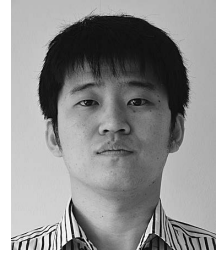


# Crabパルサーからの超高エネルギー ガンマ線放射

齋藤 隆之

〈京都大学理学研究科・京都大学白眉センター 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: tysaito@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp



パルサーとは、周期的なパルス状電磁放射をする天体である。その一部は、ガンマ線をも放射する。ガンマ線放射は、「曲率輻射」という機構で説明がつくと、最近まで思われていた。しかし、CrabパルサーをMAGICなどの解像型大気チェレンコフ望遠鏡を用いて観測した結果、50 GeVを超える超高エネルギー放射が見つかった。この放射成分は曲率輻射では説明がつかないことが明らかになり、いくつかの新たな放射モデルが提案された。50 GeV以上の波形の精密測定の結果から一部のモデルに対しては疑問符が付けられたが、放射機構の解明にまでは至っていない。パルサーからの超高エネルギー放射それ自体は、量子重力理論の検証に利用できる可能性があり、またパルサーの粒子加速機構の解明は、宇宙線陽電子の起源解明にもつながる。観測を開始したH.E.S.S. IIや数年後に観測が開始されるCTAにより、パルサー物理のさらなる発展が見込まれる。

## 1. 宇宙の粒子加速器

宇宙から地球に、大量の超高エネルギー荷電粒子が降り注いでいる。それらは一般に「宇宙線」と呼ばれており、その存在は、宇宙に荷電粒子を加速する機構が存在することを示している。

荷電粒子を超高エネルギーにまで加速することは、地球上で人工的に行うこともできる。それらの人工加速器はこれまで、素粒子物理学の発展に大きく貢献してきた。Large Hadron Collider (LHC) が、陽子を7 TeV<sup>\*1</sup>まで加速し、それらを衝突させることでHiggs粒子を発見し、昨年のノーベル物理学賞につながったことは、記憶に新しい。人工加速器では、粒子を加速する原理は、極めて単純な言い方をすれば、「荷電粒子に電場をかける」だけである。荷電粒子は電場により

「力」を受けるので「加速」される。

それでは、宇宙のあちこちに静電場加速器があり、そこで宇宙線が作られているのかというと、残念ながら、そうではない。宇宙線のほとんどは、「フェルミ加速」と呼ばれる別の機構によって加速されていると考えられている<sup>1), 2)</sup>。簡単に言えば、粒子が運動する分子雲や磁気乱流に何度も散乱される。散乱により加速されることもあれば減速されることもあるが、統計的には加速されることのほうが多い。(フェルミ加速は統計加速とも呼ばれる。) 結果として高エネルギー粒子が生成される。人工加速器と比べて、何とも非効率的な加速機構と言わざるをえない。その中でも比較的効率的と言える、超新星爆発の衝撃波面で起こるフェルミ加速でさえ、荷電粒子を10 TeVまで加速するのに何十年というオーダーの時間がかかる。

\*1 エネルギーの単位。素電荷をもつ粒子（電子、陽子等）か1Vの電位にあるときの電磁ポテンシャルエネルギーが1 eV。keV=10<sup>3</sup> eV, MeV=10<sup>6</sup> eV, GeV=10<sup>9</sup> eV, TeV=10<sup>12</sup> eV)。

人工加速器のように静電場により粒子を効率良く加速できる天体はないのだろうか。本稿の主題である「パルサー」という天体は、まさにそれで、静電場で粒子を瞬時に加速することができる。

## 2. パルサーとは

パルサーとは、周期的なパルス状電磁放射をする天体である(図1)。1967年にCambridge大学の大学院生、Jocelyn Bell, Antony Hewishらによって発見され<sup>3)</sup>、後にノーベル賞が与えられた。そのパルス周期は非常に正確で、発見当初は地球外文明の発見かと騒がれたほどである。現在ではその正体は、強磁場をもった中性子星だと考えられている。中性子星がビーム状の放射をもち、高速回転することで、周期的パルス放射をしているように観測されるわけである。夜間に灯台を遠くから眺めると点滅しているように見えるのと同じであるというのが、よく使われる説明である。

中性子星とは、太陽の10倍ほどの質量をもった星がその一生を終え超新星爆発を起こした後に残る、非常に高密度の天体である。主に中性子からなり、自己重力を中性子の縮退圧で支えている。半径10 km程度ながら質量は太陽の1.4倍程度もある。その質量密度は原子核と同程度であり、半径10 kmの超巨大原子核が宇宙に散在しているということもできるかもしれない。もともとの星の角速度や磁束がおおむね保存されるとすると、半径が10 kmに縮むことで、回転速度や磁場(磁束密度)が非常に大きくなることが期待

