

天体については、伴星の質量についてもっともらしい仮定をすることによって、その質量の下限が太陽質量の3倍より大きいことがわかっている。GS 2023+338 は、これらどのブラックホール候補よりも大きな質量関数を持つ、もっとも確実なブラックホール候補だと言えるだろう。

“ぎんが”によって発見された他のブラックホール候補についても、やがて可視光による観測から中心天体の質量の下限が求められ、ブラックホールの存在がより確実になることが期待される。そして、なぜブラックホールを含むX線源が、中性子星を含むX線源にはみられない、特徴的な性質を示すのかを解明し、巨大ブラックホールを含むと考えられる活動的銀河中心核やクェーサーとの関連を明らかにすることは、今後のX線天文学に課せられた大きな課題である。

海老沢 研 (NASA/ゴダード宇宙飛行センター)

参 考 文 献

- 1) Kitamoto et al. 1989, Nature, **342**, 518.
- 2) Tanaka, Y. 1989, Proc. 23rd ESLAB Symp. on Two Topics in X-ray Astronomy, **1**, p. 3, ESA.
- 3) 吉田健二 1990, 修士論文 (東京大学).
- 4) Casares, J., Charles, P. A. and Naylor, T. 1992, Nature **355**, 614.

太陽ニュートリノの謎に迫る

太陽ニュートリノが足りない。太陽標準模型が間違っているのか、それともニュートリノに未知の性質があるのか。次々と解決のシナリオが考えられる一方、カミオカンデではフラックスが少ないことを追認し、さらにエネルギー・スペクトルまで測った。ガリウム実験では異なるエネルギー領域のニュートリノを測り始めている。また、超新星 1987 A からのニュートリノの観測、質量測定実験、加速器 LEP の実験など、ニュートリノに関する情報も増加している。太陽ニュートリノ問題の解に向かって、いままじつづつ収束しようとしている。

1. 太陽ニュートリノ問題

最も身近な恒星で、よく理解しているつもりであった太陽。そのエネルギーの源である核融合反応で生成されるニュートリノを観測してみると理論の3分の1しか検出されない。それが1970年代から今もなおアメリカのホームステイク (Homestake) 金鉱で太陽ニュートリノを観測しているデイビスらの結論であった。実験に非は見あたらない。そうすると標準太陽模型が間違っているか、ニュートリノに未知の性質があって太陽から検出器までの伝播過程が正しく理解されていないかのいずれかである。前者は天体物理学の、後者は素粒子物理学の興味深い問題である。

2. 神岡でも観測を

デイビスらのホームステイク実験は、615トンの洗剤液にふくまれる塩素原子がニュートリノを捕獲してできるアルゴンを回収し、その崩壊を比例計数管で計測することによって太陽ニュートリノのフラックスを測定する。カミオカンデ

(KAMIOKANDE)では、ニュートリノが3000トンの水タンク内の電子と弾性散乱した時はじき出される電子のチェレンコフ光を20インチの光電子増倍管で検出する。ホームステイク実験よりも有利な点は、(1)エネルギー・スペクトルが測定できること、(2)反跳電子の角度が測定できるので、太陽方向との相関を見ることによってバックグラウンドと区別できること、(3)リアルタイムの測定なので個々のイベントの時間がわかること、である。

1987年1月から90年4月までの1040日分のデータを用いて角度の分布をとると、図1のように太陽方向にピークが見られる。解析にはバックグラウンドの少ない検出器中心部の680トンで相互作用した、電子のエネルギーが7.5 MeV以上のイベントを用いている。ニュートリノ・フラックスは標準太陽模型で期待される値の (0.46 ± 0.05) (統計誤差) ± 0.06 (系統誤差) 倍であった¹⁾。カミオカンデでも太陽ニュートリノ問題の存在を確認したのである。

またデイビスらの観測によると、フラックスが太陽活動の指標の一つである黒点数と反相関があると言われている。しかし図2のように、黒点数が大きく変化している時期に、カミオカンデでは有意な反相関が見られない²⁾。

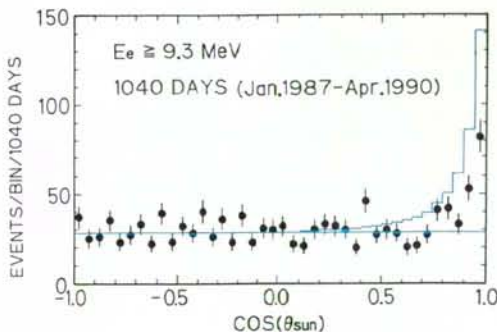


図1 イベントの太陽方向となす角度分布。黒丸がデータ、ヒストグラムが標準太陽模型による期待値。バックグラウンドレベルの上に信号が観測されている。

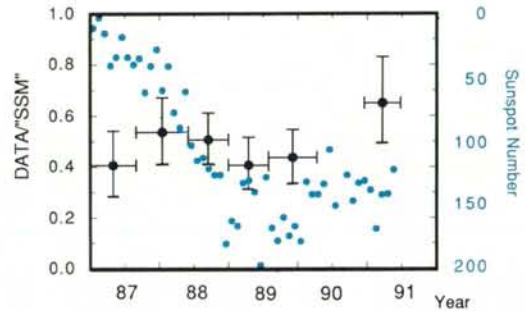


図2 カミオカンデにおける太陽ニュートリノのフラックスの時間変化²⁾。系統誤差は含んでいない。1990年の空白は測定器の改良によるものである。同時期の黒点数の変化も重ねた(青丸)。有意な時間変化は観測されなかった。

