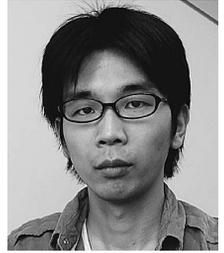


# 天体起源の宇宙線電子・陽電子について

川 中 宣 太

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉  
e-mail: norita@astron.s.u-tokyo.ac.jp



ここ数年のPAMELA/Fermi LAT/AMS-02などの観測をはじめとして、宇宙線に含まれる電子・陽電子に関する研究が非常に盛んになっている。特に陽電子に関しては、標準的なモデルからの予言とは異なり、電子に対する存在比がエネルギーとともに上昇していることが観測から明らかになっている。このことは、これまで考えられていなかった宇宙線陽電子源の存在を示唆しており、研究者の間では暗黒物質の対消滅・崩壊であるとする説とパルサーなどの天体が起源であるとする説の真っ二つに分かれた議論がなされている。本稿では後者の立場に則り、天体起源の宇宙線電子・陽電子が一般にどのようなエネルギースペクトルを示すか、現在までの観測に合うのはどのような天体モデルか、さらに将来の観測でどのようなことがわかると期待されているのかについて詳説する。

## 1. 導 入

### 1.1 宇宙線概論

宇宙線の生成源とその加速機構については、発見から101年経った今でも完全な理解には至っていないが、少なくとも銀河宇宙線については、超新星残骸における衝撃波統計加速<sup>1)</sup>が起源であると多くの研究者は考えている。銀河系内における超新星爆発の頻度がおおよそ30年に1回起こること、GeV程度のエネルギーの宇宙線が銀河系内に $10^7$ 年程度滞在すること(後述)を考慮すれば、平均的な爆発エネルギー( $\sim 10^{51}$  erg)の約10%程度を粒子加速に費やせば、観測されている宇宙線のエネルギーを供給できることがわかる。また、X線、ガンマ線による観測からそれぞれ高エネルギーの電子、陽子が超新星残骸周辺で加速されていることが確認されており<sup>2), 3)</sup>、系内宇宙線の起源が超新星残骸であるという説は強く支持されている。

加速を十分受け、衝撃波周辺の磁場による粒子

のジャイロ半径が超新星残骸のサイズとほぼ同程度になると、粒子は衝撃波から脱出し星間空間を伝播するようになる。星間空間には $\sim 3 \mu\text{G}$ 程度の乱流磁場が存在していることがわかっている。宇宙線は荷電粒子なので、この乱流磁場によりランダムに方向を曲げられながら伝播し、その様子は拡散近似で記述される。高エネルギーの粒子ほど磁場に進行方向を曲げられにくいので、それだけ早く銀河系から脱出できるはずである。結果、星間空間を飛び交う宇宙線のエネルギースペクトルは、超新星残骸から放射されたときよりも高エネルギー側が削られ、ソフトなべきを示すことになる。

### 1.2 宇宙線電子・陽電子の標準モデル

最新の宇宙線電子・陽電子の観測結果について紹介する前に、これらの成分の標準的な生成シナリオについて解説しよう。まず地球で観測される宇宙線電子( $e^-$ )は、陽子や原子核と同様に超新星残骸の衝撃波により加速されたものが大半だと考えられている。このような宇宙線粒子を『一

次粒子』と呼ぶことにする。一次粒子の陽子や電子は、星間空間への放出時には同じスペクトルのべきをもつ。一方、陽電子 ( $e^+$ ) は電子とは異なり、超新星残骸において豊富には存在しないと思われる。では宇宙線陽電子はどこからやってくるのだろうか。まず一次粒子である陽子が伝播中に星間ガス中の陽子とハドロン相互作用を起こし、パイオン ( $\pi^0, \pi^\pm$ ) を生成する。このうち、正電荷の  $\pi^+$  が崩壊した末に陽電子  $e^+$  が作られ、宇宙線の一部として地球に届く、というのが宇宙線陽電子の起源の標準的な解釈となっている。このようにして生成された陽電子は、一次粒子が星間空間を伝播中に作る「二次粒子」の一種とすることができる。このとき生成される二次粒子の量はその親となる一次粒子の量に比例するが、すでに述べたように星間空間の一次粒子のスペクトルは超新星残骸から放射されたときのものよりソフトになっており、二次粒子の生成時のスペクトルもほぼそれと同じべきをもつことになる。すなわち二次粒子の生成時のスペクトルは一次粒子よりもソフトになるはずである。

