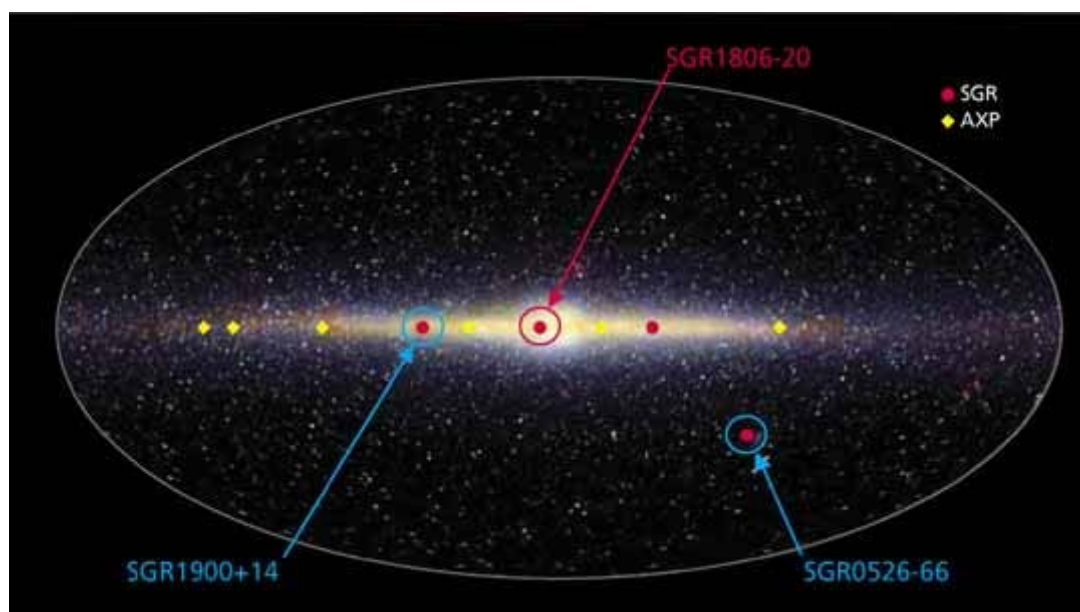


GEOTAIL 衛星天体ガンマ線観測始末記

東京大学 寺澤敏夫



これまでに知られている軟ガンマ線リピーター (SGR, 4 つの赤丸) と、類似した性質を持つといわれる異常 X 線パルサー (AXP, 6 つの黄色の四角) の位置 (銀河系座標)。今回、巨大フレアを起こした SGR1806-20 は銀河中心に近い方向にある。前々回、前回の巨大フレアは SGR0526-66 と SGR1900+14 で起きた。(C) NASA Marshall Spaceflight Center

はじめに

GEOTAIL についての原稿を向井さんから求められ、あれこれプランを練ったのですが、結局、2005 年の ISAS ニュースの記事「GEOTAIL 衛星天体ガンマ線観測始末記」がまとまっており、それを転載していただくのが一番臨場感があるだろうと思い至りました。2005 年 5 月時点で書いたものですので、そのようにお読みいただければ幸いです。なお、一部テニオハ等を修正してあります。

GEOTAIL とは、1992 年 7 月に打ち上げられ、現在もデータ取得に活躍中の磁気圏探査衛星の名前です (地球を表す接頭辞 geo に磁気圏尾部を表す tail をつないだ造語)。科学史を繙くと、予期せざるデータが新しい研究の進展につながったという沢山の例を見いだすことができます。しかし個人レベルでは、そうしたことはごく稀な非日常的出来事でしょう。私自身が GEOTAIL 衛星によって天体ガンマ線の観測を行い、しかもそれによってその最前線に躍り出ることになるろうとは、つい数ヵ月前までは思ってもみなかったことでした。

GEOTAIL 衛星プロジェクトはその名のとおり、地球磁気圏、特に尾部を主な研究対象として、JAXA 宇宙科学研究本部の前身である宇宙科学研究所と NASA が共同で企画したものです。磁気圏の研究にとって重要なのは、その場のプラズマ密度、速度、温度に加え、高エネルギー粒子や

