

銀河団の非熱的電子による逆コンプトン散乱の放射スペクトル

春山慶太（宇宙物理学教室）

宇宙は様々な天体によって構成されており、その中でも銀河団は最大級の天体である。銀河団は、ダークマター、銀河、熱的粒子、非熱的粒子などから構成される。現在、ローレンツ因子 $\gamma \sim 10^4$ をもつ非熱的電子の存在が多くの銀河団で確認されていることから、宇宙の構造形成過程において普遍的に非熱的粒子が生成されてきたと考えられている。しかし現状では、非熱的粒子についての情報源はシンクロトロン放射のみであり、それだけでは密度や起源などの詳細はわからない。そこで宇宙マイクロ波背景放射光子と銀河団中の非熱的電子の間で起こる逆コンプトン散乱による放射が注目されている。今後、硬 X 線で逆コンプトン散乱による放射が観測されれば、シンクロトロン放射との組み合わせで密度や磁場がわかることが期待される。また、 $\gamma \sim 100$ の電子は、 $\gamma \sim 10^4$ の電子に比べて寿命が長いと考えられるため、 $\gamma \sim 100$ の電子が起源である紫外線領域における逆コンプトン散乱のスペクトルについて調べることも重要である。

そこで本研究では、逆コンプトン散乱による放射をはじめ制動放射やシンクロトロン放射などのスペクトルの数値計算を行い、様々な波長帯で、どのような条件のもとで、どの放射が優位になるのかを調べた。また、逆コンプトン散乱による放射の時間変化についても考察した。一連の数値計算では、逆コンプトン散乱に対して従来用いられてきた近似解ではなく厳密解を用い、熱的制動放射は相対論的な補正を考慮した。その上で、かみのけ座銀河団中で観測されたスペクトルをもとに、硬 X 線などで逆コンプトン散乱による放射が観測されるために必要な条件を調査し、示唆されている上限との比較をした。

その結果、逆コンプトン散乱による放射スペクトルの厳密解の計算は、より低エネルギー・低周波数で近似解との差が大きくなり、厳密解による数値計算が必要であることがわかった。また、熱的制動放射の数値計算では、硬 X 線領域において、相対論的な補正を行う前後で 70% 程度の差が生じることがわかった。

硬 X 線で逆コンプトン散乱を捉えるためには、銀河団の中心よりも外縁部の方が熱的粒子が低密度で、熱的制動放射が弱くなるため、逆コンプトン散乱による放射が優位になりやすいことがわかった。また、紫外線では、熱的制動放射に比べて逆コンプトン散乱による放射が卓越することが示唆された。一方、硬 X 線での非熱的制動放射は他の放射に比べて弱いため、観測するためにはより正確に他の放射を求める必要があると考えられる。時間発展に関しては、 $\gamma \sim 10^4$ の高エネルギー電子が生成されてから、低エネルギーに落ち込み、熱的制動放射が卓越するまでの時間と、移流の速度が約 100 km/s であるという仮定のもとで、非熱的電子は生成された場所から 10 kpc 程度の範囲に存在する可能性が示唆された。

さらに、かみのけ座銀河団の中心部から Mpc 程度の地点におけるシンクロトロン放射の観測データから、非熱的電子の分布関数のべき指数が 3.5 程度になることが示唆され、非熱的電子のエネルギー密度が熱的電子の 1 割程度、磁場が $10^{-2} \mu\text{G}$ 程度の場合に、逆コンプトン散乱による放射は硬 X 線で熱的制動放射よりも優位になることがわかった。

超大質量ブラックホール周りにおける潮汐破壊現象の再現に向けた SPH コードの構築

御簾納俊徳（宇宙物理学教室）

ブラックホールとは、その強大な重力故に直接の観測が困難な天体である。その中でも、太陽質量の $10^5 \sim 10^{10}$ 倍程度の質量を持つものは超大質量ブラックホール(Super Massive Black Hole: SMBH)と呼ばれ、一般相対性理論のテストなど、それを研究対象とするモチベーションは数多い。しかし現在、これらの観測は AGN(Active Galactic Nuclei)など極端な状況に限られており、それらは存在している SMBH の約 1 % 程にも満たないと考えられている。よって、多くの SMBH についての性質を知るためには、これらとは独立な方法を用いる必要がある。

そこで、本研究では SMBH 近傍を通る天体の潮汐破壊現象に着目し、それをコンピュータシミュレーションを用いて再現することを目的として、流体コードの構築を行った。ここで、本研究では、空間 3 次元における計算が容易で、かつ計算量が比較的少ないという利点から、流体計算法として SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法を採用した。

まず初めに、連続の式、運動方程式のみを解くコードを開発し、それを非平衡形状かつ冷たいガス雲の衝突のシミュレーションに適用した(図 1)。次に、潮汐破壊現象では、強い圧縮や衝撃波による加熱によって温度上昇が伴うと考えられる為、内部エネルギーの時間発展も考慮したコードを作成した。その際、数値不安定性を緩和する為、人工粘性項の挿入も行った。

次に、構築したコードを潮汐破壊現象に適用した。その際、非平衡形状の天体では、自己重力によっても変形が生じてしまう為、潮汐力に依るものと判別が困難になってしまう。よって、初期条件として平衡形状なガス球を配置する必要があるのだが、SPH 法によるこれらの計算方法は、現時点で確立されていない。そこで、本研究ではまず作成した SPH コードを用いて、平衡形状球の再現を行った。その際、球を任意の球殻数で分割し、各球殻での粒子数を変化させることで、Lane-Emden 方程式に従うような密度分布を近似的に構築した(図 2)。その後、そのコードを時間発展させた結果、自己重力による収縮が生じてしまうという結果が得られた。そこで、初速度による過剰な収縮を抑える為、速度に比例する粘性項を挿入した。それにより、粒子数 2000 個を用いたシミュレーションにおいて、平衡形状球の密度分布を十分再現する定常的な結果を得ることに成功した。そして、そのコードに外力として、Kerr 計量における疑似ニュートンポテンシャルを挿入することで、潮汐破壊現象の再現を行った。

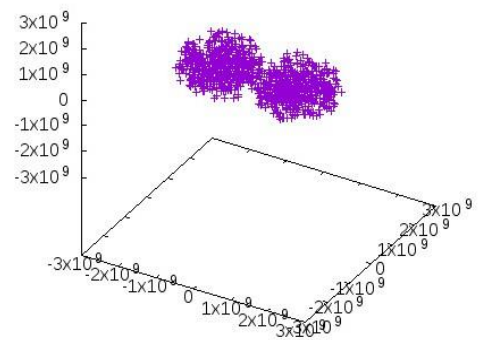


図 1. ガス雲の衝突シミュレーション

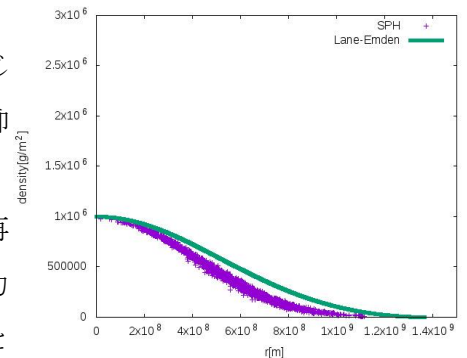


図 2. 密度分布の比較