宇宙線電子・陽電子が原子核成分と大きく異なる点は、これらが伝播中に大きなエネルギー損失を受ける点である。まず、すでに述べたように星間空間には  $\sim 3 \mu\text{G}$  程度の磁場が存在するので、電子はシンクロトロン放射による冷却を受ける。加えて、星間空間は宇宙マイクロ波背景放射、星からの可視光放射、ダストからの赤外線放射による、エネルギー密度  $1 \text{ eV cm}^{-3}$  程度の輻射で満たされているので、その光子を逆コンプトン散乱することによるエネルギー損失も存在する。高エネルギーの電子ほどこれらの放射による冷却のタイムスケールは短いため、同様のべきで超新星残骸から放出された陽子と電子でも、地球で観測されるスペクトルは後者のほうがソフトになっている (陽子は  $\propto \varepsilon^{-2.7}$ , 電子は  $\varepsilon^{-3.0}$ )。

電子と陽電子は電荷の符号が逆だけで、全く同様のエネルギー損失を受ける。ところで上に述

べたように標準的には陽電子は二次粒子であり、その生成時のスペクトルは一次粒子よりもソフトになり、さらに伝播中はエネルギー損失によるソフトニングを受ける。一方、電子は一次粒子で、地球に届くまでに受けるソフトニングはエネルギー損失によるもののみである。結果、地球で観測される宇宙線陽電子のエネルギースペクトルは電子よりもさらにソフトになっているはずである。別の言い方をすると、エネルギービンごとに宇宙線中の陽電子と電子の比をプロットすると、必ず右下がりになる、というのが標準的なシナリオからの予言となる。

## 2. 最近の宇宙線電子・陽電子の観測

### 2.1 PAMELAによる陽電子の観測

この宇宙線陽電子について、2008年に宇宙物理業界のみならず素粒子論業界をも巻き込む衝撃的な実験結果が発表された。実験はPAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) と呼ばれる宇宙線観測衛星によるもので、最初の結果は2006年7月から2008年2月までのデータに基づいてまとめられた。PAMELAの最大の特徴は、検出器に入ってきた宇宙線粒子をハドロンとレプトン (すなわち原子核・核子と電子・陽電子) に区別できるだけでなく、搭載している磁石の430 Gaussの磁場により、粒子と反粒子の分離ができることである。このとき発表されたのは、エネルギーが1.5 GeVから100 GeVまでの宇宙線中の陽電子比 (正確には、陽電子フラックスの電子と陽電子のフラックスの合計に対する比) であった (図1)。これを見てわかるとおり、実験で得られたデータは、10 GeV以上から標準モデルの予測 (実線) とは異なり、陽電子比がエネルギーとともに増大していることを示していたのである<sup>4)</sup>。

前節で述べたとおり、宇宙線陽電子が二次粒子であると考える限りは、陽電子比は基本的に「右下がり」になるはずである。したがってこの結果

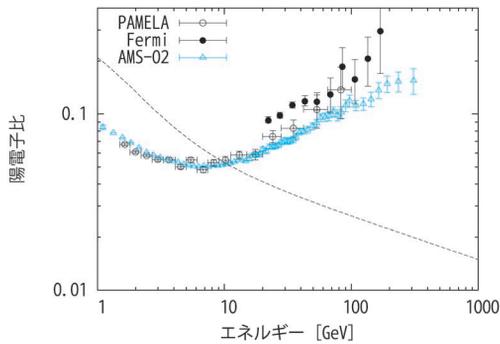


図1 PAMELA/Fermi LAT/AMS-02による宇宙線陽電子比のデータ。点線は標準モデルからの予言。

は、われわれが今まで標準モデルで考慮していなかった、陽電子を「一次的に」星間空間に放出する宇宙線源の存在を示唆していることになる。

陽電子比はその後、PAMELAによってさらに高エネルギー側のデータが示されることはなかったが、2011年にガンマ線観測衛星Fermi LATの地磁気を巧みに利用した観測<sup>5)</sup>により、200 GeVまでは増大が続いているという結果が得られた(図1)。

