

SFN #341 13-18

担当：土井 聖明 (総研大M2)

13. 11/'Oumuamua as an N₂ ice fragment of an exo-Pluto surface: I. size and compositional constraints

14. Modeling chemistry during star formation: Water deuteration in dynamic star-forming regions

15. The complex organic molecular content in the L1498 starless core

16. Stars with Photometrically Young Gaia Luminosities Around the Solar System (SPY-GLASS) I: Mapping Young Stellar Structures and their Star Formation Histories

17. ATOMS:ALMA Three-millimeter Observations of Massive Star-forming regions – III: Catalogues of candidate hot molecular cores and Hyper/Ultra compact HII regions

18. Membership of Stars in Open Clusters using Random Forest with Gaia Data

1I/'Oumuamua as an N₂ ice fragment of an exo-Pluto surface: I. size and compositional constraints

Alan P. Jackson, Steven J. Desch ★ The origin of the interstellar object 1I/'Oumuamua has defied explanation. We perform calculations of the non-gravitational acceleration that would be experienced by bodies composed of a range of different ices and demonstrate that a body composed of N₂ ice would satisfy the available constraints on the non-gravitational acceleration, size and albedo, and lack of detectable emission of CO or CO₂ or dust. We find that 'Oumuamua was small, with dimensions 45 m x 44 m x 7.5 m at the time of observation at 1.42 au from the Sun, with a high albedo of 0.64. This albedo is consistent with the N₂ surfaces of bodies like Pluto and Triton. We estimate 'Oumuamua was ejected about 0.4-0.5 Gyr ago from a young stellar system, possibly in the Perseus arm. Objects like 'Oumuamua may directly probe the surface compositions of a hitherto-unobserved type of exoplanet: "exo-plutos". In a companion paper (Desch & Jackson, 2021) we demonstrate that dynamical instabilities like the one experienced by the Kuiper belt, in other stellar systems, plausibly could generate and eject large numbers of N₂ ice fragments. 'Oumuamua may be the first sample of an exoplanet brought to us.

- 太陽系外から飛来した天体である Oumuamua の組成・サイズについての論文（先週のSFNで紹介された Oumuamua 論文はこのシリーズの2本目）
- Oumuamua は重力だけでは説明できない軌道運動をした。
- さまざまな揮発性物質からなる惑星の軌道を計算し、観測と比較した。
- N₂氷からなる天体を考えると、軌道運動、他の分子やダストのエミッション(の未検出)、サイズ、アルベドが説明できる。

イントロ：Oumuamuaの特徴・これまでの研究

Oumuamuaの特徴

- ・ 高い離心率($e=1.2$): 系外天体
このような天体は他には 2I/Borisov($e=3.36$) ぐらい
- ・ 高い軸比
1:5 ~ 1:10
- ・ 熱放射が弱い(=天体が小さい)
散乱での強度を考えると**アルベドが高い**
- ・ 太陽近傍の星との相対速度が小さい(~ 9 km/s)
恒星の速度分散は数十km/s
- ・ ガスやダストの検出なし←**小惑星っぽい**
dust, CO, CO₂がnon-detection
2I/Borisovでは CN が明るい(彗星っぽさ)
- ・ 非重力的な加速 ($\sim 1/d^2$)
ガスの噴射で加速しているのと整合的(**彗星っぽさ**)

これまでの研究

細長い楕円なら1:10、薄い円盤なら1:5(この方がより良い)

若い星なら速度分散が小さい(初期の分子雲の速度分散)

H₂氷が6%ぐらいあれば説明できる

→ **N₂ 氷の天体**だと考えてこれらの特徴を説明できるか？

非重力的な加速を説明する天体組成・サイズの推定

非重力的な加速を説明する天体の条件
変数として

• アルベド

検出されているのは散乱光

アルベドを p とすると、**天体サイズ**は $p^{1/2}$ に比例
(形状は扁平な軸比1:5を考えて相似変形)

光の吸収に応じて**ガスの揮発量**も変化

• 組成

揮発性が違うと**ガスの揮発量**が変わって加速度が変わる

結果

N₂のアルベド、揮発量で加速度が説明可能！

(冥王星表面とほぼ同じ)

O₂, NH₃, CO₂, H₂O: 加速度が不足

H₂, He: 冷たすぎて天体として長持ちしない

CH₄, CO: 少ない

N₂は冥王星表面の主要な物質

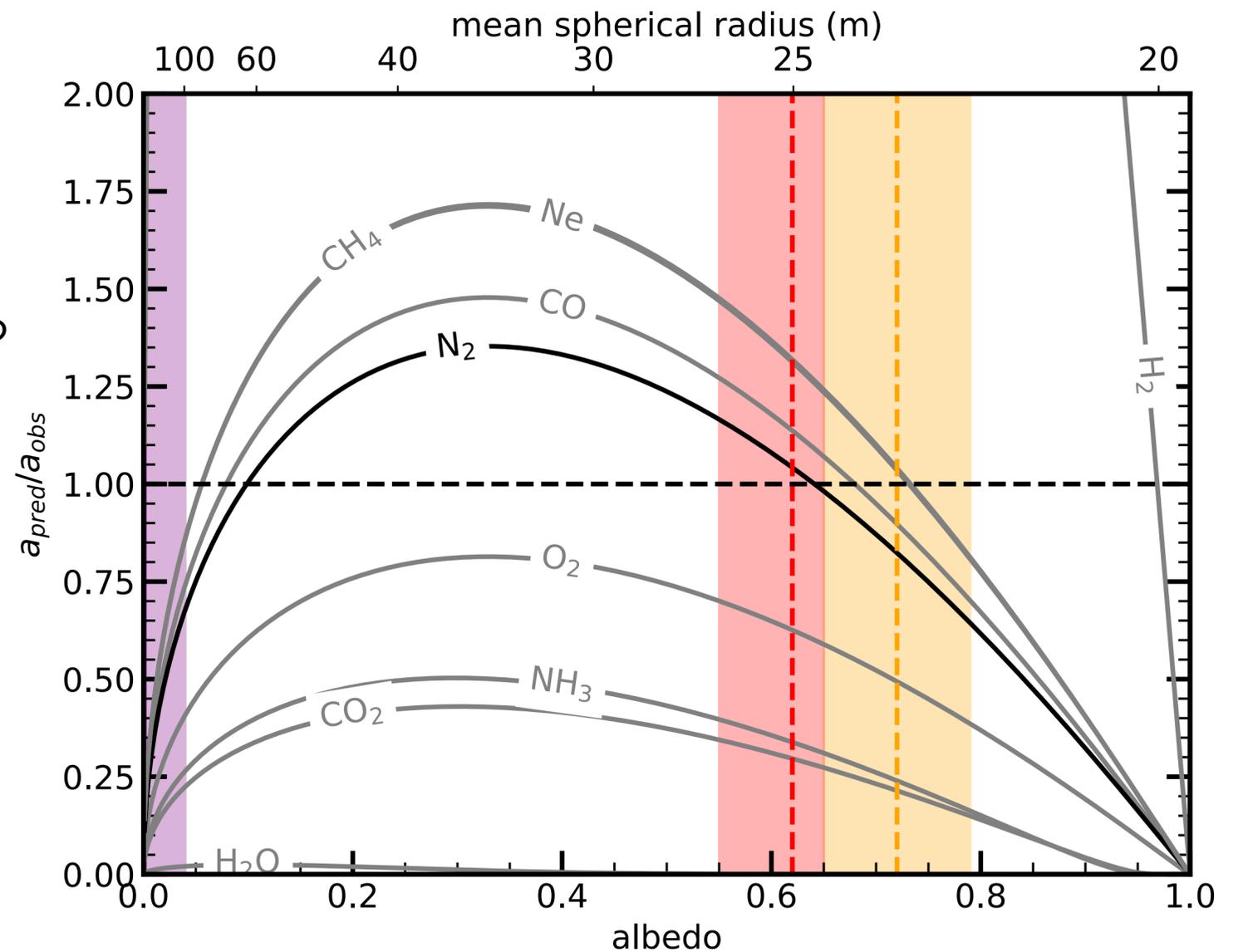
→ 系外の冥王星のような天体の破片

Rearranging Equation 1 we then obtain the mass loss rate,

$$-\frac{dM}{dt} = Sm \left[\frac{L_{\odot}}{4\pi d^2} \xi_0 (1 - p_B) - \epsilon \sigma T_{\text{surf}}^4 \right] [\Delta H_{\text{sub}} + \Delta H_{\text{trans}} + m C_p \Delta T]^{-1}, \quad (5)$$

