

# 宇宙論的なニュートリノ質量の制限： 宇宙大規模構造形成、 特に銀河クラスタリング分布の 担う役割と現状



齋藤 俊

〈カリフォルニア大学バークレー校天文学部 601 Campbell Hall, University of California, Berkeley, CA 94720, U.S.A.〉  
e-mail: ssaito@astro.berkeley.edu

近年の高精度な宇宙論的観測によりダークエネルギーをはじめとする宇宙の構成要素が明らかになったが、なかでも興味深い事実の一つは、ニュートリノ質量の最も厳しい制限が宇宙論的観測によって得られているということである。本稿では、ニュートリノの質量を決定することの意義と宇宙論的制限の担う役割について簡単にレビューし、宇宙の大規模構造形成、特に銀河クラスタリング分布を用いたニュートリノ質量の制限に関する現状を筆者らの研究成果を中心に報告したい。

## 1. はじめに

宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎなどの近年の精密な宇宙論的観測によって明らかになったこととして最も頻繁に挙げられる例は、現在の宇宙を支配するエネルギー要素の構成がわかってきたということであろう。その構成要素は73%のダークエネルギー・23%のダークマター・4%のバリオン（原子）であり、数%レベルの極めて高い精度で決定されている<sup>1)</sup>。現在進行中または近い将来の多種多様な宇宙論的観測によってこれら宇宙論パラメーターの決定精度はさらに向上すると期待されていて、それとともに目標もさらに高くなっている。その最たる例は宇宙を占める96%のダークな成分の正体を明らかにすることである

う。特にダークエネルギーの正体は、理論的にも不明瞭であり、宇宙論的観測のみによってその性質に迫ることができるという理由から、非常に多くの宇宙論的観測計画の多くが、ダークエネルギーの正体に迫るべく検討されているのは紛れもない事実である。

本稿の主題である有質量ニュートリノはダークマターの部類に入り<sup>\*1</sup>、23%のダークマターのうち、少なくとも0.1-2%分は有質量のニュートリノで占められていると考えられている。実はニュートリノが何%のエネルギー要素を占めているのかを明らかにすることはニュートリノの質量を決定することと同じことである。さらに本稿で注目する銀河の分光サーベイでは、ダークエネルギーを主目的とした観測計画であれば、同時に

\*1 ダークマターには歴史的に、‘冷たい’ダークマターと‘熱い’ダークマターという2種類が考えられていて、ニュートリノのように軽い粒子は速度分散が非常に大きく、‘熱い’ダークマターに相当する。またここでいうダークマターとは、バリオンと重力以外の相互作用をしない物質のことであり、素粒子標準模型には含まれない粒子という意味ではない。

ニュートリノの質量を厳しく制限または精度良く決定することができると期待されている。本稿ではまず、この0.1-2%程度という微小な量を精密な宇宙論的観測により正確に決定することにどんな意味があるのか高エネルギー物理学の立場から簡単に述べる。そのうえで、どのような宇宙論的観測によってニュートリノ質量が決定できるかを説明し、その具体的な例として、宇宙の大規模構造、特に銀河のクラスタリング分布を用いた方法の現状について筆者らのグループの研究成果をもとに議論したい。

## 2. ニュートリノ質量を決定する意義と宇宙論的役割

ニュートリノの質量がゼロではないという実験事実は、カミオカンデなどによるニュートリノ振動実験により明らかになった。この結果が与えたインパクトが非常に大きい理由は単純で、素粒子標準模型ではニュートリノの質量がゼロと仮定されているからである。つまりニュートリノが有限の質量をもつということ自体が素粒子標準模型の限界を示唆する証拠であり、ニュートリノがどれくらいの質量をもつか明らかにすることは素粒子標準模型を超える高エネルギー物理に迫る手がかりとなりうるのである。

ニュートリノ質量の制限における宇宙論的観測の担う役割を理解するために、地上の実験における測定可能量について触れておこう。一言でまとめれば、地上実験における観測可能量は、すべてニュートリノにおける3世代のフレーバーに関する量であり、各世代の質量固有値を直接観測できないという点が重要である。例えばニュートリノ振動実験では、質量固有値の2乗差のみが測定できるため、3世代の質量のうち質量の大きいニュートリノが1世代(順質量階層)なのか、2世代(逆質量階層)なのかは区別することができな

