

(5) 分子雲からの星の誕生

集中講義：天文学 (宇宙から地球のみらいを考える)

特任准教授 西村淳

国立天文台 野辺山宇宙電波観測所

そもそも、星ってなに？

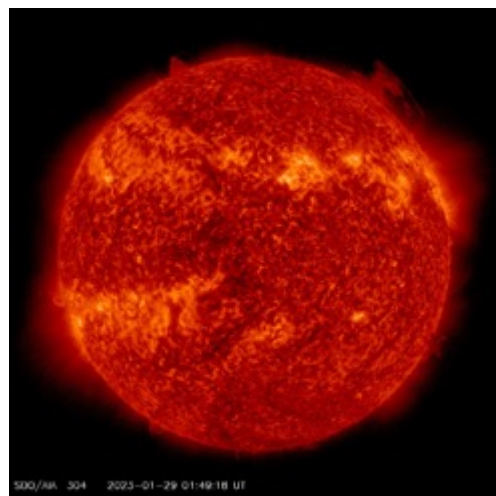
2

みなさんへ質問： 星といえば、何を思い浮かべる??

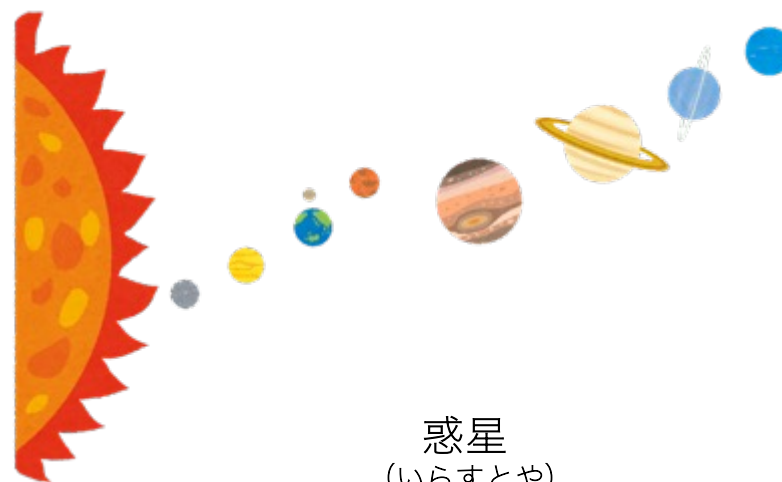
みなさんへ質問： 星といえば、何を思い浮かべる??



とある恒星
(アンドロメダ α 星, wikipediaより)



太陽(恒星)
(NASA, SDO)



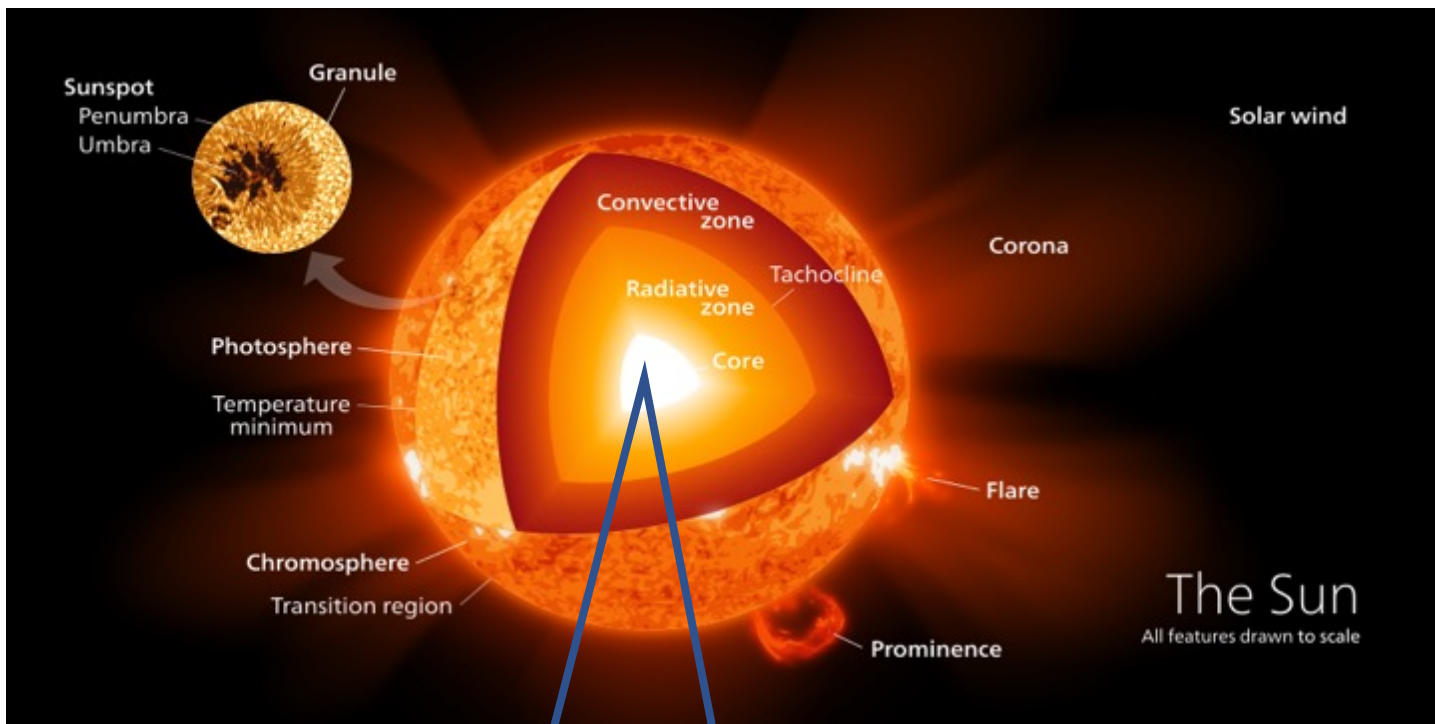
惑星
(いらすとや)



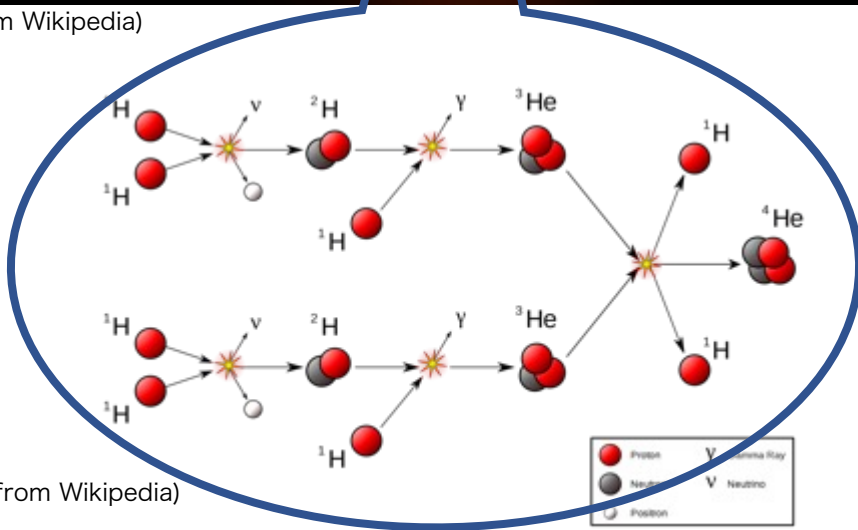
(いらすとや)

恒星編

～ キミは人類にほど良い恒星を作れるか？！ ～



Kelvinsong (from Wikipedia)



Doctor C (from Wikipedia)

- ガスがたくさん集まってできた天体

- 太陽の場合： 2×10^{27} トン
(地球の30万倍)

- 中心部分はガスの重みで圧力が高く、核融合が起きている

- 核融合の結果、膨大なエネルギーが生成され、とても高温

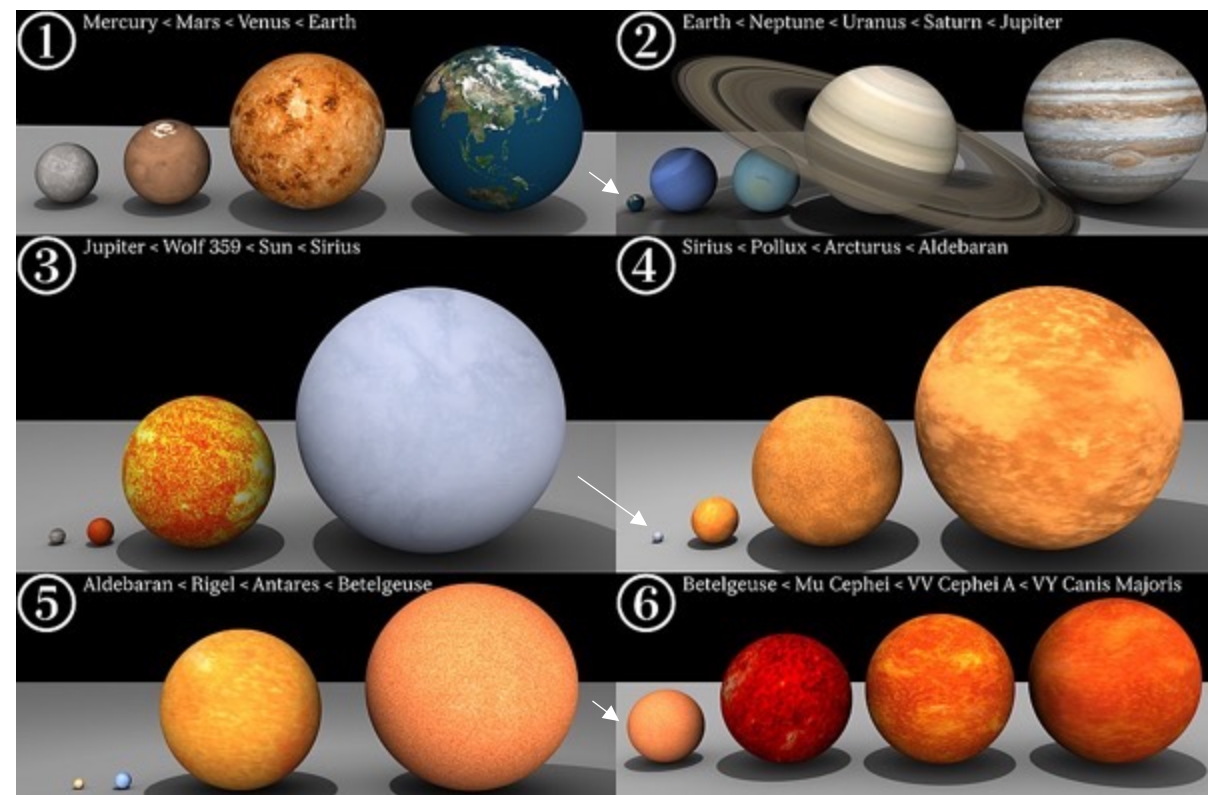
- 太陽の温度： 5500°C (表面)

- なので、明るく輝いている

人類に幸運だったこと

- 熱すぎず、冷たすぎない
- 寿命が長かったこと (現在46億歳)