and the non-gravitational acceleration,

$$a = \frac{\tau}{3} \frac{S}{M} \sqrt{\frac{8k_B m T_{\text{surf}}}{\pi}} \left[\frac{L_{\odot}}{4\pi d^2} \xi_0 (1 - p_B) - \epsilon \sigma T_{\text{surf}}^4 \right] [\Delta H_{\text{sub}} + \Delta H_{\text{trans}} + m C_p \Delta T]^{-1}. \quad (6)$$



天体のサイズの進化

太陽の近傍では、太陽放射によるガスの放出で進化(右再近接時に大きく変化)
 質量は1/10へ、軸比は2倍に

遠方でのサイズ進化の要因は？

太陽の影響は弱い、長期間(~ Gyr)星間空間を飛んできた
 (もしH₂ならもともと数十キロ必要 → N₂ が適切)

- 星間ダストの衝突: 効かない(わずか)
- 光蒸発: 効かない(1 cm/Gyr)
- Galactic Cosmic Rays (GCRs)
 6 m/Gyr (現在の太陽近傍)
 31 m/Gyr (星形成率の変化を考慮)

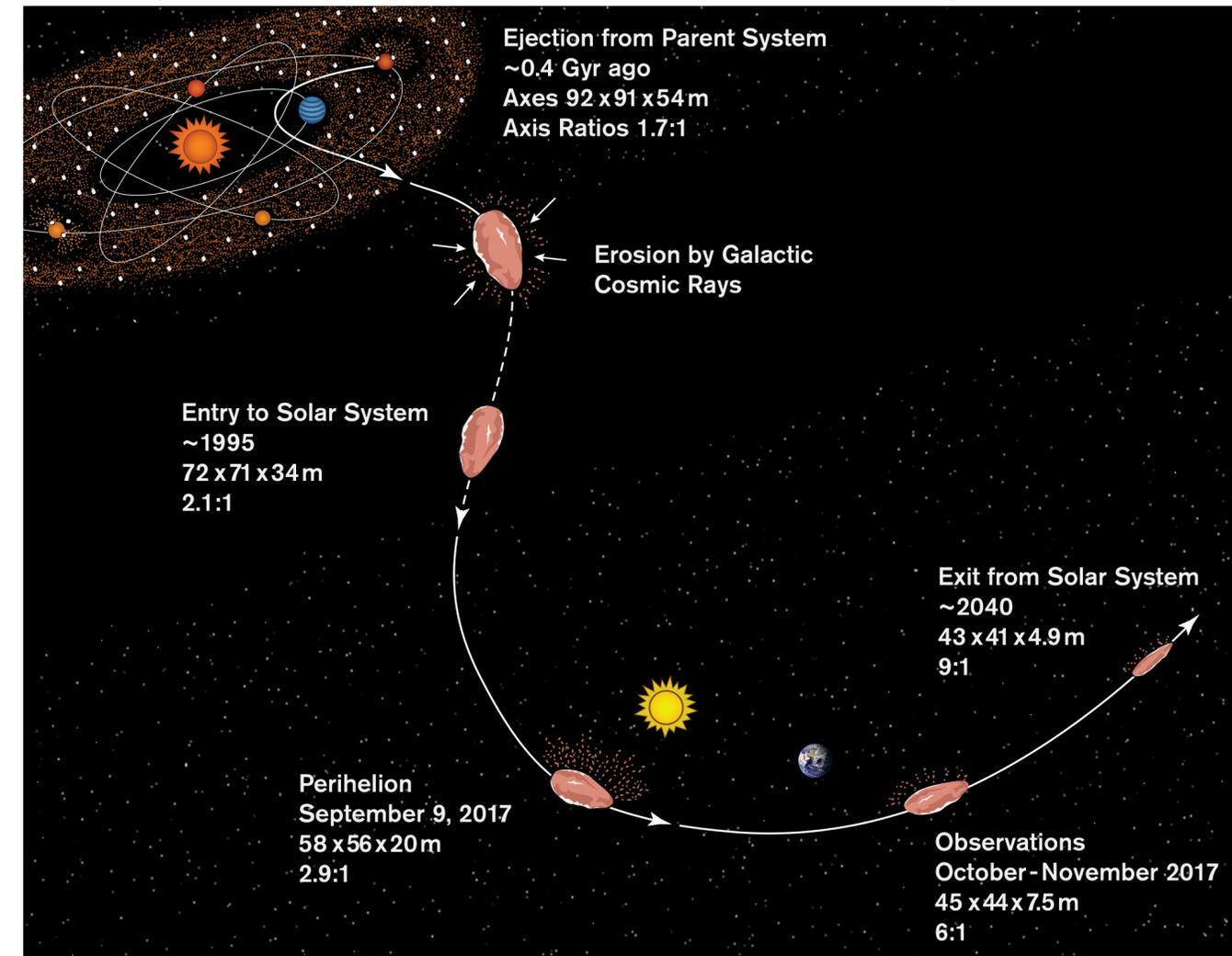
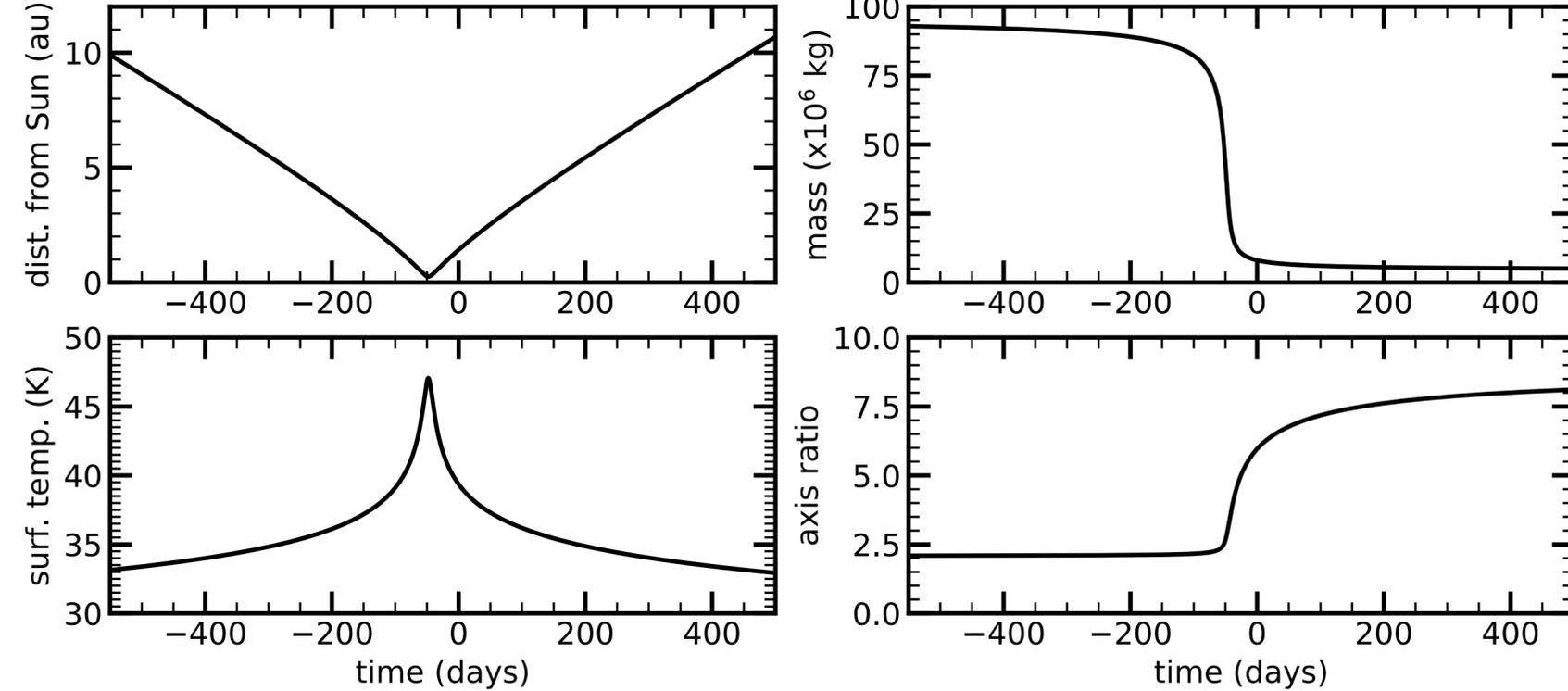