## 2.2 ATIC/PPB-BETS/Fermi/H.E.S.S.による電子・陽電子の観測

一方、電荷の区別はできないが宇宙線電子/陽電子のフラックスを測定した実験結果が、PAMELAの報告の後いくつかのグループから相次いで発表された。まず気球実験ATIC (Advanced Thin Ionization Calorimeter)により得られたのは、300-800 GeV付近において、標準モデルから予言されるべき型から大きく外れた、鋭いピークと急激なカットオフをもつスペクトルであった<sup>6)</sup>。同じく気球実験のPPB-BETS<sup>7)</sup>からも無矛盾な測定データが報告された(図2)。すでにPAMELAの陽電子観測の結果を見ていた研究者らにとって、この電子スペクトルの奇妙な超過成分の存在を陽電子超過と関連づけて説明しようと試みることは自然な流れであった。ほどなくして、新たな宇宙線電子/陽電子源のモデルが多くの理論家により提案

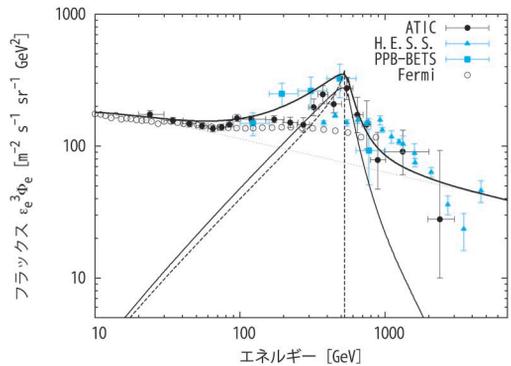


図2 ATIC/PPB-BETS/Fermi LAT/H.E.S.S.による宇宙線電子・陽電子フラックスのデータ。太実線は距離1 kpcにある年齢 $5.6 \times 10^5$ 年の天体が $10^5$ 年継続して電子・陽電子を放出し続けた場合に予測される宇宙線電子・陽電子スペクトル。点線はバックグラウンド、細実線は天体のみからの寄与、破線は同じ距離・年齢で瞬間的に電子・陽電子が注入されたとしたときのスペクトルを示している(4.1節参照)。

され、しばらくPAMELA関連論文がastro-phを席卷することとなるのだが、それらの紹介は3節に回すことにする。

ATICの報告から遅れること数カ月、今度はFermi LATによる電子/陽電子フラックスの観測データが報告された<sup>8)</sup>。これによると、電子/陽電子スペクトルにはATIC/PPB-BETSが報告したような鋭いピークとカットオフは見られず、20 GeVから1 TeVに至るまで非常に滑らかな形を示していた(図2)。ただ、このデータも標準モデルの予言するフラックスからの超過を示しているという点でATIC/PPB-BETSの結果と同様であり、やはり新たに電子/陽電子源を考える必要が出てくることになる。また、2008年から2009年にかけてガンマ線望遠鏡H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System)が340 GeVから数TeVに至るまでの電子/陽電子フラックスの観測結果を報告した<sup>9), 10)</sup>。こちらはFermi LATの結果と同様、やはり500 GeV付近にはATIC/PPB-BETSのピークは確認できず、さらに1 TeV以上においてフラックス

の急激なカットオフの存在が示唆された(図2).  
このようにして10 GeVから数TeVにわたる宇宙  
線電子/陽電子スペクトルの理解はこの数年で急  
激に進み, PAMELAの発見と合わせて, 多種多  
様な議論を宇宙線業界に喚起することになったの  
である.

### 2.3 AMS-02による陽電子の観測

2011年5月, 宇宙線観測装置AMS-02 (Alpha  
Magnetic Spectrometer) がスペースシャトル「エン  
デバー」の最後の飛行により打ち上げられ, 国  
際宇宙ステーションに設置された. このAMS-02  
は体積 $64\text{ m}^3$ , 重量6.9トンという巨大な装置であ  
り, 搭載している永久磁石の磁場はPAMELAの  
およそ3倍の1,430 Gという, まさしく反粒子検  
出装置の究極版ともいえる存在であり, 最長18  
年の稼働期間において1 TeVまでのエネルギー  
スペクトルを得る予定とされている.

