

「ついに解決した太陽ニュートリノ問題」

東北大学ニュートリノセンター・助教授 井上邦雄

1 ニュートリノ

小柴先生が「ニュートリノ天文学」への貢献でノーベル賞を受賞したことは皆さんの記憶にも新しいかと思えます。ディビス博士もニュートリノ研究で同時受賞しました。お二人の賞状 (diploma) は、ノーベル賞ホームページでご覧になれますが、賞状には絵が添えられていて、小柴先生には2つの星、ディビス博士には1つの星が描かれています。小柴先生の一方の星は、超新星SN1987Aを意味し、もう一方は、ディビス博士と同じく太陽を表しています。2002年はこの太陽からのニュートリノの研究にとって重要な年でした。ディビス博士が1969年からの実験で発見した太陽ニュートリノ問題が、33年の歳月を経てついに解決したからです。

ニュートリノの最初の登場は、陽子と電子が発見されただけで中性子すら見つかっていない時代の、1930年のことでした。 β 崩壊の連続的なエネルギー分布を説明するのに、パウリ博士は、未観測の中性粒子がエネルギーを持ち去っていると考えました。ニュートリノ (Neutrino) と命名したのはフェルミ博士で、1933年のことです。最後の"-ino"はイタリア語で小さいという意味です。 m と表記します。

観測の難しい m が発見されたのは、1956年になってからです。エネルギー10MeV (メガ電子ボルト) の(電子型) m は、水中の電子とぶつかるのに平均50万光年も距離を飛行します。太陽の中心や地球の裏からでも簡単に突き抜けてきます。初観測は、強力な原子炉のすぐ横で、大量の m の中の極まれに反応したものを捕えました。その後の実験で、 m には電子、 μ 、 s 型の3種類あり、それぞれ電子、 μ 粒子、 s 粒子を作ることがわかっています。 μ や s は、電子と似た性質のより重い素粒子です。反粒子も区別すると6種類となります。現在の素粒子標準理論では、電荷が0で、質量も0となっています。

2 太陽ニュートリノ

では m はどこから来るのでしょうか？ピッグバンの名残の m は 1cm^3 に約300個詰まっています。他

にも、宇宙線の大気衝突でできる大気 m 、地球内放射性物質起源の地球 m 、加速器 m や原子炉 m 、超新星 m もあります。体内のカリウムも m を放出し、成人で約3億個/日の m を放出する計算です。

さて、太陽は一連の核融合反応で輝いています。全体では $4p + 2e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2m_e + 26.73\text{MeV}$ 、という反応で、電子型 m も生成するため、地上には660億個/秒/ cm^2 の m が到達します。 m 量の予測は、46億年前に発生した太陽の進化を計算し、現在の大きさ・明るさ・表面組成などを再現する、標準太陽モデルを使って行われます。表面振動から調べる内部密度も再現でき、予測計算は十分信頼できると考えられています。図1が m のスペクトルです。明るさに直結する低エネルギーのpp- m 量なら精度1%で予測できますが、高エネルギーのB8- m は反応列中で0.02%の寄与しかなく、精度20%の予測となります。

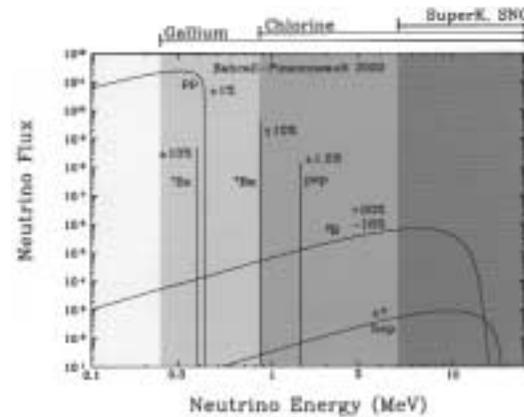


図1 太陽ニュートリノスペクトル

3 太陽ニュートリノ問題

最初に太陽 m を観測したのが、先に登場したディビス博士たちです。615トンのテトラクロロエチレンを地下に蓄え、太陽 m を捕獲して塩素が電子とアルゴンに変わるのを待ちます。そして、10個程度貯まったところでアルゴンを抽出して数えます。この放射化学的実験は、反応時刻・方向・エネルギーはわからず、反応数だけがわかります。1969年から

