

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡によるEagle nebulaの画像

Credits: Credits: NASA, ESA, CSA, STScI;

Joseph DePasquale (STScI), Anton M. Koekemoer (STScI), Alyssa Pagan (STScI)

[https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/](https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/nasa-s-webb-takes-star-filled-portrait-of-pillars-of-creation)

nasa-s-webb-takes-star-filled-portrait-of-pillars-of-creation

天文学

理工・総合情報学部講義 月曜5限



東京大学理学系研究科 鈴木昭宏

講義のアウトライン

- ・ 第1回: ~~天文学への導入と様々な時間・空間スケールの天体~~
- ・ 第2回: ~~電磁波による宇宙の観測~~
- ・ 第3回: ~~太陽系内天体と天体の運動~~
- ・ 第4回: ~~天体の距離、明るさ、色~~
- ・ 第5回: ~~恒星1 - 恒星のエネルギー源と核反応 -~~

講義のアウトライン

- ・ 第6回: ~~恒星2 -恒星の分類と進化-~~
- ・ 第7回: **星の誕生と星間物質**
- ・ 第8回: ~~銀河1 -銀河系の構成要素-~~
- ・ 第9回: ~~銀河2 -銀河の分類と進化-~~
- ・ 第10回: 超新星爆発と元素の起源

講義のアウトライン

- ・ 第11回: 白色矮星、中性子星、ブラックホール
- ・ 第12回: ニュートリノ天文学と高エネルギー天体
- ・ 第13回: 重力波天文学と中性子星・ブラックホール
- ・ 第14回: 宇宙膨張の発見と宇宙の歴史
- ・ 第15回: 系外惑星の世界

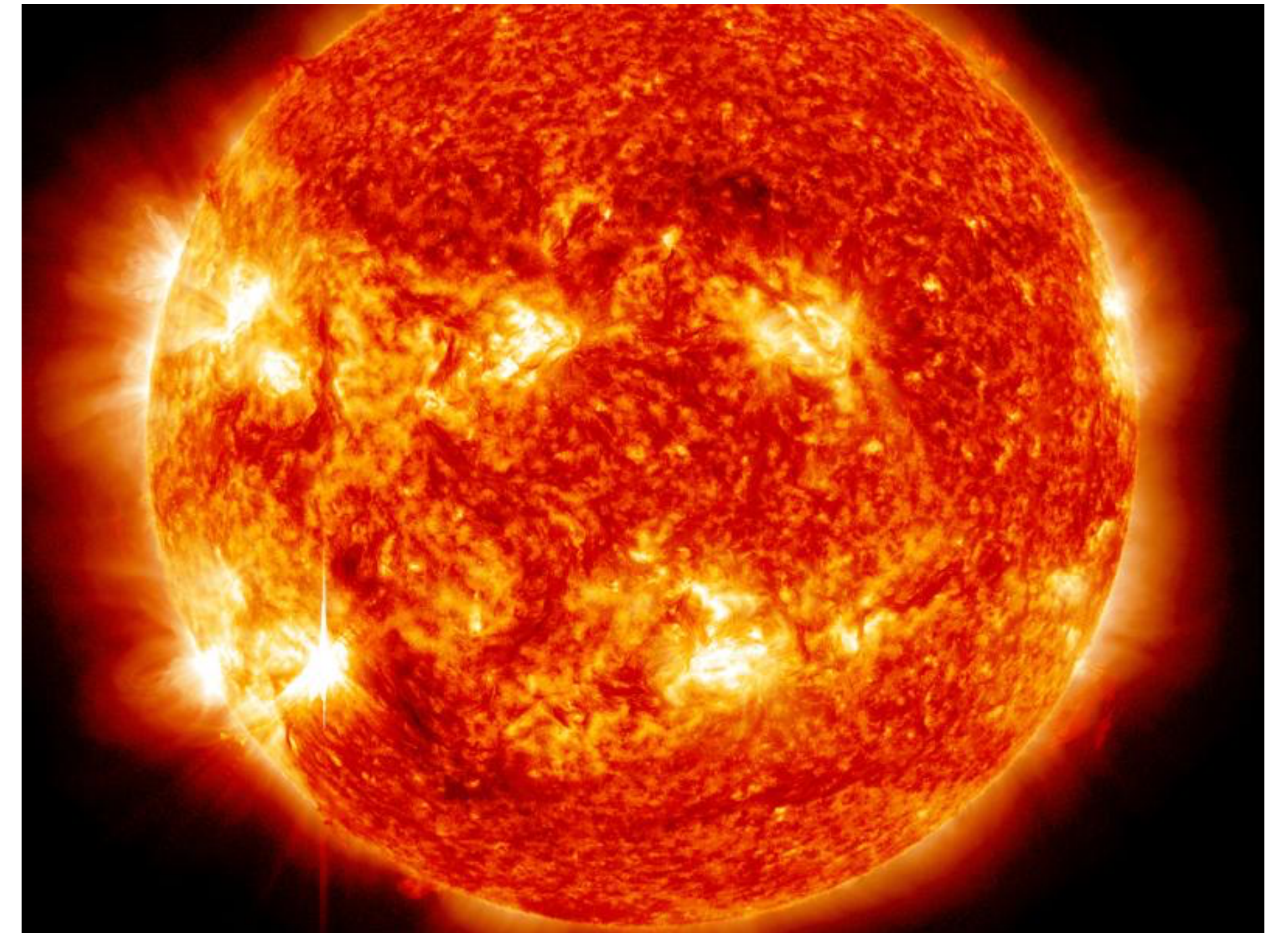
第7回:

星の誕生と星間物質

- 星間物質と分子雲
- 星が生まれる過程
- 星間空間での物質の循環

星が生まれるとは

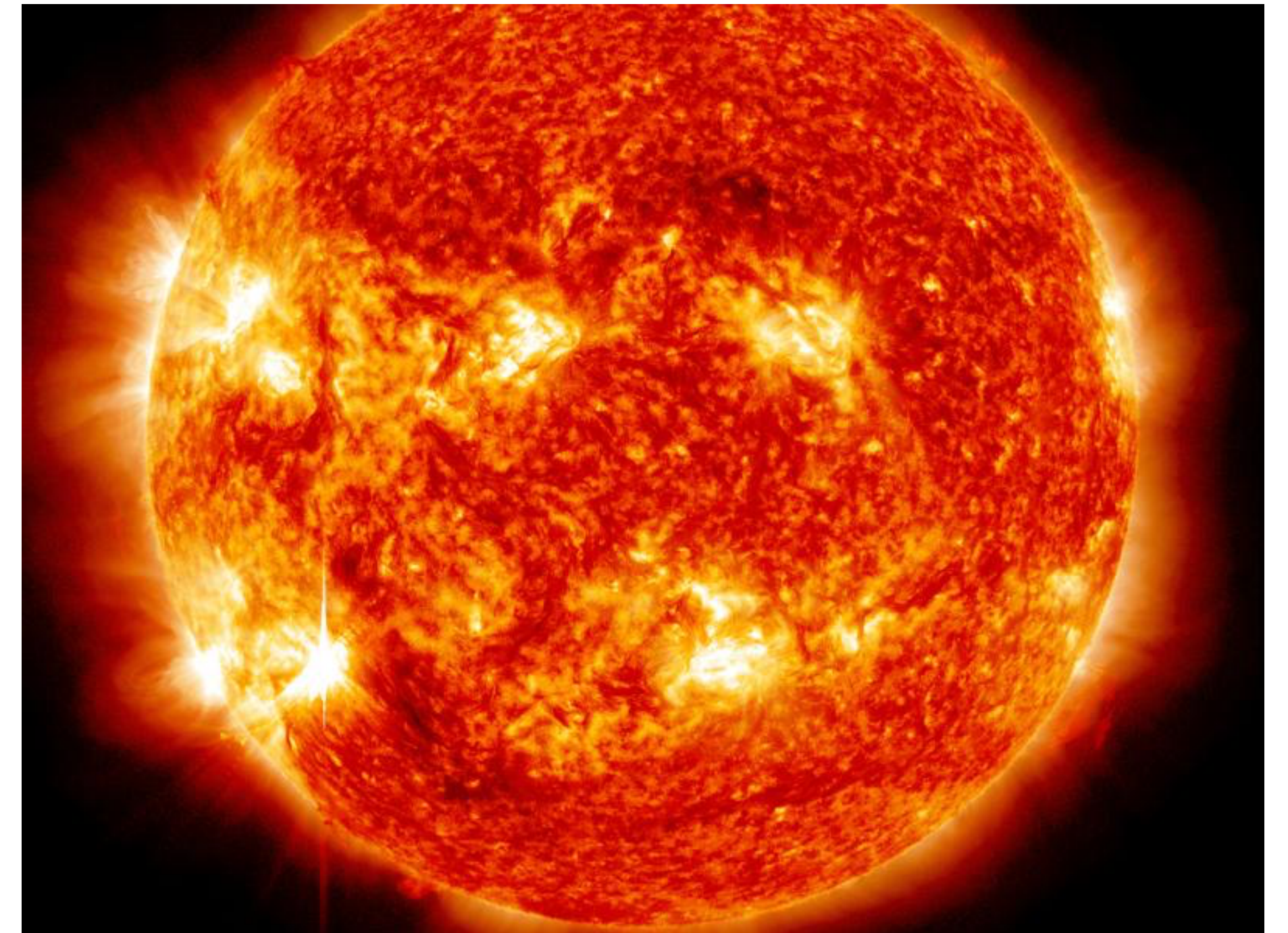
- ・ 前回は、現在の太陽(主系列段階)から赤色巨星を経て白色矮星までの進化を学習した
- ・ その”前”は？
- ・ 星が生まれる場所がどこかにあるはず
- ・ それはどこか？今もあるのか？



credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO)

星が生まれるとは

- ・ 現在の太陽は、重力的に集まった水素ガス
- ・ 平均密度 $\bar{\rho} = 3M_{\odot}/(4\pi R_{\odot}^3) = 1.4 \times 10^3 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$
- ・ 一方で、銀河系の星がない部分の密度は？
- ・ 1 cm^3 あたり、たったの水素原子 1 個
- ・ $1.6 \times 10^{-27} \text{ [kg]}/1 \text{ [cm}^3\text{]} \simeq 10^{-21} \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$



credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO)

どうやって20桁以上も物質が集まったのか？ 集まる前の物質はどこに？

暗黒星雲の発見

- ・ ウィリアム・ハーシェル(1738-1822)
- ・ “A hole in the sky(天空の穴)”
- ・ その天域にだけ星が少ない
- ・ ということなのか？

ref. : Steinicke (2016)

Journal of Astronomical History and Heritage 19, p. 305-326

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016JAHH...19..305S/abstract>



暗黒星雲 Barnard 68の可視光画像

credit: ESA

<https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/d/Dark+Nebula>

暗黒星雲の発見

- ・ ウィリアム・ハーシェル(1738-1822)
- ・ “A hole in the sky(天空の穴)”
- ・ その天域にだけ星が少ない
- ・ ということなのか？

ref. : Steinicke (2016)

Journal of Astronomical History and Heritage 19, p. 305-326

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016JAHH...19..305S/abstract>



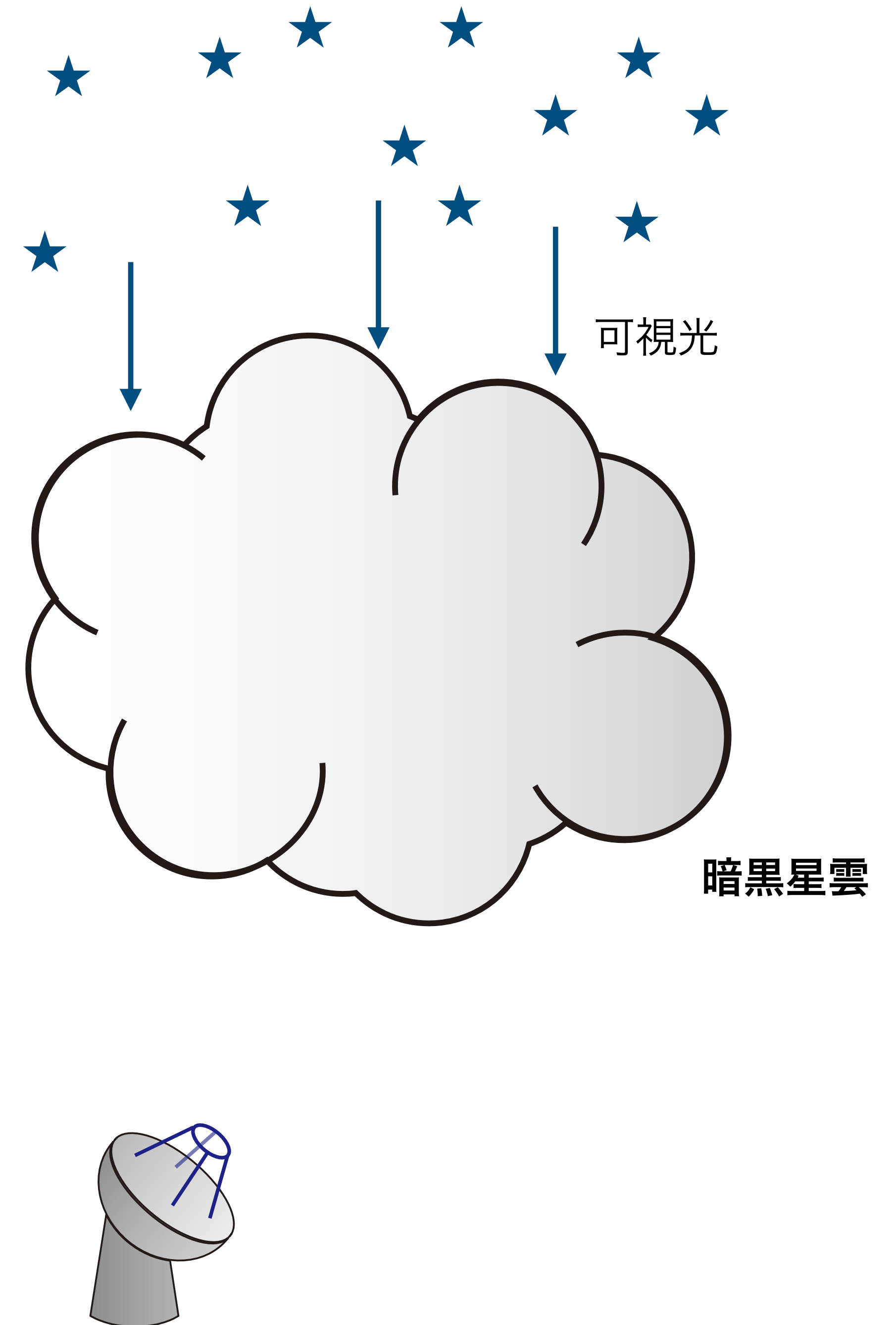
馬頭星雲(暗黒星雲)とHII領域の可視光画像

credit: AAO/David Malin

<https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/d/Dark+Nebula>

暗黒星雲の発見

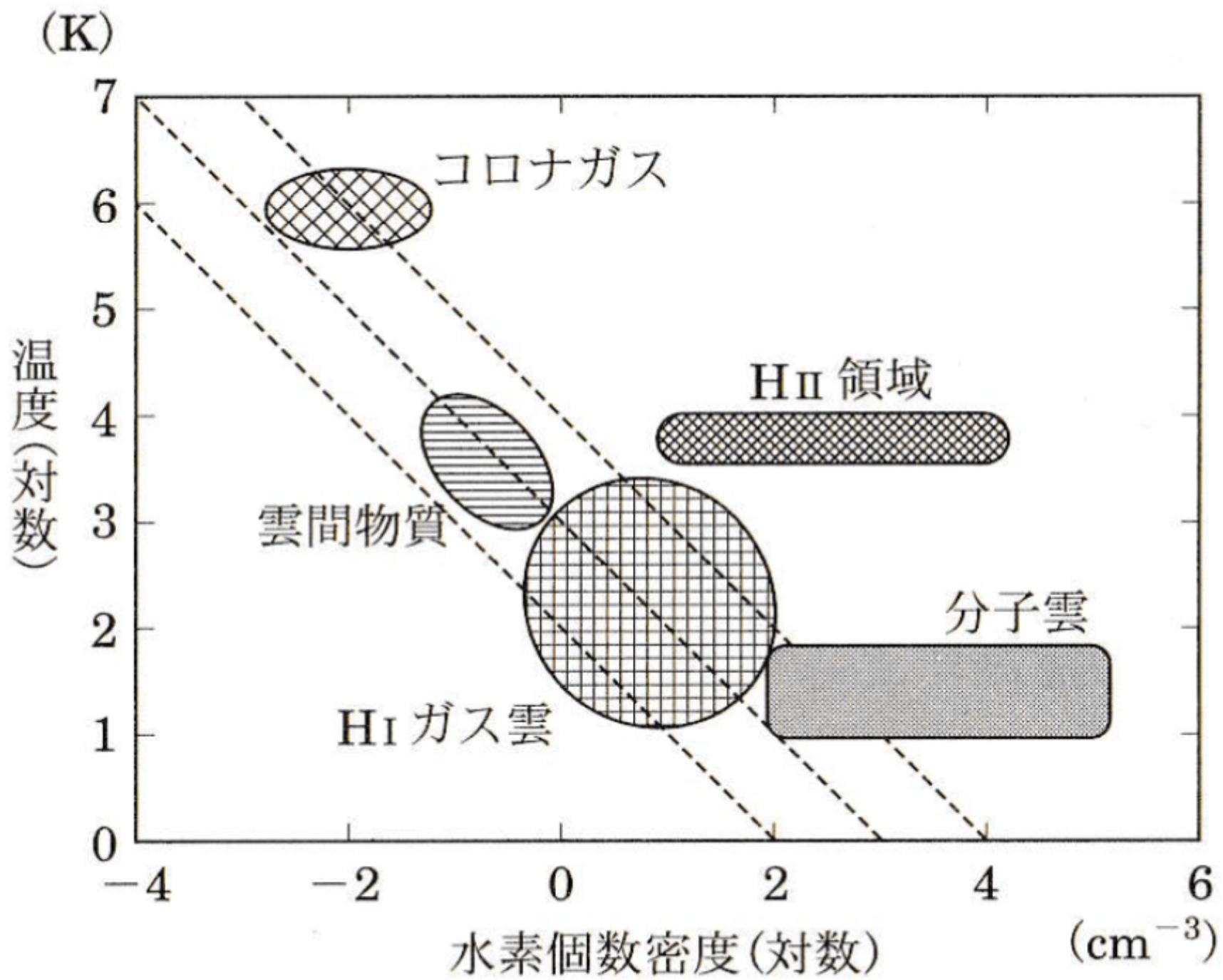
- **暗黒星雲(dark nebula)**: 星間塵(ダスト)を多量に含むガス塊で、分子なども含む
- ガス雲に含まれるダストが背景にある星の光などを吸収するため可視光で見えない
- つまり、銀河には星だけでなくガス状の物質や、星の光をブロックするぐらい集まったガス雲も存在している(**星間物質: interstellar medium**)



星間物質(interstellar medium)

- 暗黒星雲として観測される成分のほか、密度・温度の異なるいくつかの状態(相)を総合してこう呼ぶ

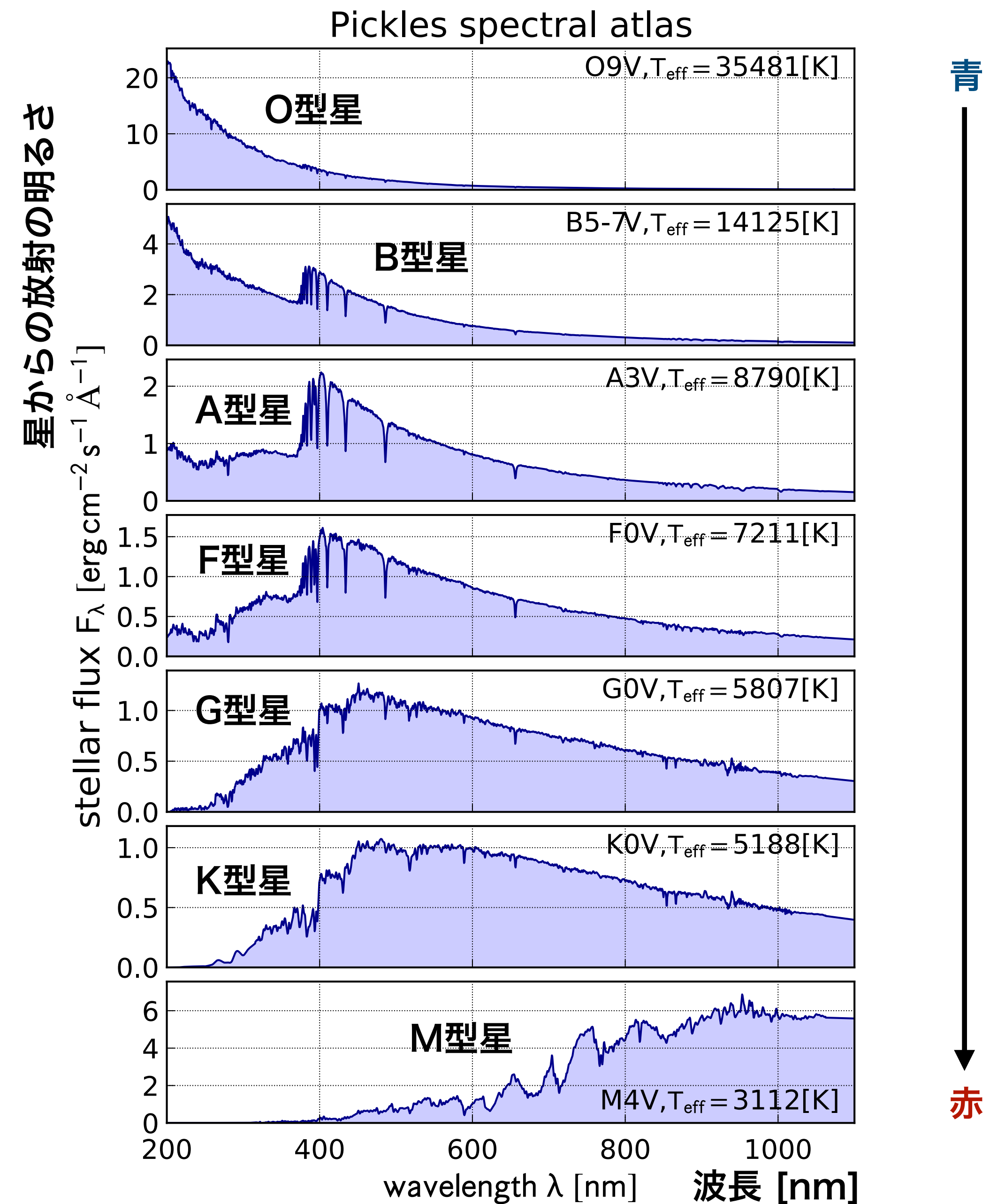
	密度 [原子/cm ³]	温度 [K]	水素の形態
分子雲	10 ² - 10 ⁵	10 - 50	分子
中性水素ガス	10 ⁰ - 10 ²	数10 - 10 ³	中性(原子)
HII領域	10 ² - 10 ⁴	10 ⁴	電離(イオン)
コロナガス	10 ⁻³ - 10 ⁻²	10 ⁶	電離(イオン)



シリーズ現代の天文学第6巻「星間物質と星形成」図1.2

星間物質の観測

- 分子雲や中性水素ガスは温度が星よりもかなり低い
- 星は温度が低いといっても数 10^3K 程度(赤外線)
- もっと低温のガスは暗黒星雲として見えるだけ → 情報が得られない
- 赤外線よりももっと長い波長の光(電波)を使おう



星間物質の観測

- 分子雲や中性水素ガスは温度が星よりもかなり低い
- 星は温度が低いといっても数 10^3 K程度(赤外線)
- もっと低温のガスは暗黒星雲として見えるだけ → 情報が得られない
- 赤外線よりももっと長い波長の光(電波)を使おう



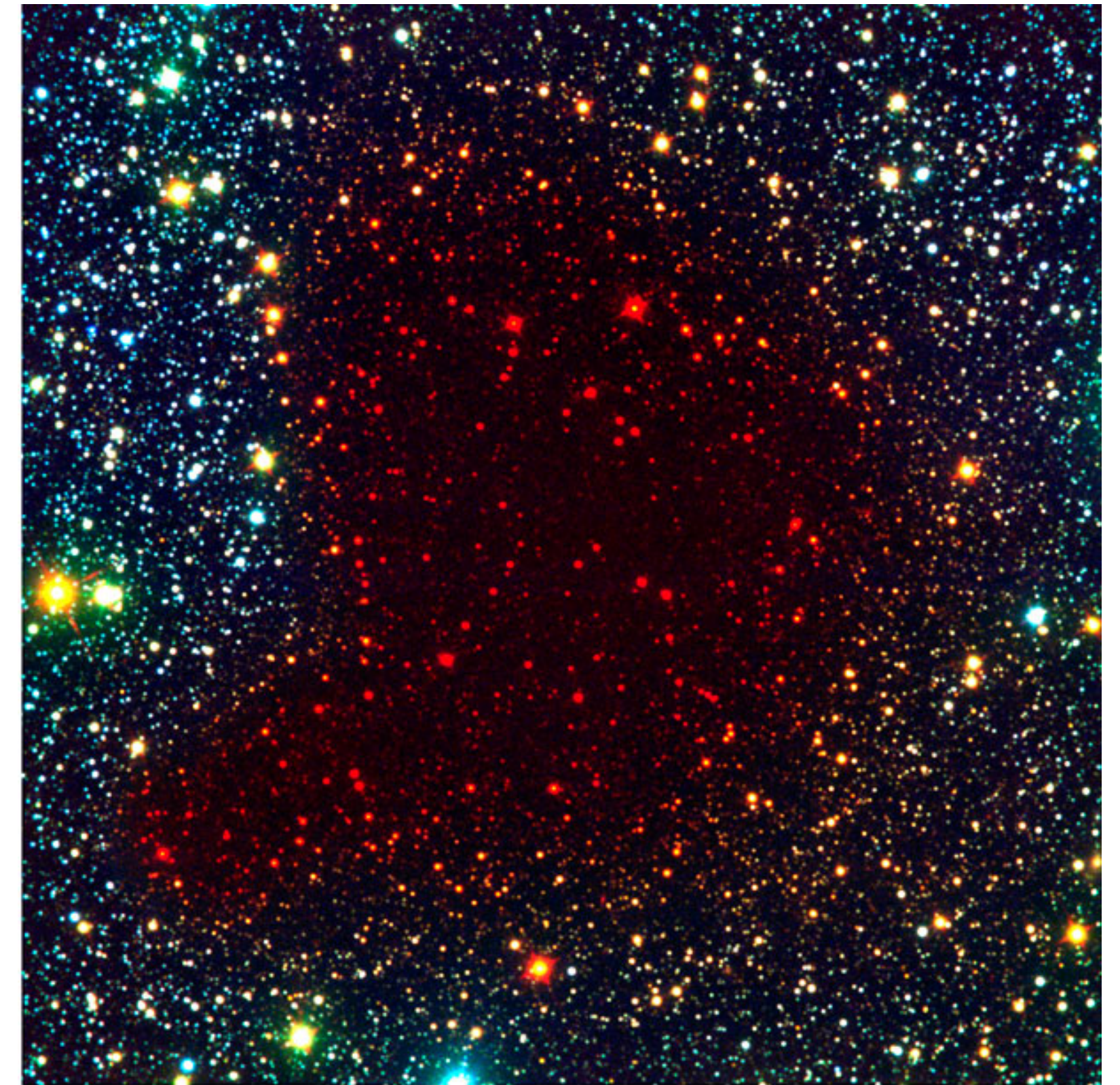
暗黒星雲 Barnard 68の可視光画像

credit: ESA

<https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/d/Dark+Nebula>

星間物質の観測

- 分子雲や中性水素ガスは温度が星よりもかなり低い
- 星は温度が低いといっても数 10^3K 程度(赤外線)
- もっと低温のガスは暗黒星雲として見えるだけ → 情報が得られない
- 赤外線よりももっと長い波長の光(電波)を使おう

