

4月23日付けで「ブラックホールを記述する新理論をコンピュータで検証」というタイトルでプレスリリースを行った。以下では、その研究の背景と概要を述べるとともに、理論センターで行われている研究の一端を紹介する。

ヒッグス粒子の発見や宇宙背景輻射の観測などから、素粒子の標準模型やインフレーション理論といった現象論が確立するにつれ、ヒッグス粒子の正体は何か、インフレーションを引き起こすメカニズムは何か、といった根源的な問題が先鋭化しつつある。こうした問題に対して、実験や観測から手がかりを得る努力の重要性は言うまでもないが、理論サイドから糸口を探ることも同様に重要である。理論センターでは、素粒子現象論、宇宙物理、格子ゲージ理論、超弦理論など様々なアプローチを用いて、宇宙の起源の解明に多角的に取り組んでいる。

ここで紹介するのは、超弦理論に関連した研究である。超弦理論では、すべての素粒子を単一の弦の振動のしかたによって表す。特に、閉じた弦の振動モードから重力を媒介するグラビトンも現れることから、重力を他の相互作用と同様に量子論的に扱うことができる。重力の量子論の構築はアインシュタイン以来の難問であるが、それを可能にする最も有望な候補が超弦理論であり、宇宙の起源を解き明かす鍵を握る理論と目されている。

超弦理論の研究における最大の課題は、この理論を如何にして非摂動的に定式化するか、ということである。摂動論とは、ファインマン・ダイアグラムを用いて計算する手法のことである。これに対して、非摂動的定式化とは、場の理論における格子ゲージ理論のようなものであり、相互作用が強い状況においても正しい計算を可能にする。超弦理論の場合、摂動論的な定式化は80年代に確立しているが、非摂動的な定式化は90年代の半ばに様々な提唱がなされたものの、まだ確立には至っていない。場の理論の場合に、クォークの閉じ込めやハドロンの質量スペクトルを理解するのに格子ゲージ理論が必要だったように、超弦理論に基づいて宇宙の起源を解明する上で、非摂動的定式化の研究は極めて重要である。

超弦理論を非摂動的に定式化するアイデアの一つは、1997年にマルダセナが提唱した「ゲージ/重力対応」である。この提案によれば、ブラックホールを含むような時空上の超弦理論を非摂動的に定式化するために、平坦な時空上で定義されたゲージ理論を用いる。これまでに、ブラックホール周辺の量子重力的效果が無視できる状況下では多くの検証がなされてきたが、その制約を超えた場合に、どの程度適用範囲があるのか、ということについては、ほとんど理解されていなかった。

ここで扱うべきゲージ理論は強結合相にあるため、格子ゲージ理論のような定式

化に基づく数値的な手法を駆使する必要があるが、理論の持つ超対称性を保った計算を行うには、様々な工夫を行わなければならない。理論センターでは2007年から超対称ゲージ理論の数値シミュレーションを開始し、マルダセナの提唱したゲージ/重力対応を検証する研究を進めてきた。

今回の研究では、超対称ゲージ理論の数値シミュレーションにより、ブラックホールの質量と温度の関係を求めた。様々な大きさのブラックホールに対して計算した結果が、従来の超弦理論の摂動論に基づいて重力の量子力学的な効果を計算した結果と一致することを確認した(図1)。この研究成果は、2014年4月17日(米国東部時間)付の米国科学誌「Science」のオンライン版に掲載された。

この研究は、超弦理論と格子ゲージ理論の境界領域に発展しつつある新しい分野の成果といえる。KEK理論センターではこうした分野の垣根を越えた議論が日常的に行われており、今回の成果にも当センターの特色が現れていると言える。

(文責 西村淳)

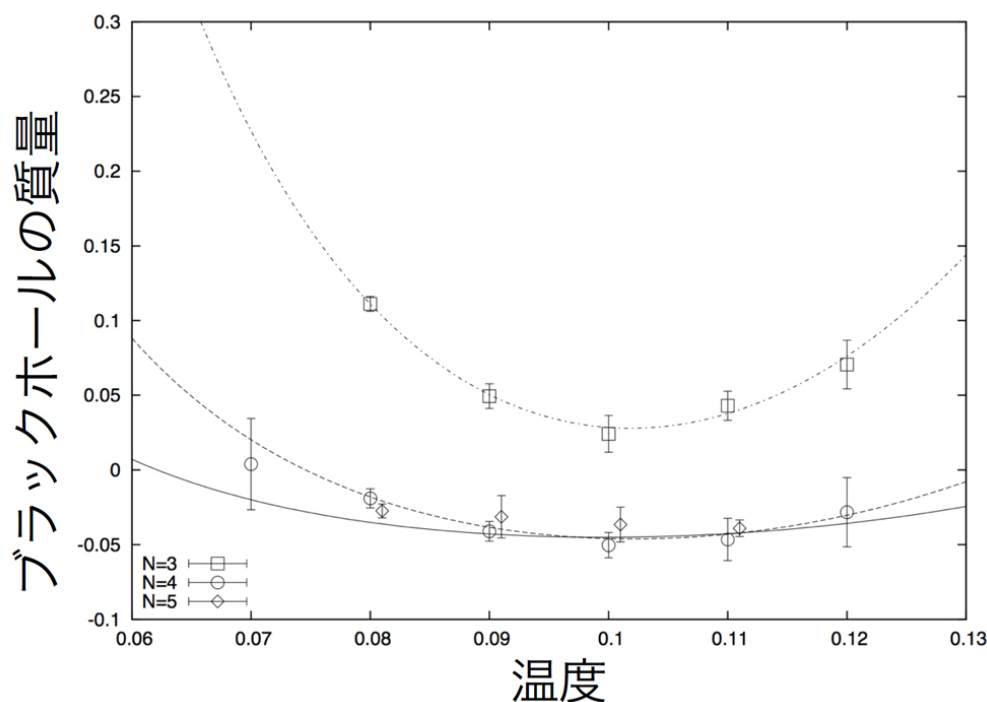


図1 ブラックホールの質量と温度の関係

□、○、◇のシンボルはそれぞれ、ブラックホールの構成要素の数Nが3、4、5の場合について、マルダセナの理論によりブラックホールの質量を計算した結果を温度に対してプロットしたものである。一方、一点鎖線、破線、実線の3種類の曲線は、やはりブラックホールの構成要素の数Nが3、4、5の場合について、従来の超弦理論に基づいて重力の量子力学的効果を近似的に取り入れて計算した結果である。両者は異なる理論計算に基づくが、よく一致していることがわかる。