

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

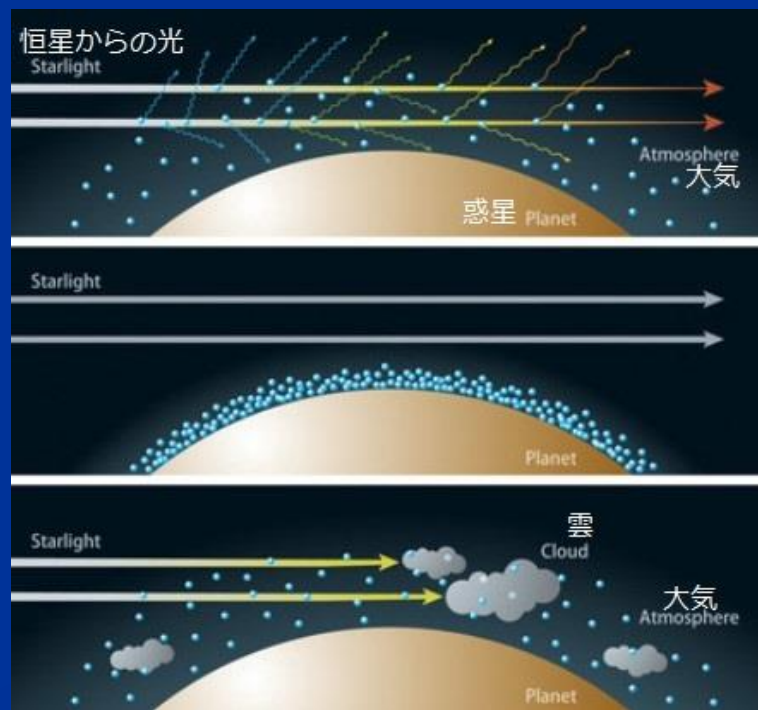
- 元素の周期表にある様々な元素の起源を知る。
- 生物が繁栄するために必要な環境を理解する。
- 地球外で生命が維持されるための方法を考える。



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	生徒の行動
大量のガスと少しのダストからなる星間雲があった。	全体がばらばらの集団になっている。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
抱きかかえる。

中心へガス役が集まり、周囲に輪に
なってダスト役が手を取り合って取り
囲む。ガスはすべて中心に集まるので
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

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、やがて地球型惑星となっていく。

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ていく。

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2：元素から見た星の進化

- 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											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	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 Fl	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2：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2：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3：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

Legend:

- 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																	2									
H																	He									
3	4											5	6	7	8	9	10									
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne									
11	12											13	14	15	16	17	18									
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar									
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36									
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cb	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr									
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54									
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe									
55	56											57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Cs	Ba											La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
87	88											89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Fr	Ra											Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118												
Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fi	Mc	Lv	Ts	Og												