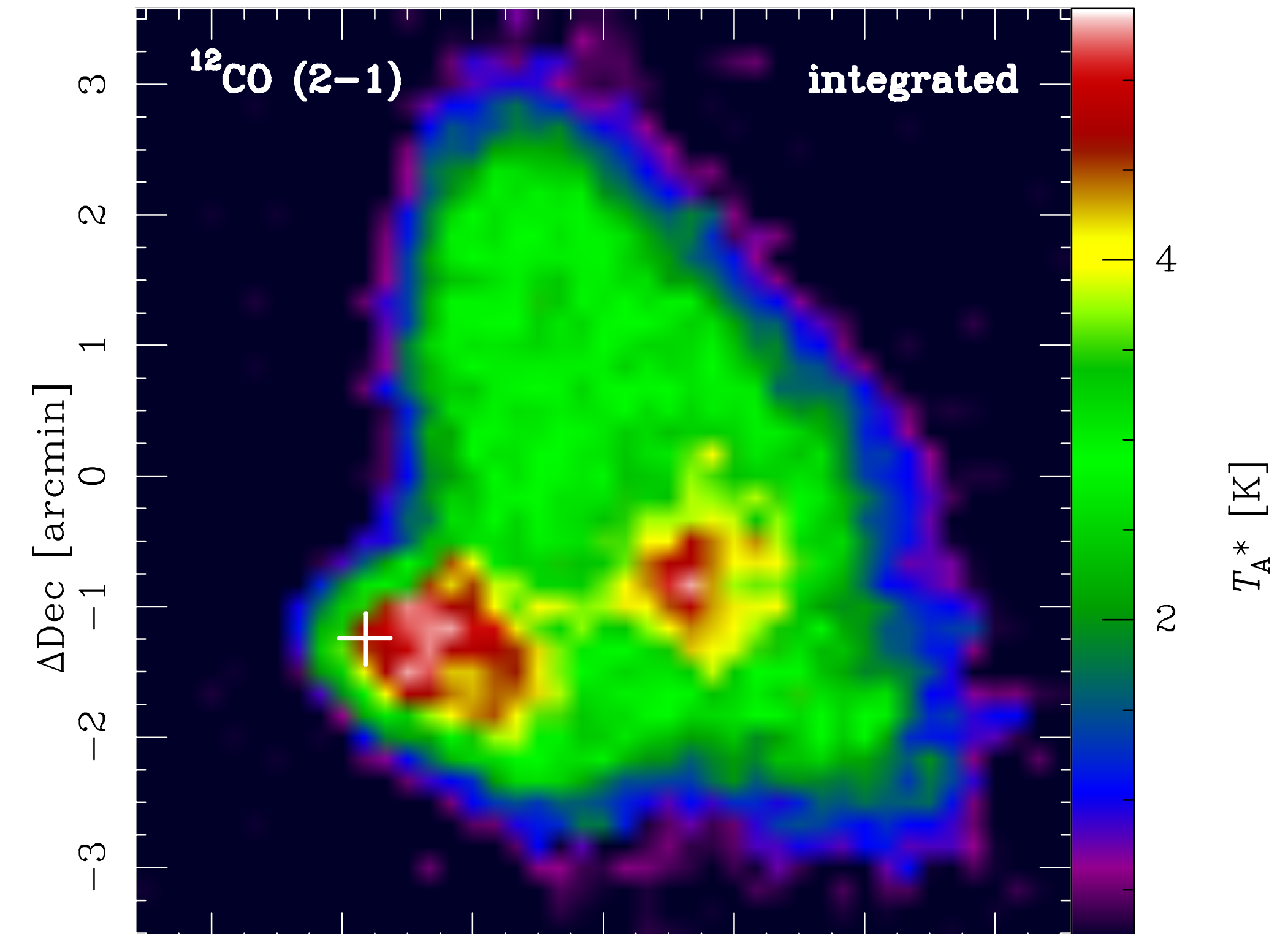


B, I, K

暗黒星雲B68の赤外線画像 credit: ESO
<https://www.eso.org/public/images/eso0102c/>

星間物質の観測

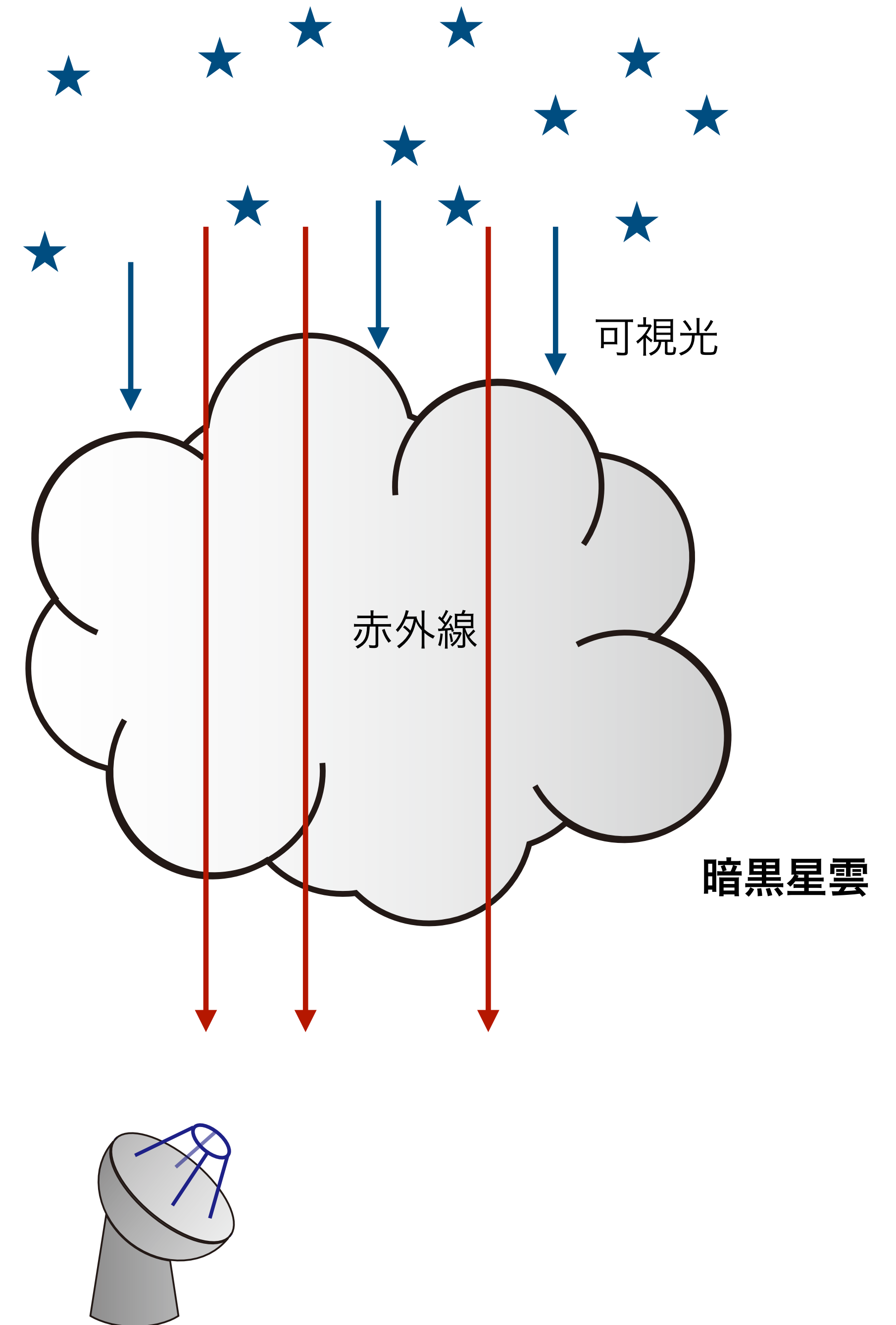
- 分子雲や中性水素ガスは温度が星よりもかなり低い
- 星は温度が低いといっても数 10^3 K程度(赤外線)
- もっと低温のガスは暗黒星雲として見えるだけ → 情報が得られない
- 赤外線よりももっと長い波長の光(電波)を使おう



M. Nielbock et al. (2012) A&A, 547, A11
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219139>

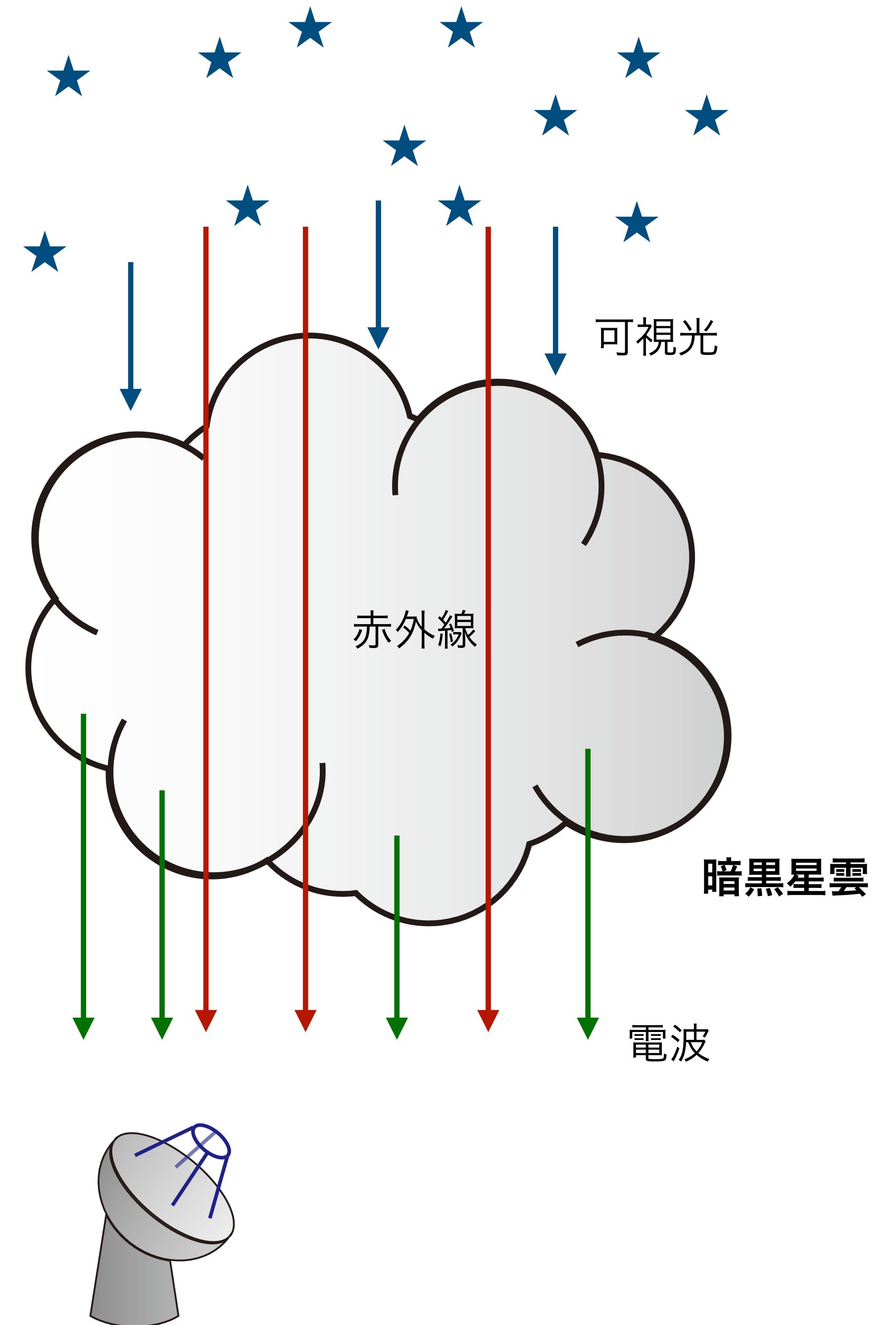
星間物質の観測

- 分子雲や中性水素ガスは温度が星よりもかなり低い
- 星は温度が低いといっても数 10^3K 程度(赤外線)
- もっと低温のガスは暗黒星雲として見えるだけ → 情報が得られない
- 赤外線よりももっと長い波長の光(電波)を使おう



星間物質の観測

- 分子雲や中性水素ガスは温度が星よりもかなり低い
- 星は温度が低いといっても数 10^3K 程度(赤外線)
- もっと低温のガスは暗黒星雲として見えるだけ → 情報が得られない
- 赤外線よりももっと長い波長の光(電波)を使おう



電波による星間物質の観測

- ・ 様々な波長の電磁波による銀河中心方向の観測
- ・ 可視光(optical)で黒く隠されていた部分が電波(や赤外線)では明るく見える
- ・ 銀河円盤に沿って、分子ガスや中性水素ガスが多数存在する

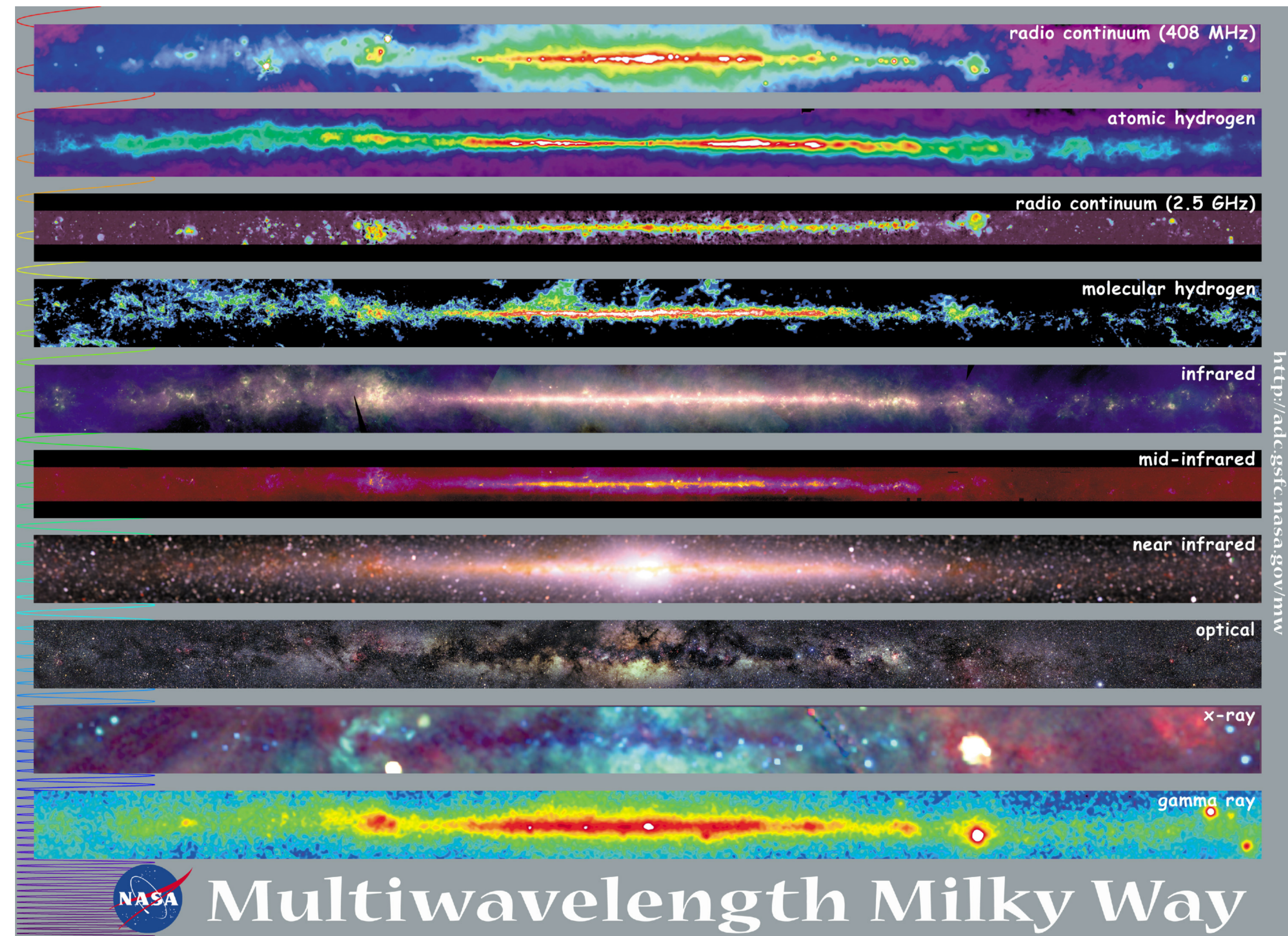


可視光での天の川銀河中心の姿 credit: Serge Brunie

<https://apod.nasa.gov/apod/ap051004.html>

電波による星間物質の観測

- 様々な波長の電磁波による銀河中心方向の観測
- 可視光(optical)で黒く隠されていた部分が電波(や赤外線)では明るく見える
- 銀河円盤に沿って、分子ガスや中性水素ガスが多数存在する



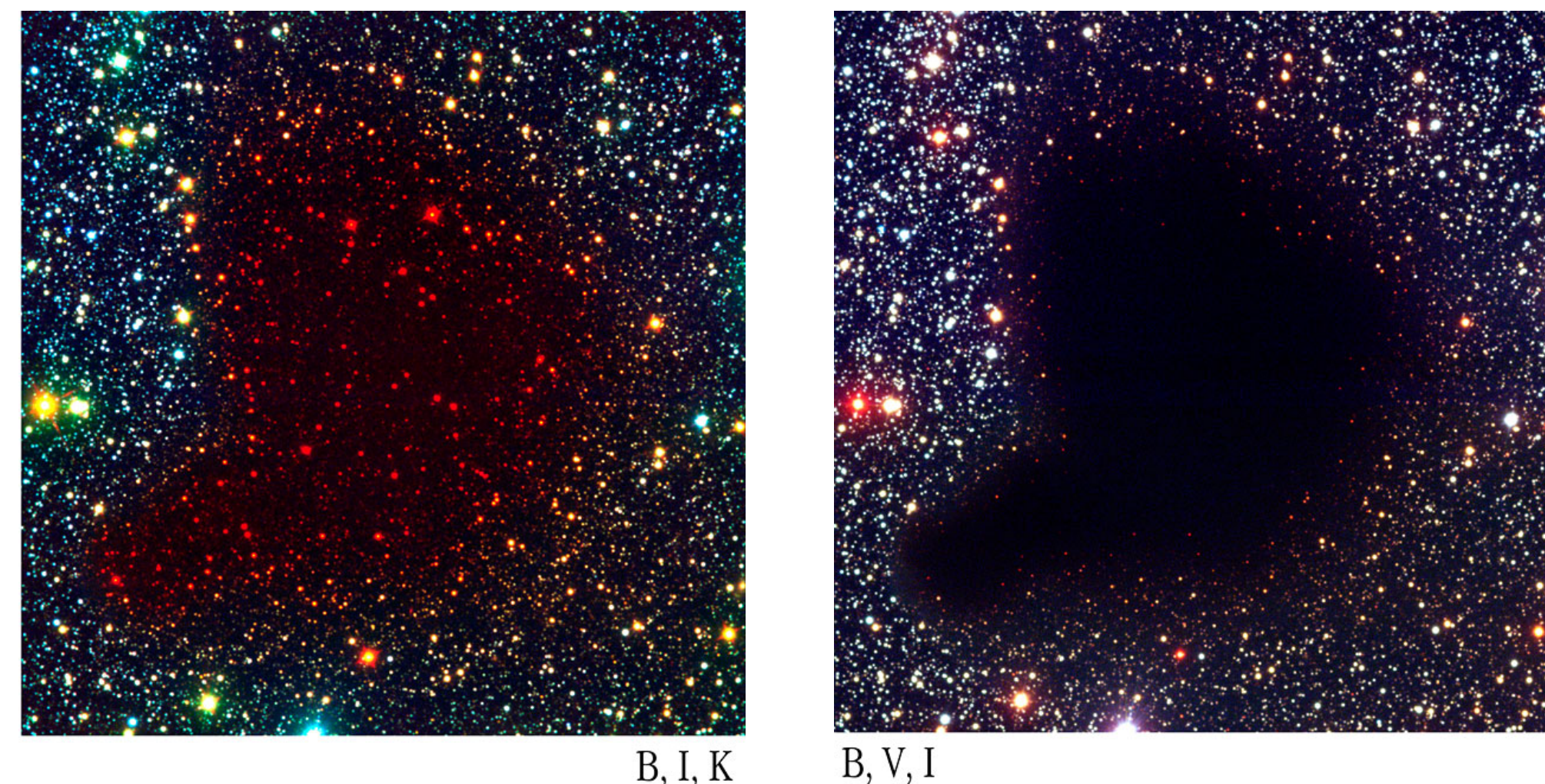
多波長での天の川銀河中心の姿 credit: NASA,

<https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/mwmw/>

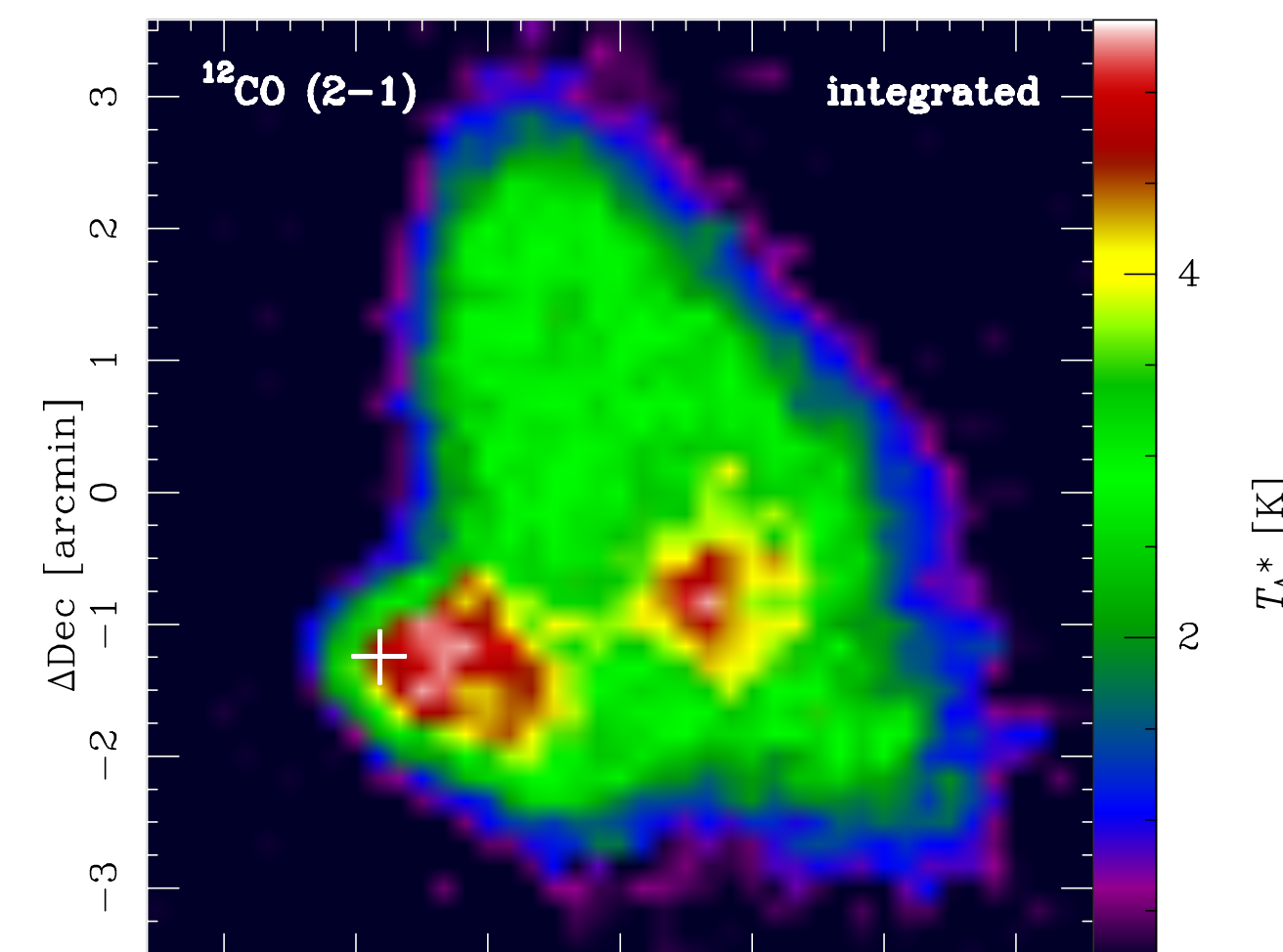
電波による星間物質の観測

暗黒星雲B68の赤外線画像 credit: ESO

<https://www.eso.org/public/images/eso0102c/>



- ・可視光で暗黒だった部分が電波では光って観測される
- ・暗黒星雲B68の例: 一酸化炭素分子 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ の電波強度(回転遷移)
- ・様々な分子からの放射を手掛かりにして、可視光では見えない物質の物理状態を調べる