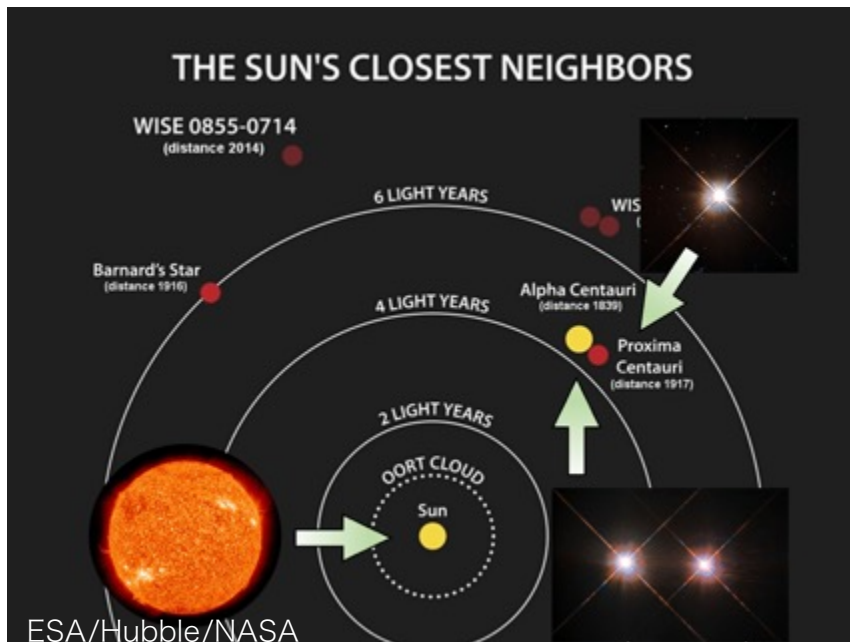
星の大きさ比べ



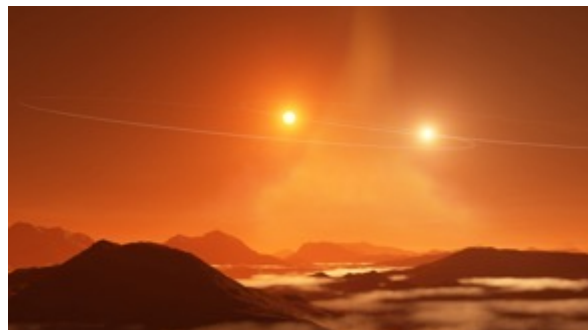
Dave Jarvis (from Wikipedia)

- 恒星にはいろいろな種類がある
 - いろいろな大きさ
 - いろいろな色
 - いろいろな温度
 - いろいろな寿命
- これらの全ては、恒星ができた時の重さ(初期質量)で決まってしまう！

重さ 太陽の何倍か	大きさ 太陽の何倍か	温度(色)	寿命
20倍	7倍	30000℃(青)	1000万年
2倍	2倍	10000℃(青白)	10億年
1倍(太陽)	1倍	5500℃(黄白)	100億年
0.5倍	0.96倍	4900℃(オレンジ)	500億年



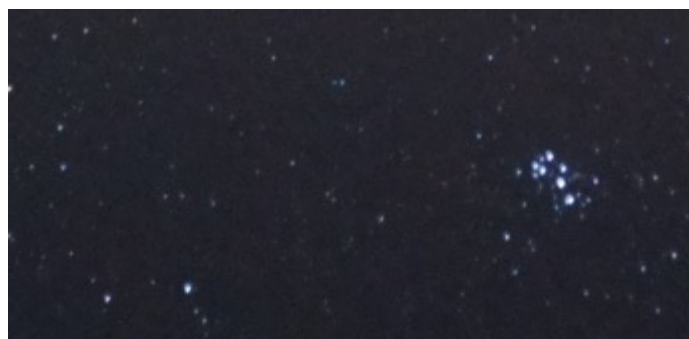
もし太陽が連星だったら...



NRAO/AUI/NSF, S. Dagnello

太陽は単独星

- 恒星 (太陽質量) の 50% は連星
- 太陽の最寄りの恒星も連星
- もし太陽が連星だったら、私たちの価値観・宗教観は、随分違っていただかもしれない



散在星と星団



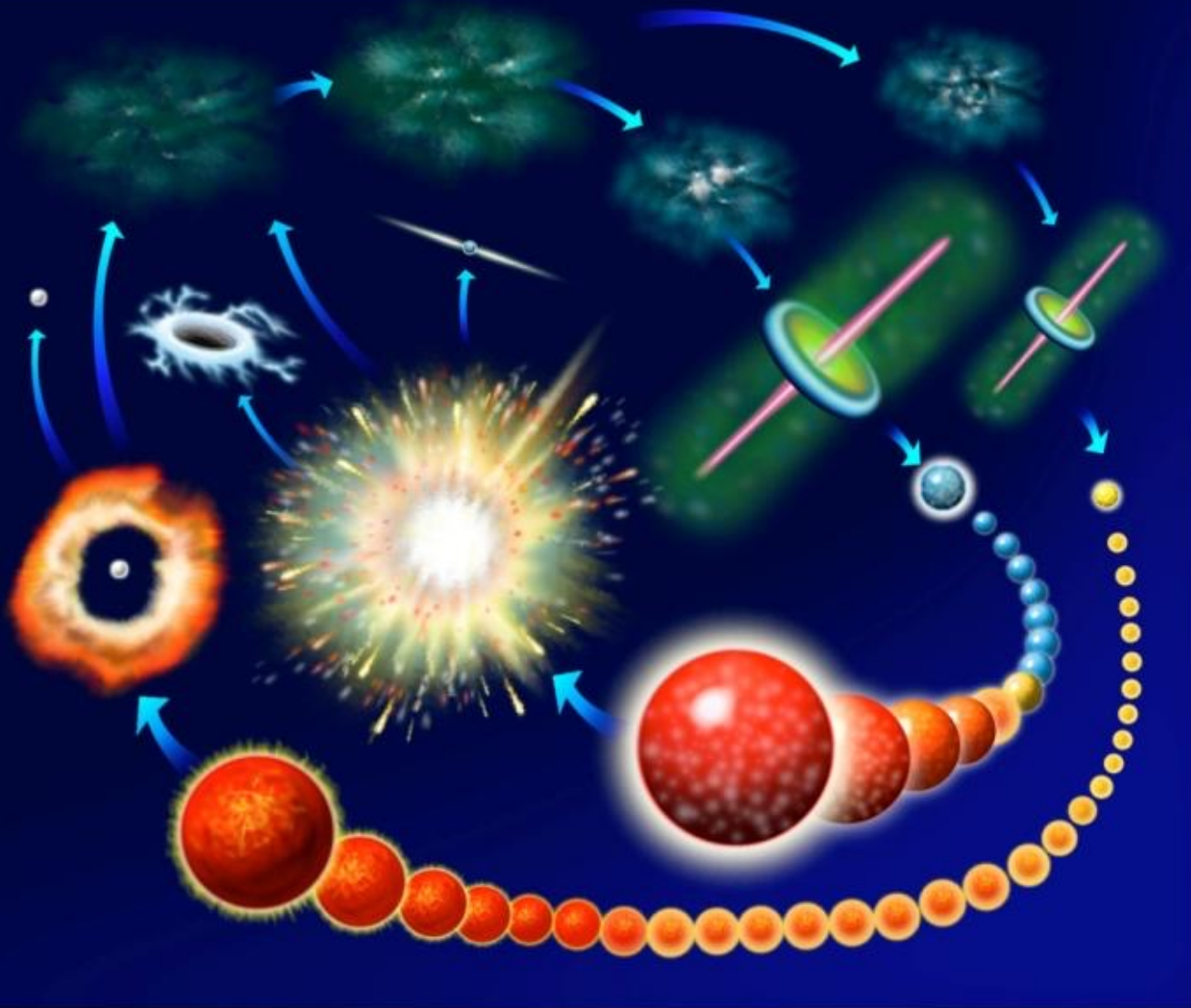
散開星団 NGC 265
(ESA/NASA)

太陽は散在星

- 太陽は星団に属しておらず、孤立している
- 星の大半は星団の一部として生まれる
- もし太陽が星団に属していれば、夜空はもっと賑やかだっただろう

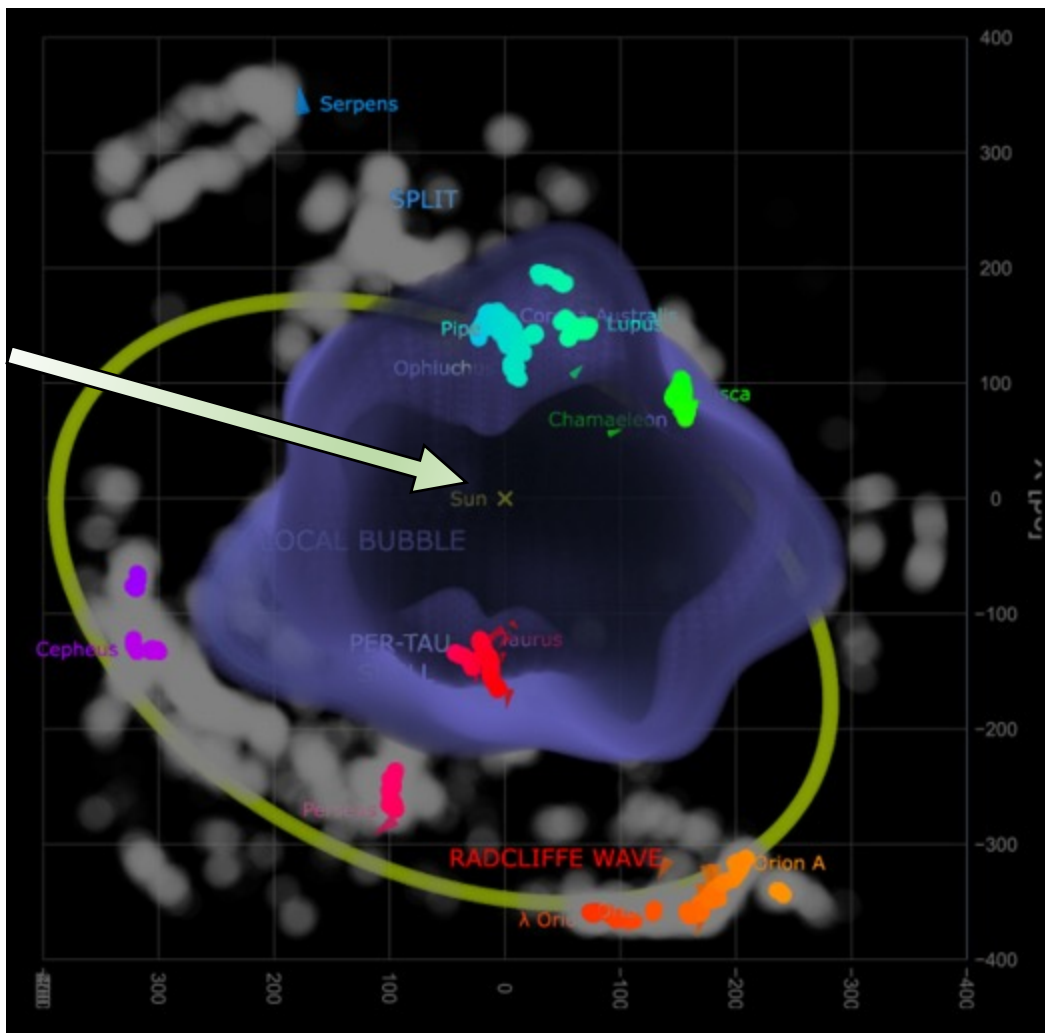
何が太陽の運命を決めたのか？

図-12 星の一生と物質のリサイクル



- 星はガス (分子雲) から生まれる
- ガスを観察してやれば、星の生まれ方を調べることができそうだ
- ガスはとても冷たい
 - $10\text{K} = -263^\circ\text{C}$
- 電波観測が大活躍

