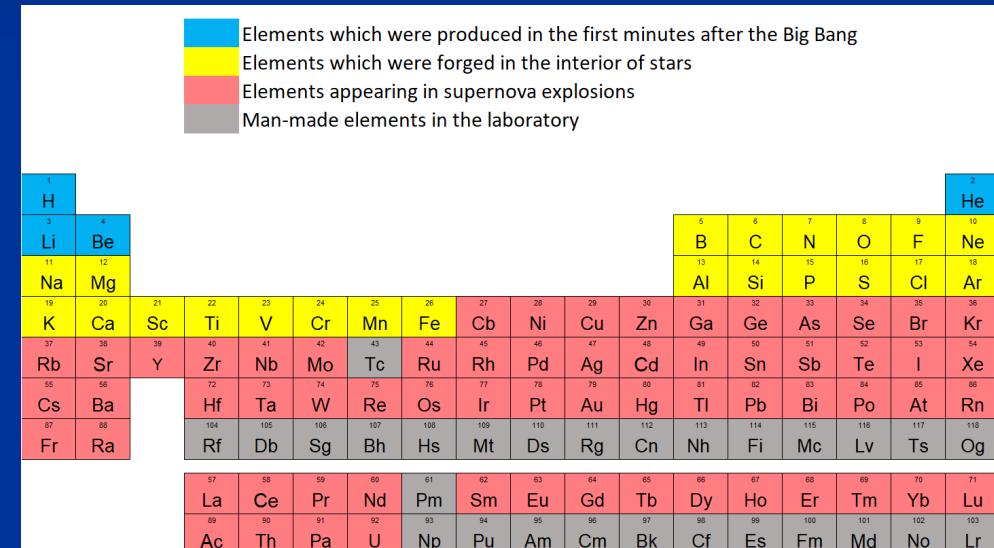
活動4：星の子ども

人体を組成している主要な元素：

酸素、炭素、水素、窒素、カルシウム、リン、カリウム、硫黄、ナトリウム、塩素、鉄、マグネシウム

その他の元素：フッ素、
亜鉛、銅、ケイ素、バナジウム、マンガン、ヨウ素、ニッケル、モリブデン、クロム、コバルト

重要な元素：リチウム、カドミウム、ヒ素、スズ



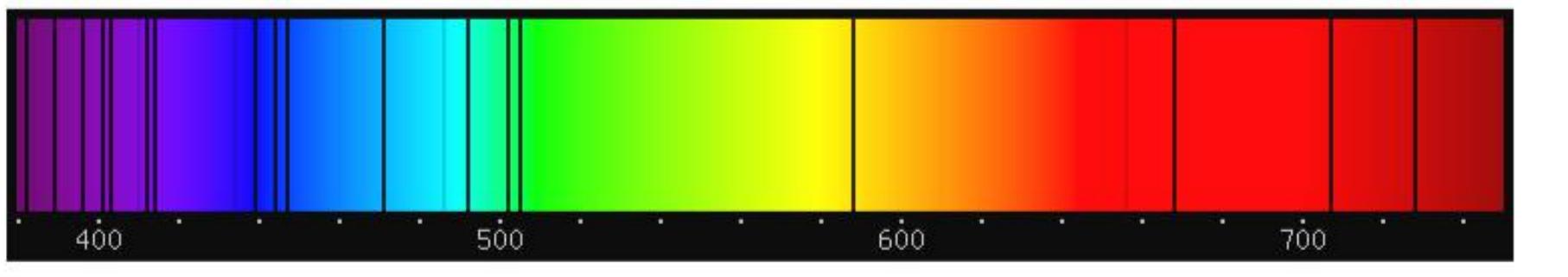
ヘリウムを除き、主要元素はすべて星の内部で合成されたものである。

私たちはみな、星の子どもである。



太陽は第一世代ではない

第一世代の星は短命で、現存していないだろう。吸収線として水素、ヘリウムのみ、もしかするとリチウムがあるのみだろう。

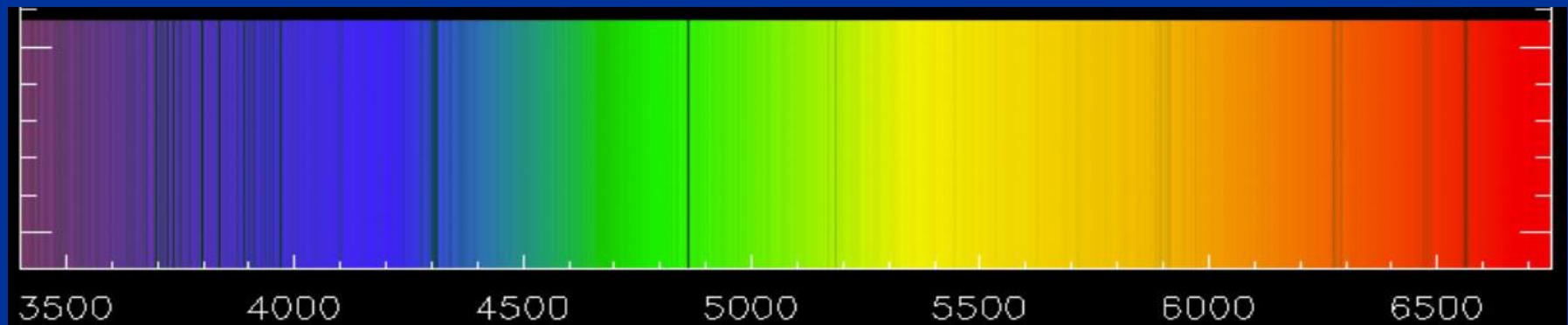


第一世代の星のスペクトルの想像図



太陽は第一世代ではない

より多くの元素をもつ星を生んだ星間雲には、超新星残骸が入っている。



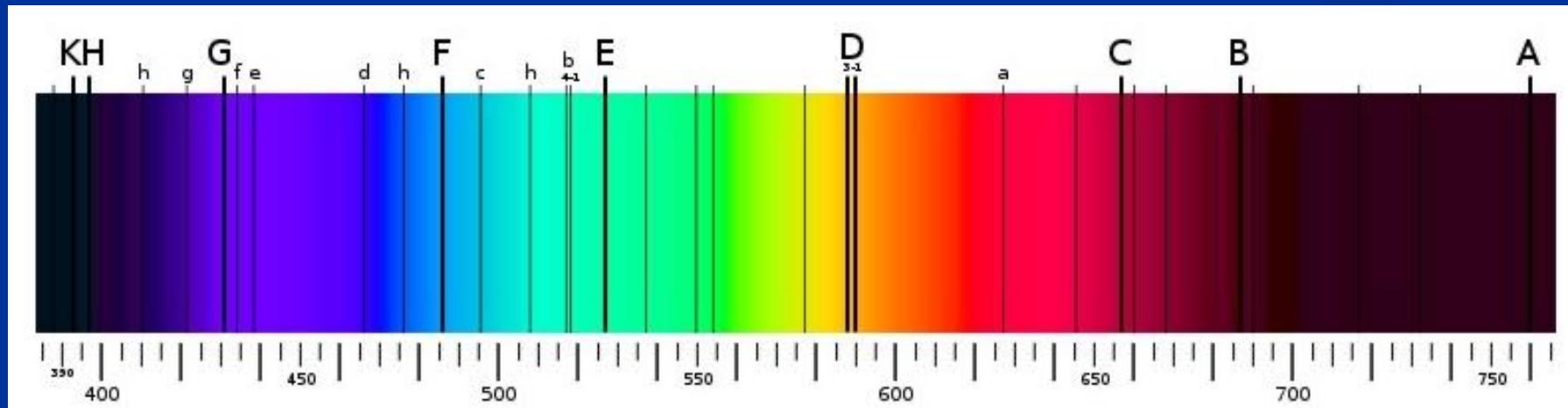
第二世代の星のスペクトル

水素と炭素の吸収線からなる、非常に古い恒星 SMSS J031300.36-670839.3



太陽は第一世代ではない

太陽系には、超新星爆発後に検出される多くの元素が見つかっている。太陽は複数の超新星爆発の世代を重ねた星間雲から生まれたと思われる。いわば「第三世代」の星といえよう。