電磁場とその揺らぎ(波動)です。そうした項目については、ほぼ完ぺきな観測体制がとられてきました。

一方、磁気圏研究のお隣に当たる太陽コロナ・フレアの分野では、「ようこう」衛星の大活躍が記憶に新しいところです。磁気圏と太陽フレアは、プラズマの密度や磁場強度は何桁も違うものの、磁気リコネクションと呼ばれる共通の物理過程が支配的であることが明らかにされました。その研究の進展には、GEOTAIL と「ようこう」のデータを用いた日本の磁気圏グループと太陽グループの寄与が本質的でした。「ようこう」では、GEOTAIL と違って直接その場所に行かずに磁気リコネクション過程を研究するため、X線～ガンマ線による遠隔観測(リモートセンシング)が行われていました。

GEOTAIL が太陽フレアのガンマ線をとらえた

さて、話は5年前の2000年初めにさかのぼります。GEOTAIL 衛星のプラズマ観測器(LEP, イオンと電子のカウンターで構成)のデータを眺めていて、時折、妙な縦縞が入ることに気が付きました。図1上は1997年11月6日11時40分～12時10分(世界時)の30分間のLEPのイオン・データを示したものです。縦軸はイオンのエネルギー、横軸が時間で、図の擬似カラーは各時刻・各エネルギーのイオンのカウント数を示します。この時間帯、GEOTAIL は磁気圏尾部のプラズマシートの中にあり、周りの熱いイオンが連続的に飛び込んできていました(磁気圏尾部とは、彗星の尾のように地球磁場が太陽風によって吹き流されてできた地球の尻尾のこと。その中央には、数千万度(数 keV)という高温のプラズマが詰め込まれてシート状の構造を作っており、それをプラズマシートと呼びます)。

図では、その様子が0.2～10keVの範囲で横に連なる色の帯として見えています。色合いが時間とともに変わるのは、イオンの量の変動していることを表しています。一方、図の中央付近、11時53分～11時55分ごろには青～黄～赤の縦縞が見えます。これがもしイオンによるものなら、計測の最低エネルギーである0.02keVから最高エネルギーの40keVに達する、広いエネルギー範囲のイオンのバースト・イベントがあったことになります。しかし、こんなイベントはそれまで知られていません。