太陽系周辺の原子ガス・分子ガスの分布



Zucker et al. 2022, Nature

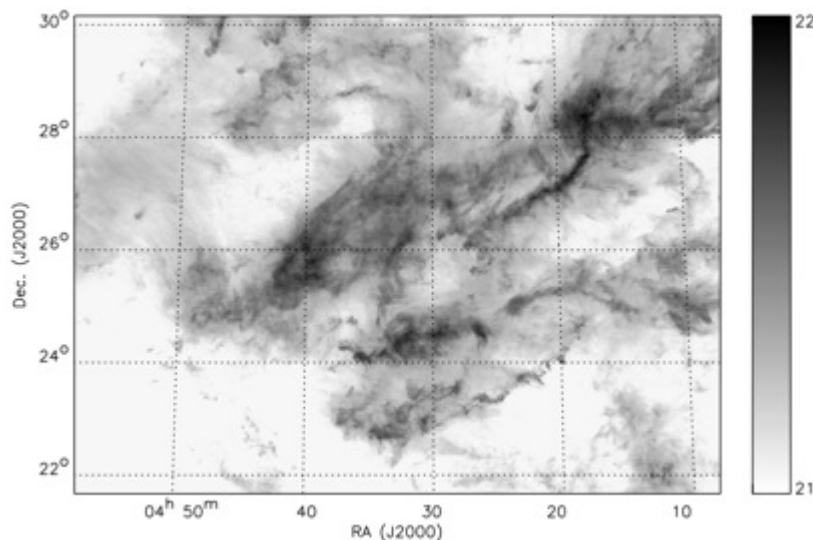
- 太陽系の周りにはガス雲がない
 - これはただの偶然
 - 太陽の年齢：46 億歳
 - ガス雲の寿命：約 1000 万年
 - ガス雲はできたり壊れたりする
- 最も近い、星が生まれている分子雲 (星形成分子雲)
 - 牡牛座の方向 400 光年
 - 太陽程度の重さ・散在星
- 最も近い、重い星が生まれている分子雲 (大質量星形成分子雲)
 - オリオン座の方向 1200 光年
 - 太陽の 30 倍程度・星団

FCRAO 14m 電波望遠鏡

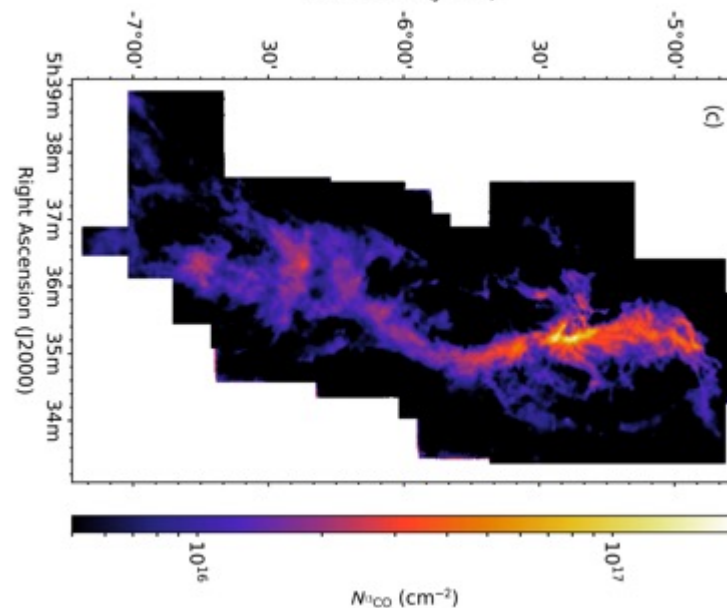


牡牛座分子雲
Goldsmith et al. (2008)

分子雲 (暗黒星雲)



巨大分子雲

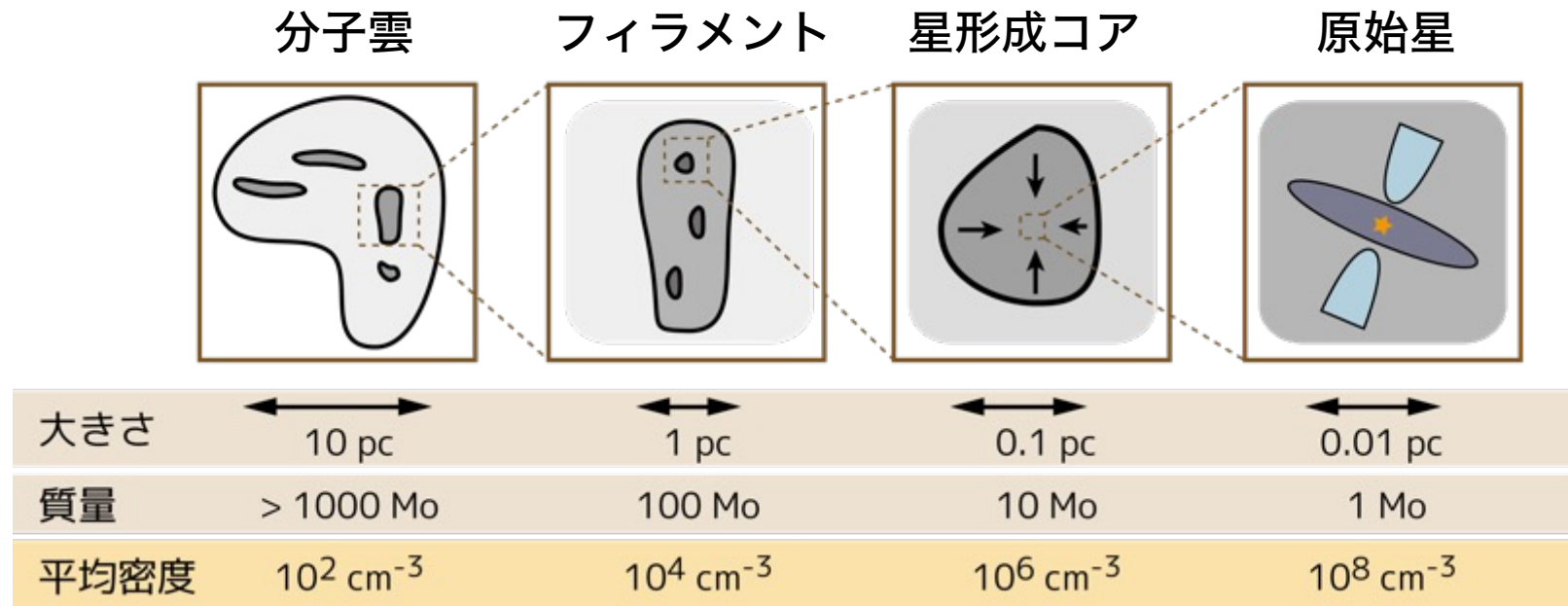


野辺山 45m 電波望遠鏡



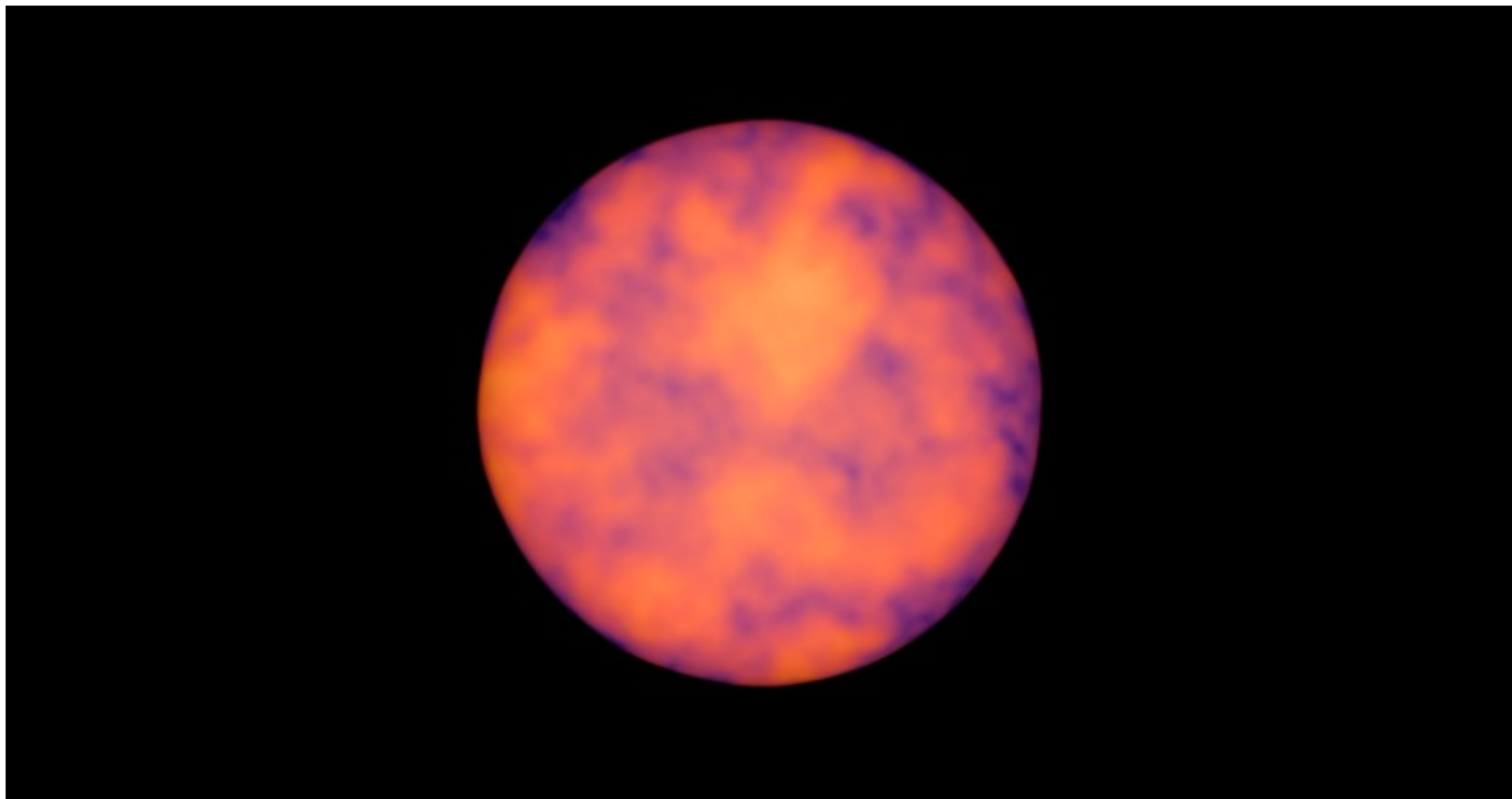
オリオン座
巨大分子雲
Ishii et al. (2019)

大きさ	1 - 10 pc (3 - 30 光年)	10 - 100 pc (30 - 300 光年)
重さ	100 - 1 万 太陽質量	10万 - 100 万 太陽質量
平均密度	100 - 1000 個/cm ³	1000 - 1 万 個/cm ³
温度	10 K	10 - 30 K
星形成	小質量星・散在星	小質量星-大質量星・星団



重力でガスが集まり、星になる

- 集まる途中で塊はちぎれる
 - 雲 → フィラメント → コア、と構造ができていく
 - 重力・乱流・磁場のバランスで決まる
- ガス雲が全て星になるわけではない
 - 最終的に、質量の1%ほどが星になる (星形成効率が低い)
 - ひとたび星ができると、星が周りの残ったガスを破壊する



最新のシミュレーション

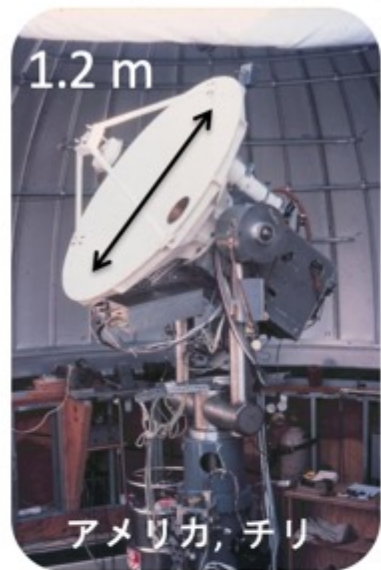
Grudic et al. (2021)

Credit: David Guszejnov, Mike Grudic, and the STARFORGE Project



いろいろな電波望遠鏡 (再掲)