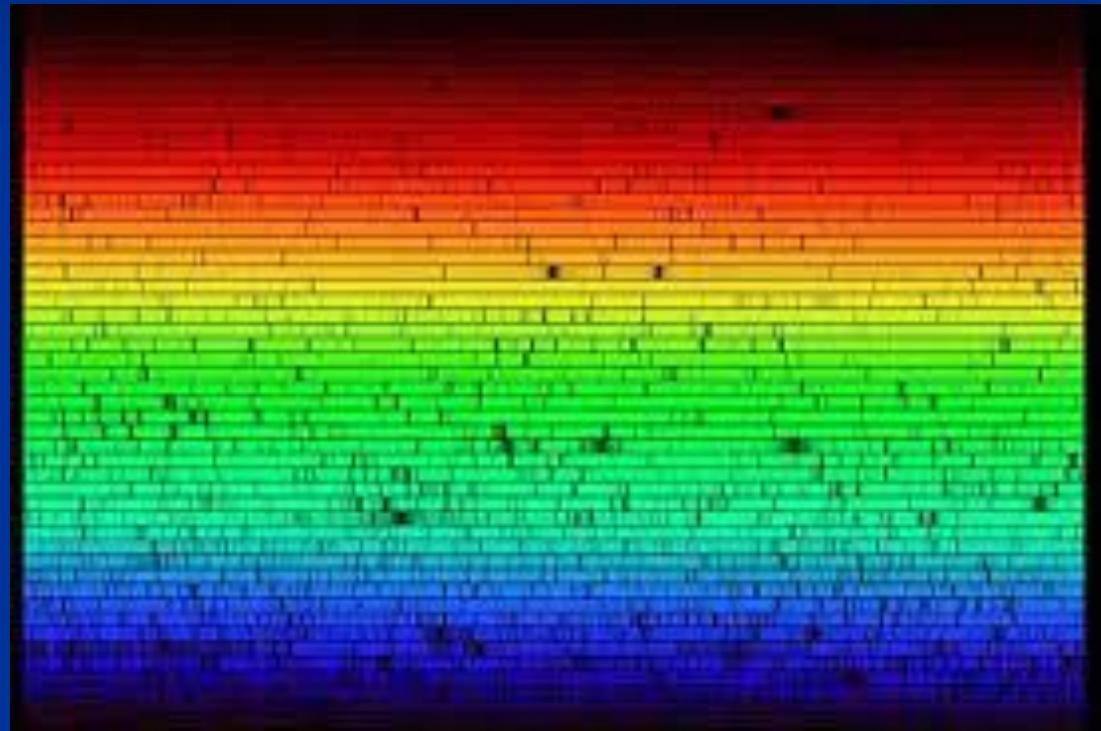
様々な吸収線が入っている、太陽のスペクトル



アクティビティ5：太陽のフラウンホーファー線

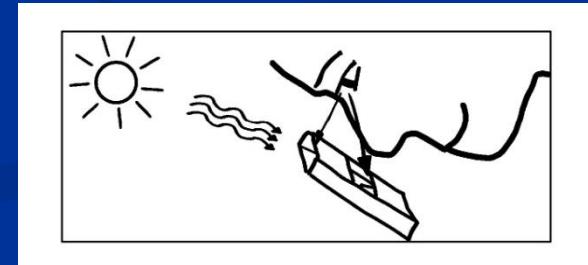
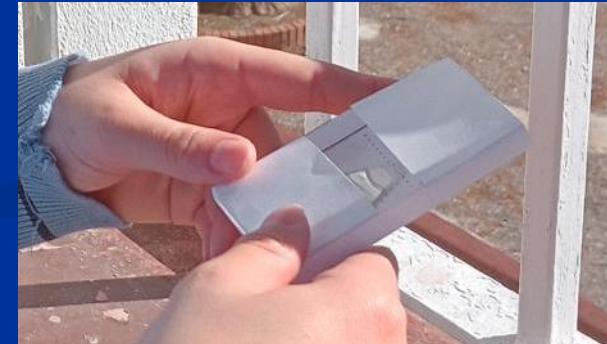
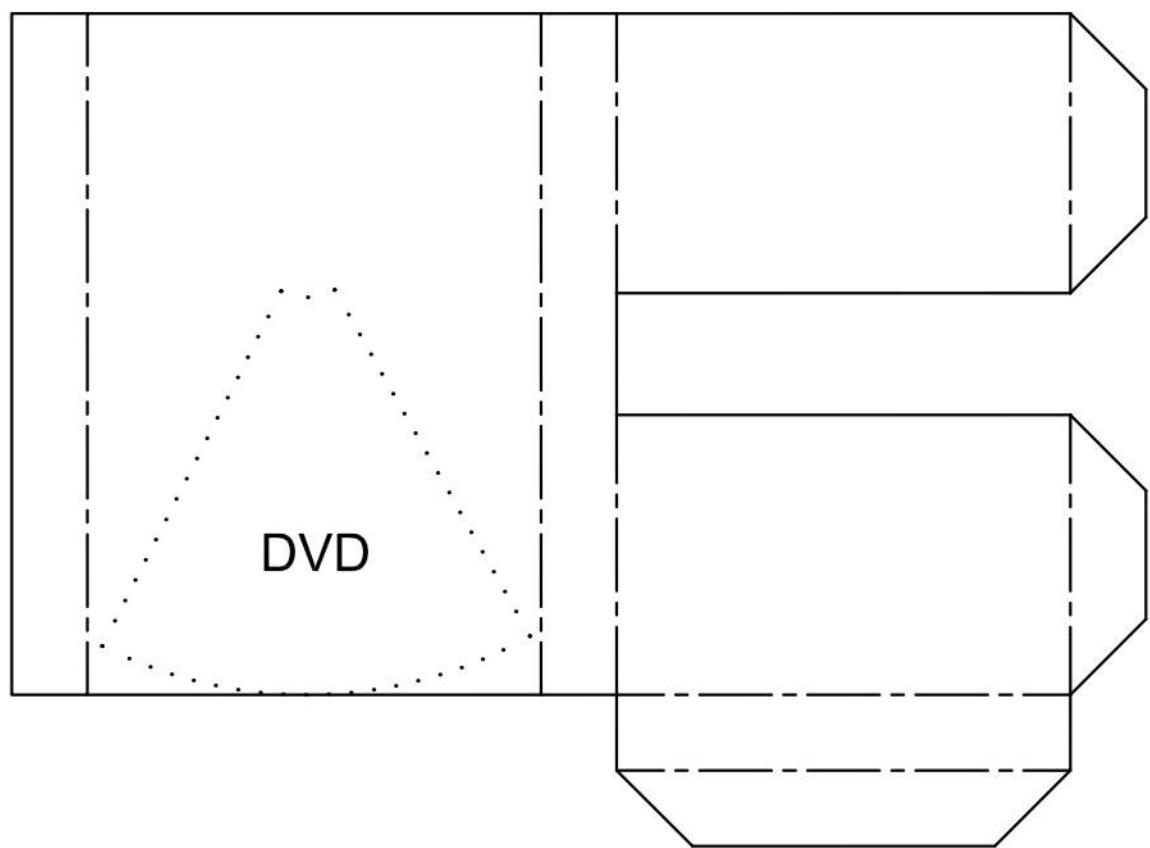
太陽のスペクトルは連続的で、フラウンホーファー線と呼ばれる大気中に含まれる化学元素に対応する暗線があります。