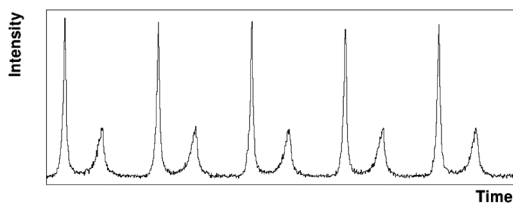


図1 パルサーからの放射の例。この場合高いピークと低いピークの二つで1周期(中性子星1回転)に相当。

される。実際、2,000個ほど見つかったパルサーにおいて、その回転周期は1ミリ秒から10秒程度と、非常に大きな角速度で回転していることがわかる。またその表面磁場も $10^4$ から $10^9$ テスラと、非常に大きい。

「超強磁場」と「高速回転」から、中性子星表面に大きな電位が生まれる。自転車をこぐことで自転車のライトを光らせるのと同様の「ダイナモ機構」である。その大きな電位により、電子や陽電子が、人工加速器の場合と同じように加速される。ただ、人工加速器との大きな違いは、荷電粒子は電場の向きに加速されるわけではないということである。超強磁場があるために、荷電粒子は磁場の向きからずれた運動をすると、シンクロトロン放射を起こし、磁場に垂直な成分の運動量は急激に失われてしまう。結果として、荷電粒子は磁場に沿った方向に加速されることになる。

## 3. 粒子加速はどこで起こるか

中性子星表面に大きな電位はできるが、放射が中性子星表面から等方的に出てしまえば、回転しても明滅は見えない。パルサーがパルサーとして観測されるためには、「ビーム状」の放射がなくてはならない。そのことから、粒子加速は、中性子近傍の限られた領域でのみ起きていることがわかる。そして、前述の「荷電粒子は磁場に沿ってしか加速されない」ということから、加速領域では電場と磁場が直交していない、ということも言える。

粒子加速が起こる領域とその物理過程については、従来、二つの理論モデルが対立してきた。最初に提案されたのは、中性子表面の磁極近傍(図2のPolar Cap領域)で高真空が実現し、磁力線に沿った粒子加速電場が発生すると考える「Polar Capモデル<sup>4)</sup>」である。しかし、このモデルでは、Polar Cap領域から磁力線に沿って細く絞られたビーム状に電磁波が放射されるので、高エネルギーガンマ線(0.1-20 GeV)で観測されてい

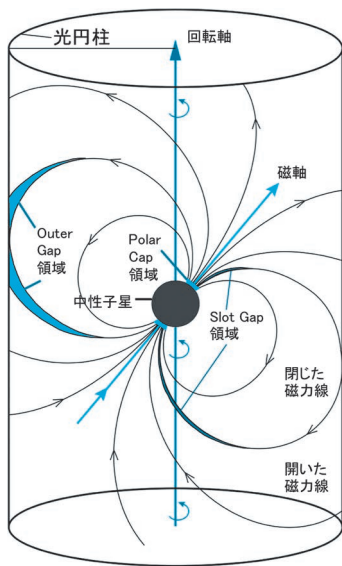


図2 光円柱内部の磁場構造. Polar Cap, Outer Gap, Slot Gap 領域も示してある.

る多様なパルス波形を説明するのが少し難しい。二つ目は、磁場と直交しない加速電場が光円柱と呼ばれる面よりも少し内側（図1のOuter Gap領域またはSlot Gap領域）に発生すると考える「Slot Gapモデル<sup>5)</sup>」および「Outer Gapモデル<sup>6)</sup>」である。ここで、光円柱とは、荷電粒子が中性子星と同じ角速度で回転した場合にその回転速度が光速に達する面として定義される（図2）。光円柱の半径は中性子星の回転周期に比例し、周期33.6ミリ秒のCrabパルサーの場合約1,600 kmである。Slot GapモデルやOuter Gapモデルでは、加速領域が広い空間に分布しているので、ビームは大きな立体角に広がり、観測される多様なパルス波形を自然に説明することができる。

さらに、最近の超高エネルギー領域（20-400 GeV）の観測からガンマ線の放射領域は、Polar Capでないことが判明してきている。Polar Cap領域は、中性子星表面の磁極近傍であるため、磁場が極端に強い。そこでは、10 GeVを超えるようなガンマ線は磁場と相互作用し、電子陽電子対に変わってしまう（図3）。その相互作用断面積は、