3. 解の行方は

上で述べたように、解は標準太陽模型に関わるものとニュートリノの性質に関わるものとの大別される。しかし前者は結局、太陽の中心温度を下げることに帰着する。エネルギー^{しきい}閾値を考えるとカミオカンデでは¹⁰Bニュートリノのみを検出し、ホームステイクは¹⁰Bと⁷Beニュートリノを検出するのだが、¹⁰Bニュートリノのフラックスは中心温度の18乗に比例し⁷Beは8乗に比例する。すなわち温度を下げるとカミオカンデの減少の方が大きいはずであるが、実際の観測では有意に逆である。同じ理由で、WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles の略)が太陽中心の熱を運び出して温度を下げるという解ももっともらしくない。LEPの結果を考慮すると、ニュートリノの崩壊に関しても解とするには多少の無理があるように思われる。

またニュートリノには3種類のフレーバーがあるが、それらに質量差が存在すれば真空のニュートリノ振動が起り、電子ニュートリノは検出可能性の低い他のニュートリノに変わる。但し太陽ニュートリノ問題の解としては非常に大きな混合角(混合の割合を表す量; この場合 $\sin^2 \theta \geq 0.5$)が必要であり、あまり好まれていない解である。

1985年、ニュートリノのフレーバー固有状態の間に質量差と混合角が存在すれば、電子ニュートリノは太陽プラズマ中の電子との相互作用によって、共鳴的にミュー・ニュートリノへ転換されるという、ニュートリノ物質振動による解(MSW解)が発表された。質量差として $10^{-7}-10^{-4}\text{eV}^2$ 、混合角として $\sin^2\theta=10^{-4}-10^{-3}$ が必要だが、特に小さい混合角はクォークにも見られる点で自然な解といえる。MSW解はエネルギースペクトルの変形を引き起こす。MSW解のうち、断熱解と呼ばれるものは高エネルギー側がなくなり、非断熱解では主に低エネルギー側が減少する。カミオカンデではスペクトルの変形は見られず、形のみで(フラックスの値を用いずに)断熱解のパラメータ領域のほとんどが棄却された³⁾。

物質振動の非断熱解は現在最も有望な解である。カミオカンデよりもホームステイクの方が減少が激しいことも説明できる。またニュートリノの磁気モーメントと組み合わせてホームステイクにだけ時間変化を与えることも可能である。(これに関しては太陽内部の磁場の強さや構造がわかっていないのではっきりしたことはいえないが。)このとき質量差は2つのフレーバー間で0.001 eVくらいになる。

4. ppニュートリノを

上の2つの実験は主として ${}^8\text{B}$ ニュートリノを対象とするもので理論計算に30%程度の誤差を含む。セイジ(SAGE)やガレックス(GALLEX)などガリウム実験ではエネルギー閾値が低い^{小さい}ため、 ${}^8\text{B}$ の10⁴倍もの個数が放出されるppニュートリノを検出することができる。ガリウムがニュートリノを捕獲してできたゲルマニウムを、ホームステイクと同様に比例計数管で測定するのである。ppニュートリノは2%程度の誤差で計算されているので、もしこれも観測値が理論値を下回るようであれば、その原因はニュートリノの性質に起因している可能性が高い。1990年前半、30トン

の液体金属ガリウムで観測したセイジの結果は、有意な信号は検出されていないというものでフラックスの上限として理論値の60%を得ている⁴⁾。物質振動の非断熱解はガリウム実験で検出されるニュートリノが抑制されることを予言しているが、実際その傾向が見えつつある。

5. これから

ガリウム実験はどんどん新しいデータを出して来るだろう。カミオカンデの時間変化を見て行くのもおもしろい。ただ、もっと統計精度を上げた観測を、と思ったとき建設中の2つの実験を待たざるを得ない。

一つはカナダのスノー(Sudbery Neutrino Observatory)で1000トンの重水を5000トンの軽水で囲んだ検出器である。これは荷電カレントのみでなく中性カレントの相互作用も検出できるので、全てのフレーバーのニュートリノを軽水の場合よりも効率よく測定できる。1995年に観測を開始すると(ただし最初の一年は軽水のみ)年間で数千のニュートリノを捕まえることができるはずである。

カミオカンデに引き続いて純水50000トンを用いるスーパーカミオカンデ(Super Kamiokande)も1996年から開始される。スノーの約3倍のイベントが検出でき、かつバックグラウンドは数倍低く抑えられるはずである。

太陽ニュートリノ問題はこれらの測定器によるエネルギースペクトルの精密測定によって最終的に解決されるだろう。

平田慶子(高エネルギー研)

参 考 文 献

- 1) K. S. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. **65** (1990) 1297.
- 2) Y. Totsuka, Preprint ICRR-Report-264-92-2, Univ. of Tokyo (1992).
- 3) K. S. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. **65** (1990) 1301.
- 4) A. I. Abazov et al., Phys. Rev. Lett. **67** (1991) 3332.