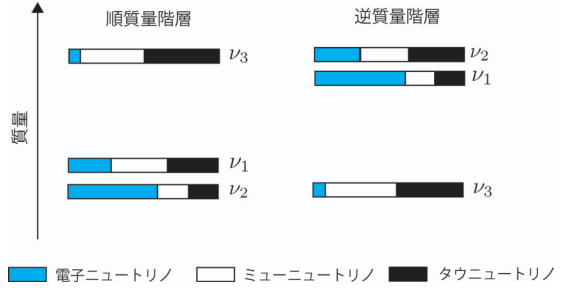


図1 ニュートリノの質量階層問題。1, 2, 3の添え字は質量固有値の世代、色の違いはそれぞれの質量固有値に対する各フレーバーの寄与を表す。振動実験で決定できるのは、各フレーバーが質量固有値にそれぞれどの程度寄与しているか(振動角パラメーター)と、各質量固有値の2乗差のみである。したがって、図のように2種類の階層性をもつ可能性がある。

い。これは一般にニュートリノの質量階層性問題と呼ばれる(図1)。どちらの質量階層であるかはどのようにニュートリノに質量をもたせるかという素粒子のモデルに依存するので、どちらの階層をもつか明らかになるだけでも重要である。他の地上実験の例においても、トリチウムのベータ崩壊エネルギースペクトルから電子ニュートリノの実効質量が、ニュートリノがマヨラナ粒子であればニュートリノなしの二重ベータ崩壊からも対応するニュートリノの実効質量がそれぞれ測定できるが、いずれもニュートリノ振動のパラメーターを介した量であり、質量固有値の絶対値を測定することはできないのである\*2。

一方、宇宙論的観測で対象になるのは、宇宙膨張の様子や大規模構造の進化といった重力の進化である。したがって宇宙論的な観測量は有質量のニュートリノが重力源としてどの程度寄与しているかに依存し、各世代のニュートリノの質量固有値の総和が測定できる。このように各世代の総和であるにせよ、質量固有値の絶対値を測定できる

\*2 最新の地上実験データに関しては、Particle Data Groupのデータベース (<http://pdg.lbl.gov/index.html>) を参照されたい。

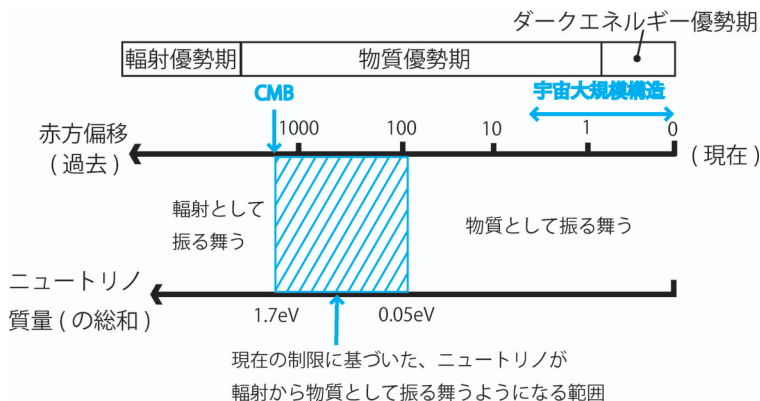


図2 ニュートリノの質量と、ニュートリノが輻射から物質として振る舞うようになる時期との対応。

という点で宇宙論的な制限は、地上の実験と相補的な役割を果たしている。そのうえ、宇宙論的観測で得られている制限、 $\Sigma m_\nu \leq 1.0 \text{ eV}$  (95% C.L.)、は、現在得られている地上実験でのニュートリノ質量の(各世代の総和に直した)制限、 $0.05 \text{ eV} \leq \Sigma m_\nu \leq 6.0 \text{ eV}$  (95% C.L.)と比較して、非常に厳しい制限を与えているのである。

以上のように、宇宙論的観測はニュートリノ質量を決定するうえで、質量固有値の総和の絶対値を唯一かつ厳しく測定する手段であり、その結果が与える高エネルギー物理学に対するインパクトも非常に大きい。以下では、宇宙論的観測によってどのようにニュートリノの質量が決定されるのかを簡単に見ていくことにしよう\*3。

### 3. 宇宙論的観測によりニュートリノの質量が測定できる原理

ニュートリノの質量がどのように宇宙論的観測によって測定されるかを理解するためには、質量をもつとはいっても非常に軽い粒子であるニュートリノが、非常に重い粒子である冷たいダークマター (Cold Dark Matter; CDM) と比較して二つの異なる特性をもつことに注目すればよい。