の観測で、予測の約1/3しか反応しませんでした。Be7- m や不定性の大きいB8- m の観測なので、標準太陽モデルの精度や実験結果も疑われました。

遅れて、小柴先生率いるカミオカンデ実験 (1987年から)が岐阜県神岡町で、そしてガリウムを使った実験 (1990年から)がロシアとイタリアで行われました。ガリウム実験は、同じ放射化学的実験で、ガリウムが m 捕獲でゲルマニウムと電子に変わり、そのゲルマニウムを集めて数えます。精度1%のpp- m にも感度があり注目されましたが、実験結果は両実験とも予測の約半分、もしpp- m しか来ていないとすれば説明できなくはありません。

カミオカンデは、鉱山の山頂直下1,000mに建設された装置で、3,000トンの純水と約1,000本の直径50cmの光センサー(光電子増倍管)を使い、水中での素粒子反応を監視します。これは、電子散乱を使った計測実験で、高速電子回路で素粒子反応が起きた瞬間をつぶさにとらえるという手法です。太陽 m が水中の電子と反応し、 m が電子に、そして電子が m に変わって飛び去ります。電子は水中で超光速で運動し(光が屈折率で遅くなる)、超音速で放たれる衝撃波のように、チェレンコフ光を放出します。この光は、賞状のデザインのように、進行方向にラッパ状に放出され、そのパターンと光量から、方向やエネルギーが得られます。こうして初めて太陽から m が来ていることが確認されました。図2は、 m で写した太陽です。後継の50,000トンの水と11,000本の光電子増倍管を有するスーパーカミオカンデSK実験 (1996年から)で、500日もの露出時間で撮影しました。1マスが $1 \times 1^\circ$ ですが、分解能が悪く、本当の大きさは1マスもありません。カミオカンデやSK実験は、B8- m に感度が有り、予測の約半分が観測されました。

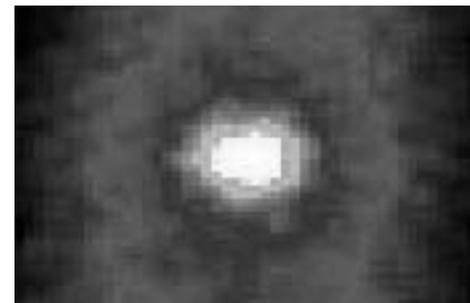


図2 ニュートリノで見た太陽

このように、どの実験も予測より少ない観測結果

でした。これが第1の太陽ニュートリノ問題です。では、標準太陽モデルの間違いとして全てが解決するかというと、そうでもありません。カミオカンデでB8- m の量を決めると、塩素実験からBe7- m が来ていないとなってしまいます。他の組合せも同様です。2つ以上で間違いがないと、矛盾が生じます。これが、第2の太陽ニュートリノ問題です。

4 素粒子標準理論を越えて

第2の太陽ニュートリノ問題以降は、標準太陽モデルや実験結果を疑うより、暗黙の仮定を疑うようになりました。それは、発生した m が変化しないという仮定です。つまり、一連の核融合反応で作られた m が、実験装置に届くまでに、観測できないものに変わればよいのです。これは、素粒子物理の知識を大きく書き換えます。それまで全ての素粒子反応を説明できた素粒子標準理論に修正が必要となりました。これは大統一理論のヒントと考えられ、 m 振動、 m 磁気モーメント、 m 崩壊など、いろいろな素粒子モデルが提案されました。

m 振動は、 m の質量差を必要とし、質量0とする標準理論の枠から出てしまいます。伝搬中の m は、質量に応じた速さで振動する波のように振る舞います。音に例えると、軽い m は低音、重い m は高音です。それぞれ m_1 、 m_2 と名付けます。そして、観測できる電子型や μ 型 m は、これら m_1 、 m_2 の混合状態と考えます。波長の違う音(m_1 と m_2)を重ねると「うなり」が聞こえます。(実際はもう少し複雑ですが、)このうなりの山の部分が電子型、谷の部分が μ 型です。混合の度合い h と、質量の2乗の差 $Dm^2 [eV^2]$ 、距離 $L [m]$ 、エネルギー $E [MeV]$ で表した m の変化確率は、

$$P(m_e \rightarrow m_\mu) = \sin^2(2h) \times \sin^2(1.27 \times Dm^2 \times L/E)$$

で、飛行中に電子型から μ 型、また電子型と振動するように変化し、 m 振動といわれます。小さな質量差なら長距離が低エネルギーでの観測が必要です。

一方、 m に大きな磁気モーメントがあれば、太陽磁場との反応で、電子型 m から反 μ 型 m への変化が考えられます。地球磁場は0.5ガウス程度ですが、太陽表面は1,000ガウス程度、太陽内部はさらに強い磁場があると考えられています。