これらは、DVDに映る太陽光の反射で肉眼で確認することができます。多くのFe線が観測され、Mg三重項(緑)、Na二重項(黄)



アクティビティ5：太陽のフラウンホーファー線

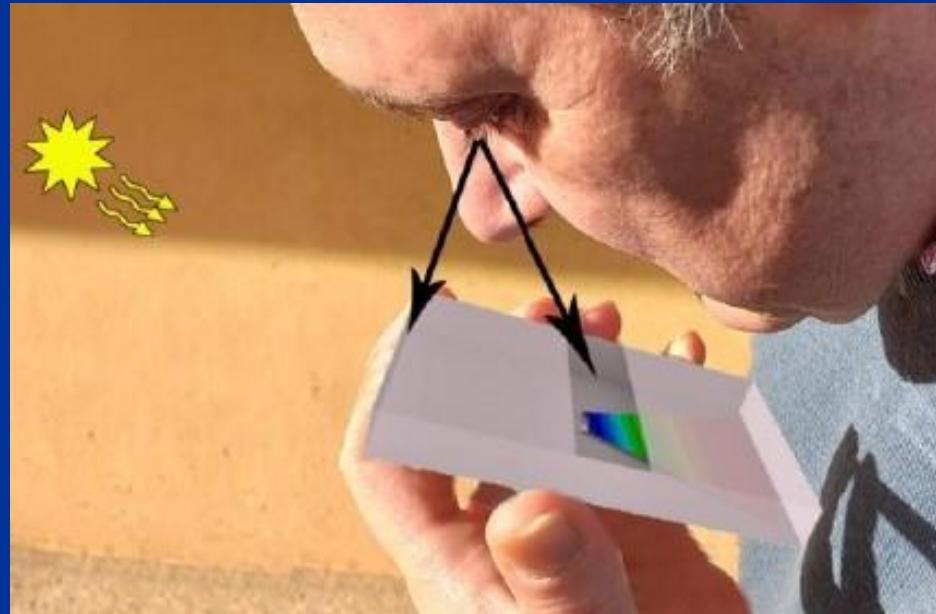
テンプレートを切り取り、DVD の $1/8$ を接着し、DVD が入った箱を点線に沿って折りながら組み立てます。



アクティビティ5：太陽のフラウンホーファー線

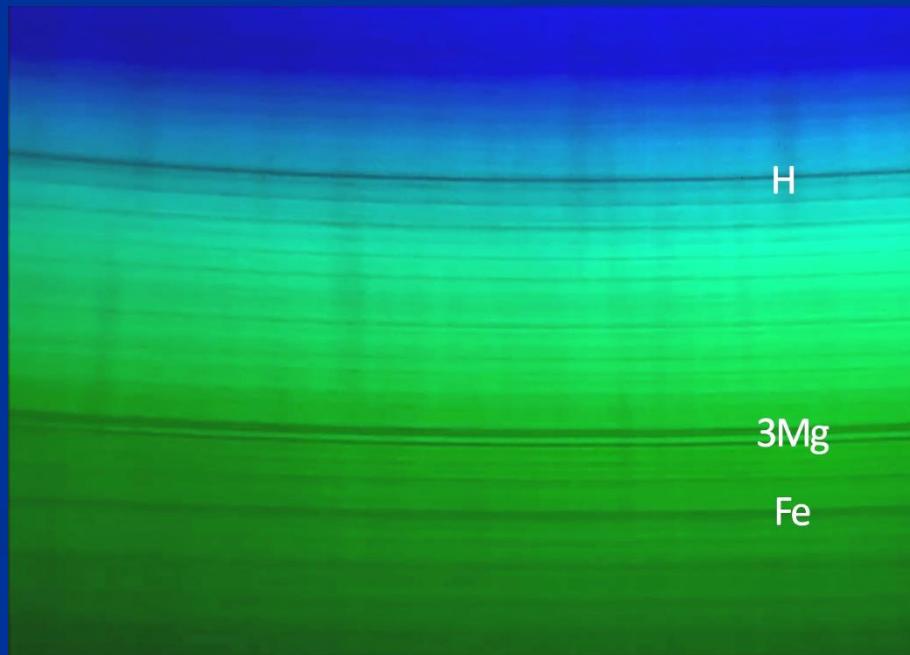
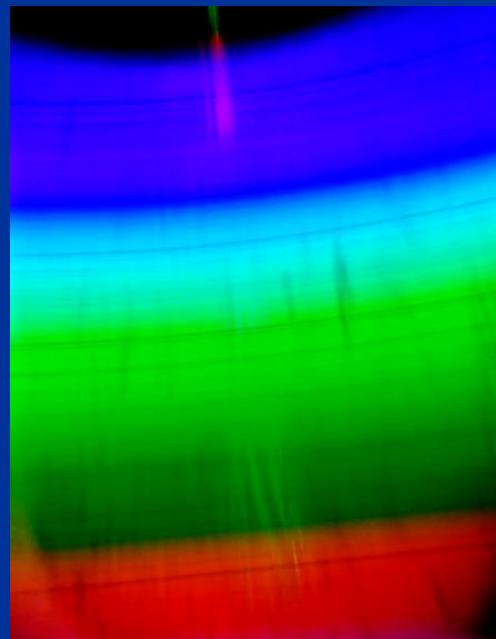
晴れた日には外に出て太陽に向かってください。

写真に見られるように、ボックスの上端が目の高さになるように、顔の前にボックスを置きます。 中の DVD を見て、DVD 上に太陽の明るく色とりどりの放射状の反射が見えるまでゆっくりと移動します。