まず第1に、ニュートリノは宇宙膨張を引き起こすエネルギー源として、宇宙初期には光子と同様に輻射として寄与するが、時間が十分経って宇宙の温度がニュートリノの静止質量エネルギー程度にまで冷えると、CDM粒子と同様に物質として寄与するという点である。つまりニュートリノがどの程度の質量をもつかによって、ニュートリノがいつ輻射でなく物質として寄与するかが変わり、宇宙膨張の様子を変えることになる。具体的には、ニュートリノの熱的エネルギーと質量のバランスにより、赤方偏移にして約  $1,890 \times (m_\nu / 1 \text{ eV})$  の時期にニュートリノは輻射でなく物質として振る舞うようになる。図2に示したように、例えば宇宙マイクロ波背景輻射 (Cosmic Microwave Background; CMB) の温度ゆらぎを観測することによって、光子の最終散乱時である赤方偏移で約 1080 (宇宙が始まって約 30 万年後) の宇宙膨張の様子を測定することができる。もしニュートリノが光子の最終散乱時より以前に物質として振る舞うようになり宇宙膨張に影響を与えていれば、CMBの温度ゆらぎにも影響を与えているはずである。したがって、世代間の質量差が小さいとすれば、ニュートリノ質量の総和が  $3 \times 1,080 /$

\*3 宇宙論的なニュートリノ質量の制限に関する包括的なレビューとして、Lesgourgues氏とPastor氏による文献を挙げておく2)。

1,890 $\approx$ 1.7 eV 程度以上の質量があると CMB の温度ゆらぎからニュートリノの質量が決定できるということになる<sup>3)</sup>。実際に、最近の CMB 観測である Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) による結果では、 $\Sigma m_\nu \leq 1.3$  eV (95% C.L.) とよく似たものになっている。しかしここで強調すべきは、逆に言えば CMB だけでは限界があるということである。よく知られているように、CMB の温度ゆらぎと偏光の高精度な観測により、ダークマターやバリオンの密度パラメーターなどの宇宙論パラメーターは精密に決定されているのに対して、ニュートリノ質量に関しては前述の理由により、振動実験で示唆されるような  $\mathcal{O}(0.1)$  eV 程度の軽いニュートリノ質量は CMB に影響を及ぼさないのである。現在進行中で 2013 年頃に結果が出る予定であるヨーロッパの CMB 観測衛星である PLANCK では、WMAP より精度の良い温度ゆらぎと偏光の観測によって、0.6 eV (95% C.L.) 程度の制限が得られると期待されているが、これでも十分とはいえないであろう。では Ia 型超新星などによる比較的現在に近い宇宙膨張での観測ではどうだろうか？ 図 2 にあるように、振動実験によるニュートリノ質量の下限値を仮定したとしても、赤方偏移にして約 100 の頃にはニュートリノは物質として振る舞うようになっている。つまりニュートリノは CDM と区別できず、現在に近い宇宙膨張の観測では直接ニュートリノ質量を制限することはできない<sup>4)</sup>。

第 2 にニュートリノは非常に軽いので、非常に大きな速度分散をもつ。つまりニュートリノがある特徴的な時間スケールで移動する距離（これをフリーストリーミングスケールと呼ぶ）は非常に大きく、例えば現在では、約 130 ( $m_\nu/0.1$  eV) Mpc という非常に大きなスケールである。これは何を

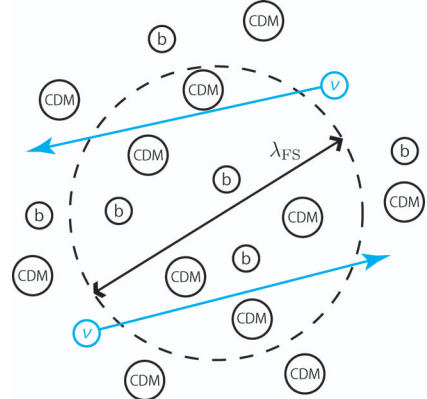


図 3 ニュートリノのフリーストリーミングの概念図。大規模構造を形成する物質の要素、冷たいダークマター (CDM)、バリオン (b) に比べて、軽いニュートリノ ( $\nu$ ) は速度分散が大きいためフリーストリーミングスケール ( $\lambda_{FS}$ ) より小さいスケールにはとどまることができない。したがって、 $\lambda_{FS}$  以下のスケールの構造の成長は、ニュートリノが重力として寄与しない分、ニュートリノ質量が 0 の場合に比べて抑制される。

