

氏 名 池田 紀夫

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1032 号

学位授与の日付 平成 19 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Dense Core Survey Toward Nearby Massive Star and
Cluster Forming Giant Molecular Clouds: Origin of the
Initial Mass Function

論文審査委員 主 査 助教授 田村 元秀
教授 小林 行泰
教授 坪井 昌人
助教授 立松 健一
教授 百瀬 宗武（茨城大学）

On the study of the formation of stars, the origin of the initial mass function (IMF) is one of the most important issues because stars are characterized by their masses. The IMF has distinct features such as the power-law form in the high-mass part above $1 M_{\odot}$, of which the power-law index seems not to vary over various environments, and a characteristic mass at slightly below $1 M_{\odot}$. Since these features are thought to be determined in the very early stage of star formation and molecular cloud cores are likely to be birthplaces of stars, one of the promising ways to investigate the origin of the features is studying molecular cloud core mass function (CMF). To derive statistically reliable CMFs enough to compare with the IMF, we need unbiased and uniform dense core catalogs, especially in giant molecular clouds (GMCs), where the most of stars are formed, in order to understand the star formation of the majority of stars.

We have carried out $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=1-0)$ core unbiased surveys in the nearby massive star- and cluster-forming GMCs Orion A, Orion B, and Cepheus OB3. Our observations were carried out using the Nobeyama 45 m radio telescope with the 25-Beam Array Receiver System (BEARS). Our surveys are very unique in that large areas (1.4–1.5 square degrees) of the clouds were covered with very high spatial resolutions of 21–27", enough to resolve dense cores, and with deep integration ($1 \sigma \sim 0.1 \text{ K in } \tau_{\text{a}}$), resulting in the sensitive mass detection of 1.6–3.5 M_{\odot} for dense cores in the clouds. These observational advantages allow us to derive reliable CMFs with a good statistics of sample number $\sim 30\text{--}240$ and a wide-mass range of $2 < M/M_{\odot} < 100$.

The morphology of the $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=1-0)$ emission in the Orion A and B is very similar to that of the dust continuum emission. In addition, our observation of the Cepheus cloud is the first unbiased one of the dense gas with such a high spatial resolution. We identified 236, 98, and 31 dense cores from our data with the clumpfind algorithm in the Orion A, B, and Cepheus OB3, respectively. All the cores seem to be almost in virial equilibrium independently of whether the cores are thermal or turbulent. Furthermore, the majority of the cores in the three clouds has very similar distributions of the physical parameters. This suggests that the most of the cores are the common ones, while there are a few peculiar cores whose velocity widths and radii are larger than 1 km s^{-1} and 0.14 pc , respectively. We derived the H^{13}CO^+ CMFs of the clouds and found that these are consistent with those by previous studies in the sense of their power-law indices in the high-mass part of $(-2.1)\text{--}(-2.4)$ and the existence of turnovers near $5\text{--}20 M_{\odot}$.

We show that the dust CMF can be produced from the H^{13}CO^+ CMF assuming that the dust cores correspond to the inner denser ($>10^6 \text{ cm}^{-3}$) structures of the H^{13}CO^+ ones and the core density profile which is proportional to R^{-2} . Furthermore we predicted IMFs from the H^{13}CO^+ CMFs in the three clouds assuming that all the cores form stars simultaneously and the star formation efficiency is uniform over the cores. We also considered binary formations assuming that the core multiplicity is uniform over the cores. We found that the high-mass part power-law slope of the predicted IMFs

agree well with that of the Orion Nebula Cluster IMF and of the Galactic-field averaged IMF for a star formation efficiency of $\sim 25\text{-}50\%$. These findings suggest that the IMF is determined at the time of the H^{13}CO^+ core (the density of $\sim 10^{4.5}\text{ cm}^{-3}$ or less) formation, rather than that of the dust cores of $> 10^6\text{ cm}^{-3}$.

On the other hand, the predicted IMFs seem to have less number of stars considerably in the low-mass part below $2M_{\odot}$, resulted from the turnover of the CMFs. As one of the possible causes of the CMF turnover, we modeled confusion along the line of sight, mainly due to the shadowing of low-mass cores caused by massive ones. The shadowing-corrected predicted IMFs agree well with the IMFs. We found that the shadowing-corrected CMFs do not have turnovers, suggesting that the apparent turnovers in the observed CMFs may not correspond to those of the IMFs. On the other hand, the power-law indices of the shadowing-corrected IMFs are very similar to each other although the three clouds have apparent difference in star-forming activities. This implies a common core formation processes that is insensitive to environmental parameters, leading to the origin of the universality of the IMF.