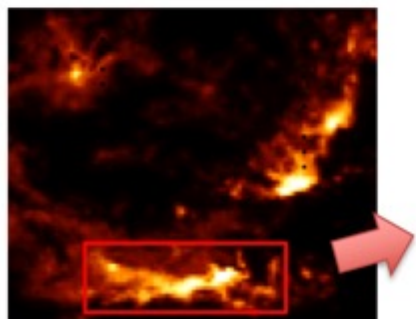
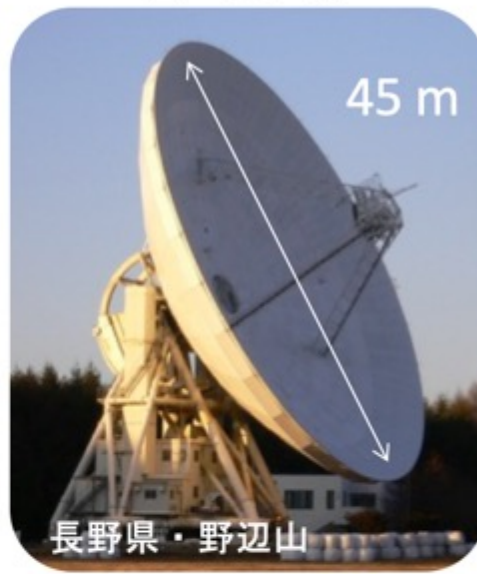
ハーバード・スミソニアン



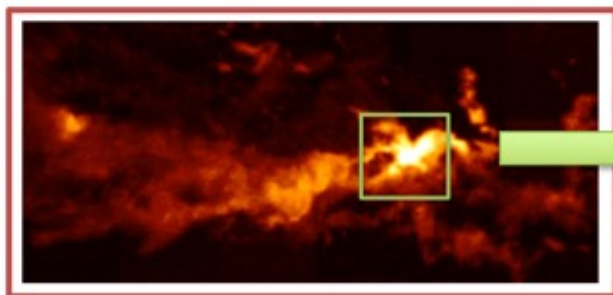
名古屋大学



国立天文台



Wilson et al. (2005)



Nishimura et al. (2015)



Shimajiri et al. (2011)

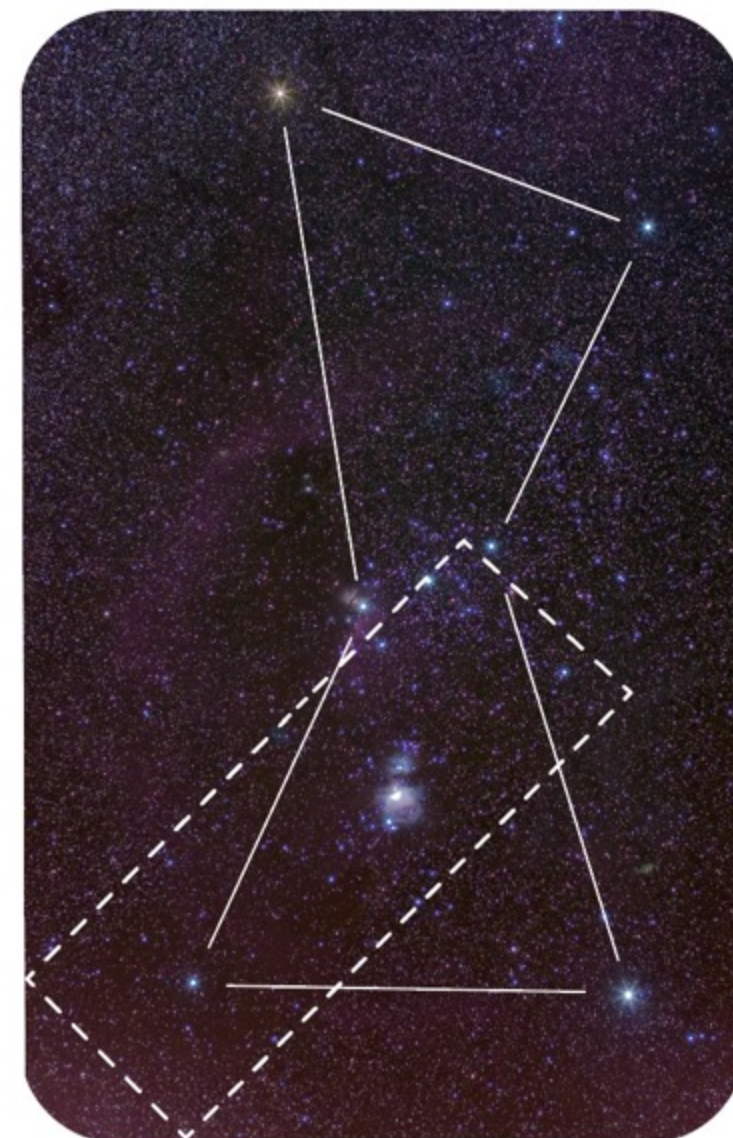
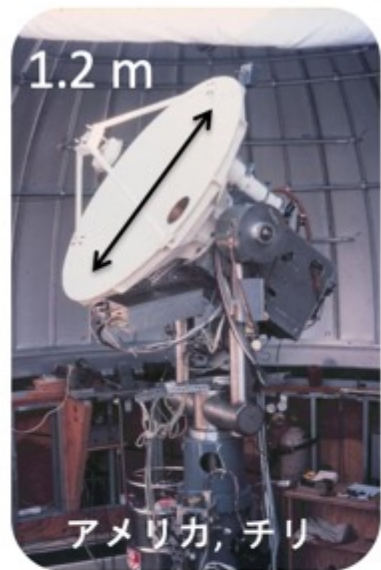


Photo: Mouser

観測にかかる時間はどの望遠鏡も同じで数ヶ月かかる

いろいろな電波望遠鏡 (再掲)

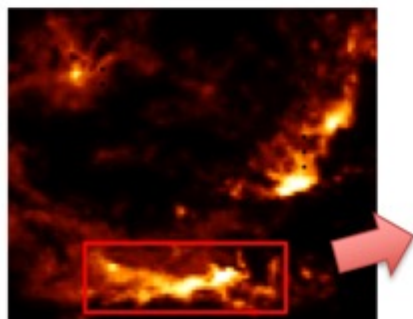
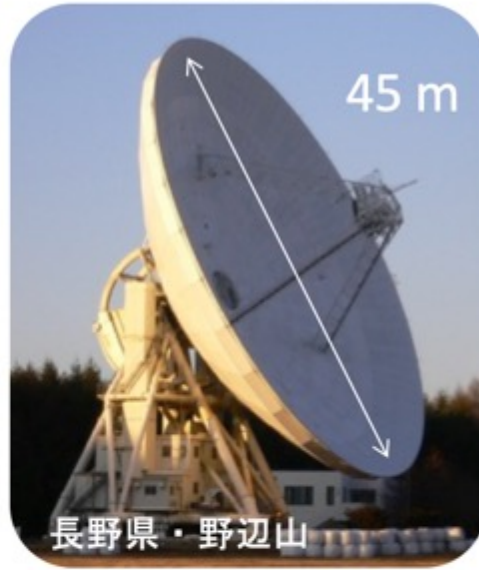
ハーバード・スミソニアン



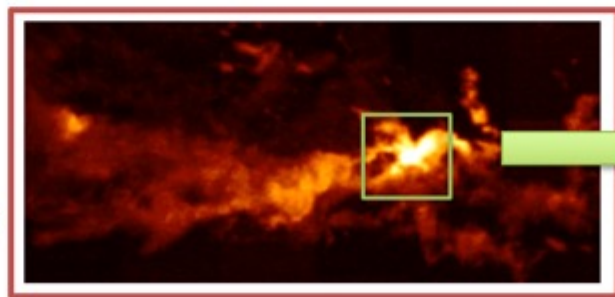
名古屋大学



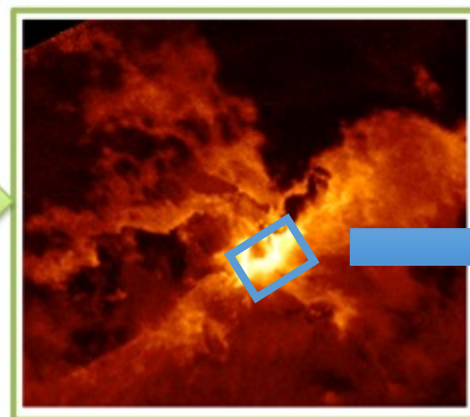
国立天文台



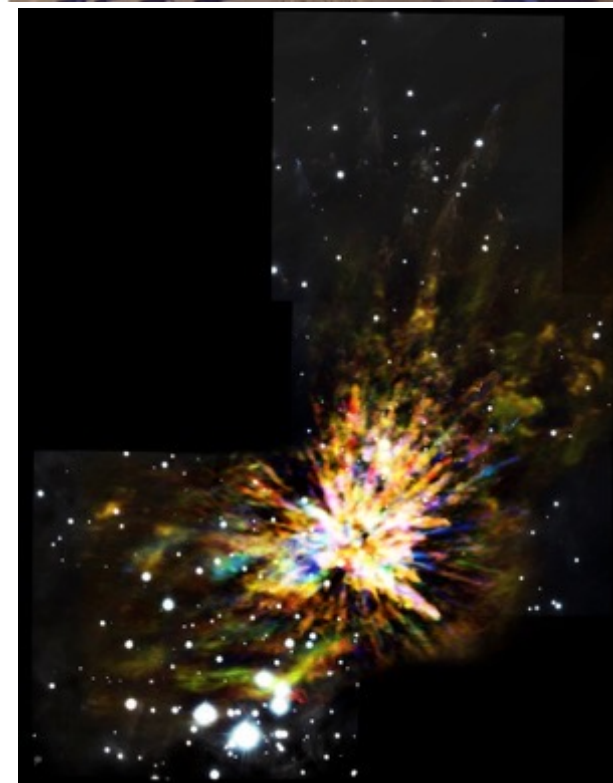
Wilson et al. (2005)



Nishimura et al. (2015)



Shimajiri et al. (2011)



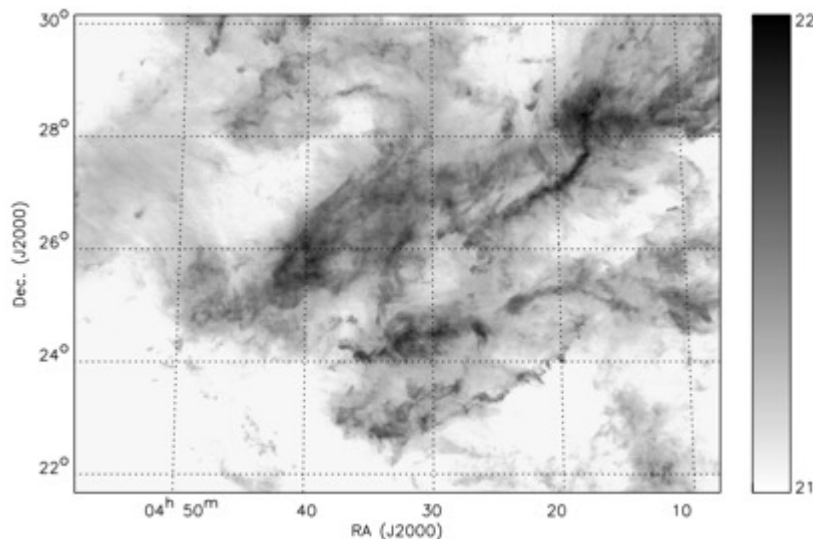
Bally et al. (2017)