意味するだろうか？ 十分現在に近い宇宙の大規模構造形成とは、主に CDM・バリオン・有質量ニュートリノという物質がそれら自身を重力源として成長するものである。有質量ニュートリノは、そのフリーストリーミングスケールより十分大きなスケールでは単に CDM と全く同じように振る舞うが、逆にフリーストリーミングスケールより十分小さいスケールにはとどまれないので、重力に寄与することができない (図 3 参照)。したがって、ニュートリノが質量をもつ場合の大規模構造の成長は、フリーストリーミングスケールより十分小さいスケールでは、ニュートリノの質量が 0 の場合に比べて抑制されるのである。図 4 に例として、物質ゆらぎの大きさ (パワースペクトル) がニュートリノ質量の有無に応じてどのよう

<sup>4)</sup> 実は、CMB による制限では宇宙膨張を用いてニュートリノ質量を制限していることに起因して、ハッブル定数の決定精度との縮退がある。したがって Ia 型超新星のような現在に近い宇宙膨張の測定でその縮退を解くことによって間接的に制限を強めることができる<sup>4)</sup>。

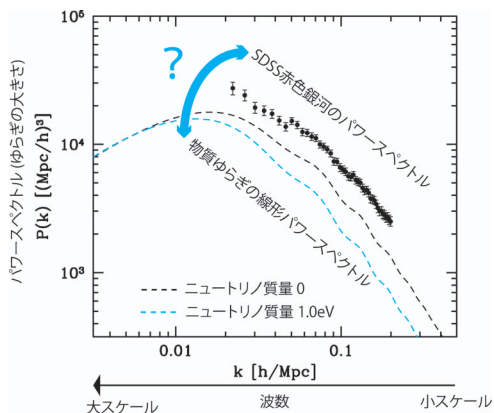


図4 線形理論により予言される物質ゆらぎのパワースペクトル(破線)と、SDSS赤色銀河で測定された銀河のパワースペクトル(データ点). 参考のため、ニュートリノ質量が0の場合(黒の破線)とニュートリノが質量をもつ場合(0.1 eV, 青の破線)の両方を示した.

な違いがあるかを示した. 図より明らかなように、有質量ニュートリノを考慮すると、大スケールでは違いはないが、小スケールではゆらぎの成長が抑制されていることがわかる. どの程度抑制されるのかという量は、まさにどの程度のニュートリノが重力源として寄与したかに依存しており、したがってニュートリノ質量の総和がどの程度かをこの構造を抑制する効果から知ることができるのである\*5.

では、どのような大規模構造観測がニュートリノのフリーストリーミングによる構造成長抑制の効果を見るのに良いであろうか? 大規模構造観測と一口に言って、思いつくままに挙げただけでも、銀河のクラスター分布、銀河の弱い重力レンズ効果、CMBへの弱い重力レンズ効果、ライマン- $\alpha$ の森、水素の21 cm線、銀河団の個数分布、など非常に多岐にわたる. これらはすべてブ

ロープできるスケールや宇宙の時期が異なり、相補的であると言える. 理論的にはいったんニュートリノ質量(の総和)を仮定してしまえば、有質量ニュートリノによる物質ゆらぎの成長に対するスケール依存性と時間依存性は特徴的であり、これら相補的な観測をCMB観測と組み合わせることによって、非常に厳しい質量の制限さらには質量の決定が期待されているのである. ただし確かに多種多様な観測を組み合わせることでより精度の高いニュートリノ質量の制限は得られるが、問題は各観測でどの程度ロバストな制限が得られているかを明らかにすることであろう. というのも、有質量ニュートリノによる構造抑制の効果は、物質ゆらぎの振幅に対して数%程度の効果であり、これは現在または近い将来の大規模構造形成における統計誤差と同等またはそれ以上である. そのような事実にもかかわらず、有質量ニュートリノの大規模構造形成、特にその非線形進化への影響は、ニュートリノ質量の決定において本質的だが、十分理解されているとは言えないのが現状である. 以下では大規模構造観測の一例として、銀河のクラスター分布に焦点を絞り、筆者らのグループが行ってきた、銀河クラスター分布の非線形進化に対する有質量ニュートリノの影響、さらにはそれから得られるニュートリノ質量の制限における研究について議論しよう.

