

新しい高精度シミュレーションが明らかにした星団形成の現場

1. 発表者：

- 藤井 通子 (東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 准教授)
熊本 淳 (研究当時：東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 特任研究員／
現：中京学院大学経営学部経営学科 専任講師)
島尻 芳人 (研究当時：国立天文台アルマプロジェクト 特任准教授／
現：九州共立大学共通教育センター 教授)
服部 公平 (国立天文台研究力強化戦略室／統計数理研究所統計思考院 助教)
平居 悠 (東北大学大学院理学研究科天文学専攻 日本学術振興会 特別研究員・CPD)
齋藤 貴之 (神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 准教授)

2. 発表のポイント：

- ◆ オリオン大星雲の中心部にある星団（注1）から互いの重力による加速で弾き出された大質量星が、オリオン大星雲の電離領域（注2）の形成のきっかけとなった可能性を、スーパーコンピュータを用いた数値シミュレーションと観測データから示した。
- ◆ 星団内の星の重力による運動を従来手法より高精度で解く星団形成シミュレーションコードを新規開発し、それを用いることでオリオン大星雲内の星の運動を再現することができた。
- ◆ 本研究は星一つ一つの運動を追う新しい星団・銀河シミュレーションを行う「SIRIUS」プロジェクトの一環であり、今後はより大規模な星団形成シミュレーションを行い、星団の成り立ちを明らかにしていく。

3. 発表概要：

星は分子雲（注3）という低温で高密度の主に水素分子からなる星間ガスの中で生まれますが、多数の星が近くで同時に生まれると、星団と呼ばれる星の集まりとなります。星団は大質量星（太陽の約8倍以上重い星）を含むことが多く、大質量星が生まれる場所として注目されています。自らの重力によってガスが落ち込んでくるような巨大分子雲で星団や大質量星が生まれ、大質量星はやがて星の原料となる分子ガスを電離し、吹き飛ばし、星形成を終わらせます。オリオン大星雲は、このような過程が今まさに起こっている現場だと考えられています（図1）。

星団形成の様子は、近年、スーパーコンピュータを用いた数値シミュレーションによって解析が進められています。数値シミュレーションは、天体现象の時間進化を理解する上で重要な手法ですが、現在のスーパーコンピュータで行うことができる数値シミュレーションの正確さには限界があります。

東京大学大学院理学系研究科の藤井通子准教授らは、独自に開発したシミュレーション手法を用い、これまでより星の運動を正確に解いた星団形成シミュレーションを行いました。その結果、星同士の重力相互作用によって大質量星が星団の中心から外縁部へと弾き出される時に、星団中心部分に集まる密度の高い分子雲の一方に穴を開け、星団の中心から一方向に広がる電離領域が作られました。また、ガイア衛星（注4）の観測データとの比較により、オリオン大星雲の大質量星の運動が、シミュレーションから予測されるものと一致していることを示しました。

本研究は「SIRIUS」プロジェクトの一環として、国立天文台の天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイ II」（注5）を用いて行われました。今後は、この新規開発コードを用いたより大規模なシミュレーションを行い、未だ形成過程の解明されていない大質量星団の形成過程を明らかにしていくことが期待されます。

4. 発表内容：

研究の背景

星は分子雲（注3）という低温で高密度の主に水素分子からなる星間ガス（分子ガス）の中で生まれます。分子雲の中でも特に自らの重力によってガスが落ち込んでくるような巨大分子雲では、星団と呼ばれる星の集団や太陽の約8倍以上の質量を持つ大質量星が生まれると考えられています。星団は、初めは分子雲の中に埋もれています。しかし、星団の中で大質量星は、やがて星の原料となる分子ガスを電離し、吹き飛ばし、星形成を終わらせます。そのため、大質量星が生まれる場所として星団は注目されています。オリオン大星雲は、このような過程が今まさに起こっている現場だと考えられています（図1a）。

