

宇宙初期に生成される宇宙紐

我々の宇宙の初期は非常に高温高密度の状態、宇宙の膨張に従いその温度が下がり、その結果、現在の宇宙が実現された事が、観測によって実証されている。そのような過程において、必然的に起こると理論的に予想される現象として“真空の対称性の自発的な破れ”による“真空の相転移”が挙げられる。宇宙初期にこの現象が複数回起こった事によって、現在の4つの基本的な相互作用は、もともと1つだった相互作用が次々と分離した事によって実現されたと理論的に予想されている。真空の相転移によって必然的に起こる興味深い現象として、“位相欠陥の生成”が挙げられるが、対称性がどのように移り変わったかにより、現れる位相欠陥の種類が違う。位相欠陥として大まかに挙げると、0次元天体の磁気単極子(モノポール)、1次元天体の宇宙紐、2次元天体のドメインウォール等である。それらは現在と比べて非常に高いエネルギースケールを持つ宇宙において生成されるため現在では、例えば宇宙紐なら高いエネルギー線密度(張力も同じ大きさ)を持ち、その構造は位相的に安定なので現在の宇宙に残り続けていると考えられている。

重力波

20世紀の理論物理学における大きな一つの成功としてアインシュタインにより提唱された一般相対論が挙げられる。一般相対論が予言する現象として、時空のゆがみのさざなみである“重力波”の存在が挙げられる。現在そして将来世界中で稼動する干渉計によって重力波が直接観測されることが期待されている。その観測に向けて、一般相対論を研究する理論物理学者の役割の一つとして、様々な重力波の源の候補を想定した場合、それらから放出されるだろう重力波の理論波形を精密に求めておく事が挙げられる。重力波源として、これまで観測されてきたり、もしくは理論的に予想されてきた、一般相対論の効果が無視できない強い重力を伴う天体現象、言い換えれば天体自身の質量密度が高く運動が光速に近い現象がリストアップされる。例えば、ブラックホールや中性子星の2体連星の合体過程、宇宙紐の運動等が挙げられる。1次元天体である宇宙紐の運動は“南部-後藤作用”によって記述される。

定常剛体回転する宇宙紐からの重力波放射

現在の宇宙物理の興味深い目標の二つとして、重要な天体現象である“宇宙紐”および“重力波”の存在の実証が挙げられる。以下に述べる私の研究は、これらが観測を通じて実現されるために、備えられるべき研究のひとつであるだろうと確信している。

特に解析的にその運動を記述できる宇宙紐からの重力波放射について研究してきた。広がりを持つために、一般に宇宙紐の運動は偏微分方程式によって記述され、解析的に解けない場合が多い。

背景時空に付随するある対称性を持って運動する宇宙紐を考慮し、その対称性により宇宙紐の運動方程式を、以下に述べるように、常微分方程式に変形できる事に注目した。宇宙紐の運動方程式を解く事は、 $(1+1)$ -次元の世界面を決定する事と同等である。一方、背景時空として、対称性を持つ時空を考慮すると、時空の対称性を特徴付けるキリングベクトル場が、考慮する対称性の数だけ存在する。そこで私は、宇宙紐の世界面にそのキリングベクトルが接する場合について考えた。すると、宇宙紐の運動方程式を解く際に、適当に時空の座標系と世界面上に誘導された座標系を一方向を揃えるように選ぶ事ができれば、普遍的に常微分方程式に落とせる事がわかった。

その常微分方程式から特に解析的に解が得られる場合として、ミンコフスキー時空中で定常に剛体回転する宇宙紐の解に注目した。運動方程式を解くと、その運動および形状は2つのパラメータによって完全に決定される事がわかった。

定常回転状態は宇宙における天体の最終的に安定な状態であることも、定常剛体回転する宇宙紐を考える動機である。例えば、ブラック・ホールを例に挙げると、ブラック・ホールは生成されたばかりの頃の運動は非常に複雑な状態であっても、その終状態においては定常に軸回転する状態(カー・ブラック・ホール)である事が証明されている。

その宇宙紐の解析解を用いて、宇宙紐から十分遠くで観測する重力波の波形を、弱い重力場のアインシュタイン方程式を数値的に解くことによって見積もった。重力波の波形も同様に、宇宙紐の解を特徴付ける2つのパラメータによって特徴付けられる事がわかった。