#### 4. 銀河のクラスター分布を用いたニュートリノ質量の制限

##### 4.1 銀河サーベイの利点と理論的課題

まず銀河のクラスター分布を測定するような大規模な銀河の分光サーベイについて述べておこう. 近年、アメリカを中心とした Sloan Digital

\*5 厳密には各世代の質量固有値のニュートリノ質量それぞれに対してニュートリノのフリーストリーミングスケールは異なるので、各世代のニュートリノ質量を決定することが原理的には可能である. しかし、現実的にはニュートリノ振動実験の結果を信じれば、各世代間の質量差は非常に小さく、それによる各ニュートリノのフリーストリーミングスケールにおける違いも非常に小さい.



Sky Survey (SDSS), オーストラリアの WiggleZ, 日本のすばる望遠鏡を用いた将来計画 Subaru Measurements of Imaging and Redshift (SUMIRe) の分光計画である Prime Focus Spectrograph (PFS), さらには将来の衛星計画である WFIRST など, 盛んに銀河分光サーベイが提案されているが, その主な目的はバリオン振動の高精度測定によってダークエネルギーの性質に迫ることである. バリオン振動スケールとは, CMB で測定されている初期宇宙の光子・バリオン流体の音速ホライズンスケールであり, これを宇宙膨張を測定するためのロバストな標準ものさしとして用いることで宇宙膨張の様子を知ろうというのである. 銀河のクラスティング分布に現れるバリオン振動スケールは約 150 Mpc という非常に大きなスケールなので, 測定には非常に大規模なサーベイが必要になるが, 非常に興味深いのは, ニュートリノのフリーストリーミングスケールが偶然にも同程度であるという点である. つまり, バリオン振動探査を主目的とするような大規模な銀河分光サーベイは同時にニュートリノ質量をプローブするのに適していると言える. さらにニュートリノフリーストリーミングスケール付近の大スケールの物質ゆらぎを測定できるような大規模構造観測は今のところほかにはない. 例えば, 現存する銀河の弱い重力レンズ効果<sup>5)</sup>やライマン- $\alpha$  の森<sup>6)</sup>の観測で測定できるのは, フリーストリーミングスケールに比べて小スケールである. このような小スケールでは, 実は物質ゆらぎに対するニュートリノによる抑制の効果のスケール依存性は小さくなるので, 単に CDM の量が少ないということと区別できないのである.

このように, バリオン振動探査を主目的とした大規模な銀河分光サーベイはニュートリノ質量の効果を直接プローブできうという点で非常に魅力的であるものの, ロバストなニュートリノ質量の制限を得るには多くの課題が残されている. 図 4 に示したように, 観測されている銀河クラスタ

リングのパワースペクトルは, 簡単に予言できる線形理論のそれとは大きく異なる. この違いを物理的に説明するうえで, 特に重要だと考えられている三つの理論的課題を以下に列挙しよう.

• 重力による非線形進化

CMB の温度ゆらぎは等方成分と比較して  $\mathcal{O}(10^{-5})$  と非常に小さなゆらぎであり, ゆえにゆらぎの進化を記述する理論は線形理論で十分であった. しかし銀河サーベイで興味のあるような現在に近い時期では, 物質ゆらぎは重力的に十分成長しており, バリオン振動や有質量ニュートリノの影響が見られるような大きいスケールであっても, 重力の非線形進化は無視できない.

• 銀河バイアス

銀河のクラスティング分布とは, 銀河が空間的にどのように分布して集まっているかを測定する. しかし理論的に予言できるのは物質ゆらぎの分布であり, 銀河のクラスティング分布との関係を明らかにしなくてはならない. 厳密には銀河が物質分布の中でどのように形成されるかに依存するが, 非常に複雑な物理過程の理解が必要であり, たいへん難しい. 興味のあるような大スケールでは主に重力進化を対象とするので, 線形関係に近い関係であると考えられていたが, どのような銀河を観測するかにも依存して多種多様な関係を示す.

• 赤方偏移歪み

銀河の 3次元クラスティング分布を測定するためには, 銀河の位置を知る必要がある. しかし分光サーベイでは, 赤方偏移によって銀河の視線方向の位置の情報を得るので, 各銀河のもつ固有速度の視線方向の成分と区別できない. したがって銀河の視線方向は特別な方向となるために, 銀河の 3次元クラスティング分布は非等方に歪む, これを赤方偏移歪みと呼ぶ. どのように歪むかは銀河の速度場に対して非線形な関係にあり, 理論予言は容易ではない.

