

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	猪口 睦子
論文題目	Star cluster formation and molecular cloud destruction caused by radiative feedback (星団形成と輻射フィードバックによる分子雲破壊)		
(論文内容の要旨)			
<p>分子雲中の星形成効率が何によって決まるのかを明らかにすることは、星形成研究における重要課題の一つである。しかし、近傍銀河の観測から示唆される低い星形成効率 (~数%) がなぜ実現しているのか十分な理解が得られていない。いくつか物理過程の候補がある中で、分子雲内で形成された大質量星が発する電離光によるフィードバック効果が重要視されている。それに加え、星が発する解離光によるガス加熱も星形成抑制に寄与すると考えられる。解離光は星にならずに残っているガスの化学組成にも影響を与えるため、その影響を考えることは星間物質の循環の観点からも重要である。しかし電離光と解離光を共に考慮した理論研究は未だ不十分であり、解離光がどれほど星形成抑制に寄与するのか、そして星にならなかったガスがいかにして次の星形成につながっていくのか、といった課題解明には、これまでほとんど手付かずとなっていた。</p> <p>申請者は光電離と光解離のフィードバックを両方とも考慮した上で電離領域のダイナミクスおよび外側の温度・化学構造を解く球対称一次元準解析的コードを作成し、分子雲の星形成効率および分子雲残骸の化学組成を計算した。様々な質量・面密度を持つ分子雲について幅広くパラメータをとり、ダスト光電加熱をも考慮して星形成効率決定法の再検討を行ったところ、$10^5 M_{\odot}$よりも大質量、かつ面密度が小さめの分子雲においては、星形成効率が光電離のみを考慮した見積もりよりファクター2程度小さくなることが示唆された。また、分子雲の面密度が高いほど ($> 100 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$) CO分子が壊されやすく、分子雲の質量を変えても同様の傾向が見られることが分かった (第2章)。</p> <p>この一次元準解析的モデルは星形成効率をよく説明するものの、球対称な分子雲構造や、星団形成が瞬時に起こることを仮定しており、現実的な系の時間進化を追うことは困難である。観測を理解するためには3次元輻射流体シミュレーションが必要となる。そこで申請者はFukushima & Yajima (2021)に注目した。彼らは、球状星団に匹敵する若い大質量星団 (YMC) の形成条件を調べることを目的に光電離・光解離フィードバックを考慮した星団形成シミュレーションを行っている。申請者は彼らの結果を用いて、YMC 形成途上の分子雲がどのような観測的特徴を示すかを調べた。同じ質量 $10^6 M_{\odot}$ をもつ分子雲のうち、YMCが形成される面密度 $400 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ の場合と、されない面密度 $100 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ の場合のシミュレーションデータを取りあげ、両者を比較した。両者の違いは活発な星形成が $1.5 t_{\text{ff}}$ (t_{ff}は自由落下時間) 経過後も持続するか否かにあるが、観測で両者を区別できるか、自明ではない。そこで [CII] や [OI] 等の輝線強度分布や、星団前面にある分子ガスの視線速度分布を計算し、両者を比較したところ、電離領域へ向かう分子ガスの落下運動と、強く中心集中した [CII] 等の輝線放射分布が YMC 形成時の観測的特徴であることが分かった (第3章)。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

銀河がどのように進化して現在の姿になったのか、それを解明することは現代天文学最大の課題の一つである。そしてその解明には、恒星がどう生まれるかという星形成過程の理解がベースとなる。本申請論文はこの基本的課題に関わるもので、ことに星形成過程における解離光の影響を、シンプルなモデルおよび輻射流体シミュレーションデータを用いて明らかにしたところに、大きな意義が認められる。

さて恒星は「分子雲の中で特に密度が高いところが重力収縮してできる」という描像はすでに20世紀半ばには確立していたのだが、そうした単純な描像だと星形成率は、分子雲質量を収縮時間(～自由落下時間)で割った値になるはずである。しかしながら、天の川銀河の星形成率は、その単純な見積もりの数%しかない。何か、星形成を抑制するメカニズムがあるはずである。一体、何が星形成率を決めているのか、さまざまな説が提唱された。中でも大質量星からの電離光がガスを電離して星形成(効率)を抑制する(フィードバック)という説は有力であり、実際、そのような研究はすでに行われている。しかし、電離光よりエネルギーの低い解離光は何も影響を与えないのか、やはりガスを温めてフィードバックに寄与するのではないか。それだけでなく分子ガスの化学組成にも大きな影響を与えるのではないか。これらの点にスポットライトをあてた本論文は、その着眼点の良さが光っている。

解離光の影響を調べるため、申請者は一次元球対称というシンプルなモデルをたて、光電離と光解離の両方のフィードバック効果を吟味すべく、コードを開発した。電離領域のダイナミクスを与えて、その外側の温度・化学構造を解く準解析的コードである。そして分子雲質量と面密度をパラメータに、中心に置いた星団からの光による周囲への影響の時間進化を丁寧に計算し、星形成効率および分子雲残骸の化学組成を求めた。その結果、 $10^5 M_{\odot}$ よりも大質量の分子雲においては、星形成効率が光電離のみを考慮した見積もりよりファクター2程度小さくなることを見いだした。また、分子雲の面密度が高いケースでは、COは壊され、COが暗い分子雲が存在することを示した。これは観測面への示唆は極めて大きい。というのも、 H_2 量を直接測定することが困難なため、多くの観測家はCOガス量を観測して、そこから H_2 ガスの量を推定しているからである。この結果は本論文の大きな成果として高く評価できよう。

とはいうものの、球対称な分子雲形状という仮定、及び初期条件として星団が瞬時に中心に誕生しその後は生まれないとする単純化はあまり現実的とはいえない。星形成効率のフィードバック効果の評価には適していても、分子雲はどのように進化し、いかに星団は誕生するか、という問いに答えるのは困難であり、観測との比較に堪えうる分子雲進化を論じることには向かない。3次元輻射流体シミュレーションデータが必要となるのである。

そこで申請者は光電離・光解離フィードバックを考慮した星団形成シミュレーションを行っているFukushima & Yajima (2021) に注目した。そこで申請者は彼らのシミュレーションデータを用いて、若い大質量星団(YMC)形成途上の分子雲がどのような観測的特徴を示すかを調べた。Fukushima & Yajima (2021) の計算例では雲質量を $10^6 M_{\odot}$ に固定すると、面密度 $400 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ の場合はYMCが形成され、

面密度 $100 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ の場合は形成されない。もちろん、シミュレーションデータを見ればこれは将来YMCが形成されるケースなのか否か、答えが分かるのであるが、観測からそれを判断するには、スナップショットをみて両者がどう区別されるかである。申請者はその観点でシミュレーションデータを「疑似観測」し、さまざまな観測量を計算してみた。その結果、[CII] や [OI] 等の輝線強度分布や、星団前面にある分子ガスの視線速度分布に、両者を区別する特徴を見いだした。それぞれ、[CII] 等の輝線放射の中心集中、電離領域へ向かう分子ガスの運動である。定量的精緻化は今後の課題ではあるが、観測面に示唆が大きく、今後のさらなる発展が十分期待できる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年1月14日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： _____ 年 _____ 月 _____ 日以降