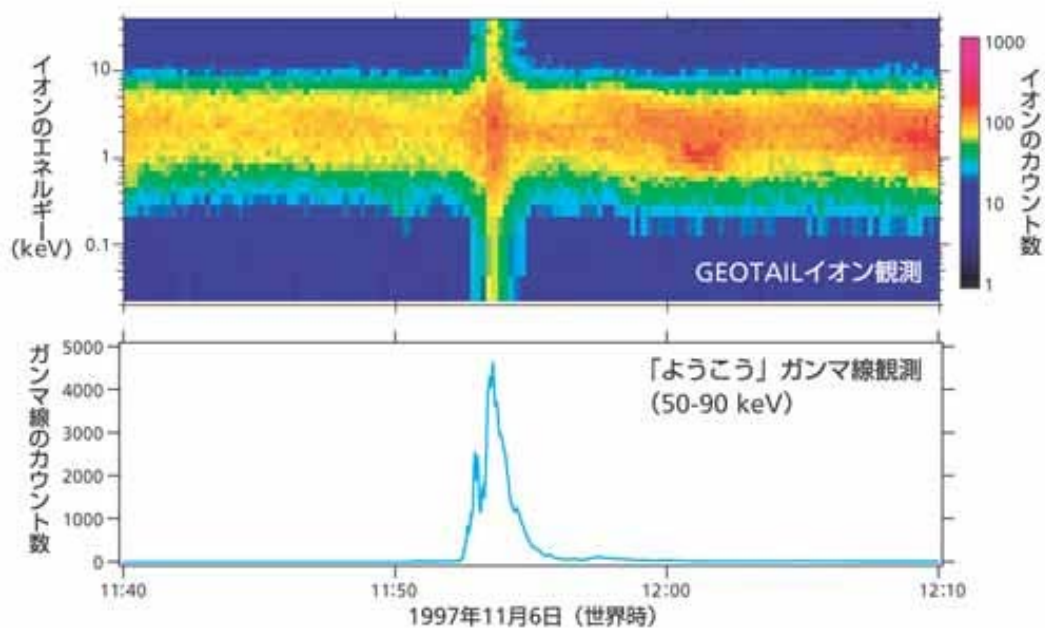


図1 上：LEPのイオンカウントを時刻・エネルギーごとに擬似カラーで表示(E-t図)。中央に近い縦縞がGEOTAILへの太陽ガンマ線の到来を示します。

下：「ようこう」が観測した太陽からのガンマ線(50～90keV)の時間プロファイル。ピークの位置は、上の縦縞と一致しています。

LEPデータの信憑性を調べているうちに、同時刻に観測された「ようこう」のガンマ線光子のデータ(HXT/H)に行き着きました(図1下)。「ようこう」は、ちょうど図1上の縦縞の時間帯に光子数の増大を観測していますが、これはクラスX9.4という特大級の太陽フレアに伴うものでした。当時大学院生の竹井康博君が調べたところ、大きな太陽フレア(>X3)に伴ってLEP観測に似たような縦縞が入る例が沢山見いだされました。さらに、LEPデータと「ようこう」のエネルギー別データの詳しい比較から、縦縞部分のLEPデータは50keV以上のガンマ線光子の強度を表していることが証明されたのです(ガンマ線に対しては、図1上の縦軸のエネルギーの目盛りは意味を持ちません)。

LEPのガンマ線に対する感度はごく低いもので、専用観測器に比べると1000分の1程度以下ですが、専用観測器は地球の影に入って太陽を見ていない時間帯が結構あります。それに対し、地球中心から10～30地球半径の距離を飛行するGEOTAILは、地球の影に入る時間は無視できるほど少なく、ほぼ連続的に太陽を「見て」います。そのため、ほかのデータが得られていなかったとき、太陽ガンマ線データを取得して太陽フレア研究者に提供することもできました。

しかし、太陽活動の低下に伴ってフレア数も減少、これでLEP太陽ガンマ線観測も店じまいかと思っていた矢先の2005年初めのことです。

SGR1806-20の巨大フレア発生

ガンマ線天文衛星 HETE2 の日本側代表として活躍中の東工大の河合誠之さんから「軟ガンマ線リピーターSGR1806-20 が、2004 年 12 月 27 日 21 時 30 分 26 秒(世界時)から数分間にわたって巨大フレアを起こした。そのフレアの開始直後のガンマ線強度は、太陽フレアより強かったといわれている。LEP データにそれらしいものは見えていないだろうか?」というメールが飛び込んできました。

早速、LEP データを調べてみました。まず初めに描いたのは図 2 です。この図は 2004 年 12 月 27 日 21 時 15 分～21 時 45 分の 30 分間の電子(上段)とイオン(下段)のデータを示したものです。GEOTAIL は太陽風内にあったので、太陽風の電子とイオンが連続的に横の帯状に並んでいます。そして、河合さんから連絡のあったまさにその時間に、これらの電子、イオンの横帯を貫く縦縞が入っているではありませんか(図の中央付近の青色矢印で表示)。この図を見て巨大フレア観測の成功をほぼ確信しましたが、その後論文を仕上げる 3 月末に至るまで、大学の義務的な仕事以外のほとんどをキャンセルし、大学院生の田中康之君ほか幾人かの共著者とともにデータ解析作業に没頭することになったのでした。