オリオン大星雲は複数の大質量星を含む星団を持ち、私たちから見て星団の奥側にはまだ分子雲が残って星形成を続けているものの、手前側は大質量星によって電離された電離領域が広がっています。また、地球から比較的近い距離にある星団であるため、その構造がよく調べられています。これまで、オリオン大星雲では、星団の中心にある最も重い星 $\theta 1$ Ori C が手前側の大きな電離領域を作っていると考えられていました。一方、近年の分子雲に埋もれた星団をモデル化した数値シミュレーションによる研究で、星団中心では分子ガスの密度が高く、大質量星が生まれてもすぐには大きく広がる電離領域を作れないが、大質量星の星団内での運動を正しく取り入れると、オリオン大星雲で見られるような、星団の外側に大きく広がる電離領域を作る可能性があることがわかってきました。

しかし、分子雲の中で星が徐々に作られていく星団形成シミュレーションで、このような過程が検証されたことはありませんでした。これまでの星団形成シミュレーションでは、星の軌道の計算において、近接遭遇した星の間に働く重力を実際より弱めて計算することで、計算コストを抑える手法が用いられてきました。このようなシミュレーションでは、中心からの星の弾き出しの様子をとらえることができませんでした。

研究内容

本研究では、東京大学、神戸大学他で新しい星団形成シミュレーションコード「ASURA+BRIDGE」を開発しました。このコードでは、星間ガスと星を一定時間の間分けて、異なる積分法で積分することによって、星間ガスが作る重力場の中での星の運動を、近接遭遇時に重力を弱める仮定を使わず高速に計算できるようになりました。

「ASURA+BRIDGE」を用いた星団形成シミュレーションで形成された星団（図3）と、オリオン大星雲の中心部にある星団の星の空間分布、速度分布を比較しました。オリオン大星雲の星団は、地球から最も近い星団の一つで、個々の星の質量や位置や運動、星間ガスの分布がよく観測されています。そのため、シミュレーションとの詳細な比較が可能です。

その結果、オリオン大星雲にある大質量星の速度分布は、星団形成シミュレーションで示されたような、星団中心から弾き出された星と同じ分布をしていることがわかりました（図2）。これは、大質量星は星団の中心部、つまり、星の材料となる低温・高密度の分子ガスが多く存在する場所で生まれ、星同士の重力相互作用によって中心部から弾き出されていることを示しています。

実際、オリオン大星雲では中心から少し離れた場所に大質量星が存在しています。位置天文学衛星ガイア（注4）のデータとシミュレーションの結果から、 $\theta 2$ Ori A という星は、50万年程前に星団中心から弾き出され、今は、星団中心に戻っていく途中であると推定できました（図1b）。また、NU Ori（図1a上部）も星団中心部から弾き出された星とみられる運動をしていることもわかりました。

このような星団中心から弾き出された星は、星団外縁部の分子ガスを電離し、星団を中心としない電離領域の形成に寄与します。オリオン大星雲では観測者から見て手前側に電離領域が開い

ている一方、奥側にはまだ分子雲が存在し、星形成を続けています。星団の中心部、分子雲の密度が高い部分で生まれた大質量星は、まず、星団の中心に小さな電離領域を作ります（図4）。大質量星が星団の外縁部を電離するためには、この中心を覆う分厚い分子雲に穴を開ける必要があります。今回のシミュレーションでは、星団中心で生まれた大質量星が、観測者から見て手前方向に飛び出した際に、中心部の高密度の分子雲に穴を開け、オリオン大星雲のように手前側に広がる電離領域を作る様子が見られました（図4）。これは、オリオン大星雲のような星団形成領域の電離の過程において、大質量星の運動が重要であることを示しています。

将来の展望

本研究のシミュレーションで再現されたオリオン大星雲の星団は、星団の中でも中規模の星団であり、より多くの星を含む大質量星団の形成過程については、まだ誰も星一つ一つの運動を再現したシミュレーションに成功していません。本研究で開発されたシミュレーションコード「ASURA+BRIDGE」は、より大規模なシミュレーションにも対応しており、オリオン大星雲の10倍、100倍の星を含む大質量星団の形成シミュレーションも可能です。本研究は、星団のみならず、より多くの星を含む銀河までも個々の星まで再現してシミュレーションする「SIRIUSプロジェクト」の一環として、国立天文台の天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイ II」（注5）を用いて行われました。今後は、より大規模なシミュレーションを行い、大質量星団や銀河の形成過程と、その中で大質量星の果たす役割を明らかにしていくことが期待されます。