以上の三つの理論的課題に対して, 近年  $N$  体シ

ミュレーションや摂動論による解析的手法による数多くの発展があり筆者らの研究グループも貢献している<sup>7),8)</sup>が、基本的には有質量ニュートリノの効果を無視した宇宙モデルでのものがほとんどである。理由は単純で、まずは有質量ニュートリノの効果を無視した単純な状況設定で構造形成の非線形進化を理解したいからである。しかし前述のように想定する銀河サーベイの統計精度を考慮すると、有質量ニュートリノの効果は決して無視できないのである。以下では本論である銀河のクラスタリング分布に対して有質量ニュートリノが及ぼす影響について筆者らのグループが行った一連の研究について簡単に紹介する。

#### 4.2 非線形銀河パワースペクトルに対する有質量ニュートリノの影響とSDSS銀河サンプルへの適用

上記で挙げた理論的課題のうち、有質量ニュートリノの及ぼす重力非線形進化に焦点を絞ろう。すでに言及したように、構造形成を成すのは、CDM・バリオンさらには有質量のニュートリノであり、これら3者がどのように重力進化するかが問題である。ニュートリノの質量が0である宇宙モデルでは、CDM・バリオン「流体」が膨張宇宙の中でどのように重力進化するかという流体の方程式系（つまり、連続の式・オイラー方程式と重力を記述するポアソン方程式からなる系）を解けば良い。この場合は摂動論的手法による解析的な方法で解くことができ、 $N$ 体シミュレーションとのよい一致も報告されている。では有質量ニュートリノを考慮することにより問題はどのように複雑になるだろうか？

まず第1に、ニュートリノは物質として振る舞うとはいえやはり十分軽く、位相空間においてフェルミ分布をもち、CDMやバリオンと同様の「流体」として厳密には扱えない。この事実により

線形理論のレベルでも方程式系を複雑にしており、厳密に非線形な重力進化を追うのは難しい<sup>\*6</sup>。第2に、ニュートリノのフリーストリーミングスケールを境にしてニュートリノが重力に寄与するかしないかが変わってしまうので、重力の働き方がスケールによって異なる。そのため重力の非線形効果が、ニュートリノの質量が0である宇宙モデルと比較して複雑になる。なぜなら非線形進化とは、異なるスケール間がどのように重力の非線形性によってカップルするかが本質的な問題であるからである。

以上のような理由から、有質量ニュートリノが存在する場合の重力非線形進化を厳密に解くのは難しい。そこで我々は有質量ニュートリノが存在する場合の摂動論的手法を確立した<sup>10)-12)</sup>。細かい説明は省くが、重要なのは、流体として扱えないニュートリノゆらぎの発展に対して、ニュートリノゆらぎは線形レベルにとどまるという物理的に妥当な近似を用いたことである。この仮定は、興味のある準非線形進化領域ではニュートリノはそもそもフリーストリーミングによってクラスタリングできないということ、さらには物質ゆらぎ全体に対するニュートリノの寄与は非常に小さい（全物質に対して5%以下）という物理的な状況から正当化できる。

筆者らが確立したこの手法は、有質量ニュートリノを考慮した大規模構造形成の一連の研究に少なからず影響を与えた。実は、ニュートリノのような軽くて速度分散の大きい粒子を $N$ 体シミュレーションに組み込むことは原理的には容易であるが、計算コストが非常に大きく大変である。しかし我々の用いた仮定と同様、ニュートリノの発展を線形として仮定すると、計算コストは格段に減り、かつニュートリノ粒子を正確に取り扱った場合とよく一致する<sup>6),13)</sup>。もちろん近似の妥当な

\*6 Shoji & Komatsu (2010) の研究で有質量ニュートリノを流体として扱うことのできる範囲が議論されている<sup>9)</sup>。

範囲などより詳細な検討が必要であるが、有質量ニュートリノの大規模構造形成に対する効果を物理的に理解するうえで、筆者らの研究が少なくない役割を担ったと考えている。

またこの摂動論的手法の一つの利点は、銀河バイアスの非線形性を含めるように自然に拡張できる点である。筆者らは、以上の確立した方法を実存の銀河パワースペクトルに適用した<sup>12), 14)</sup>。より具体的には現存する最大規模の銀河カタログである、SDSSの赤色銀河カタログにより測定された銀河のパワースペクトルに筆者らの手法を適用した。WMAPの5年目の結果と組み合わせることによって、0.81 eV (95% C.L.) というニュートリノ質量の制限を得た(図5を参照)。これはWMAPのみと比較して約1.8倍厳しい制限であり、大規模構造による制限の重要性を示す一つの例である。しかしここで強調したいのは得られた制限の値そのものよりも、制限のロバストさである。我々の手法は確かに物理的考察に基づいてゆらぎの非線形進化を取り扱ってはいるものの、実際にニュートリノ質量に関する情報を正確に抜き出しうるかは自明ではない。そこで筆者らはN