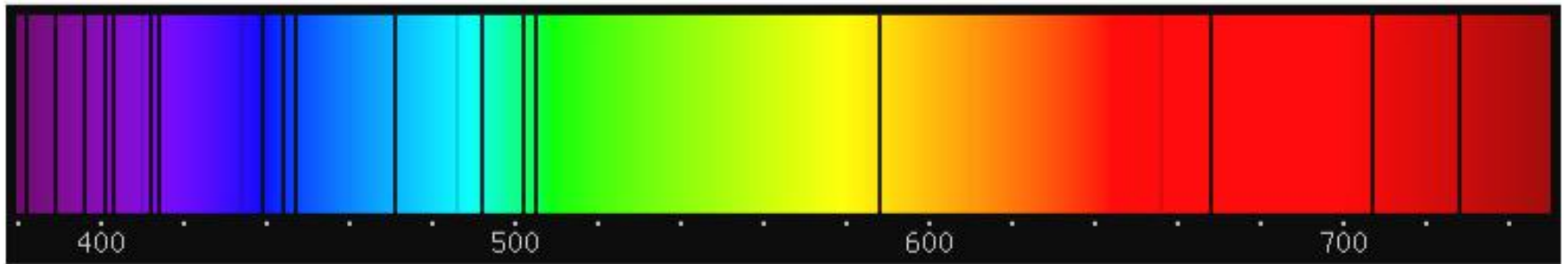
ヘリウムを除き、主要元素はすべて星の内部で合成されたものである。

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

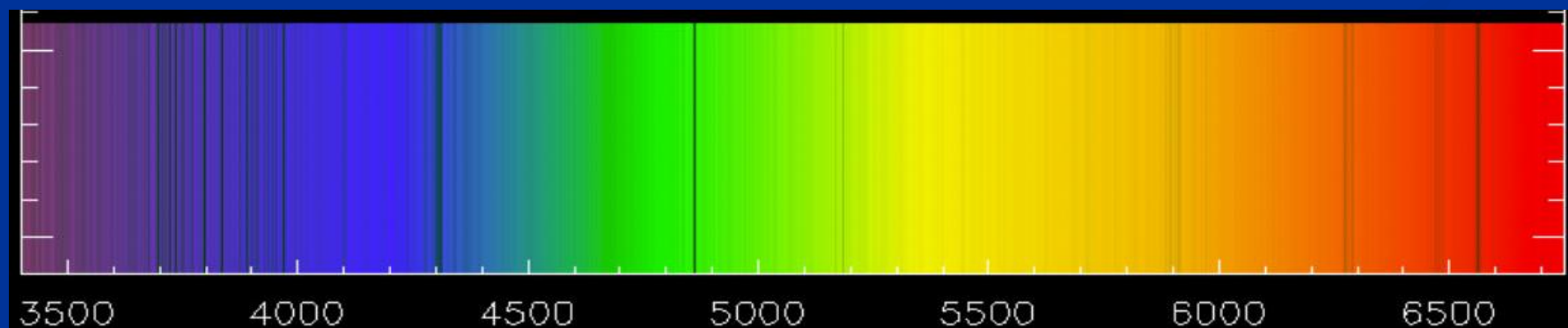
第一世代の星は短命で、現存していないだろう。吸収線として水素、ヘリウムのみ、もしかするとリチウムがあるのみだろう。