SIRIUS プロジェクト

<https://sites.google.com/g.ecc.u-tokyo.ac.jp/sirius-project/>

本研究は、科研費「銀河シミュレーションで探る星団起源ブラックホール連星の宇宙史（課題番号：19H01933）」、「球状星団の元素組成異常の起源の解明（課題番号：21K03614）」他（課題番号：20K14532, 21J00153, 21K03633, 21H04499）の支援により実施されました。また、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」（JPMXP1020200109）および計算基礎科学連携拠点（JICFuS）の一環として実施されたものです。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*」

論文タイトル：SIRIUS Project. V. Formation of off-center ionized bubbles associated with Orion Nebula Cluster

著者：Michiko S. Fujii*, Kohei Hattori, Long Wang, Yutaka Hirai, Jun Kumamoto, Yoshito Shimajiri, Takayuki R. Saitoh

DOI 番号：10.1093/mnras/stac808

6. 注意事項：

日本時間 6月8日（水）午前9時1分（協定世界時（UTC）：6月8日（水）午前0時1分）以前の公表は禁じられています。

7. 問い合わせ先：

（研究に関すること）

東京大学大学院理学系研究科 天文学専攻

准教授 藤井 通子（ふじい みちこ）

TEL：03-5841-1030 E-mail：fujii@astron.s.u-tokyo.ac.jp

東北大学大学院理学研究科 天文学専攻
研究員 平居 悠 (ひらい ゆたか)
TEL : 022-795-6607 E-mail : yutaka.hirai@astr.tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室
TEL : 03-5841-0654 E-mail : kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 統計数理研究所 運営企画本部企画室
URA ステーション
TEL : 050-5533-8500 (代表) E-mail : ask-ura@ism.ac.jp

国立天文台 天文情報センター
センター長・広報室長 山岡 均
TEL : 090-1257-7980 E-mail: hitoshi.yamaoka@nao.ac.jp

東北大学大学院理学研究科・理学部 広報・アウトリーチ支援室
TEL : 022-795-6708 E-mail : sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp

神戸大学総務部広報課
TEL : 078-803-5453 E-mail : ppr-kouhoushitsu@office.kobe-u.ac.jp

8. 用語解説：

(注1) 星団：数十から数百万個の星が互いの重力で束縛されて集まっている天体。

(注2) 電離領域：大質量星から放出された多量の電離光子（紫外線領域の光子）によって、星間ガスの主成分である水素が電離されている領域。図1の写真で、赤～ピンクの明るい部分。

(注3) 分子雲：主に水素分子からなる低温で高密度の星間ガス。分子雲の中で新しい恒星が生まれる。

(注4) ガイア衛星：星の正確な位置や速度を測ることを目的とし、2013年にヨーロッパ宇宙機関によって打ち上げられた観測機。現在、18億個以上の星について、観測データを公開している。地球を周回せずラグランジュ点で観測を行うため厳密には衛星ではないが、ここでは便宜上衛星と呼ぶことにする。

(注5) アテルイII：国立天文台が運用するシミュレーション天文学専用のスーパーコンピュータ（Cray XC50）。岩手県奥州市の国立天文台水沢キャンパスに設置され、天文学専用機として世界最速の理論演算性能 3.087 ペタフロップス（1秒間に浮動小数点計算を 3000 兆回行う）ほこる。