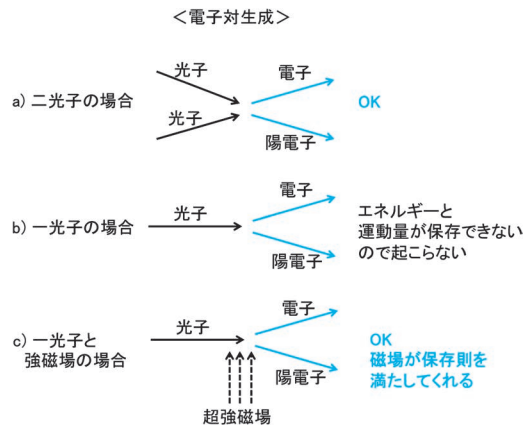


図3 三つの場合の電子陽電子対生成. 通常光子一つでは対生成できないが、超強磁場があるときには可能になる. Polar Capでは10 GeV以上のガンマ線はc)の反応を起こし、完全に吸収される。

ある閾値（ガンマ線のエネルギーと磁場のサイクロトロンエネルギーの積が電子の質量の2乗程度）以降急激に増加する<sup>7)</sup>。そのため、観測されるガンマ線スペクトラムは10 GeV付近で非常に急峻なカットオフを示すはずである。しかし、2008年Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope (MAGIC望遠鏡)がCrabパルサーから25 GeVのガンマ線を検出し、その後のFermi Large Area Telescope (Fermi-LAT)の観測からも多くのパルサーのスペクトラムは急峻ではなくなだらかなカットオフをもち10 GeVを超える光子も到来していることを発見した。これらのことから、ガンマ線の放射領域はSlot GapまたはOuter Gapであるということが判明した。

Outer GapとSlot Gapは異なる電気力学的構造をもつが、幾何学的な分布は比較的似ており、類似のパルス波形を与える。そこで本稿では、両者を合わせて「外部磁気圏加速領域」と呼ぶこととする。

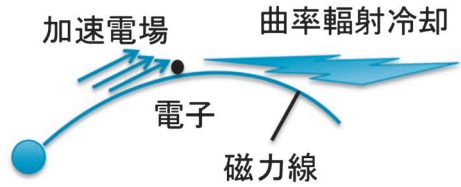
#### 4. 外部磁気圏加速領域でのガンマ線放射機構

外部磁気圏加速領域から、ガンマ線はいかにし

て作られるのだろうか。中性子星が回転することによって発生する星表面の起電力は、Crabパルサーの場合  $10^{16.7}$  Vにも及ぶ。電気回路に例えれば、この起電力の一部が外部磁気圏加速領域で抵抗によって散逸し、残りの大部分が遠方でのパルサー風加速（第7章参照）という描像になる。詳しい理論計算により、外部磁気圏加速領域での電圧降下はおよそ  $10^{14.3}$  Vであることがわかっている。もし、この電位差で加速された電子が放射によってエネルギーを全く失わなければ200 TeVまで加速されうが、そうはならない。上述のとおり、電子は磁力線に沿って走るが、磁力線は直線ではなく曲がっている。したがって電子の運動も曲率をもつことになる。曲率をもって運動することは「加速度」を受けるということで、荷電粒子は加速度を受けると放射する（図4）。この曲がった磁場に沿って走ることによる放射を「曲率放射」と呼ぶ。曲率放射により、加速された電子はエネルギーを失う。そのエネルギー損失率は、エネルギーの4乗に比例するため、この「パルサー加速器」の強力なブレーキとなる。強烈な加速力と強烈なブレーキにより、「加速器」内の電子は10 TeV程度のほぼ単一のエネルギーとなる。

このブレーキの際に出るのが、ガンマ線である。10 TeVの電子が1,000 km程度の曲率をもって走るとき（磁場強度には依存しない!）、数GeV程度のガンマ線がでる。単一エネルギーの電子から出る曲率放射は単一エネルギーのガンマ線になるわけではなく、代表的エネルギー以降指数関数的に減少していくスペクトラムとなる（図5）。

結果として、外部磁気圏が放射領域であるとするならば、ガンマ線スペクトラムはあるエネルギー以降指数関数的に減少するはずである。実際、2009年までにFermi-LATは46個のパルサーを検出している<sup>8)</sup>が、それらの10 GeV程度までのスペクトラムは「指数関数的減少」という予想とよく合っていた。これにより、パルサーのガン



