

Kerr Black Holes as Particle Accelerators to Arbitrarily High Energy

Maximo Banados, Joseph Silk, and Stephen M. West

arXiv:0909.0169v1 [hep-ph]

相対論における新しい現象の話です。2009年というかなり最近のものですが、発想はかなり単純で、シュバルツシルトとカーの簡単な知識があれば何をしているのか分かります。式の導出はまったくせず何をしているのか言葉だけで説明しているので、あまり役に立たないと思います。式や図は原論文を見てください。

最初にシュバルツシルトブラックホールの場合を見ていきます。軽量は(1)で、 $(-, +, +, +)$ にとっています。これに突っ込んでいく粒子を2つ用意して、それぞれの角運動量を l_1, l_2 とします。そして粒子は無限遠で静止しているとします。この角運動量 l の粒子に対する測地線方程式が(2)になっています。これの $\dot{r} = dr/d\tau$ を図にしたものがFIG.2の左側です。シュバルツシルト計量を見れば分かるように、 $r = r_+ = 2$ が地平面に当たるために、 \dot{r} が r_+ で発散しています。そして、 $l = 5$ のときに $r = 10$ から r_+ になる直前あたりまで飛び上がることが分かります。これは l が大きいときには地平面に到達できないことを意味します。なので、飛びが現れない $l = \pm 4$ までが重要になります。

次に重心系でのエネルギーを作ります。特殊相対論での2粒子による重心系のエネルギーは(3)で、 $u_{(1)}, u_{(2)}$ はそれぞれの粒子の4元速度で、 $g_{\mu\nu}u_{(1)}^\mu u_{(2)}^\nu = -1$ と規格化されています。これは曲がった空間でも有効な理由を、(4)、(5)で基底ベクトル(テトラッド)を使って簡単に説明しています。

(3)と(2)を合わせると(6)になって、その図がFIG.2の右側です。(6)を見てすぐに、 $r = 2$ で分母が0になるのが分かります。そして、分子も $r = 2$ で0になります。このため $r = 2$ まわりで展開すると発散しないものが求まって、それが(7)です((6)のルート部分を $r = 2$ まわりで展開すればいい)。(6)とFIG.2の右側を見れば分かるように、 $l_1 = 4, l_2 = -4$ で重心系のエネルギーは最大値を持ち、 $2\sqrt{5}m_0$ となります。

同じことをカーブラックホールで行います。(8)がカーブラックホールの計量で、(11)~(13)が測地線方程式です。FIG.3の左側を見て分かるように、 $l = 3$ で飛びが出ていて、 $l = 2$ がとびのないぎりぎりのものです。粒子の設定をシュバルツシルトと同じにすると、重心系のエネルギーが(14)で与えられます。これを地平面の位置 r_+ まわりで展開したのが(15)で、図にしたのがFIG.3の右側です。式をみるより図を見たほうが早いですが、 $l_1 = 2, l_2 = -2(1 + \sqrt{2})$ での重心系のエネルギーが地平面の直前で発散しています(l_2 の角運動量は $l_2 > 2$ となっているために地平面に到達できない)。つまり、カーブラックホールの地平面に l_1 の粒子が当たることで、衝突による任意の大きな重心系のエネルギーが現れます(シュバルツシルトでは最大値が決まっていた)。この重力による粒子加速で作られる大きな衝突エネルギーを、この論文が初めて指摘しました。

この話はさらに解析がされた発展的な内容のものが大量にあります。特に、この論文だけだと重心系エネルギーがどうなっているのかとか、これは地平面のこういった性質なのかとかが全く分かりません(ちなみにカーブラックホールで $a = 1$ は現実的に可能なのか分かってない)。なので、気になる人はさらに解析された話を読むことをお勧めします。例えば、arXiv:0911.3363v2、arXiv:1007.3678v2、arXiv:1102.3316v2 辺りから参照先を戻りつつ調べていくといいと思います。