9. 添付資料：

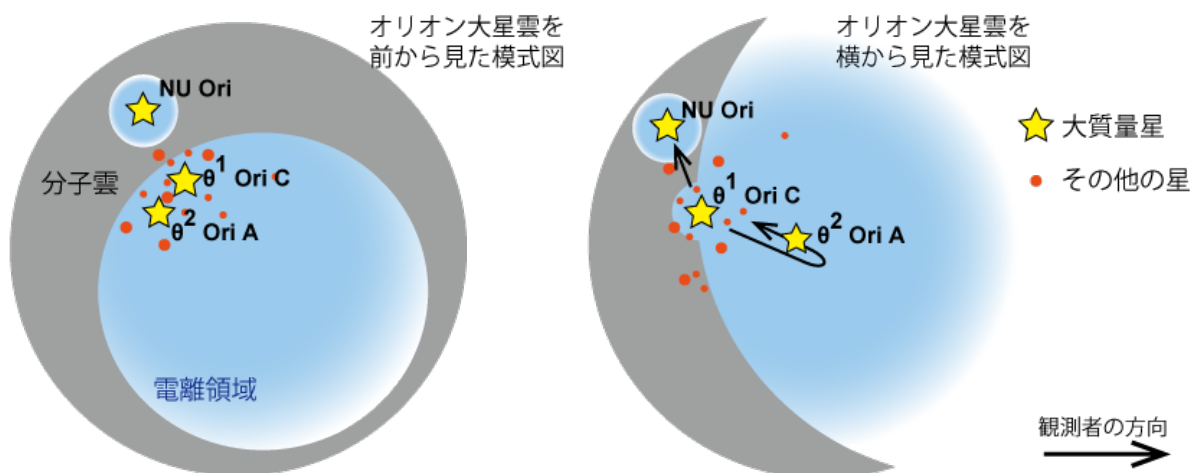
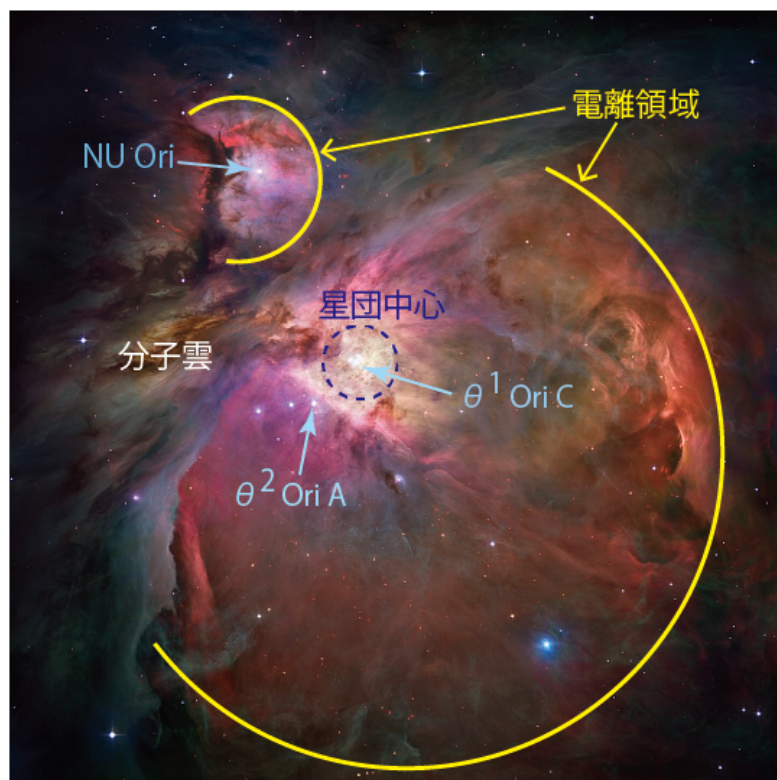


図1：a) オリオン大星雲。θ1 Ori C はオリオン大星雲で最も大質量で明るい星であり、星団の中心部に存在する。NU Ori と θ2 Ori A も大質量星であり、図2のように、重力相互作用によって星団中心から弾き出された星であると考えられる。黄色で囲われた赤～ピンクの部分は高温の電離水素で満たされた電離領域である。一方、星団の左上の黒っぽい部分は、低温の水素分子ガスが集まっている領域（分子雲）である。分子雲の中では、新しい星が生まれつつある。（画像クレジット：NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team を改変）

b) オリオン大星雲の構造の模式図（左：図1aのように正面から見た図、右：断面の予想図）。観測者から見て星団の奥側に分子雲があり、手前側に電離領域が広がっている。θ2 Ori A は星団手前の電離領域の中、NU Ori は星団より奥の分子雲の中に半分埋もれている。