体シミュレーションに基づいて、筆者らの摂動論による手法の限界を詳細に検討したうえで、実際のデータに適用し、上記の制限を得たのである。実は同じ銀河カタログを用いたニュートリノ質量の制限には先行研究がある<sup>15)</sup>(図5の黒の実線に彼らの結果を示した)。彼らは種々の非線形効果に対して、有質量ニュートリノを無視したシミュレーションに基づいたフィッティング公式を用いた理論モデルを用いている。彼らの手法が筆者らと同様の結果になることは決して自明ではない。

近い将来、SDSSの第3期におけるBaryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) などからより統計精度の高い銀河パワースペクトルが測定される。しかし残念ながら筆者らの確立した手法はこのような高精度な測定では適用範囲がさらに限定され、銀河クラスタリング分布のもつニュートリノ質量の情報を抜き出すという意味で十分なポテンシャルがあるとは言えないだろう。ここで紹介した手法は、今後発展するであろう解析的手法とシミュレーション双方を用いた、有質量ニュートリノの及ぼす構造形成の非線形進化に対する研究の第一歩であると筆者は考えている。

## 5. 最後 に

以上、銀河クラスタリング分布におけるニュートリノ質量の現状について筆者らの研究を中心に簡単に紹介した。最後に補足として他の観測量とニュートリノ質量の制限について紹介しておくことにしよう。すでに述べたように、宇宙論的観測はどれも単独ではニュートリノ質量を精度よく決定することはできない。しかしCMBと種々の大規模構造観測の双方を同時に考えることによって、宇宙の異なる時刻・異なるスケールをプローブでき、ニュートリノ質量に関して相補的な情報を得ることができる。さらには異なる宇宙論パラメーターとの縮退を解くことで、より精度の良い制限が得られると期待できるのである。図6の表

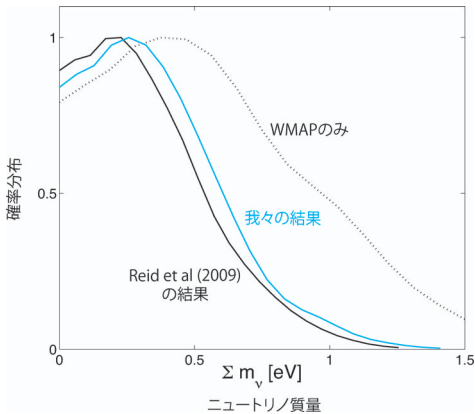


図5 SDSS赤色銀河の銀河パワースペクトルを用いて得られたニュートリノ質量の確率分布(青の実線)。参考に、WMAP5年目のみを用いた結果(黒の点線)と、シミュレーションに基づいた方法を用いた先攻研究の結果(黒の実線)を示してある。



観測量	現在の制限 [eV]	期待される制限[eV]	現存する観測	将来の観測計画
CMB	1.3	0.6	WMAP, PLANCK	—
CMB + 距離指標	0.58	0.35	WMAP, PLANCK	—
CMB + CMBの弱重力レンズ	—	0.05-0.2	PLANCK, ACT, SPT	ACTPol, SPTPol, POLARBEAR
銀河クラスタリング分布	0.6-0.8	0.1	SDSS, WiggleZ, BOSS	BigBOSS, Subaru PFS, HETDEX, WFIRST
銀河の弱重力レンズ	0.6	0.07	CFHTLS, COSMOS	DES, HSC, LSST, EUCLID
ライマン- $\alpha$	0.2	0.1	SDSS, BOSS	BigBOSS, TMT, GMT
21cm	—	0.006-0.1	GBT, LOFAR, PAPER, GMRT	MWA, SKA, FFTT
銀河団の個数分布	0.3	0.1	SDSS, SPT, ACT, XMM, Chandra	DES, eRosita, LSST

図6 宇宙論的観測とニュートリノ質量制限のまとめ (主に Abazajian et al. (2011)<sup>16)</sup>からの転用). ニュートリノ質量 (の総和,  $\Sigma m_\nu$ ) の制限はすべて 95% C.L. である. 細かな数値の由来については文献を参考にして欲しいが, それぞれの値は, 宇宙論パラメーターセットの仮定や, どのような観測量を組み合わせたか, に強く依存することに留意するべきである.