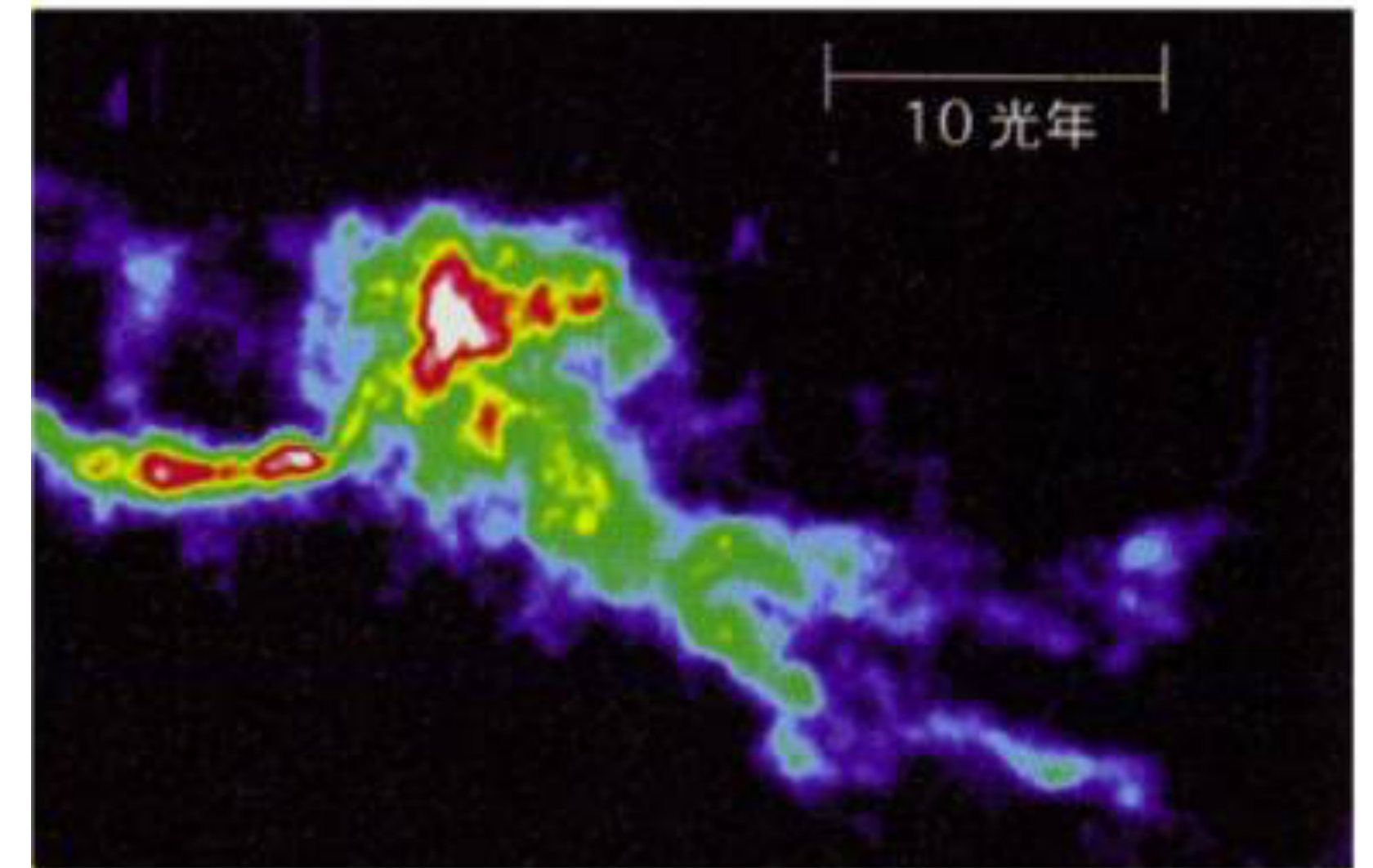


M. Nielbock et al. (2012) A&A, 547, A11

<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219139>

電波による星間物質の観測

- ・ 可視光で暗黒だった部分が電波では光って観測される
- ・ おうし座分子雲の例: 一酸化炭素分子の同位体 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ の電波強度(110GHz)
- ・ 様々な分子からの放射を手掛かりにして、可視光では見えない物質の物理状態を調べる



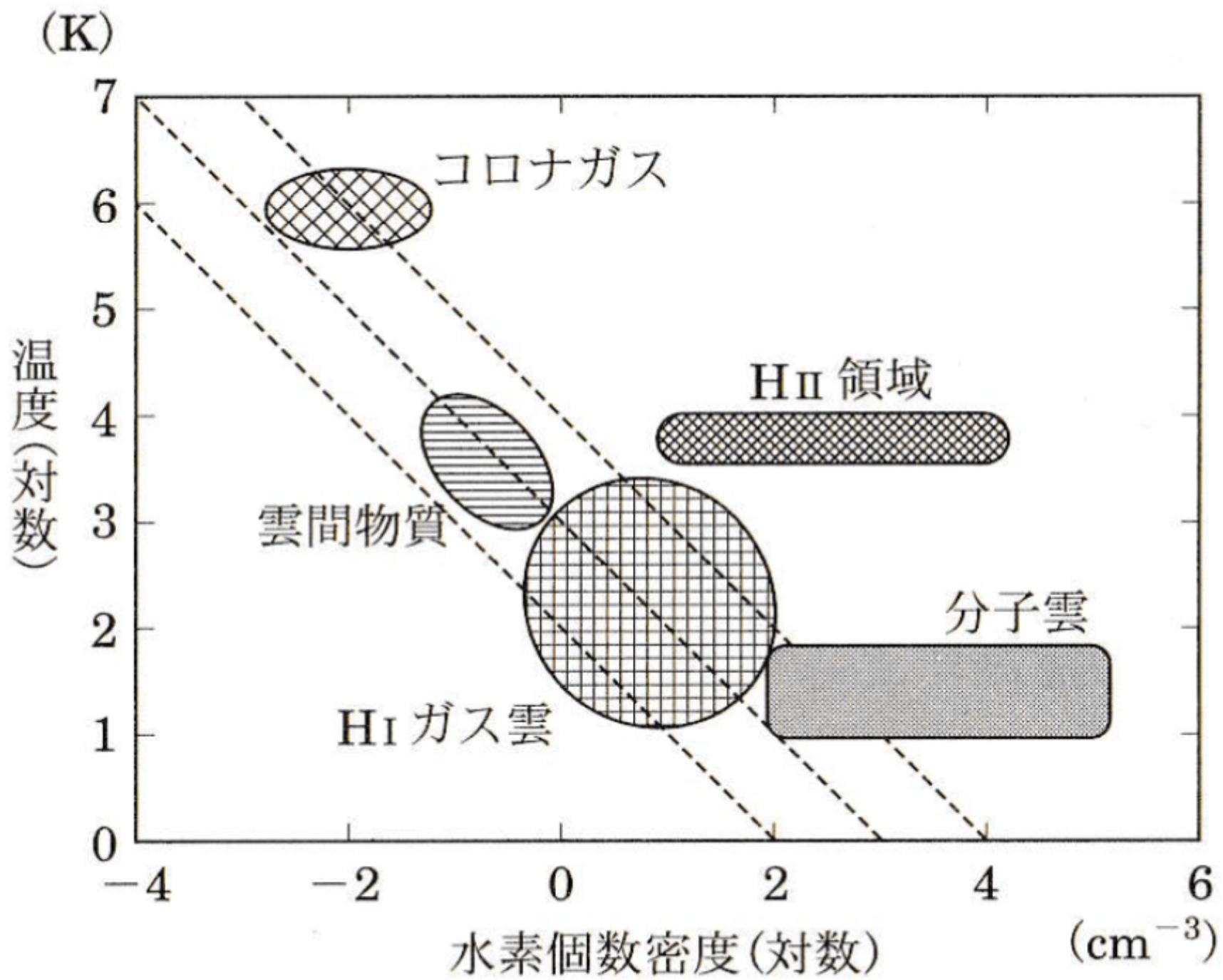
おうし座分子雲の可視光(上)と電波(下)での観測
credit: 名古屋大学、理科年表オフィシャルサイト

https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_009_2.html

星間物質(interstellar medium)

- 暗黒星雲として観測される成分のほか、密度・温度の異なるいくつかの状態(相)を総合してこう呼ぶ

	密度 [原子/cm ³]	温度 [K]	水素の形態
分子雲	10 ² - 10 ⁵	10 - 50	分子
中性水素ガス	10 ⁰ - 10 ²	数10 - 10 ³	中性(原子)
HII領域	10 ² - 10 ⁴	10 ⁴	電離(イオン)
コロナガス	10 ⁻³ - 10 ⁻²	10 ⁶	電離(イオン)

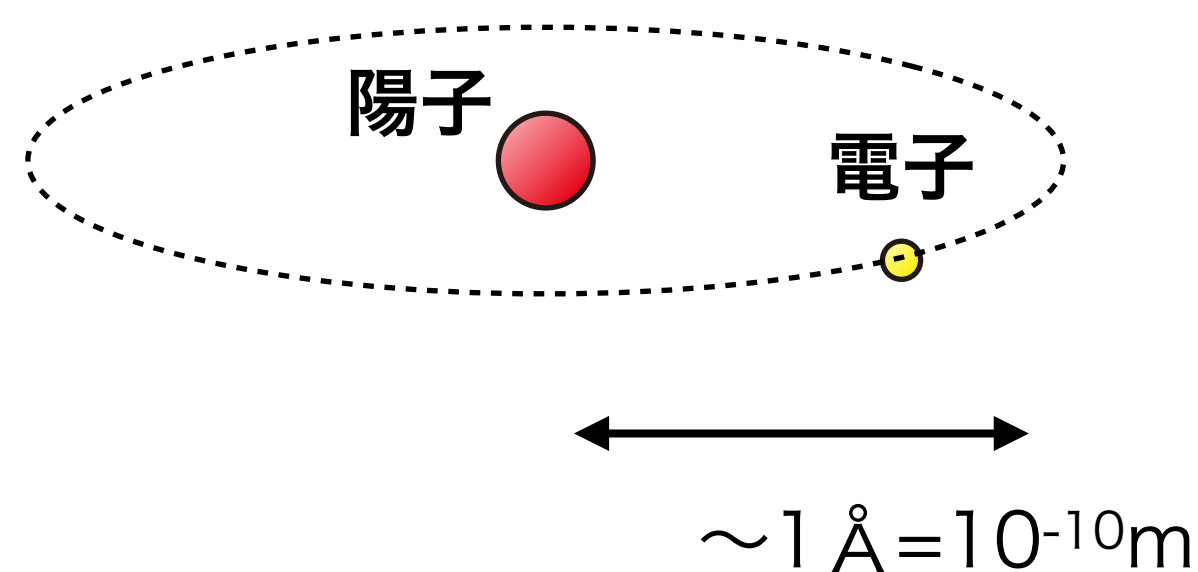


シリーズ現代の天文学第6巻「星間物質と星形成」図1.2

中性水素ガス(HI gas)

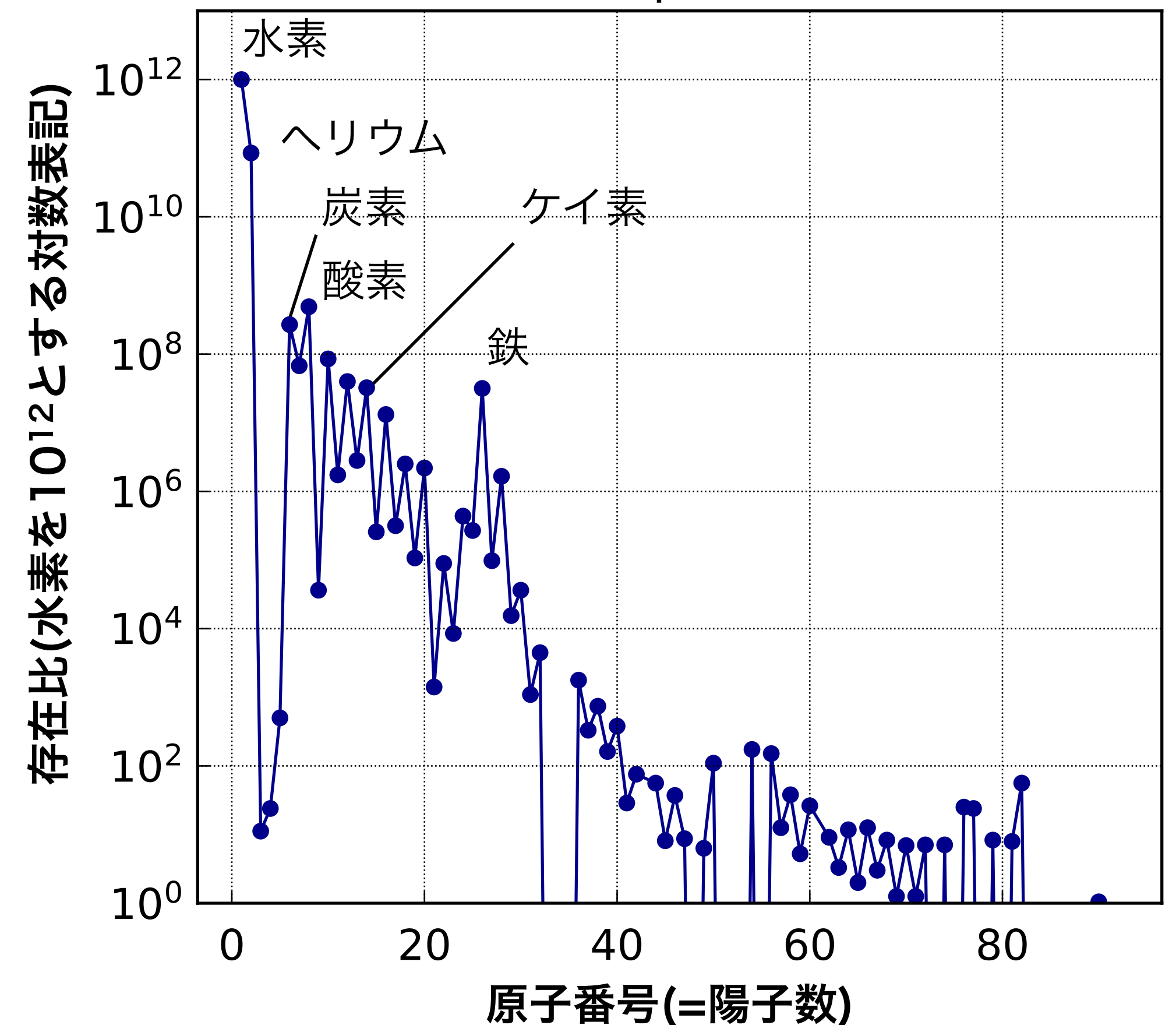
- ・ 中性な原子の状態で存在している水素の集まり ($T = \text{数}10 - 10^3 \text{K}$)
- ・ 水素はやはり銀河にたくさん存在している (太陽の化学組成参照) ので見つかりやすい

水素原子の模式図



太陽表面(光球: photosphere)
での化学組成(Asplund et al. 2009)

Solar photospheric abundance
Asplund et al. (2009)

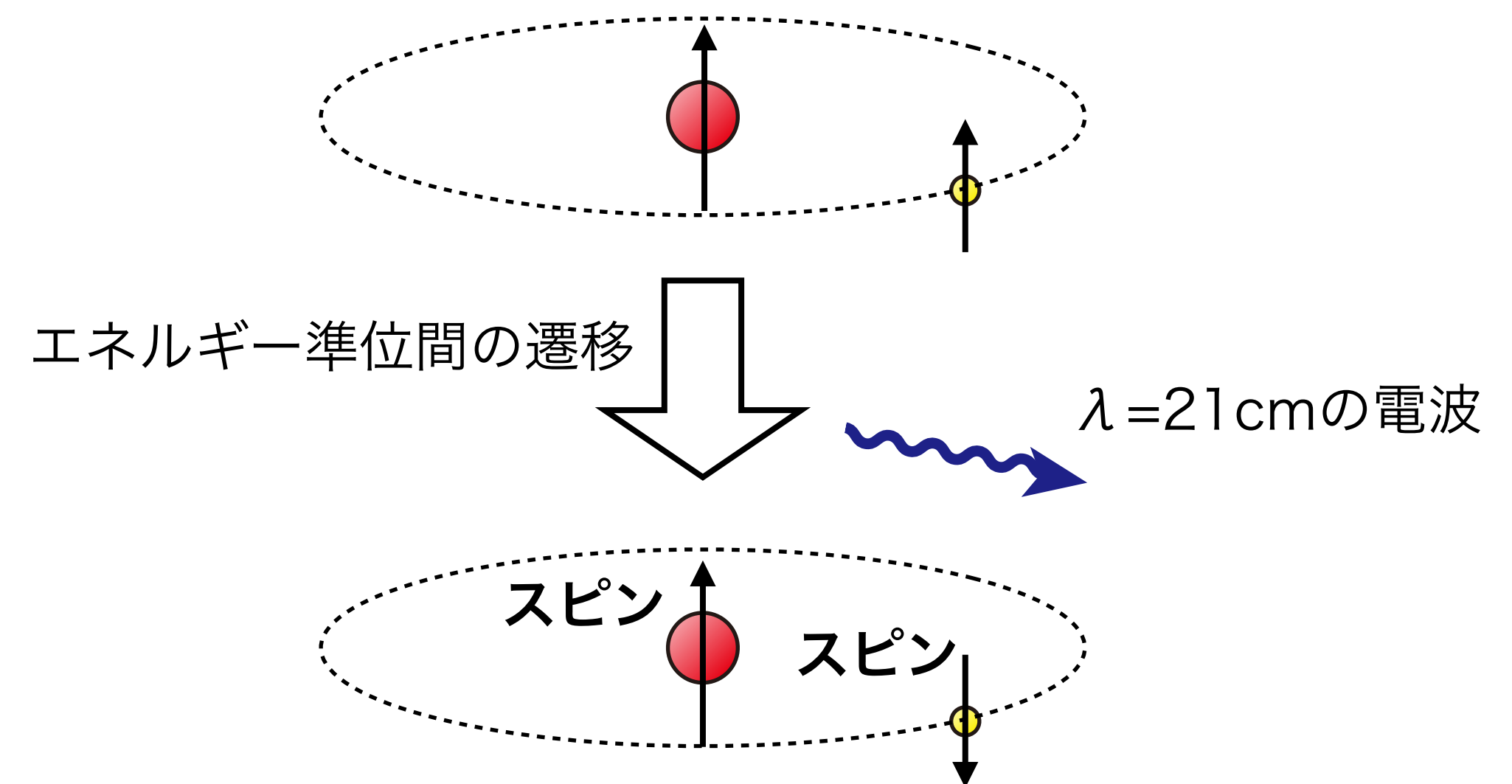


中性水素ガス(HI gas)

- 中性な原子の状態で存在している水素の集まり ($T = \text{数}10 - 10^3 \text{K}$)
- 水素はやはり銀河にたくさん存在している (太陽の化学組成参照) ので見つかりやすい
- **水素の21cm線 (21cm hydrogen line):** 水素原子に特徴的な放射
- 中性水素ガスの分布: 銀河の円盤に沿って存在

21cm線の放射機構の模式図

スピンの揃った状態(エネルギー準位が高い)

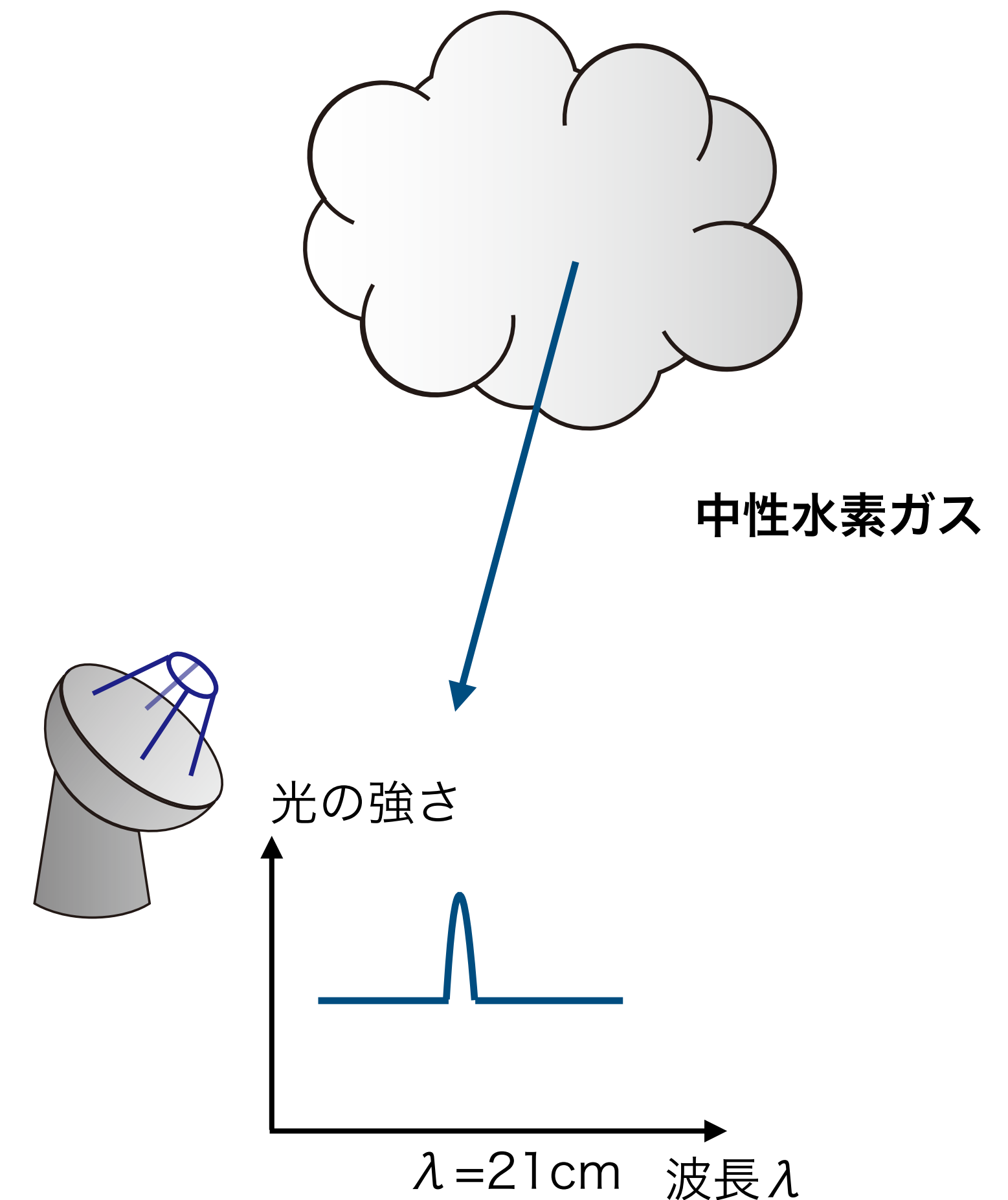


スピンの反対の状態(エネルギー準位が低い)

中性水素ガス(HI gas)

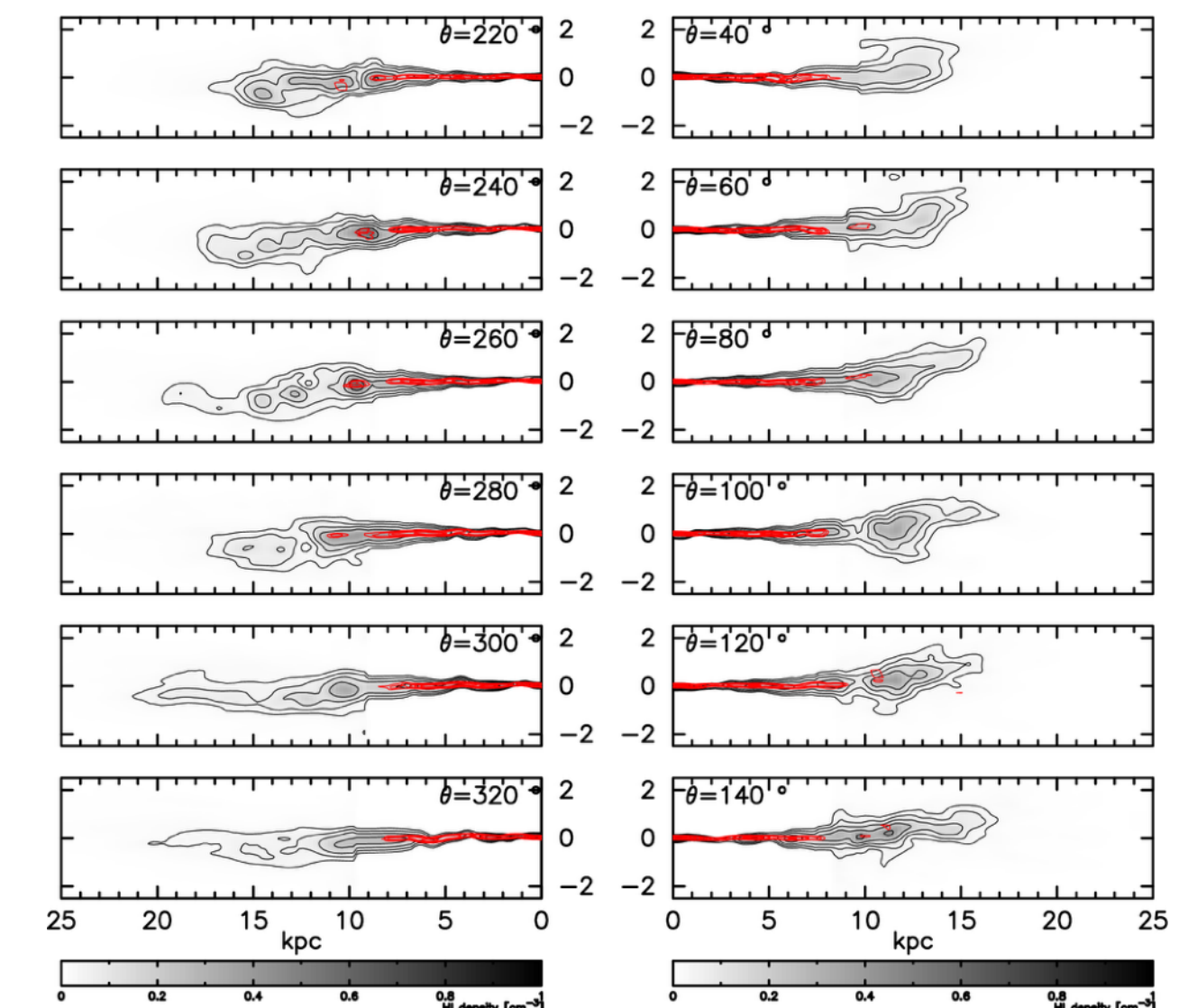
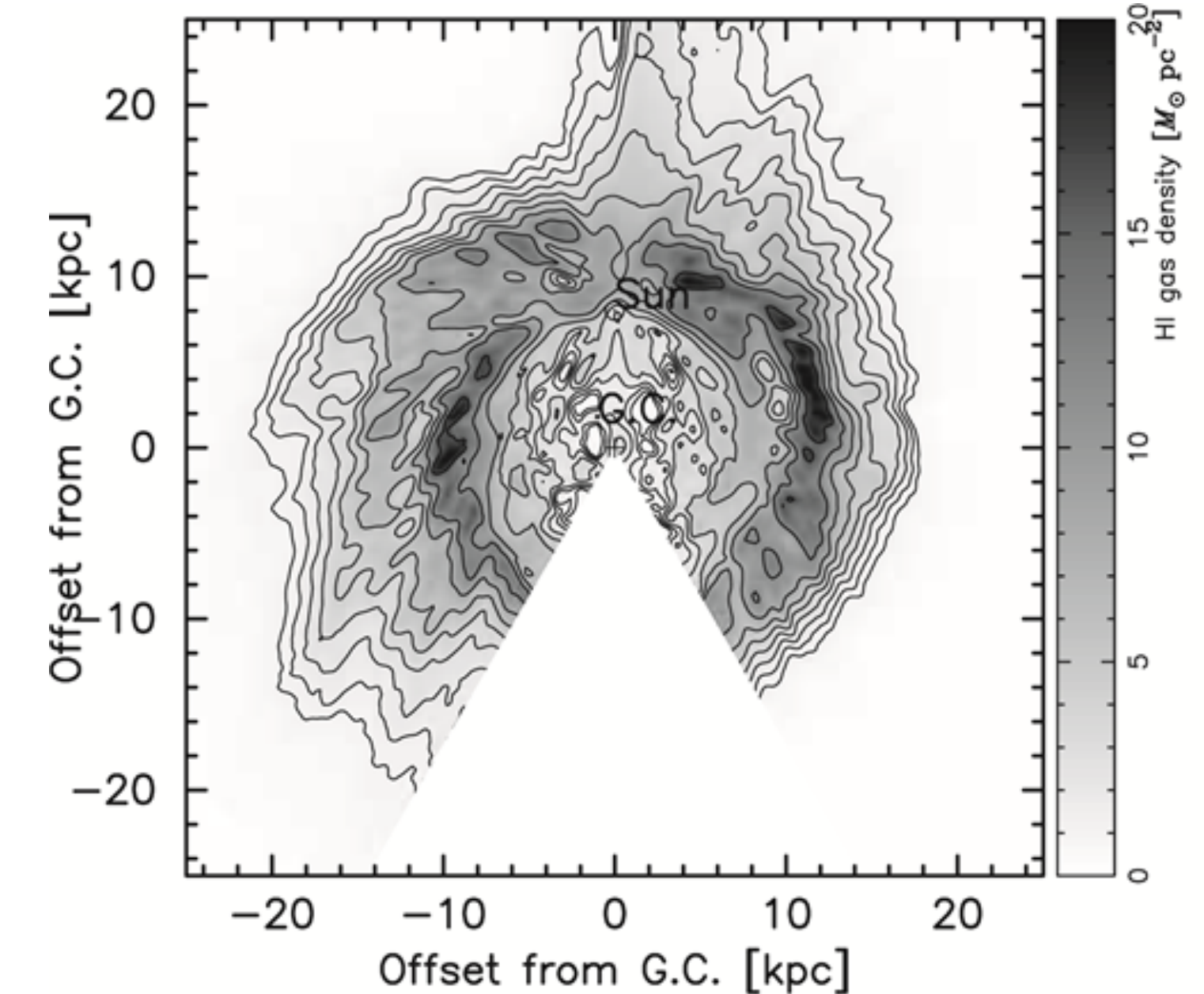
- 中性な原子の状態で存在している水素の集まり ($T = \text{数}10 - 10^3 \text{K}$)
- 水素はやはり銀河にたくさん存在している (太陽の化学組成参照) ので見つかりやすい
- **水素の21cm線 (21cm hydrogen line):** 水素原子に特徴的な放射
- 中性水素ガスの分布: 銀河の円盤に沿って存在