Figure 1. A plausible history for ‘Oumuamua as a collisional fragment of N₂ ice, as hypothesized in this paper and the companion paper by Jackson and Desch (2021). *Credit:* Sue Selkirk.

Modeling chemistry during star formation: Water deuteration in dynamic star-forming regions

S. S. Jensen, J. K. Jørgensen, K. Furuya, T. Haugbølle, Y. Aikawa ★ Recent observations of the HDO/H₂O ratio toward protostars in isolated and clustered environments show an apparent dichotomy, where isolated sources show higher D/H ratios than clustered counterparts. Establishing which physical and chemical processes create this differentiation can provide insights into the chemical evolution of water during star formation and the chemical diversity during the star formation process and in young planetary systems. Methods: The evolution of water is modeled using 3D physicochemical models of a dynamic star-forming environment. The physical evolution during the protostellar collapse is described by tracer particles from a 3D MHD simulation of a molecular cloud region. Each particle trajectory is post-processed using RADMC-3D to calculate the temperature and radiation field. The chemical evolution is simulated using a three-phase grain-surface chemistry model and the results are compared with interferometric observations of H₂O, HDO, and D₂O in hot corinos toward low-mass protostars. Results: The physicochemical model reproduces the observed HDO/H₂O and D₂O/HDO ratios in hot corinos, but shows no correlation with cloud environment for similar identical conditions. The observed dichotomy in water D/H ratios requires variation in the initial conditions (e.g., the duration and temperature of the prestellar phase). Reproducing the observed D/H ratios in hot corinos requires a prestellar phase duration $t \sim 1-3$ Myr and temperatures in the range $T \sim 10-20$ K prior to collapse. This work demonstrates that the observed differentiation between clustered and isolated protostars stems from differences in the molecular cloud or prestellar core conditions and does not arise during the protostellar collapse itself.

- 水の同位体比に関するシミュレーション論文
- 原始星周りの HDO/H₂O 観測からクラスターより孤立天体の方が D/H が高い
- 3次元の動的な物理化学モデルで水の進化をモデリングし、トレーサー粒子を追って化学進化を見た。
- low mass protostarのhot corino の水の同位体観測と比較した。
- モデルは観測された HDO/H₂O、D₂O/HDOを再現するが、原始星の環境の違いとの相関はなかった。
- クラスターと孤立天体での違いは、分子雲やprestellar coreの初期条件の違いによるものであり、protostellar collapse段階での進化の違いによるものではない

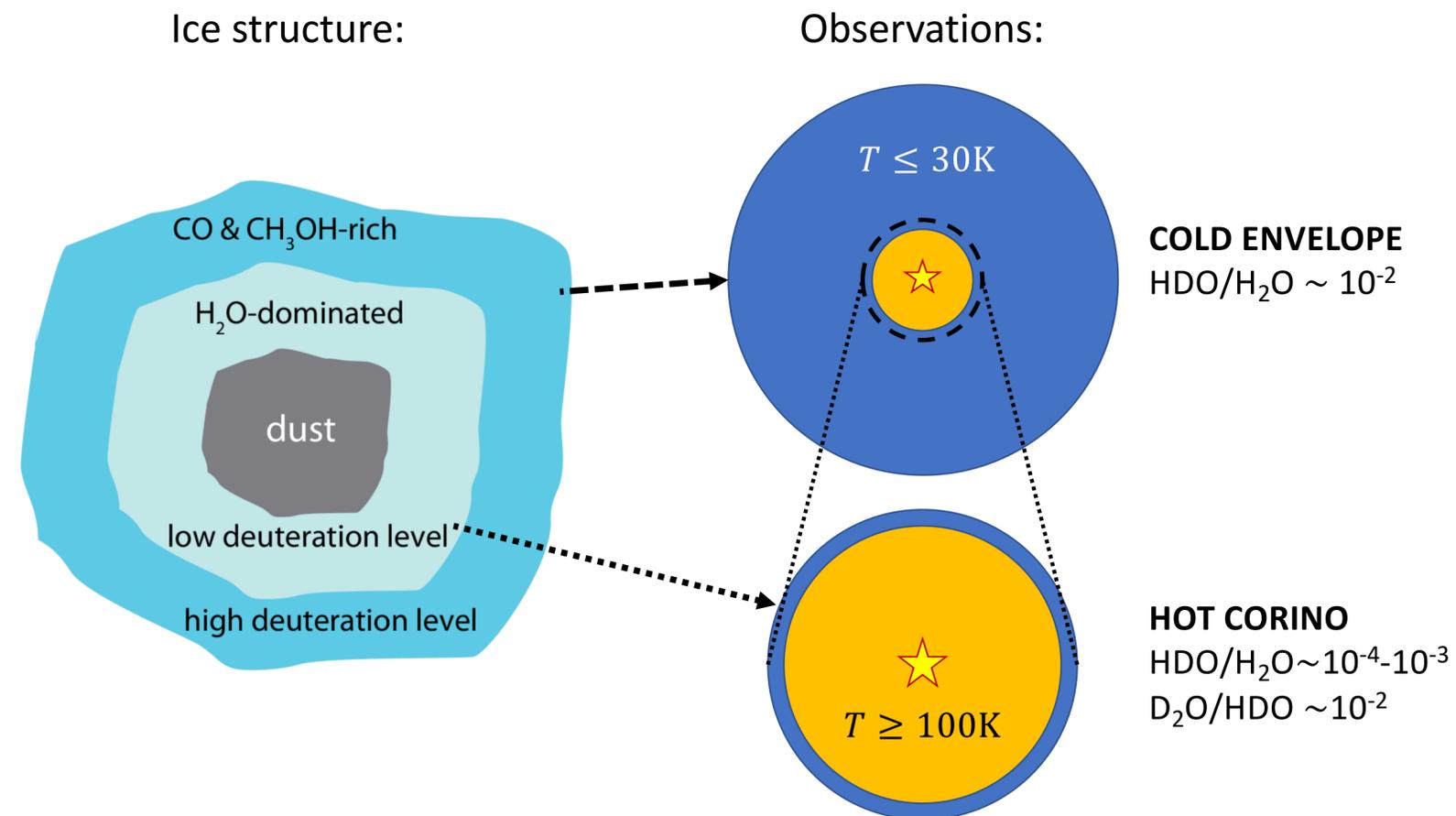
イントロ：水の同位体の特徴

- 氷の同位体比はその形成環境に作用されるため、物理的・化学的な進化のトレーサー
- 観測事実として
 - HDO/H₂O は、cold envelope では hot corino より高い。
 - Hot corino では D₂O/HDO > HDO/H₂O である。
→ 氷ダストが重水素率が低いマントル部分と、重水素濃縮が進んだ表層から構成されていると考えると説明できる