### 中性子星

図4 外部磁気圏（Slot GapまたはOuter Gap）における電子の加速と減速（冷却）の模式図。ブレーキの際に曲率放射で放出されるのがガンマ線である。

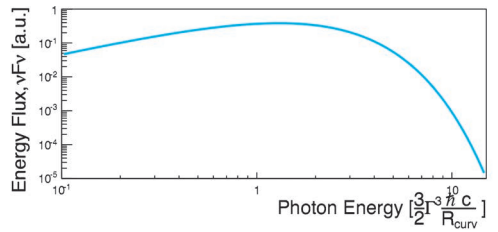
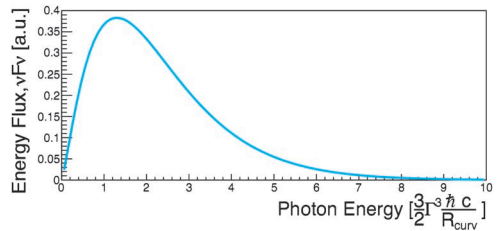


図5 単一エネルギー ( $\Gamma_{mc}^2$ ,  $\Gamma$ はローレンツ因子,  $m$ は電子の質量,  $c$ は光速)の電子が曲率半径  $R_{curv}$ の曲がった軌道进行の際に放出される曲率放射のスペクトラム。上は線形表示, 下は両対数表示。  $2\Gamma^3 \hbar c / R_{curv}$  付近にピークをもち、指数関数的に減衰していく。パルサーの外部磁気圏からのガンマ線スペクトラムはこのような形をすると期待される。ちなみに、Polar Capの場合は磁場による吸収のため（図3c）、指数関数よりも早く減衰する。

マ線放射機構がよく理解されたと思われた。しかし、そうではなかった。非常に長くなったが、ここまでが本稿の「序章」である。

## 5. 理論と矛盾するCrabパルサー

Fermi-LATの観測によると、Crabパルサーのスペクトラムは6 GeV程度以降指数関数的減衰

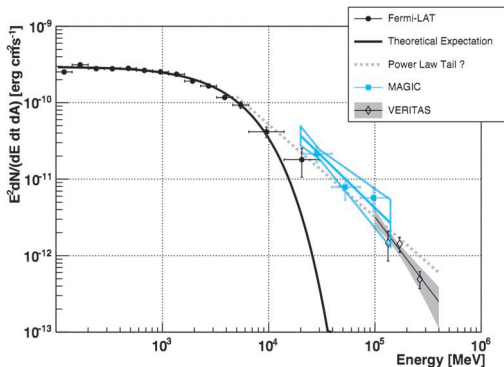


図6 Crabパルサーのガンマ線スペクトラム。20 GeVまでの点はFermi-LATによる測定。「指数関数的減衰」という理論予想（黒実線）と矛盾なく見える。25 GeVから100 GeVまでがMAGICによるもの、それ以降がVERITASによるもの。指数関数的に減衰せず、べき関数的なテール（灰色点線）をもつことがIACTによる測定で判明した。

を示していたが、測定は20 GeV程度までであった(図6)。Fermi-LATのような衛星搭載型ガンマ線検出器の場合、検出有効面積が1 m<sup>2</sup>程度に限られ、フラックスの落ちる10 GeV以上では感度が十分でない。一方、MAGIC, VERITAS, H.E.S.S.などの地上の解像型大気チェレンコフ望遠鏡(Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope; IACT)は、超高エネルギーガンマ線が大気に突入する際に生じるチェレンコフ光を捉えるため、検出有効面積は1 TeVで10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>を超える。宇宙線ハドロンの作るチェレンコフ光がバックグラウンドになるため、有効面積の差がそのまま感度の違いに現れるわけではないが、数十GeV以上ではIACTの感度は衛星搭載型検出器を凌駕する\*2。

MAGIC望遠鏡がCrabパルサーから25GeVガンマ線を検出したことはすでに述べたが、それは指数関数的に減衰しているスペクトラムのテールを捉えたにすぎないと当初は思われていた。しか

し、MAGIC望遠鏡およびVERITAS望遠鏡が観測を続けた結果、Crabパルサーのスペクトラムは指数関数的に減衰せず、べき関数的に400 GeVまで延びていることがわかった<sup>9)-12)</sup>。

