

論文内容の要旨

論文題目 Cosmic Microwave Background Constraint on Neutrino Masses
(ニュートリノの質量に対する宇宙背景放射からの制限)

氏名 市川 和秀

ニュートリノの質量の絶対値に対する上限は、トリチウムのベータ崩壊実験のスペクトルの端点を調べることで求められている。しかし、この方法で制限を 1 eV 以下に下げることが難しい。代わりに期待できるのは宇宙論的な方法で制限をつけることである。ニュートリノ質量の宇宙論に対する影響は、密度ゆらぎに対するものが大きく、とくにフリーストリーミングによって小さいスケールのゆらぎを消してしまうというものである。物質の密度が小さい宇宙においてはこの影響は特に大きく、銀河クラスターの存在量から得た小スケールのゆらぎの情報を宇宙背景放射 (CMB) から観測される大スケールでのゆらぎと比較する方法や、銀河のパワースペクトルの形から小スケールのゆらぎを知る方法によって 3 世代の合計で数 eV 程度という上限が得られてきた。

この他にもニュートリノ質量は CMB の温度ゆらぎに対しては中間的なスケールで特徴的な影響を与える。これは単にゆらぎを消すというよりも、CMB におけるアコースティック振動や動的ザックス・ヴォルフェ効果への影響を通じて引き起こされる。WMAP による CMB 観測のデータが発表された以降のニュートリノ質量への制限は、2dFGRS の銀河のデータと合わせることによっては 0.7 eV、SDSS の銀河データとのものは 1.7 eV (いずれも 3 世代合計) という上限である。しかし、宇宙論データをいくつか組み合わせて扱うときには、解析結果がどの観測のどのような特徴によって現れたのか、どんな仮定が効いているのかといったことが不明瞭になるという問題がある。

よって、CMB (WMAP) データだけでどれだけの制限が与えられるのかを調べるのは非常に重要である。特に、WMAP だけからのニュートリノ質量の制限として、予想の段階ではある程度の制限が与えられると考えられていたが、実際にはゆるい制限しか与えられない (ダークマターが100%ニュートリノでも許される) という解析結果がでており、さらなる解析、考察をする必要がある。また、銀河のデータに関してはバイアスや非線形効果といった不定性が常につきまとうのに対して、CMB のデータは将来計画されている PLANCK の観測によって精度が上がるのが保証されているため、CMB のデータだけでニュートリノ質量の制限を調べることは大変意味がある。

また、ニュートリノ質量に対する上限を求める際には平坦な宇宙を考えることがほとんどであるが、この仮定が制限に影響するかを調べることも重要である。宇宙が平坦に極めて近いことはわかっているが、ある程度の平坦性からのずれは許されているからである。たとえば、2%だけ平坦宇宙からずらしただけでハッブル定数の推定値は平坦な場合の推定値を大きく下回り、全体としてはよいフィットを与えるということもありうるのである。さらに、ニュートリノ質量が CMB に与える影響が曲率の変化による影響によって打ち消され、制限がゆるくなりうる兆候もあるため、より詳細な解析によって是非を調べる必要がある。

このような背景、動機の下、本論文では宇宙背景放射のデータのみから、ニュートリノ質量の上限が 1eV 以下であることを示した。宇宙が ΛCDM モデルで記述され、初期ゆらぎのスペクトルが断熱的でスケールに対して巾則に従うという標準的な枠組みを仮定した。宇宙背景放射以外の宇宙論的または天体物理的データは使用していない。

平坦な宇宙を仮定すると、現在の WMAP の観測データによる3世代のニュートリノ質量の和の上限が95%の信頼度で 2.0eV であるという結果を得た。これは各世代のニュートリノ質量が同じだとすると、ある世代のニュートリノの質量の上限は 0.66eV であることを意味する。また、この制限が平坦性の仮定を外してもほとんど変わらないことを示した。

この上限が、PLANCK による次世代の背景放射データでどれくらい改善されるかを見積もり、3世代の和として 1.5eV 程度までは背景放射のデータのみで上限を下げうることを議論した。これは cosmic variance のみによる原理的に存在する不定性である。より強い制限を得るための背景放射以外のデータとして、ハッブル定数が下から制限されることが非常に有効であることを指摘した。

また、なぜ背景放射のみで上記の程度の制限が得られるのかについて議論するため、ニュートリノ質量が背景放射のゆらぎに与える影響を計算し、他の宇宙論的パラメータの変化でニュートリノ質量の影響が打ち消されるかどうかを調べた。この結果、統計的

な解析によって得られた制限が直感的、物理的に妥当なものであることが理解された。すなわち、上記の制限の値はニュートリノが再結合（宇宙の晴れ上がり）の時にちょうど非相対論的になり輻射から物質として振る舞うようになる質量に対応している。いいかえると、もしニュートリノ質量がこの制限より大きければ、再結合前にゆらぎを消して重力ポテンシャルを減少させることになる。これはアコースティック振動の強制振動を増加させることになり、最終散乱面に大きな痕跡を残すはずである。WMAP はアコースティック振動を2番目のピークまで正確に観測したため、そのようなシグナルは否定され、上限がついたのである。