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。



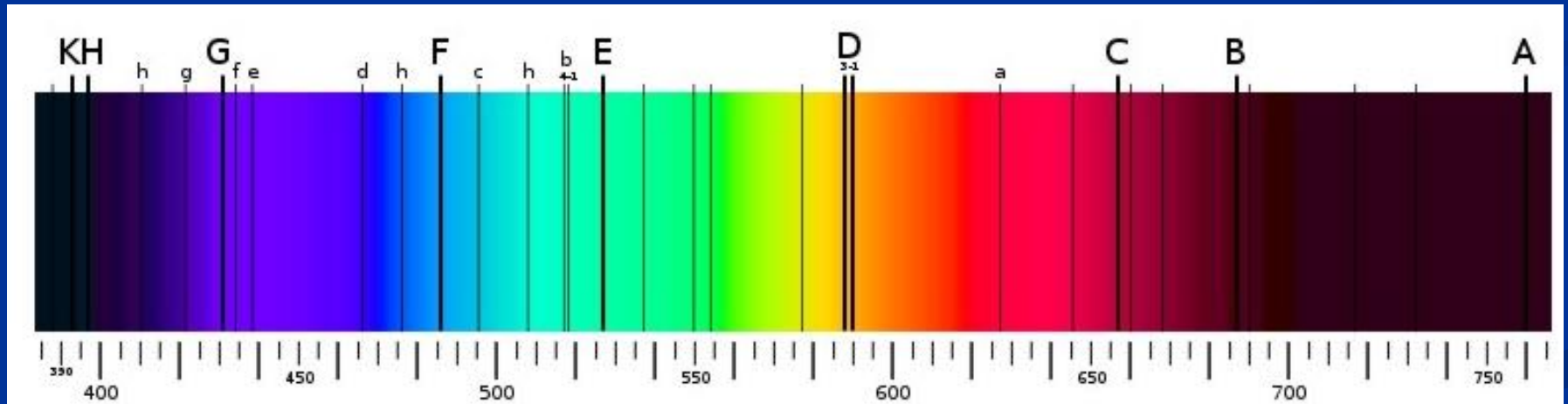
第二世代の星のスペクトル

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



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。

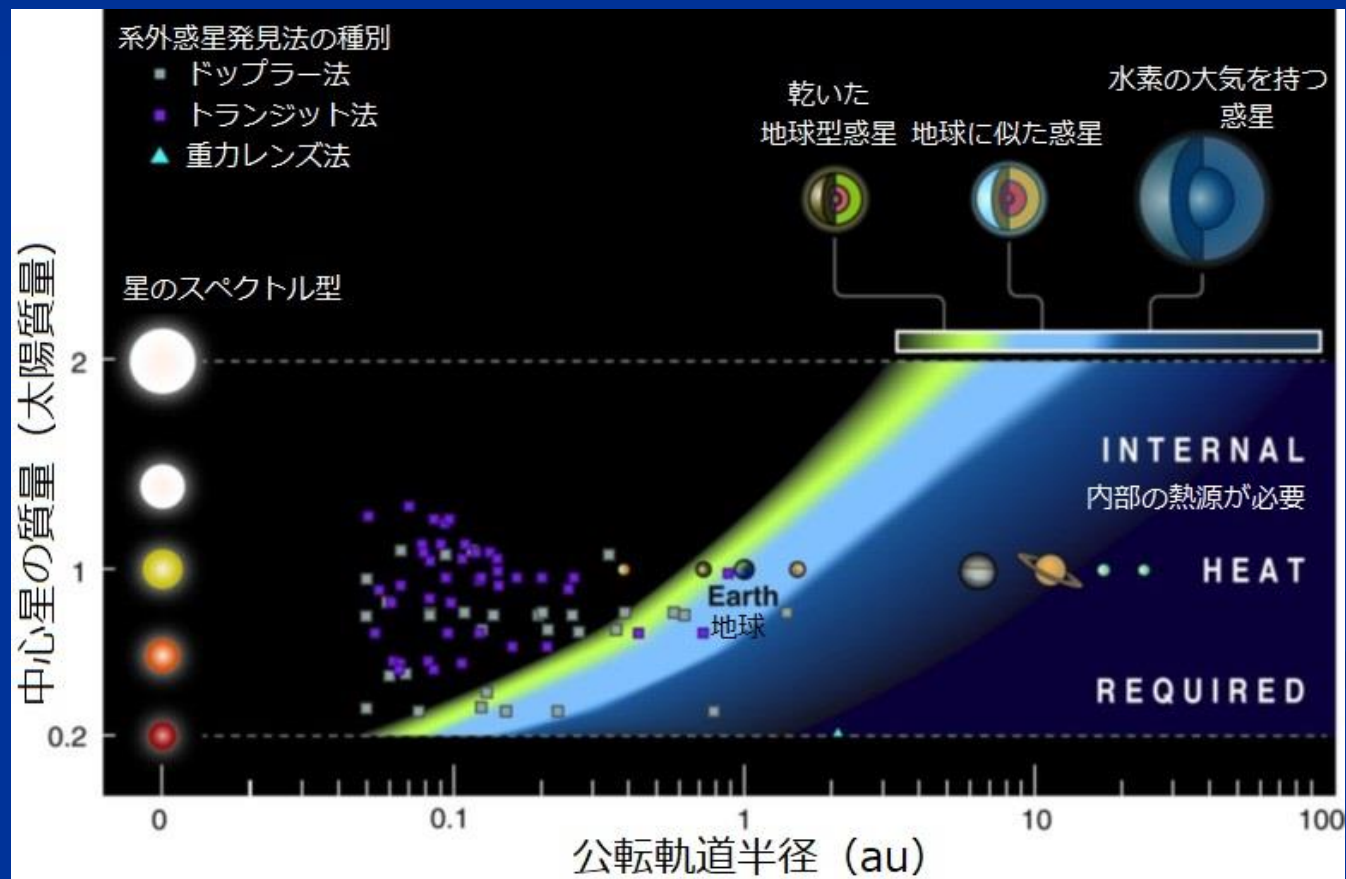
（炭素を基本とした生命体を考えており、水が必須となる）

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）

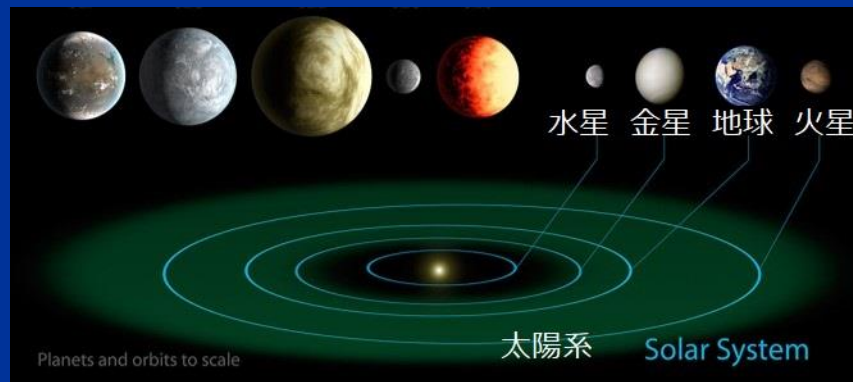
ハビタブル・ゾーンは中心星の質量による。質量が大きければ温度や光度が高くなり、ハビタブル・ゾーンは、より遠方に位置するようになる。



