電子・陽電子対ジェット生成

浅野勝晃（国立天文台）、高原文郎（大阪大学）

概要

火の玉モデルによるジェット加速を念頭に、輻射輸送を考慮した、高温プラズマ中での電子・陽電子対生成、流出の二流体計算を行った。今回の例では、流出する電子・陽電子対の量は活動銀河核からのジェットを説明する上で十分な量であったが、温度がやや低くなった。今後の計算で、より高温の火の玉を作ることができるかどうかを明らかにしていく予定である。

イントロダクション

活動銀河核（AGN）からの相対論的ジェットを作るメカニズムは全く分かっていない。磁気流体力学に基づく数値計算が多数なされているが、ローレンツファクター（Γ）が 10 に達する流れを実現できた例はない。一方、火の玉モデルはガンマ線バースト（GRB）の超相対論的な流れを説明するために導入された。輻射優勢な流体が加速膨張し、輻射とガスの相互作用が切れた時に、その加速は終了する。この加速メカニズムには物理的な曖昧さは全くなく、自然に大きなΓを実現する。しかし、AGN では GRB のような完全な熱平衡に達している高温プラズマを作る物理的状況にはない。

様々な観測からジェットの成分は電子・陽電子対（ペア）プラズマである可能性が指摘されている。AGN の高温降着円盤内では、ガンマ線からペアを作ることができる。ペアと光子は完全な熱平衡に達することはないが、Wien 平衡状態を成す可能性がある。ペアと光子が Wien 平衡になっており、火の玉の温度が電子質量程度になっていれば、Γ～10 の流れを実現でき、ペアも対消滅することなく、生き残る（Iwamoto & Takahara 2002, 2004）。

本稿では、上記で述べた Wien Fireball を実際に作ることができるかどうか調べるため、二流体数値シミュレーションを行った結果を報告する。

数値計算

降着円盤が粘性によって加熱されている様子をシミュレーションしたいが、ここでは簡単のために１次元の輻射流体シミュレーションを行う。電子と陽子からなる 1.5×10^{14} cm、10^{10} 個/cc の一様なプラズマ球を考える。このプラズマ全体を一様に加熱率 L [erg/s]で加熱する。この背景プラズマとは別に光子の対消滅によって生まれたペアプラズマを考え、二流体近似の元で計算を行う。考える物理過程はクーロン散乱、制動放射、電子・陽電子対消滅、同対生成、コンプトン散乱である。輻射輸送はモンテカルロ法で解き、ペア流体の運動は相対論的な連続の式、エネルギー・運動量保存の方程式を解く。

運動するペア流体と背景流体の間にはクーロン散乱に起因する摩擦力が働くが、この値を評価するために別途計算を行い、低速側の近似

$$\left.\frac{dP}{dtdV}\right|_{e-p} \cong 2.0\times10^{-15}\left(\frac{\mathrm{U}}{0.01}\right)\mathrm{n}_{+}\mathrm{n}_{\mathrm{p}}\theta_{+}^{-1.3}m_{e}c$$

$$\left.\frac{dP}{dtdV}\right|_{\pm-e} \cong 5.2\times10^{-15}\left(\frac{\mathrm{U}}{0.01}\right)\mathrm{n}_{+}\mathrm{n}_{\mathrm{p}}\theta_{+}^{-1.3}m_{e}c$$