2013年4月, このAMS-02による最初の科学的  
成果, 350 GeVまでの陽電子比が発表された. こ  
の発表は一般メディアでも大きく報道されたの  
で, ご存じの方も多いただろう. 図1を見ていただ  
くとわかるように, 今回のAMS-02の測定結果は  
エネルギー領域をPAMELA/Fermiからさらに拮  
げただけでなく, その驚異的なエネルギー分解能  
と統計量のおかげで, これまでとは比べものにな  
らないほど細かくエラーの少ないデータとなっ  
ている. 結論をひと言で言うと, 陽電子比は250  
GeV付近までやはり増大を続けており, PAME  
LAの結果をそのまま支持する形となった<sup>11)</sup>. さ  
らに, スペクトルは細かい振動のような構造をも  
たず, 非常に滑らかであることも示された. ま  
た, 確定的なことはまだ言える段階ではないもの  
の, 200 GeV以上でスペクトルがややソフトにな  
る傾向も見えている. いずれにせよ, こうして陽  
電子超過は揺るぎない実験事実となり, その解釈  
については今でも結論が出ていない. 次のセク  
ションでは現在提示されているシナリオについて  
紹介する.

## 3. 電子・陽電子超過の起源は何か?

### 3.1 ダークマター

すでに述べたように, 陽電子超過を説明するた  
めには, これまで考えられていなかった一次的な  
宇宙線陽電子源を導入する必要がある. さらに  
ATICやFermiなどの電子スペクトルも同時に説  
明しようと思えば, 電子・陽電子の両方を放射す  
る何らかのソースを新たに考えることになる. ま  
た, すでに述べたように宇宙線電子・陽電子は原  
子核成分とは異なり, 伝播中の放射によるエネ  
ルギー損失が大きいので, あまり遠方(例えば銀河  
系外や銀河中心など)のソースから放射されても  
地球で観測されるフラックスには全く影響がない.  
電子・陽電子のエネルギーにもよるが, せいぜい  
1-2 kpc程度の距離にあるソースが必要となる.

最も多くの論文が発表されたのはダークマター  
が起源であるとするモデルであった. ダークマ  
ターの正体はもちろんいまだに明らかにはなっ  
ていないが, 有力なモデルの一つとして, WIMPs  
(Weakly Interacting Massive Particles) と呼ばれる,  
弱い相互作用と重力のみに反応するような中性粒  
子が頻りに議論されている. WIMPsは素粒子論の  
標準模型には組み込まれておらず, 超対称性理論  
により存在が予言されている粒子であり, その存  
在はいまだに実験的には確認されていない. とに  
かくこのような粒子が対消滅もしくは崩壊するこ  
とにより, 副産物として電子・陽電子を放出すれ  
ば, PAMELAやAMS-02で示された陽電子超過  
ならびにFermiなどで見えた電子スペクトルも説  
明できる, というのが基本的な主張である. この  
とき, スペクトルの形は電子・陽電子がどのよ  
うな対消滅・崩壊モードに由来するかで決まり, ま  
たその最大エネルギーはダークマター粒子の質  
量, 総量は反応レート(対消滅の場合は反応断面  
積, 崩壊の場合は寿命の逆数に比例)によってそ  
れぞれ決まる. しかし, 対消滅だと考えた場合  
は, 必要となる断面積が熱的ダークマターのそれ

より2-3桁程度大きくなければいけないことが分かっている。また、崩壊だとしても、 $3 \times 10^{18}$ 年という宇宙年齢をはるかに超える長寿命の粒子を仮定する必要がある。また、PAMELAでは陽電子と違い反陽子の超過は見られていない<sup>12)</sup>ことからレプトンを選択的に多く放出するモデルでなければならなかったりと、とにかく一筋縄では説明できないことが問題視されている。

### 3.2 高エネルギー天体

一方、未知のダークマター粒子ではなく既知の天体で説明しようという試みも多く行われた。なかでも頻繁に議論されたのはパルサーである<sup>13)</sup>。パルサーはその高速な自転と強力な表面磁場により、周囲に電子・陽電子プラズマを誘導し、磁気圏と呼ばれる領域を構成すると考えられている。この電子・陽電子は相対論的速度にまで加速されパルサー風となって光円柱外へ流れ出し、超新星残骸もしくは星間物質と相互作用して終端衝撃波を形成した時点で、シンクロトロン放射・逆コンプトン散乱により輝く。これがかに星雲などに代表されるパルサー風星雲である。この高エネルギー電子・陽電子が衝撃波から星間空間に逃走することができるのであれば、宇宙線電子・陽電子源の候補となりうるわけである。