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



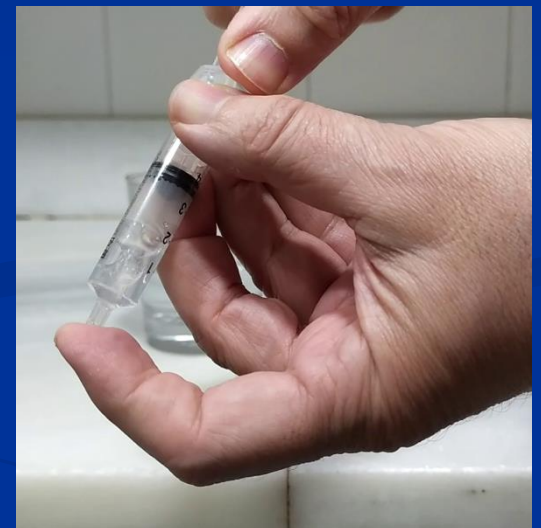
惑星質量が十分大きく、大気を保持できなければならない。

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 4: 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。

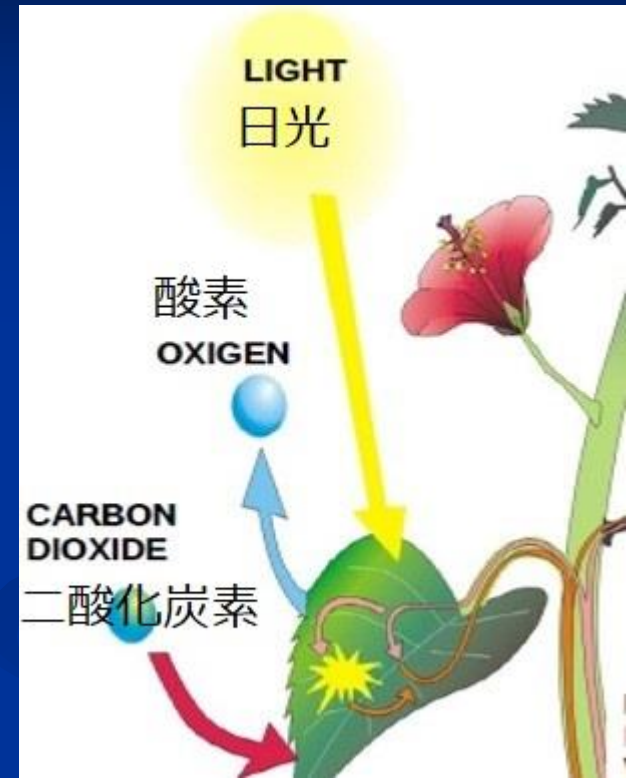
沸騰近くに熱した水をシリンダーに入れる。



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。

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。



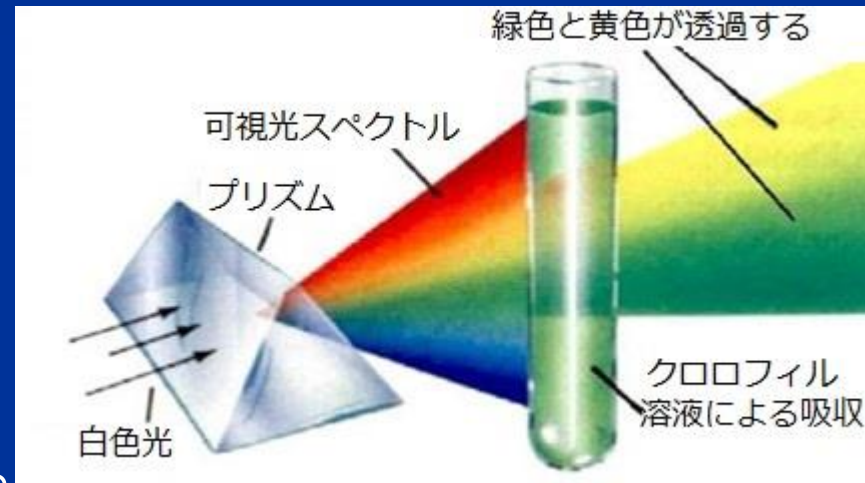
光合成色素（クロロフィルなど）が、光エネルギーを化学エネルギーに変換している

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
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5：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5：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5：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5：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できるようにする。