いろいろなモデルの中で、尤もらしかったのは m 振動です。というのも、1998年のSKの大気 m 観測

で、 l 型 m の振動を知ったからです。後の研究で、 l 型から s 型への振動ともわかりました。この結果は重要で、クリントン大統領の演説にも組み込まれましたし、何より素粒子実験の論文の中で最多の引用件数です。 m 振動モデルは、もちろん太陽ニュートリノ問題を説明しますが、 m の質量2乗差は特定できません。さらに、 m 磁気モーメントの方が、実験結果との良い一致を示していました。

5 ニュートリノ全種類の測定

どのモデルが正しいかを知るには、「 m の変化後の観測」、あるいは、「低エネルギー m の計測実験」が必要と考えられました。

太陽 m はエネルギーが低く、 l 型 m は重い l 粒子に変わらないので、放射化学的手法では電子型 m しか観測しません。電子散乱の観測では、電子型以外にも少し感度があります。 m が電子に変わらなくても、もとあった電子をビリヤードの球のようにはじき飛ばせば、 m が変化した電子と区別できないからです。ただし、反応確率は電子型の約1/6です。

カナダのSNO実験(1998年から)は、水のかわりに1,000トンの重水を使ったカミオカンデと同様な装置で行います。重水中の電子で電子散乱の観測もできますが、特徴的なのは重水素です。電子型 m を捕獲して電子と2個の陽子に変わる反応と、全ての種類で同様に反応する、 m が重水素を陽子と中性子に分解し飛び去る反応があります。それぞれの観測結果は、電子型 m だけの観測が予測の約1/3、全種類の m と反応する後者は、見事に予測と一致しました。2002年の報告です。図3で3種類の観測結果と標準太陽モデルの予測を示します。電子型 m だけの観測(CC)は縦線($X =$ 測定値)、電子散乱(ES)は少し傾いて($X + Y/6 =$ 測定値)、全種類観測(NC)は($X + Y =$ 測定値)の斜め線、標準太陽モデル(SSM)も($X + Y =$ 予測値)で表されます。2本の直線の交点が連立方程式の解ですが、この図では4本の直線が1点で交わっており、非常に説得力があります。交点($Y > 0$)は、電子型以外の m が確かにやって来ていることを示します。

これは、 m 振動モデルの予測と一致しますが、 m 磁気モーメントなどの他のモデルで無いとは言えません。また、 m 振動としても、 m の質量2乗差には6桁もの不定性があり、問題は解決しませんでした。

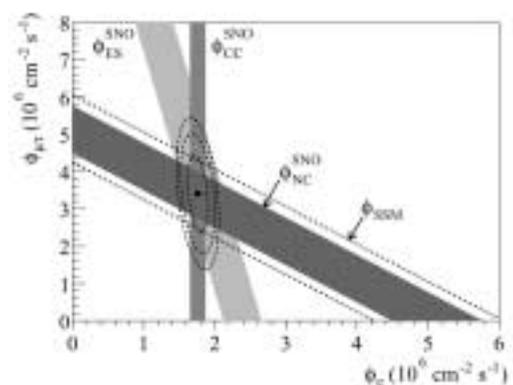


図3 SNO実験の結果

6 カムランド実験

m を最初に発見したライネス博士率いる実験は、700MWの原子炉から11m離れた地下12mの場所で、200リットルの水を標的とし、1,400リットルの液体シンチレータ(素粒子反応によって、チェレンコフ光の100倍程度の光を出します。LSと表記します。)と55本の光電子増倍管を使用しました。原子炉はウランやプルトニウムの核分裂でエネルギーを生み出しますが、核分裂でできた原子核が β 崩壊を繰り返すことで、反電子型 m を放出します。この実験の優れた点は、反電子型 m を陽子で捕まえる所にあります。反電子型 m は陽電子に変化し、陽子は中性子に変化します。少し遅れて中性子が他の原子核に吸収され γ 線を放出するために、陽電子と γ 線のペアというバックグラウンド識別に適した明確な信号が得られるからです。太陽は1億5千万kmも離れていますが、その非常に大きな密度から、特別な機構が働く場合があり、100km程度の距離でも太陽 m 振動を検証できる可能性があります。距離の2乗に反比例して m が減るので、長距離実験では、強力な原子炉、大きな検出器、そして極低バックグラウンド環境が必要で、これまではたかだか1kmの距離が達成できたばかりでした。