- 孤立原始星では、cluster内と比較して HDO/H₂Oが高い
→ この理由を探るのが本研究のメインピック。

考えられる解釈は

- isolated protostarでは崩壊の時間が長くて重水素濃縮がよく進む
- clustered protostarでは温度が高い、もしくは放射が強いことで重水素濃縮が進みにくい
→ 3Dの流体シミュレーションと化学進化計算を行う



シミュレーション設定

計算設定

- 流体シミュレーション: RAMSES
- 輻射シミュレーション: RADMC3D
- 化学計算
 - 3相モデル(mantle, surface, gas)でのrate equation
 - 気相反応、表面反応、光化学を導入

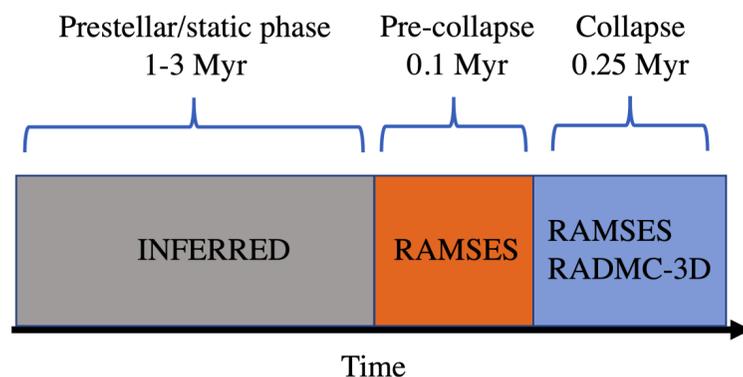


図3. 計算設定の外観。

1. 崩壊前の静的な段階
 2. sink形成前: RAMSES (10 K)
 3. sink形成後: RAMSES+RADMC3D
- の3段階のをこなう。

sinkができる0.1 Myr前からの0.35 Myrの間について、tracer particleに沿った化学計算を行う。

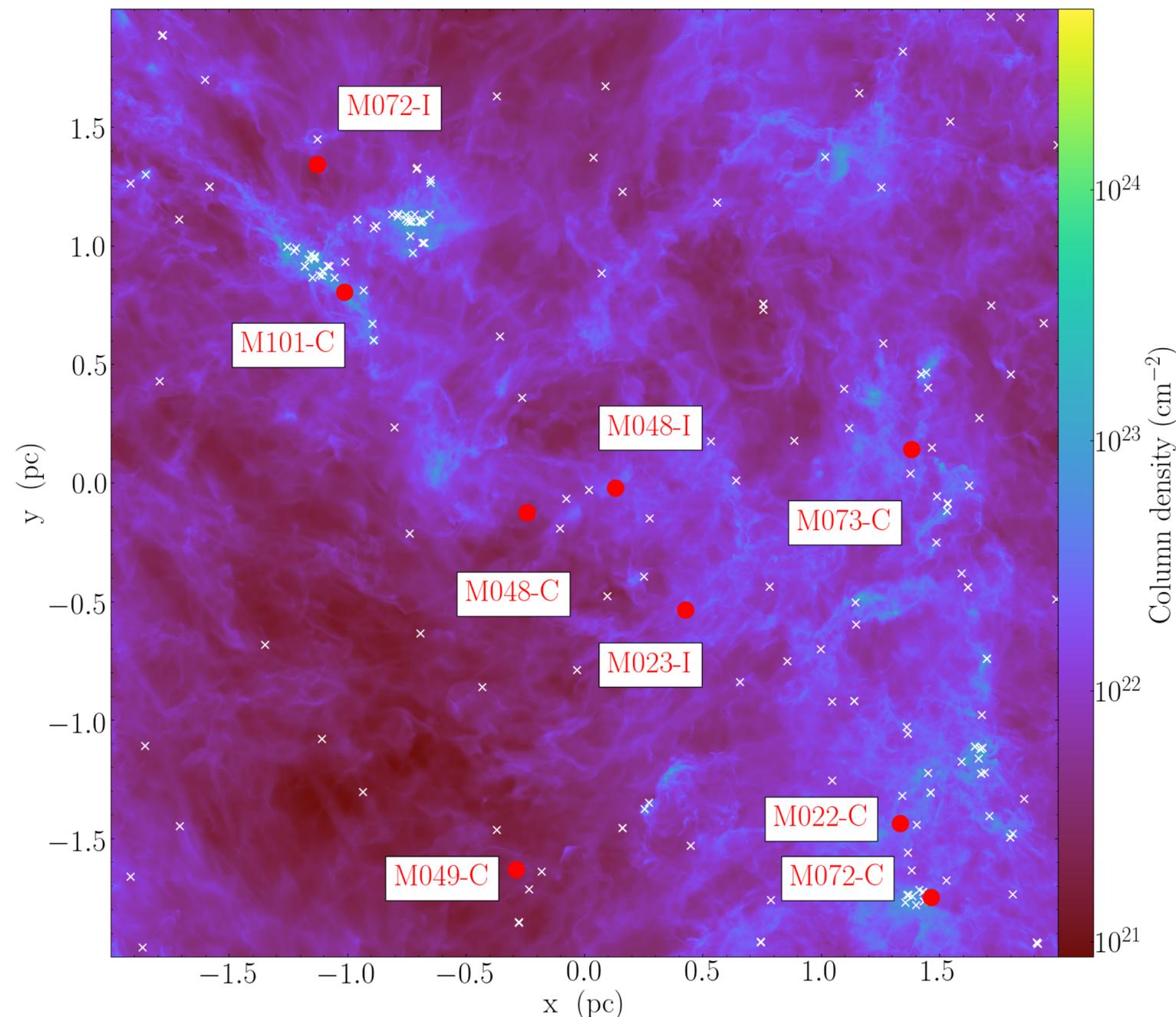


図2. RAMSESのスナップショット(計算終了時)
Cはclustered、IはIsolatedを意味する。

結果

3Dでは10個のトレーサー粒子に沿った HDO/H₂O、D₂O/HDOをプロット

1D(これまで)と3Dどちらも

- ice mantle が溶けるまでは高い重水素率
- 溶けてからは HDO/H₂Oは大きく低下、D₂O/HDOはさほどかわらず

3Dの特徴

- ice mantle が溶けるまでは分散が大きい、溶けたあとは分散が小さい
- 最初はトレーサー粒子ごとに密度がばらついているので重水素率が異なる
- ice mantleが溶けると分散が小さくなる