注射器の口を指でしっかり押さえて真空を保つようにする。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できるようにする。



活動5：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5：光合成による酸素の生成

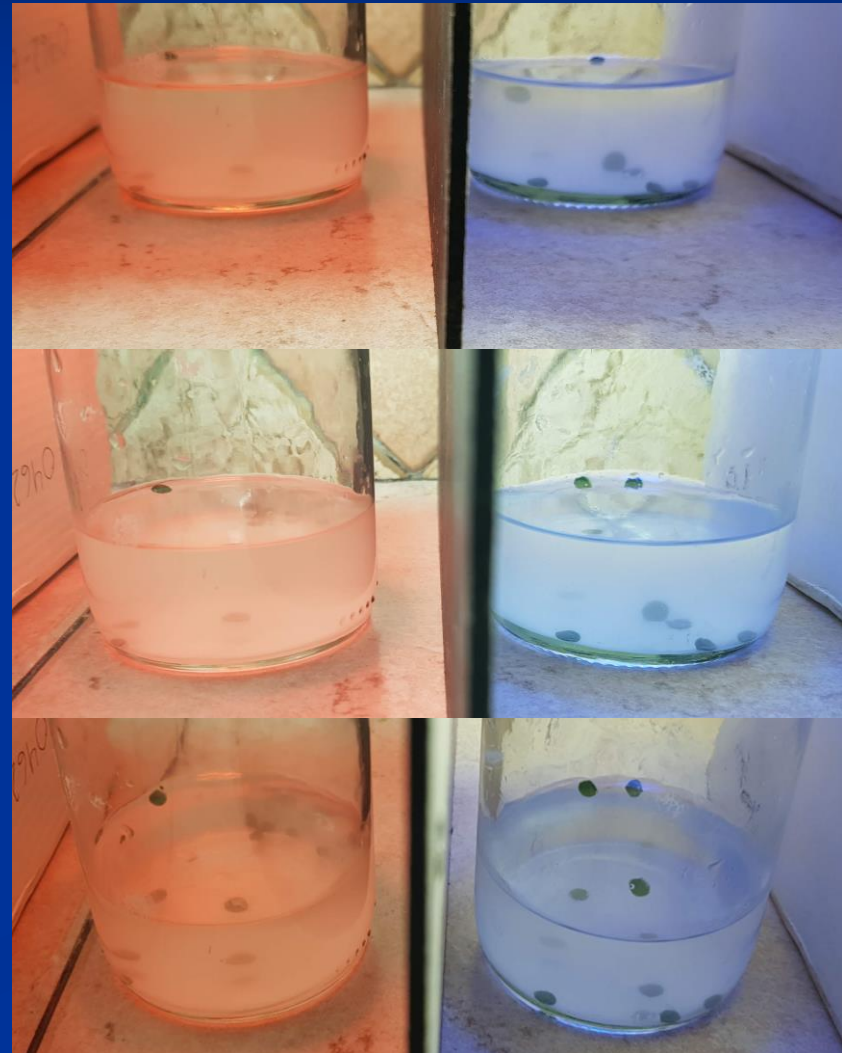
照射を始めたら、葉の
くり抜きが浮くまでの
時間を測り始める。

光合成の活動度の間接
的な測定となる。



活動5：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5：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、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6：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6：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6：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℃から27℃）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、同じものを用意する。



活動6：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6：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。

