

論文の内容の要旨

論文題目

Forecast constraints on cosmic string parameters
from observations of gravitational waves and CMB
(将来の重力波及び宇宙背景放射の観測による宇宙紐に対する制限)

氏名：宮本 幸一

宇宙ひもとは、宇宙論的な長さで微視的な太さを持つ、莫大なエネルギーが凝縮した1次元的な領域である。素粒子や初期宇宙に関する様々な理論的なモデルにおいて、宇宙初期に宇宙ひもが発生し、現在も存在している可能性が指摘されている。最も典型的な例は、素粒子の大統一理論のような、自然はもともと高い対称性を有していたが、宇宙の進化の過程の中で対称性が破れていき、現在観測される対称性が生じたとする理論である。この対称性の破れの際に、位相欠陥として宇宙ひもが発生しうる。また、超弦理論に基づくインフレーションモデルの1つであるブレーンインフレーションでは、インフレーションを引き起こすDブレーンと反Dブレーンが対消滅した後に、宇宙論的な長さを持った超弦理論の「ひも」が残される。もし、宇宙ひもが発見され、その性質を詳しく調べる事ができれば、我々は、標準模型を超える素粒子物理学や、初期宇宙の歴史に対して観測的にアプローチする新たな手段を得る事になる。したがって、宇宙ひもは、素粒子物理学と宇宙論の双方にとって非常に重要である。

宇宙ひもは、発生後、衝突とつなぎ替わりを繰り返しながら、非常に非線形的に運動し、複雑なネットワークを形成する。この宇宙ひもネットワークには、次の2種類の宇宙ひもが含まれる。1つは、ハッブル地平線を越えて宇宙を張り巡る infinite string である。infinite string の典型的な曲率半径や間隔は、ハッブル半径に匹敵する。もう1つは閉じた

ループである。これは、1本の *infinite string* の異なる部分が衝突してつなぎ替わる事で生じ、振動に伴って重力波を放出しながら縮小し、最終的には消滅する。宇宙ひもネットワークは、主には重力を通じて、まわりの時空や物体に影響を及ぼす。このような宇宙ひもの痕跡は、将来の宇宙の観測実験を通じて検出される可能性がある。

宇宙ひもの観測的なシグナルには様々な種類のものがあるが、この論文では、その中でも以下の2種類のシグナルに注目する。1つ目は重力波である。莫大なエネルギーの塊である宇宙ひもが運動すれば、強力な重力波が発生する。宇宙ひもネットワークからの重力波は、主にはループによってもたらされる。特に、ループ上のカuspと呼ばれる構造が主たる重力波源となる。カuspとは、ループの振動の1周期のうちに数回現れる、非常に光速に近い速度を持った尖った領域である。カuspの運動に伴って、ビーム状の重力波が短時間のうちに放出される。これはしばしば重力波バーストと呼ばれる。この重力波バーストは、次の2つの形で検出される。1つ目は、検出器の感度を超える振幅を持つ強力なバーストが、そのまま単独のバーストとして検出されるものである。このようなバーストは稀にしか飛来しないので、レアバーストと呼ぶ事にする。2つ目は、微弱であるため単独では検出できないが頻繁にやってくるバーストが、互いに重なりあって形成する背景重力波である。LIGO や KAGRA といった重力波干渉計では、レアバーストに加えて、異なる干渉計のシグナルの相関を取る事で背景重力波も検出できる。また、背景重力波は、パルサーから届くパルスの到着時間のずれを観測するパルサータイミング実験によっても検出する事ができる。

もう1つの重要な宇宙ひものシグナルは、宇宙背景放射 (CMB) の非等方性である。宇宙ひもは、その複雑な運動に伴って重力不安定性を発生させ、まわりの物質に揺らぎを作る。CMB も、主には *infinite string* からこのような影響を受け、我々は様々な方向から飛来する CMB の温度や偏光の揺らぎを観測する事になる。これまでに観測された CMB の温度の非等方性は、インフレーション起源の揺らぎが作るものと基本的には一致しており、宇宙ひもは CMB 非等方性の主たる要因ではないことが明らかになっている。しかし、CMBpol のような将来の CMB 観測衛星によるより精密な測定により、宇宙ひものシグナルが発見される可能性がある。また、Bモードと呼ばれるタイプの偏光には、宇宙ひもが主たる寄与を及ぼしうる。