21cm線の放射機構の模式図

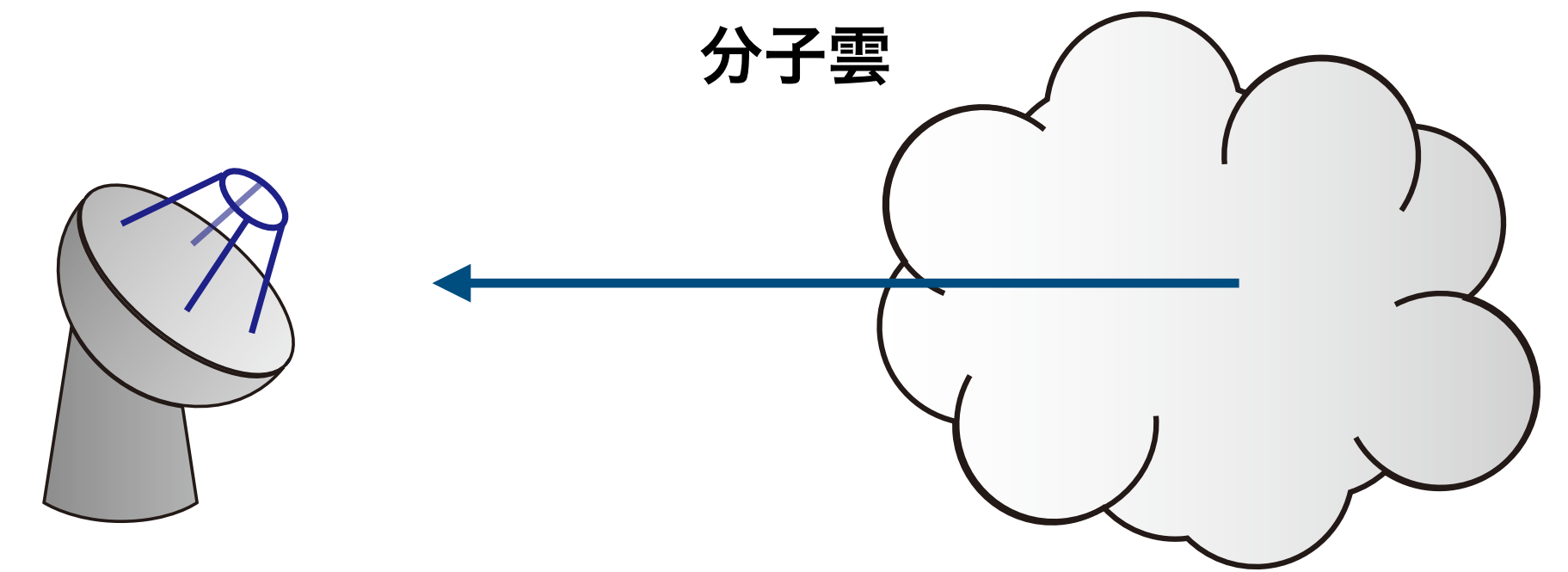


中性水素ガス(HI gas)

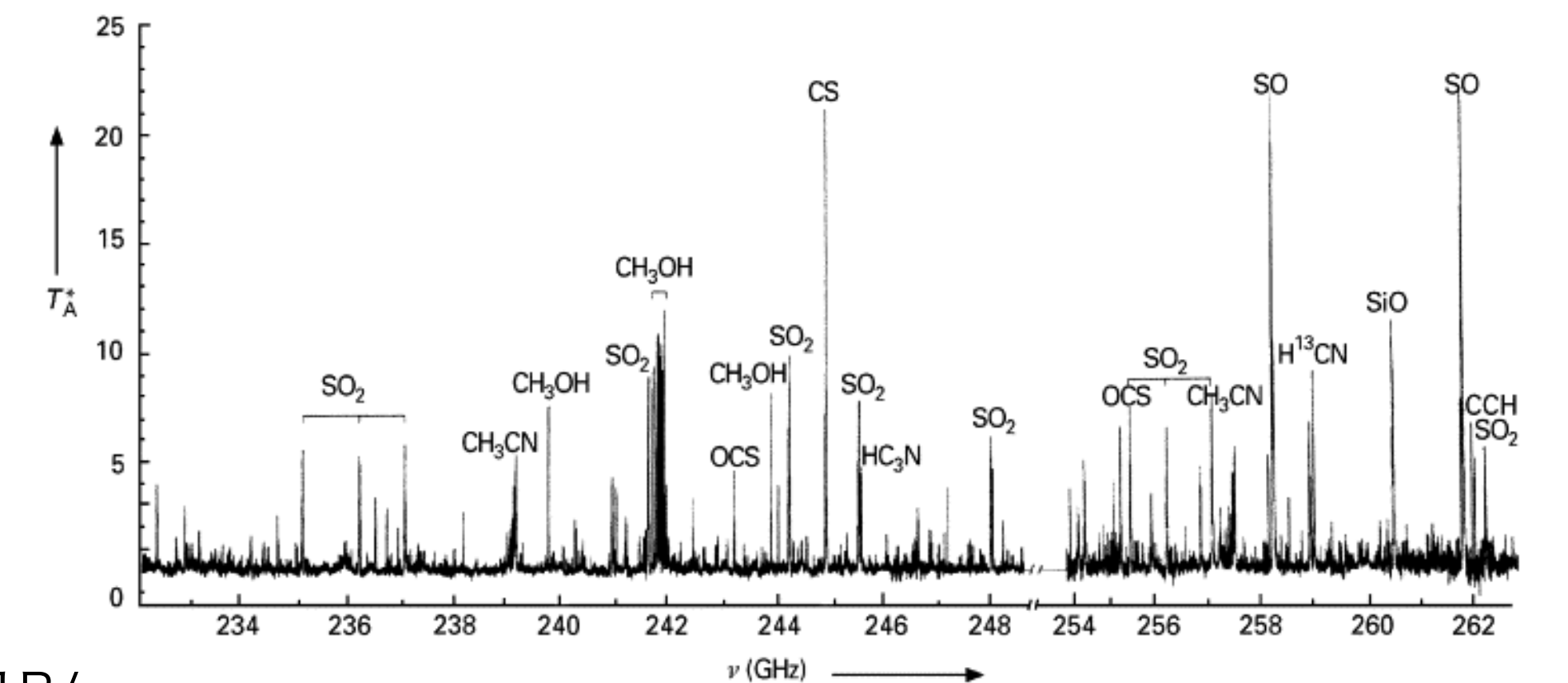
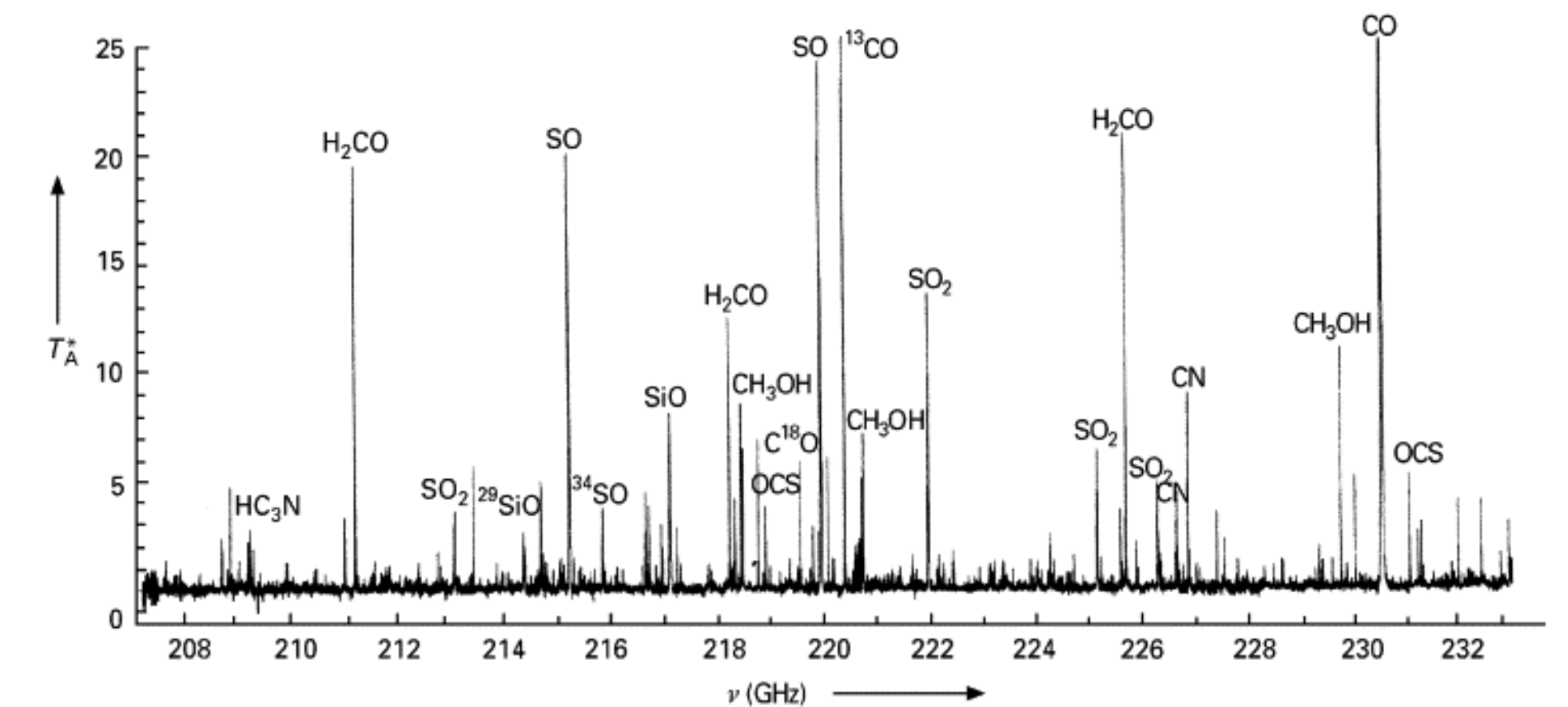
- 中性な原子の状態で存在している水素の集まり ($T = \text{数}10 - 10^3 \text{K}$)
- 水素はやはり銀河にたくさん存在している (太陽の化学組成参照) ので見つかりやすい
- **水素の21cm線 (21cm hydrogen line):** 水素原子に特徴的な放射
- 中性水素ガスの分布: 銀河の円盤に沿って存在



分子雲(molecular cloud)



- さらに温度が低いガスでは様々な分子が存在する($T=10$ -数 10 K)
- H_2 , CO , SO , SO_2 , HCO^+ , ...
- 分子の観測を通して分子雲の物理量や化学組成が推定されている



オリオン星雲の分子輝線スペクトル

Blake et al.(1987), ApJ, 315, 621

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987ApJ...315..621B/>

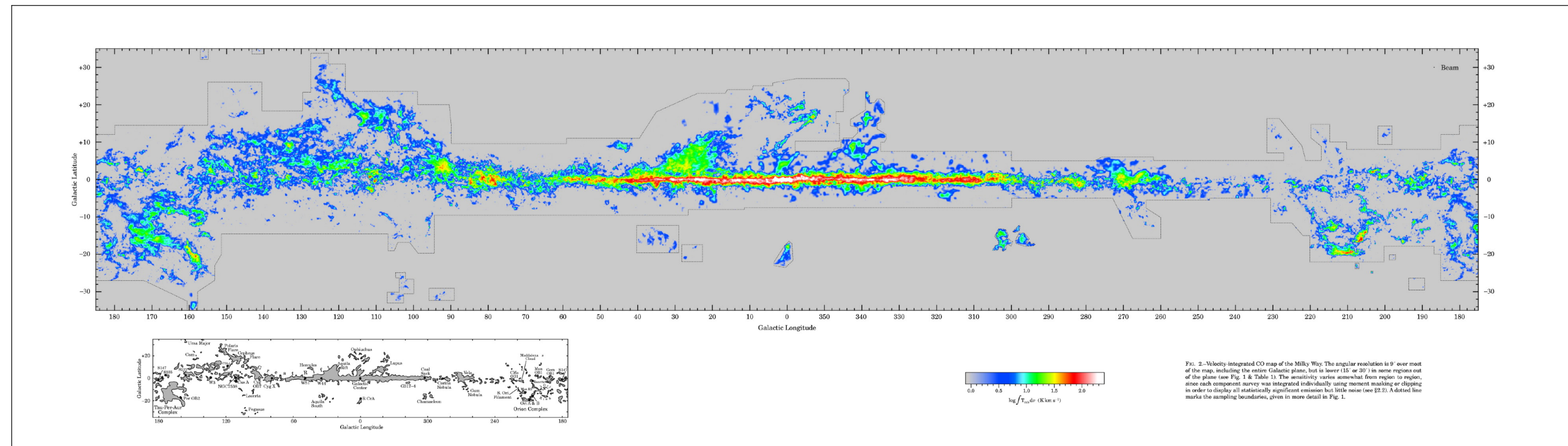
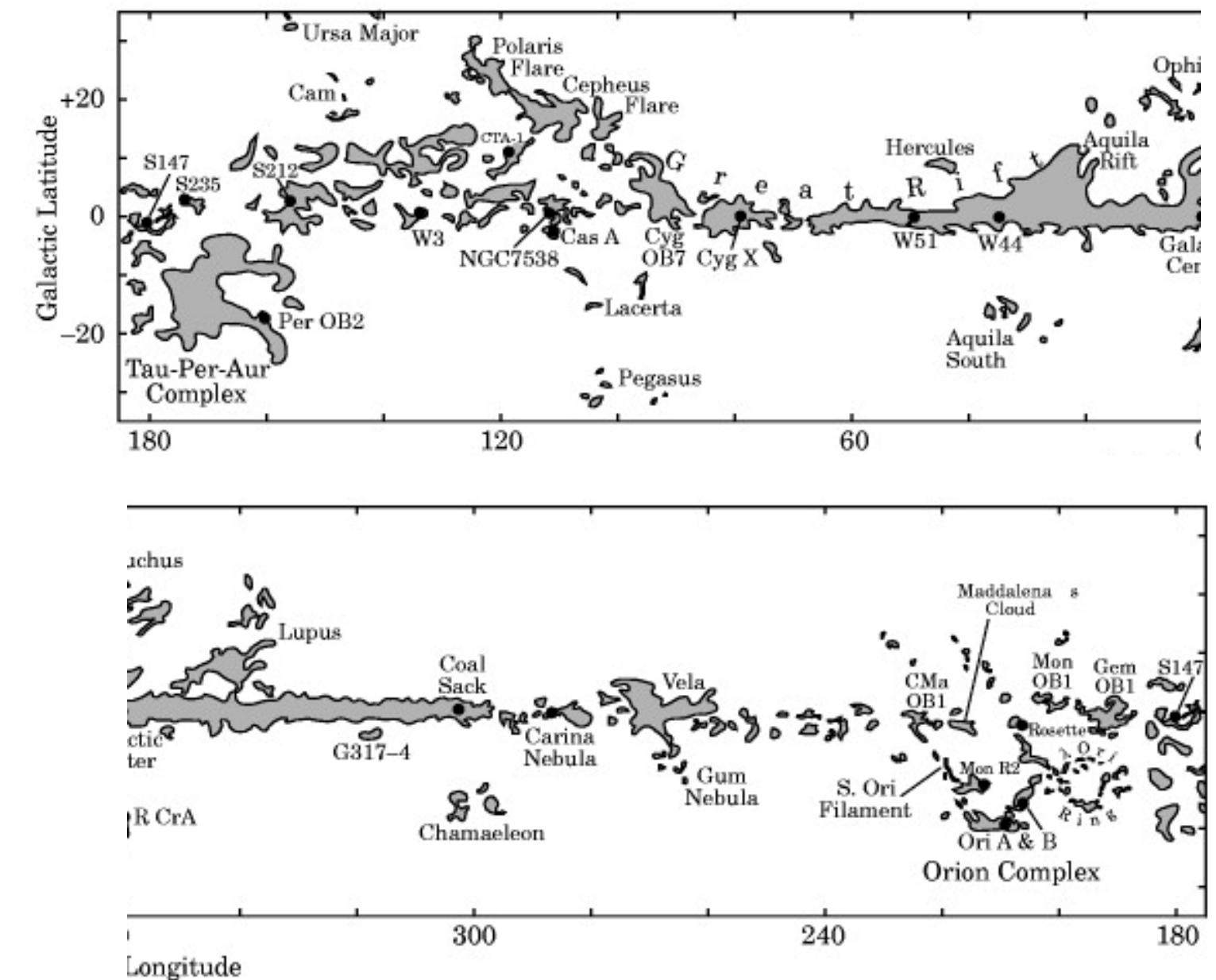
分子雲(molecular cloud)

- 分子雲も銀河の中に普遍的に存在している

CO輝線による銀河面のCOサーベイ観測

Dame et al.(2001), ApJ, 547, 792

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...547..792D/>



分子雲(molecular cloud)

- どんな分子がみつまっているのか？
- H₂,COのような単純な分子から複雑な分子まで様々
- 有機分子(炭素化合物)も見つまっている

Table 1.2 Molecules found in interstellar clouds

Simple neutral molecules
H ₂ , CH, CN, CO, HCl, NH, NO, NS, OH, PN, SO, SiO, SiS, CS, HF, O ₂ , SH, CH ₂ , HCN, HCO, H ₂ O, H ₂ S, HNC, HNO, N ₂ O, OCS, SO ₂ , CO ₂ , NH ₂ , HO ₂ , NH ₃ , H ₂ CO, H ₂ CS, CH ₃ , H ₂ O ₂ , CH ₄
Ionic species
(Cation)
CH ⁺ , CO ⁺ , SO ⁺ , CF ⁺ , OH ⁺ , SH ⁺ , HCl ⁺ , ArH ⁺ , HCO ⁺ , HCS ⁺ , HOC ⁺ , N ₂ H ⁺ , H ₃ ⁺ , H ₂ O ⁺ , H ₂ Cl ⁺ , OH ₃ ⁺ , HCNH ⁺ , HCO ₂ ⁺ , C ₃ H ⁺ , H ₂ COH ⁺ , NH ₄ ⁺ , H ₂ NCO ⁺ , HC ₃ NH ⁺
(Anion)
C ₄ H ⁻ , C ₆ H ⁻ , C ₈ H
Carbon-chain molecules and their isomers
C ₂ , C ₃ , C ₂ H, C ₂ O, C ₂ S, c-C ₃ H, l-C ₃ H, C ₃ N, C ₃ O, C ₃ S, C ₂ H ₂ , C ₅ , C ₄ H, l-C ₃ H ₂ , c-C ₃ H ₂ , HC ₃ N, HCCNC, HNC ₃ , C ₅ H, l-C ₄ H ₂ , C ₅ N, C ₆ H, CH ₃ CCH, HC ₅ N, CH ₃ C ₃ N, C ₆ H ₂ , CH ₂ CCHCN, CH ₃ C ₄ H, HC ₇ N, CH ₃ C ₅ N, HC ₉ N, CH ₃ C ₆ H, HC ₁₁ N
Complex organic molecules
HCOOH, CH ₂ CO, CH ₃ CN, CH ₃ NC, CH ₃ OH, CH ₃ SH, HC ₂ CHO, c-C ₃ H ₂ O, CH ₂ CNH, HNCHCN, CH ₂ CHCN, CH ₃ CHO, CH ₃ NH ₂ , c-C ₂ H ₄ O, H ₂ CCHOH, HCOOCH ₃ , CH ₃ COOH, CH ₂ OHCHO, CH ₂ CHCHO, NH ₂ CH ₂ CN, CH ₃ CHNH, CH ₃ CH ₂ CN, (CH ₃) ₂ O, CH ₃ CH ₂ OH, CH ₃ CONH ₂ , C ₃ H ₆ , CH ₃ CH ₂ SH, (CH ₃) ₂ CO, (CH ₂ OH) ₂ , CH ₃ CH ₂ CHO, C ₂ H ₅ OCHO, CH ₃ OCOCH ₃ , C ₂ H ₅ OCH ₃ , n-C ₃ H ₇ CN
Other molecules
FeO, HNCO, HNCS, H ₂ CN, HCNO, HOCN, HSCN, CH ₂ CN, H ₂ CNH, NH ₂ CN, HCOCN, HNCNH, CH ₃ O, NH ₂ CHO

Note: Based on the Cologne Database for Molecular Spectroscopy (CDMS) (Muller et al. 2001, 2008). The classification of molecules is arbitrary

これまでにみつまっている分子のリスト

S. Yamamoto (2017) “Introduction to Astrochemistry”

分子雲(molecular cloud)

- どんな分子がみつまっているのか？
- H₂,COのような単純な分子から複雑な分子まで様々
- 有機分子(炭素化合物)も見つまっている
- 生命の材料になる物質(例えばアミノ酸)はあるのか？

Table 1.2 Molecules found in interstellar clouds

Simple neutral molecules
H ₂ , CH, CN, CO, HCl, NH, NO, NS, OH, PN, SO, SiO, SiS, CS, HF, O ₂ , SH, CH ₂ , HCN, HCO, H ₂ O, H ₂ S, HNC, HNO, N ₂ O, OCS, SO ₂ , CO ₂ , NH ₂ , HO ₂ , NH ₃ , H ₂ CO, H ₂ CS, CH ₃ , H ₂ O ₂ , CH ₄
Ionic species
(Cation)
CH ⁺ , CO ⁺ , SO ⁺ , CF ⁺ , OH ⁺ , SH ⁺ , HCl ⁺ , ArH ⁺ , HCO ⁺ , HCS ⁺ , HOC ⁺ , N ₂ H ⁺ , H ₃ ⁺ , H ₂ O ⁺ , H ₂ Cl ⁺ , OH ₃ ⁺ , HCNH ⁺ , HCO ₂ ⁺ , C ₃ H ⁺ , H ₂ COH ⁺ , NH ₄ ⁺ , H ₂ NCO ⁺ , HC ₃ NH ⁺
(Anion)
C ₄ H ⁻ , C ₆ H ⁻ , C ₈ H
Carbon-chain molecules and their isomers
C ₂ , C ₃ , C ₂ H, C ₂ O, C ₂ S, c-C ₃ H, l-C ₃ H, C ₃ N, C ₃ O, C ₃ S, C ₂ H ₂ , C ₅ , C ₄ H, l-C ₃ H ₂ , c-C ₃ H ₂ , HC ₃ N, HCCNC, HNC ₃ , C ₅ H, l-C ₄ H ₂ , C ₅ N, C ₆ H, CH ₃ CCH, HC ₅ N, CH ₃ C ₃ N, C ₆ H ₂ , CH ₂ CCHCN, CH ₃ C ₄ H, HC ₇ N, CH ₃ C ₅ N, HC ₉ N, CH ₃ C ₆ H, HC ₁₁ N
Complex organic molecules
HCOOH, CH ₂ CO, CH ₃ CN, CH ₃ NC, CH ₃ OH, CH ₃ SH, HC ₂ CHO, c-C ₃ H ₂ O, CH ₂ CNH, HNCHCN, CH ₂ CHCN, CH ₃ CHO, CH ₃ NH ₂ , c-C ₂ H ₄ O, H ₂ CCHOH, HCOOCH ₃ , CH ₃ COOH, CH ₂ OHCHO, CH ₂ CHCHO, NH ₂ CH ₂ CN, CH ₃ CHNH, CH ₃ CH ₂ CN, (CH ₃) ₂ O, CH ₃ CH ₂ OH, CH ₃ CONH ₂ , C ₃ H ₆ , CH ₃ CH ₂ SH, (CH ₃) ₂ CO, (CH ₂ OH) ₂ , CH ₃ CH ₂ CHO, C ₂ H ₅ OCHO, CH ₃ OCOCH ₃ , C ₂ H ₅ OCH ₃ , n-C ₃ H ₇ CN
Other molecules
FeO, HNCO, HNCS, H ₂ CN, HCNO, HOCN, HSCN, CH ₂ CN, H ₂ CNH, NH ₂ CN, HCOCN, HNCNH, CH ₃ O, NH ₂ CHO