また、超新星残骸を起源とするシナリオもいくつか存在する。上に述べたように、単純に考えると超新星残骸では宇宙線陽電子を大量に作ることはできないのだが、特殊な状況を考えればそれも可能となる。例えば地球近傍の高密度のガス雲の中で超新星爆発が起こった場合、衝撃波加速された陽子とそのガス雲中において作る陽電子が超過に寄与する可能性が指摘されている<sup>14)</sup>。また、銀河系内で起こる超新星爆発の空間分布が非一様であることを考慮するとスペクトルが再現できる、というアイデアもある<sup>15)</sup>。ほかに注目を集

めているのは、超新星残骸中で加速されている最中の陽子が周辺ガスとハドロン相互作用をして陽電子を生成するというモデルで、この陽電子がさらに衝撃波加速を受けた結果、観測されているような超過を作ることができる<sup>16)</sup>。<sup>\*</sup>1. 超新星残骸が起源とするシナリオは、宇宙線陽子と周辺物質との相互作用で陽電子を作るという前提があるため、将来他の二次粒子（例えば同じく陽子のハドロン相互作用で生成される反陽子や、炭素原子核の破碎により生成されるホウ素原子核など）の測定による検証が可能である。

ほかにも、昔に系内で起こったガンマ線バースト<sup>18)</sup>、強磁場白色矮星<sup>19)</sup>、ミリ秒パルサー<sup>20)</sup>など、さまざまな天体から電子・陽電子が放射される可能性が指摘されている。次節では、そんな天体からの宇宙線電子・陽電子が一般的にどのようなスペクトルの特徴を示すか、筆者らの研究を中心に紹介していく。

## 4. 天体起源の宇宙線電子・陽電子スペクトルの特徴

### 4.1 単一天体の場合

まず簡単な場合として、宇宙線電子・陽電子が単一の点源から放射されたときを考える。まず注目すべきスペクトルの特徴は、その最大エネルギー（カットオフ）である。すでに述べたとおり、一般に宇宙線粒子の伝播は、放射によるエネルギー損失の項を含む拡散方程式で記述できる。特に逆コンプトン散乱をトムソン散乱で近似できる場合（エネルギーがTeV以下の場合）、電子・陽電子の冷却時間はそれらのエネルギーに反比例する。このとき、観測される宇宙線電子・陽電子のスペクトルは、天体がそれらを放出してからの経過時間に反比例したエネルギーにおいてカットオフをもつことが示せる<sup>18)</sup>（図2、破線）。例えば

<sup>\*</sup>1 ちなみに筆者は、後述する超新星残骸からの宇宙線の逃走シナリオに基づく、このモデルでは陽電子超過を作れない可能性があることを指摘した<sup>17)</sup>。

$5.6 \times 10^5$ 年前にある天体から瞬間的に放出された電子・陽電子の観測スペクトルは、 $\sim 540$  GeV付近に高エネルギーカットオフをもつ。ダークマター起源説においては、カットオフエネルギーはダークマター粒子の質量に対応していたが、天体起源説ではその天体の年齢という、全く違った意味合いをもつことに注意していただきたい。

仮にATIC/PPB-BETSの鋭いピークとカットオフが実在のものであり、単一の天体が起源だとすれば、この $5.6 \times 10^5$ 年前に現れたソースでその特徴がうまく説明できることがわかる。また、パルサーのように $10^4$ 年から $10^5$ 年程度の寿命をもつような天体から宇宙線電子・陽電子が放射された場合は、その寿命の長さに応じてカットオフに有限の幅が現れることが示せる<sup>21)</sup>(図2, 太実線)。もしATIC/PPB-BETSのピーク・カットオフを作っている天体が $10^4$ 年程度の寿命をもっていたならば、将来CALET(後述)による観測でそれが確かめられるかもしれない。

#### 4.2 複数天体の場合

ガンマ線バーストのような発生頻度の低い天体現象が宇宙線電子・陽電子の主な起源ならば、単一天体からの寄与のみを考えるのは妥当だが、パルサーや超新星残骸のような30-100年に一度銀河系内で起こるような現象が起源だとした場合、その頻度を元にして全ての天体からの寄与を合わせた宇宙線電子・陽電子フラックスを求める必要がある。筆者らは、観測から示唆されているパルサーの地球近傍での単位面積(銀河面)あたりの誕生頻度 $10^{-5} \text{ year}^{-1} \text{ kpc}^{-2}$ に基づいて、期待される宇宙線電子・陽電子フラックスの平均スペクトル $f_{\text{ave}}(\epsilon)$ を求め、さらにその平均値からの分散 $f_{\text{ave}} \pm \Delta f_{\text{ave}}$ を求めた<sup>21)</sup>。ここからまず言えることは、計算で求めた平均スペクトルはPAMELAの陽電子比のデータ(図3)およびFermi/H.E.S.S.の $\epsilon \lesssim \text{TeV}$ のデータ(図4)とよく一致しているということ、さらに $\epsilon \gtrsim \text{TeV}$ においてH.E.S.S.のデータに見られる急激なフラックスの落ち込み