ところで、世界では、1.1TWものエネルギーが原子炉で作られています。うち15%が日本、しかも、神岡から130から240kmに全体の7%が集中しています。この立地条件のおかげで、神岡に1,000トン規模の極低バックグラウンドの実験装置を作れば、太陽ニュートリノ問題に関連する m 振動を研究できる可能性が出てきました。これが「カムランド」

です。最初の原子炉ニュートリノ実験と比較すると、70GWの原子炉、180kmの距離、地下1,000m、1,000トンのLS、1879本の光電子増倍管というふうに、全てが桁違いです。この進歩には、過去の実験で、原子炉や m 反応の理解が進んだことも重要でした。また、実験原理は最初と同じで、ライネス博士の着想の良さは驚嘆に値します。

カムランドは、カミオカンデ跡地に建設されました。直径18mの球形タンクに、1,800m³のバッファーオイル(光らない)と1,200m³のLSを満たしてあり、LSは、約100 μ m厚の球形の袋で中心につるされています。超高純度にするために、LSは水で洗われました。イオンは水に溶けやすいので、超純水と混ぜ、油の一種であるLSと自然に分離させると、残ったLSは超純粋というわけです。LS中のウラン量(1gあたり 3.5×10^{-18} g)は通常物質の1兆分の1で、世界一清浄な実験装置です。

日本中の原子炉の運転履歴を教えてもらい、詳細な予測計算を行ったところ、 86.8 ± 5.6 個の m 反応と、 1 ± 1 個のバックグラウンドの予測に対し、54個の反応を記録しました。反電子型 m が予測の61%しか来ていません。他の原子炉 m 実験の結果を一緒にグラフにしたのが図4で、点線およびバンドは、 m 振動で期待される距離と m 反応率との関係です。

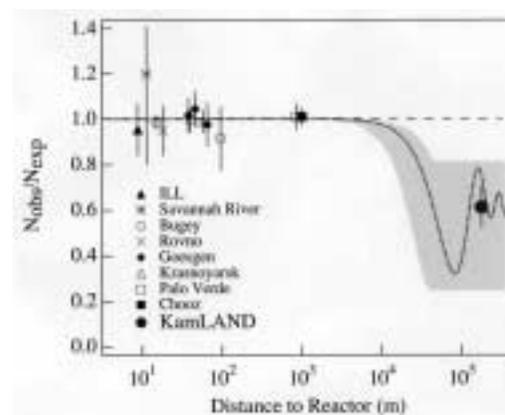


図4 距離と反応率の関係

7 そして太陽ニュートリノ問題は解決へ

SNO実験は、太陽 m 観測で電子型 m が他種の m へ変化していることを発見し、カムランド実験は、原子炉 m 観測で反電子型 m が180kmで61%に減少することを発見しました。それぞれ単独では、 m 振動が答えとはいえません。しかし原子炉実験では強い

磁場は無く m 磁気モーメントモデルは排除される、というように消去法を使うと、 m 振動のみが生き残ることがわかりました。しかも、混合角や質量2乗差といった値も特定できました。

カムランド実験は、単独でも m 振動を確認しようとしています。エネルギースペクトルの歪みの観測や、2006年に本格稼働する志賀2号機(距離88km)の観測で、距離と反応率の関係が振動パターンを描くかなどを調べようとしていて、もう少しデータを蓄積する必要があります。さらに、低エネルギーのBe7- m を計測実験として観測しようともして、これには装置の改良が必要です。

8 最後に

カムランド実験は、東北大学が主体となった日米中の共同研究ですが、最初の結果を報告したとき、外国の研究者からは「また神岡か」と、嫉妬半分称賛半分に言われました。超新星 m 観測、大気 m 振動の発見、長基線加速器実験など全て(スーパー)カミオカンデで達成し、そして原子炉 m 欠損がカムランドです。ニュートリノ研究の新しい発見や成果は、神岡がほぼ独占しています。

さらにカムランドでは、地球内部のウラン・トリウムが出す反電子型 m を観測し、地球内部を直接研究しようとしています。小柴先生の打ち上げた「ニュートリノ天文学」同様に、この新しい「ニュートリノ地球物理」も大きく発展すると期待されています。もしかしたら、ノーベル賞ももたらすかもしれません。ニュートリノ研究は、今後も更なる展開が期待されていて、ますます活気のある研究分野です。今後も多くの若い研究者たちが合流し、更なる発展があることと思います。

参考になるホームページ

ノーベル賞 <http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/>

標準太陽モデル <http://www.sns.ias.edu/~jnb/>

カミオカンデ <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

SNO <http://www.sno.phy.queensu.ca/>

カムランド <http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND/>