

ニュートン力学における臨界現象

前田秀基、原田知広(早稲田大学理工学研究科)

球対称の自己相似解はニュートン力学でも一般相対論でも広く研究されてきました。ニュートン力学での自己相似解の研究は主に後の星形成につながる原始ガスの重力崩壊に対する現実的な解を求めようという動機で広く行われてきました。ラーソンとペンストンはそれぞれ独立にラーソン・ペンストン解と呼ばれる重力崩壊する等温ガス球殻を表す自己相似解を見つけました[1]。ハンターはハンター(A)-(D)解と呼ばれる同じ物理状況を表す一連の解を見つけ、さらに無限個の自己相似解があることを示しました[2]。

そうするとこれらの自己相似解のうちどの解が一般的な重力崩壊をよく近似するか?という疑問が出てきます。近年の流体力学的な数値シミュレーションやモード解析による安定性の議論の結果ラーソン・ペンストン解が重力崩壊するガス球殻の中心部を最もよく近似する解であることが示されています[3,4]。花輪と中山は球対称摂動に対する安定性をモード解析の手法により調べ、ラーソン・ペンストン解は不安定モードを持たず、ハンター(B),(D)解は不安定モードを持つことを示しました。彼らはハンター(A),(C)解については調べていませんが、ハンター解は不安定で現実的な解ではなく、ラーソン・ペンストン解が現実的な解となりうると結論しています[4]。またオリとピランは内部流体の動径方向速度が音速になる音速点において摂動の一階微分の不連続性が発展するというキンク不安定性について議論し、一様崩壊解がキンク不安定性を持つのに対してラーソン・ペンストン解はキンク不安定性を持たないことを示しました[5]。

私たちはラーソン・ペンストン解、ハンター(A)-(D)解、一様崩壊解の球対称線形摂動に対する安定性を解析しました[6]。その結果、ハンター解は球対称線形摂動に対して、解の密度分布における振動の数と同じ数の不安定モードを持ち、不安定であることがわかりました。一方ラーソン・ペンストン解と一様崩壊解は球対称線形摂動に対して不安定モードを持ちません。しかしキンク不安定性を考えると、一様崩壊解は不安定ですので、これらの解の中ではラーソン・ペンストン解が現実的な等温ガスの重力崩壊を表していると言えます。流体力学的な数値シミュレーションの結果もこのことを後押ししており、一般的な初期分布からの等温ガスの重力崩壊の中心部がラーソン・ペンストン解に収束していくことがわかっています。

また、ハンター(A)解には不安定モードが一つだけ ($| -t |^{-9.4637}$ の依存性: t は $-\infty$ から増加していく) あり、この解が一般相対論において発見された重力崩壊における臨界現象に関係していることがわかりました[7]。繰り込み群の手法で解析された結果、重力崩壊における臨界現象に関する臨界解は不安定モードを一つだけ持ち、スケーリング則に現われるべきはこのモードの固有値の逆数であることがわかっています[8]。一般相対論的ハンター(A)解は臨界解であり、スケーリング則を満たす量は形成されるブラックホールの質量です[9]。ニュートン力学の場合でもハンター(A)解は臨界現象に関係していると思われ、ニュートン力学ではブラックホールが無いために、スケーリング則を満たす量が何であるかはまだ不明ですが、スケーリング則に現われるべきの値 ($\gamma \approx 0.10567$) が得られました。この値は一般相対論の結果のニュートン極限と無矛盾です[9]。スケーリング則を満たす物理量が何であるか知るために、流体力学的な数値シミュレーションをやる必要があります。

参考文献

- [1] M.V. Penston, ApJ **144**, 425 (1969); R.B. Larson, MNRAS **145**, 271 (1969).
- [2] C. Hunter, ApJ **218**, 834 (1977).
- [3] T. Tsunabe and S. Inutsuka, ApJ **526**, 307 (1999); T. Hanawa and T. Matsumoto, PASJ **52**, 241 (2000); T. Hanawa and T. Matsumoto, ApJ **521**, 703 (2000); P.N. Foster and R.A. Chevalier, ApJ **416**, 303 (1993).
- [4] T. Hanawa and K. Nakayama, ApJ **484**, 238 (1997).
- [5] A. Ori and T. Piran, MNRAS **234**, 821 (1988).
- [6] H. Maeda and T. Harada, PRD **64**, 124024 (2001).
- [7] M.W. Choptuik, PRL **70**, 9 (1993); C.R. Evans and J.S. Coleman, PRL **72**, 1782 (1994).
- [8] T. Koike, T. Hara and S. Adachi, PRL **74**, 5170 (1995); D. Maison, Phys. Lett. B **366**, 82 (1996).
- [9] T. Harada and H. Maeda, PRD **63**, 084022 (2001); T. Koike, T. Hara and S. Adachi, PRD **59**, 104008 (1999).