

# 太陽フレアニュートリノの数値計算

東京大学宇宙線研究所 寺澤研究室 武石隆治

太陽の表面で起こる太陽フレアは粒子加速を起こし、加速された高エネルギー粒子の反応によりニュートリノが生成される。ここではフレアによって生じるニュートリノの研究について紹介する。

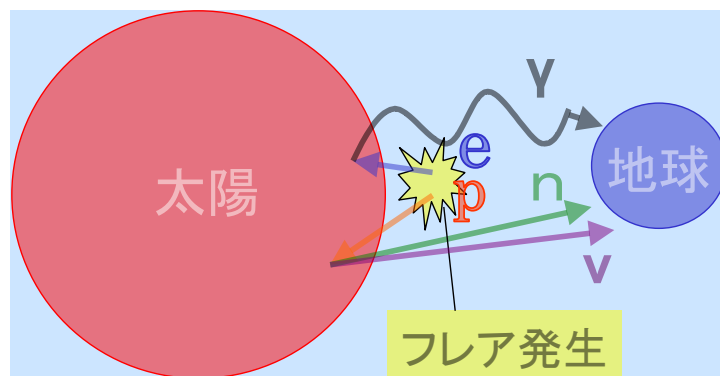
## 1. 太陽フレアとニュートリノ

太陽フレアは太陽表面での爆発現象であり、周囲の陽子・電子を加速する。加速粒子の一部は地球上空で磁気嵐やオーロラなどを引き起こすが、その加速過程はわかっていない。そのため、二次生成物であるガンマ線や中性子線から加速機構の解明への研究が進められている。

フレア生成物の一つ、太陽フレアニュートリノは、フラックスが小さいため実際の検出例は存在しない。一方、既存の理論はニュートリノ検出器スーパーカミオカンデ(SK)でも観測可能と示唆していた。

このような理論と観測の不一致の原因を調べるため、本研究においてフレアニュートリノの理論を詳しく調べたところ、既存の理論が検出量を多く見積もりすぎていたことが分かった。最新のフレア観測データを用いて計算を補正し、SKでの正しい検出量を見積もると、検出はほぼ不可能との結果となり、既存の理論で正しく観測結果が説明できるようになった。

一方、計画中のニュートリノ検出器ハイパーカミオカンデ(HK)は感度がSKの20倍となる。そこで補正後のフレアニュートリノの検出予測値をHKに適用したところ、数十年に一回は検出可能ということが判明した。これはHKにより太陽フレアニュートリノが観測可能であることを示している。しかし、ここで見積もった検出予測値は粗い計算結果であり、**フレア加速機構の解明**・**HKでの他のニュートリノ信号に対するノイズを減らす**という2つの点において、より精密な計算を行う必要がある。



フレアで加速された粒子(図中  $p \cdot e$ )は太陽大気と相互作用し、電磁波・中性子・ニュートリノ(図中  $\gamma \cdot n \cdot \nu$ )を発生する

## 2. 既存の理論の修正

ニュートリノ検出量は、次の式により計算される。

SKで検出される量(Fargion *et al.* 2004)

$$N_{ev} = \sum_i \langle N_{\nu_i} \rangle \sigma_{\nu,p}(E_{\nu_i}) N_{pSK} \quad i = e, \mu$$

$\nu$  の粒子数  
フレアのエネルギー  
 $E_{FL}$ から見積もる

$\nu$  の反応断面積

SKの反応陽子数

右辺の3つの因子のうち、ニュートリノの粒子数（緑の下線）がフレアニュートリノの理論に応じて異なる部分である。

太陽フレアニュートリノについての先行研究は、以下の2つがある。

### ①Kocharov *et al.* 1991

- ・陽子を水素・ヘリウムガス中に入射し、生じるニュートリノを計算
- ・結果をSKの感度に換算すると、1回の大きなフレアについて **85%の検出確率**があると予想