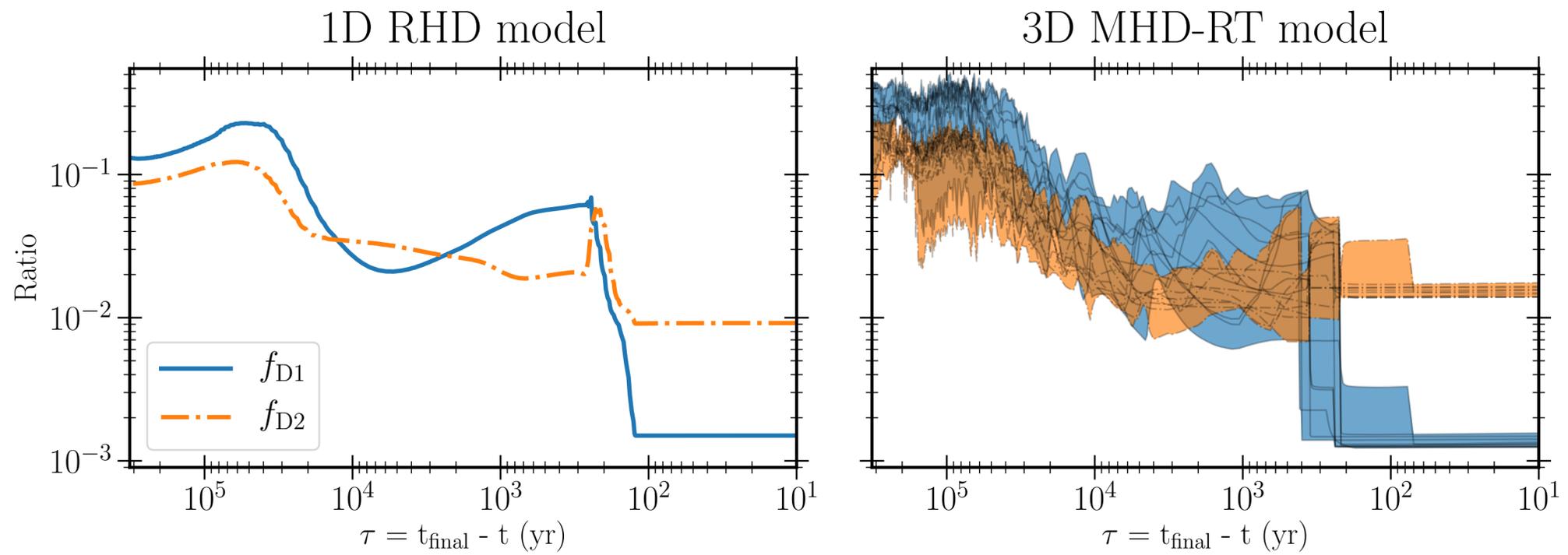
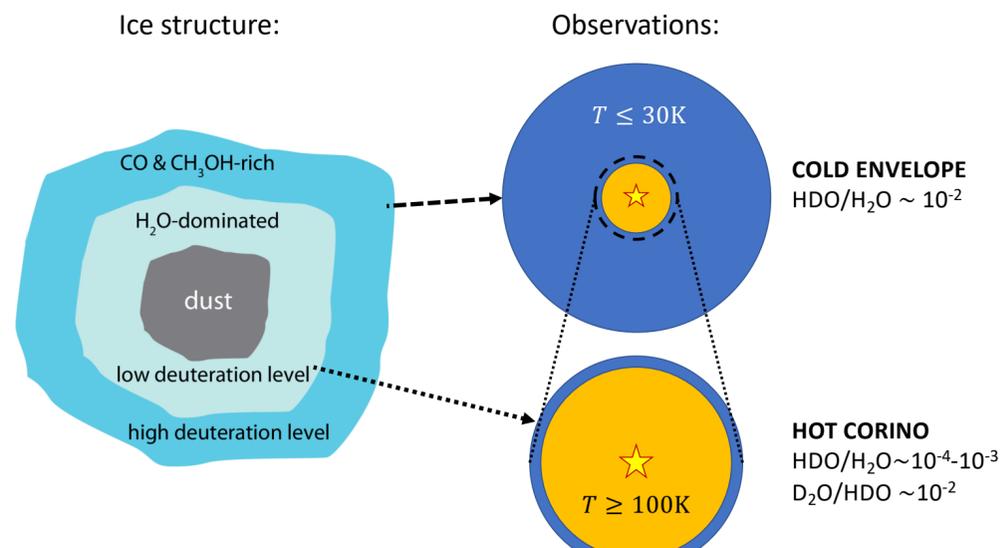


Fig. 7. M101-C周りの重水素率(気相)

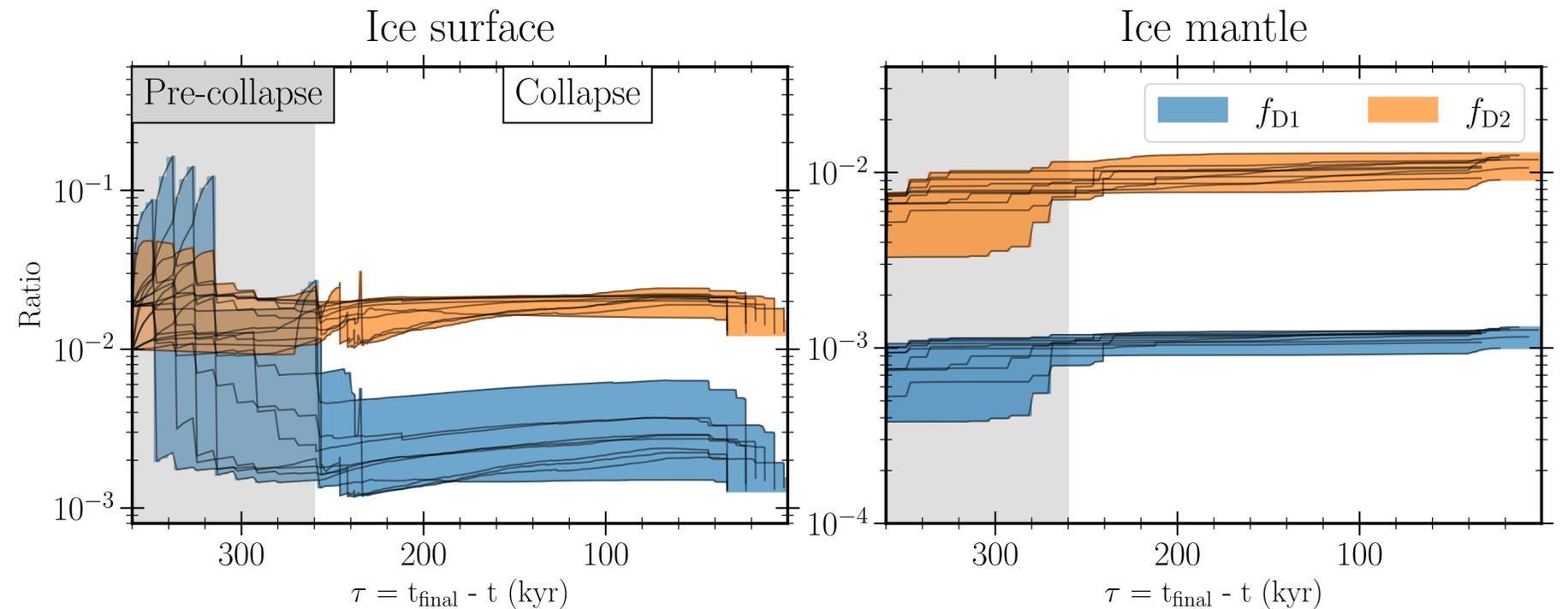


Fig. 8. M101-C周りの重水素率(固相)

