

# 重力波観測による究極理論探査



小玉 英雄

京都大学基礎物理学研究所  
kodama@yukawa.kyoto-u.ac.jp



吉野 裕高

大阪市立大学数学研究所  
hyoshino@sci.osaka-cu.ac.jp

すべての自然現象を統一的に記述する究極理論の構築は、理論物理学者の夢である。その実現における最大の難関は、重力理論と量子論を整合的に融合した量子重力理論をつくることである。この難関を摂動論レベルで克服したのが、超弦理論である。超弦理論は、また、他の量子重力理論候補と異なり、重力を含むすべての相互作用と物質が有機的に結合して理論の整合性を生み出している、真の統一理論といえる。しかし、超弦理論が究極理論の候補となるには、まず、なんとと言っても、低エネルギーでの有効理論として我々の知る自然の基本法則を再現することが必要である。

Minkowski 時空を真空解としてもつことと量子論の無矛盾性を要請すると、超弦理論は 10 次元時空の理論となる。我々の住む宇宙は 4 次元に見えるので、まず、4 次元と 10 次元の関係を説明しないと行けない。その方法として最もポピュラーなものは、余次元が小さく縮んでしまい、低エネルギーの状態では見えなくなるとするコンパクト化という方法である。整合的な 10 次元超弦理論として、これまでにヘテロ型、IIA 型、IIB 型など複数の理論が作られており、コンパクト化の詳細は理論ごとに異なるが、一般的には、余次元を担う多様体の構造、背景場の配位、ひもの高次元的な拡張であるブレーンの数や配置により指定される。これまでに数億のコンパクト化が計算機の力を借りてチェックされ、ゲージ群やフェルミ粒子の種類・世代数が標準模型と一致するものが発見されているが、未だ、ゲージ結合係数の値、湯川結合の構造と値などすべての点で標準模型を再現するものは見つかっていない。可能なモ

デルは、例えば IIA 型理論だけでも  $10^{15}$  個も存在し、そのすべてを計算機で調べ尽くすのは現状では不可能である。また、加速器実験などの地上実験により新たな情報を得る可能性も現状では難しい。

このような状況で、コンパクト化の構造を探る新たなアプローチとして注目されているのが、隠れたセクターが引き起こす宇宙現象を用いる方法である。超弦理論に共通に含まれるフォーム場と呼ばれる一般化された 10 次元ゲージ場は、コンパクト化により、アクシオンと呼ばれる 4 次元擬スカラー場を生み出す。その種類は余次元の位相構造が複雑になるほど多くなる。また、その相互作用強度や質量は、余次元サイズやブレーン配位についての情報を担っている。

アクシオンの質量  $m_a$  は、 $10^{-10}$  eV 以下の範囲で  $\log m_a$  でみて広く分布していることが期待されるが、これらの微小質量アクシオンは、コンプトン波長が宇宙スケールとなるため、様々な宇宙現象を引き起こす。とくに、 $m_a = 10^{-10} \sim 10^{-20}$  eV の範囲にあるアクシオン場は、太陽の  $1 \sim 10^{10}$  倍の質量をもつ回転ブラックホールの近傍で不安定となり、ゼロ点振動を種として、ブラックホールの周りにアクシオンの雲を形成する。これらの雲は、回転により定期的に重力波を放出すると共に、非線形相互作用によりしばしばバースト的重力波を放出する。我々の銀河内ないし近傍の銀河でこの現象が起きれば、現在稼働中の重力波干渉計や将来の衛星を用いた重力波干渉計で検出可能であり、重力波観測により超弦理論コンパクト化を探る道が開かれる。

## —Keywords—

### 超弦理論：

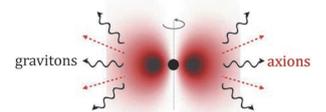
点粒子ではなく広がりをもつひもの運動、分裂・合体により自然界のすべての素粒子とその相互作用を統一的に記述する局所超対称理論。まだ未完成の理論ではあるが、摂動論的なレベルで整合的な S 行列を与える。

### 隠れたセクター：

超弦理論のコンパクト化は、多くの場合、目的とする素粒子標準模型に登場する「可視セクター」の素粒子以外に、それらと重力相互作用程度の非常に弱い相互作用しかしない場・素粒子を生み出す。これらは「隠れたセクター」(hidden sector) の場・素粒子と呼ばれ、ダークマターやダークエネルギーの起源となったり、インフレーションを引き起こす場となる可能性がある。

### アクシオン：

カイラルな  $U(1)$  ないしシフト対称性の自発的破れにより生み出される南部・ゴールドストーン粒子。通常、小さな質量をもつ擬スカラー粒子で隠れたセクターに属する。最初、強い相互作用における CP の破れを回避するためにペッチェイとクインにより導入された。



ブラックホール(中央黒丸)の周りのアクシオン雲(赤茶、ダンベル形)からの重力波(波線)やアクシオン(赤点線)放射。