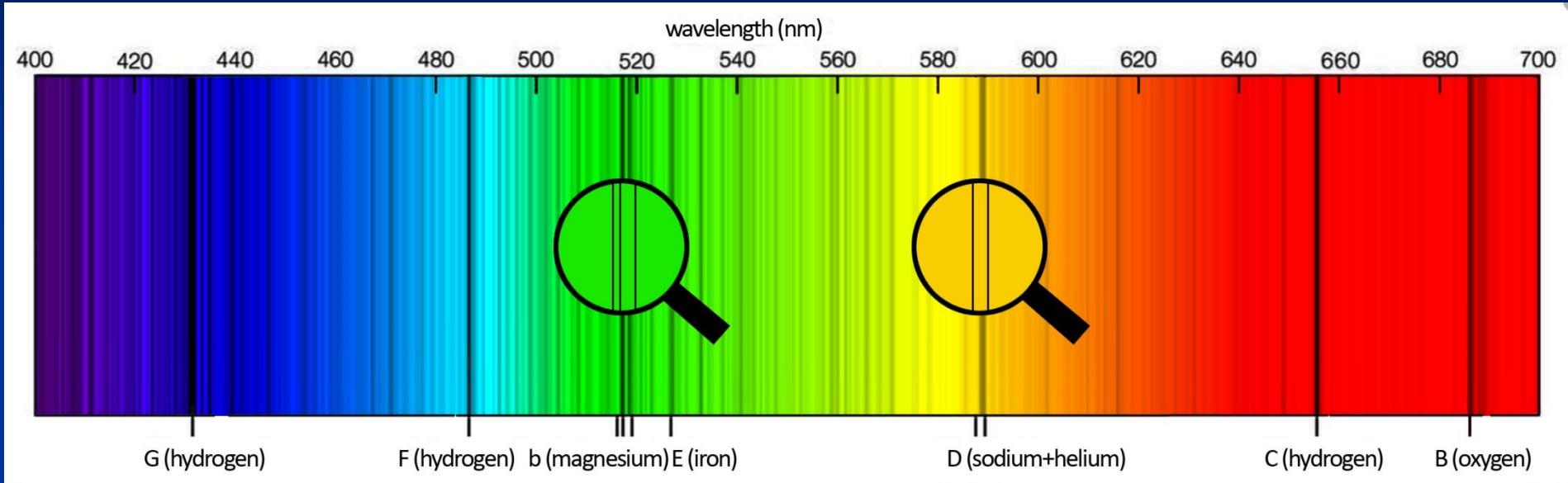


アクティビティ5：太陽のフラウンホーファー線

常に反射を見ながら顔をボックスに近づけると、より広く見えます。目が窓に触れそうになると、色の領域に細くて鋭い黒い線が見えます。それらは、太陽に含まれる化学元素のスペクトル線です。



アクティビティ5：太陽のフラウンホーファー線



多くの線が見られ、その中には他の線よりも濃い線もあります。青で見られる主な縞は水素によるもので、緑では、マグネシウムの三重項である 3 本の非常に密集した縞がよく見えます。もう 1 つの別の縞は鉄に由来します。黄色の部分にはヘリウムとナトリウムによる二重の縞模様が見えます。赤い部分には強烈な水素が見えます。

ハビタブル・ゾーン（生命居住可能領域）

中心星から岩石惑星表面への放射を考えた時、ハビタブル・ゾーンとは、そこで液体の水が存在できるような距離範囲のことである。

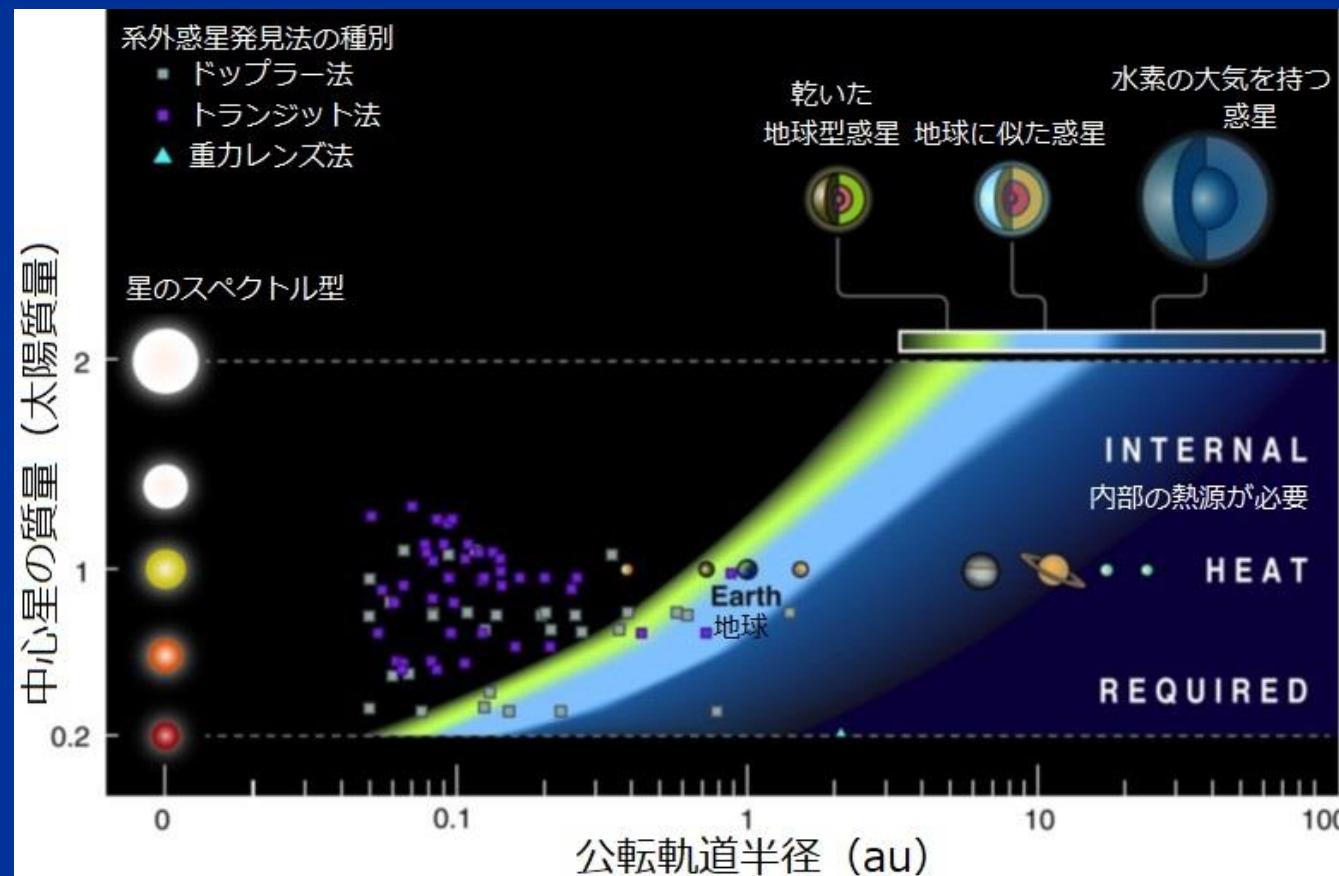
（炭素を基本とした生命体を考えており、水が必須となる）

惑星質量として地球質量の 0.5 倍から 10 倍の範囲、水の三重点（氷、水、水蒸気が共存できる）となる 6.1 hPa 以上の大気圧と 273.16 K の温度が必要である。



ハビタブル・ゾーン（生命居住可能領域）

ハビタブル・ゾーンは中心星の質量による。質量が大きければ温度や光度が高くなり、ハビタブル・ゾーンは、より遠方に位置するようになる。



生命居住可能となるための他の条件

惑星軌道の中心星からの距離は生命居住可能としての必要条件である。実際に生命存在のためには、十分条件ではない。

例：金星と火星



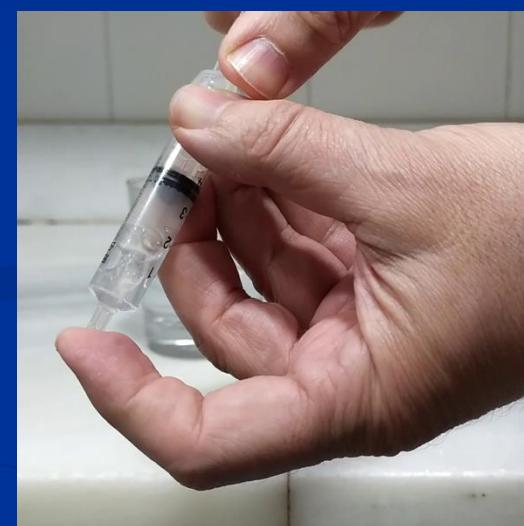
惑星質量が十分大きく、大気を保持できなければならぬ。

火星は現在、生命居住可能とはいえない。十分な重力がなく、初期の10億年間に持っていたであろう大気と表面の水を失った。

活動 6: 火星表面に液体の水は?