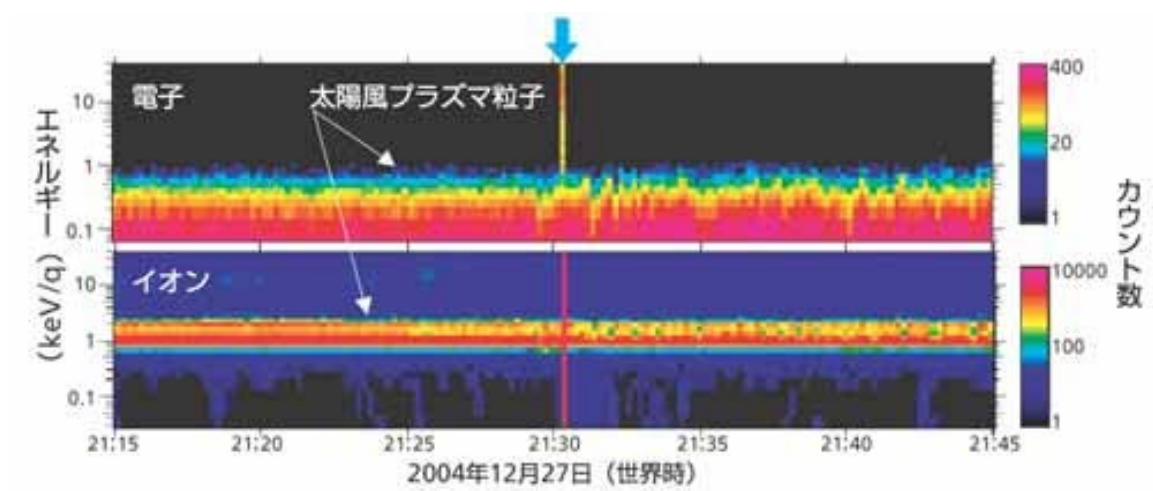


図 2 上：LEP の電子のカウント。下：LEP のイオンカウントの E-t 図

青の下向き矢印で示した時刻に一筋の縦縞が見られます。これが SGR1806-20 からのガンマ線のシグナルを表していました。

ピーク観測は GEOTAIL の LEP だけ

話を図 2 を描いた直後に戻します。LEP データの時刻と、SGR1806-20 からのガンマ線の GEOTAIL への到達予想時刻を比べ、その差はデータの時間精度である数ミリ秒以内で一致することが判明しました。こうして、巨大フレアからのガンマ線光子を検出したことは疑いのないところとなりました。図 2 のカウントデータを時間順に並べ替えたのが図 3 上です。このように時間順に並べ替えると、LEP は 5.48 ミリ秒の時間分解能を持ったガンマ線観測器ということになります。この時間分解能は、ガンマ線専用観測器に比べてもそれほど見劣りのしないものです。

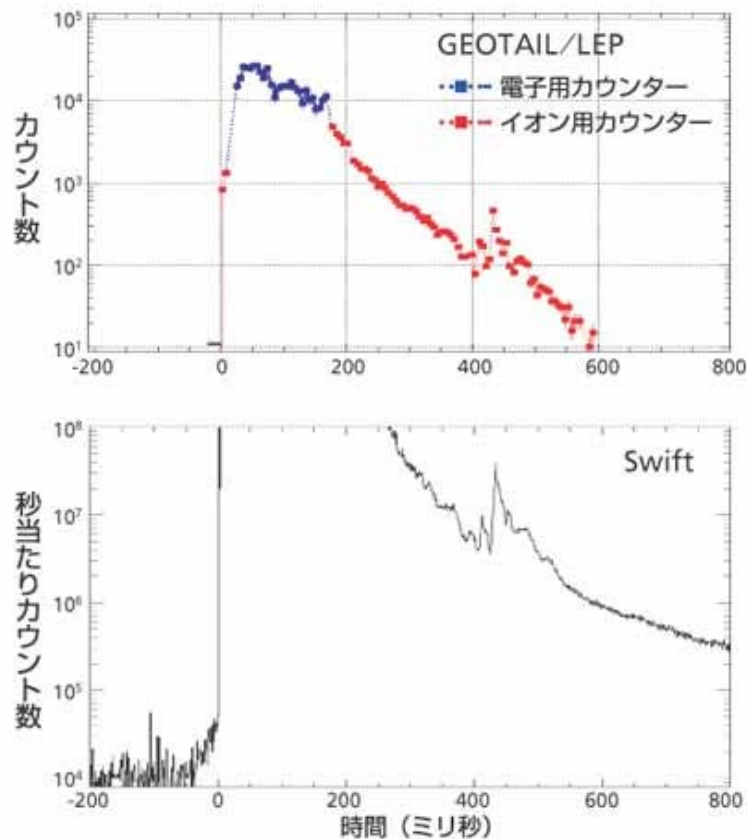


図3 上：LEP のカウントを時間順に並べ直したグラフ(巨大フレアからのガンマ線の光度曲線)。下：ガンマ線天文衛星 Swift が得た光度曲線。ピークを含む約 260 ミリ秒間はデータが得られていません。上下のグラフとも 400～450 ミリ秒の辺りにいくつかのサブピークが見える。2 つの独立な観測でサブピークの構造は細部まで一致しており、これらが本物であることが証明されました。この構造は小さなエネルギー解放が再び起こったことを示すと思われますが、詳しいことは今後の研究を待ちたいと思います。

そうこうしているうちに、ほかのガンマ線天文衛星のデータ取得状況が明らかになってきました。残念ながら河合さんが関与する HETE2 衛星は SGR1806-20 から見て地球の影にありデータは取得できなかったのですが、Integral, RHESSI, Konus-Wind, Swift といったそうそうたる顔ぶれが参戦してきました。しかし同時に、それらのガンマ線天文衛星にとっては巨大フレア開始直後の 200～500 ミリ秒間は信号が強過ぎて、いずれもデータを取りこぼしていたことが判明しました。いくつかの観測の速報を眺めると、一応、ピークのガンマ線エネルギー量の推定が載っていますが、それらはガンマ線専用の観測器が得たものではなく、もっと時間分解能の悪い別の観測器(地球の放射線帯モニタなど)に飛び込んできたガンマ線光子によるカウント数を苦労してエネルギー量に焼き直したもののようでした。

