

3 太陽ニュートリノ問題

3.1 太陽ニュートリノ問題とは

- 太陽中心の核融合反応： $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$
- 太陽のモデルが得られれば、太陽から放射されるニュートリノのフラックスが計算できる
- 検出される電子型ニュートリノのフラックスの観測値が理論値の半分程度
- 太陽中心部から地球にやって来るニュートリノの量に関するわれわれの理解に、何か間違いがある？
 - ▷ 実験が間違っている？
 - ▷ 実験は間違っていないとしたら、核反応がそんなに起こっていない？
 - ただし、 L_\odot は定まっている
 - ▷ …
- ニュートリノ
 - ▷ β 崩壊（原子核の崩壊過程のうち β 線を放出するもの）によって生ずる電子のエネルギースペクトルで、エネルギー保存則が破れてみえる現象の説明のため、Pauli が導入（エネルギーを持ち去る役目）
 - 反応 ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+$ で、 e^+ の持ち去る運動エネルギーが、 ${}^8\text{Be}$ と ${}^8\text{B}$ のエネルギー差より小さく、しかも連続スペクトルだった (Be^*)の*は励起状態を表わす
 - 反応が ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$ なら説明できる
 - ▷ 静止質量・電荷はゼロ。スピンは $1/2$ … 静止質量は実は $\neq 0$?
 - ▷ 他の物質との相互作用は非常に弱い
 - ▷ 現在の素粒子物理学の「標準モデル」では電子型・ μ 型・ τ 型の3種の存在を想定

3.2 Davis の実験

- 最初の太陽ニュートリノ検出プロジェクト（1968年～）
- 米 South Dakota 州 Homestake の廃坑（元は金鉱）… 宇宙線の影響を避けるため
- 地下 1.5km に直径 6m、長さ 15m のタンクを起し、内部を 615 トンの C_2Cl_4 （四塩化エチレン、ドライクリーニング液）で満たす
- 高エネルギー（814keV 以上）のニュートリノが入射すると、反応断面積は小さいながら



の右向きの反応が起こる。生成した ${}^{37}\text{Ar}$ は四塩化エチレンの分子から離れて溶液中を漂うが、半減期約 35 日で電子捕獲 (β 崩壊) して (左向きの反応)、 ${}^{37}\text{Cl}$ に戻る

¹<http://solarwww.mtk.nao.ac.jp/heliOSEISMOLOGY/Komaba2009/>

	電荷			
レプトン	-1	電子 (e)	μ 粒子 (μ)	τ 粒子 (τ)
	0	電子ニュートリノ (ν_e)	μ ニュートリノ (ν_μ)	τ ニュートリノ (ν_τ)
クォーク	+2/3	アップ (u)	チャーム (c)	トップ (t)
	-1/3	ダウン (d)	ストレンジ (s)	ボトム (b)

表 4: レプトンとクォーク

- ~ 100 日も経過すると、 ^{37}Ar の量はほぼ平衡値 (\propto 単位時間に入射するニュートリノの量) に達すると考えていいので、回収して数をカウント
- ^{37}Ar の量は、電子捕獲の際の Auger 電子 (2.82keV) を数えて計測
 - ▷ 原子内の電子がエネルギーの低い状態に落ちる時、光子を放出するかわりに別の原子内電子を放出することがある。これを Auger 効果といい、放出された電子を Auger 電子という
- Solar Neutrino Unit (SNU): $1\text{SNU} = 10^{-36}$ captures per sec per target nucleus
- 当時の標準太陽モデルからは $7.9 \pm 2.6\text{SNU}$ を予想
- Davis の実験 : $2.1 \pm 0.9\text{SNU} \Rightarrow$ 太陽ニュートリノ問題

3.3 Kamiokande/SuperKamiokande

- 元は Kamioka Nucleon Decay Experiment
- 神岡鉱山の地下 1000m に 50000t の純水 (SuperK)
- ニュートリノ-電子散乱で跳ね飛ばされた電子からの Cerenkov 光を phototube で検出
 - ▷ 太陽ニュートリノ : 実験値は理論値の約半分
 - ▷ SN1987A からのニュートリノも検出
- Homestake と同様、高エネルギー (約 7MeV 以上) のニュートリノのみ検出。主として電子型だが、 μ 型、 τ 型も検出 (感度は 1/6 程度)

3.4 ガリウム実験

- Gallex (欧州)、SAGE (露米) はガリウムを使ったニュートリノ検出実験も行った
- 特徴は、低エネルギーのニュートリノも検出できること
- しかし、やはり実験値は理論値の半分程度

3.5 どうやったら解決できるか？

- 実験が間違っている?... 新世代のニュートリノ実験でも、太陽ニュートリノの量は不足している。太陽から地上にやって来る電子型ニュートリノは、確かに理論的予想より少ない
- もともと太陽中心で生まれる電子型ニュートリノが少ない？ しかし、 L_\odot の制約から、水素核燃焼の総量は決まっている

