

## ニュートリノの質量と宇宙論

富田 憲 二\*

## 1. はじめに

1980年の春、大変な噂が物理学関係の専門家の間で流れ始めた。それは質量がゼロであるというのが定説であったニュートリノに質量があることが実験的にわかったこと、宇宙論的に重要な意味をもつほどの大きさの質量であること、およびそのような質量は、ガット(大統一)の理論から考えて存りうることだというようなことであった。噂の段階ですでに宇宙論と結びついているのは、実はそれまで、ニュートリノの質量の上限や質量があればどのような現象が起るかの宇宙論的問題について推測がかなりなされていたからである。噂の内容が論文として発表されるとともに、80年末頃から、これに関連した様々な理論的研究が、ゼルドヴィッチたち、佐藤・高原の仕事をはじめ、ぞくぞくと発表された。以下では、これまで注目されてきた問題と研究状況をかいつまんで解説してみることにしよう。

## 2. ニュートリノの質量

まずニュートリノには、電子( $e$ )に対する電子ニュートリノ( $\nu_e$ )、ミューオンに対するミュー・ニュートリノ( $\nu_\mu$ )および、1976年に発見されたタウ( $\tau$ )に対するタウ・ニュートリノ( $\nu_\tau$ )の少なくとも3種類が存在する。さらに他にニュートリノがあるのかどうかはわかっていない。もし光子のように質量が完全にゼロであるなら寿命は無有限大であるが、少しでも質量があるなら、崩壊したり、3種類のニュートリノが互に入れかわるといふ不安定な現象をひきおこす可能性がある。時間とともに順々にニュートリノが入れかわってゆく現象を「ニュートリノ振動」という。アメリカのライネスたち(1980)は、 $\nu_e$ と $\nu_\mu$ の間で、この振動が起きていることを実験によって示した。彼等の結果では、2種類のニュートリノの質量を、 $m_1, m_2$ とすると、 $\Delta \equiv |m_1^2 - m_2^2|/c^4$ は大体(1eV)<sup>2</sup>。したがってニュートリノの少なくとも一方は、エネルギー単位で1eV程度以上で、もし $m_1$ が1eVより充分大きければ $m_2$ は $m_1$ にほぼ等しいということになる。プロトン、電子の質量はそれぞれ $10^9$ eV、 $5 \times 10^5$ eVであるから、1eVの質量はやはり非常に小さい。

一方、ソ連のリュビモフたち(1980)は、トリチウムのベータ崩壊の解析から $\nu_e$ の質量が25eVと47eVの

間にあることを示した。その後ニュートリノ振動についての追試が独立に数箇所で行われているが肯定的結果は得られていない。質量については、これまで $\sim 50$ eVの上限が既に得られていたので問題は下限であるが、これについても、まだ独立の結果は得られていない。

## 3. 宇宙の熱史とニュートリノの密度

どのニュートリノにどれだけの質量があるかは、現在わからないので、ここでは3種類のニュートリノが、それぞれ $m_\nu = 10 \sim 40$ eVの同じ質量をもつと考えることにしよう。

宇宙の膨張はビッグバンの瞬間までさかのぼれるので、かつて宇宙は相互作用の小さいニュートリノも他の粒子とひんぱんに衝突、反応をして熱平衡の状態にあるほど高温、高密度であったと考えられる。この時期では、ニュートリノの温度 $T_\nu$ は光子の温度 $T$ と等しかった。やがて膨張とともに冷却して、 $T = 10^{10} \sim 10^{11}$ の時期にニュートリノは輻射(光子ガス)から分離してしまい、その後、平衡状態のエネルギー分布をのこしたまま(凍結して)断熱的に冷える無衝突粒子となる。一方、光子は、 $T$ が $4 \times 10^9$ ( $= 2m_e c^2 / (3k)$ )のときに電子対が消滅することによって、あためられる( $T$ が1.4倍)以外は、宇宙の半径 $R$ に反比例して断熱的に冷却するので、 $T$ と $T_\nu$ の関係は $T_\nu = T/1.4$ となる。