火星の大気圧は大変低い（地球の 0.7%）。それにもかかわらず、火星の極冠上空に水の雲が発生する。ではなぜ、表面に液体の水が見られないのか。

沸騰近くに熱した水をシリンダーに入れる。



ピストンを引いてシリンダー内の気圧を減じると、水は沸騰し、湯気になり、やがて消える。

火星の大気圧を再現するには、このピストンを 9 m も引かないといけない。

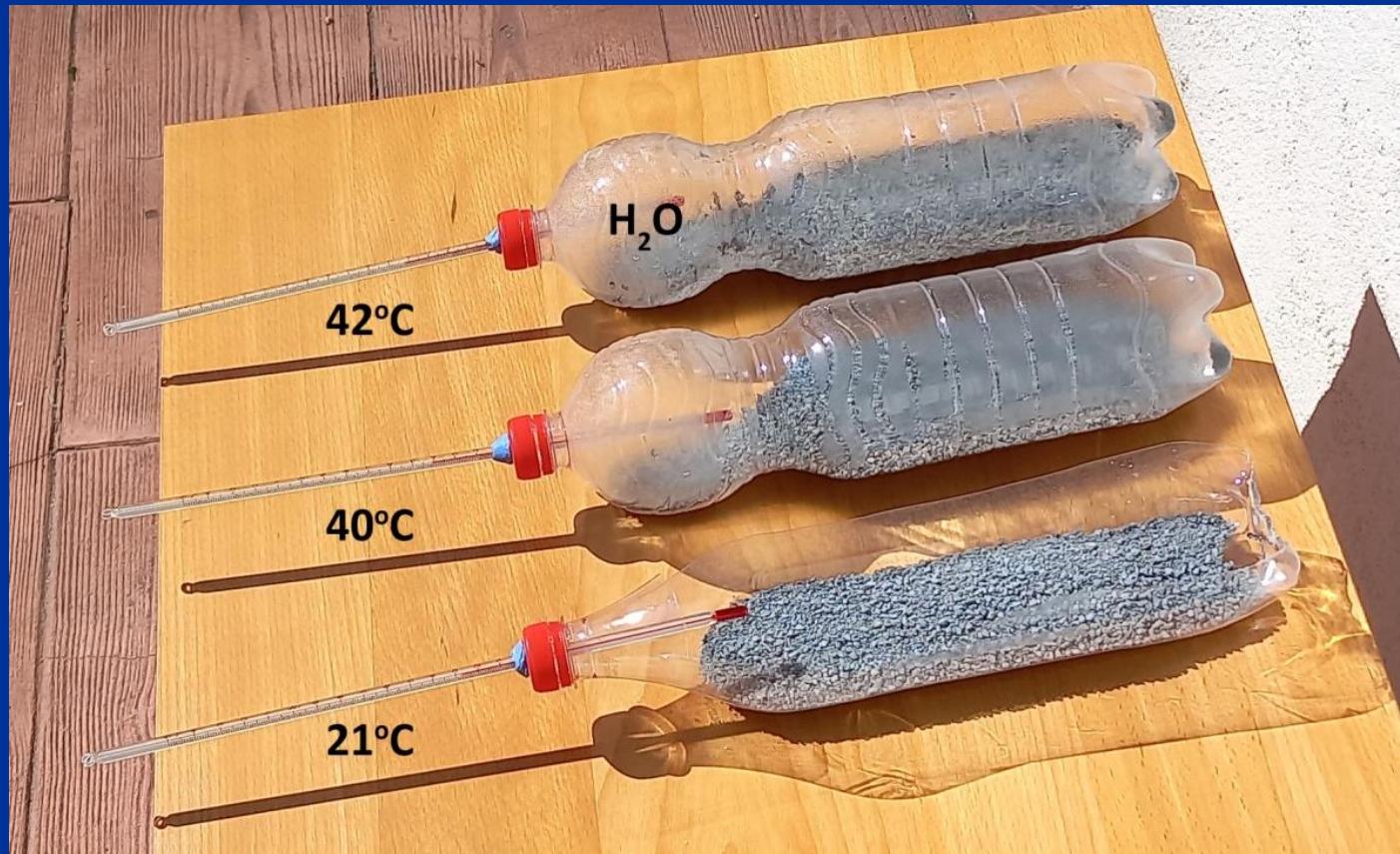
アクティビティ7：温室効果

空のペットボトル2本と、縦に半分に切ったペットボトル1本に、濃い土を入れました。それぞれのボトルの栓に温度計を挿入した。カットしたペットボトルは雲のない惑星を、最初のペットボトル全体は雲のある惑星を、最後のペットボトルには数滴の水を入れて、水蒸気のある大気を再現しました。