結果：孤立環境とクラスター環境の違い

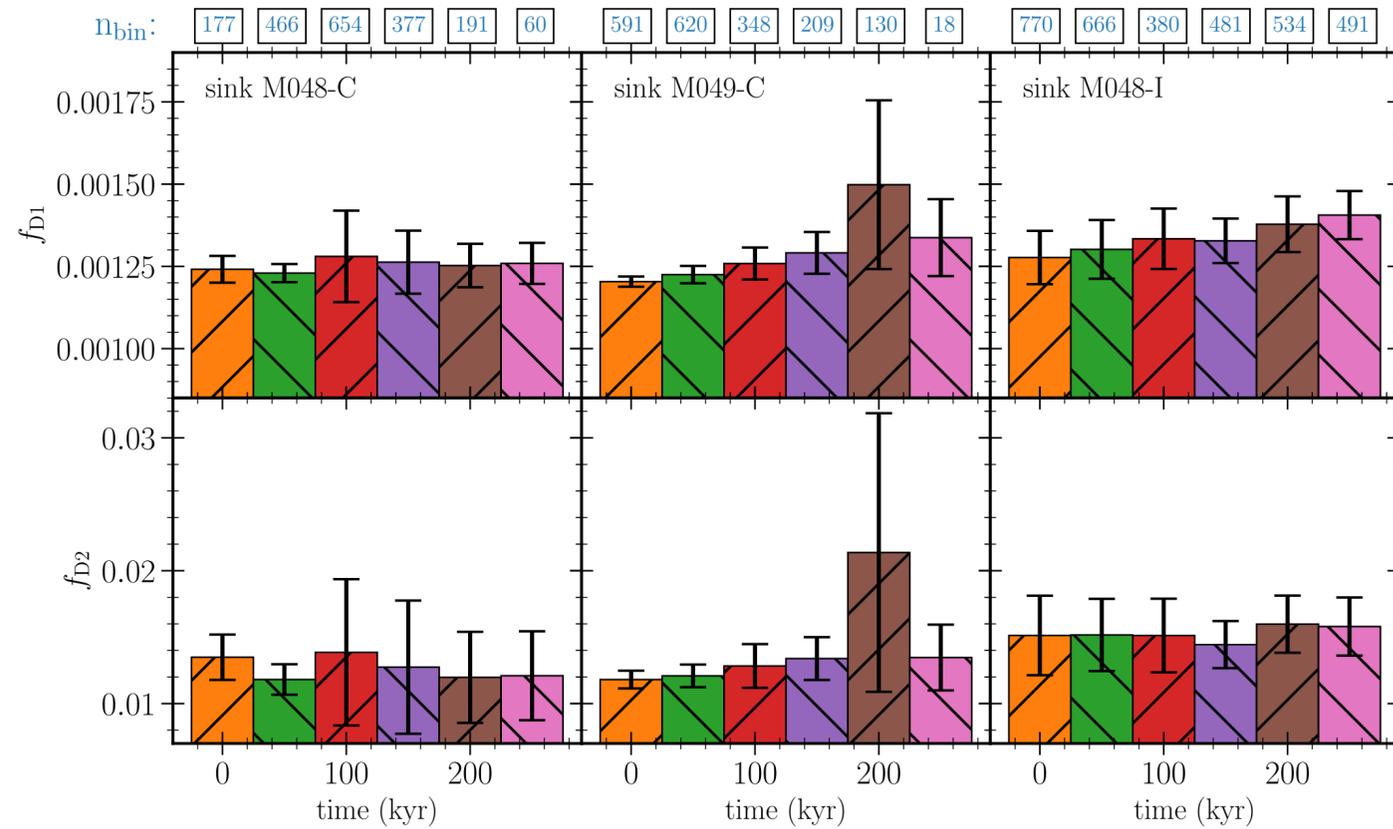


Fig. 10. 同程度の質量のsinkへ降着するtracer粒子の HDO/H₂O(上) と D₂O/HDO(下)

- ・ 時間経過とともに D/H はわずかに上昇するが、観測できるほどではない
- ・ HDO/H₂O と D₂O/HDOには形成環境(isolated, clustered)による明確な相関はなかった
DH比は崩壊中よりも、それより前の初期の分子雲の状態に強く依存

結果: 形成環境のD/Hへの影響

prestellarを	#	T (K)	Duration (Myr)	ξ_{H_2} (10^{-17}s^{-1})	G_0	f_{D1}	f_{D2}	α
短く →	1	10	1	1	1	5×10^{-4}	6×10^{-3}	12.0
	2	10	2	1	1	1×10^{-3}	2×10^{-2}	20.0
Fiducial →	3	10	3	1	1	1×10^{-3}	2×10^{-2}	20.0
	4	10	3	10	1	7×10^{-3}	1×10^{-2}	1.4
	5	10	3	100	1	3×10^{-2}	2×10^{-2}	0.7
	6	10	3	1	10	1×10^{-3}	2×10^{-2}	20.0
	7	10	3	1	100	3×10^{-3}	3×10^{-2}	10.0
	8	20	1	1	1	1×10^{-3}	1×10^{-2}	10
	9	30	1	1	1	2×10^{-3}	7×10^{-3}	3.5
	10	20	3	1	1	2×10^{-3}	3×10^{-2}	15.0
	11	30	3	1	1	1×10^{-3}	5×10^{-3}	5.0
	12	10	1.5	1	1	7×10^{-4}	8×10^{-3}	11.0
温度上げた →	13 ^a	15	1.5	1	1	7×10^{-4}	6×10^{-3}	8.6
	14 ^a	20	1.5	1	1	3×10^{-4}	2×10^{-3}	6.7

