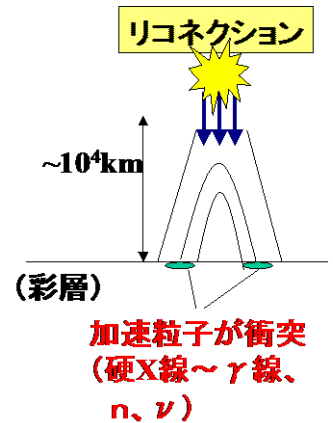


# 太陽フレアニュートリノの数値計算

東京大学宇宙線研究所 寺澤研究室 武石隆治

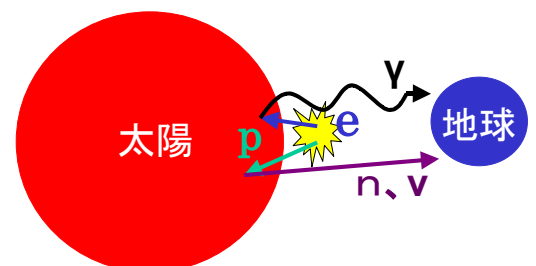
太陽の表面で起こる太陽フレアは粒子加速を起こし、加速された高エネルギー粒子の反応によりニュートリノが生成される。ここでは太陽フレアによって生じるニュートリノの量を計算する研究について紹介する。

太陽の光球の外側を覆う厚さ 2000~1 万 km の領域を彩層と呼び、彩層内部~上空には磁気ループが存在する。太陽フレアは彩層上空 1 万 m での磁気リコネクションによる爆発現象である。磁気エネルギーの解放により、 $10^{28} \sim 10^{34}$ erg ものエネルギーが  $10 \sim 10^3$ s の間に放出される。その際に粒子加速が起こり、最大で陽子は数十 GeV、電子は数十 MeV まで加速する。加速粒子のうち太陽表面側へ進んだものは、彩層において太陽大気と衝突し、電子から硬 X 線や  $\gamma$  線、陽子から中性子やニュートリノが生成される。

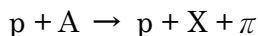


フレアによる粒子の加速機構を調べるためには、電子や陽子のスペクトルを知る必要があるが、それらの直接観測は難しい。一方、加速粒子から生じる  $\gamma$  線や中性子、ニュートリノは地球に来るため、比較的観測しやすい状態となっている。そこで、電子や陽子の太陽大気中での反応のシミュレーションを行い、生じる  $\gamma$  線や中性子、ニュートリノのスペクトルを観測値と比べることで、その成因となる電子や陽子のスペクトルを逆算するという手法がとれる。これにより太陽フレア中での粒子加速の起源に迫ることが可能となる。ここでは特にニュートリノに注目する。

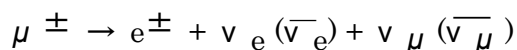
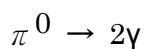
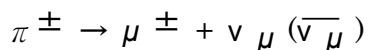
太陽フレアニュートリノは以下のような経路で生成される。まず、加速された陽子  $p$  が太陽大気中の原子と原子核破砕反応を起こし、 $\pi$  粒子を生成する。



粒子生成の模式図



$\pi$  粒子は崩壊反応を起こし、 $\mu$  粒子やニュートリノが生成される。



このようにして生じたニュートリノは、スーパーカミオカンデ(SK)で検出される。SK

では太陽中心からのニュートリノ、大気ニュートリノ、加速器からのニュートリノなどを調べているが、太陽フレアからのニュートリノは量が少なくまだ検出されていない。しかし、現在計画されている次世代のニュートリノ検出器ハイパーカミオカンデ(HK)は容積がSKの20倍であり、検出能力も20倍となるため、太陽フレアニュートリノの検出が期待されている。そのため太陽フレアニュートリノの量の精密な計算が必要となっている。

太陽フレアニュートリノの先行研究(Fargion 2004)では、SKでの検出量が以下の式で表されている。

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

ここで  $N_{\nu}$  はフレアニュートリノの粒子数であり、フレア全体のエネルギー  $E_{FL}$  から見積もられる。 $\sigma_{\nu p}$  はニュートリノの反応断面積、 $N_{pSK}$  はSK内の反応陽子数である。 $E_{\nu} \sim 100 \text{ MeV}$ 、 $E_{FL} \sim 10^{31} \text{ erg}$  とし、 $E_{FL}$  の内  $\eta E_{FL}$  がニュートリノのエネルギーに移ると考えると

$$N_{ev} = 7.5 \eta \text{ event / flare}$$

となる。HKならこの20倍、すなわち  $150\eta$  となる。また  $\eta$  はおよそ0.1以下と見積もられている。しかし、SKで検出されていないことから  $\eta$  はもっと小さな値をとるものと予想され、またこのような見積もり方ではスペクトルの形などもわからない。そこでこれよりも精密な計算をする必要があり、それに適しているのが計算ツール GEANT4 である。