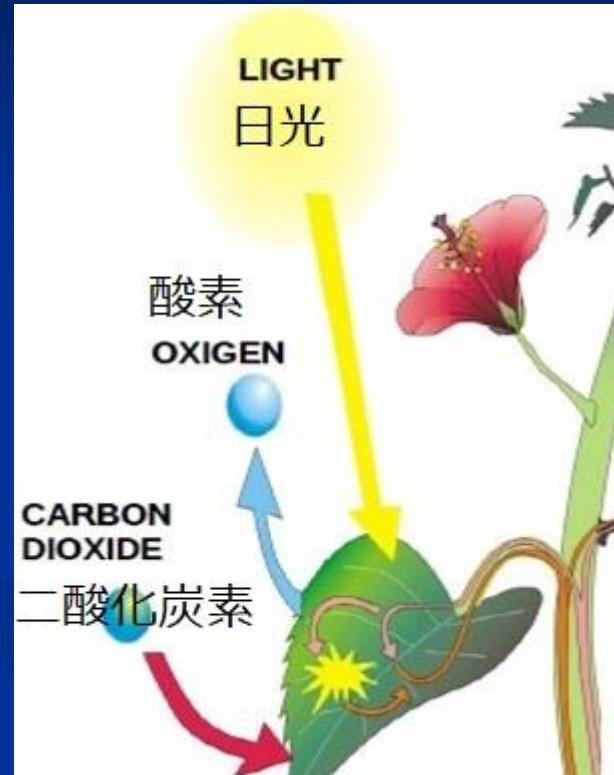
アクティビティ7：温室効果

ボトルを太陽の下に置き、5分ごとに内部の温度を測定します。温室効果がどのように影響しているかを調べるために、測定値を書き留めます。



光合成：酸素の生成

植物やある種のバクテリアは、二酸化炭素と水から、太陽光を利用して炭水化物や酸素を合成する。



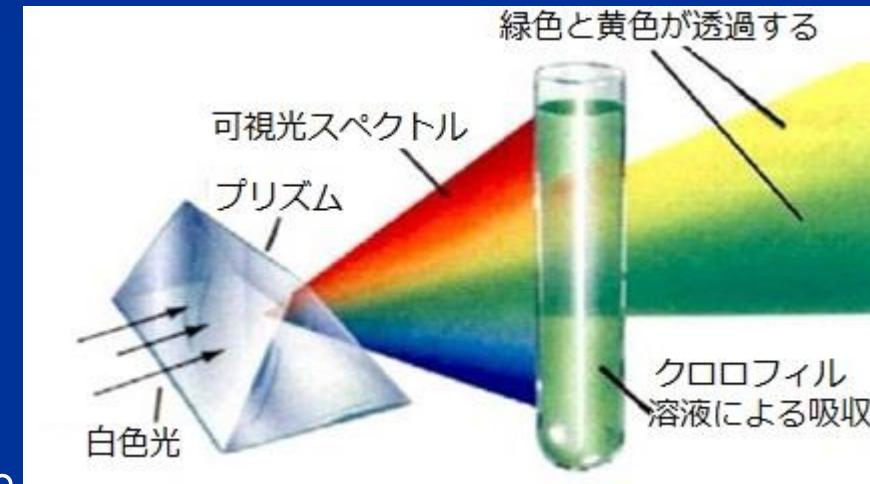
光合成色素（クロロフィルなど）が、光エネルギーを化学エネルギーに変換している

光合成：なぜ葉は緑色か

植物が吸収した光は種々の化学反応に使われる。一方、反射光の波長特性から、光合成色素がどのような色に見えるかが決まる。

光合成色素のひとつ、クロロフィルは可視光域で吸収帯が2つある。

青色帯 (400-500 nm) と
赤色帯 (600-700 nm) である。



両者の間の波長帯である
緑色の領域 (500-600 nm) が残る。

光合成：酸素の生成

色素に光が当たると、たたき出された電子が移動していく。水は分子間を移動する電子の供給源となっている。最終的に水分子は解離して酸素が生成される。これは光合成の明反応（光化学反応）と呼ばれるものである。光が当たっていない時、炭水化物を生成する暗反応（炭素固定反応）が行われる。



活動8：光合成による酸素の生成



透明なガラス瓶2つを用意し、その上にかぶせる青と赤の色セロファンを準備する。

活動8：光合成による酸素の生成



パンチを使い、ホウレンソウなどの菜っ葉の、葉脈部分を避けて円形のくりぬきを作る。
ガラス瓶それぞれに10個入れる。

活動8：光合成による酸素の生成



水1リットルに炭酸水素ナトリウム 25 g を溶かした水溶液を作り、ガラス瓶それぞれに 20 ml を入れる。葉の円形くり抜きを炭酸水素ナトリウム水溶液によく浸す。10 ml 使い捨て注射器に水溶液を入れ、葉をよく浸す。

活動8: 光合成による酸素の生成

注射器内の空気をできるだけ除き、水溶液中の葉だけにするようとする。

注射器の口を指でしっかりと押さえて真空を保つようとする。葉の組織中の空気を炭酸水素ナトリウム水溶液で置き換え、それを葉の光合成のための炭素の供給源とするようとする。



活動8: 光合成による酸素の生成

葉のくり抜きをガラス瓶2つに入れる。
ガラス瓶にはそれぞれ、赤と青の色セロ
ファンをかぶせる。

70 W 以上の電球でガラス瓶を照らす。
側面は紙で覆うとよい。電球の照射の距
離を同じにする。

電球が熱を発しないよう、LEDを使うの
がいいだろう。



活動8: 光合成による酸素の生成

照射を始めたら、葉の
くり抜きが浮くまでの
時間を測り始める。

光合成の活動度の間接
的な測定となる。



活動8: 光合成による酸素の生成

5分程度待つと、葉のくり抜きが浮き始める。電球の明るさや、その距離に応じて、これは変わる。



活動8: 光合成による酸素の生成

照射が始まると、生成した酸素の泡ができる、それによって浮くようになる。

照射光の色によって、この時間が変わる。
青色光の方が早い。青色光の方が高エネルギーであり、化学反応でも効率が高い。



活動9: 極端な環境下の生命

イースト菌はブドウ糖をエチルアルコールと二酸化炭素に変換する。

発酵はエネルギー効率の低い過程である一方、呼吸は効率が高く、進化の過程でより最近に出てきたものである。



活動9：極端な環境下の生命

ここでは、二酸化炭素が存在することは、発酵があると考える。このようにして生命存在を確かめていくことができる。

以下の実験ではすべて、水があるところでの生命活動がどうなるか、という視点で行う。



活動9：極端な環境下の生命

用意するもの：

パン用のイーストをスプーン1杯

(手にいれやすい生きた微生物)

あたたかい水 (22°Cから27°C) をコップ1杯

微生物の栄養分として砂糖をスプーン1杯

統制群用と極端な環境下の対照群用のものとして、同じもの用意する。



活動9：極端な環境下の生命

統制群実験：

ガラス瓶に、イーストと砂糖を温水に溶かす。空気を抜いたプラスチック袋にすばやく入れ、中の空気を抜いて閉める。

中に空気を残さないようにするのが重要。



活動9：極端な環境下の生命

統制群実験：

15-20分すると、二酸化炭素の泡が出て、袋が膨らむのがわかる。

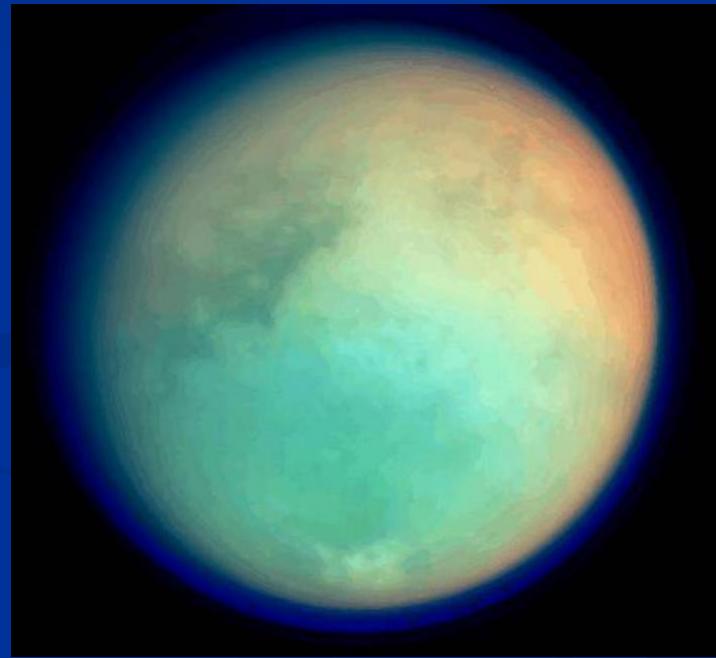
二酸化炭素の泡が出ることは、微生物が生きていることを示している。



活動9：極端な環境下の生命

「アルカリ惑星」で試す
(アンモニアを含む大気を持つ
海王星やタイタンを想定)：

炭酸水素ナトリウム水溶液 (pH 8.4) や
アンモニア水 (pH 11) で試す。



タイタン：NASA 提供

泡が出れば、生命存在



活動9：極端な環境下の生命

「塩辛い惑星」で試す
(火星やガニメデを想定) :