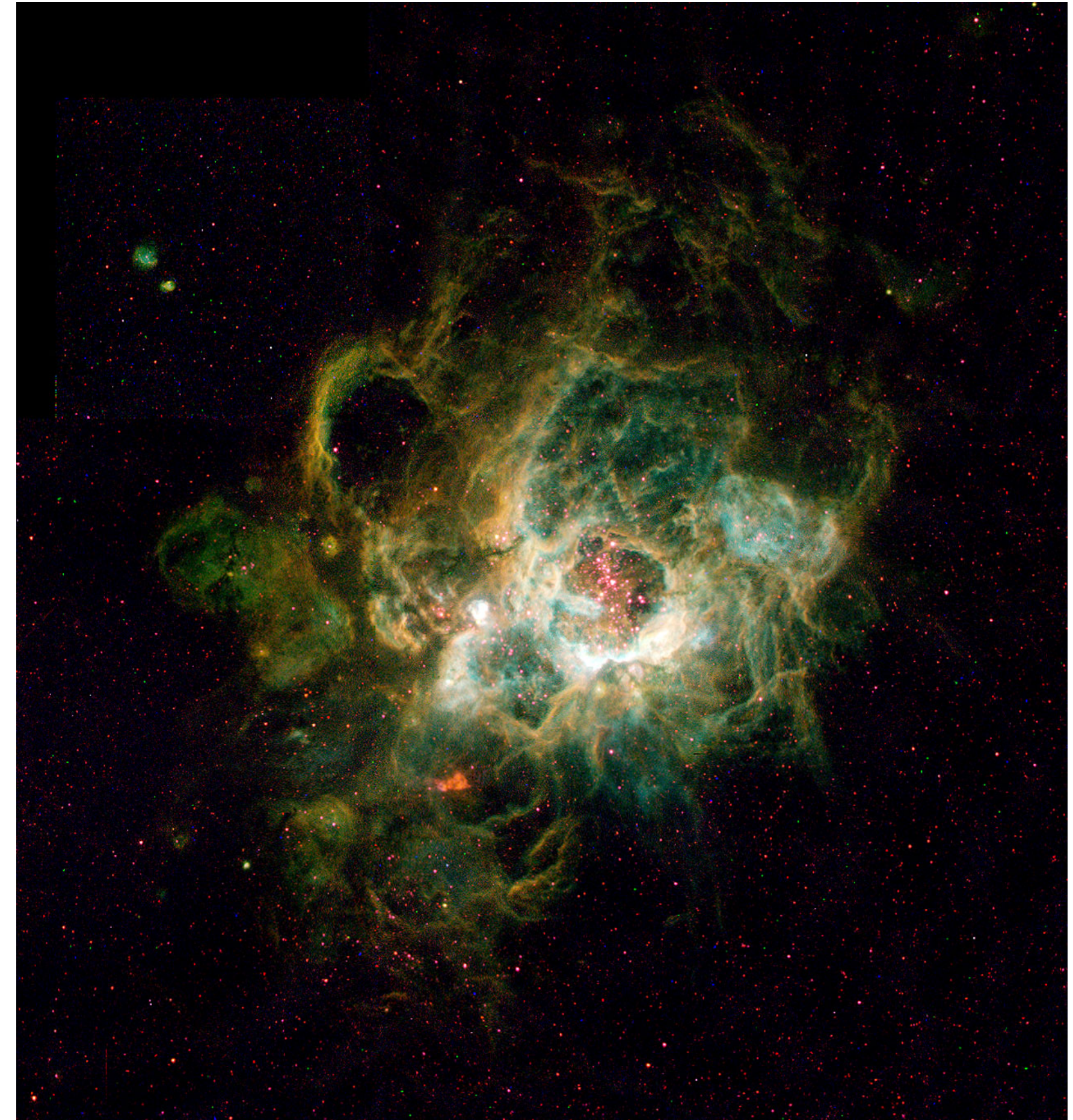
Note: Based on the Cologne Database for Molecular Spectroscopy (CDMS) (Muller et al. 2001, 2008). The classification of molecules is arbitrary

これまでにみつまっている分子のリスト

S. Yamamoto (2017) “Introduction to Astrochemistry”

HII領域 (HII region)

- ・ 冷たいガスがあれば熱いガスもある
- ・ **HII領域(HII region)**: 明るい星(大質量星)によって照らされたガス
- ・ 大質量星と同じくらいの高温に熱せられている($T \approx 10^4 \text{K}$)
- ・ 様々な原子の輝線
- ・ HII領域があると最近の星形成活動を示唆する



ハッブル宇宙望遠鏡によるM33のHII領域NGC603の画像
Credits: Hui Yang (University of Illinois) and NASA/ESA
<https://esahubble.org/images/opo9627c/>

HII領域 (HII region)

- 冷たいガスがあれば熱いガスもある
- **HII領域(HII region)**: 明るい星(大質量星)によって照らされたガス
- 大質量星と同じくらいの高温に熱せられている($T \approx 10^4 \text{K}$)
- 様々な原子の輝線
- HII領域があると最近の星形成活動を示唆する

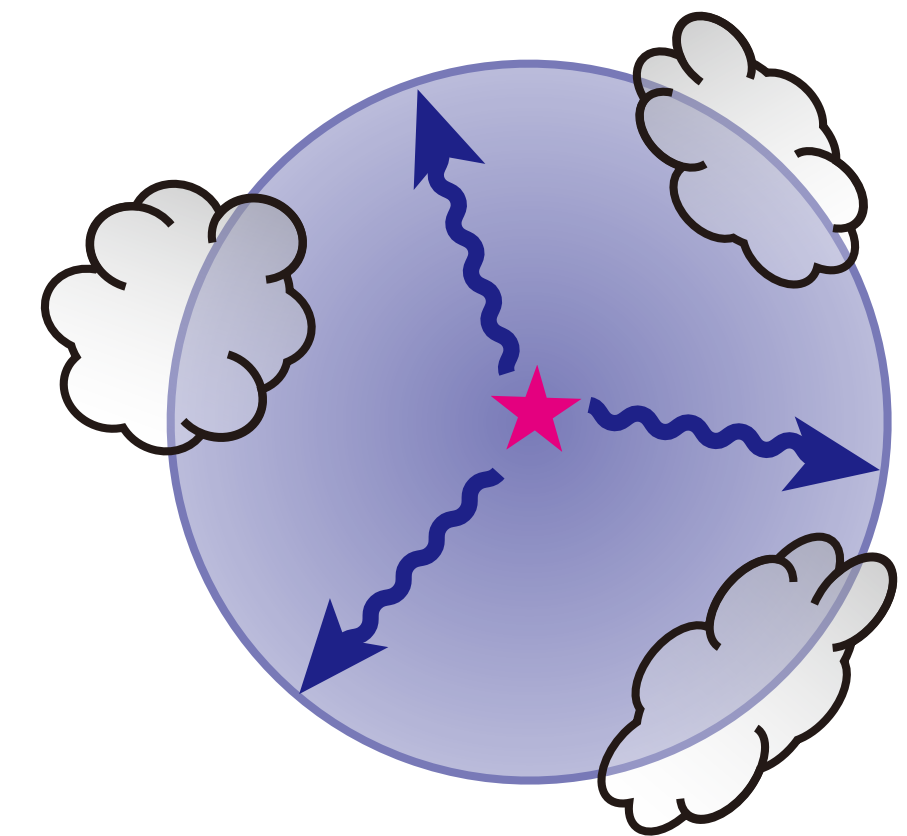
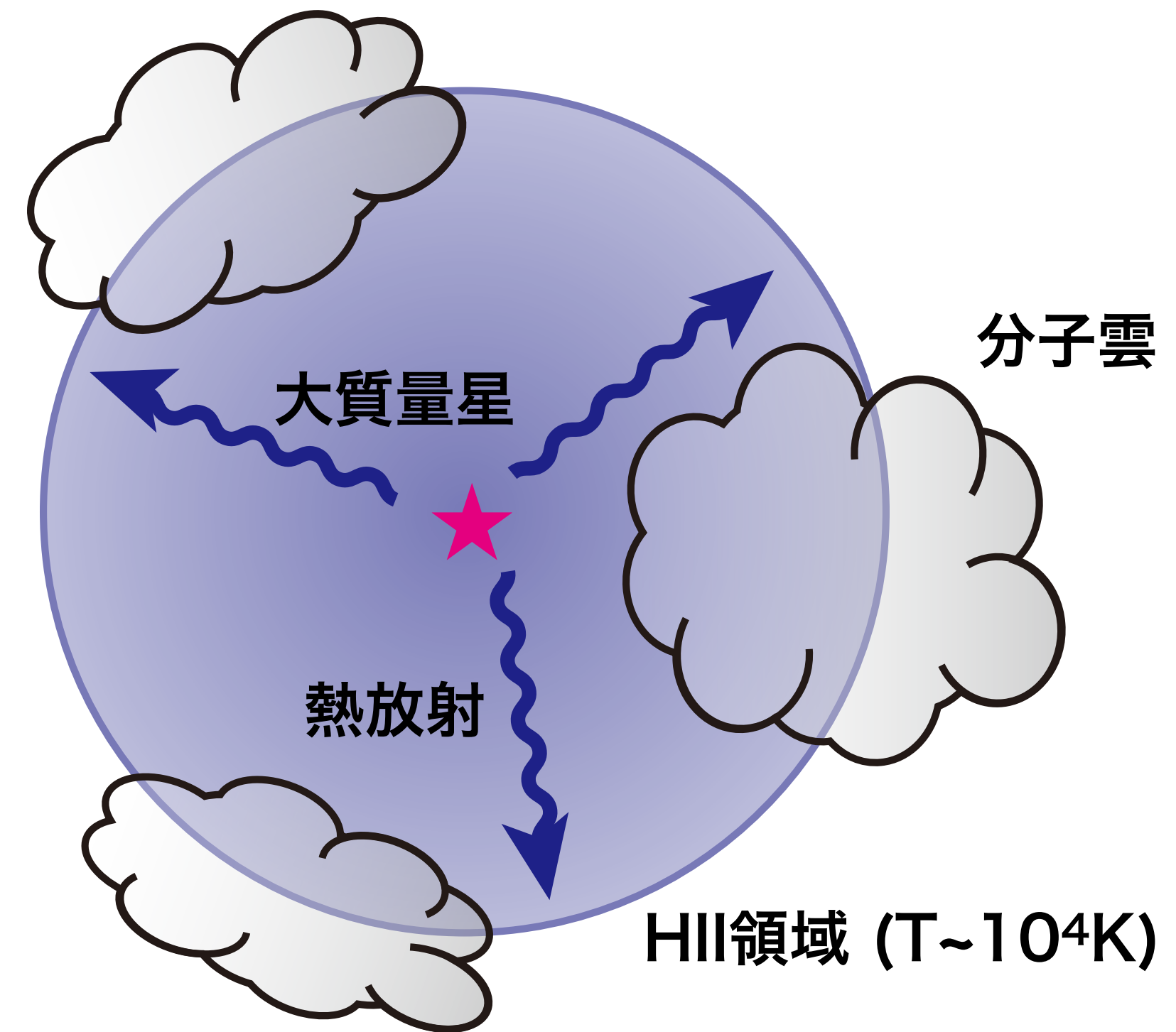


ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡によるEagle nebulaの画像

Credits: Credits: NASA, ESA, CSA, STScI;
Joseph DePasquale (STScI), Anton M. Koekemoer (STScI), Alyssa Pagan (STScI)
[https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/
nasa-s-webb-takes-star-filled-portrait-of-pillars-of-creation](https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/nasa-s-webb-takes-star-filled-portrait-of-pillars-of-creation)

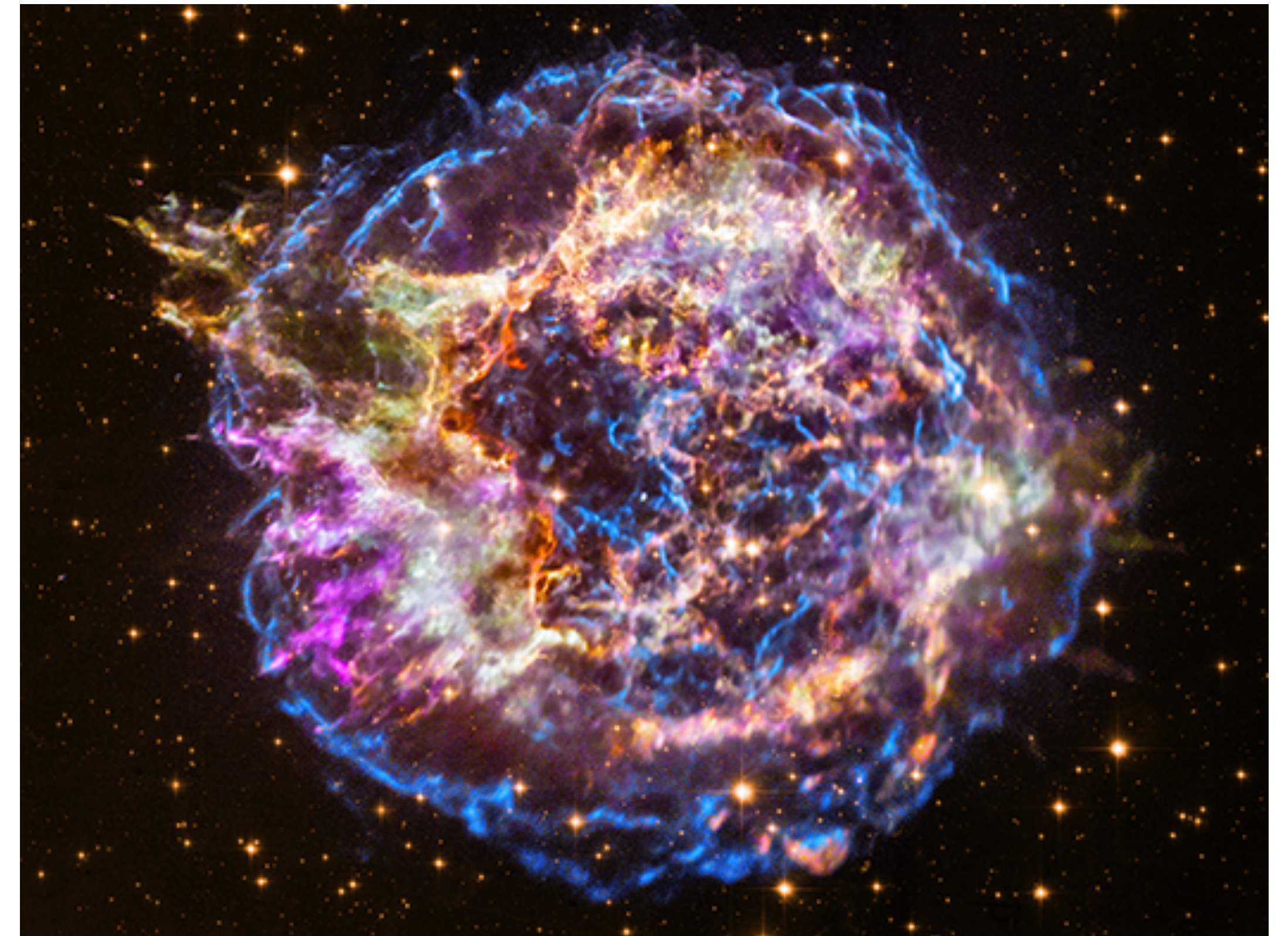
HII領域 (HII region)

- 冷たいガスがあれば熱いガスもある
- **HII領域(HII region)**: 明るい星(大質量星)によって照らされたガス
- 大質量星と同じくらいの高温に熱せられている($T \approx 10^4\text{K}$)
- 様々な原子の輝線
- HII領域があると最近の星形成活動を示唆する



コロナガス (coronal gas)

- もっと熱いガスもある
- **超新星残骸(supernova remnant):**
星が最期に大爆発した残骸
- 爆風(衝撃波)が周りのガスを温める
($T \sim 10^6 \text{K}$)
- 主にX線で光る



超新星残骸Cassiopeia AのX線と可視光の複合画像

Credits: X-ray: NASA/CXC/RIKEN/T. Sato et al.; Optical: NASA/STScI

<https://chandra.harvard.edu/photo/2019/firstlight/>

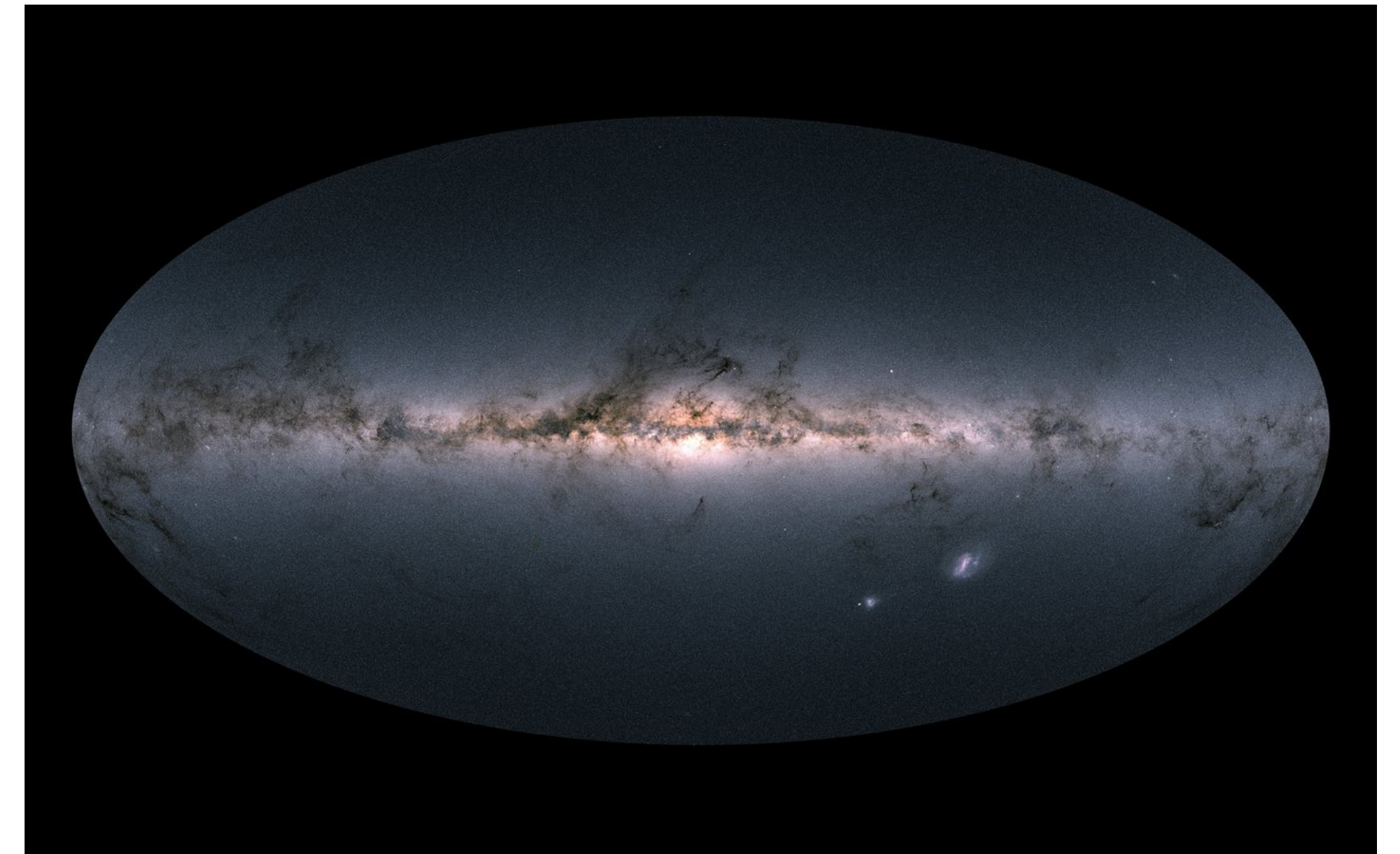
第7回:

星の誕生と星間物質

- ・ 星間物質と分子雲
- ・ 星が生まれる過程
- ・ 星間空間での物質の循環

星が生まれる効率

- 星は今も銀河系内で作られている(星形成銀河)
- 銀河系の中にある星の数 = 1000-4000億
- 銀河系には100億歳を超えているだろうと推測されている星が存在する
- おおざっぱに銀河系を100億歳とすると…



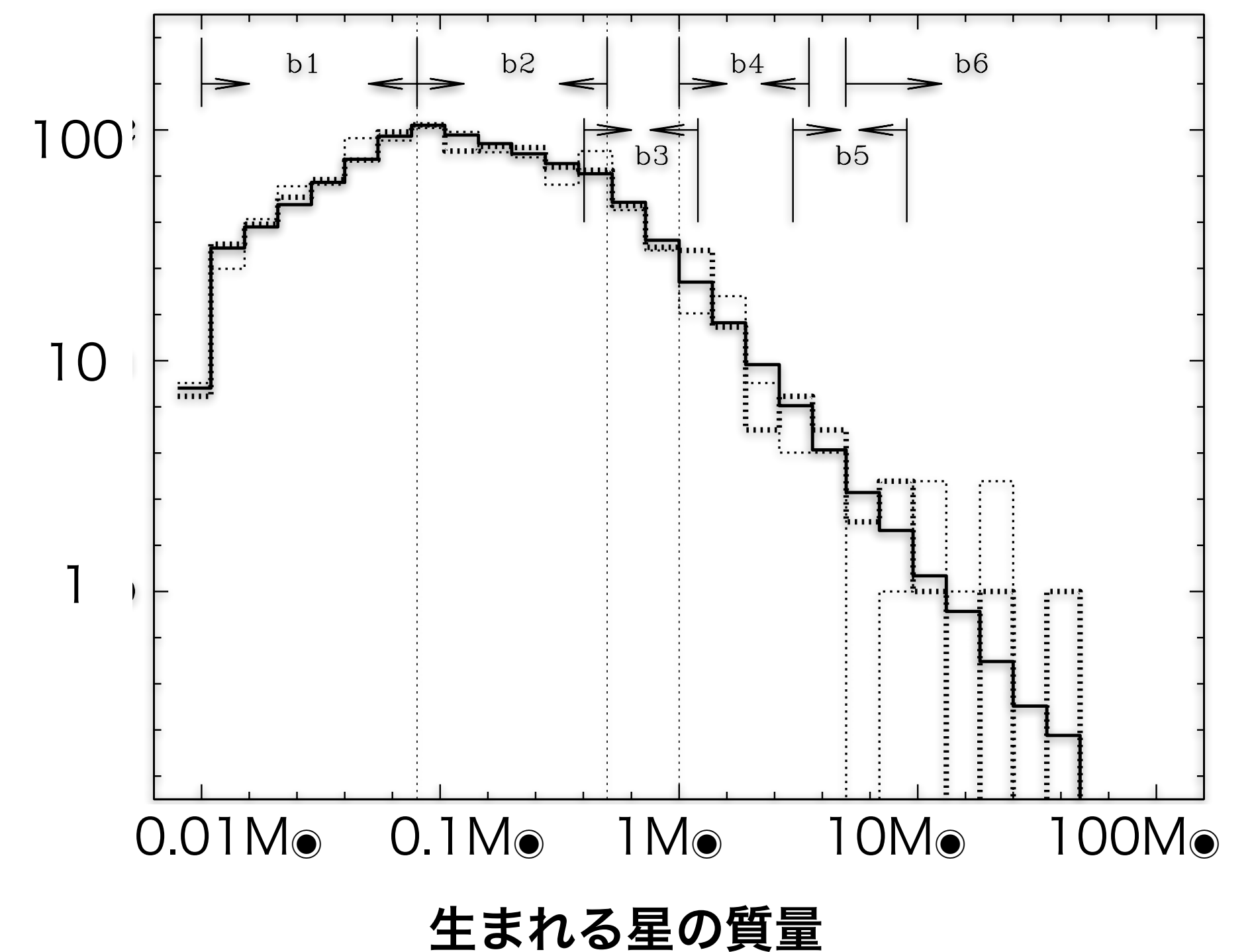
credit: ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO

初期質量関数(Initial mass function)

- 数1000億個/100億年 = 数10個/年
- どのくらいの質量が星になるのか？
- **初期質量関数(Initial mass function):** 生まれる星の質量の頻度分布
- 星の質量として一番頻度が高いのは約0.1-1M $\odot$ (重たい星は非常に稀)

初期質量関数の例 (Kroupa 2001)