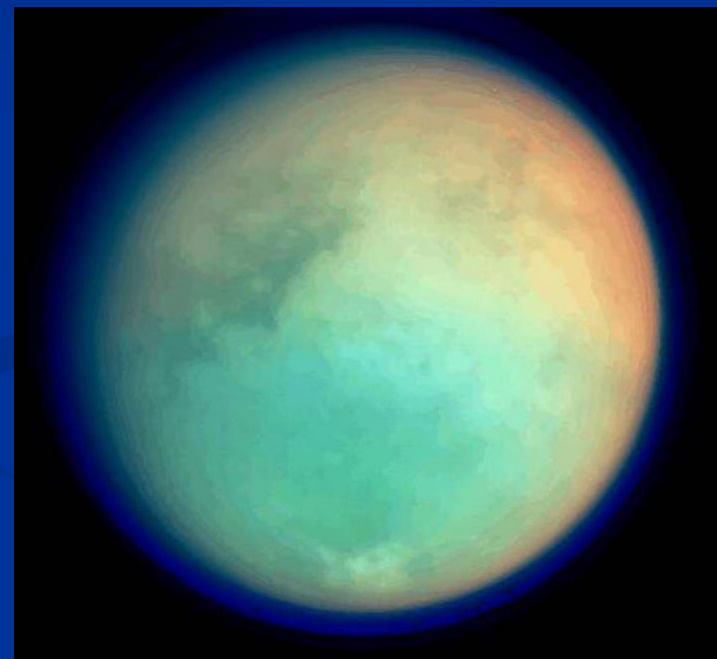
二酸化炭素の泡が出ることは、微生物が生きていることを示している。



活動6： 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6：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

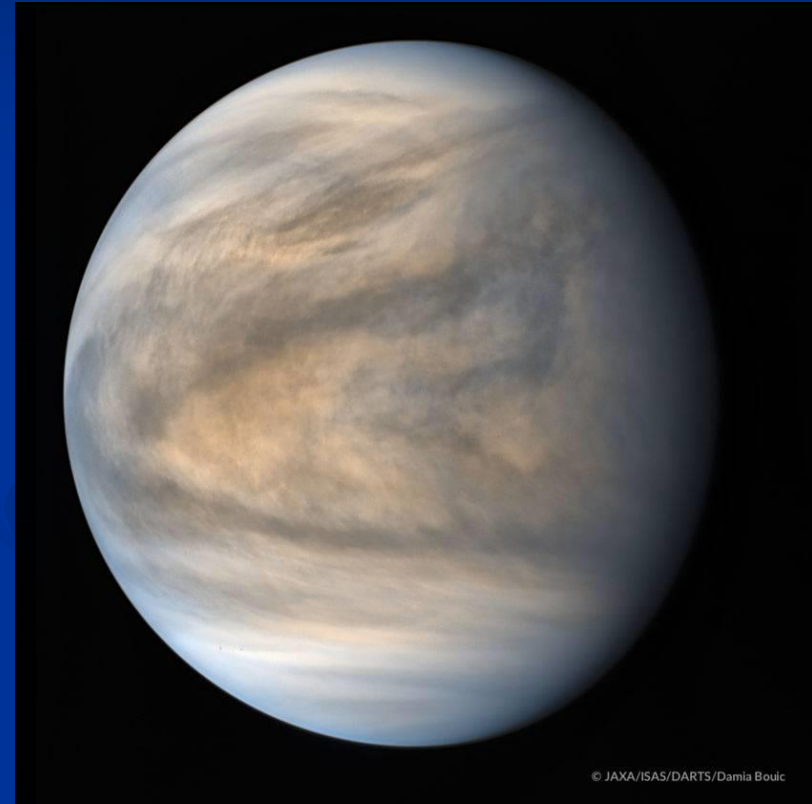
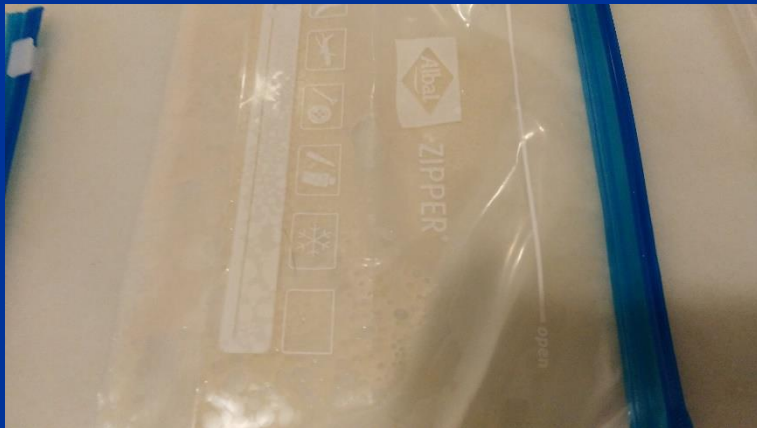
泡が出れば、生命存在



