相対論的宇宙ジェットの物理

高原文郎（阪大理宇宙地球）

活動銀河などに見られる相対論的ジェットの形成機構と物理過程について議論した。近年の観測的進歩によって、ジェットの理論的問題は観測と対比可能な形で議論できるようになってきた。その結果、ジェット形成は降積円盤と深くかかわっていること、ジェットでの磁場のエネルギー密度は電子（陽電子を含む）のエネルギー密度より１桁以上小さい事がわかってきた。このことはジェットの形成、バルク加速の機構として磁場は支配的ではないことを強く示唆している。ジェットの主成分が電子陽電子対であるかどうかはまだ確定的ではないが、いくつかの間接的証拠はこれを支持している。そこで、電子陽電子対ジェットの生成、バルク加速についての一つのモデルを提案した。このモデルはガンマ線バーストのファイアボールモデルに類似したものであるが、光子と電子陽電子対の結合が完全な熱平衡ではなく、ウィーン平衡にあるとしたものである。適切な境界条件を選べば、エディントン光度程度のパワーをもったローレンツ因子１０程度のバルク加速が可能であることを示した。このモデルは、このとき必然的にエディントン光度程度の MeV 放射が放出されることを予言する。コリメーションは今後の課題である。以下にはいくつかの補足的事項をメモとしてまとめる。

説明すべき観測的事実

1. 電波銀河や電波クェーサーの観測から、pc スケールでのジェットのローレンツ因子は 10 程度である。また拡がった電波源のエネルギーの推定からジェットのパワーはエディントン光度程度と推定される。

2. ジェットのパワーと降積円盤に起因すると考えられる輝線光度との間にはよい相関があり、ジェット形成は降積に起因すると考えられる。ジェットパワーの大きさはジェット形成がブラックホールの近傍で起こることを示している。

3. 銀河系内のマイクロクェーサーのジェット形成時期は X 線放射のモードの転換の時期と一致しており、前項の事実と符合している。

4. ブレーザーが１日程度の時間変動を示すこととガンマ線が見えることだけから、ジェットはおよそ 0.01pc のスケールで既にローレンツ因子が 10 程度に加速されていることがわかる。

5. ブレーザーの多周波同時観測のスペクトルの解析から、0.01pc スケールの輻射領域では磁場のエネルギー密度は相対論的電子（陽電子を含む）のエネルギー密度より１桁以上小さい。

6. 0.01pc スケールでのジェットのパワーと拡がった電波源でのパワーは同程度である。但し、同一天体での比較は観測上困難なので、電波銀河の統一モデルというもっともらしい仮説を前提としている。

7. ジェットの組成については偏光観測や pc スケールのジェットの多周波スペクトルの解析から電子陽電子対が主であるとの結果が報告されている。0.01pc スケールの観測は、もし電子の平均エネルギーが静止エネルギーの 100 倍程度まで加速されているならば陽子の運動学的パワーは電子の 10 倍程度で収まるので、まだ観測の許容範囲内である。

基本的描像

1. べき型スペクトルが観測されていることからも、粒子加速は衝撃波加速と考えられる。0.01pc スケールのジェットからの輻射は内部衝撃波と考えると整合的に観測を理解できる。ここで外部衝撃波がおこるとすると減速してしまってより外側の超光速膨張現象を理解できなくなる。内部衝撃波では平均運動は散逸されず残るので、ジェットは大きなパワーをより外側に運び、これが外部衝撃波を介して拡がった電波源を作ることになる。

2. 降積円盤からジェットを作るということは降積する物質のごく一部に重力の束縛を振り切る大きなエネルギーを与え、大部分の物質は重力に強く束縛された状態でブラックホールに落ちるということを如何にして実現するかという問題である。解放されたエネルギーが輻射に転化してエネルギー解放が起こるという降積円盤の基本は、輻射が重力ポテンシャルに束縛されていないという性質によっている。こう考えるとジェットを作るのに二つの可能性があるだろう。一つは円盤表面の物質を著しく非束縛状態にすること、もう一つは相対論的な電子陽電子対を光子と同じように振舞わせることである。

3. 表面の物質を非束縛状態にして質量放出を起こすことは太陽風をはじめ天体現象であまねく観測されていることである。多くの場合、得られる放出速度はポテンシャルの深さに対応する脱出速度程度になる。通常は静止質量に比べ、重力ポテンシャル、回転運動や熱運動、磁場のエネルギーは小さく、粒子１個あたりのエネルギーが重力ポテンシャルの深さを超えて非束縛になって流れが生じる場合を考えているので、流出風の自然な速度は脱出速度程度になると理解される。バルクローレンツ因子が 10 という流れを実現するためには、粒子１個あたりのエネルギーが静止質量の 10 倍必要だということを意味している。したがってこのような機構で相対論的速度の流れを作ることは困難である。

4. 相対論的な流れの例はパルサー風だが、この場合には中性子星の近傍は極真空で流出する物質は中性子星表面のものではなく、強磁場中の相互作用で新たに作られる電子陽電子対であるとみなされる。そのため、粒子１個