FCRAO 14m 電波望遠鏡

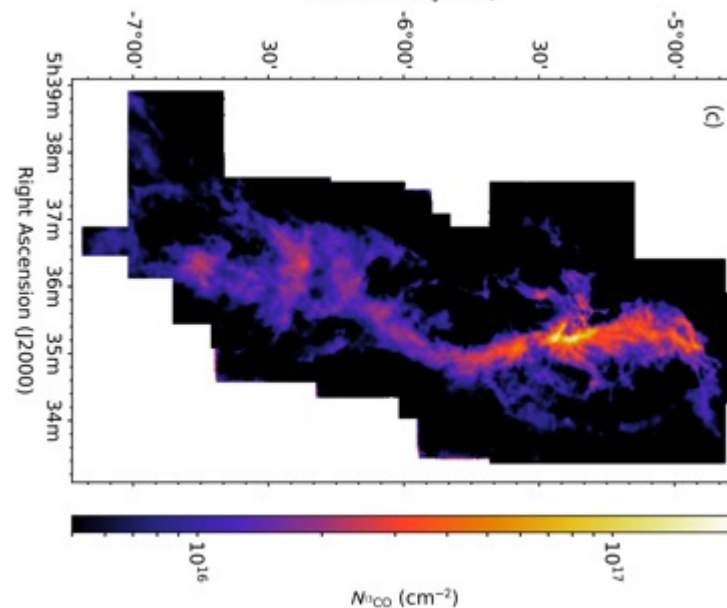


牡牛座分子雲
Goldsmith et al. (2008)

分子雲 (暗黒星雲)



巨大分子雲



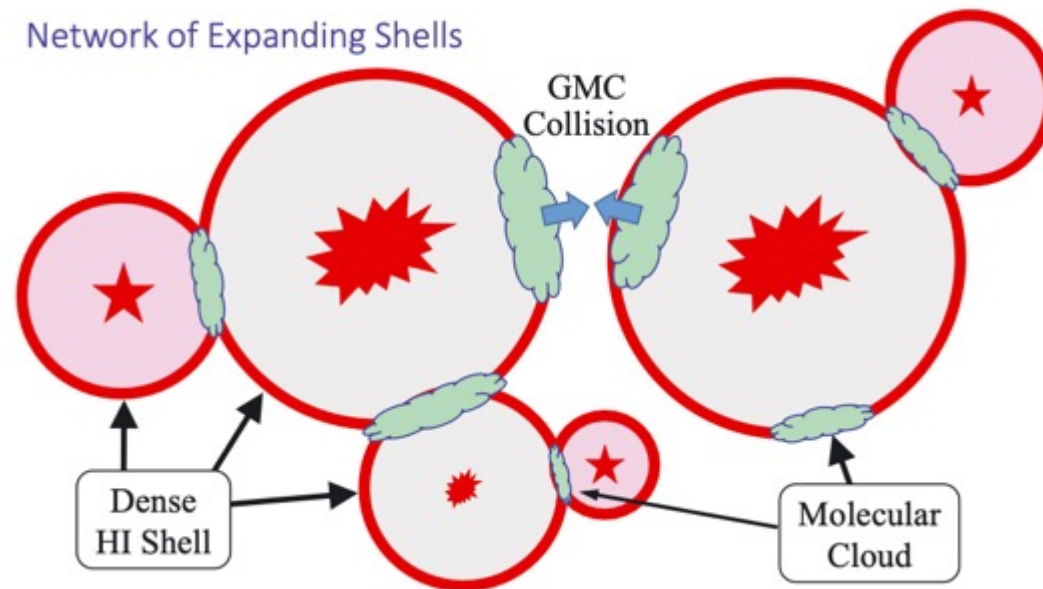
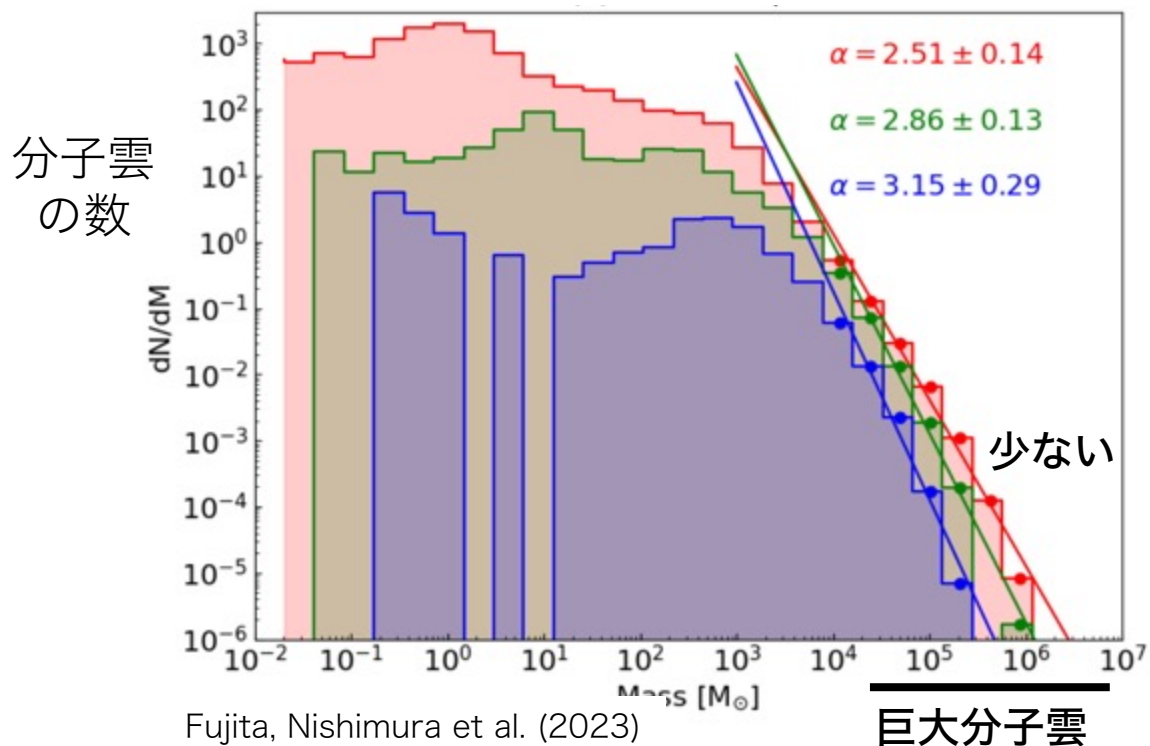
野辺山 45m 電波望遠鏡



オリオン座
巨大分子雲
Ishii et al. (2019)

大きさ	1 - 10 pc (3 - 30 光年)	10 - 100 pc (30 - 300 光年)
重さ	100 - 1 万 太陽質量	10万 - 100 万 太陽質量
平均密度	100 - 1000 個/cm ³	1000 - 1 万 個/cm ³
温度	10 K	10 - 30 K
星形成	小質量星・散在星	小質量星-大質量星・星団

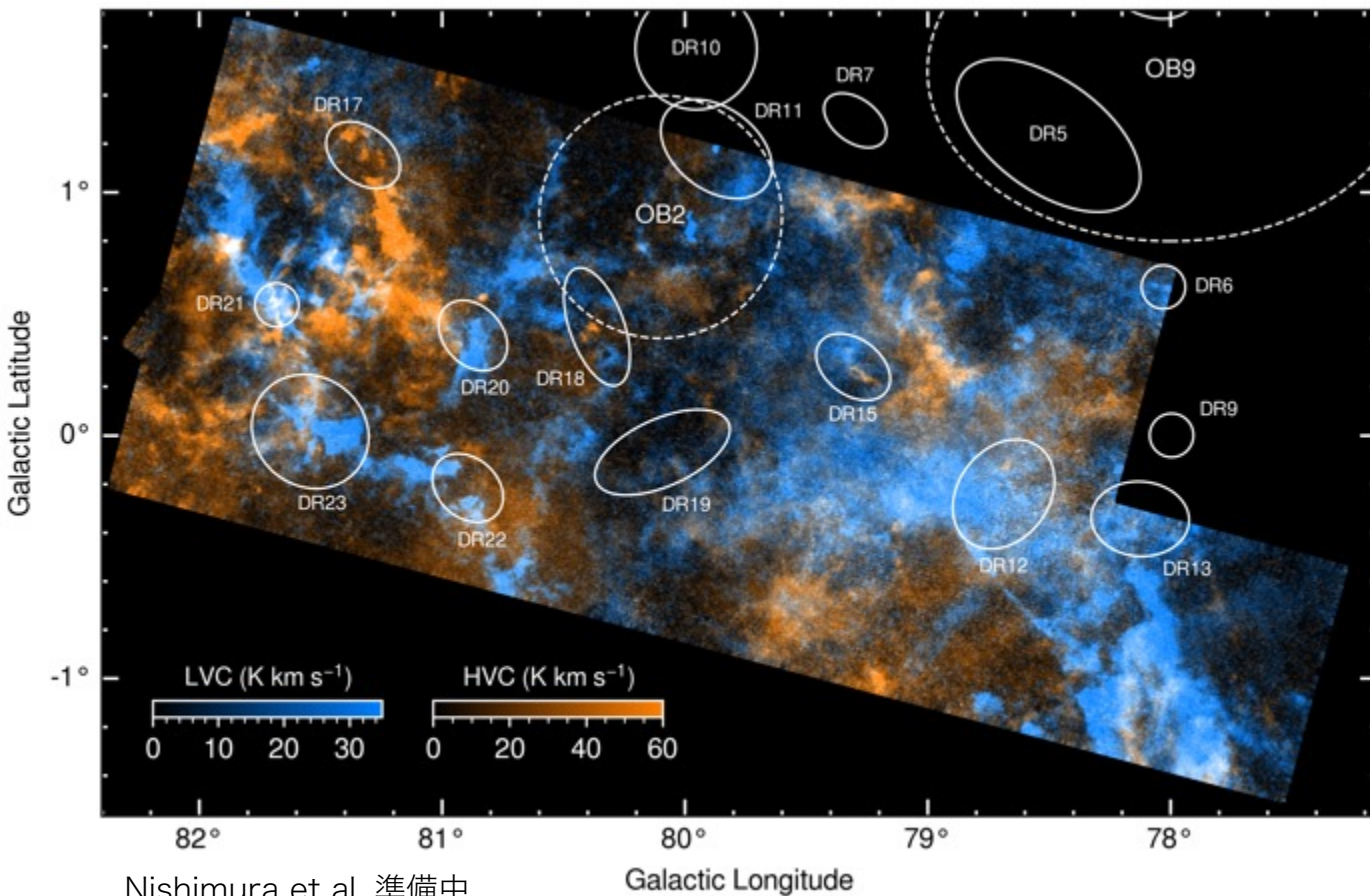
天の川銀河での分子雲の重さあたりの個数



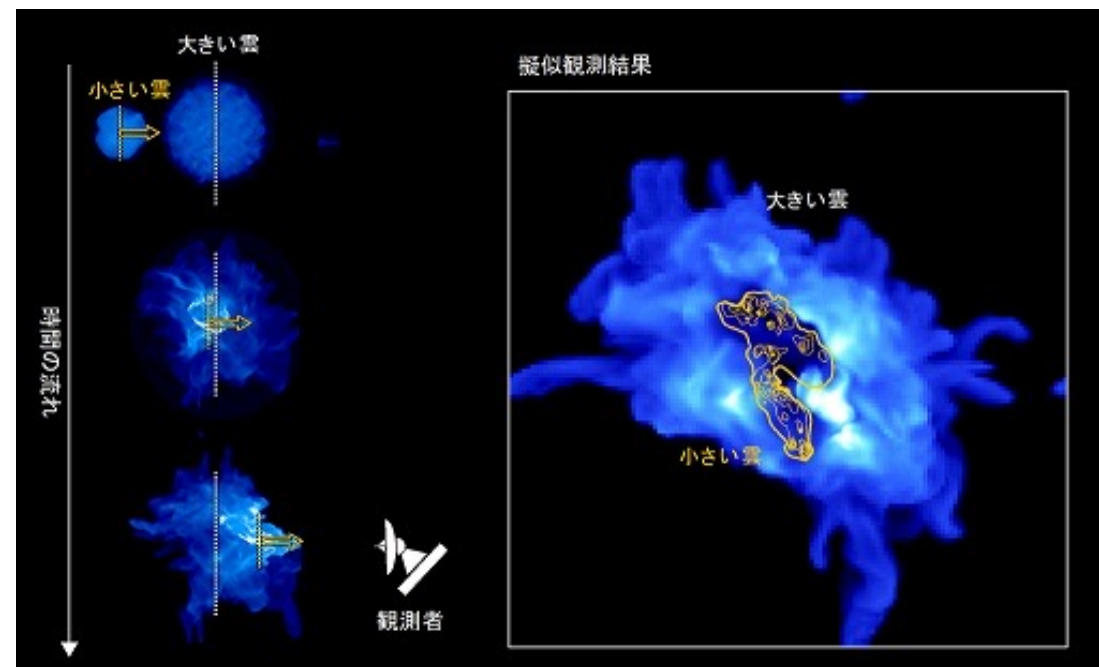
Inutsuka et al. (2015)