食塩水で試す。



ガニメデ : NASA 提供

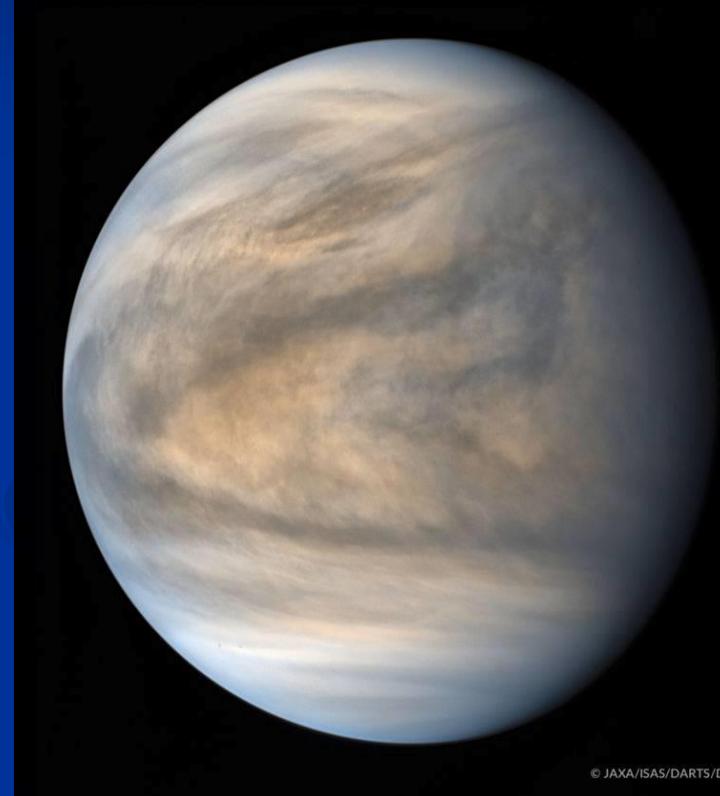
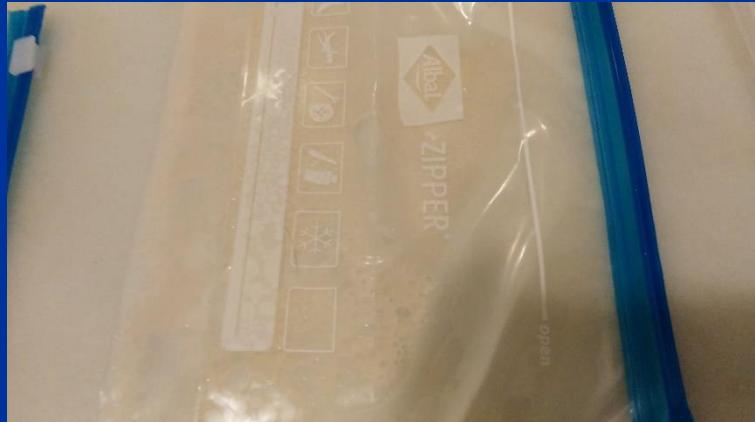
泡が出れば、生命存在



活動9：極端な環境下の生命

「酸性惑星」で試す
(硫酸の雨が降る
金星を想定) :

酢 (pH 2.9) や
レモン水 (pH 2.3) で試す。



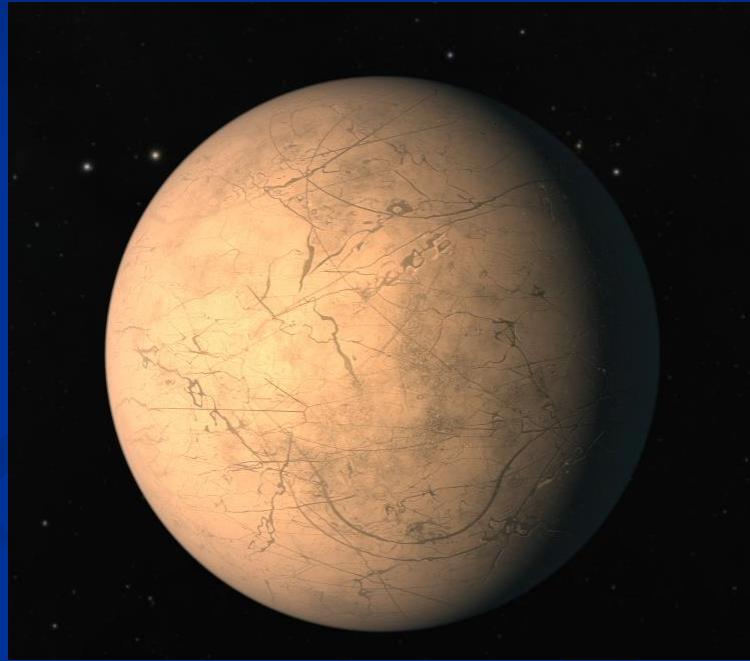
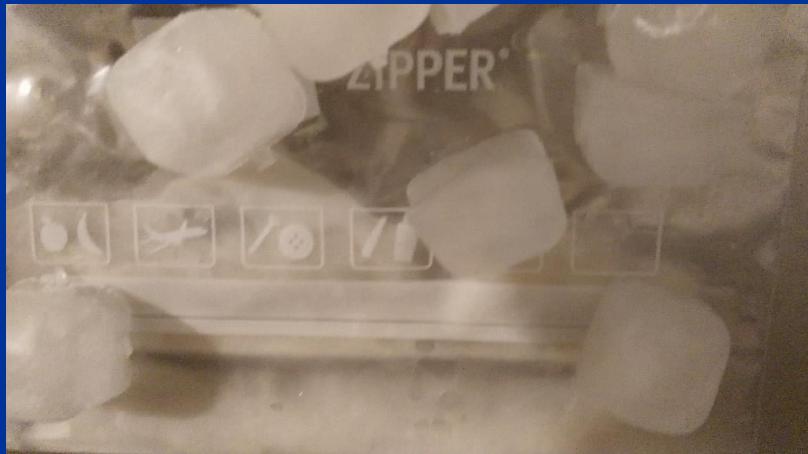
金星：NASA 提供
泡が出れば、生命存在



活動9：極端な環境下の生命

「氷の惑星」で試す
(エウロパや
Trappist 1h を想定) :