活動6：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。



© JAXA/ISAS/DARTS/Damia Bouic

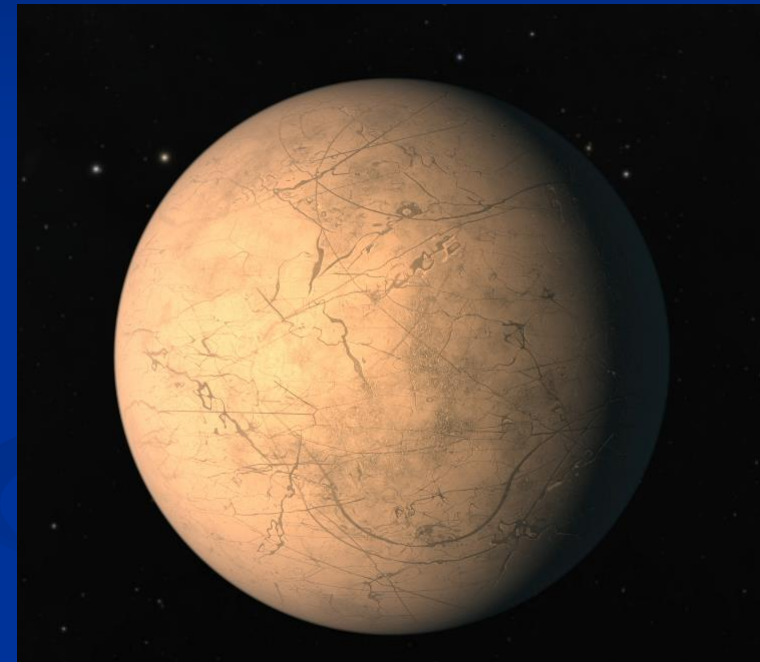
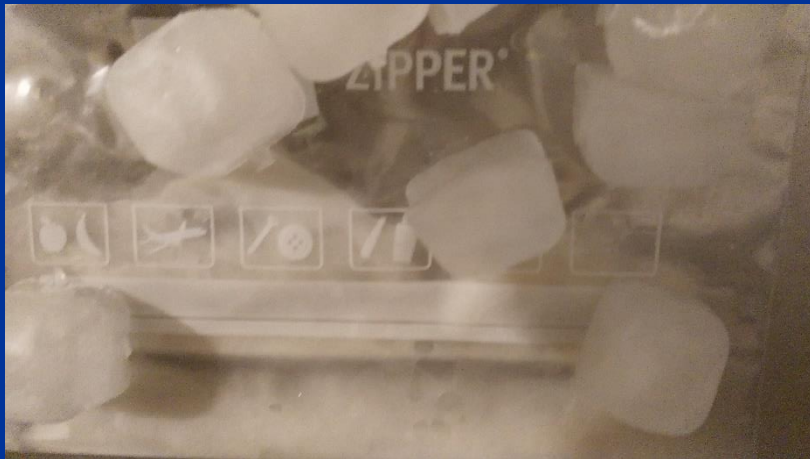
金星：NASA 提供
泡が出れば、生命存在



活動6： 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

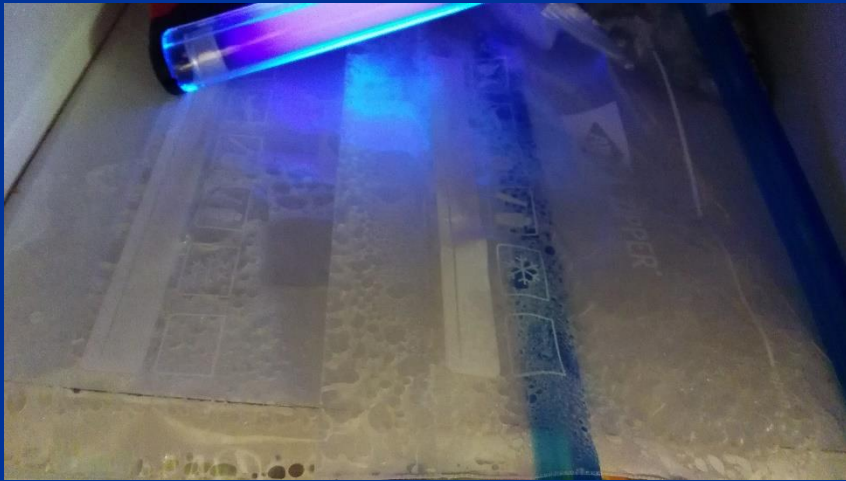
泡が出れなければ、生命なし



活動6：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7：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、それに伴ってハビタブル・ゾーンが遠くなる。