### ②Fargion *et al.* 2004

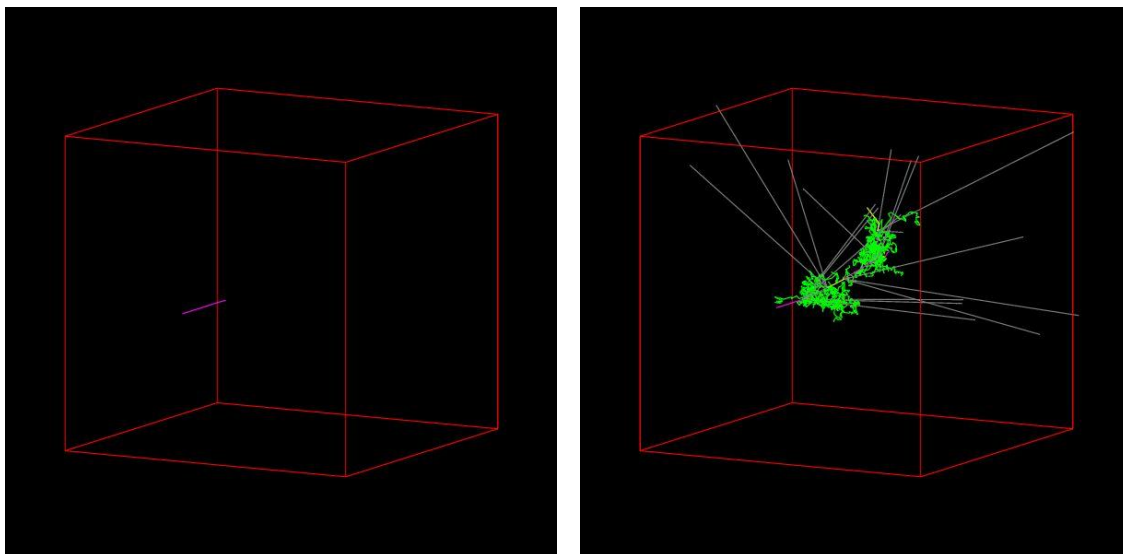
- ・フレアの全エネルギーから中間生成物の $\pi$ 粒子へのエネルギー変換効率 $\eta$ を計算し、ニュートリノのフラックスを計算
- ・SKにおいて、一回の大きなフレアあたりニュートリノは **7.5 $\eta$  個検出される**と予想

これらの理論を調べたところ、①は太陽フレアにより発生する加速陽子を実際より多く見積もっており、②は変換効率 $\eta$ についての不定性を残していることが分かった。そこで太陽フレアで生じる加速陽子のデータから2つの理論を補正したところ、両者ともに **10年に一回起こるような巨大フレアに対し、SKでは100分の1、HKでは10分の1のオーダーの検出量**となった。このことから、SKでの検出頻度は数百年に一回であり、検出がほぼ不可能な反面、HKでは数十年に一回の頻度で検出されるため、検出は十分可能であると言える。

## 3. シミュレーションによる精密化

現時点で得られたフレアニュートリノの検出量は、単位までしか分からない粗い計算となっている。そこでシミュレーションにより精密な検出量を見積もる必要があり、その参考となるのが太陽フレアガンマ線を計算した先行研究である (Kotoku *et al.* 2007)。この先行研究では、計算ツール“Geant4”を用いて加速電子由来のガンマ線の

スペクトルや角度分布を計算している。これを応用し、今後フレアニュートリノにおいても同様の手法で計算を行っていく予定である。

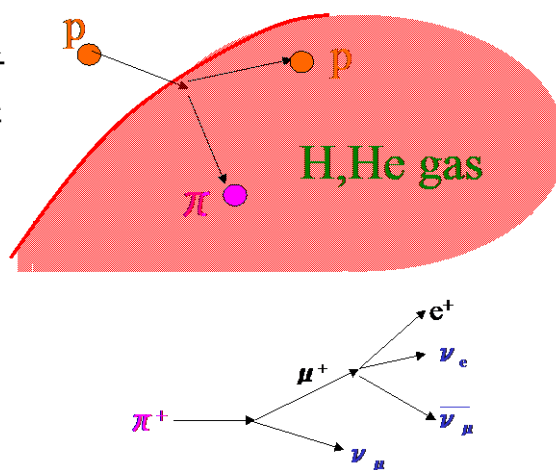


太陽大気密度の箱に陽子(図中 —)を入射し、  
生じるニュートリノ(図中 —)を取得する

(参考) フレアニュートリノ生成反応について

太陽の上空1万kmで起こる太陽フレアは、周囲のプラズマ粒子を加速し、加速された粒子のうち太陽側へ向かうものは太陽大気粒子(水素・ヘリウム)と衝突する。衝突の際に生じた $\pi$ 粒子の崩壊によりニュートリノが生まれ、そのうち地球方向へ向かうものは観測が可能となる。

一方、加速粒子のうち星間空間側へ向かうものは、太陽風として地球近傍に届くため、直接観測が可能である。しかし、それらの粒子は太陽磁場による擾乱を受けており、フレア発生時の情報を失っている。そのため、太陽表面上での加速粒子の反応による二次生成物の研究が必要となるのである。



加速された陽子は太陽大気中で $\pi$ 粒子を生成、 $\pi$ 粒子は崩壊しニュートリノを生み出す