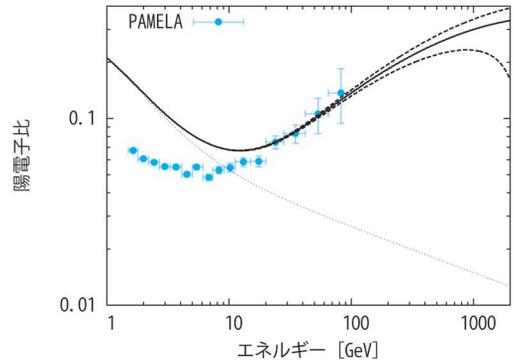


図3 地球近傍で誕生頻度を $\sim 10^{-5} \text{ kpc}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 程度のパルサーが1個当たり $\sim 10^{48} \text{ erg}$ の宇宙線電子・陽電子を放出したと仮定したときに期待される平均の宇宙線陽電子比(実線)とその分散(破線)。

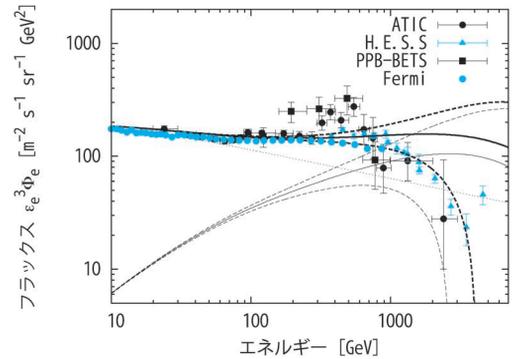


図4 図3と同じ仮定のもとで期待される平均の宇宙線電子・陽電子フラックス(太実線)とその分散(太破線)。細線はバックグラウンドを除いた天体からの寄与のみを示す。

は、平均からの分散( $1\sigma$ )により説明できる(図4)ということである。後者に関しては説明が必要であろう。まず平均フラックスは4.1節で求めた単一天体からのフラックスに単位面積当たりの発生頻度をかけてから、面積・時間積分することによって得られるが、数式上は連続的に分布しているソースからの寄与を計算しているのと変わらない。ところがパルサーなどの天体を起源と考えるのならばソースは当然離散的であり、各エネルギービンのフラックスに寄与するパルサーの個数

$N(\epsilon)$  が定義できる。パルサーの誕生頻度を一定とすればこれはポアソン分布に従うはずなので、必ず  $\Delta N \sim \sqrt{N(\epsilon)}$  程度の分散があると言える。ここからフラックスの分散も  $\Delta f_{ave} \sim f_{ave}/\sqrt{N}$  と評価できる。特にこの平均からの  $-\Delta f_{ave}$  のずれと、H.E.S.S. の  $\geq \text{TeV}$  のデータとの良い一致は、宇宙線電子・陽電子超過が天体起源であるとすれば、それはパルサーかもしくはそれと同程度の誕生頻度をもつ種族の天体であるということを示唆している。

4.3 TeV 電子・陽電子スペクトルからわかること

すでに何度か述べているように、宇宙線電子・陽電子は原子核成分に比べ伝播中のエネルギー損失が大きい。そのため、天体から星間空間に放射されてからの時間によって、地球で観測されるエネルギーが大きく異なる。これは言い換えると、観測されるスペクトルの中で、若い天体起源の電子・陽電子は高エネルギー側に現れ、誕生から長時間経っている天体からの寄与は低エネルギー側に現れるということになる。ところが4.3節の分散の計算でわかるように、エネルギーが TeV 以上になると寄与するパルサーの個数は非常に少なくなる。すなわち、TeV 以上のエネルギー領域におけるフラックスは、単一（もしくはごく少数）の宇宙線源からの寄与であることが期待できる。これは伝播中にほとんどエネルギー損失を受けず、いろんな世代のソースからの寄与が同じエネルギー領域で重なり合う原子核成分とは異なる、電子・陽電子ならではの性質である。