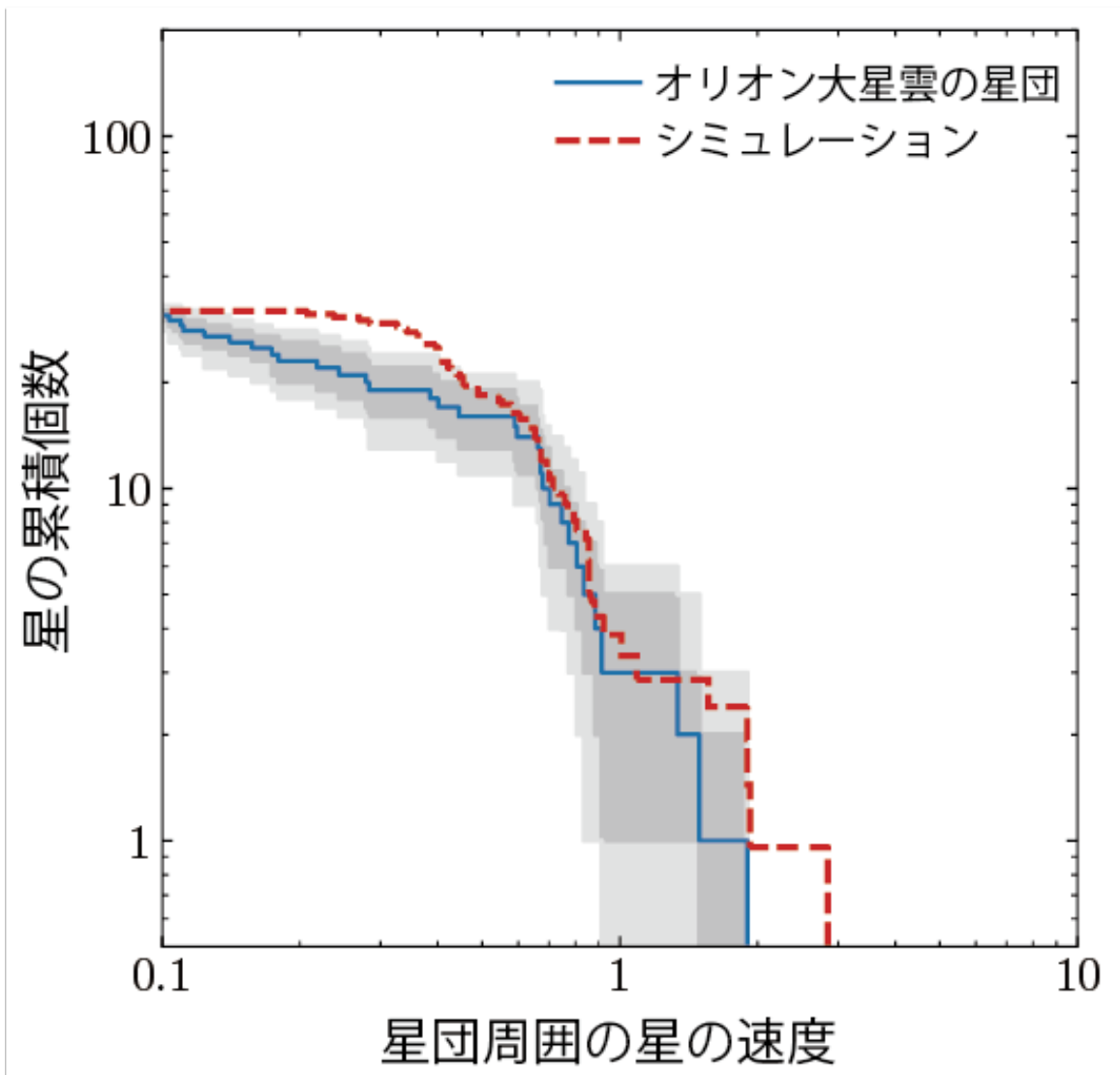


図 2：星団から 5pc（約 16 光年）以内にあり、太陽の約 2 倍以上の質量を持つ星の速度分布。星の速度は、星団の重力に束縛されないために必要な速度を 1 としている。赤破線はシミュレーションで形成された星団、青線はオリオン大星雲内の星団。灰色の領域は観測された速度分布の不確かさの範囲を示す（ブートストラップ法という統計手法を用いて推定）。速度が 1 より大きい星は、星団中心から弾き出された可能性の高い星、1 より小さい星は星団に重力的に束縛されている星である。