氷をたくさん入れるか冷凍庫を
使って試す。



Trappist 1h の想像図

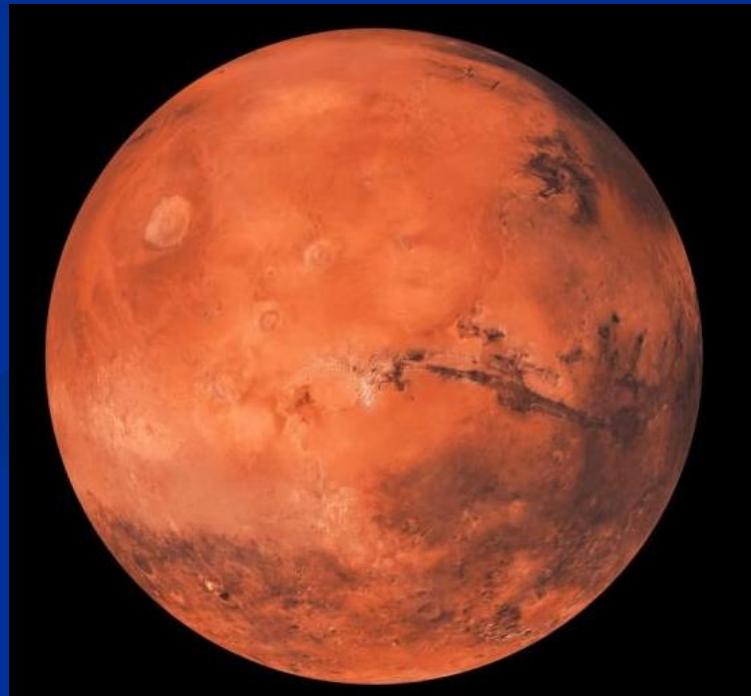
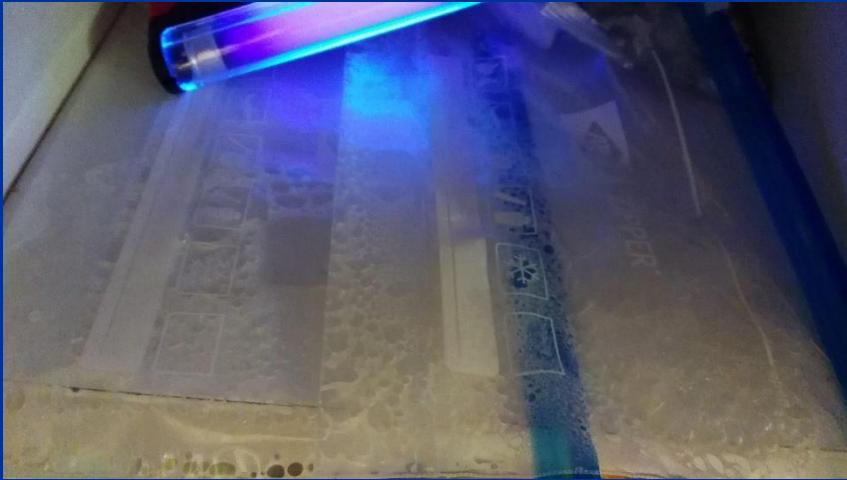
泡が出れなければ、生命なし



活動9：極端な環境下の生命

「紫外線環境下の惑星」で試す
(火星を想定) :

UV光を照射して試す。



火星 : iStock 提供

泡が出れなければ、生命なし



活動10：第2の地球を探す

地球は生命存在の惑星として唯一知られているものである。似た環境下にある系外惑星を見てみよう。何に注目すべきか。

- 惑星の半径と質量
- ハビタブル・ゾーン
- 中心星



系外惑星の半径と質量

惑星の半径と質量は、その惑星が適切な密度を持っているかを知る情報になる。

ケプラー衛星での基準：

- 地球サイズの惑星として、地球半径の2倍より小さいもの。
- スーパー・アースとしての質量の上限は、地球質量の10倍。

ハビタブル・ゾーン

主系列星は光度と温度が相関している。
高温の星ほど光度が大きく、それに伴つてハビタブル・ゾーンが遠くになる。

スペクトル型	表面温度 K	ハビタブル・ゾーン au
O6V	41000	450-900
B5V	15400	20-40
A5V	8200	2.6-5.2
F5V	6400	1.3-2.5
G5V	5800	0.7-1.4
K5V	4400	0.3-0.5
M5V	3200	0.07-0.15



中心星の質量

星の一生は、星の質量に依存する。水素の核融合によるエネルギー放出は質量による。主系列星の寿命は、質量を光度で割った値に比例する。太陽の寿命を単位とすると、主系列星としての寿命は、以下のように表現できる。

$$t^*/t_s = (M^*/M_s) / (L^*/L_s)$$

主系列星ならば、光度-質量関係は : $L \propto M^{3.5}$

$$t^*/t_s = (M^*/M_s) / (M^{*3.5}/M_s^{3.5}) = (M^*/M_s)^{-2.5}$$

$$t^*/t_s = (M_s/M^*)^{2.5}$$

中心星の質量

太陽の寿命 $t_s = 10^{10}$ 年 を使うと：

$$t^* \sim 10^{10} \cdot (M_s/M^*)^{2.5} \text{ 年}$$

主系列星として最低 3×10^9 年 (30億年) の時間を確保するための、星の質量の上限を求める。

$$M^* = (10^{-10} \times t)^{-0.4} M_s$$

$$M^* = (10^{-10} \times 3000000000)^{-0.4} M_s$$

$$M^* = < 1.6 M_s$$

第2の地球を探す

系外惑星名	質量 (地球質量)	半径 (地球半径)	中心星からの 距離 (au)	中心星の質量 (太陽質量)	中心星の スペクトル型
Beta Pic b	4100	18.5	11.8	1.73	A6V
HD 209458 b	219.00	15.10	0.05	1.10	G0V
HR8799 b	2226	14.20	68.0	1.56	A5V
Kepler-452 b	不明	1.59	1.05	1.04	G2V
Kepler-78 b	1.69	1.20	0.01	0.81	G
Luyten b	2.19	不明	0.09	0.29	M3.5V
Tau Cet c	3.11	不明	0.20	0.78	G8.5V
TOI 163 b	387	16.34	0.06	1.43	F
Trappist-1 b	0.86	1.09	0.01	0.08	M8
TW Hya d (未確認)	4	不明	24	0.7	K8V
HD 10613 b	12.60	2.39	0.09	1.07	F5V
Kepler-138c	1.97	1.20	0.09	0.57	M1V
Kepler-62f	2.80	1.41	0.72	0.69	K2V
Proxima Centauri b	1.30	1.10	0.05	0.12	M5V
HD 10613 b	12.60	2.39	0.09	1.07	F5V

第2の地球を探す

系外惑星名	質量 (地球質量)	半径 (地球半径)	中心星からの 距離 (au)	中心星の質量 (太陽質量)	中心星の スペクトル型
Beta Pic b	4100	18.5	41.8	4.73	A6V
HD 209458 b	219.00	15.10	0.05	1.10	G0V
HR8799 b	2226	14.20	68.0	1.56	A5V
Kepler-452 b	不明	1.59	1.05	1.04	G2V
Kepler-78 b	1.69	1.20	0.01	0.81	G
Luyten b	2.19	不明	0.09	0.29	M3.5V
Tau Cet c	3.11	不明	0.20	0.78	G8.5V
TOI 163 b	387	16.34	0.06	1.43	F
Trappist-1 b	0.86	1.09	0.01	0.08	M8
TW Hya d (未確認)	4	不明	24	0.7	K8V
HD 10613 b	42.60	2.39	0.09	1.07	F5V
Kepler-138c	1.97	1.20	0.09	0.57	M1V
Kepler-62f	2.80	1.41	0.72	0.69	K2V
Proxima Centauri b	1.30	1.10	0.05	0.12	M5V
HD 10613 b	42.60	2.39	0.09	1.07	F5V

まとめ

- ハビタブル・ゾーンについて理解した。
- アストロバイオロジーの初步を理解した。
- 生命現象としての酸素や二酸化炭素の発生について理解した。
- 第2の地球の見分け方を理解した。



ありがとうございました