Table 3. パラメータを変えた時の D/H

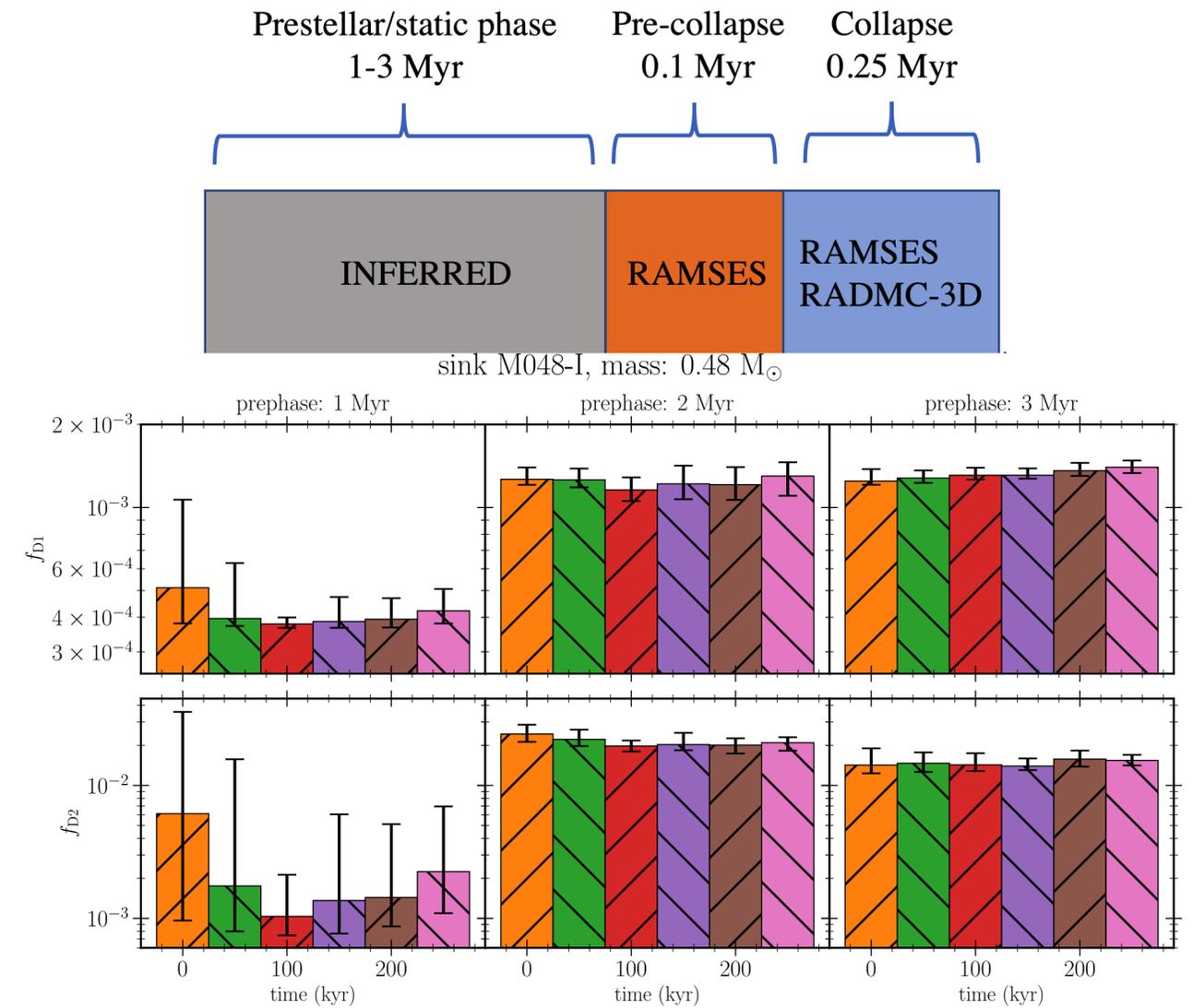


Fig. 12. 崩壊前の時間を変更。
1 Myrだと濃縮があまり起こらない。
2 Myrだと3 Myrに近い。

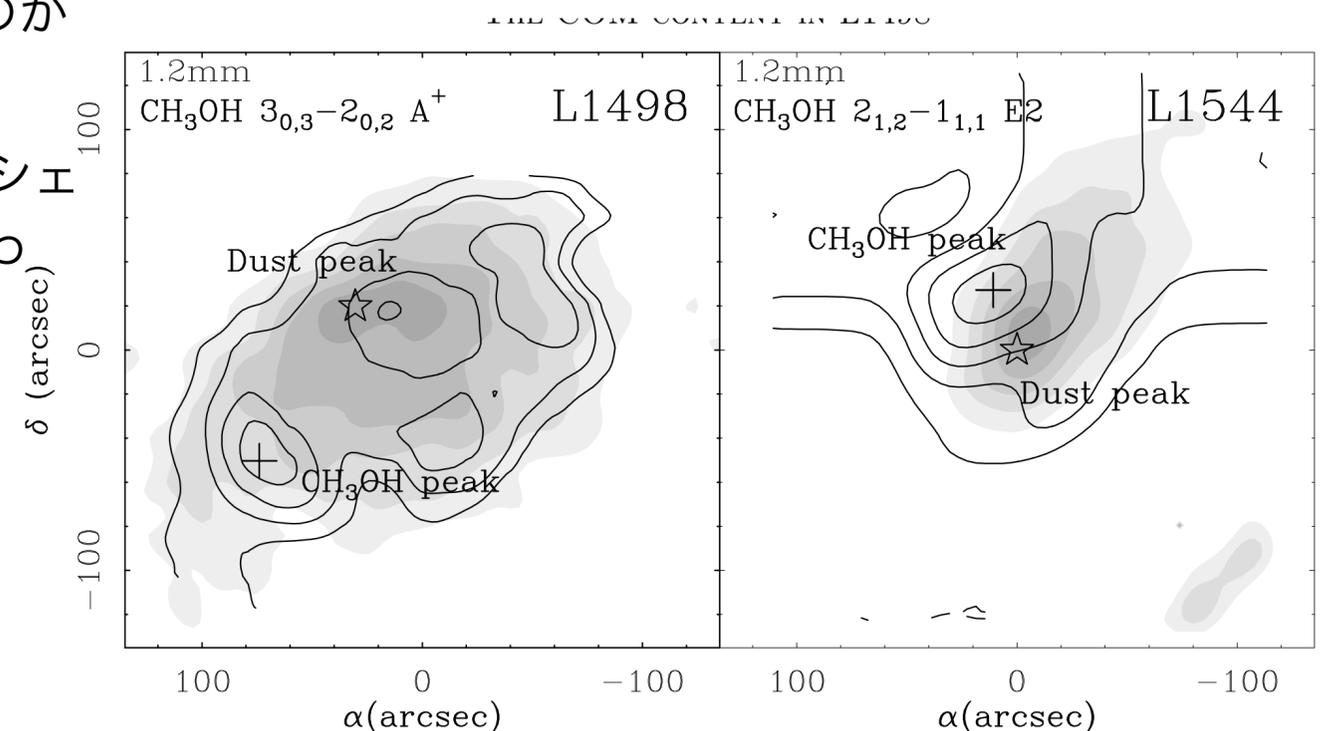
観測された孤立天体とclusterでの D/H の違いは、
崩壊前の物理状態の違いによるもの

The complex organic molecular content in the L1498 starless core

Izaskun Jimenez-Serra, Anton I. Vasyunin, Silvia Spezzano, Paola Caselli, Giuliana Cosentino, Serena Viti ★

Observations carried out toward starless and pre-stellar cores have revealed that complex organic molecules are prevalent in these objects, but it is unclear what chemical processes are involved in their formation. Recently, it has been shown that complex organics are preferentially produced at an intermediate-density shell within the L1544 pre-stellar core at radial distances of 4000 au with respect to the core center. However, the spatial distribution of complex organics has only been inferred toward this core and it remains unknown whether these species present a similar behaviour in other cores. We report high-sensitivity observations carried out toward two positions in the L1498 pre-stellar core, the dust peak and a position located at a distance of 11000 au from the center of the core where the emission of CH₃OH peaks. Similarly to L1544, our observations reveal that small O-bearing molecules and N-bearing species are enhanced by factors 4-14 toward the outer shell of L1498. However, unlike L1544, large O-bearing organics such as CH₃CHO, CH₃OCH₃ or CH₃OCHO are not detected within our sensitivity limits. For N-bearing organics, these species are more abundant toward the outer shell of the L1498 pre-stellar core than toward the one in L1544. We propose that the differences observed between O-bearing and N-bearing species in L1498 and L1544 are due to the different physical structure of these cores, which in turn is a consequence of their evolutionary stage, with L1498 being younger than L1544.

- これまでの観測から starless core や prestellar core には complex organic molecules が存在していることがわかった。これらがどのようにして作られたのかは未解明。
- 先行研究から、L1544 prestellar core で、中心から 4000 au、中程度の密度のシェルで複雑有機分子が作られていることが明らかとなった。ただし、空間分布がわかってるのはこの天体だけ。
- 本研究では、L1498 prestellar core に対して、ダストのピークと中心から 11000 au の箇所の高感度観測を行なった (IRAM 30m telescope)。
- (L1544 と同じく) N や小さい O を含む分子は外側と比べて 4-14 倍増加している
- (L1544 と違って) 大きい O を含む分子は今回の観測では non-detection
- L1544 と L1498 の物理構造の違いによるもの、L1498 はより若い



Stars with Photometrically Young Gaia Luminosities Around the Solar System (SPY-GLASS) I: Mapping Young Stellar Structures and their Star Formation Histories

Ronan Kerr, Aaron C. Rizzuto, Adam L. Kraus, Stella S. R. Offner ★ Young stellar associations hold a star formation record that can persist for millions of years, revealing the progression of star formation long after the dispersal of the natal cloud. To identify nearby young stellar populations that trace this progression, we have designed a comprehensive framework for the identification of young stars, and use it to identify $\sim 3 \times 10^4$ candidate young stars within a distance of 333 pc using Gaia DR2. Applying the HDBSCAN clustering algorithm to this sample, we identify 27 top-level groups, nearly half of which have little to no presence in previous literature. Ten of these groups have visible substructure, including notable young associations such as Orion, Perseus, Taurus, and Sco-Cen. We provide a complete subclustering analysis on all groups with substructure, using age estimates to reveal each region's star formation history. The patterns we reveal include an apparent star formation origin for Sco-Cen along a semicircular arc, as well as clear evidence for sequential star formation moving away from that arc with a propagation speed of $\sim 4 \text{ km s}^{-1}$ ($\sim 4 \text{ pc Myr}^{-1}$). We also identify earlier bursts of star formation in Perseus and Taurus that predate current, kinematically identical active star-forming events, suggesting that the mechanisms that collect gas can spark multiple generations of star formation, punctuated by gas dispersal and cloud regrowth. The large spatial scales and long temporal scales on which we observe star formation offer a bridge between the processes within individual molecular clouds and the broad forces guiding star formation at galactic scales.