では、そのような若い近傍の単一宇宙線電子・陽電子源からはどのようなスペクトルが期待できるだろうか。筆者らはその一例として、誕生して間もない、まだ超新星残骸に取り囲まれているパルサーからの宇宙線電子・陽電子のスペクトルについて考察を行った<sup>22)</sup>。陽子などの宇宙線粒子が超新星残骸で衝撃波によって加速されたのち、いつどのようにして星間空間に逃走するかというのは粒子加速研究における重要な問題である。最も

シンプルなシナリオでは、すべての加速される粒子は衝撃波面近辺にとどまり続け、超新星残骸が壊れて星間ガスと一体化した段階で同時に宇宙線として逃走するとされている。しかし近年、加速された粒子のうち高いエネルギーのものから順に星間空間に逃走していくというシナリオがよく議論されており、最近の Fermi LAT によるガンマ線観測をうまく説明できるとされている<sup>23), 24)</sup>。もしこれが正しいとすれば、逃走できる粒子のエネルギーの閾値が時間の関数として存在し、それより低いエネルギーの粒子は超新星残骸の中に閉じ込められ星間空間に逃走できないことになる。したがって超新星残骸に取り囲まれたパルサーからは、低エネルギーの電子・陽電子は出てこられず、期待されるスペクトルは低エネルギーカットオフをもつものになるはずである。図5は地球近傍の代表的な超新星残骸と付随したパルサーである Vela パルサー（距離  $\sim 290$  pc, 年齢  $\sim 10^4$  年）から期待される電子・陽電子スペクトルをプロットしたものである。逃走エネルギーの時間依存性にもよるが、将来の観測により 10 TeV あたりの電子・陽電子スペクトル中に低エネルギーカットオフが見え

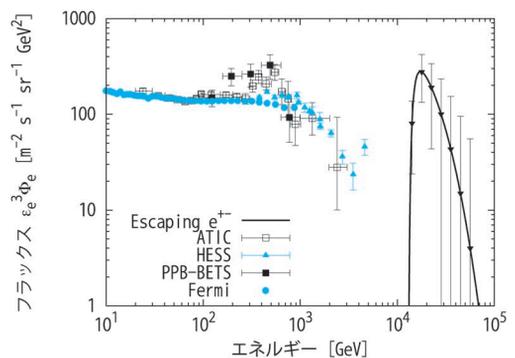


図5 Ptuskin & Zirakashvili<sup>25)</sup> の超新星残骸からの宇宙線逃走モデルに基づいて計算した、Vela パルサーからの宇宙線電子・陽電子スペクトル。CALET による5年間の観測 ( $SQT=220$   $m^2$   $sr$   $days$ ) から期待されるエラーバーも示した (黒三角)。

れば、上に述べた宇宙線逃走シナリオの直接的な検証となるだろう。

筆者らはこのほか、比較的寿命の長い天体、例えば強磁場白色矮星<sup>19)</sup>やミリ秒パルサー<sup>20)</sup>からの高エネルギー電子・陽電子がTeVスペクトルに寄与する可能性を指摘している。いずれにせよ、TeV領域に新たなスペクトルの特徴が現れば、天体起源説を裏づけることにもつながり、将来の観測によりいっそう期待が寄せられるところである。

## 5. まとめと将来の展望

銀河系内の宇宙線は、標準的には超新星残骸からの一次粒子およびそれが星間空間を伝播中に生成した二次粒子とで説明できると考えられてきた。ところがPAMELAにより確認された宇宙線陽電子超過、その後相次いで報告された宇宙線電子・陽電子フラックスの超過は、超新星残骸以外にも宇宙線電子・陽電子を一次的に放射しているソースの存在を強く示唆することになった。昨年新たにAMS-02によるより詳細な陽電子比のデータが発表されたが、現段階ではその超過を作っているものの正体がダークマター粒子なのかパルサーなどの天体なのかの決着はつけられないままである。仮にダークマター粒子が起源であるとすれば、素粒子論上でも宇宙論上でも大発見となるし、天体が起源だとしても新たな宇宙線源の確認という、100年以上にわたる長い宇宙線研究の歴史上の重要な発見となる。筆者らの研究で示したように、電子・陽電子のスペクトルを将来の高いエネルギー分解能と広いエネルギー帯域をもった検出器で探ることにより、その超過の起源をはっきりさせられるだけでなく、どのような天体が寄与しているかに関する示唆も与えられる可能性がある。AMS-02は最大で18年稼働し続ける予定であり、今後最大~1 TeV程度までさらに統計の良い測定結果が得られるはずである。また、電子・陽電子フラックスの観測については、2014年の国際宇

