

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	福島 肇
論文題目	Radiative feedback from massive stars in low-metallicity environments		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>申請者は、初期宇宙で実現されると考えられる金属(重元素)量の少ない環境において、大質量星の及ぼす輻射フィードバックが金属量の大小によっていかに異なる効果を及ぼすかを理論的考察によって明らかにした。</p> <p>太陽の10倍以上の質量を持つ恒星は大質量星と呼ばれ、大光度で輝くために自身および周囲の星形成過程に大きく影響する(輻射フィードバック効果)。近傍宇宙ではその様子は観測から明らかであるが、一方で初期宇宙では未知な点が多い。にもかかわらず、その重要性はさらに大きなものと考えられている。誕生する星の典型質量が銀河系よりも大幅に大きいものと理論的に予言されているからである。</p> <p>星形成環境を特徴づけるのは星の材料となるガス中に含まれる金属量である。全宇宙の平均を考えると金属量は宇宙年齢をかけて少しずつ増加してきたと考えられるため、この量をパラメータとして宇宙全史に渡っての大質量星によるフィードバック効果を系統的に考えることができる。申請者は、まさにこのようなアイデアに基づいて以下の2つの異なる局面におけるフィードバック効果を調べた。</p> <p>[I] 大質量星形成時における輻射フィードバック効果</p> <p>星形成では最終的にどれほどの質量を持つ星が誕生するのかが特に重要である。そして、これは原始星へのガス降着がいつまで継続するかによって決定される。原始星光度は質量が増すとともに急激に増加するので、星からの輻射フィードバックが降着を止め得る。こうして星の最終質量が定まる。申請者はまず球対称定常を仮定してこの問題をモデル化した。原始星が出す放射が周囲のガス中をどのように伝播していくかは、振動数依存性のある輻射輸送方程式を解くことによって厳密に考慮した。最も強いフィードバックを及ぼす過程は金属量に依存し、太陽の1/100以上の金属量ではガス中に含まれるダストにはたらく輻射圧、それ以下では原始星周囲に形成される光電離領域のガス圧の効果が支配的になる。輻射輸送計算の結果、星形成時の放射スペクトルを初めて定量的に与え、金属量に応じて異なる特徴が現れることを予言した。</p> <p>さらに研究を拡張して、申請者は球対称定常の仮定を外した2次元軸対称での動的数値シミュレーションを行った。この設定ではガス雲に有限の角運動量を加えると、原始星周囲に降着円盤が形成される。フィードバック強度はこの影響を受けるが、金属量に依って支配的な過程が変わるため、状況に応じて定性的に全く逆の効果があることを明らかにした。すなわち、太陽の1/100以上の金属量では輻射圧が支配的で、このとき円盤があるとその影にある降着ガスは輻射から守られてフィードバック効果は弱まる。そのため、より質量の大きな星まで成長できる。一方で、太陽の1/100以下の金属量では電離領域のガス圧が効くが、円盤降着では逆に密度の低い極方向へ電離領域が成長しやすくなる。その結果、フィードバックが強化されて星質量は低下する。全体として、フィードバック強度の金属量依存性は球対称を仮定した見積もりよりは弱いことを示した。</p>			

[II] 星形成ガス雲への輻射フィードバック効果：ダストの選択的排出

誕生した大質量星からの輻射フィードバックは母体となった星形成ガス雲全体の構造にも影響する。僅かに重元素を含むガス雲からは、大質量星に加えて太陽質量を切るような低質量星も誕生し得る。低質量星形成が可能になるためにはガス雲中に含まれるダスト量が重要と言われている。ダストは熱放射により効率的にエネルギーを系から逃し、ガス雲の分裂を引き起こすからである。申請者は大質量星が内部に存在するような低金属のガス雲を考え、この雲中でのダストの運動をモデル化した。特に着目したのはダスト粒子が大質量星からの輻射圧を受けて加速され、ガス粒子との衝突による摩擦に打ち勝って雲から選択的に排出されてしまうケースである。申請者は解析的にこの過程が働くための条件を見積もり、金属量が太陽の1/100以下の環境では自然と起こり得ることを示した。理論的にダスト冷却に伴う低質量星形成が可能になる金属量は太陽の10~100万分の1と言われているが、この効果を考慮すると重元素があったとしてもダスト存在量が相対的に下がることから、必要な金属量はもう少し高くてもよくなる。この傾向は最近の観測的な制限と整合的である。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

初期宇宙における天体形成の研究は、宇宙最初の星、いわゆる初代星の誕生過程の興味から始まり最近多様な展開を見せている。一つの方向として、星形成過程が重元素量の増加とともに宇宙論的な時間をかけてどのように変遷してきたのか、という問題が活発に研究されている。申請者の研究は、このうち大質量星の形成過程と周囲の星形成活動への影響について、特に輻射フィードバックの役割に主に着目した先駆的なものである。

論文の構成は大きく分けて[I]大質量星形成時のフィードバック効果、[II]星形成ガス雲へのフィードバック効果、の2つのトピックに分かれている。[I]では大質量星自身が誕生する際の比較的小スケールでの現象、[II]では大質量星が誕生した後、母体となったガス雲全体に及ぶ比較的大スケールでの現象、という位置づけである。評価すべき点として、まず金属量をパラメータとして多様な星形成環境でのフィードバック効果を系統的に扱っている新規性が挙げられる。この手の研究はこれまで金属量ゼロの初代星形成を対象とした研究と、太陽組成を前提とした銀河系での星形成を対象とした研究が殆ど独立に行われてきた。明らかにこの2分野の間は境界領域として取り残されており、申請者の低金属環境に着目した研究はこの未踏の領域を切り開く取り組みの1つと見なすことができる。

研究の手法は解析的モデル化と詳細な数値計算の両方を目的に応じて併用している。例えば、研究[I]では、まず球対称を仮定した設定で輻射フィードバックに抗して降着可能な限界星質量を見積もっているが、このとき輻射輸送計算を用いた詳細な降着流構造のモデル化とは別に、より簡単化した解析的考察も行い両者を比較した検討を行った。このようにすることで、詳細計算の結果のどの部分にどの効果が効いているのか、詳細計算を行ったことで初めて現れた効果が何なのか、の議論が可能になっている。さらに球対称の仮定を外して軸対称2次元の数値計算に進むことによって、次は多次元性の効果がどこにどのように現れるか、と議論を段階的に積み重ねてある。このような研究スタイルは計算機資源が豊富になった現在、複雑な星形成過程を取り扱う際しばしば軽視されることもあるが、結果の物理的な解釈を与える際には特に有用である。申請者の論文ではこのような姿勢が貫かれており、評価できる点である。

研究[I]に続き、研究[II]では少し視点を変えてより大きなスケールでのフィードバック、特にすでに誕生した大質量星からガス雲中の固体(ダスト)粒子が選択的に排出される可能性について議論されている。これは位置付け的には星形成の枠組みを超えて銀河形成の観点からも重要な効果である。また、論文中で議論されているように、大質量星のフィードバックが周囲の低質量星の形成に影響を与えるという観点も興味深い。この部分の議論は解析的な見積もりに留まっているが、研究[I]で行った手順と同様に、今後段階的により詳細なモデル化に進むことが期待される。

以上まとめると、申請者の研究は最近活発に進展する分野において先駆的な仕事を行ったものであり、その意義は十分評価できる。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た。また、平成31年1月15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