

論文内容の要旨

論文題目

Investigation of the sources of ultra-high-energy cosmic rays with numerical simulations

(数値シミュレーションを用いた超高エネルギー宇宙線源の探索)

氏名 高見 一

最高エネルギーが 10^{20} eV にも達する最高エネルギー宇宙線はその観測的発見以降多くの科学者の興味を引きつけてきた。世界最大の人工粒子加速器 LHC の最高エネルギーを 3 桁以上凌駕するこのような宇宙線がどこでどのように作られているかという疑問は、宇宙線物理学最大の問題の一つであり続けてきた。

理論的に多くの可能性が提示されてきた中で、超高エネルギー宇宙線の起源がいまだに理解されていない理由の一つは観測手段の欠如である。天文学は光を見ることでその光の起源を理解してきた。超高エネルギー宇宙線のプローブとなり得る光はガンマ線だと考えられるが、ガンマ線はハドロン過程からもレプトン過程からも生成され得る。従って、宇宙線起源で起こっているガンマ線と超高エネルギー宇宙線を結びつけている物理を完全に理解しない限り、ガンマ線は超高エネルギー宇宙線の直接的な証拠にはならない。天体からの超高エネルギーニュートリノはニュートリノがハドロン起源であることから直接的な超高エネルギー宇宙線生成の証拠になり得るが、現在地球上に存在する最も大きなニュートリノ観測器でも超高エネルギー宇宙線起源を解明できるほどのニュートリノイベントの観測は実現できていない。

本博士論文では、超高エネルギー宇宙線の起源の観測手段として超高エネルギー宇宙線そのものを用いるアプローチについて議論した。宇宙は微弱ながら磁場を持っているため、荷電粒子である宇宙線は直進して地球に到来することができない。しかし一方で、粒子のエネルギーが高くなるほど磁場によって軌跡が曲げられる効果は小さくなるので、このようなアプローチが可能であるかどうかは宇宙空間に存在する磁場の強さに依存する。

近年の超高エネルギー宇宙線観測の結果はこの可能性を肯定している。Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) は 1999 年に宇宙線の最高エネルギー成分に有意な非等方性を見つけているし、2007 年には Pierre Auger Observatory (PAO) が非等方性に加え、銀河系外の近傍天体と最高エネルギー宇宙線の間位置相関を報告している。これらの観測結果は超高エネルギー宇宙線到来方向分布にその起源の情報が埋め込まれていることを示唆している。

超高エネルギー宇宙線の観測結果をその起源での物理に結びつけるためには、地球までの宇宙線

の伝搬過程が本質的である。とりわけ最高エネルギー成分は伝搬中に宇宙背景放射光子と反応を起こし急速にエネルギーを失うため、地球で観測できる超高エネルギー宇宙線の最高エネルギー成分はせいぜい 100Mpc 以内からしか飛来できない。このことは、100Mpc 以内の宇宙の非等方な構造が地球での超高エネルギー宇宙線の到来方向分布に反映されることを意味している。

本博士論文では、近傍宇宙の物質構造と磁場構造を考慮したモデルを元に超高エネルギー宇宙線の伝搬を計算し、到来方向分布をシミュレーションした。このシミュレーションで得られた結果を用いて、超高エネルギー宇宙線の観測データからその起源についてのどのような情報が引き出せるか議論した。

まず、PAO の観測結果である 5.7×10^{19} eV 以上の宇宙線到来方向分布の非等方性の統計的な再現性から、近傍宇宙の超高エネルギー宇宙線起源天体の数密度を 10^{-4}Mpc^{-3} 程度と見積もった。この値には現在までに観測された超高エネルギー宇宙線イベントが少ないことに起因する不定性が一桁程度存在するが、Fanaroff-Reilly (FR) 2 銀河や blazar といった希少数密度を持つこれまで期待されていたいくつかの起源天体候補が少なくとも地球に到来する超高エネルギー宇宙線の大部分を占めていることはない結論できた。また、この値は明るい銀河などの「普通」の天体の数密度より二桁程度小さいことから、超高エネルギー宇宙線生成は宇宙にありふれた現象でもないということが具体的に示された。 10^{-4}Mpc^{-3} という値は理論的な起源天体候補である FR 1 銀河の数密度と同程度である。このことから、FR 1 銀河が観測データをパスする起源候補の一つであると結論できる。

PAO のもう一つの観測結果である 10^{19} eV 以上の宇宙線到来方向分布の等方性もまた超高エネルギー宇宙線起源に関する情報を持っている。この等方性は 5Mpc 以内に超高エネルギー宇宙線の起源があると破られる。また、このような最近傍ソースを意図的に除いたとしても上で制限した数密度を持つ起源モデルではこの等方性が説明できないことがわかった。この等方性を再現するためには一桁以上多い 10^{-2} - 10^{-3}Mpc^{-3} が必要である。この結果を自然に解釈すると最高エネルギー宇宙線の起源天体の他に最大加速エネルギーが 10^{19} eV 程度の超高エネルギー宇宙線源が多数存在することになる。その他に等方性を再現するシナリオとして、各ソースの最大加速エネルギーに分布を持たせるシナリオと、宇宙線生成が突発的であるというシナリオを提案した。

また、将来の観測イベントの増加で宇宙線源の姿が宇宙線到来方向分布の中に見えてくる可能性についてシミュレーションを用いて検討した。その結果、たとえ銀河系外の磁場を考慮したとしても、全天で 1000 イベント程度の最高エネルギー陽子を検出することができれば、近傍の宇宙線源の姿が宇宙線到来方向分布として 2 度程度の広がりを持って見えてくることを示した。銀河系内の磁場は宇宙線軌跡の曲がりやに寄与するが、この特徴を大きく歪めるものではない。

最後に超高エネルギー宇宙線伝搬における副生成物であるニュートリノについて議論した。どの程度のエネルギー以上の宇宙線が銀河系外宇宙線であるかという問題が長らく議論されているが、このニュートリノのスペクトルがこの問題を解く鍵になることを示した。また、ニュートリノは宇宙背景放射に邪魔されることなく宇宙論的距離から到来できることから宇宙論的な距離にある超高エネルギー宇宙線源についての情報を持っていると期待される。計算によれば 10^{18} eV のニュートリノフラックスは超高エネルギー宇宙線源の宇宙論的進化のモデルにのみ依存するので、このエネルギーでのニュートリノフラックスが超高エネルギー宇宙線源の宇宙論的進化のモデルのプロープになることを示した。