「時間分解能の高い観測でピーク付近のデータを取りこぼさなかったのは、GEOTAIL の LEP だけらしい!」。我々のデータが重要性を増してきました。急きよ、データを論文にまとめて投稿しようと思ったのは、1 月下旬のことでした。図 3 下は、その後報告された Swift 衛星のデータです。0～260 ミリ秒の間、グラフが上に突き抜けているのは、信号が強過ぎたために生じ

たデータギャップの部分です。図 3 の上下を比べると、LEP のデータがきれいに Swift 衛星のデータギャップを埋めているのがお分かりいただけるでしょう。そして、過去 5 年間の太陽フレアガンマ線による感度校正の結果を生かし、このピークでのガンマ線の強さが 1 平方センチメートル当たり毎秒 20 エルグという、とんでもない強さであったことが確認されたのです。

マグネターのフレアに磁気リコネクションが関与

SGR1806-20 の正体は、1000 兆ガウス程度という超強磁場を持つ中性子星(マグネター)であるとする説が有力です。マグネターは普段から少量の磁場エネルギーを断続的に解放し、比較的能量の低いガンマ線を放射しているため、軟ガンマ線リピーター(SGR)と呼ばれています。これまで 3 つのマグネターが巨大フレアを起こしたのですが(表紙の図の SGR0526-66, SGR1900+14 そして SGR1806-20), 今回のフレアは過去の 2 つに比べて 100 倍以上も大きいものであったことが明らかになりました。

マグネターは、数十年に一度ほど巨大フレアとして普段よりはるかに多くの磁場エネルギーの爆発的解放を起こすらしいのですが、詳しいことはよく分かっていません。そのメカニズムを探るためには、フレア開始直後のガンマ線の強度変化を知ることが必要です。そのために LEP データは大変貴重なもので、今後の理論モデル構築の手掛かりとして重要な役割を果たすことになるでしょう。特に図 3 上の光度曲線の 0~200 ミリ秒の間に見られる凹凸の 60 ミリ秒ほどの時間スケールは、マグネターにおけるエネルギー解放素過程の時間スケールを反映すると考えられます。通説によれば、その素過程にも磁気リコネクションが関与しているといわれており、それが正しければ GEOTAIL は、地球磁気圏と天体の両方の磁気リコネクションを観測した最初の人工衛星であることになります。

少し早めの桜が咲き始めた 3 月末、ほかのガンマ線天文衛星の結果と並んで、我々の結果が 4 月 28 日発行の『Nature』誌に掲載されることが決まり、取りあえず是一件落着となったのでした。

後日談

文中に登場する田中康之君は、Geotail データ解析により博士号を取得しました(Geotail は別のマグネター SGR1900+14 の 1998 年 8 月の巨大フレアも観測していました。田中君は遡ってそのフレアについても解析し、博士論文はその結果を含めたものになりました。)その後、宇宙研 X 線天文学部門の高橋研での PD 修行を経て、広島大学の Fermi チームの特任助教と、X 線/ガンマ線天文学のプロとなって活躍中です。

2004 年以降、いくつかの別のマグネターがフレアを起こしました。その都度 LEP データをチェックすると(*)、フレアの規模に対応したガンマ線を感じているようです。ただし、2004. 12 月ほど強いものは起きておらず、天体 X 線/ガンマ線観測衛星が完ぺきなデータを取得している

ことから、Geotail の「出番」は来ていません。一方、天体から飛来するガンマ線として、マグネターのフレアよりはるかに頻度が高いものに宇宙論的遠方で発生する「ガンマ線バースト現象」(GRB)があります。GRB からのガンマ線強度は 2004. 12 のマグネター巨大フレア時の強度に比べ 6-7 桁程度も低く、LEP の「検出限界」以下であるのが普通です。しかし、2013 年 4 月 27 日に発生した GRB130427A は距離が比較的近く(赤方偏移 0. 34、すなわち約 40 億光年)、ガンマ線強度も GRB としては大変強いものでした(といっても 2004. 12 の巨大フレアの 3 桁以下)。この時の LEP データを調べたところ、ちゃんとそのガンマ線を感じていたことがわかりました。図 4 にそのデータを示します。これは Geotail がこれまでに「見た」天体現象として最遠であることは間違いないでしょう。

