

インフレーション宇宙における重力的粒子生成 ——2つの異なるアプローチの探究

金田 邦雄[†] 〈新潟大学教育学部 kaneta@ed.niigata-u.ac.jp〉

宇宙は 138 億年前、極めて高温・高密度の状態から始まった。しかし、その始まりよりさらに以前を遡ると、**インフレーション**と呼ばれる急激な加速膨張の時代に行き着く。インフレーションが終了した直後の宇宙は空っぽの空間で極度に冷え切っており、現在我々が観測するような、熱いビッグバンにより実現する銀河・星・元素に満ちた宇宙へと移行するには、膨張を駆動したエネルギーが粒子へと変換される**再加熱**が不可欠である。

この再加熱期に、極めて普遍的な粒子生成機構が働く。重力的粒子生成と呼ばれるこの機構は、他の粒子との直接的な相互作用を一切持たない粒子であっても、時空の曲率との結合を通じて不可避免的に生成されるという特徴を持つ。**暗黒物質**の起源を説明する有力な候補の一つであり、その定量的評価は宇宙論の重要課題となっている。

この現象を記述するために、2つの異なる理論的アプローチが用いられてきた。一つは、ミンコフスキー時空上の散乱振幅に基づく**ボルツマン方程式**であり、もう一つは、曲がった時空における真空の時間変化を追跡する**ボゴリューボフ変換**である。前者は解析的計算に優れ、後者は宇宙膨張による非摂動的効果を捉えられる。特に、インフレーション期の真空状態の扱いが両者で本質的に異なるため、どこまで一貫した結果を与えるかは自明ではなかった。

筆者らは、スカラー場の純粋な重力的生成を舞台に両者を直接比較し、再加熱期に生成される高い運動量を持つ粒子に対しては両者が完全に一致する一方、低運動量モードに現れる真空からの粒子生成はボゴリューボフ変換のみが記述可能であることを明らかにした。高運動量モードは局所的に平坦な時空とみなせるため、ボルツマ

ン方程式の摂動的な描像が正当化されるのである。ハッブル地平線を超える低運動量モードでは、宇宙の状態方程式の急変に伴い真空の断熱性が破れ、べき乗則的な粒子生成が現れる。平坦時空上の散乱描像を前提とするボルツマン方程式で、この寄与を取り込むことは難しい。この結果は、各アプローチの適用範囲を初めて厳密に示したものである。

この知見を踏まえ、ボルツマン方程式の適用範囲内でスピンの異なる粒子への重力的生成を系統的に解析した。フェルミオン（スピン 1/2）の生成はヘリシティの構造から生成振幅が質量に比例するため抑制される一方、ベクトル場の縦波モードはスカラーと同等の生成率を持つ。インフラトンのポテンシャル形状と崩壊先のスピンの組み合わせによって再加熱の成否が左右されるという非自明な構造も見出された。スピン 3/2 粒子（**raritron** と呼ばれる）では縦波モードの生成率が質量の逆二乗に比例して増大し、安定な暗黒物質としての質量に 6 ペタ電子ボルト以上という厳しい下限が課されることが判明した。

さらに、こうした目に見えない粒子生成の歴史を直接検証する新たな窓として、再加熱期の重力波シグナルに注目した。インフラトンが標準模型粒子へ崩壊する際に随伴する「グラビトン制動放射」を解析した結果、ピーク周波数がギガヘルツを超える超高周波重力波が放射されることを示した。そのスペクトルの裾野は、将来のメガヘルツ帯共振空洞検出器の感度域に入り得る。このように、重力的粒子生成の理論的枠組みの精緻化は、初期宇宙のダイナミクスを観測的に紐解くための重要な指針を与えつつある。

——用語解説——

インフレーション：

宇宙初期に起きたとされる急激な加速膨張。宇宙の一様性や平坦性を自然に説明し、宇宙マイクロ波背景放射の観測により強く支持されている。

再加熱：

インフレーション終了後、インフラトン場のエネルギーが標準模型粒子などの輻射に変換される過程。歴史的には、インフレーション前の高温状態から過冷却を経て「再び」熱い状態に戻ると考えられていたことに由来。ビッグバン元素合成が正しく進行するためには、少なくとも数メガ電子ボルト以上の温度への加熱が必要となる。

暗黒物質：

宇宙に存在するが光を発しないため直接観測できない謎の物質。銀河の回転速度や重力レンズ効果などの観測から、その存在は強く示唆されているが、正体は未解明である。宇宙全体のエネルギーの約 27% を占めると考えられている。

ボルツマン方程式：

粒子の分布関数の時間発展を記述する方程式。右辺の衝突項に重力子交換の散乱振幅を組み込むことで、重力的粒子生成を摂動的に評価できる。

ボゴリューボフ変換：

曲がった時空において、異なる時刻の真空状態を結びつける変換。変換係数の大きさが生成粒子数を与える。

raritron (ラリトロン)：

Rarita-Schwinger 方程式に従うスピン 3/2 の仮説的基本粒子で、超対称性理論のグラビティーノの一般化にあたる。超対称性の有無にかかわらず存在し得る。

[†] 著者が編集委員の場合、会誌編集委員会では別の委員を担当編集委員に選び、記事の審査の公正さを保つという内規に従っております。