

膨張宇宙背景における重力崩壊の臨界現象

池田 大志 (名古屋大学理学研究科)

Abstract

重力崩壊の臨界現象は Choptuik の発見以降様々な系で発見されてきた。本研究ではこの臨界現象の普遍性に注目して原始ブラックホール (PBH) 形成への応用を念頭に置く。原始ブラックホール (PBH) は宇宙の初期ゆらぎの重力崩壊で形成されるブラックホールである。PBH の数密度は初期宇宙のゆらぎを反映しているため、PBH 形成の普遍的な性質の研究は宇宙論において重要な位置を占めている。本発表ではこうした研究の第一ステップとして shell の崩壊に伴う臨界現象を扱い、それに必要な式とそこで扱う方法を説明していく。

1 Introduction

重力理論における重力崩壊現象は、非線形性の強い現象であり解析が困難な重要な問題である。今回はその中でも 1990 年代に発見された重力崩壊の臨界現象に注目する。重力崩壊における臨界現象は、はじめ球対称ゼロ質量スカラー場の系で Choptuik により発見され [Choptuik (1992)]、その後軸対称真空重力波の重力崩壊 [Abrahams (1993)]、など様々な系で発見された。本発表では臨界現象の基本的な性質を解説したのち、この現象を膨張宇宙背景へ応用することへの意義を述べ最後に今後どのようなモデルで解析していくかを述べる。

2 重力崩壊の臨界現象

重力現象を考える上で系が重力崩壊を起こすか起こさないかの条件を調べることは非常に重要な課題である。ミンコフスキー時空上に十分小さな摂動を与えた時には重力崩壊を起こさず、その摂動は拡散することが知られている。その一方で十分大きな摂動を与えた場合には系は重力崩壊を起こしブラックホールを形成する。このように系に与えた摂動が拡散するか、重力崩壊してブラックホールを形成するかの条件がブラックホールの形成条件であり、直感的には初期に与えた系のエネルギーが大きいほど重力崩壊しやすく形成されるブラックホールの質量が大きくなる。そこで系の初期値を特徴付けるパラメー

タ p (摂動の振幅など) に対して、 $p < p^*$ の時に摂動は拡散し $p > p^*$ の時には重力崩壊しブラックホールを形成するような閾値 p^* が存在することが期待される。Choptuik は球対称ゼロ質量スカラー場の系においてパラメーター p を持つ様々な初期値の時間発展を数値的に計算し、閾値付近 $p \sim p^*$ での系の振る舞いを詳細に調べた。その結果、次に述べる性質を得た。

- 初期値から BH 形成までのある時間間隔において系は自己相似な振る舞いをする。この性質は系の初期値の詳細に依存しない。
- 形成されるブラックホールの質量 M は $M \sim |p - p^*|^\gamma$ のスケーリング則を満たす。スケーリング則のべき γ は初期値の詳細に依存しない。

Choptuik の発見したこれらの性質は、以後様々な系で解析されこうした重力崩壊の臨界現象はゼロ質量スカラー場の系に限らず様々な系が持つ性質であることが明らかになった。

現在では重力崩壊の臨界現象は 2 つのタイプ (type I と type II) があることが知られている。

2.1 type I

type I の臨界現象では、閾値付近 $p \sim p^*$ の初期値を時間発展させると、ある時間間隔で初期値によらない静的な時空を経過する。その後摂動が拡散す

るが、ブラックホールが形成される。形成されるブラックホールの質量は $M \sim M_0 \neq 0$ である。

2.2 type II

type II の臨界現象は、閾値付近 $p \sim p^*$ の初期値を時間発展をさせると、ある時間間隔で初期値によらない自己相似な時空を経過する。その後には摂動が拡散するか、ブラックホールが形成される。形成されるブラックホールの質量は $M \sim |p - p^*|^\gamma$ を満たす。ここで γ は初期値の詳細に依存しない定数である。また自己相似な時空も不連続な自己相似性と連続な自己相似性が存在する。

2.3 臨界現象の解析

こうした解析はくりこみ群を用いて理解されている。Koike (1993) この研究によると臨界現象の指数 γ は critical solution と呼ばれる解の周りの摂動の growing mode を用いて計算できる。ここで critical solution とは type I の場合、系の中間状態で近似的に実現される静的な時空、type II の場合、系の中間状態で近似的に実現される不連続あるいは連続な自己相似時空である。こうした理解が得られた現在では、重力崩壊の臨界現象のアプローチとして主に二つの方法が存在する。一つは実際に系の時間発展を計算し、臨界現象を見出す方法である。二つ目の方法は critical solution を実際に構成しその摂動のモードを調べることで臨界現象を解析する方法である。前者は系が持つ臨界現象を知る上で必要なアプローチであり、これによって臨界現象が type I か type II か、また type II の場合 critical solution が不連続な自己相似時空か、連続な自己相似時空かを見極めることができる。それを見極めたのち、逆に実際に critical solution を構成しその周りの摂動を調べより精度よく臨界指数を知ることができる。

3 重力崩壊の臨界現象の応用

重力崩壊の臨界現象は初期値の詳細に依存しない普遍的な性質である。そのため単なる理論的な興味

だけでなく、宇宙論などへの応用も考えることができる。本研究ではその中でも初期宇宙のゆらぎが重力崩壊を起こして形成される Primordial Black Hole を考える。臨界現象の普遍性と形成される質量のスケールリングを用いることで初期宇宙のゆらぎの分布を仮定し、形成される PBH の質量分布を計算することができる。

4 本研究で扱う系

本研究ではこうした PBH 形成に関係する臨界現象を調べる第一ステップとして shell の崩壊に伴う臨界現象を扱う。こうした shell はポテンシャル $V(\phi) = -\mu^2\phi^2 + \lambda\phi^4$ を持ったスカラー場を用いて実現していく。

本発表では shell 崩壊で必要となる式の導出と計算で用いる方法も解説する予定である。

Reference

- M. W. Choptuik 1993, Phys. Rev. Lett. **70**.9
- A. M. Abrahams and C. R. Evans 1993, Phys. Rev. Lett. **70** 2980.
- T. Koike, T. Hara and S. Adachi 1999, Phys. Rev. D **59** (1999) 104008.