べき型のテールはすでに曲率放射のシナリオと矛盾するが、さらに400 GeVの放射自体も曲率放射で説明しづらい。電子のエネルギーは「加速力」と「ブレーキ力」の均衡で決まることはすでに述べた。磁場の曲率半径が大きい(直線に近い)ほど「ブレーキ力」は減少する。また、加速電場が強いほど電子は高いエネルギーに到達できる。つまり、磁場の曲率が大きいほど、加速電場が大きいほど、放出されるガンマ線のエネルギーは高くなる。

加速電場は、磁場強度以上に大きくなれない、曲率半径は光円柱半径より大きくなれない、という自然な条件を課すと、Crabパルサーが曲率放射で放出できるガンマ線の最大エネルギーは150 GeV程度となる。したがって、400 GeVまで延びる放射を説明するには、従来の放射モデルでは非常に困難なのである。

## 6. 新たな放射モデル

標準的なシナリオでCrabパルサーの観測結果を説明することが困難であることがわかり、新たなモデルがいくつか提案された。

電子が10 TeVまで加速されているのなら、逆コンプトン散乱で400 GeVを説明するというのは自然な考え方である。磁気圏カスケードモデルとも呼ばれるKouichi Hirotaniのモデルは、10 TeV電子が曲率放射をするのと同時に、周辺の低エネルギー光子を逆コンプトン散乱する<sup>10)</sup>。生成された10 TeVガンマ線は周辺の光子と電子対生成を起こし(図3a)、直接地球に届くことはない。しかし、生成された電子対がまた逆コンプトン散乱によりガンマ線を生成し、一部は地球に届

\*2 タイトルにもある「超高エネルギーガンマ線」とは一般にIACTによる観測が主流となる数十GeV以上のガンマ線を指す。

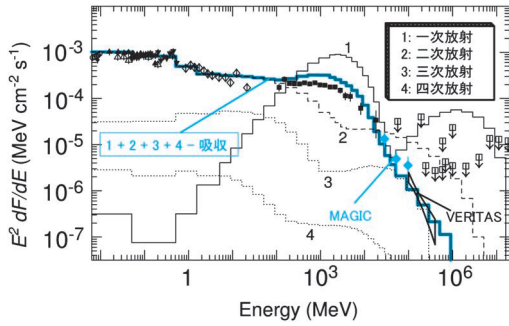


図7 Kouichi Hirotaniによる、磁気圏カスケードモデル。10 TeVに加速された電子は曲率輻射で数GeVに、逆コンプトン散乱で10 TeVにピークをもつスペクトルを作る(実線1)。逆コンプトン散乱成分のすべてと、曲率輻射成分の一部は磁気圏内で対生成を起こす。生成された電子陽電子対が、シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱で二次放射を生成する(点線2)。同様に三次、四次放射がカスケード的に生成されていく。それらの放射のうち、地球に届く成分を足し上げると青線のようになり、観測結果を説明することができる。

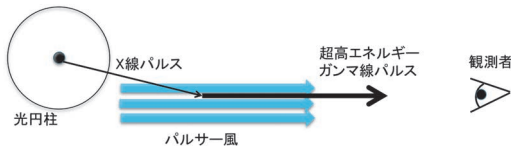


図8 Felix Aharonianらによるパルサー風散乱モデルの基本的な概念。粒子がパルサーの回転エネルギーと角運動量を持ち去ると考えると、パルサー風の向きは中性子星から放射状ではなく、光円柱に接するベクトルになる。そのため、中性子星近傍から放射されるX線パルスを散乱できる。

き一部はまた対生成を起こす。このように、パルサー磁気圏内で電磁カスケードが起こり、磁気圏で吸収されず(対生成を起こさず)に地球に届くガンマ線を足し上げると、観測されたようなべき型のスペクトラムができる(図7)。

一方、全く違うアイデアで観測結果を説明するモデルもある。「パルサー風散乱モデル」でも

呼ぶべきFelix Aharonianらのモデルである<sup>13)</sup>。それは、X線のパルス放射が、パルサー風領域で逆コンプトン散乱され、数百GeVのパルス放射となって観測されるというものである(図8)。非常に単純な描像のように思われるが、このモデルには深い意義がある。そのことを理解するには、次章で述べるパルサー風について知る必要がある。

## 7. パルサー風

これまでパルス放射を生成する中性子星近傍についてのみ述べてきたが、「高エネルギー宇宙」という観点からは、パルサーという天体はパルス放射する天体という以上の意味がある。これまでIACTで検出された超高エネルギー天体は150個程度あるが、銀河内の天体で最も多く見つかっている天体種族は、「パルサー風星雲」で、33個にのぼる<sup>\*3)</sup>。これは、パルサーが吹き出す粒子風が終端衝撃波面を作り、そこで前述のフェルミ加速により荷電粒子を超高エネルギーにまで加速していると考えられている。