1個のニュートリノの平均の熱エネルギーを凍結したエネルギー分布にもとづいて計算すると、静止エネルギーと等しくなるのは、 $T_{nr} = 2 \times 10^4 (m_\nu/10) K$ となる。ただし $m_\nu$ はeV単位で $10 \sim 40$ 。この時期以前では、熱エネルギーが圧倒しているため $m_\nu$ は無視でき(相対論的となり)、以後では静止エネルギーが圧倒して、ニュートリノは圧力なしのガスとして振舞う(非相対論的となる)。1種類のニュートリノの個数密度は同様にして $1000(T/2.7)^3 \text{ cm}^{-3}$ となるので、3種類を加えた質量密度は、 $\rho_\nu = 5 \times 10^{-30} (T/2.7)^3 (m_\nu/10) \text{ g/cc}$ 、 $T < T_{nr}$ ではこれはニュートリノの全エネルギー密度に等しい。

## 4. 宇宙モデル

一樣、等方的な宇宙モデルは、2つのパラメータを使って分類される。今、現在の全質量密度 $\rho_{\nu 0}$ と臨界密度 $\rho_{cr}$ の比 $\Omega_i = \rho_{i0}/\rho_{cr}$ ( $= 8\pi G \rho_{i0}/(3H^2)$ )および減速パラメーター $q$ を用いることにしよう( $H$ はハッブル定数)。宇宙定数 $\Lambda$ と曲率の付号 $k$ は、それぞれ $\Lambda c^2/H^2 =$

\* 広大理論研 Kenji Tomita: Neutrino Mass and Cosmology

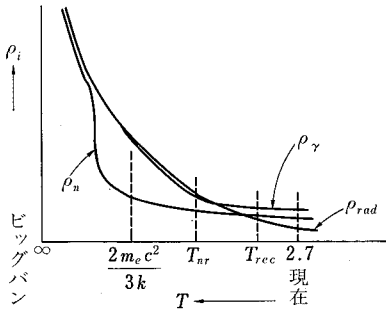


図 1  $\rho$ - $T$  ダイアグラム。 $\rho_\nu$ ,  $\rho_{rad}$ ,  $\rho_n$  は、それぞれ、ニュートリノ、光子、核子の質量密度。

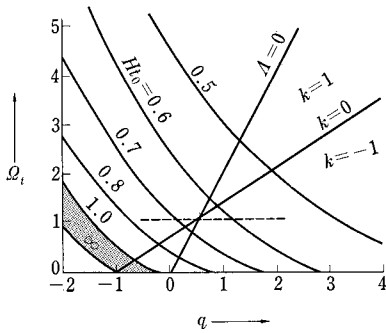


図 2 宇宙のモデルと年齢。 $k=0$  の線の上では宇宙は閉じている。斜線は  $Ht_0 > 1$  の領域。

$3(\Omega_t/2-q)$ ,  $kc^2/(HR_0)^2=3\Omega_t/2-q-1$  で関係づけられる ( $R_0$  は現在の  $R$ )。  $A=0$  なら  $\Omega_t > 1$  に対して  $k=1$  (閉じる)。 銀河・銀河集団を構成している通常の物質の現在の平均質量密度  $\rho_{00}$  は、 $\rho_{cr}$  との比をとると、 $\Omega_0=0.05\sim 0.1$  となり、放射 (光子) の場合はさらに小さいから、これらだけから宇宙がなりたっていれば、宇宙は開いている ( $k=-1$ ) ことになる。ところが、ニュートリノでは  $\Omega_\nu=\rho_{\nu 0}/\rho_{cr}=0.06m_\nu$  となる。ただし  $H=75\text{ km/s/Mpc}$ ,  $T_0=2.7$  とする。そこで  $\Omega_t=\Omega_\nu+\Omega_g$  の値は、 $\Omega_g=0.05$  に対して表 1 のようになり、 $m_\nu > 20\text{ eV}$  では  $A \geq 0$  なら宇宙が閉じている ( $k=1$ ) ことになる (図 1 参照)。

表 1

$m_\nu$ (eV)	$\Omega_t$	$\Omega_t/\Omega_g$
10	0.7	13
20	1.3	26
30	1.9	38
40	2.5	50

宇宙の年齢  $t_0$  は、各モデルについて、2つのパラメータの関数として図 2 のように表わされる。  $1/H$  は  $13 \times 10^9\text{ y}$  だから  $A=0$  かつ  $\Omega_t > 1$  のモデルでは  $t_0 < 10^{10}\text{ y}$

