

ブラックホールからエネルギーを引き抜く ——Blandford-Znajek 機構の本質

木下俊一郎 〈中央大学大学院理工学研究科 kinoshita@phys.chuo-u.ac.jp〉

伊形尚久 〈立教大学理学部 igata@rikkyo.ac.jp〉

磁力線は、ひも状の実体である——この主張にすぐさま賛同してくれる読者は、どれくらいいるだろうか。だがこの描像は、電磁場によってブラックホールからエネルギーを引き抜く「Blandford-Znajek 機構」の本質をきわめて自然に説明する。回転している物体に絡んだひもは、物体にトルクをおよぼしてその回転にブレーキをかける。この結果、物体は角運動量と回転エネルギーを失い、その角運動量とエネルギーはひもの張力を介して物体から取りだされる。物体をブラックホールに、ひもを磁力線に読み替えたものが、Blandford-Znajek 機構の原理である。

宇宙には、活動銀河核やガンマ線バーストといった、ほぼ光速に近い速度でプラズマガスを噴き出す、いわゆる相対論的ジェットを伴った天体現象が様々なスケールで存在する。このような天体の多くは中心にブラックホールをもつことが示唆されるため、そのブラックホールの回転エネルギーは相対論的ジェットの莫大なエネルギーの供給源となり得る。

Blandford-Znajek 機構は、非常に強い電磁場中を伝導性の高いプラズマが満たしている、電磁場優勢プラズマの環境下にあるブラックホール周辺ではたらく。ブラックホールの回転エネルギーから、高効率で強力なエネルギー流束を達成できるため、相対論的ジェットの駆動メカニズムとして盛んに研究されてきた。近年では、一般相対論的磁気流体力学に基づく数値シミュレーションも可能となり、エネルギー流束の生成も確認されている。

ところが、Blandford-Znajek 機構の物理的描像に対する理論的な説明は、研究者によって見解・解釈が異なっており、いくぶ

ん混乱や誤解が生じている（一部には、この機構が因果的な問題をはらむという批判さえある）。この系でとりあつかう対象には、電磁場・電流・プラズマの運動などに加えて、ブラックホールの強重力による顕著な一般相対論的効果もある。結果、電場や磁場などの様々な物理量が、場所や座標系に応じて相対的にその意味や解釈を変えてしまう。この点が物理的描像を見えづらくしている一端であろう。

ここでは従来とは異なるアプローチとして、電磁気学における磁力線と、南部・後藤ストリングとの対応に着目する。すなわち、冒頭の主張である。磁力線は、接線方向に縮もうとする磁気張力と垂直方向に反発しようとする磁気圧をもつ。とくに張力の大きさは、南部・後藤ストリングと同じようにエネルギー密度と等しい。このような力学的性質は、磁力線を主体とする力学系として、ストリングの場合と類似した形に定式化される。いうなれば、磁力線は座標系の選び方などによらない“変わらない”物理的概念なのである。

以上の観点に立つと、Blandford-Znajek 機構で標準的な定常・軸対称系の磁力線は、ブラックホールまわりを一様角速度で剛体回転している南部・後藤ストリングと明白に対応づけされる。さらに特筆すべきは、エネルギー引き抜き指標である単位張力あたりのエネルギー・角運動量流束が、どちらの系もエルゴ領域内の全く同じ場所・同じ代数関係式で決定されることである。この結果は、磁力線とストリングによる両者のエネルギー引き抜き機構が、運動方程式を解かずとも決まる局所的な同じキネマティクス、つまり張力により支配されていることを意味している。

—Keywords—

ブラックホール：

強い重力のため光さえも脱出できない時空の領域。その境界は「事象の地平面（イベントホライズン）」と呼ばれる。ブラックホールの回転エネルギーは、宇宙における様々な天体現象の有力なエネルギー源と思われており、それをいかに引き抜くかは重要な問題である。

エルゴ領域：

自転する、ブラックホールなどの強重力コンパクト天体の周囲に生じる、時空が自転方向に流されている領域。ここでは光であっても、自転方向にしか周回できない。ただしブラックホールの内部領域とは違って、エルゴ領域から脱出することはできる。

エネルギー引き抜き過程：

ブラックホールの自転と逆符号の「大きな」角運動量流束を流入させる際に、エルゴ領域であらかじめ受け取っておいた反作用を外へと取り出す過程。この過程全体をみて、ブラックホールの回転エネルギーを引き抜く、と表現する。様々な種類の物質を使って、この過程を実現することができる。

ストリング：

空間1次元に拡がった物体。このダイナミクスは、時空に埋め込まれた(1+1)次元面(世界面)で記述される。とくに、(張力がエネルギー密度と等しい)相対論的張力だけで特徴づけられるものを南部・後藤ストリングという。