- 巨大分子雲は数が少ない
 - 数は少ないが、質量が大きいので、星はたくさん作る
 - 軽い小さな分子雲が成長して、巨大分子雲になる
- 雲同士が衝突・合体を繰り返す
 - 衝突が激しいと、急激に星を作ることがある(すると雲は破壊される)

白鳥座-X 巨大分子雲複合体



Nishimura et al. 準備中



ガスの超音速衝突が、
星団を作るきっかけとなっていた例



衝突している分子雲が、
天の川銀河で数多く見つかってきている

Nishimura et al. (2021)

Fujita, Nishimura et al. (2021)

Kohno, Nishimura et al. (2021)

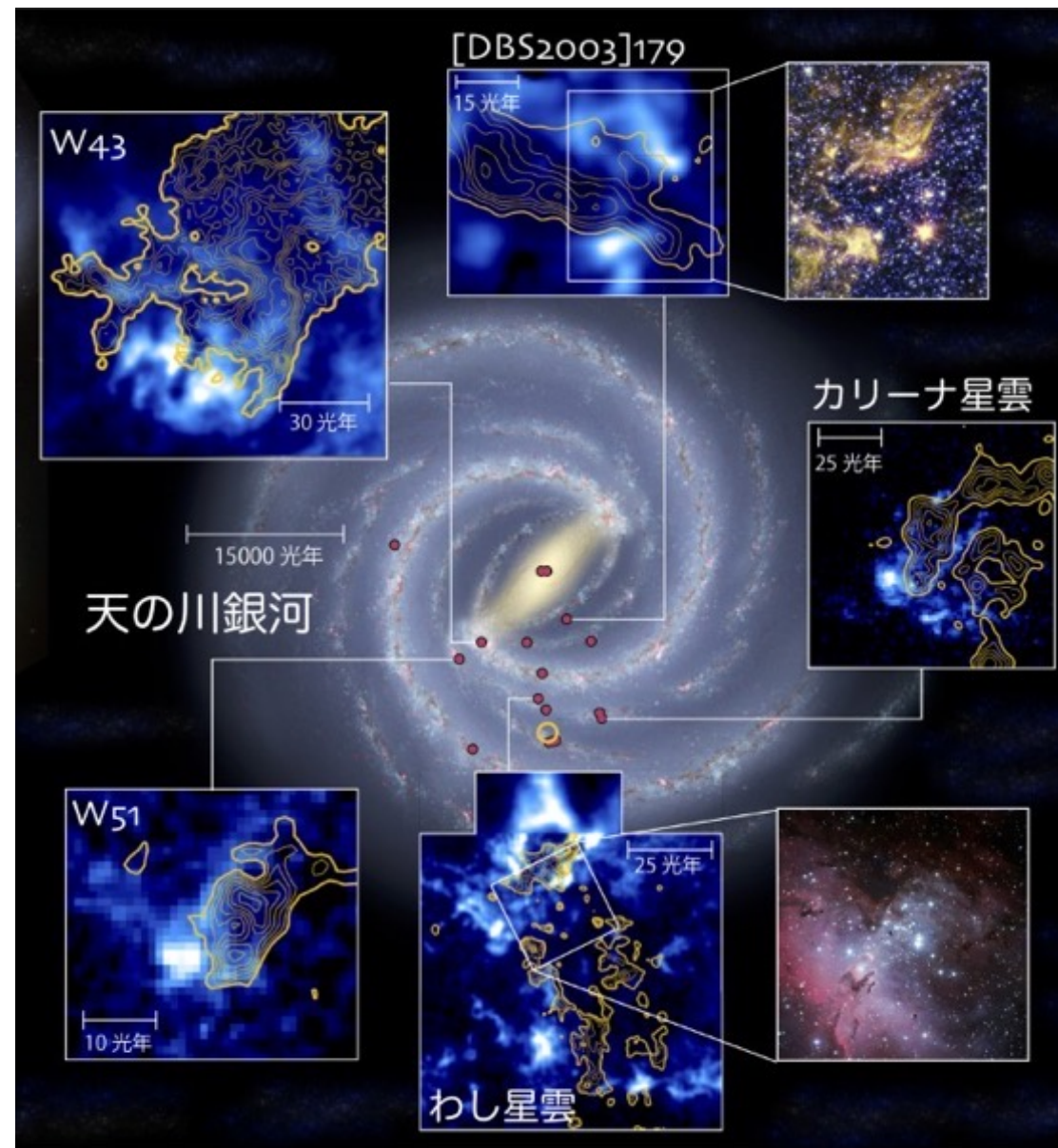
Torii, Nishimura et al. (2021)

Fujita, Nishimura et al. (2019)

Nishimura et al. (2018)

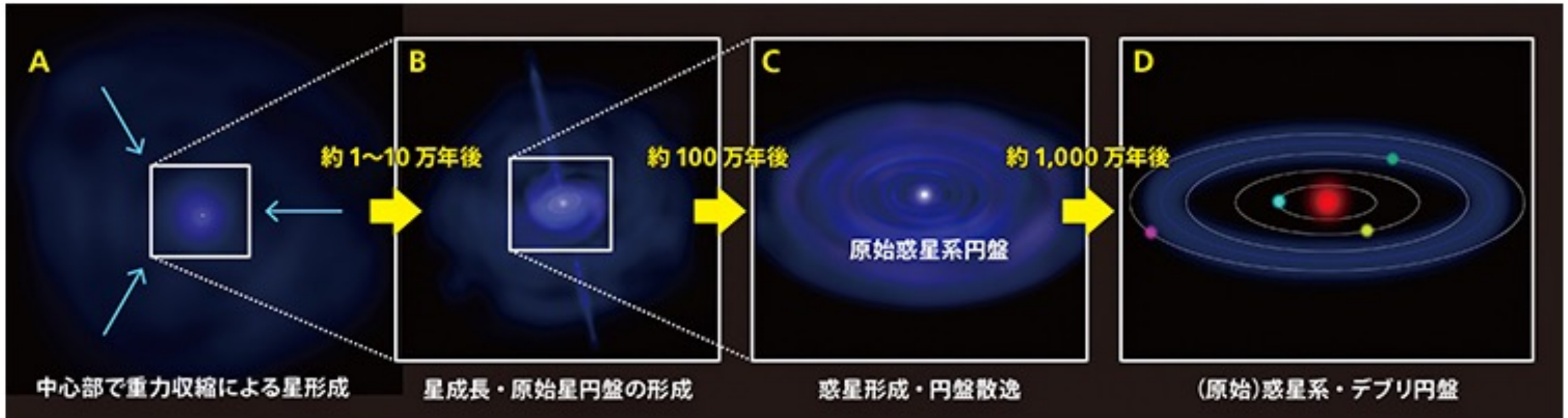
Kohno, Nishimura et al. (2018)

Torii, Nishimura et al. (2018)



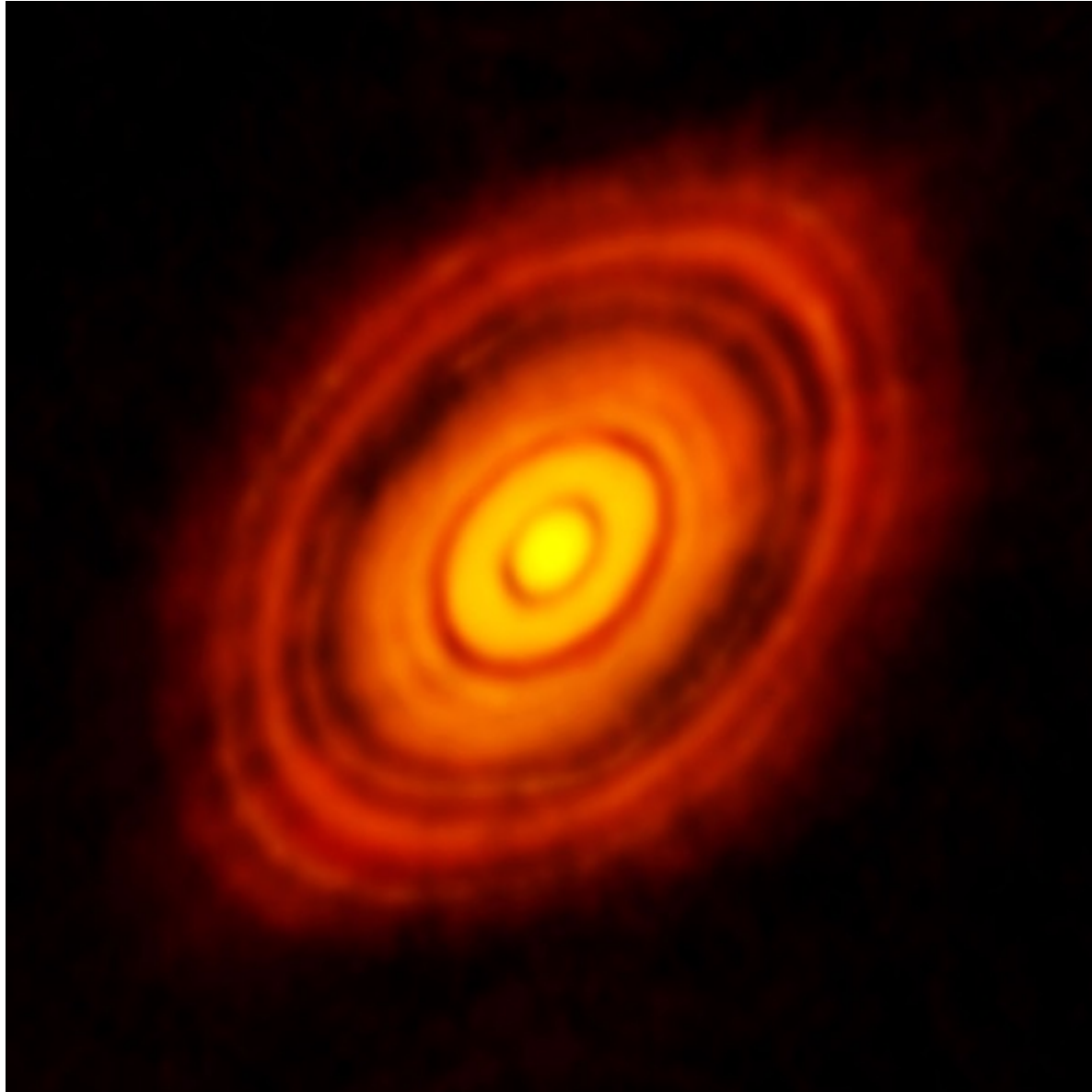
惑星編

～ 惑星もしっかり作らないと人類は生まれません ～



理化学研究所

- 星の周りに円盤ができ、円盤を通過して星にガスが落ち込む (原始星円盤)
- 円盤からの星へのガス供給が終わり、円盤に惑星が出来始める (原始惑星系円盤)

