

論文審査の結果の要旨

氏名 古徳 純一

本論文は7章からなっている。第1章では、本論文の概略が紹介され、第2章で、宇宙での粒子加速の素過程、太陽フレアに伴う硬X線・軟ガンマ線の観測、の概略が紹介されている。第3章では、加速された電子や放射されたガンマ線に関連した物理素過程の説明が行われ、第4章では、本論文で用いられている Geant4 と呼ばれるシミュレーション・ツールキットの説明が行われている。第5章が、本論文の核となる部分であり、種々のシミュレーション結果が示されている。そして、第6章で、シミュレーションの結果と実際の太陽フレアの観測結果との比較・検討が行われ、第7章において結論がまとめられている。

太陽表面では、フレアと呼ばれる爆発現象がしばしば発生し、その際電子は高いエネルギーまで加速される。太陽フレアに伴って観測される硬X線からガンマ線にわたる連続成分は、この非熱的な電子がおもに光球に突入する際、制動放射として発生すると考えられる。しかしながら、相対論的電子が光球に突入するものとすれば、制動放射光子は前方（太陽の内側方向）に偏って放射されるはずだから、それらは我々には直接届かず、光球より深部でコンプトン散乱をうけることで、初めて観測されると考えられる。この過程は観測データの解釈において本質的に重要と考えられるにもかかわらず、今までほとんど研究されてこなかった。本論文では、このコンプトン散乱を含め、太陽フレアにおける様々な素過程を考慮し、与えられた電子のスペクトルから、どのようなガンマ線スペクトルが放射されるか、定量的に計算が行われた。

論文提出者は、シミュレーションにあたり、太陽表面を中性水素ガスのみからなる密度一定の直方体の積み重ねで近似し、物理プロセスとして、光子については光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成をとりこみ、電子については、電離、制動放射、多重散乱、電子対消滅のプロセスを考慮した。電子は1-100 MeV の範囲にスペクトル指数 δ のパワーロー分布を持つとし、電子は物質中でおもにクーロン散乱でエネルギーを失いつつ、制動放射を出し続け、放射された光子は直接もしくはコンプトン散乱を経て観測者に届くとした。

シミュレーションを行なった結果、太陽表面に対して電子を垂直に入射した場合には、どの方向から観測しても観測される光子のエネルギーが1 MeV を越えることは難しいことが判明した。そこで、太陽表面に対して電子を斜めから入射すると、観測さ

れるスペクトルはハードになった。さらに、観測者の俯角を変えてみると、俯角が大きい（太陽面に近い）ほど観測されるスペクトルがハードになることがわかった。電子スペクトル指数 δ と光子指数 γ の関係は、コンプトン散乱を考慮することで大きく変更されなければならないことがわかった。また、 δ を様々に変えたところ、電子のスペクトルがハードなほど γ も小さくなるが、 δ を0.8と1次のフェルミ加速で予想されるよりもずっと小さくしても、 γ は1.8程度までにしか小さくならなかった。俯角が60度以上の範囲では、広い δ の範囲にわたって、 γ は2-3の範囲に収まった。

これらを、実際の太陽フレアでの現象にあてはめて解釈した結果、論文提出者は以下の結論を提示している。

○太陽の縁に近いほど、エネルギーの高いガンマ線が観測されやすいという、よく知られた観測事実は、コンプトン散乱を考えることで説明できる。

○少なくとも、強いガンマ線放射を伴うフレアでは、電子のピッチ角分布はかなり大きな値（90度に近いもの）まで分布している必要がある。

○太陽の縁の近くで発生したフレアに限った時、「ようこう」衛星で観測されたガンマ線スペクトル指数 γ の分布は、シミュレーションでほぼ再現できた。

○「ようこう」の観測したフレアの中には、硬X線で急なスペクトル指数を持つにもかかわらず、ガンマ線では平らなスペクトルを示すものがある。これは、異なるピッチ角の電子を足しあわせることで説明できる。

○1998年8月18日のフレアで観測されたハードなガンマ線のスペクトルは、ループの足元からの放射とは考えにくく、ループ頂上からの放射である可能性が強い。

以上のように、本論文においては、制動放射の異方性およびコンプトン散乱を考慮したシミュレーションを行なうことにより、太陽フレアに伴う、非熱的な電子のスペクトルおよびピッチ角分布に関し、従来にない新しい知見が導かれている。これは、太陽フレアにおける粒子加速の理解に重要な情報を与えたものであり、博士論文に値すると評価できる。

なお、本論文第5章と、第6章の主要部分は、牧島一夫、小浜光洋、寺田幸功、玉川徹との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。