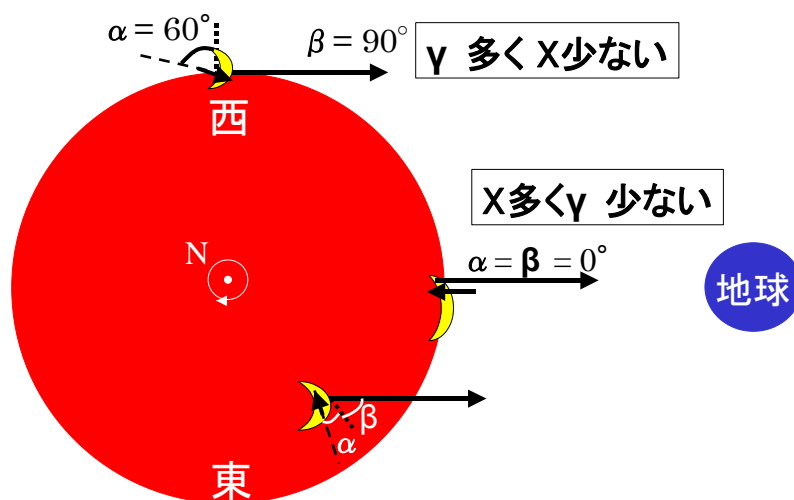
GEANT4 は高エネルギー粒子の反応の計算に素粒子の分野で一般的に用いられているツールである。反応領域、入射粒子、必要な相互作用を設定すると、反応が進む過程で放射されるスペクトルを計算することができる。”GEometry ANd Tacking”の名の通り、粒子の反応を幾何学的に追跡できるのが特徴である。

このような経緯から、この研究は GEANT4 を用いて先行研究よりも精密なフレアニュートリノの計算を行うことを目的とする。そのための手段として、GEANT4 を使い太陽フレア  $\gamma$  線を計算した先行研究(Kotoku 2007)を参考にする。これは加速された電子の反応のシミュレーションから、生じるガンマ線のスペクトルを計算した研究である。ここで計算に用いた条件は以下のようにされていた。

- ・ 入射電子 1~100MeV
- ・ 電子、 $\gamma$ 線ともにパワースペクトル
- ・ 太陽大気の密度の水素ガス中で反応

- ・クーロン散乱、制動放射で光子が生じ、コンプトン散乱により生じた光子が減る

計算の結果、太陽表面への粒子の入射角  $\alpha$ 、光子の散乱角  $\beta$  が大きいほど、すなわち入射・散乱が太陽表面に対し斜めであるほど高エネルギー側の光子が多いスペクトルとなることがわかった。つまり、地球から見て太陽の端の方で起きたフレアは、 $\beta$  が大きいため  $\gamma$  線が多く、X 線が少ないスペクトルとなり、太陽の中心付近で起きたフレアは  $\beta$  が小さいため X 線が多く、 $\gamma$  線が少ないスペクトルとなることになる。このようにして GEANT4 を用いた計算によってフレアの位置とスペクトルの関係が明らかになった。またこの結果は観測とも合っていたという。



Kotoku の結果

以上のようなフレア  $\gamma$  線の計算と同様の手法をフレアニュートリノに対して行う。その際に必要となるのは、計算の条件を以下のように変えることである。

- ・入射粒子：電子 1~100MeV → 陽子 100MeV~数十 GeV
- ・反応機構：荷電粒子、光子の相互作用 →  $\pi$  や  $\mu$  の崩壊反応
- ・反応領域は同じ太陽大気密度の水素ガス

これに加え、太陽の裏側からの寄与も考えなくてはならない。 $\gamma$  線と違いニュートリノは太陽内部を貫通するため、地球から見て太陽の裏側で起きたフレア由来のニュートリノも観測されるはずである。相対論的ビーミングの効果により、入射陽子と生じるニュートリノの向きがそろっているほど高エネルギーで多量のニュートリノが観測されるとの先行研究(Kocharov 1991)もあり、太陽裏側からの寄与は無視できないものと予想される。以上のような条件をもとに研究を行っていきたい。