(*) ガンマ線検出の有無のチェックのためには通常の LEP データ処理とは別系統の追加的処理が必要になります。時ならずして割り込んでくる追加的処理について、いつもお世話になる斎藤義文さん、篠原育さんほかの方々にこの場を借りてお礼申し上げます。

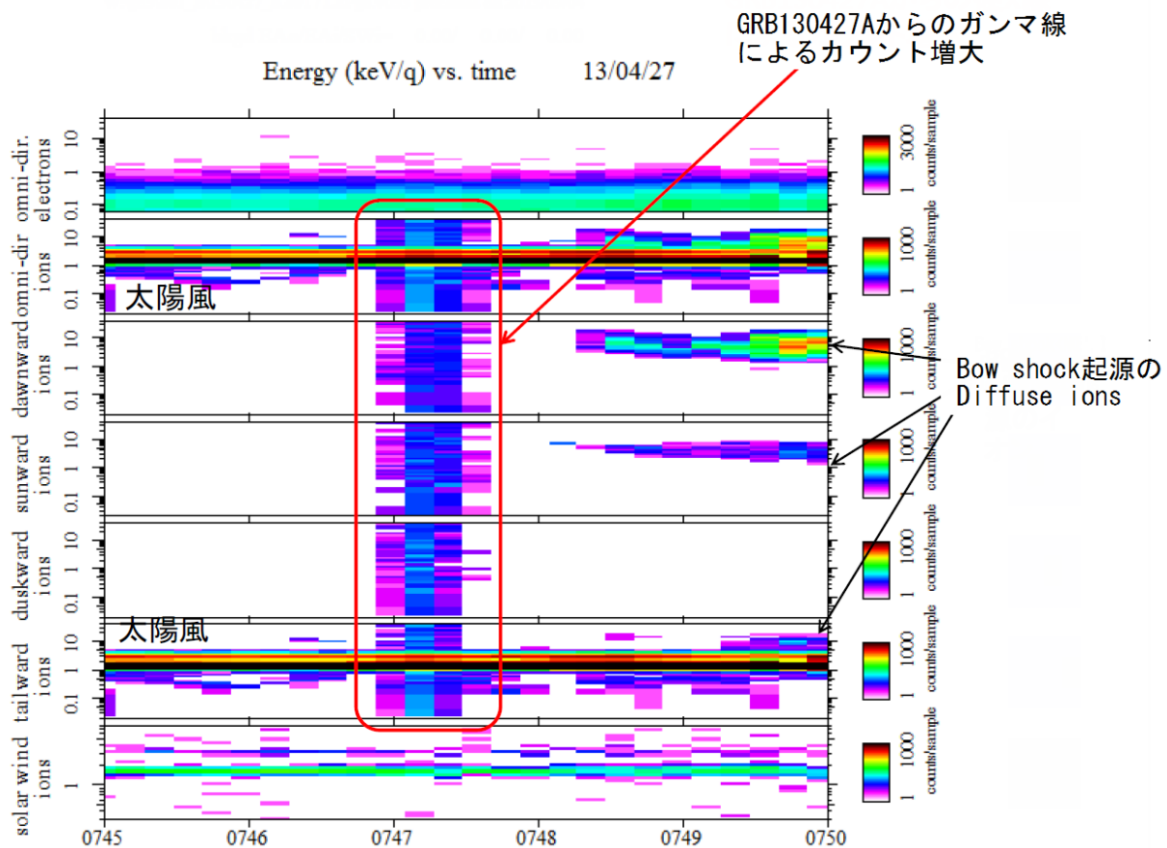


図 4. Geotail の「見た」最遠天文イベント (LEP による GRB130427A からのガンマ線検出)。図は 2013 年 4 月 27 日の 07:45~07:50UT の 5 分間の LEP の E-t 図 (上から電子、イオン (全方向の和 1 パネルと方向別に 4 パネル)、SW センサー) を示します。07:47 から約 30 秒間のほぼ等方的なイオンのカウント増大がガンマ線に対応していることがわかりました。(電子と太陽風センサーは断面積が小さいので、ガンマ線によるカウント増大はノイズレベル以下でした。) 07:48 以降にみられる横に伸びたイオンのカウントは bow shock で加速された diffuse ion の出現を示します。