宇宙ひもの性質を特徴付け、観測的なシグナルに大きな影響を与えるパラメータとして、以下の3つを挙げる事ができる。1つ目は、宇宙ひもの *tension* μ である。これは、宇宙ひもの単位長さあたりの質量にあたり、しばしばニュートン定数 G との積 $G\mu$ の形で書かれる。 $G\mu$ は、対称性の破れに伴って発生した宇宙ひもに対しては、その対称性の破れが起こったエネルギースケールによって決まる。一方、超弦理論に基づく宇宙ひもの場合には、

超弦理論のエネルギースケールや余剰次元の幾何が $G\mu$ に反映される。 $G\mu$ は、宇宙ひもから放出される重力波の振幅や、CMB 非等方性の大きさを決める。加えて、 $G\mu$ はループの寿命を決めるので、ループの個数密度にも影響する。

2つ目は、ループの長さ α である。時刻 t に生じたループの長さは αt と表される。厳密には、 α はパラメータではなく、宇宙ひもネットワークのダイナミクスを正確に追う事ができれば求まる量である。しかし、解析的にも数値的にも非常に非線形的なダイナミクスを追う事は容易ではなく、 α の値はそのオーダーさえ明らかになっていない。そのため、この論文では、 α をパラメータと見なす。 α はループの個数密度に加えて重力波バーストの振幅にも影響する。

3つ目は、つなぎ替わり確率 p である。2本の宇宙ひもが衝突すると、ある確率 p でつなぎ替わりが起こる。対称性の破れにより生じる宇宙ひもの場合、 p はほぼ1である。一方、超弦理論に基づく宇宙ひもの場合、4次元で見て衝突しそうな宇宙ひもが余剰次元の中ですれ違う等の効果のために、 p は極めて小さくなりうる。**infinite string** はループ生成により常に長さを減らしていくが、 p が小さくなればなるほどその効率が下がる。そのため、**infinite string** は密になる。ゆえに、 p が小さいほど CMB 非等方性は大きくなる。**infinite string** が密になればループの個数密度も大きくなるので、重力波シグナルも増大する。

これらのパラメータは、宇宙ひもの背後にある物理と密接に関係しており、これらのパラメータの値が分かれば、非常に大きなインパクトとなる。そのため、将来の観測で宇宙ひものシグナルが見つかったとして、どれだけの精度でこれらのパラメータの値を決定できるかを調べる事は、非常に意義深い。

この論文は、将来の干渉計による重力波直接検出実験、パルサータイミング実験及び CMB 観測の中で宇宙ひものシグナルが検出された場合に、 $G\mu$ 、 α 、 p がどの程度制限されるのかを調べることを主眼とする。まず、宇宙ひものダイナミクスや、宇宙ひものシグナルの計算方法等について、過去の研究の結果をレビューする。その後、レアバーストの検出頻度や背景重力波のスペクトル、CMB 非等方性のパワースペクトルが、宇宙ひものパラメータにどのように依存するのかを議論し、将来の観測により探索できるパラメータ領域を求める。そして、その領域の中からいくつかの点を取り上げ、真のパラメータがその点である場合にどの程度の精度でパラメータが決定できるかを、フィッシャー解析という手法を用いて推定する。その際、個々の実験が単独で与える制限だけでなく、異なる実験の組み合わせにより与えられる制限を求める。

重要なのは、異なる種類の実験は、宇宙ひもネットワークの異なる側面を反映するため、我々に異なる情報を与えてくれるという事である。例えば、重力波の主たる源となるのはループであるが、CMB 非等方性に主要な寄与をするのは **infinite string** である。レアバー

ストの検出頻度は、ループの個数密度やループの長さを反映するが、背景重力波の振幅はループのエネルギー密度を反映する。また、異なる振動数の重力波は、異なる時期に放出されたものである。このような理由により、異なる実験の結果を組み合わせる事で、パラメータに対するより厳しい制限を得る事ができる。この意味で、レアバースト検出と背景重力波検出という2種類の観測を自ずから兼ね備えている重力波直接検出実験は、宇宙ひものパラメータを制限する上で非常に有用であると言える。とりわけ、**DICIGO**のような、宇宙空間に設置される重力波干渉計は、重力波に対する究極の感度を有し、宇宙ひもの極めて精密な観測を可能にする。