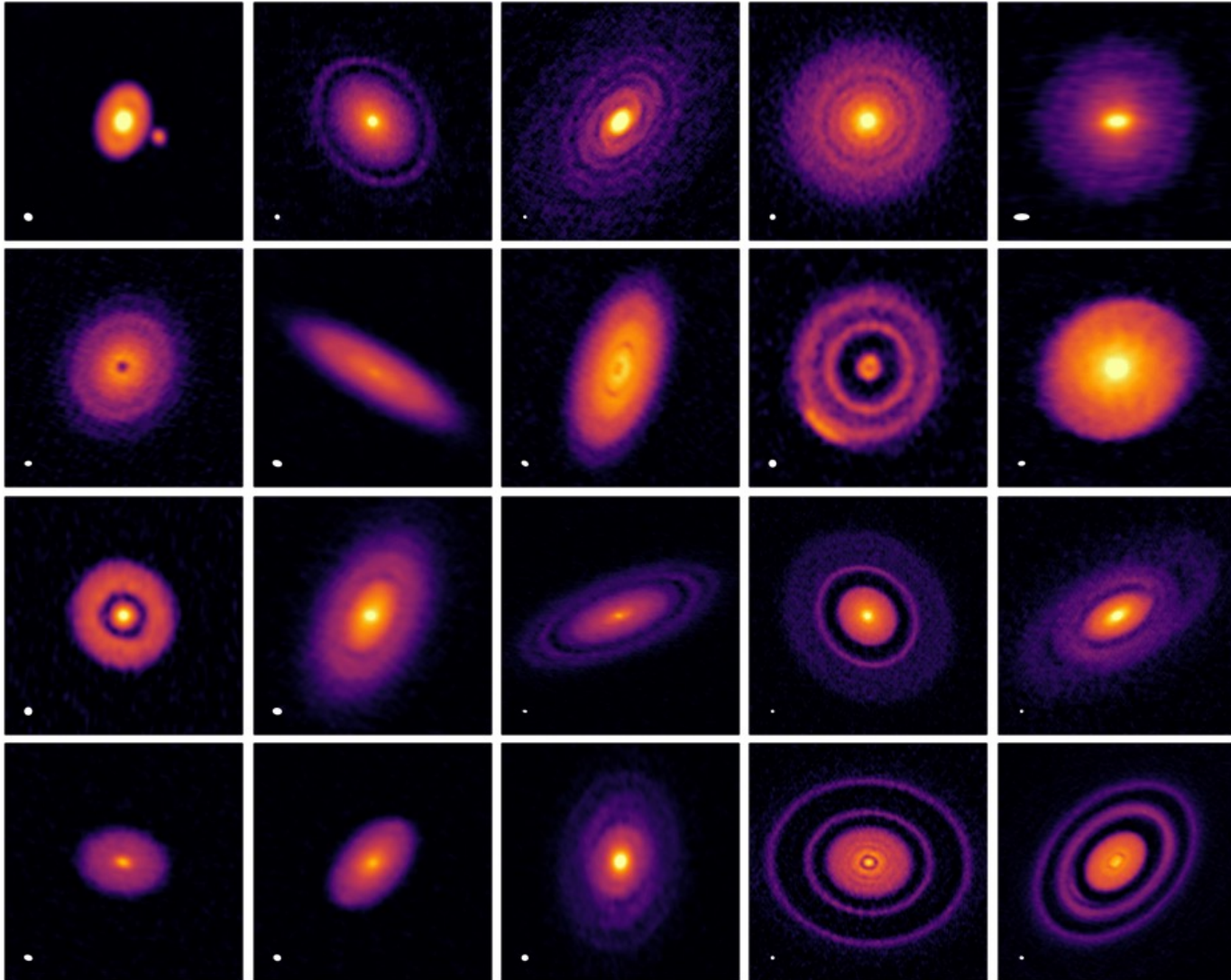


ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), ALMA Partnership et al. (2015)

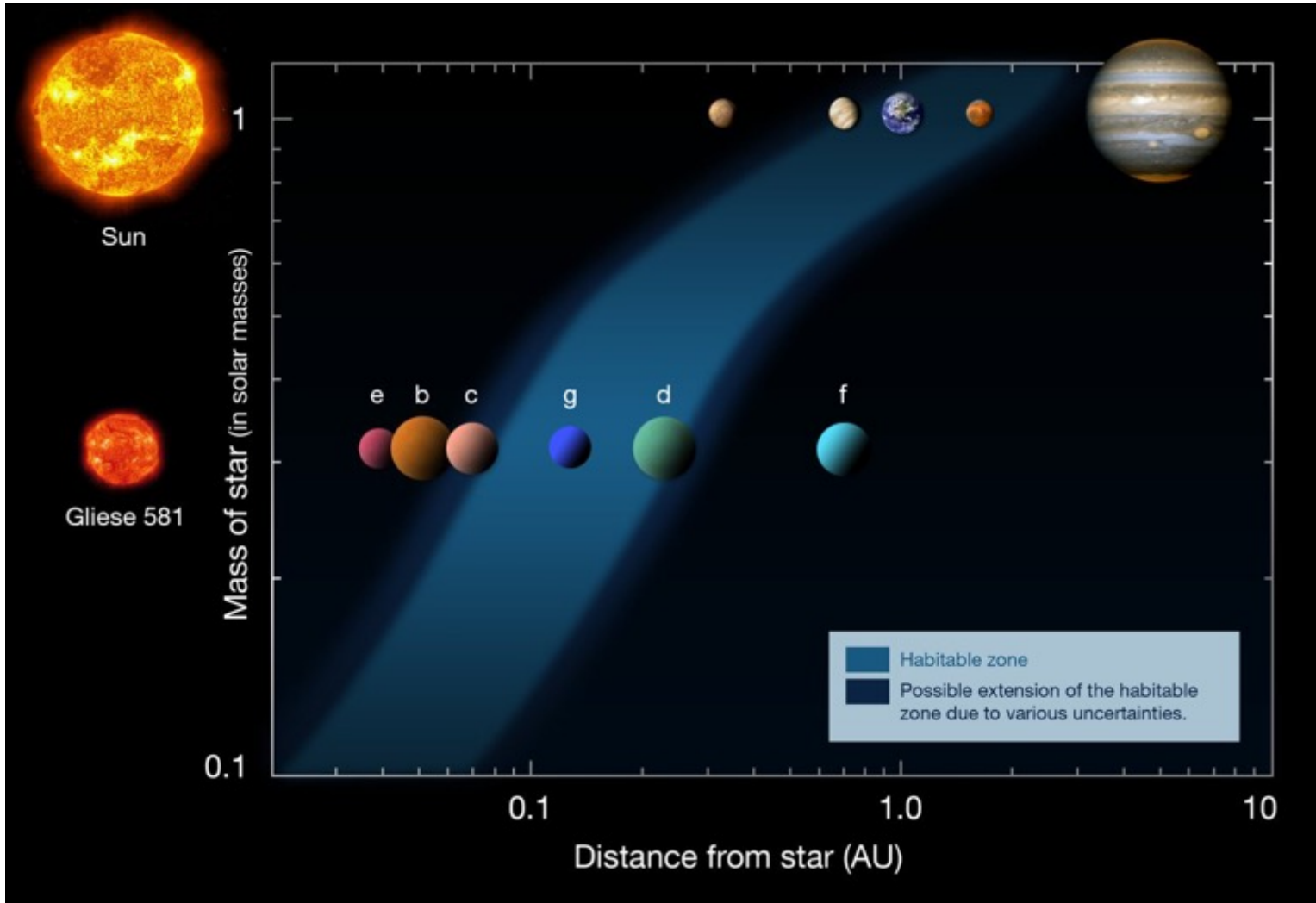


ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), A. Marinkovic/X-Cam

- 人類が初めて撮像に成功した原始惑星系円盤 (天体名：HL Tau)
- ALMA 望遠鏡の最高性能である視力 2000 により実現された
- 中心に恒星があり、周囲の黒い円は、惑星がガス・塵を飲み込み成長したことを示している



- 様々な原始惑星系円盤を観察することで、
 - 惑星の種類 (地球型, 木星型)
 - 惑星の大きさ
 - 惑星の中心星からの距離
 - 惑星のでき方、できる早さ
 - が、調べられている
- 地球の場合：
 - 地球型 (岩石)
 - 水が凍らず、蒸発しない距離 (ハビタブルゾーン)



ESO

- 惑星に水があった時、
 - 恒星に近すぎると、暑くて蒸発してしまう
 - 恒星から遠すぎると、寒くて全て凍ってしまう
- ハビタブルゾーン
 - 水が凍らず、蒸発しない距離
 - 恒星が熱い(=重い)と、より遠くの距離になる

もし地球の位置が違ったら？

- 惑星の公転周期は、軌道半径の1.5乗に比例する
 - ケプラーの第3法則

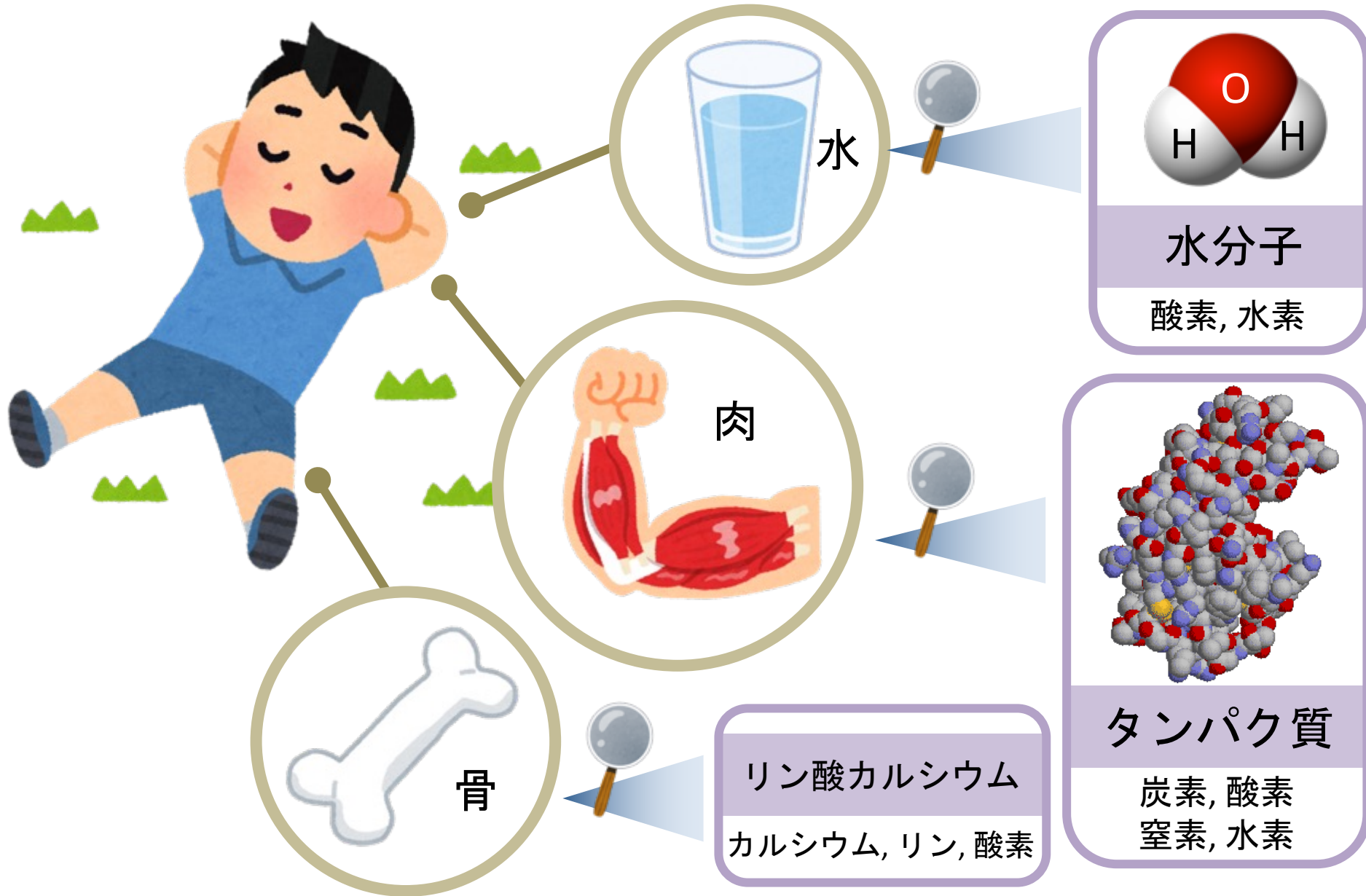
水星	金星	地球	火星
88日	225日	1年	1.8年

木星
11.9年



生命編

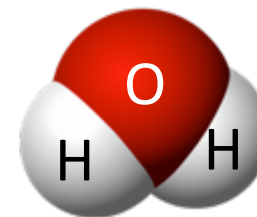
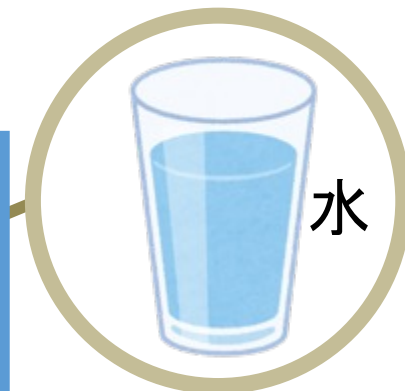
～ 恒星も惑星も準備できたけど、まだ何かが足りない！ ～



