

重力波を用いたスカラーテンソル理論の検証

浅川 直道（宇宙物理学教室）

一般相対性理論はこれまで多くの実験をクリアしており、弱重力場においては綻びが見つかっていない、現在における重力場の標準理論である。しかし、一般相対性理論の枠組みで宇宙の加速膨張を説明するにはダークエネルギーを導入しなければならないことや、一般相対性理論は繰り込みができず重力場を量子化することができないといった、観測と理論的両面の問題点が存在する。これらの問題点の解決に向けて一般相対性理論を拡張した多くの修正重力理論が考案されている。

修正重力理論の一つとしてスカラーテンソル理論がある。スカラーテンソル理論は、そのラグランジアンがスカラー場と重力場の非最小結合項を含む理論である。スカラー場が宇宙の加速膨張を引き起こせることや、繰り込み可能な重力理論である超弦理論のラグランジアンが低エネルギー極限で重力場と非最小結合したスカラー場を伴うことから、一般相対性理論の拡張として有望な理論の一つである。

修正重力理論の有力な検証方法の一つとして重力波観測が挙げられる。スカラーテンソル理論ではスカラーモードの重力波が放射されるため、スカラーモードの重力波が観測されれば強重力場における一般相対性理論の綻びの証拠となるだけでなく、その解析からスカラーテンソル理論の種類を区別することが可能である。スカラーモードの重力波の検出には重力波検出器が 4 台必要となるが、現在稼働中の Advanced-LIGO と Advanced-VIRGO、KAGRA に加えて、LIGO-India が 2030 年代から観測に参加することが期待されるため、近い将来にスカラー重力波を検出できる環境になると期待される。

以上の背景を鑑みて、本論文ではスカラーテンソル理論において放射されるスカラーモードの重力波に対する 2 つの数値的研究を行った。1 つ目はポテンシャルが質量項と自己相互作用項で与えられる場合に、大質量星の重力崩壊で放射されるスカラーモードの重力波放射シミュレーションである。系統的な解析の結果、観測されるスカラーモードの重力波スペクトル密度の傾きから、スカラー場の自己相互作用の種類に対して制限がかけられることが得られた(図 1 参照)。

2 つ目はトポロジカル中性子星と呼ばれる、複数のスカラー場を含むスカラーテンソル理論において存在できる新たな中性子星の振動によって放射されるスカラーモードの重力波計算である。トポロジカル中性子星からはパラメータによらず大振幅のスカラーモードの重力波が放射され、そのような大振幅の重力波の検出は複数のスカラー場の存在の証拠となる可能性があることが分かった。

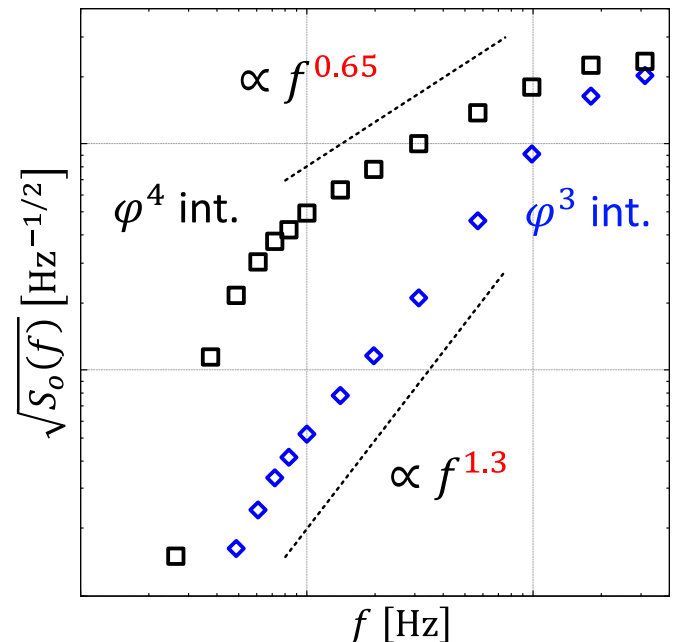


図 1：スカラー場の 3 乗と 4 乗に比例する自己相互作用項を含む場合のスカラーテンソル理論における大質量星の重力崩壊で放射されるスカラーモードの重力波のスペクトル密度。3 乗と 4 乗相互作用ではスペクトル密度のベキが約 2 倍異なる。