その質量の星が生まれる相対頻度

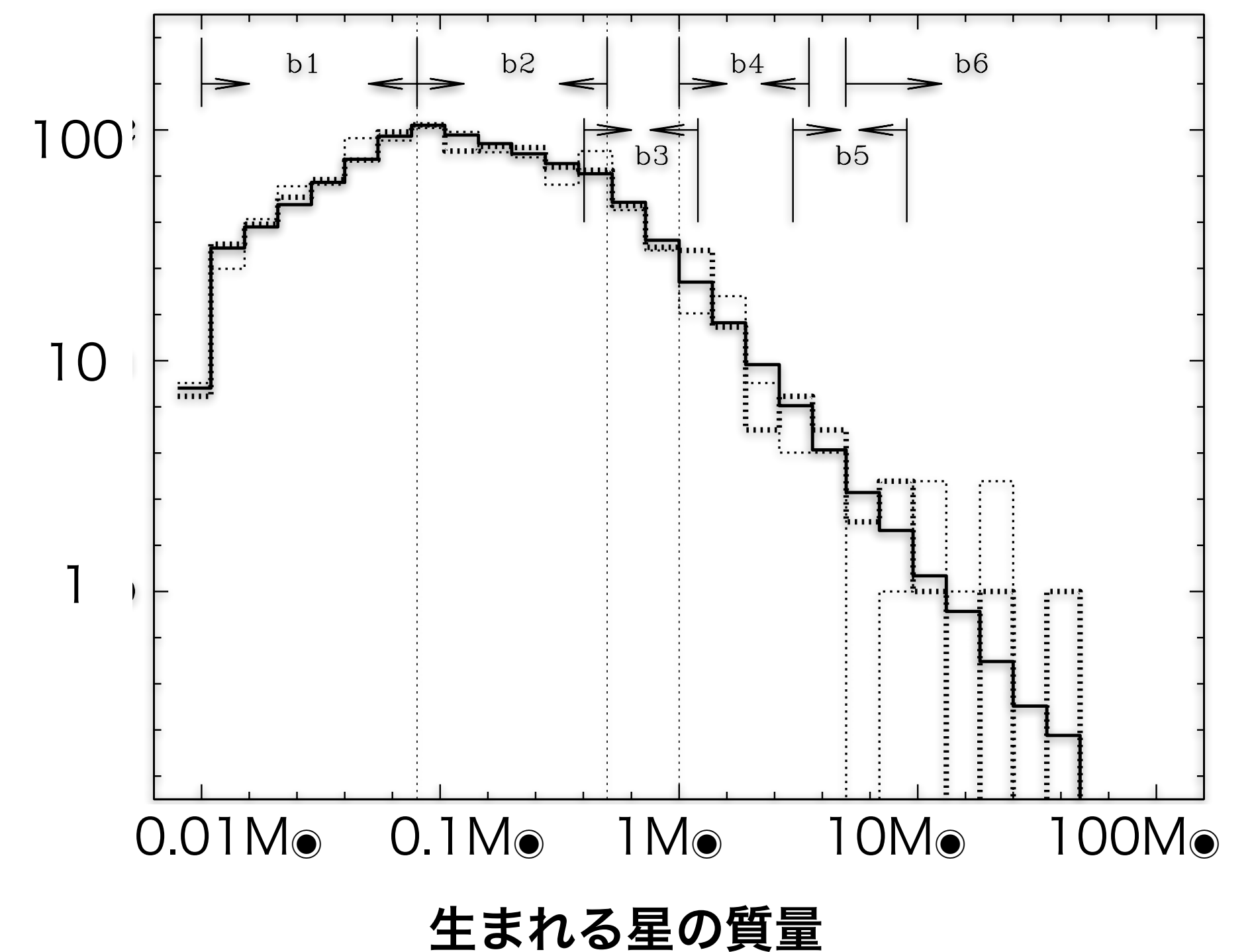


初期質量関数(Initial mass function)

- 数1000億個/100億年 = 数10個/年
- どのくらいの質量が星になるのか？
- **初期質量関数(Initial mass function)**: 生まれる星の質量の頻度分布
- 星の質量として一番頻度が高いのは約0.1-1M $\odot$ (重たい星は非常に稀)
- 星形成の効率の概算値: 1-数10M $\odot$ /yr

初期質量関数の例 (Kroupa 2001)

その質量の星が生まれる相対頻度



星形成の現場

- 数10個/年ということで、探せば星を作っている現場がありそう
- 例: オリオン大星雲(2000M $\odot$, 数1000個の星からなる若い星の集団 + 星形成領域)
- できたばかりの星やできかけの星を観測し、星形成のシナリオを構築する



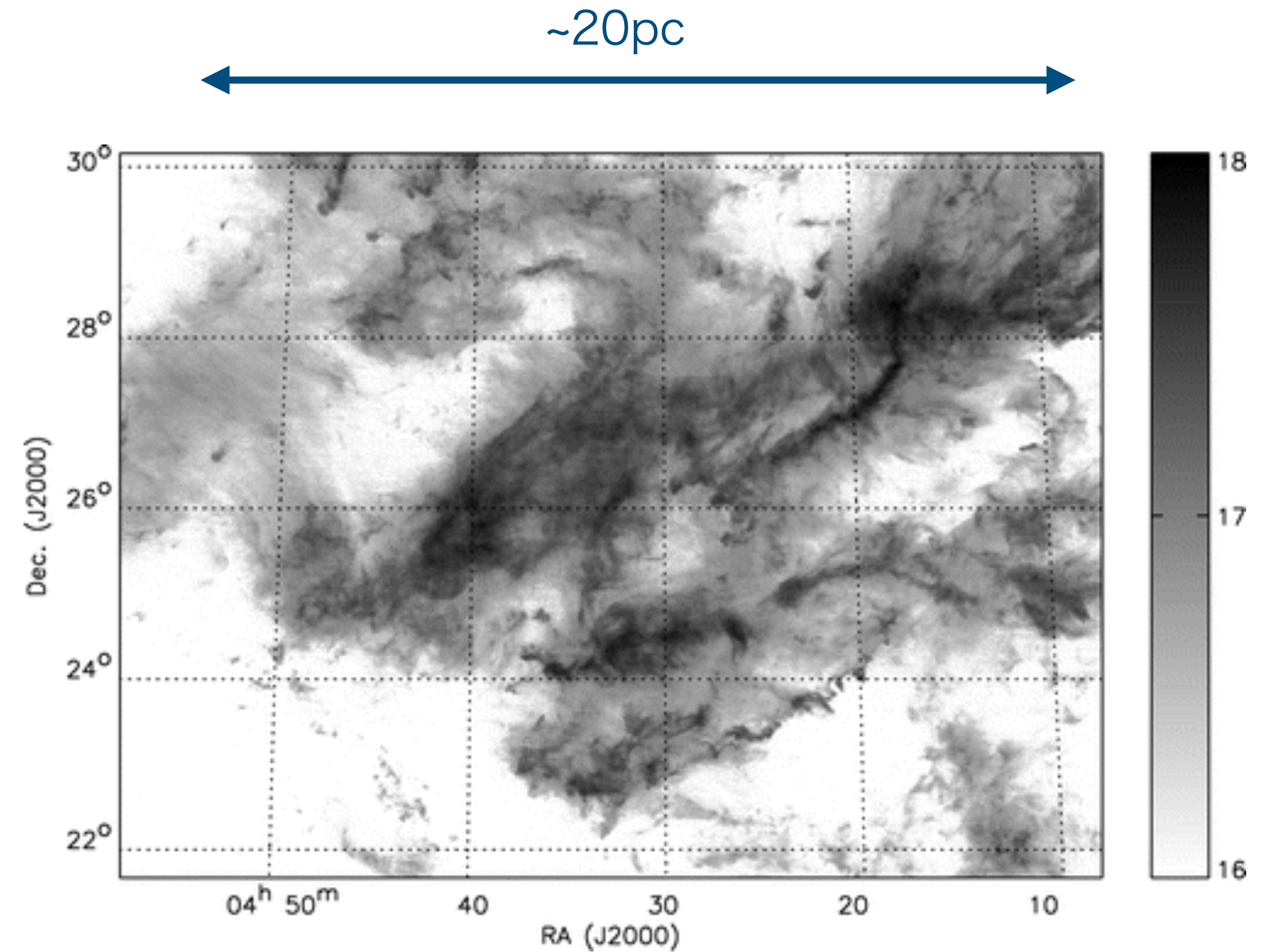
ハッブル宇宙望遠鏡によるオリオン大星雲の画像

credit: NASA, ESA, M. Robberto (STScI)

and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team

星形成の現場

- 分子雲: $\sim 10\text{pc}$, $10^2 [\text{cm}^{-3}]$
- 分子雲コア: $\sim 1\text{pc}$, $10^4 [\text{cm}^{-3}]$
- **Young Stellar Object(YSO)**
- 原始星
- Tタウリ型星



おうし座分子雲のCOマップ

Goldsmith et al. (2008) ApJ, 680, 428

<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/587166>

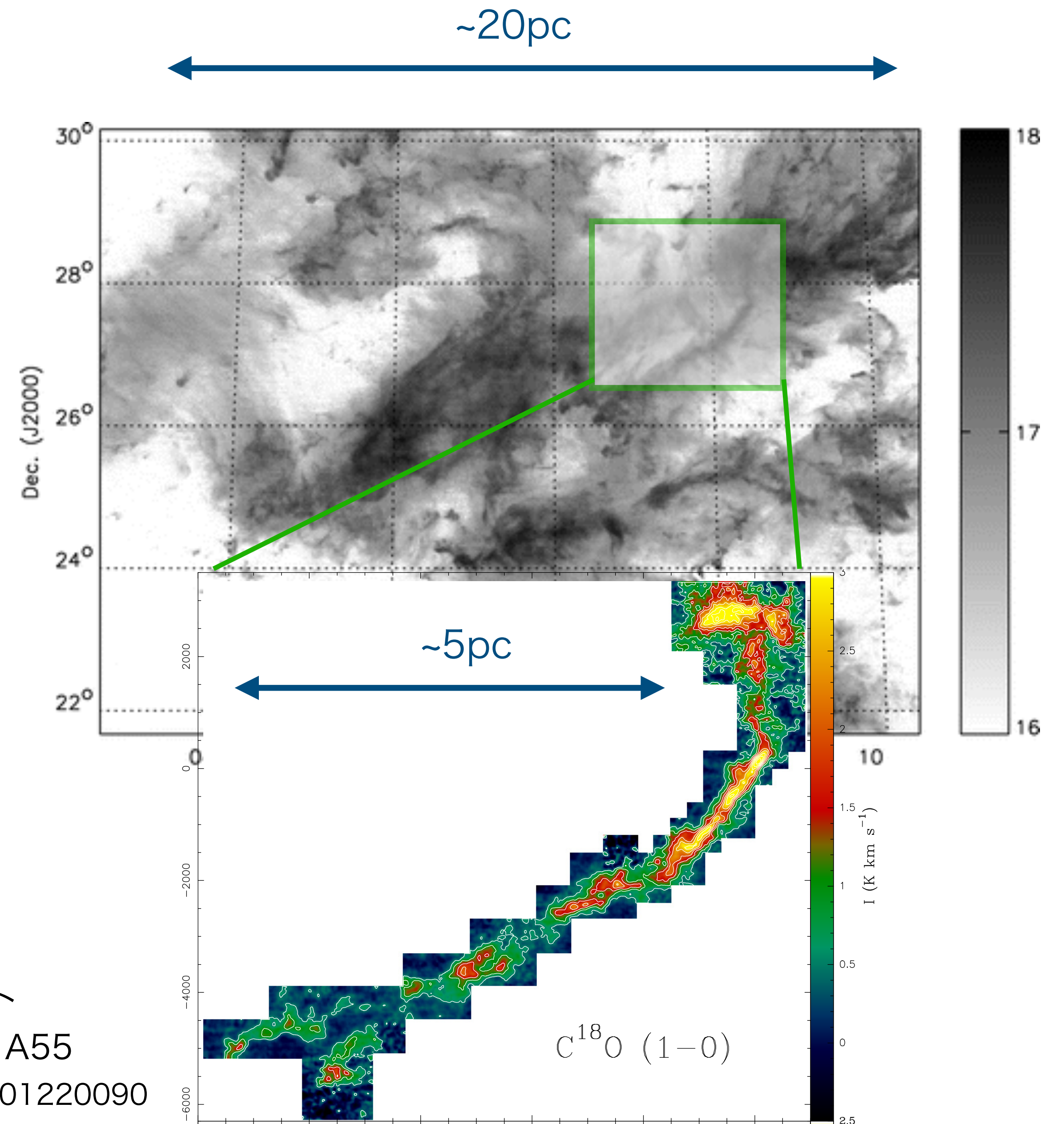
星形成の現場

- 分子雲: $\sim 10\text{pc}$, $10^2 [\text{cm}^{-3}]$
- 分子雲コア: $\sim 1\text{pc}$, $10^4 [\text{cm}^{-3}]$
- **Young Stellar Object (YSO)**
- 原始星
- Tタウリ型星

おうし座分子雲のフィラメント

Hacar et al. (2013) A&A, 554, A55

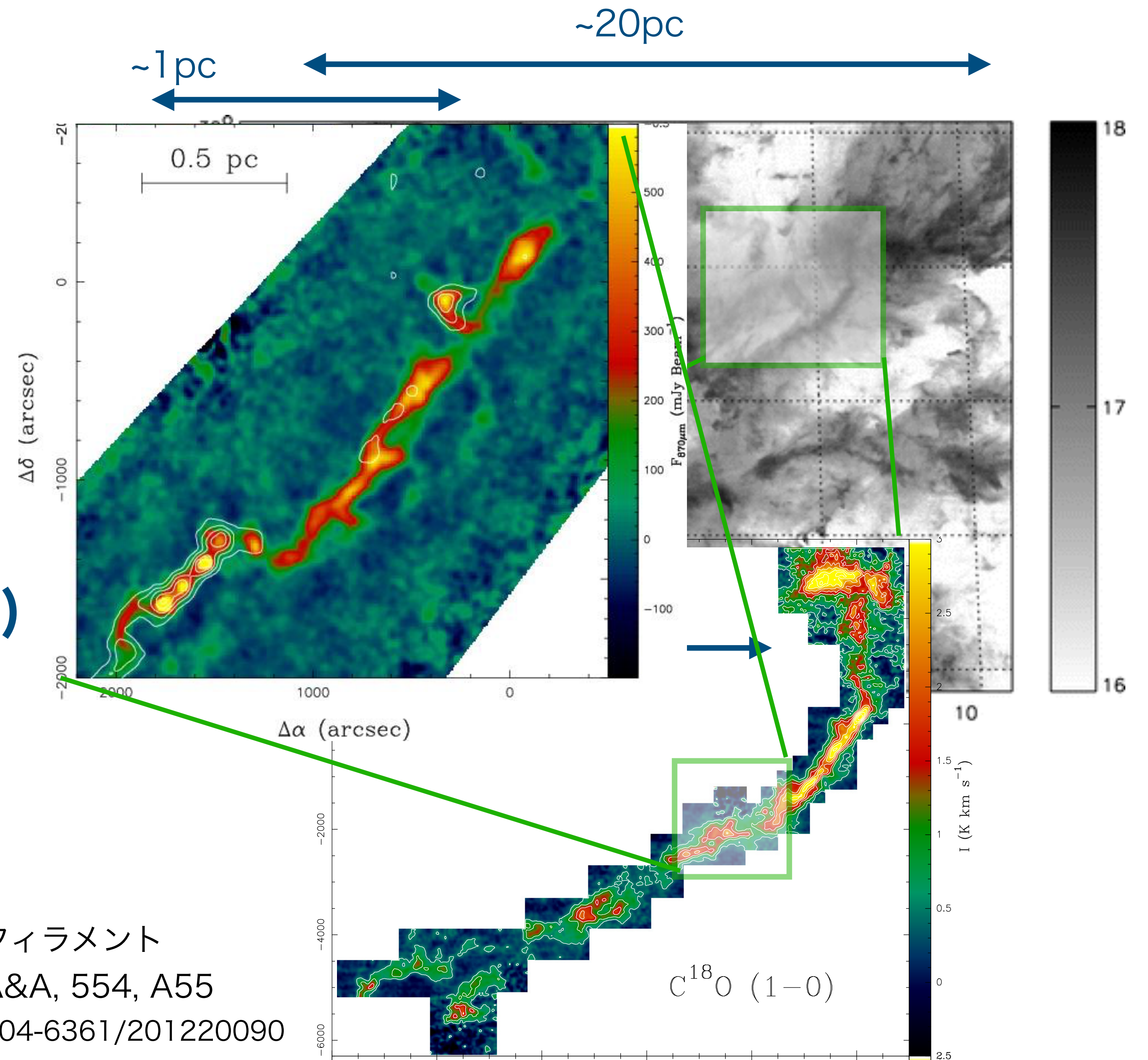
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201220090>



星形成の現場

- 分子雲: $\sim 10\text{pc}$, $10^2\text{ [cm}^{-3}\text{]}$
- 分子雲コア: $\sim 1\text{pc}$, $10^4\text{ [cm}^{-3}\text{]}$
- Young Stellar Object (YSO)
- 原始星
- Tタウリ型星

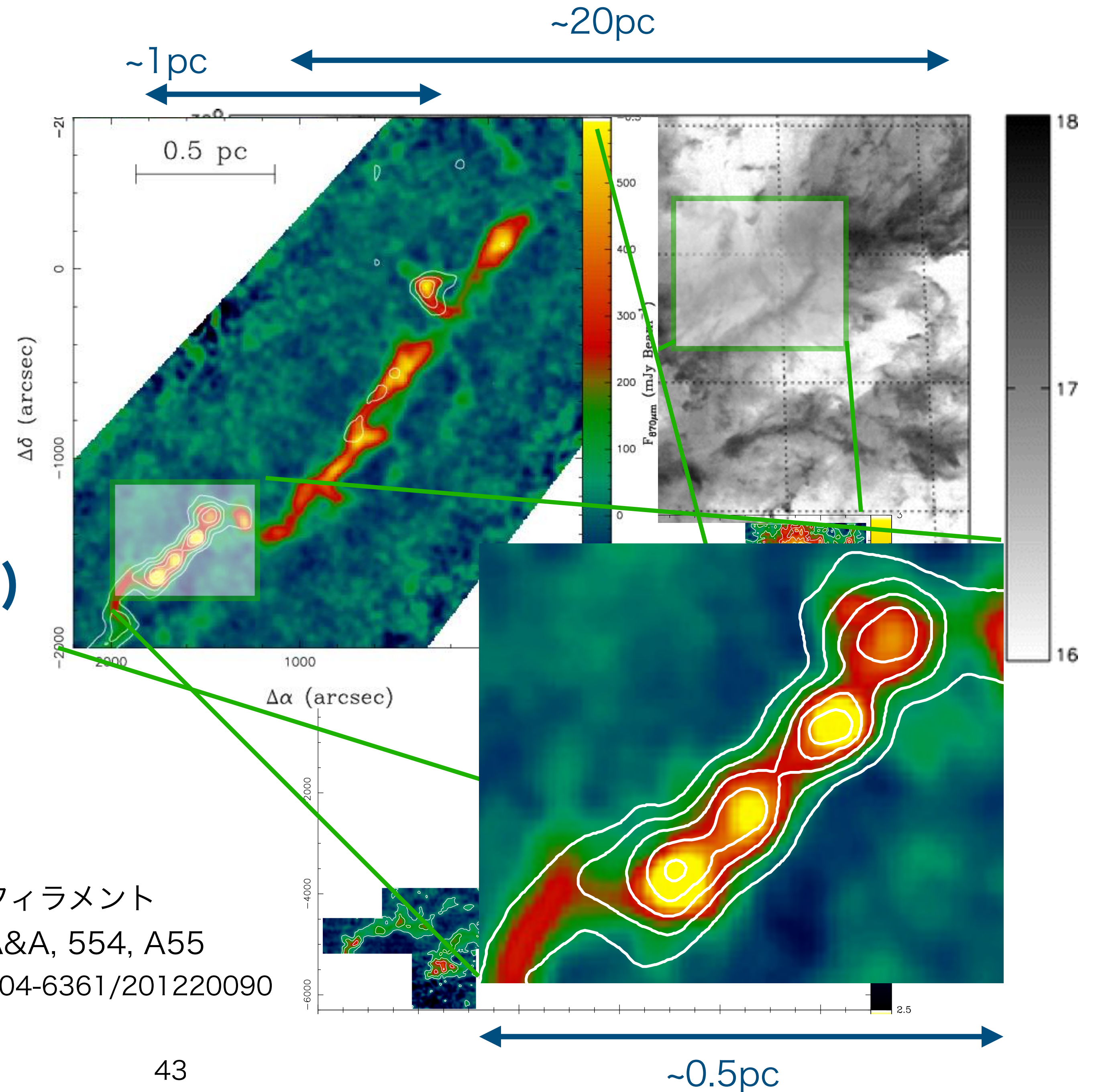
おうし座分子雲のフィラメント
Hacar et al. (2013) A&A, 554, A55
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201220090>



星形成の現場

- 分子雲: $\sim 10\text{pc}$, $10^2 [\text{cm}^{-3}]$
- 分子雲コア: $\sim 1\text{pc}$, $10^4 [\text{cm}^{-3}]$
- Young Stellar Object (YSO)
- 原始星
- Tタウリ型星

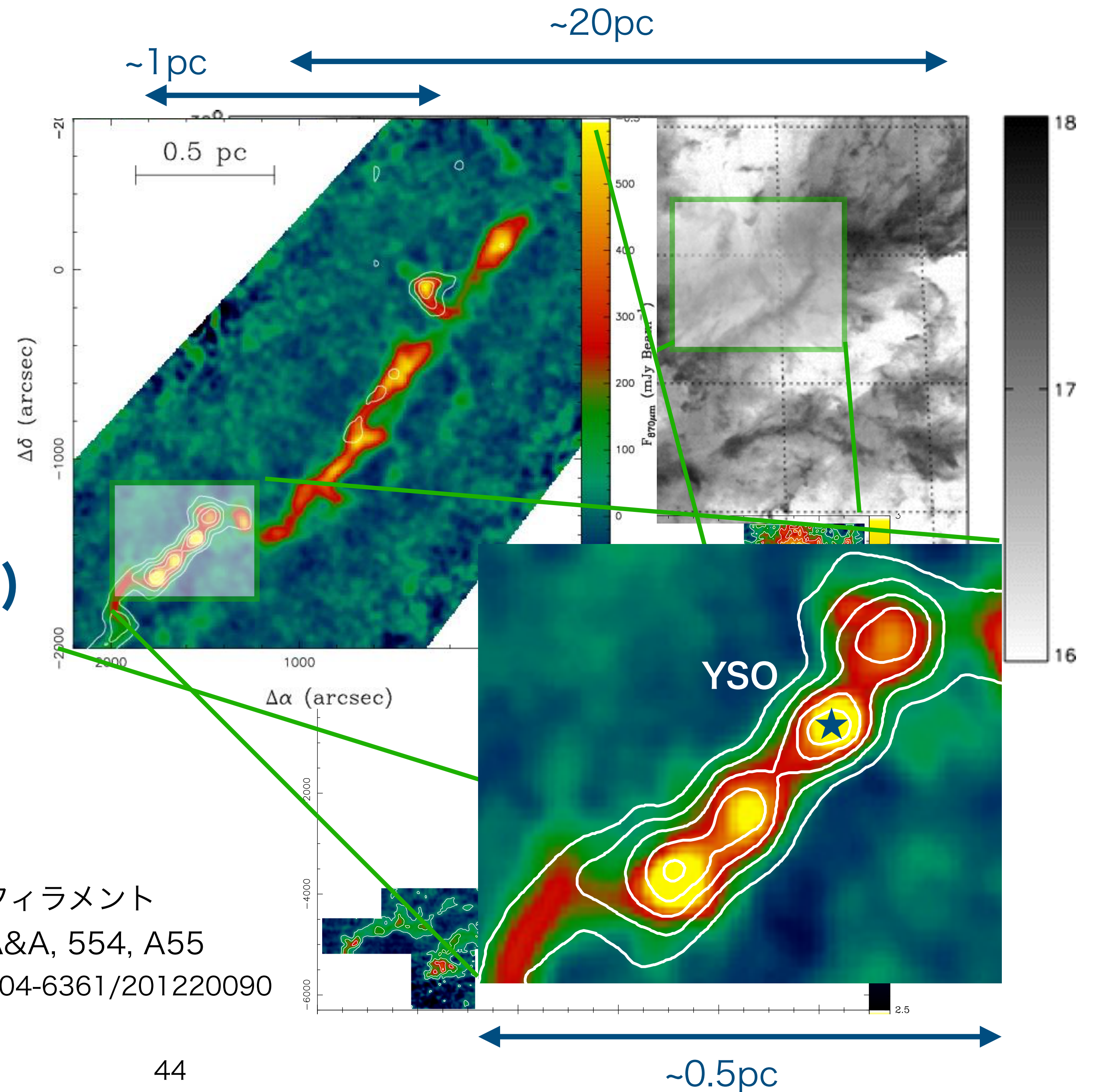
おうし座分子雲のフィラメント
Hacar et al. (2013) A&A, 554, A55
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201220090>



星形成の現場

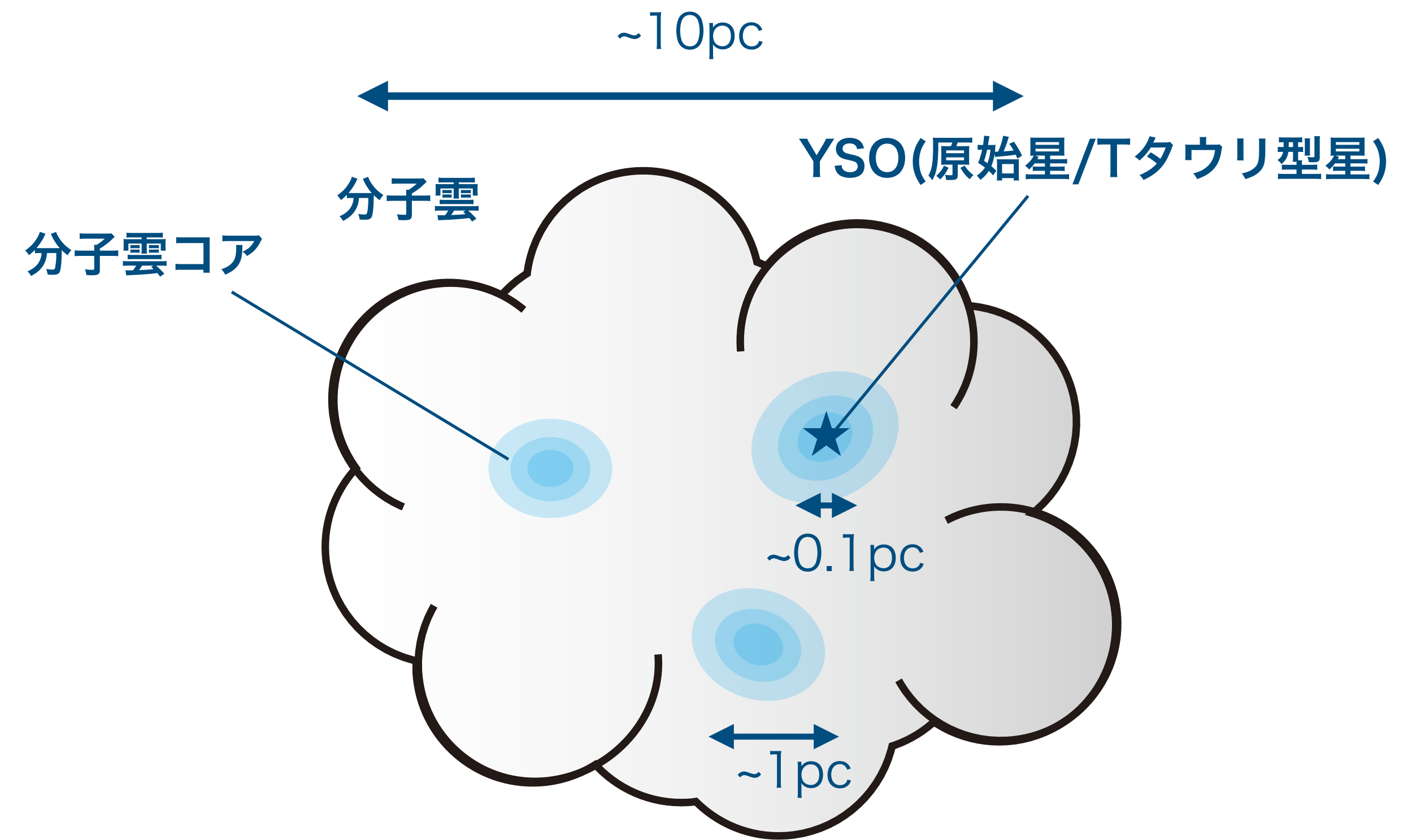
- 分子雲: $\sim 10\text{pc}$, $10^2 [\text{cm}^{-3}]$
- 分子雲コア: $\sim 1\text{pc}$, $10^4 [\text{cm}^{-3}]$
- Young Stellar Object (YSO)
- 原始星
- Tタウリ型星