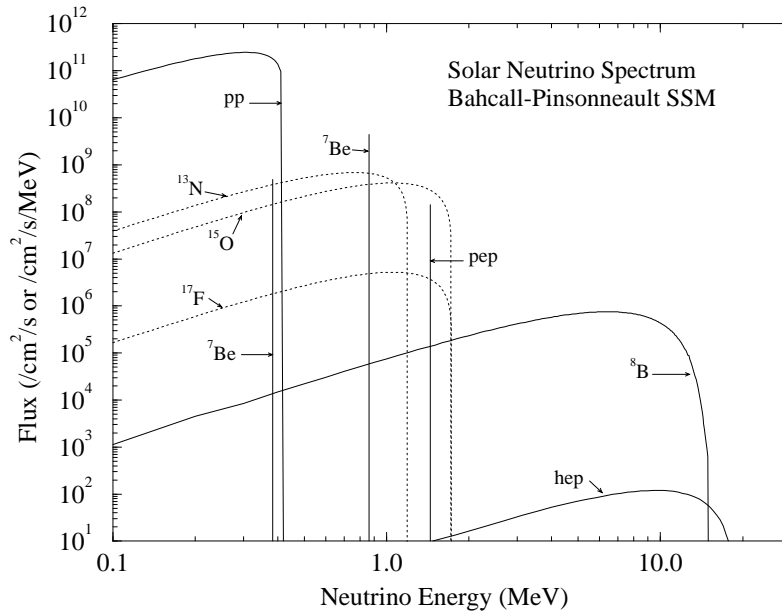


図 5: 標準太陽モデルによる、ニュートリノのエネルギースペクトル

- ▷ ただし、B ニュートリノは minor branch の pp III 起源
 - pp I では $\epsilon \propto T^4$
 - pp III では $\epsilon \propto T^{30}$
 ⇒ B ニュートリノのフラックスは L_{\odot} よりも温度に敏感
 ⇒ B ニュートリノの生成領域は photon の生成領域よりもコンパクト
- 標準太陽モデルで取り入れている input physics の誤り？
 - ▷ 例えば ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ の反応率が違っていれば、 L_{\odot} にほとんど影響を及ぼさずに、太陽ニュートリノだけを減らせる
 - ▷ ただし、ガリウム実験は pp ニュートリノにも感度がある
- 標準太陽モデルで取り入れている諸仮定の誤り？
 - ▷ L_{\odot} と太陽ニュートリノフラックスをを両方説明する様な構造・時間依存の現象など
 - ▷ ニュートリノで「観て」いるのは 500 秒前の太陽だが、光で「観て」いるのは数百万年前の太陽。現在では核反応が減っている？
- 太陽中心では理論値通りの電子型ニュートリノが生まれているが、地上に達するまでに崩壊したり、他の型のニュートリノに変換？
- 結局、大きく分けて、二種類の解決策
 - ▷ particle physics solution — ニュートリノの性質 (崩壊、振動) の問題
 - ▷ astrophysical solution — 太陽の構造の問題

3.6 非標準太陽モデル

- low Z モデル
 - ▷ 金属量を減らしたら？ $Z \downarrow \Rightarrow \text{opacity} \downarrow \Rightarrow \text{温度勾配} \downarrow$

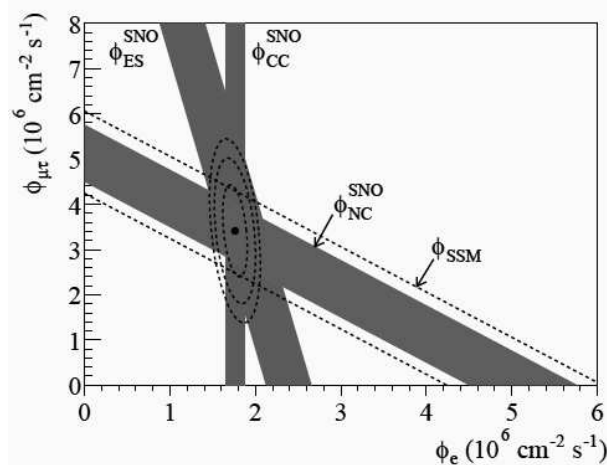


図 6: SNO の実験結果

- ▷ L_{\odot} を保ったまま中心付近の温度勾配を減少
 ⇒ 中心温度は下がる (周辺の温度は上がる)
 ⇒ 太陽ニュートリノのフラックスは減少
- ▷ $Z \approx 0.001$ なら実験値とあう
- ▷ 表面の $Z \approx 0.02$ はどう説明するか？
 - 過去に星間物質中の dust が表面に降り積もったと考える
- ▷ その他の問題点
 - initial helium abundance $\lesssim 0.2$ (Big Bang+元素合成では 0.23)
 - 太陽の音波的固有モードの振動数が観測と合わない