一方、パルサーの回転周期は一定ではない。時間が経つにつれ、周期は少しずつ長くなっている(連星系のパルサーを除く)。つまり、回転速度が落ちていっている(スピンドウンしている)のである。中性子星の半径や質量は大まかにわかっているため、スピンドウンの程度から、どれだけ回転エネルギーが失われているか見積もることができる。単位時間当たりに失われる回転エネルギーをSpindown Powerと呼ぶ。

そして、パルサー風星雲の観測から見積もられるパルサー風が(星雲に)供給する単位時間あたりのエネルギー総量と、Spindown Powerは同程度なのである。一方、パルス放射によるエネルギー放出は、それらに比べてたかだか数%程度である。

つまり、パルサーは、パルサー風を作り出すことで回転エネルギーを失っていっている。ここで

\*3 <http://tevcat.uchicago.edu/>

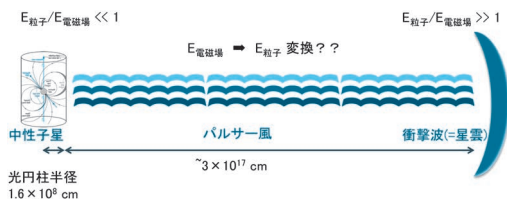


図9 光円柱から終端衝撃波までの「パルサー風領域」。光円柱近傍では電磁エネルギーが卓越しているが、終端衝撃は近傍では粒子の運動エネルギー卓越している。どこでエネルギー変換が行われているかわかっていない。

一つ大きな問題がある。回転する中性子星がいかにして粒子風を作り出すか（パルサー風加速）ということである。高速回転する磁気双極子が、電磁的にエネルギーを失っていくことは説明がつくが、放出された電磁エネルギーがいかにして粒子の運動エネルギーに変換されているのか、いまだにわかっていない。光円柱近傍では、電磁的エネルギーが卓越していることがわかっていて、終端衝撃波面では運動エネルギーが卓越している。Crabパルサーの場合光円柱半径は約1,600 kmで、衝撃波面は0.1 pc, 3兆kmである。9桁に及ぶ範囲の中で、エネルギー変換が起きている場所がわからない(図9)。これは一般に「シグマ問題」と呼ばれ、宇宙物理学の大きな問題の一つである。

ここで「パルサー風散乱モデル」に話を戻そう。Aharonianらのモデル<sup>13)</sup>によれば、観測されたCrabパルサーのスペクトラムを説明するためには、光円柱の20-50倍の距離で、電磁エネルギーが粒子の運動エネルギーに変換されている必要がある。9桁に及ぶ不定性が、一気に縮まるわけである。このモデルが正しいという確証はないが、否定することもできない。さらなる観測により、モデルの検証をしていく必要がある。

そこで、MAGIC望遠鏡によりさらなる観測を続けた。パルサー風散乱モデルを検証する手段の一つとして、400 GeV以上のスペクトラムの形を調べるという方法がある。パルサー風粒子のエネ

ルギーで決まるカットオフが500 GeV付近に予想されるからである。しかしながら、データを解析するうえでバックグラウンドが非常に大きな問題となる。通常、IACTの解析で除去すべきバックグラウンドは、宇宙線ハドロン事象である。ガンマ線の場合と空気シャワー像の違いがあるので大半は除去でき、高エネルギーにいくほど除去率は上がる。しかしながら、Crabパルサーの場合、400 GeV以上で重要となるバックグラウンドは、かに星雲（Crabパルサーのパルサー風が作る星雲）の作りだすガンマ線である。IACTの角度分解能では両者を角度で区別することは不可能で、同一の点源と認識される。当然シャワー像にも違いはない。唯一区別する方法が、到来時刻、つまりパルサーの回転位相である。さらに悪いことに、かに星雲はIACTの標準光源として使われるほど明るく、スペクトラムはCrabパルサーよりもハードで、高エネルギーにいくほど信号・ノイズ比が悪くなる。これが、400 GeV以上のスペクトラムを測定するのが困難な理由である。測定するには、数百時間というオーダーで観測をして、統計を稼ぐ必要がある。