となる。そこで  $t_0 >$  古い星の年齢 ( $> 10^{10}\text{ y}$ ) の条件は、 $A=0$  のモデルでは、かなり厳しい。  $H$  を 75 より小さくとることによって、ギリギリに満すが、そうでなければ、図 2 の  $A > 0$ ,  $q < 0$  の領域にある  $Ht_0 > 1$  のルメートル・モデルを採用するかである。

5. 重力不安定性と銀河形成

(A) 重いニュートリノのガス、放射および通常の物質 (プロトン、電子) からなる宇宙における“ゆらぎ”の成長を考えよう。表 1 にあるように、ニュートリノの質量密度が圧倒的に大である場合には、ゆらぎとして先ずとり上げるべきものは、ニュートリノ自体の密度のゆらぎである。ニュートリノが放射から分離する時期以前では、ニュートリノは放射と一緒に運動するので、放射と同じ相対的ゆらぎ ( $\delta\rho/\rho$ ) をもつ。それらのゆらぎは、分離後も残され、ゆらいだ領域の長さ  $L$  が、ジーンズ波長  $\lambda_J$  より大きい間は重力によって成長する。無衝突粒子からなる膨張宇宙の重力不安定性の線型理論 (ギルバート 1966) によると、 $L \gg \lambda_J$  では、ゆらぎの振舞は流体のものと同じである。しかし  $L \ll \lambda_J$  では、流体のゆらぎが音波的振動をするのに対し、無衝突粒子系のゆらぎは減衰する。ところで、 $\lambda_J$  は、ニュートリノの速度の 2 乗平均を  $v^2$  とするとき、 $\lambda_J^2=\pi v^2/(G\rho_\nu)$  で与えられる (この式には著者によって、オーダー-1 のくいちがいがある)。  $T > T_{nr}$  では  $v$  は  $c$  (光速) に近いので、 $\lambda_J$  は地平線  $ct$  に近い。今、 $\lambda_J$  の代りに半径  $\lambda_J$  内のニュートリノの質量  $M_J$  ( $\equiv \frac{4}{3}\pi\rho_\nu\lambda_J^3$ ) を用いて、その時間的変化を表わすと、図 3 のようになる。  $M_J$  の最大値は、 $M_{Jm}=7 \times 10^{19}/(m_\nu)^2 M_\odot$  で、この質量の中に含まれる通常の物質の質量は、 $m_\nu=10, 20, 30, 40\text{ eV}$  に対して、それぞれ  $(50, 6, 3, 0.8) \times 10^{15} M_\odot$  となり、銀河集団の質量に近くなる。これ以下の質量をもつニュートリノのゆらぎは減衰してしまう (ともなっている放射のゆらぎは音波となる)。  $M_\nu > M_{Jm}$  ならゆらぎは、流体的に成長しつづけることが可能である。また中性化期

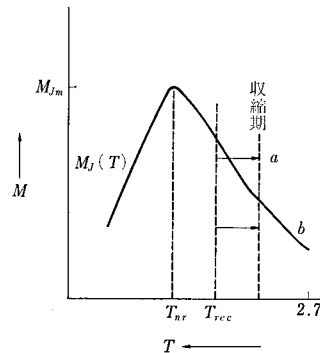


図 3 ジーンズ質量  $M_J$  の変化。

のあとでは、物質は重力をとおして、ニュートリノのゆらぎからの摂動をうけ、ニュートリノと同程度の相対的ゆらぎを得る。

このようなことから、ニュートリノのゆらぎが原始銀河集団の形成に役かっているのではないかと憶測された。個々の銀河は、別のゆらぎ(例えば(B))で述べるエントロピーゆらぎ)の成長によってつくられると考えなければならないが、もし、銀河と同時期に銀河集団が形成されるとすれば、ニュートリノのゆらぎは相当に大きくなければならない。現在までに、ゆらぎが成長して膨張を脱し、さらに収縮して銀河集団ができるためには、中性化期( $T \approx 4500$  K)における相対的ゆらぎ( $\delta\rho_\nu/\rho_\nu$ )<sub>rec</sub>の大きさは、 $\Omega_t=1$ のモデルで0.003以上でなければならない。 $\Omega_t < 1$ ではもっと大きく、 $\Omega_t > 1$ ではもう少し小さくてもよい(富田 1969)。またクェーサーが観測にかかり始める時期(赤方変位  $z=3.5$ )に、ゆらぎがすでに収縮期に達しているためには、 $\Omega_t=1$ では、( $\delta\rho_\nu/\rho_\nu$ )<sub>rec</sub>が0.01以上でなければならない。このようなゆらぎには、上記のように輻射のゆらぎがともなっているので、宇宙背景輻射の厳しい等方性の制約が問題になる。