● WIMP モデル

- ▷ WIMP (Weakly Interacting Massive Particles、dark matter 候補のひとつ) が太陽の重力場に捕捉されているとする
- ▷ 周囲の物質との相互作用は弱く、太陽中心付近での平均自由行程が長い ⇒ 熱輸送に寄与 ⇒ 中心付近の温度勾配が減少
- ▷ low Z モデルと同様の道筋で太陽ニュートリノ問題を解決するが、low Z モデルと同様に太陽の音波的固有モードの振動数が観測と合わない

● 混合モデル

- ▷ 太陽の中心付近で混合が起きているとすると、中心付近にたまったヘリウムの一部が外側の水素と入れ代わる
 ⇒ 核燃焼の燃料が増えたことになるので、中心温度が低くても構わない
- ▷ どうやって混ぜる？
- ▷ これもまた、太陽の音波的固有モードの振動数が観測と合わない

● 結局のところ、非標準モデルの試みはどれも

- ▷ 太陽の中心の温度を下げる
- ▷ 温度勾配を下げて、エネルギーを生成している $r \lesssim 0.3R_{\odot}$ の平均的な温度は保つ

ことで太陽の明るさは変えずにニュートリノ生成率を下げようとしたが、とくに太陽の音波的固有モードの振動数が観測と合わなくなるなどの難点を克服できなかった

3.7 ニュートリノ振動解

- 太陽中心で生成した電子型ニュートリノが、ニュートリノ振動により μ 型や τ 型のニュートリノに変換？
- Homestake も SuperK も (SuperK の場合、主として) 電子型ニュートリノを検出しているのに、フラックスは減少
- ニュートリノ振動: ニュートリノ物理の「非標準」モデル
 - ▷ 電子型、 μ 型、 τ 型: "flavour"
 - ▷ Flavour eigenstate \neq Mass eigenstate で、少なくともひとつの mass eigenstate の mass $\neq 0$ なら、flavour eigenstate 間の振動が起こる
 - ▷ Vacuum oscillation & Matter oscillation (MSW effect)

3.8 Sudbury Neutrino Observatory

- Sudbury, Ontario 近くの Creighton Mine の地下 2000m
- 1000t の重水を使った検出器。約 7MeV 以上の高エネルギーのニュートリノを検出
- 3種類の反応を利用
 - ▷ ES (Electron Scattering): SuperK と同じ、電子による散乱
 - ▷ CC (Charged Current): 重水核が電子型ニュートリノを吸収して陽子 2つと電子とに分解する反応。電子型だけを検出
 - ▷ NC (Neutral Current): 重水核による散乱。すべての型を検出
 - ▷ 電子型ニュートリノのフラックスを ϕ_e 、 μ 型・ τ 型ニュートリノのフラックスの合計を $\phi_{\mu\tau}$ とし、SNO の反応ごとの検出値を ϕ_{ES} などとすると

$$\phi_{ES} \simeq \phi_e + \frac{1}{6}\phi_{\mu\tau}$$

$$\phi_{CC} = \phi_e$$

$$\phi_{NC} = \phi_e + \phi_{\mu\tau}$$

- 総ての flavour を合わせたニュートリノの全フラックスを測定
⇒ 実験値 (3種の flavour) は理論値 (電子型ニュートリノを想定) と一致!

3.9 太陽ニュートリノ問題は解決できたか？

- ニュートリノ振動解
 - ▷ SNO results はニュートリノ振動解を定量的に支持
 - ▷ 大気ニュートリノ (宇宙線が大気に入射して生成するニュートリノ) の観測も、ニュートリノ振動・ニュートリノの質量を示唆 (ただし主として μ 型ニュートリノ)
 - ▷ KamLAND: 1000t の液体シンチレータを使い、原子炉からの反ニュートリノを検出 → やはりニュートリノ振動を支持 [KamLAND は地球の内部を起源とするニュートリノの検出にも成功 (2005)]
 - ▷ K2K 実験: KEK (つくば) の加速器で ν_μ を生成 (\sim GeV) して SuperKamiokande に向けて発射し、SuperKamiokande でこれを検出。ニュートリノ振動を確認 (2004)

- 素粒子の標準模型は質量のあるニュートリノが説明できるよう、拡張が必要
 - ▷ ニュートリノ質量 $m_\nu < 10^{-6}m_e$ (何故こんなに小さい?)
- Kamiokande のもうひとつの結果：陽子寿命 $> 2.5 \times 10^{32}\text{yr}$ (標準的な理論は却下)
- 今後は、ニュートリノ物理のパラメータに関する天体物理的制約を与える方向?