スペクトラム以外にも、パルサー風散乱モデルを検証する方法はある。それは、波形の精密測定である。パルサー風散乱モデルによれば、50 GeV以上ガンマ線の波形は、X線の波形と似た形になるはずである。130時間の観測データを解析したところ、X線の波形とは似ても似つかぬ波形が得られた(図10)。二つのピークは非常に細いにもかかわらず、その間をつなぐ「ブリッジ放射」も検出されたのである<sup>14)</sup>。このブリッジ放射の発見は、Crabパルサーからの数十GeV以上の放射を説明するその他のいくつかのモデル<sup>15), 16)</sup>を否定することとなった。

この波形がパルサー風散乱モデルを完全に棄却できたかと言うと、そういうことにはならないようだ。Dmitry Khangulyanによると、パルサー風の粒子密度が特殊な分布を示していた場合、細い二

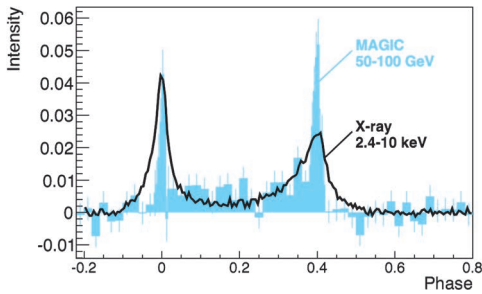


図10 MAGICによる50–100 GeVのパルス波形とX線(2.4–10 keV)のパルス波形の比較。パルサー風散乱モデル<sup>12)</sup>によれば、両者はよく似た形になるはず。50–100 GeVのパルスはX線に比べずっと細いにもかかわらず、二つのパルスの間を橋渡しするような放射(ブリッジ放射)は顕在である。

つのピークとブリッジ放射は説明できるようだ<sup>17)</sup>。

結局のところ、400 GeVにまで続くCrabパルサーの放射については、説明できていないのが現状である。

## 8. 量子重力理論の検証

Crabパルサーがどのような機構で超高エネルギーガンマ線を生成しているのかはまだ解明できてはいないが、超高エネルギーパルス放射を「利用して」基礎物理学の研究ができる可能性がある。

いくつかの量子重力理論のモデルによると、光速が不変ではなく、エネルギー依存性をもっている可能性がある。それを検証するのに、宇宙論的距離で発生したガンマ線バースト<sup>18)</sup>や、活動銀河核のフレア<sup>19)</sup>が利用されてきた。それらの場合、光子の走る距離が膨大であるがために、微小な速度差が(バーストやフレアのタイムスケールと比べて)観測可能な時間差となる。現在光速の不変性に最も厳しい制限を付けているのがFermi-LATによる3.8 Gpcからのガンマ線バースト<sup>18)</sup>であるが、Crabパルサーの場合、距離は約2 kpcと、これに比べてずっと近い。しかし、パルス幅が非常に狭いおかげで、数十マイクロ秒程

度の精度で到来時刻差を検出できる。数百GeV以上まで放射があることは、例えば光速がエネルギーの2乗に比例している場合にガンマ線バースト以上のリミットがつけられる可能性がある。

さらに、パルサーの場合、フレアやバーストに頼る必要はなく常に放射しており、いつでも再検証ができる。放射のタイミング自体にエネルギー依存性がある可能性が否定できないのはガンマ線バーストや活動銀河核のフレアと同じであるが、将来Crabパルサーだけでなく、複数のパルサーから数百GeVを超える放射が見つかり、距離に応じた時間差が検出されれば、量子重力効果の堅実な証拠となるかもしれない。

## 9. 宇宙線陽電子の起源はパルサーか

パルサーの超高エネルギー放射機構を解明することは、パルサーという天体の理解にとどまらない。地球近傍で観測された宇宙線陽電子の宇宙線電子に対する比および電子と陽電子のフラックスの和は10 GeV以降理論予想を大きく上回ることが知られている<sup>20), 21)</sup>。それが暗黒物質の崩壊によって作られた電子陽電子対によるものであるという説もあるが<sup>22), 23)</sup>、地球近傍のパルサーが作り出した電子・陽電子である可能性も考えられる<sup>24)</sup>。パルサーの粒子加速機構とそれらの伝播機構を解明することは、宇宙線電子・陽電子の起源解明にもつながり、暗黒物質探索への手助けともなる。

## 10. 今後の展望

本稿では主にCrabパルサーについてのみ述べた。それは、原稿を書き始めた時点では、IACTで検出できたパルサーがCrabだけであったからである。先日のある国際会議で、南半球にあるH.E.S.S. II望遠鏡がVelaパルサーからのパルス放射を検出したと報告した(北半球にあるMAGIC望遠鏡では、Velaパルサーの観測はできない)。H.E.S.S. II望遠鏡とは、口径が28 mもある巨大IACT(MAGICは17 m)で、4台あるH.E.S.S.望