(B) これまで考えたゆらぎは、断熱的変動をする、いわゆる“断熱ゆらぎ”であるが、これとは対照的なゆらぎ”として、“エントロピーゆらぎ”または“等温ゆらぎ”と呼ばれるものがある。これはプロトン、中性子などの核子の個数密度のゆらぎである。中性化期より充分前では、核子の質量密度はニュートリノの $\rho_\nu$ に比べて非常に小さいので、このゆらぎ $\delta\rho_n/\rho_n$ は重力的影響をもたないが、中性化期以後では、 $\delta\rho_n/\rho_n \geq 1$ ならば重要に

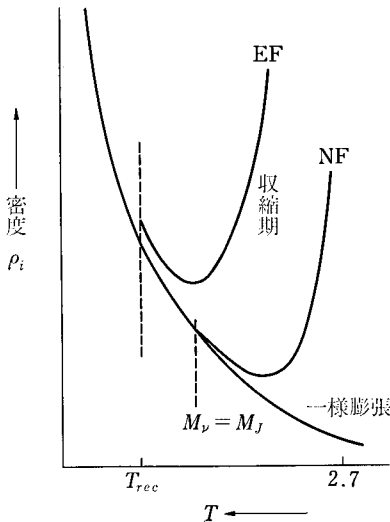


図4 エントロピーゆらぎの非線形的成長。EF: エントロピーゆらぎ, NF: ニュートリノゆらぎ。

なる。ゆらぎの成長のしかたに、2つのタイプがある。

1. ゆらぎ中の物質の質量  $M_n$  が  $10^{10} M_\odot$  以上の場合 ( $m_\nu=20$  eV とする): 図3の a のように、途中で  $M_n > M_J$  となることによって、ニュートリノが重力不安定となる。 $M_n < M_J$  の時期には、 $\delta\rho_n/\rho_n$  の成長は極めてゆるいが  $M_n > M_J$  となると急速に進む(図4参照)。 $M_n < M_J$  の時期での線型近似での成長は、 $\delta\rho_n/\rho_n \propto R^\sigma$ , ただし  $\sigma \equiv (\sqrt{1+24\Omega_g/\Omega_t}-1)/4 = 0.2 \sim 0.06$ 。物質の雲とともに、ニュートリノの雲がともなうのが特徴。
2.  $M_n$  が  $10^{10} M_\odot$  以下の場合 ( $m_\nu=20$  eV): 図3の b のように、 $M_n < M_J$  のままで、物質のみ自己重力で非線型効果によって収縮期に達する。この場合には、ニュートリノの雲はともなわない(富田 1982)。

このように、エントロピーゆらぎから形成される  $M_n \geq 10^{10} M_\odot$  の原始銀河には、ニュートリノの雲がともなうので、“重いハーロー”や“見えない質量”を説明する可能性があり興味深い。

### 6. 宇宙背景輻射 (CBR)

CBR の非等方性は、角度  $\theta \approx 100^\circ$  の大角度非等方性と  $\theta=1 \sim 200'$  の小角度非等方性に分けられる。前者については、 $\delta T/T \approx 10^{-3}$  の双極型の非等方性が検出されており、その源は太陽系の CBR に対する固有運動のドップラー効果である可能性と宇宙論的原始的ゆらぎによる可能性とがある。一方、小角度非等方性については、ソ連のパリスキーたち(1977)による観測結果が示すように、厳しい上限だけが導かれている:

$$\delta T/T < 1.6 \times 10^{-4} (\theta')^{-2/3}$$

$$\theta' = 10 \Omega_t^{2/3} (M/10^{15} M_\odot)^{1/3}$$

$M$  は、ゆらいだ領域内の全質量 ( $\Omega_t = \Omega_\nu + \Omega_g$ )。  $\delta T/T$  を中性化期の輻射のゆらぎによってもたらされたものと解釈すると、この上限は輻射のゆらぎの大きさの上限を与え、さらに、5節の A で述べたように、ニュートリノのガスのゆらぎの大きさに対する厳しい上限を与えることになる。私の計算では、( $\delta\rho_\nu/\rho_\nu$ )<sub>rec</sub> は、0.002 以下でなければならないことになる。これはクェーサーが  $z=3.5$  の時期に形成されるに必要なゆらぎの大きさ0.01より小さい。これらの値は、ハッブル定数その他のパラメーターの値のとり方によって少し変わるが、どうしても、きわどい点は変わらない。もし  $\delta T/T$  の上限が、一桁下がれば、断熱ゆらぎは主役として寄与しなかったと考えべきである。