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。

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

中心星の質量

主系列星ならば、光度-質量関係は： $L \propto M^{3.5}$

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

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

太陽の寿命 $t_s=10^{10}$ 年 を使うと：

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

中心星の質量

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。

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

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

$$M^* \leq 1.6 M_{\odot}$$

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	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	0.04	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	0.04	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

活動 8: DNA 抽出

残存 DNA は現在あるいは過去の生命存在の証拠とされ、他天体での生命探査で使われる手法である。

DNA は大変長い分子であり、蛋白質とともに細胞内にボール状に収められている。

細胞を溶かす溶液を作る：コップ 1/2 杯の水

食塩を1さじ：塩化ナトリウムで蛋白質を緩め、DNA を解き放つ。

重曹を3さじ：DNAが分解しないように溶液の pH を一定に保たせる。

食器洗剤：細胞膜をつぶすためのもので、洗剤が溶液全体に行き渡るようにしておく。

攪拌：DNAがよく見えるよう、泡が立たないようにかき混ぜる。

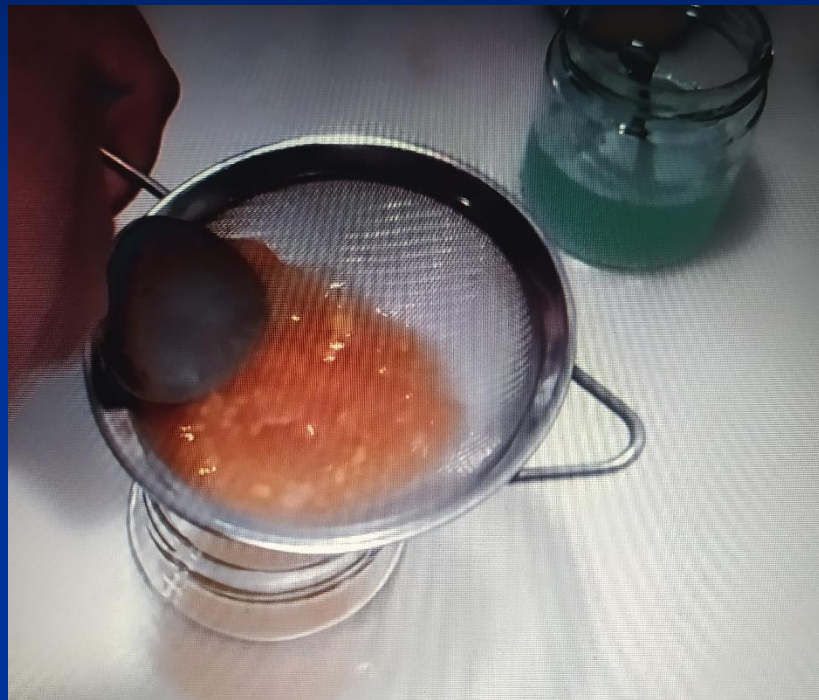


活動 8: DNA 抽出

トマト細胞のジュースを作る

さじ2杯のトマトのペーストを
フォークですりつぶして
ピューレにする。

トマトピューレの2倍の量の、
よくかき混ぜた溶液を注ぐ。



細胞膜をつぶすために、泡が立たないように注意
しながらかき混ぜる。

大きな塊は取り除く。

細胞の内容物はジュースになっている。

活動 8: DNA 抽出

DNA を見る

DNAのたくさんの束は白色の塊として見える。DNA自体は肉眼で見えず、食塩によって白色化している。

液の上部にアルコールの層を作るために、混合しないようにコップの縁からアルコールを注ぐ。

3,4分すると、DNAが集積して白色塊が形成され、液の上部に集まってきた目で見えるようになる。

DNAはアルコールに溶けないため、アルコールを加えることによってDNAが塊になる。



まとめ

- ハビタブル・ゾーンについて理解した。
- アstroバイオロジーの初歩を理解した。
- 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