を得た。ここで U は二流体間の四元相対速度、n はそれぞれの密度、θ_{+}は電子質量で規格化したペアの温度である。

結果

加熱率 L が 10^{46} 、3×10^{46} 、10^{47} erg/s の 3 通りについての結果を図 1 に示す。

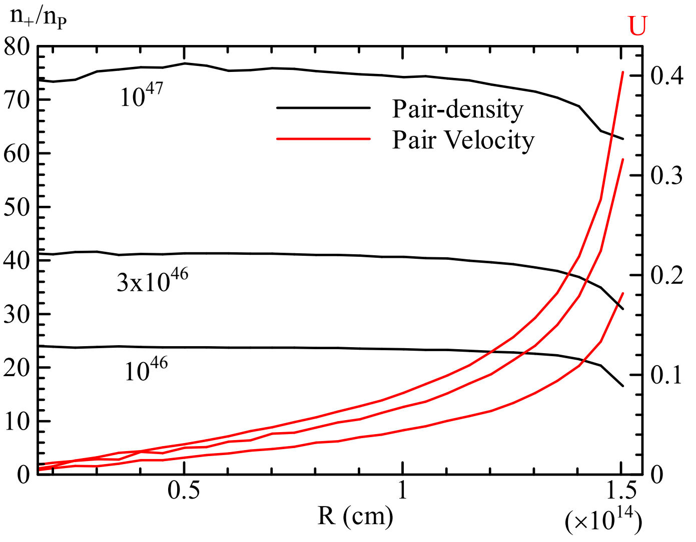

図 1　ペアの密度と速度 U

L の増加と共に、密度も上昇していく。速度 U（右縦軸）は外側に向かって徐々に加速している様子がわかる。速度は L の上昇と共に増加しているが、概ね光速の数割である。輻射による外向きの力は強力だが、摩擦力と競合し、相対論的な速度にまでは至っていない。

図 2 にはペアの温度を示す。密度が上がると、輻射による冷却が効くので、L の増加と共に温度は下がっていく。外側ほど温度は高くなるが、電子質量の 0.2 倍程度である。10^{47} erg/s の場合、このガス球の表面での質量放出率は 3×10^{45}erg/s となり、$\eta=L/\dot{M}\sim30$ である。表面での光子の平均自由行程も 10^{12} cm となり、いわゆる火の玉モデルと近い状況となっている。しかし、図 3 からわかる通り、大量のソフトな光子が存在し、プランク分布のような形ではない。エネルギー分布のピークを温度に換算するとペアと同様に 0.2 程度である。

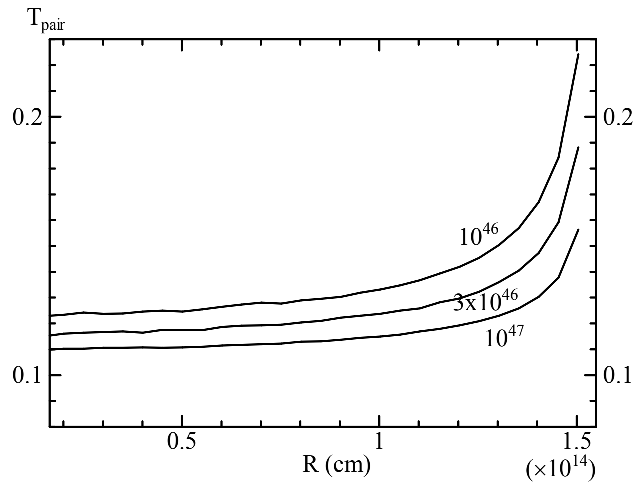

図２　ペアの温度分布（電子質量で規格化）

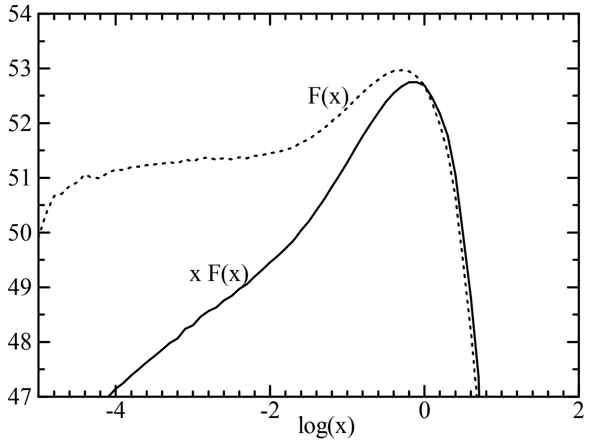

図３　表面からの光子のスペクトル

議論

火の玉の初期温度が低すぎると、加速の途中でペアが対消滅して減少してしまう困難がある。Wien　Fireball モデルでは電子質量程度の温度を想定しているが、今回の結果はそれよりも若干低い値となっている。L の増加が密度の増加をまねくため、温度が低下するという逆説的な傾向がこの原因である。しかし、ペアの加速がより速やかになれば、ペアの密度が減少する可能性がある。今回の計算では大きなクーロン摩擦力がプラズマの加速を妨げていた。実際には背景プラズマ密度は一様ではなく、勾配をもつであろう。この場合、低密度領域では速やかな加速が起き、高温の火の玉を作れるかもしれない。

参考文献

Iwamoto & Takahara 2002, **ApJ** 565, 163

Iwamoto & Takahara 2004, **ApJ** 601, 78