おうし座分子雲のフィラメント
Hacar et al. (2013) A&A, 554, A55
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201220090>



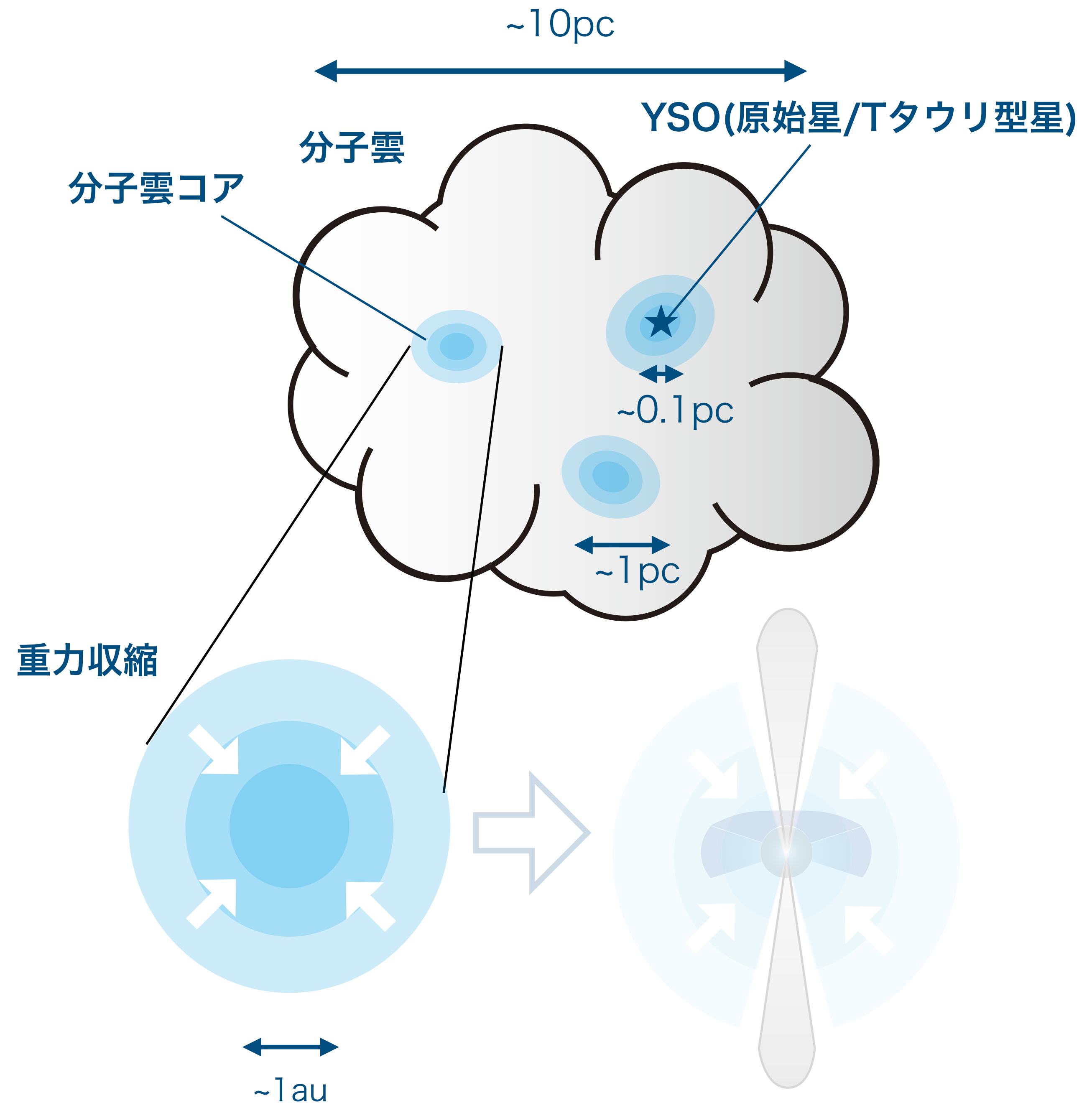
星形成の現場

- 分子雲: $\sim 10\text{pc}$, $10^2 [\text{cm}^{-3}]$
- 分子雲コア: $\sim 1\text{pc}$, $10^4 [\text{cm}^{-3}]$
- **Young Stellar Object (YSO)**
- 原始星
- Tタウリ型星



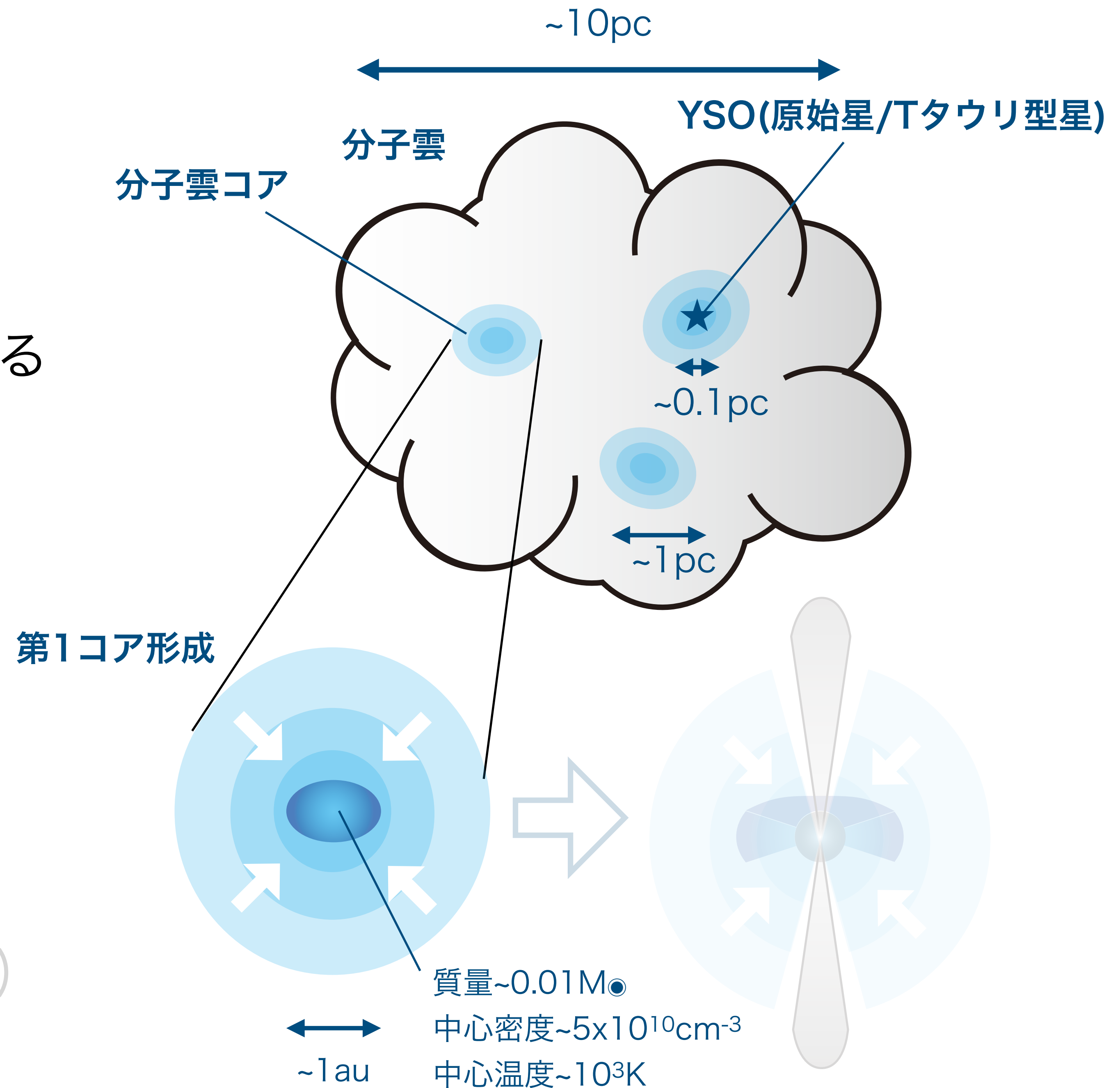
星形成のシナリオ

- 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- 第1コアの形成
- 水素分子の解離($\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$)
- 第2コアの形成
- 主質量降着期
- 前主系列収縮期(Tタウリ型星など)



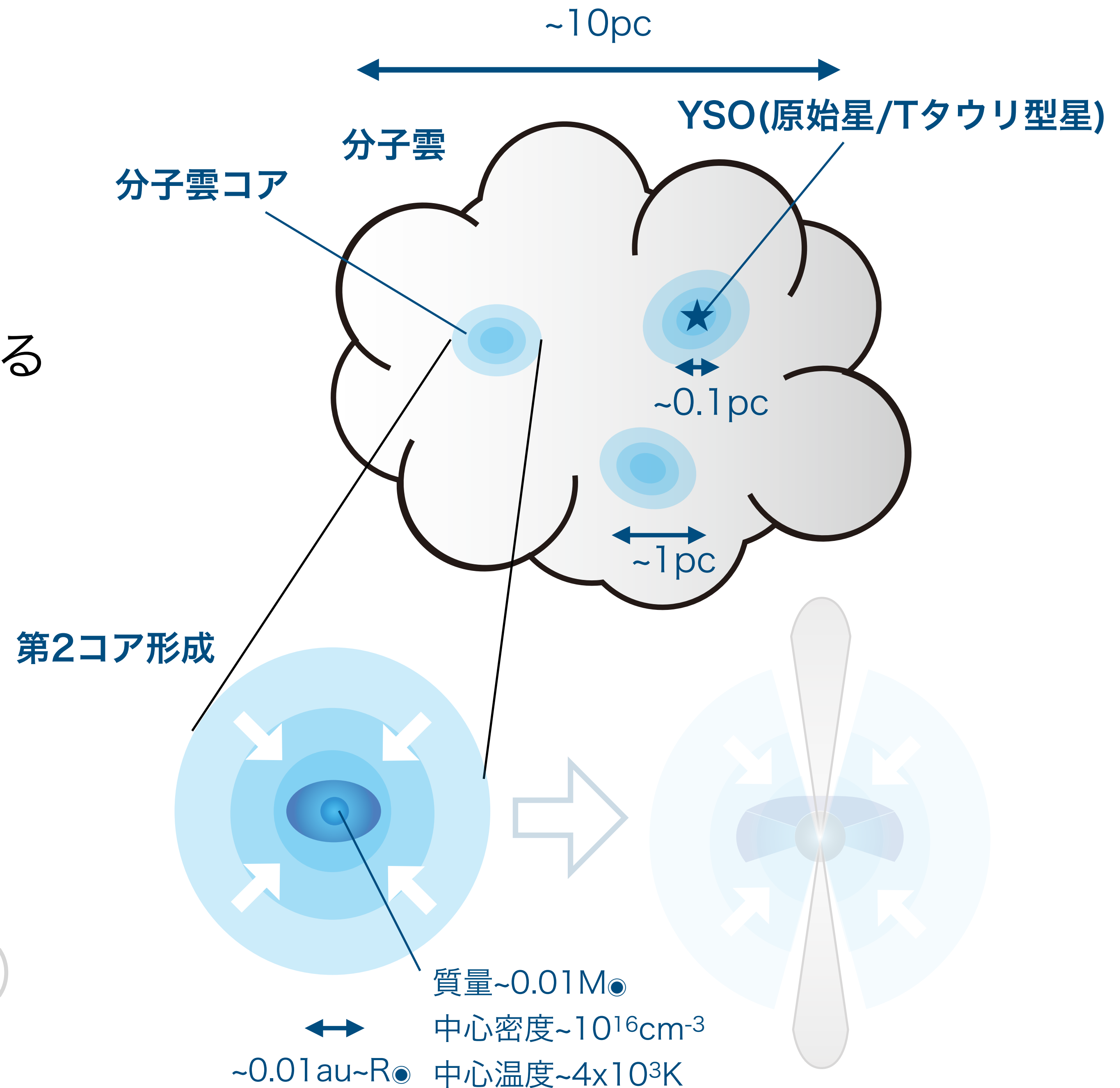
星形成のシナリオ

- 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- 第1コアの形成
- 水素分子の解離($\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$)
- 第2コアの形成
- 主質量降着期
- 前主系列収縮期(Tタウリ型星など)



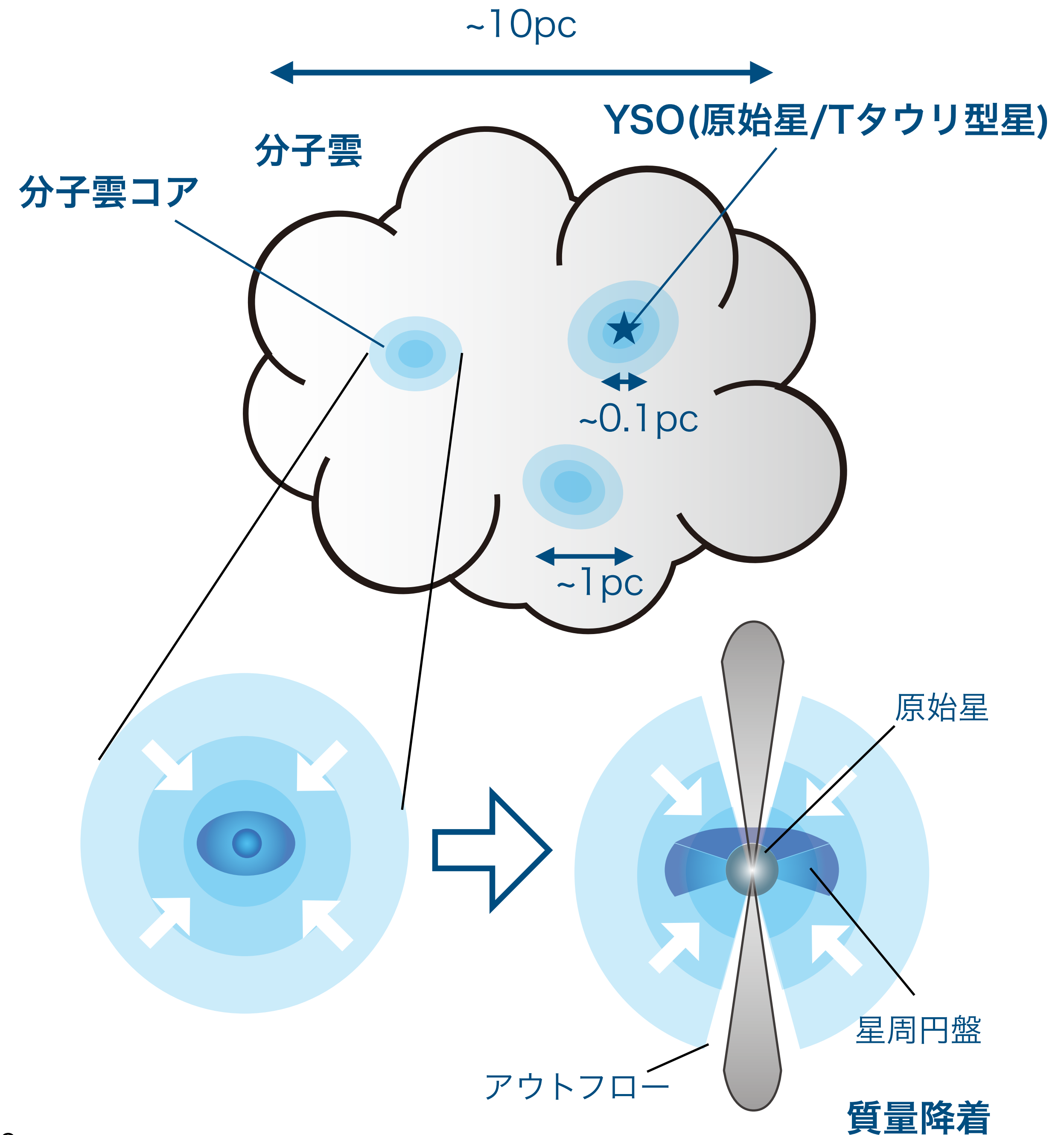
星形成のシナリオ

- ・ 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- ・ 第1コアの形成
- ・ 水素分子の解離($\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$)
- ・ 第2コアの形成
- ・ 主質量降着期
- ・ 前主系列収縮期(Tタウリ型星など)



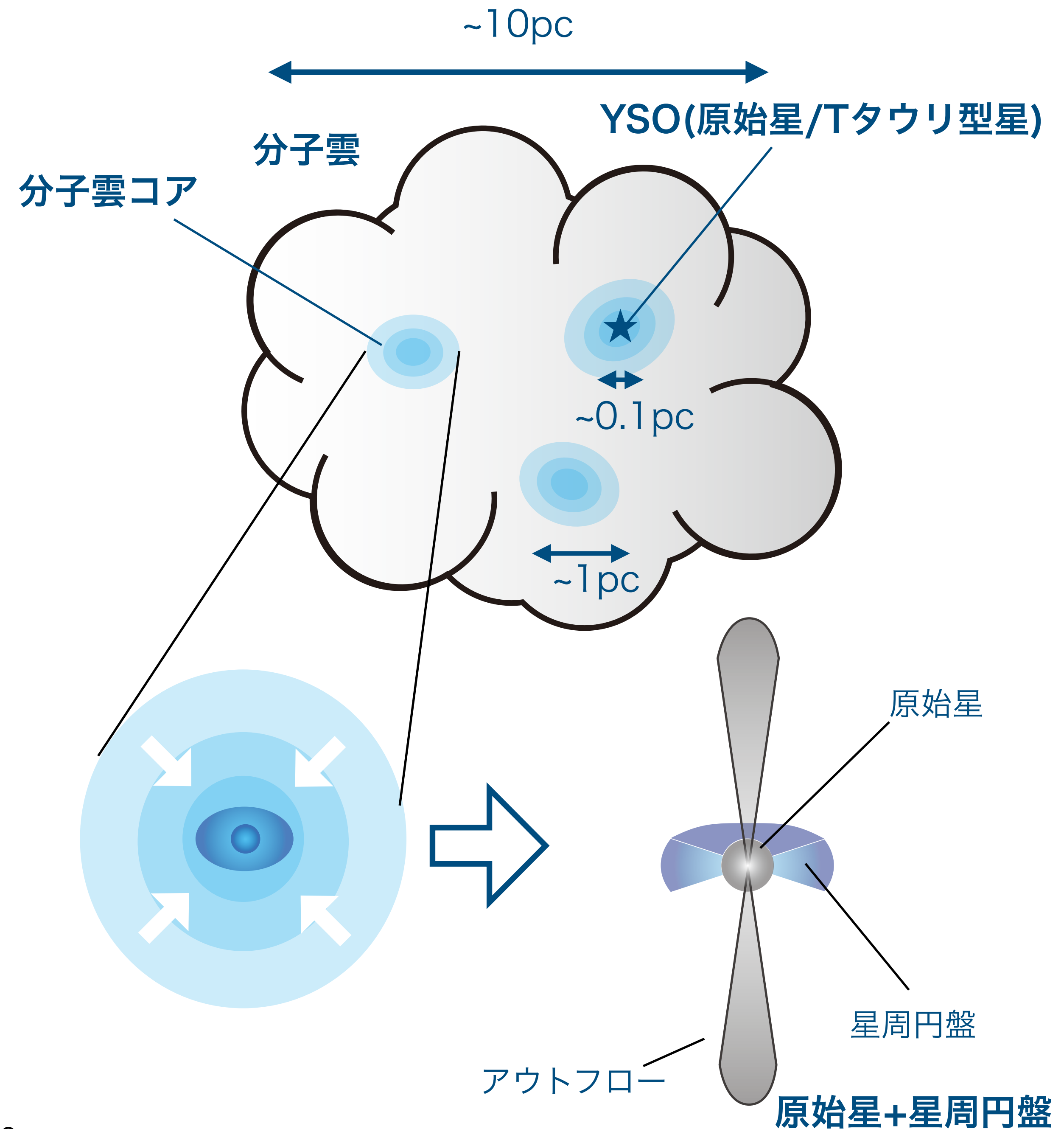
星形成のシナリオ

- ・ 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- ・ 第1コアの形成
- ・ 水素分子の解離($\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$)
- ・ 第2コアの形成
- ・ 主質量降着期
- ・ 前主系列収縮期(Tタウリ型星など)



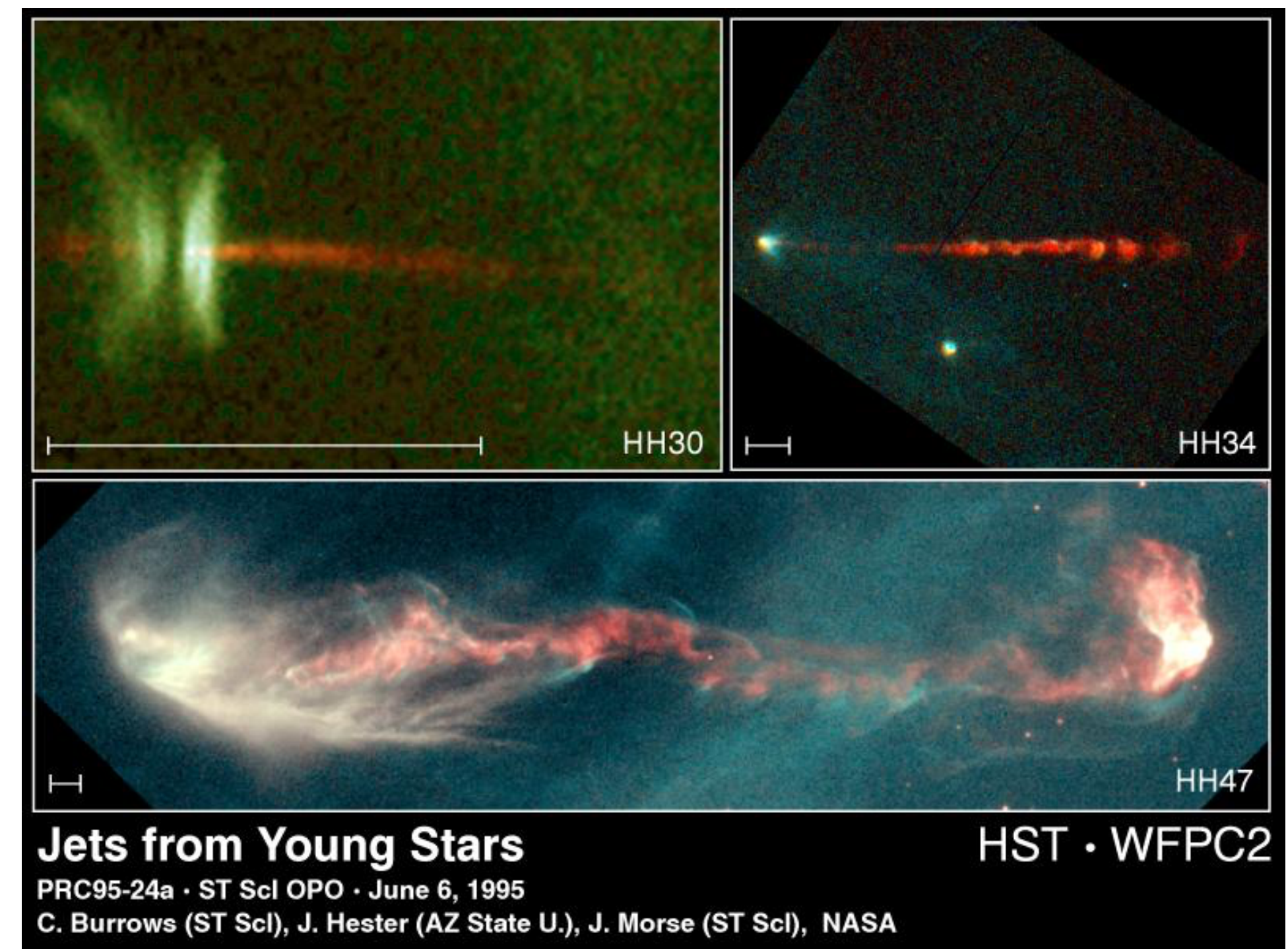
星形成のシナリオ

- ・ 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- ・ 第1コアの形成
- ・ 水素分子の解離($\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$)
- ・ 第2コアの形成
- ・ 主質量降着期
- ・ 前主系列収縮期(Tタウリ型星など)