宙ステーションへの搭載に向けて現在早稲田大学鳥居研究室を中心として開発が進められている、CALET (CALorimetric Electron Telescope) という高エネルギー宇宙線・ガンマ線観測装置に期待が集まっている<sup>26)</sup>。CALETは高エネルギー宇宙線電子・陽電子の観測に最適化されており、特にTeV以上のスペクトルに現れるとされる、近傍の若い少数天体からの寄与を詳しく調べることができるとされる。さらにもしこのエネルギー帯で電子・陽電子の到来方向の非等方性まで見えれば、起源天体を同定することすら可能となるだろう。

## 謝辞

本稿の元になった研究は、井岡邦仁氏、野尻美保子氏、大平豊氏、檜山和己氏、木坂将太氏と共同で行ったものです。皆様のご協力に改めて感謝いたします。2010年度から2011年度にかけては研究を遂行するにあたり、日本学術振興会より科学研究費補助金(若手研究B, No. 22740131)のサポートをいただきました。また、編集担当の富永望氏には遅々として進まない筆者の執筆をたいへん粘り強く待っていただき、原稿にもたいへん有益なコメントをいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Blandford R. D., Ostriker J. P., 1978, ApJ 221, L29
- 2) Koyama K., et al., 1995, Nature 378, 255
- 3) Ackermann M., et al., 2013, Science 339, 807
- 4) Adriani O., et al., 2009, Nature 458, 607
- 5) Ackermann M., et al., 2012, Phys. Rev. Lett. 108, 011103
- 6) Chang J., et al., 2008, Nature 456, 362
- 7) Yoshida K., et al., 2008, Advances in Space Research 42, 1670
- 8) Abdo A. A., et al., 2009, Phys. Rev. Lett. 102, 181101
- 9) Aharonian F., et al., 2008, Phys. Rev. Lett. 101, 261104
- 10) Aharonian F., et al., 2009, A&A 508, 561
- 11) Aguilar M., et al., 2013, Phys. Rev. Lett. 110, 141102
- 12) Adriani O., et al., 2009, Phys. Rev. Lett. 102, 051101
- 13) Hooper D., Blasi P., Dario Serpico P., 2009, JCAP 1, 25
- 14) Fujita Y., Kohri K., Yamazaki R., Ioka K., 2009, Phys. Rev. D 80, 063003

- 15) Shaviv N. J., Nakar E., Piran T., 2009, Phys. Rev. Lett., 103, 111302
- 16) Blasi P., 2009, Phys. Rev. Lett. 103, 051104
- 17) Kawanaka N., 2012, arXiv:1207.0010
- 18) Ioka K., 2010, Progr. Theor. Phys. 123, 743
- 19) Kashiyama K., Ioka K., Kawanaka N., 2011, Phys. Rev. D 83, 023002
- 20) Kisaka S., Kawanaka N., 2012, MNRAS 421, 3543
- 21) Kawanaka N., Ioka K., Nojiri M.M., 2010, ApJ 710, 958
- 22) Kawanaka N., Ioka K., Ohira Y., Kashiyama K., 2011, ApJ 729, 93
- 23) Ohira Y., Murase K., Yamazaki R., 2010, A&A 513, A17
- 24) Ohira Y., Murase K., Yamazaki R., 2011, MNRAS 410, 1577
- 25) Ptuskin V. S., Zirakashvili V. N., 2005, A&A 429, 755
- 26) Torii S., CALET Collaboration, 2008, J. Phys. Conf. Ser. 120, 062020

## **Cosmic-Ray Electrons/Positrons from Astrophysical Sources**

**Norita KAWANAKA**

*Department of Astronomy, Graduate School of Science, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: Since the recent remarkable observational results reported by PAMELA/Fermi LAT/AMS-02 and other experiments, cosmic-ray electrons/positrons have been intensely investigated by many authors. Especially, according to the observations, the positron fraction rises with energy, contrary to the standard theoretical prediction. This fact suggests a new kind of sources of cosmic-ray positrons, whose origin may be the annihilation/decay of dark matter particles, or astrophysical objects such as pulsars. We describe the spectral features of cosmic-ray electrons/positrons expected from astrophysical sources, and compare them with the recent observations. We also discuss what are expected from the future observations.