### 7. ニュートリノの崩壊

質量をもったニュートリノ ( $\nu$ ) は、より軽いニュートリノ ( $\nu'$ ) へ崩壊することが可能である ( $\nu \rightarrow \nu' + \gamma$ )。崩壊にともなって放出される光子( $\gamma$ )の波長は、 $m_\nu=20$  eV

に対して、 $\lambda \sim 1000 \text{ \AA}$  となり、可視光線より波長が充分短い。

現在銀河間ガスは電離状態にあるが、従来電離のメカニズムは、キューサーや活動銀河からの光子によると考えられてきた。しかし、この光子との衝突によって、銀河間ガスが加熱され電離される可能性もある(シアマ1980)。ニュートリノの寿命  $\tau$  は、大統一理論のモデルのとり方によって様々の値をもつが、代表的な値  $\tau = 10^{27} \text{ s}$  をとると、個数密度  $n_\nu (10^3/\text{cc})$  のニュートリノの

崩壊率  $n_\nu/\tau$  と、個数密度  $n_H (\sim 10^{-5}/\text{cc})$  の中性水素の電離率  $n_H/t_{ion}$  は、 $t_{ion} \sim t_{ex}$  に対してほぼ等しい。したがって現在に近い過去に電離が起ったのかもしれない。

## 8. 終りに

以上のように、ニュートリノの個数、質量、寿命の値は、まだ確定していないので、明確な結果を出す段階にはないが、宇宙論に大きい変革をもたらす可能性は、充分留意しておく必要がある。

## 雑報

### 変光星名が付けられた新星など

IAU 変光星委員会から出版されている Information Bulletin on Variable Stars (IBVS) No. 2042 によると、

1981年12月までに命名・登録された変光星の総数は28457星で、本誌1981年7月号で紹介して以来203星が新たに加えられたことになる。新たに変光星名が付けられたのは下表の3星だけで、いずれも本田実氏の発見されたものである。(香西洋樹)

	星名	$\alpha$ (1950.0)	$\delta$	発見者	発見日
1.	Nova CrA 1981 =V693 CrA	18h38m5	-37°34'	M. Honda	1981 Apr. 2
2.	Nova? Cyg 1980 =Honda's Variable in Cyg 1980	21h40m8	+31°14'	M. Honda	1980 Nov. 29
3.	Nova Sgr 1980 =V4065 Sgr	18h16m5	-24°45'	M. Honda	1980 Oct. 28

わが国唯一の天体観測雑誌

# 天文ガイド

定価380円(〒70) '83-1月号・12月4日発売!

## 1月のおもな内容

- ★1983年は流星群の条件が最高! 1年間の流星群の状況を毎年恒例の富岡啓行さんから。ペルセウスも最良!!
- ★観測ガイド=本号では発売日の関係で1982年12月30日の月食観測法の詳細を中心に紹介。ほかに好条件で1月4日極大を迎える『りゅう座流星群』
- ★マイコン教室が装いを新たに連載開始。担当は中野圭一さん。今回からプログラムも掲載します。
- ★流星のFM観測をコンピュータを使って受信、記録することを始めた人がいます。北海道の柴田さんから。
- ★ほかに、同好会だより、私の愛機、彗星ガイドなど、1983年も毎月魅力ある内容をお届けします。乞ご期待

創刊35年  
他の追隨を許さない!

# 天文年鑑 1983

定価480円★大好評発売中

B6判のハンディサイズ、  
星空への便利な案内書。

毎年、毎年 爆発的に売れています

1月から12月までの空の案内のほかに、

惑星、小惑星、流星、彗星、  
新星、変光星の一年間の予報、  
天体観測に最低限必要なデータ、  
前年の天文界トピックス  
などを満載した 観測必備書

誠文堂新光社 〒101 東京都千代田区神田錦町1-5  
振替東京7-6294 電話03(292)1221