遠鏡（口径12 m）の間に建設され、最近になって観測を開始した。Velaパルサーのスペクトラムはまだ公開されていないが、超高エネルギーガンマ線を放射する二つ目のパルサーが見つかったことには大きな意義がある。

Crabパルサーが標準モデルと矛盾する原因は何なのか、Crabパルサーだけを観測していても解明できないかもしれない。複数のパルサーを高感度で観測し、どのようなパルサーが標準モデルどおりで、どのようなパルサーがそうでないのかを検証することが、パルサーという天体のさらなる理解につながる。

その意味でH.E.S.S. IIの登場は大きな躍進であるが、数年後にはさらなる進展が望める。Cherenkov Telescope Array (CTA) が建設されるからである。CTAとは、南北両半球に、数十台のIACTを数キロメートル四方に配置する大型計画である。日本をはじめ30カ国近くの国から約1,200人以上の研究者が参加している国際大型プロジェクトで、20 GeVから100 TeV以上の領域において、現行のIACTよりも1桁高い感度をもつ。CTAは大、中、小の口径をもつ3種類の望遠鏡からなるが、パルサー研究に特に貢献するのは、20-300 GeVの感度を担う大口径望遠鏡である。CTAの日本チームはこの大口径望遠鏡の開発を主に行っており、筆者もパルサー物理の新時代を開くべく尽力している。

## 謝 辞

本稿は、博士論文とその後3年の研究成果、およびその結果を受けて新たに提案された理論をもとにまとめたものである。まず、博士過程時代の指導教官である手嶋政廣教授をはじめ、MAGIC Collaborationのメンバーに感謝したい。研究会等で会うたびに議論に付き合ってくださいましたD. Khangulyan氏にも感謝したい。また、この執筆機会を与えてくださっただけでなく、数々の有用なコメントをくださった馬場 彩氏に御礼申し上げる。

そして、論文執筆の際に常に理論的なサポートをしてくださり、本稿においても多くの重要な修正や貴重なアドバイスをくださった、広谷幸一氏にも深く感謝の意を表したい。

## 参考文献

- 1) Fermi E., 1949, Physical Review 75, 1169
- 2) Blandford R. D., Ostriker J. P., 1978, ApJ 221, L29
- 3) Hewish A., et al., 1968, Nature 217, 709
- 4) Ruderman M. A., Sutherland P. G., 1975, ApJ 196, 51
- 5) Arons J., 1983, ApJ 266, 215
- 6) Cheng K. S., et al., 1986, ApJ 300, 500
- 7) Erber T., 1966, Rev. Mod. Phys. 38, 626
- 8) Abdo A. A., et al., 2010, ApJS 187, 460
- 9) Saito T., 2010, Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universitaet Muenchen, Germany
- 10) Aleksic J., et al., 2011, ApJ 742, 43
- 11) Aleksic J., et al., 2012, A&A 540, A69
- 12) VERITAS Collaboration, 2011, Science 334, 69
- 13) Aharonian F., et al., 2012, Nature 482, 507
- 14) Aleksic J., et al., 2014, A&A 565, L12
- 15) Arka I., Dubus, G., 2013, A&A 550, A101
- 16) Chkheidze N., et al., 2013, ApJ 773, 143
- 17) Khangulyan D., et al., 2012, AIP Conf. Ser. 1505
- 18) Abdo A. A., et al., 2009, Nature 462, 331
- 19) Albert J., et al., 2008, Phys. Lett. B 668, 253
- 20) Adriani O., et al., 2009, Nature 458, 607
- 21) Aguilar M., et al., 2013, Phys. Rev. Lett. 110, 141102
- 22) Hisano J., et al., 2009, Phys. Rev. D79, 063514
- 23) Ishiwata K., et al., 2009, Phys. Lett. B 675, 446
- 24) Di Mauro M., et al., 2014, JCAP 04, 006

## Very High Energy Gamma-Ray Emission from the Crab Pulsar

Takayuki SAITO

Graduate School of Science/Hakubi Center, Kyoto University, Kitashirakawaoiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: Gamma-ray emission from pulsars is generally explained by Curvature Radiation. However, recent observations of the Crab pulsar with IACTs revealed that the emission extends up to 400 GeV, which is very difficult to explain with the Curvature Radiation. Though several new models were proposed to explain the observational results, it is still unclear which is the right one. The new IACT, H.E.S.S. II and the near-future project, CTA, may solve this problem and open a new era of the pulsar physics.