図3：シミュレーションによって描き出された形成途中の星団。青白い点は星を、赤～緑色の領域はガスを表している。低温のガスを赤色に、高温のガスを緑色に色付けしている。（画像クレジット：藤井通子、武田隆顕、国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト）

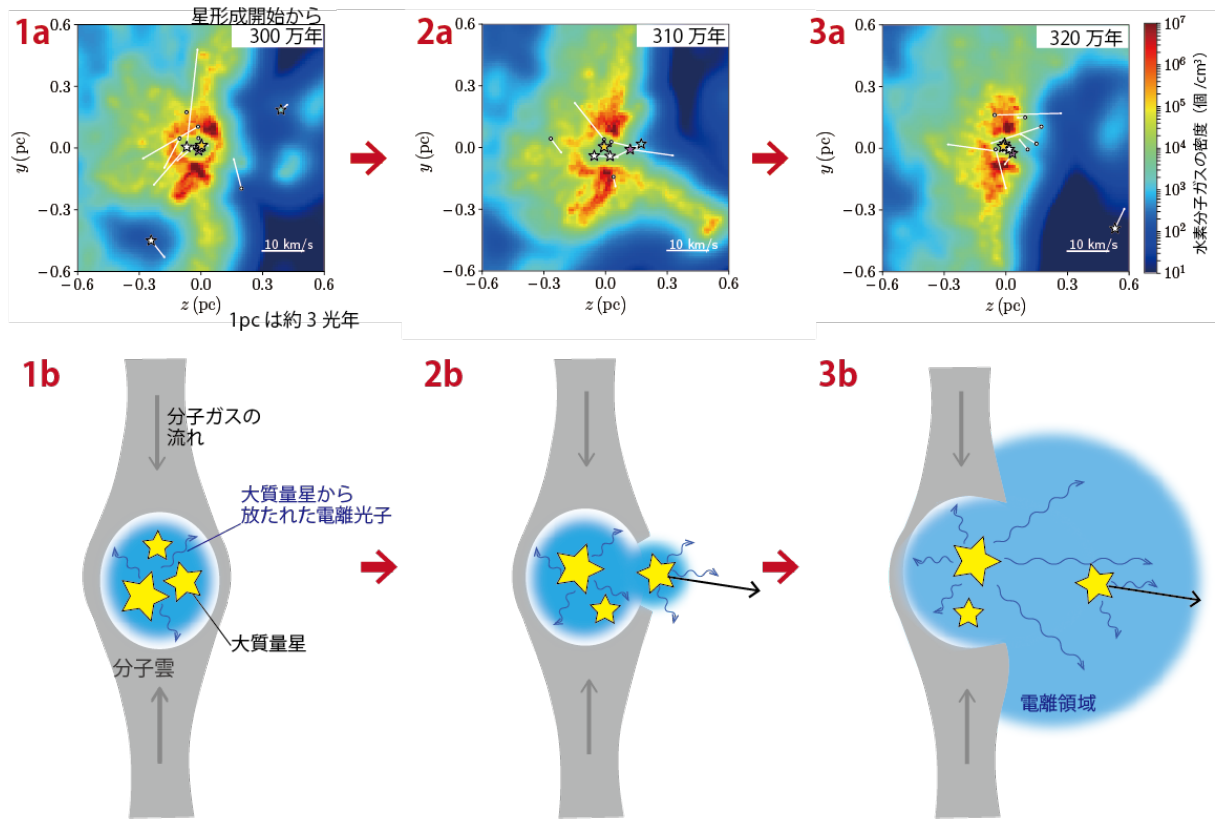


図4：シミュレーションで再現された星団の中心部の断面図（上段）とオリオン大星雲の中心領域の断面の模式図（下段）。右側が観測者側。a→b→cの順に時間が進む。）星印は大質量星を示し、矢印（上段：白、下段黒）は星の進む向きを示す。星団中心から右側に大質量星が飛び出す時に、星団中心付近を覆っていた分子雲に穴が開き、右側方向に電離領域が広がる。