あたりのエネルギーが静止質量エネルギーをはるかに超えることが可能になっている。ブレーザーの場合には磁場の強さがはるかに小さいこと、真空度もはるかに弱いことを考えると、同様な状況を実現することは困難である。

5. 第 2 の可能性、すなわち、降積円盤中で電子陽電子対をつくり、これと光子とを一緒にして円盤外に取り出し、1 粒子あたりのエネルギーが十分大きいようにすることは、これまであまり考えられてはいないが十分検討の価値がある。この機構はガンマ線バーストのファイアボールモデルと類似している。ガンマ線バーストではバリオン 1 個あたりのエネルギーが静止質量の数百倍という状態(これは熱平衡にある光子や電子陽電子対が担っている)が初期に用意されれば、断熱膨張によって最終的にバリオンの運動エネルギーに転化するというものである。初期に非一様性があれば内部衝撃波によってガンマ線バースト本体が生じ、その後外部衝撃波によってアフタグローができるというのもブレーザーとの類似に大きな示唆を与える。内部衝撃波は $0.01\mathrm{pc}$ スケールのコンパクト源、外部衝撃波は拡がった電波源に対応すると考えられる。

ブレーザーのファイアボール

1. ブレーザーでのファイアボールはいくつかの点でガンマ線バーストのものとは異なる。まず、降積円盤でファイアボールができるとするとそのサイズは $10^{14}\mathrm{cm}$ 程度と大きい。このため、完全に熱平衡にあるとすると温度は $10^{6}\mathrm{K}$ 以下であって、電子陽電子対は存在しない。ローレンツ因子を 10 まで持っていくためにはバリオンの量は非常に小さくなくてはならず、散乱に対して光学的に薄くなってしまう。これは単に輻射の塊に過ぎず、物質は加速されない。ファイアボールの光学的厚さを大きくするためには、温度を十分高くして電子陽電子対を多量に作ればよい。エネルギー収支からしてこのときの光子分布はプランク分布に比べ光子数の非常に少ない状態でなければならない。いわゆる 2 温度円盤で軟光子量が少なく電子温度が相対論的になり、かつ電子陽電子対が多量に存在する状態を考えればよい。
2. 降積円盤の物質について平均すればバリオン 1 個あたりのエネルギーは非相対論的にとどまるので、電子陽電子対だけを外部に取り出して粒子 1 個あたりのエネルギーが相対論的になるような状態を作り出さねばならない。降積円盤にこのような状態が実現されるかどうか、これができたとして電子陽電子対だけ取り出せるかどうか、この可能性は一見ほとんどありそうもないように思えるが、それほど捨てたものでもない。電子陽電子対と陽子とのクーロン結合は弱いからこそ 2 温度状態になっているのであり、電子陽電子対はむしろ光子と強く結合しているともみなせる。電子陽電子対が自由に近く円盤から脱出できれば、円盤中の対密度はかなり大きくなれることも示唆されている。もちろんこれらの定量的検討は今後の大きな課題として残されている。

3. もし、このような初期状態が用意されたとすると、ファイアボールは断熱膨張して内部エネルギーを運動エネルギーに転化し相対論的な流れができることになる。簡単のため、バリオンのない純粋な電子陽電対と光子のファイアボールで、光子分布がウィーン分布で記述されるものとして、球対称定常流の様子を解析的および数値的に調べると次のことがわかる。

4. 散乱に対する光学的厚さが厚い間は 1 流体近似が成立し、温度の下降に伴い流れは熱的に加速される。光学的厚さが 1 になる光球の位置はほぼ対消滅と対生成の平衡が切れる位置ともなる。光球での温度が相対論的ならば、光子数と対の数はほぼ同じ、非相対論的ならば対の数は光子数より少なくなる。前者の場合、対の運動学的光度は輻射光度の 2 倍程度、後者の場合でも 3 分の 1 程度になる。もちろんファイアボールの描像が成立するためには球面積分した全光度はエディントン光度の 100 倍といった光度が必要である。

5. 現実のジェットはコリメートされて立体角はかなり小さいので、実際の全光度はエディントン光度程度 (あるいはそれ以下) でもよい。但し、コリメーションの機構は不明である。初期にある程度コリメーションされていれば、一旦相対論的になると慣性運動だけでよいので、これはファイアボールのでき方とも関係する。これも今後の課題である。

6. これまで電子陽電子対説の難点として、コンパクトな領域で対を作ると対消滅してしまうこと、周囲の輻射による減速が大きいことの二つがあげられていた。ファイアボールモデルでは高温にして対生成を同時に考えることで前者の困難を避け、ファイアボールの光球からの輻射が光球の相対論的運動によって強くビーミングしていることで後者の困難を避けている。光学的に薄い領域でも輻射は対の加速に寄与している。

7. このファイアボールの一つの予言は必然的に光球からジェットパワーと同程度の MeV ガンマ線放射を伴うことである。このエネルギー領域の観測はまだ本格的なものがないので、現在の段階ではなんともいえないが、これまでも Mev ブレーザーと呼ばれる天体がいくつか知られていることは興味深い。今後の観測的進展が待たれる。