We discovered four cores with large velocity widths, significantly wider than those of the other cores, only toward the M42 H II region and the Cep A compact H II region. The finding of the large-velocity width cores suggests that the energy input from the H II regions increases the velocity width. Since the large-velocity width cores can produce the most massive stars owing to their large mass accretion rates, the massive star formations in the Orion A and Cepheus OB3 clouds are likely to be caused by the environmental stellar activities. This may imply that the IMF have additional turnover at the high-mass end, although the statistical uncertainties of the observed IMF are too large to recognize the turnover. In the Orion B, on the other hand, there is no core with large velocity width significantly. One of the explanations is that stellar activities in the Orion B cloud, in which the most earliest star is O8, are less energetic than those of O6 and O7 in the Orion A and Cepheus clouds, respectively. This may indicate that stellar energy sources earlier than O7-O6 are required to influence the most massive stars of the next generation.

We conclude that the IMF originates from the CMF. It implies that investigating the CMF formation processes is equivalent to revealing the origin of the IMF. We tested the proposed core formation processes such as gravitational fragmentation, collision and coalescence, accretion, and turbulent fragmentation based on our core catalog. We conclude that the turbulent fragmentation is the most plausible one of them.

論文の審査結果の要旨

星の初期質量関数 (Initial Mass Function; IMF)、すなわち、星の質量の個数分布の研究、および、星の質量の決定原因の解明は星形成の最も重要な課題のひとつである。さらに、IMFの理解は、単に恒星研究の興味にとどまらず、銀河形成・宇宙論の研究にとっても不可欠である。IMFの決定は、1950年代からのフィールド星を用いた先駆的研究から、最近の赤外線による若い星団を用いた研究などにより進んで来たが、その起源に迫るには、星の前段階である分子雲コアの形成に迫ることが求められる。出願者の博士論文は、星のIMFの起源が、星形成の前段階と考えられる高密度分子雲コアの質量分布 (Core Mass Function; CMF) にあるという動機のもとに行われた。

そのために、出願者は野辺山45m電波望遠鏡を用いて、大規模かつ高解像度の H^{13}CO^+ 分子輝線サーベイを行い、従来に無い多数の高密度分子雲コアを同定し、カタログとしてまとめ、さらに、その質量分布 (CMF) を求めた。サーベイは共同研究者との共同プロジェクトであるが、出願者は観測から解析・議論に至るまで、中心となって本研究を進めた。その結果得られた具体的な科学的成果としては、(1) 近傍の大中質量星形成領域である、オリオンA分子雲、オリオンB分子雲、および、ケフェウスOB2分子雲において、 H^{13}CO^+ という高密度トレーサーを用いて求めたCMFのスロープが一定であること、および、環境に依らないことを示した。得られたCMFのスロープは星のIMFのスロープとほぼ一致する。これは、CMFを求めた最初の観測では無いが、質・量ともに過去の観測を凌駕し、初めて複数の領域に対し、同じ分子種・同じ手法でCMFを求め、統計的な議論の礎となるデータを与えた。(2) オリオン分子雲において、分子をトレーサーとしたCMFと、従来の観測で得られているサブミリ波観測によるダストのCMFとが矛盾しないことを示した。(3) 全てのコアが一定の星形成効率および一定の連星率で星を形成するという仮定のもとで、CMFからIMFを推定し、それが星のIMFの観測結果と矛盾しないことを導いた。その結果として、IMFの決定時期が H^{13}CO^+ 分子の形成時期 (約 10^5cm^{-3}) の頃、あるいは、それ以前であることを示した。(4) 約10太陽質量程度におけるCMFの折れ曲がり、コア同士の重なりという観測的効果で説明できることを初めて示し、それをモデル化した。また、その効果を補正したIMFを推定した。その結果、得られたIMFのスロープは、乱流が支配する分子雲の分裂モデルで説明できることを示した。さらに、(5) 速度分散の大きいコアの検出から、IMFの大質量星側にも折れ曲がりがある可能性を示唆した。

以上のように、出願者の研究成果は、初期質量関数と高密度分子雲コア質量関数との密接な関係を、従来に無い多数のコアに基づく統計から明らかにしたものであり、星の質量の起源を理解する上で非常に重要な観測的知見をもたらしたことは高く評価できる。

審査委員全員の出席のもと、公開の論文発表会を行った。まず、出願者による論文内容の口頭発表を40分間行い、引き続き審査委員および一般聴講者による質疑応答を約20分、また審査員だけによる質疑応答をさらに約45分行った。

出願者は、研究の背景、目的・意義、観測手法や独自性・独創性、また研究結果の要点

と新たな知見、その重要性などについて、的確に説明した。質疑応答も満足の行くものであった。

その後、審査員のみによる審議を行い、その結果、論文の科学的な価値が十分に認められること、投稿中の英文学術論文についても、出願者の寄与によるものが大きいこと、を確認することができた。さらに出願者の天文学に関する学識や力量も十分であることを認識し、また論文が適正な英文で書かれていることから、語学力についても問題ないことを確認した。

以上の試験の結果、出願者は天文科学において、博士（理学）の学位を受けるに相応しい力量を持つものと認め、審査員全員一致により合格と判定した。