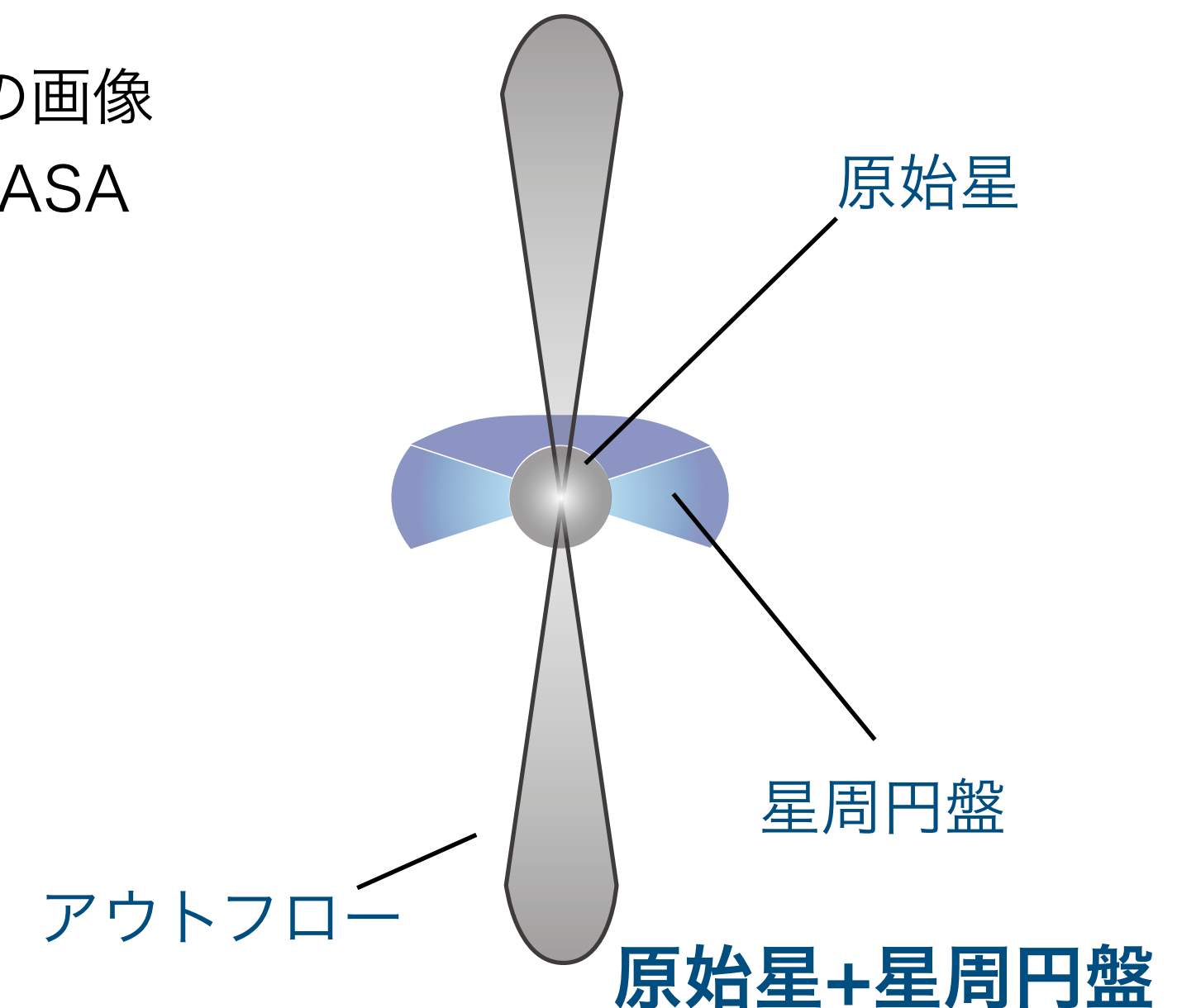


星形成のシナリオ

- ・ 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- ・ 第1コアの形成
- ・ 水素分子の解離($\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$)
- ・ 第2コアの形成
- ・ 主質量降着期
- ・ 前主系列収縮期(Tタウリ型星など)

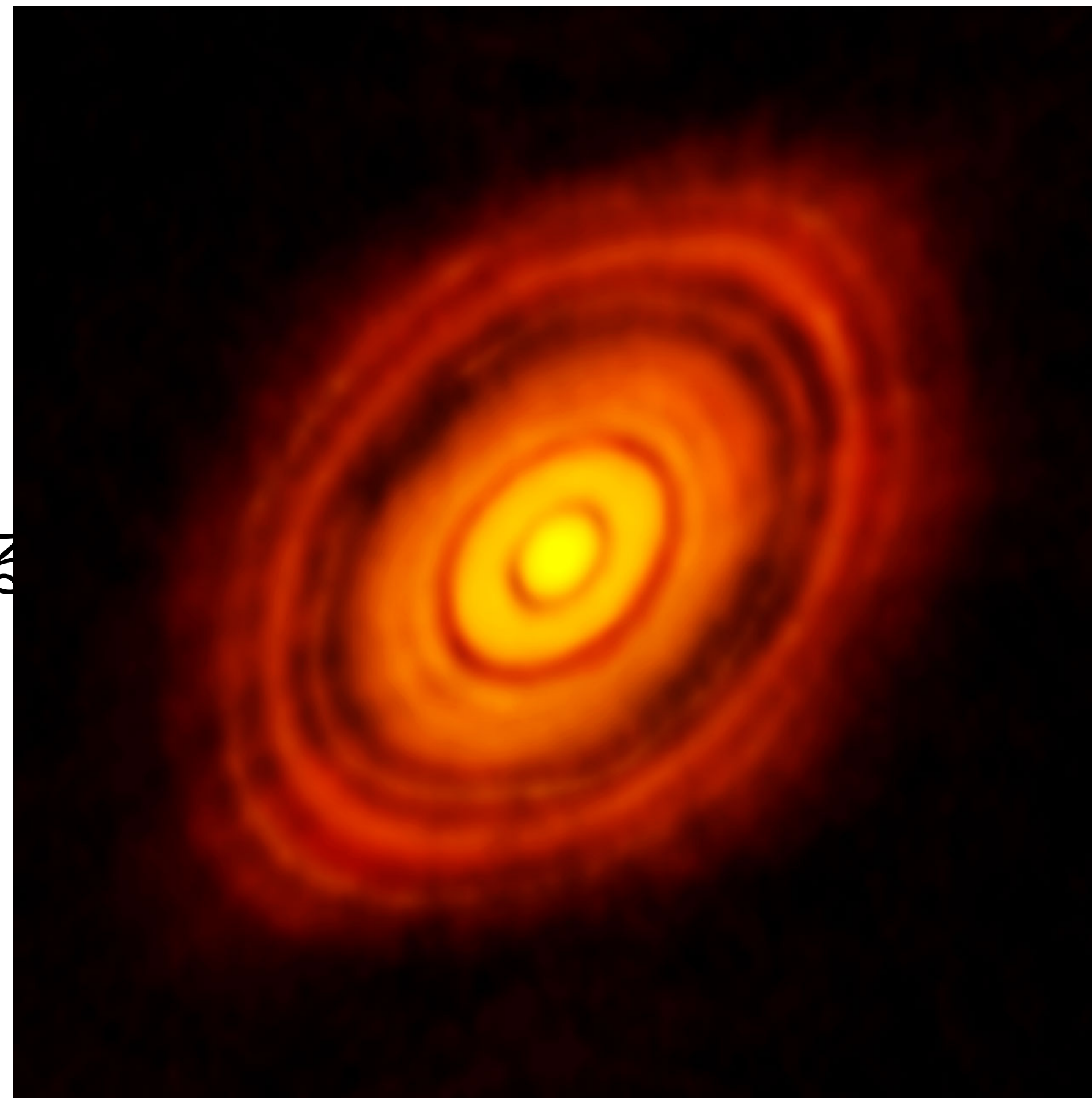


ハッブル宇宙望遠鏡による原始星ジェットの画像
credit: C.Burrows, J.Hester, J.Morse, NASA

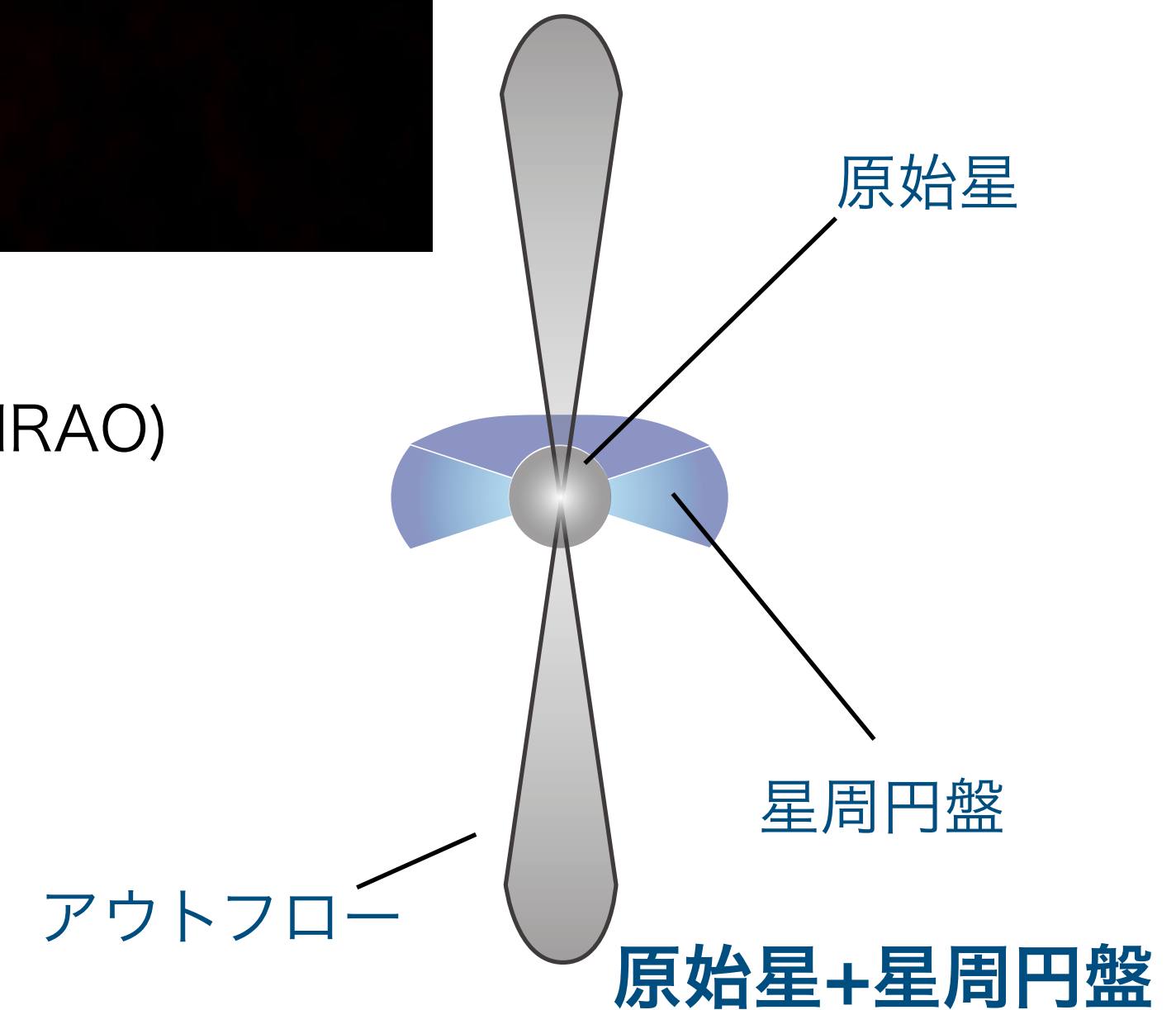


星形成のシナリオ

- ・ 分子雲コアが自分の重力で収縮する
- ・ 第1コアの形成
- ・ 水素分子の解離($\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$)
- ・ 第2コアの形成
- ・ 主質量降着期
- ・ 前主系列収縮期(Tタウリ型星など)



原始惑星系円盤 HL Tau
credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



第7回:

星の誕生と星間物質

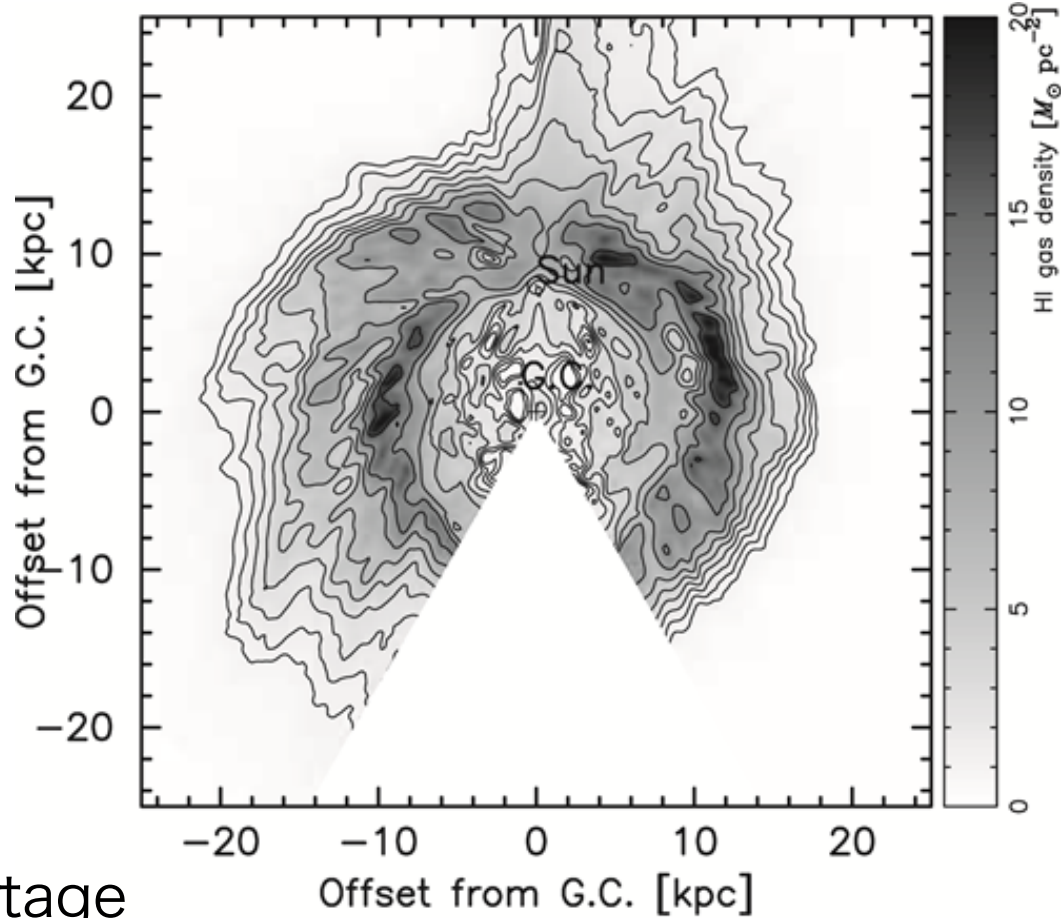
- ・ 星間物質と分子雲
- ・ 星が生まれる過程
- ・ 星間空間での物質の循環

星間空間での物質循環

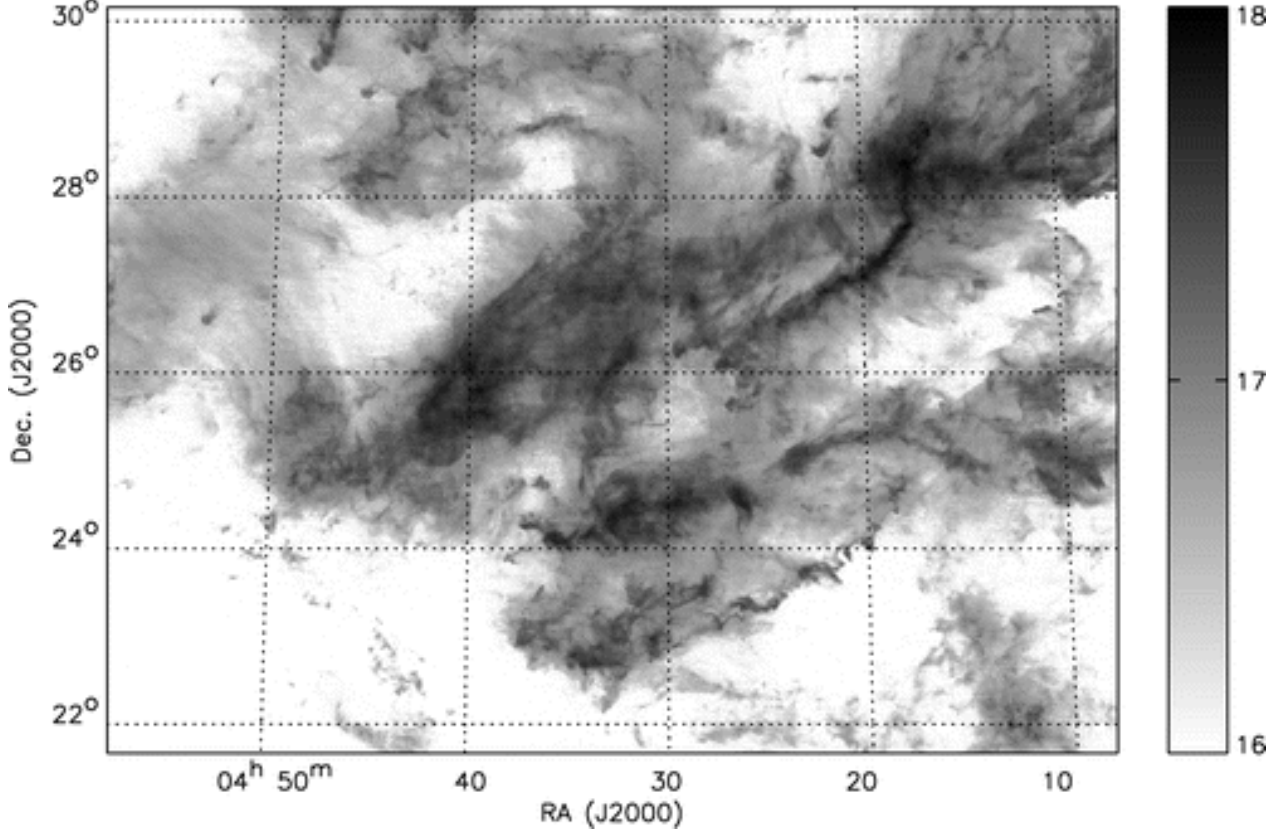
惑星状星雲



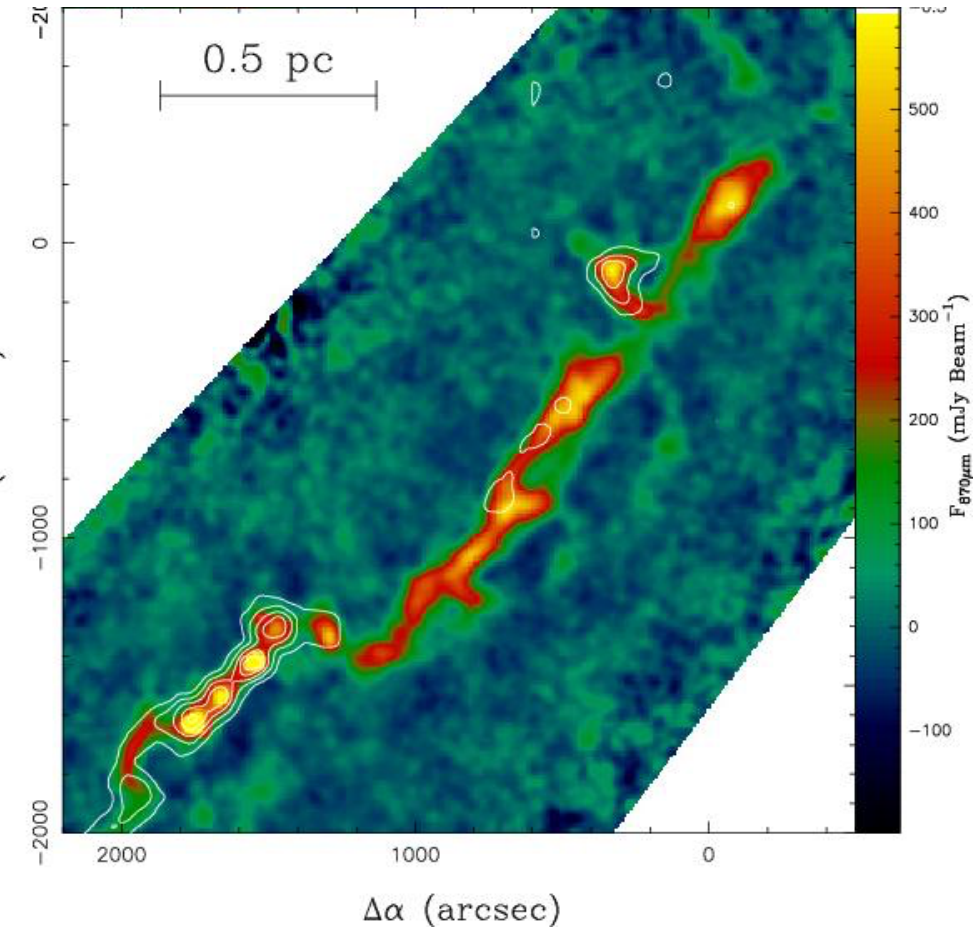
中性水素ガス



分子雲



分子雲コア



Credits: NASA, ESA and the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration

Nakanishi&Sofue(2016), PASJ, 68, 5

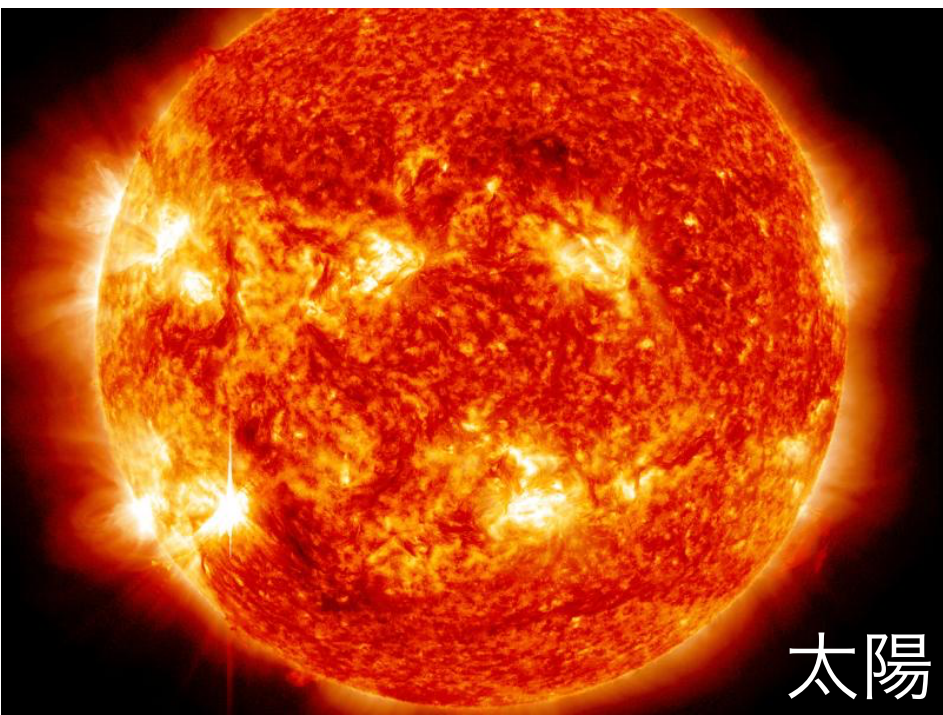
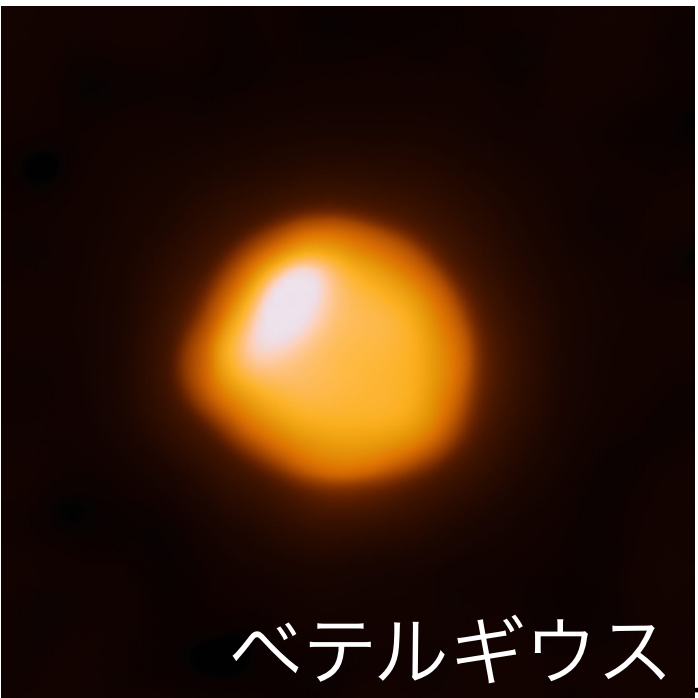
Goldsmith et al. (2008) ApJ, 680, 428

Hacar et al. (2013) A&A, 554, A55

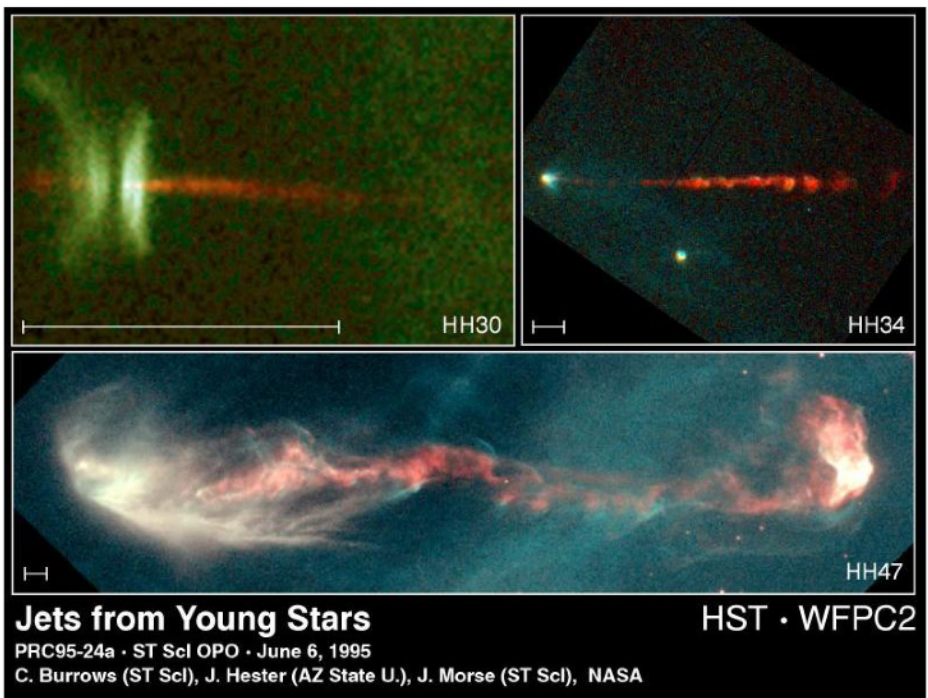
超新星残骸



恒星



原始星



credit: C.Burrows, J.Hester, .Morse, NASA

白色矮星

中性子星

ブラックホール



credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO)

credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO) /E. O’Gorman/P. KervellaMA