

## 一般相対論的 6 次元 Boltzmann 輻射輸送計算コードの開発

小川拓未 (筑波大学)

利用カテゴリ    利用カテゴリ XC-B

以下に成果の概要を記入してください。ページ数に上限はありませんが、最終的に提出される PDF のファイルサイズの上限は 2 MB です。

Summarize your achievement in this document. Though there is no page limitation, eventual size of the file must not exceed 2 MB in the PDF format.    ブラックホールへの超臨界降着流 (質量降着率がエディントン限界を超える降着流) は、超高光度 X 線源 (Ultra-Luminous X-ray sources, ULX) やマイクロクェーサー、潮汐破壊による突発的増光現象 (Tidal Disruption Event, TDE) など、エディントン光度以上の光度を持つコンパクトな天体現象を説明する有力なモデルとなっている。また、超臨界降着流は宇宙初期の超巨大ブラックホール形成において重要な役割を担っているとされており、特に、数百太陽質量の種族 III の星から超巨大ブラックホール (百億太陽質量) への成長には不可欠とされている。超臨界降着円盤は輻射圧優勢の光学的に厚い円盤であり、そこからは非常に大量のアウトフローが吹き出すとされているため、解析のためにはアウトフローによるコンプトン散乱などを考慮した輻射輸送計算が不可欠である。

超臨界降着流のシミュレーションは、Ohsuga et al. (2005)[?] で行われた 2 次元軸対称非相対論輻射流体シミュレーションに端を発し、現在では一般相対論を考慮した輻射磁気流体シミュレーションが最先端で行われている。しかし、現在最先端に行われている研究であっても輻射とそれに伴う大量のアウトフローとの相互作用において重要な熱的コンプトン散乱の効果に関しては、光子の分布をプランク分布と仮定して輻射流体計算に組み込んでいるものがほとんどであり、観測されるスペクトル (プランク分布では無い冪型に近い形) と矛盾するような仮定が使われているのが現状である。熱的コンプトン散乱の効果を実際に正確に取り入れるためにも、振動数の依存性を考慮した輻射輸送を組み込んだ輻射輸送計算が必要である。

このような現状を鑑みて、我々は最も基礎的な方程式である Boltzmann 方程式に従って輻射を解き、かつコンプトン散乱を厳密に解くことができるコードを開発した。具体的には光子の移流を実験室系において Boltzmann 方程式により解き、一方、散乱過程は光子モンテカルロ計算で得られた散乱分布を用いて流体静止系で解く。基礎方程式は Shibata et al. (2014)[?] で導出された一般相対論的 Boltzmann 方程式に従う。本研究では、一般相対論的輻射磁気流体計算 (GRRMHD) で得られた円盤の物理場を背景に輻射輸送計算を行い、従来のモーメント法による輻射輸送計算との比較を行った。背景場として使用したデータは高橋博之氏 (駒澤大学) の GRRMHD 計算によって得られた準定常的な状態の温度・速度・密度である。それらを流体場として熱制動放射・吸収、コンプトン散乱を考慮して輻射場が定常状態になるまで計算を続けた。

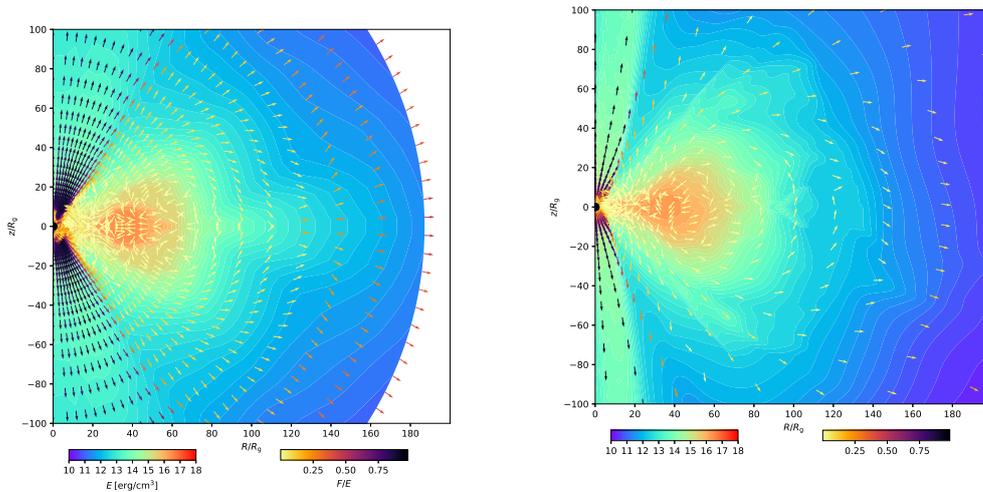


図 1: 輻射エネルギー密度のコンターマップと輻射フラックスのベクトルプロット。横軸は円盤面、縦軸は円盤軸を示している。左図: Boltzmann 輻射輸送コードによる計算。右図: Moment 法による計算。

図 1 では Boltzmann 法と Moment 法の比較を行っている。それぞれの方法で計算した輻射エネルギー密度のマップであるが、Boltzmann(左)のほうが軸付近の構造が広がっており、Moment 法(右)では軸付近の構造が絞られていることが確認できる。Moment 法は輻射に関する一種の流体近似のようなもの (Boltzmann 方程式の 1 次のモーメントをとった方程式を解く) であるので軸付近では円盤から出た放射が衝突し衝撃波領域のようなものを形成しているためである。Boltzmann 法では光子同士は衝突することはなく、円盤から軸方向に向かった光子はすれ違って軸の反対側に移動できるため、エネルギー密度に大きな不連続が現れず、広がった構造を持っている。

また、今回は振動数依存性も解いているため従来の熱的コンプトン散乱の計算法での過程 (=プランク分布仮定) が実際の輻射場とどれほど違っているかも検証することができる。その結果、従来の方法では軸から少し離れたジェットファンネルの部分で最も熱的コンプトン散乱の値を間違えていることが確認でき、1 桁以上熱的コンプトン散乱の寄与を間違えてしまうことが確認できた。