- 若い星の集団は星形成の記録を保持しており、星形成の進行を明らかにすることにつながる。
- 近傍の若い星の数を特定するために、若い星を若い星を同定するための包括的なフレームワークを構築した。
- Gaia DR2 のデータから、333 pc以内の $\sim 3 \times 10^4$ の若い星の候補を特定した。
- HDBSCAN を使ってクラスタリングすると、27のトップレベルグループが同定され、そのうち半分は先行研究で指摘されていないものであった。
- 10個のクラスターは、目に見えるようなsubstructureを持っている。
- 星形成史の解明のため、年齢の見積もりからsubstructureを持つ天体に対してsubclusteringを行った。
- Sco-Cenでは半円に沿って星形成が起き、 $\sim 4 \text{ km/s}$ (4 pc/Myr)で形成領域が外側に伝播していることが明らかとなった。
- Perseus と Taurus では、現在の星形成イベントの前に、星形成バーストが起きていることが明らかとなった。
- ガスの集積が、ガスの拡散や分子雲の再成長により中断されながら、複数の世代の星形成を引き起こすことを示唆する。
- 大きな空間、時間スケールでの星形成の観測は、分子雲内と銀河全体の星形成をつなぐことにつながる。

ATOMS:ALMA Three-millimeter Observations of Massive Star-forming regions – III: Catalogues of candidate hot molecular cores and Hyper/Ultra compact HII regions

ATOMS survey - Hong-Li Liu et al. ★ We have identified 453 compact dense cores in 3 mm continuum emission maps in the ATOMS (ALMA Three-millimeter Observations of Massive Star-forming regions) survey, and compiled three catalogues of high-mass star forming cores. One catalogue, referred to as H/UC-HII catalogue, includes 89 cores that enshroud hyper/ultra compact (H/UC) HII regions as characterized by associated compact H40alpha emission. A second catalogue, referred to as pure s-cHMC, includes 32 candidate Hot Molecular Cores (HMCs) showing rich spectra ($N > 20$ lines) of complex organic molecules (COMs) but not associated with H/UC-HII regions. The third catalogue, referred to as pure w-cHMC, includes 58 candidate HMCs with relatively low levels of COM richness and not associated with H/UC-HII regions. These three catalogues of dense cores provide an important foundation for future studies of the early stages of high-mass star formation across the Milky Way. We also find that nearly half of H/UC-HII cores are candidate HMCs. From the number counts of COM-containing and H/UC-HII cores, we suggest that the duration of high-mass protostellar cores showing chemically rich features is at least comparable to the lifetime of H/UC-HII regions. For cores in the H/UC-HII catalogue, the width of the H40alpha line increases as the core size decreases, suggesting that the non-thermal dynamical and/or pressure line-broadening mechanisms dominate on the smaller scales of the H/UC-HII cores.

- ATOMSサーベイ(大質量星形成領域への3mm観測)から、3mm連続波で453個のdense coreを同定した。
- 3つのカタログを作成、銀河系での大質量星形成のための研究の基礎となるカタログ
 - H/UC-HIIコア: コンパクトなH40 α 、98個が同定
 - pure s-cHMC: COMs(complex organic molecules)が豊富なHot Molecular Cores、32個が同定
 - pure w-cHMC: COMが豊富ではないHMC、58個が同定
- H/UC-HIIの半数はHMCsの候補
- COMsを含むコアとH/UC-HIIコアの数から、化学的にリッチな大質量原始星コアの寿命はH/UC-HII領域の寿命と同程度
- H/UC-HIIカタログのコアサイズが小さいほどH40 α の線幅が大きいため、非熱的な運動や圧力による線幅の広がりがH/UC-HIIコアで支配的

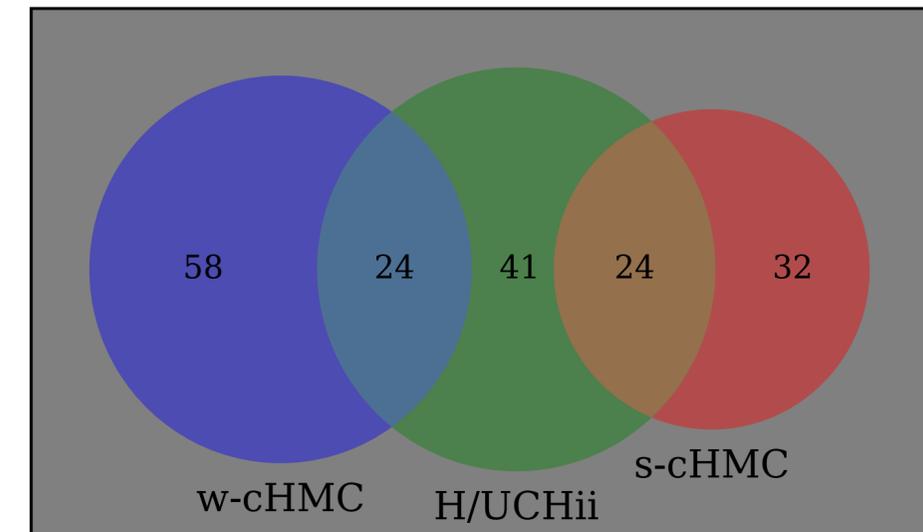


Fig. 5 それぞれのコアの数を表したベン図

Membership of Stars in Open Clusters using Random Forest with Gaia Data

Md Mahmudunnobe, Priya Hasan, Mudasir Raja, S N Hasan ★ Membership of stars in open clusters is one of the most crucial parameters in studies of star clusters. Gaia opened a new window in the estimation of membership because of its unprecedented 6-D data. In the present study, we used published membership data of nine open star clusters as a training set to find new members from Gaia DR2 data using a supervised random forest model with a precision of around 90%. The number of new members found is often double the published number. Membership probability of a larger sample of stars in clusters is a major benefit in determination of cluster parameters like distance, extinction and mass functions. We also found members in the outer regions of the cluster and found sub-structures in the clusters studied. The color magnitude diagrams are more populated and enriched by the addition of new members making their study more promising.

- 散開星団において、星の構成は最も重要なパラメータ。
- 機械学習で星の分類を行う。
 - 9つの星団に関する星の構成を学習データにして、Gaia DR2から新しいメンバーを作成した。
- これまでのデータより2倍の数のメンバーを見つけた
- サンプル数の充実は、距離や吸収、質量関数を決定する上でメリットがある。
- クラスターの周りでもメンバーが見つかった
- クラスターの中にsubstructureが見つかった
- カラーマグニチュード図はより一層充実したものに