に主な観測量とその計画, 対応するニュートリノ質量の制限について示した. 表の中で重要なことは, それぞれの値の大小によってどの観測量が優れているということではない. ここで得られている値はすべてさまざまな仮定に依存しており, どれくらいロバスタな制限であるかが示されていないという点に注目すべきであろう. 本稿で銀河のクラスタリング分布を例に強調したように, それぞれの観測量を用いる際には, 内在する系統誤差に対して注意深く検討すべきである. 現在は単に上限が与えられているだけである (つまりニュートリノ質量は0であっても観測とは矛盾しない) が, 表の「期待される制限」から明らかなように, 近い将来に宇宙論的観測によってニュートリノ質量の値が決定されることは十分に予想される. そうでなくとも例えば, 図1で示した質量階層によって予想されるニュートリノ質量の総和の下限値が異なる (順階層では 0.05 eV であるのに対して, 逆階層では 0.1 eV) ことから, 宇宙論的制限によって質量上限が 0.1 eV 以下であることが示されれば逆質量階層を棄却できることになる. 冒

頭に述べたように, そのような事態は基礎物理学に対するインパクトも非常に大きく, 宇宙論研究者としてはこのうえないエキサイティングな時代を迎えるだろう. しかしそのような明るい未来を確固たるものにするためには, あらゆる系統誤差に対する理解を深め, 素粒子物理学の分野の研究者を含めて広く納得されるような方法論を築かなくてはならない. 本稿で紹介した筆者らの研究は, 銀河のクラスタリング分布だけにとどまらず, 有質量ニュートリノが存在するという現実的な宇宙モデルでの構造形成を理解する第一歩として位置づけられると信じて結びとしたい.

謝辞

本稿は筆者の博士論文の内容を踏まえて拡張したものです. 共同研究者の高田昌宏氏, 樽家篤史氏, 並河俊哉氏に感謝いたします. またこの記事を書くように勧めていただいた市来浄與氏に感謝します.

参考文献

- 1) Komatsu E., et al., 2011, ApJS 192, 18
- 2) Lesgourgues J., Pastor S., 2006, Phys. Rept. 429, 307
- 3) Ichikawa K., Fukugita M., Kawasaki, M., 2005, Phys. Rev. D 71, 043001
- 4) Reid B. A., Verde L., Jimenez R., Mena, O., 2010, JCAP 1, 3
- 5) Ichiki K., Takada M., Takahashi T., 2009, Phys. Rev. D 79, 023520
- 6) Viel M., Haehnelt M. G., Springel V., 2010, JCAP 6, 15
- 7) Taruya A., Nishimichi T., Saito S., Hiramatsu T., 2009, Phys. Rev. D 80, 123503
- 8) Taruya A., Nishimichi T., Saito S., 2010, Phys. Rev. D 82, 063522
- 9) Shoji M., Komatsu E., 2010, Phys. Rev. D 81, 123516
- 10) Saito S., Takada M., Taruya A., 2008, Phys. Rev. Lett., 100, 191301
- 11) Saito S., Takada M., Taruya A., 2009, Phys. Rev. D 80, 083528
- 12) 斎藤 俊, 2010, 博士論文 (東京大学)
- 13) Brandbyge J., Hannestad, S., 2010, JCAP 1, 21
- 14) Saito S., Takada M., Taruya A., 2011, Phys. Rev. D 83, 043529
- 15) Reid B. A., et al., 2010, MNRAS 404, 60
- 16) Abazajian K. N., et al., 2011, arXiv: 1103.5083

**Cosmological Constraint on Neutrino Mass:  
A Role of Large-Scale Structure Focusing  
on the Galaxy Clustering**

**Shun SAITO**

*Department of Astronomy, University of California at Berkeley, 601 Campbell Hall, University of California, Berkeley, CA 94720, U.S.A.*

Abstract: Recent cosmological observations reveal the contents of the Universe, and especially give us the most significant upper-bound on the mass of neutrinos. In this article, we review how the neutrino mass can be constrained and a role of cosmological observations in determining the neutrino mass. We especially focus on the galaxy clustering as an example of the large-scale structure probe, and discuss a current status of the neutrino mass measurement with the nonlinear galaxy clustering based on our recent study.