

学位論文要旨

Stochastic Gyroresonant Acceleration for Hard Electron Spectra of Blazars: Effect of Damping of Cascading Turbulence

統計的ジャイロ共鳴加速機構によるブレーザー領域の硬い電子スペクトルの解釈
における乱れ場減衰の影響

氏名: 格和 純

ブレーザーは、最大 Mpc の規模にまで達する活動銀河核からのジェットが、輸送するエネルギーの一部を pc 以下の領域で散逸した際に放射された電磁波が主に観測されている天体だと考えられている。この散逸領域はブレーザー領域と呼ばれ、観測されている電磁波のエネルギースペクトルは電波からガンマ線まで広帯域に渡る。発見より半世紀ほどの間に我々は、その放射を担っているのがエネルギー空間で数桁の範囲に渡る幂的なエネルギー分布に従った非熱的な相対論的電子である、という共通理解に達している。しかしながら、そのような高エネルギー電子はいかにしてエネルギーを獲得したか。その機構を原理的な立場から無矛盾に説明するには至っていない。

本論の最も基本的な目的は、この未解決の問題に対する我々の理解の前進である。候補とされる機構は提唱されている。これまでに得られた観測的示唆に基づき、この 10 年ほど注目を集めつつあるのが一般に統計的加速機構 (stochastic acceleration: SA) と呼ばれる機構である。SA では乱れた背景プラズマ中で粒子群が平均として加速を受ける。SA の観測的示唆の中で特に強い関心を集めているのは、数 10GeV–数 TeV 帯域において取得された、極度に硬い放射のエネルギースペクトル (spectral energy distribution: SED) である。その検出以来、それが SA の著しい特徴の一つである、極度に硬い電子エネルギー分布の形成を示しているとする解釈が可能性の一つとして提唱されている。その硬い電子分布は、集積分布と呼ばれ、SA によって形成される分布形状の一つとしてよく知られている。実際に SA を考慮したブレーザー領域からの放射の計算によって極度に硬い SED の再現性は既に検証が行われており、SA に対し肯定的な結果が報告されてきた。

しかしながら現在のところ、ブレーザーにおける SA の検証はその全てが、被加速粒子をテスト粒子として扱う定式化に基づいている (例えば Katarzyński et al. 2006, A&A)。本論はこの点に着目して新たに、非テスト粒子的効果である、SA に伴う乱れ場の減衰効果を取り入れた、より自己無矛盾な計算を行う。本論の目的は、乱れ場の減衰を考慮することによって、極度に硬い SED を説明すると期待されてきた電子の集積分布の形成が (どのように) 変更を受けるのかを明確に示し、ブレーザー放射の SA による解釈の可能性に関する新たな知見を得ることにある。ブレーザーにおける従来のテスト粒子計算の制約について言及した唯一の例として Kakuwa et al. (2015, MNRAS) が挙げられるが、彼らも実際に実行したのはテスト粒子計算である。また特別硬くない代表的な SED に対して SA を検証している点も本論とは目的を異にする。

本論では具体的には、SA の一種である統計的ジャイロ共鳴加速 (stochastic gyroresonant acceleration: SGA) 機構による乱れ場の減衰及び電子加速を考慮し、従来の集積分布の形成が期待されるパラメータ領域において、電子エネルギー分布の形成を再考する。SGA は背景プラズマ中の乱れた電磁場を構成する波動とのジャイロ共鳴相互作用を通して粒子が統計的に加速される加速機構であり、素過程が詳細に調べられている代表的な加速機構である。そのためブレーザー

の文献において可能性がしばしば言及されてきた。SGA によって十分なエネルギー範囲に電子が分布するためには、乱れ場も相応に広い波数域で形成される必要がある。その形成はコルモゴロフ (Kolmogorov) 型のエネルギー輸送を仮定した上で、乱れ場の発展のモデル方程式を解くことで計算に考慮される。扱うモデル方程式系自体は、SA の宇宙物理学における応用上比較的広く流布したものであり、特別新規なものではない。しかしながら集積分布の形成と乱れ場の減衰の関係について明確に議論した例は、このモデルの他天体への適用例を含めてもない。また上述のように、ブレーザー領域に対しては、集積分布の形成は元より減衰が考慮された例もなく、被加速粒子の非テスト粒子的振る舞いの重要性は認識されてこなかったのが現状である。

論文の第 1 章では、上述の極度に硬い SED に加えて、ブレーザー領域での電子加速に関する旧来よりの課題である典型的な SED の形状の問題や、電子加速時間に関して言及した文献を挙げながら、近年ブレーザーで SA が検証されてきた動機、及び本論の目的について簡潔に述べる。

第 2 章では、テスト粒子を仮定して SA をブレーザーに適用してきたいいくつかの先行研究を取り上げる。それらが SED の再現に成功したと報告しているパラメータ値を使って、単純な単一領域の SA モデルの適用では乱れ場の減衰が有意であること、すなわちテスト粒子計算が破綻している可能性があることを、コルモゴロフ型のエネルギー輸送率と SGA を仮定した場合の結果として示す。

本論で採用する、乱れ場、被加速電子、光子それぞれの輸送方程式を第 3 章で導入した後、第 4 章ではこの系の定常解を、集積分布を形成するとされてきたパラメータセットに対して示す。そして減衰の影響とその普遍性について考察する。

第 5 章が本論のまとめである。さらに付録として、SGA による粒子エネルギー分布の輸送係数の一つである運動量拡散係数の導出が、極めて簡便な手続きで、直感的に理解しやすい形で示してある。

本要旨の冒頭で述べた問題に対して本論が明確にした主要な成果について述べる。SA が形成する極度に硬いエネルギー分布としてよく知られる集積分布の形成及びその SED への適用においては、テスト粒子の仮定が本質的な役割を担っている。非テスト粒子的効果である乱れ場の減衰を考慮し、かつ SA の具体的機構として代表的な SGA を考えた場合、集積分布の形成は妨げられ、テスト粒子的扱いで期待されるほど電子分布は硬くはならない。到達可能な硬さは主に乱れ場のエネルギー輸送率によって決まっている。例えば集積分布の電子指数 +2 は、コルモゴロフ輸送率を仮定した場合 -1 に変更を受ける。従ってこの場合、従来 SA に期待されてきたほどの硬さの SED は実現されない。

第 2 章で示す計算と関連した本論の発見的成果と発展的課題について述べて結ぶ。乱れ場の強度を可能な最大値にした場合でも、また本来減衰は効かないと推測される、集積分布形成とは真逆の場合 (すなわち乱れ場の強度が弱く電子の系外への脱出が効率的な場合) でも、単一領域放射モデルでは減衰が有意と見積もられた。このことは SED モデリングにおいて、自己無矛盾な計算には本論が考慮した乱れ場と被加速電子との相互作用だけでなく、加速過程への電子の注入率の与え方も慎重に見直す必要があることを示唆する。注入電子は十分加速された電子とは異なるモードの波動と相互作用し、そしてその波動の性質は熱的プラズマの性質と関係する。すなわち注入過程を見直すことは、被加速粒子よりも一層未解明の、ブレーザー領域における熱的プラズマの性質の理解に繋がる可能性を内包している。この周辺の問題はほとんど明らかにされていない問題であり、困難であると共に全容解明には避けては通れない問題である。