Question

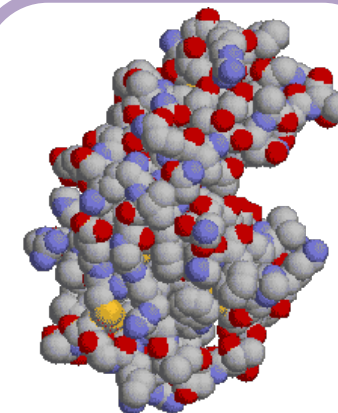
地球ができたときから
あった元素はどれ？

1. 全てあった
2. 半分くらいあった
3. ほとんど無かった



水分子

酸素, 水素



タンパク質

炭素, 酸素
窒素, 水素

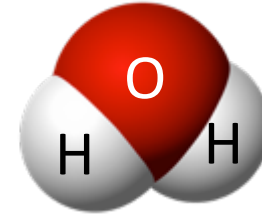


リン酸カルシウム
カルシウム, リン, 酸素

Question

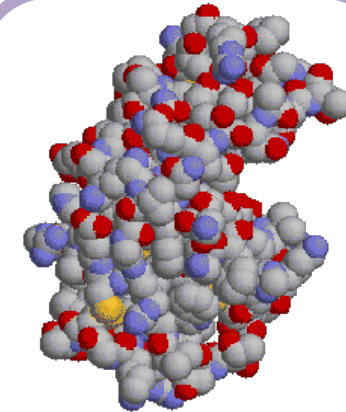
地球ができたときから
あった元素はどれ？

1. 全てあった
2. 半分くらいあった
3. ほとんど無かった



水分子

酸素, 水素



タンパク質

炭素, 酸素
窒素, 水素

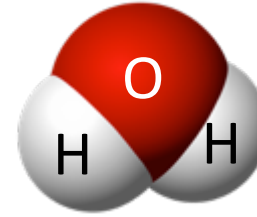


リン酸カルシウム
カルシウム, リン, 酸素

Question

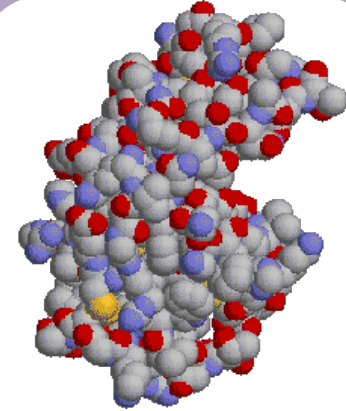
宇宙ができたときから
あった元素はどれ？

1. 全てあった
2. 半分くらいあった
3. ほとんど無かった



水分子

酸素, 水素



タンパク質

炭素, 酸素
窒素, 水素

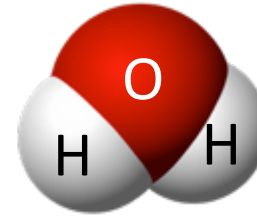


リン酸カルシウム
カルシウム, リン, 酸素

Question

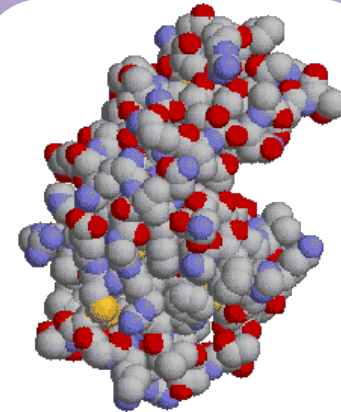
宇宙ができたときから
あった元素はどれ？

1. 全てあった
2. 半分くらいあった
3. **ほとんど無かった**



水分子

~~酸素, 水素~~



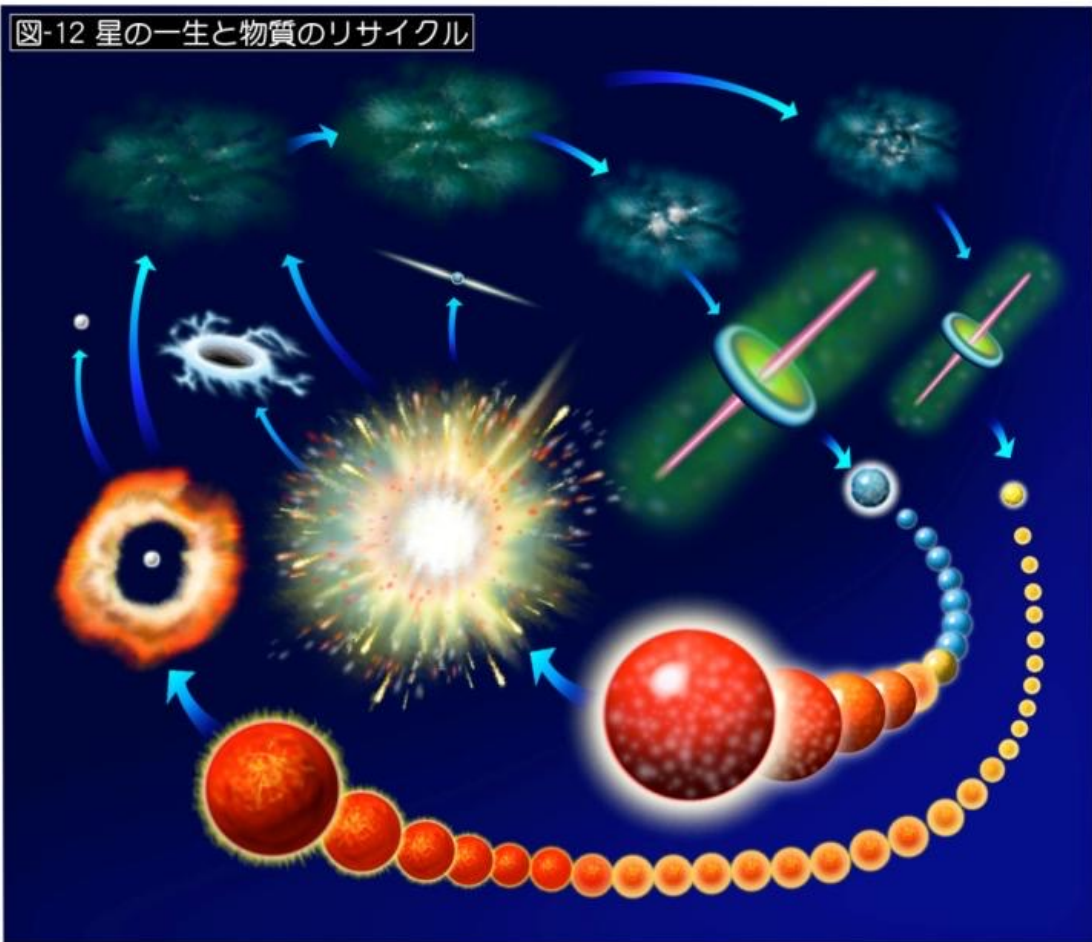
タンパク質

~~炭素, 酸素~~
~~窒素, 水素~~



リン酸カルシウム
~~カルシウム, リン, 酸素~~

図-12 星の一生と物質のリサイクル



福井康雄著「大宇宙の誕生」より

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	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
5	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
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	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
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	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		
			* 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		

恒星の核融合で作れる

超新星爆発、rプロセス (中性子星の合体) でしか作れない

- あなたの体も地球の大地も、宇宙誕生からこれまでの間に、何度か恒星を経験してきた



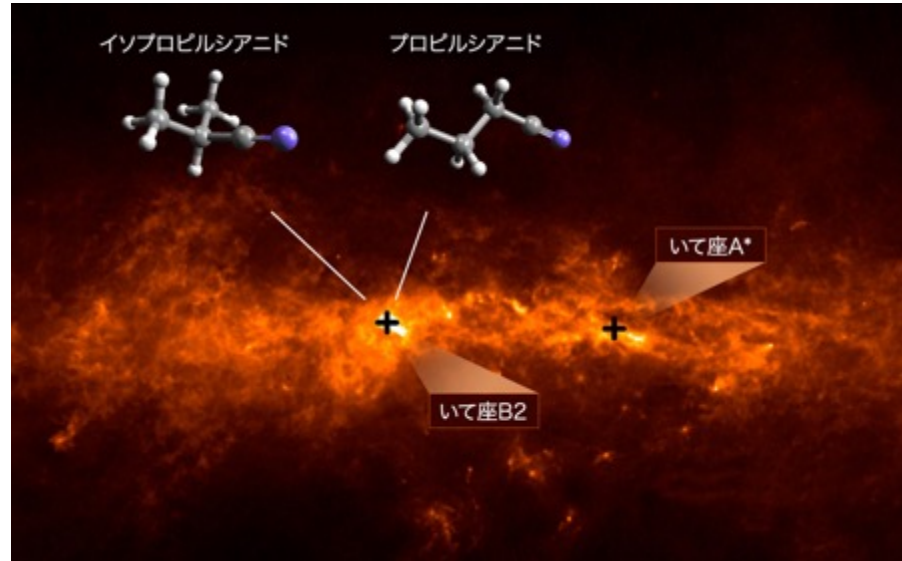
ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), A. Marinkovic/X-Cam



ESO/L. Calçada & NASA/JPL-Caltech/WISE Team

糖類分子のグリコールアルデヒドを星形成領域で発見

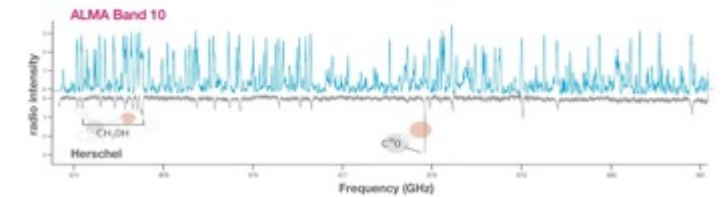
Jorgensen et al. (2012)



MPIfR/A. Weiß, University of Cologne/M. Koerber, MPIfR/A. Belloche

枝分かれした有機分子を銀河中心方向で発見

Belloche et al. (2014), Science



S. Lipinski/NASA & ESA, NAOJ, NRAO/AUI/NSF, B. McGuire et al.

糖類分子など多数の分子を大質量星形成領域で発見

McGuire et al. (2018)

- 分子雲の中で、かなり複雑な分子まで合成されていることが分かってきた

(5) 分子雲からの星の誕生：まとめ

- 恒星は分子雲の中でできる
- 恒星の特徴(温度、寿命など)は、初期質量で決まる
 - 初期質量が何で決まるかは、まだ分かっていない
 - 分子雲の密度(重力)、乱流、磁場が関係していて複雑な過程となる
- 恒星の周りに、惑星ができる
- 重元素は、大質量星が作る
- 有機物分子は分子雲でも作れる