

宇宙ギネスシリーズ【2】

宇宙最大の高エネルギー現象

福江 純（大阪教育大学）

1. 一行で終わり？

編集長からタイトルのようなお題をいただいたのだが、これはもう文句なく、

ビッグバン＝宇宙の開闢

こそが、あらゆる面において、宇宙最大の高エネルギー現象に違いない。でも、それじゃあ、一行と一枚の絵ぐらいで終わっちゃうので、身も蓋もあったものではないだろう（図1）。

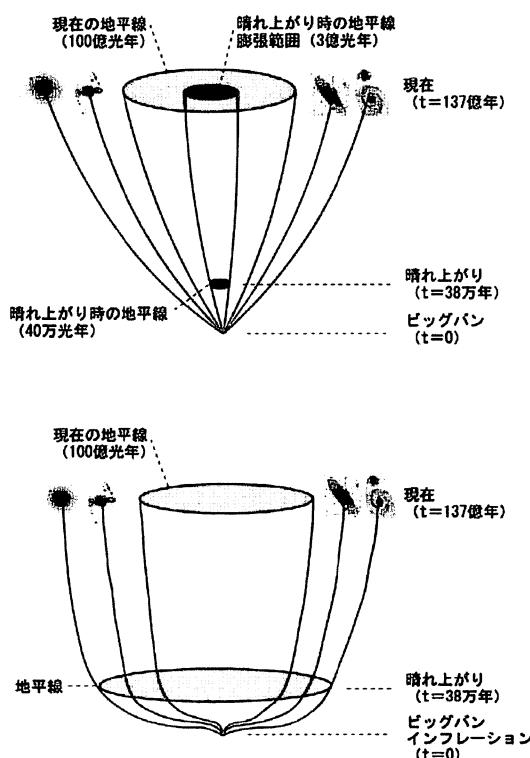


図1 宇宙の開闢。ビッグバン（上）とインフレーション（下）。

逆に、宇宙そのものは除いて考えると、これはこれで、なかなか難しいお題なのである。

というのも、“高エネルギー現象”にはいろいろな捉え方があるからだ。最大というのは、単純に放出されるエネルギーの大きさだろうか。それとも、単位時間に放出されるエネルギー量（光度）だろうか。はたまた、プラズマの高温状態を指すのだろうか。高速のプラズマ流も高エネルギー状態と呼ぶことが多い。ほぼ光速で飛来する高エネルギー宇宙線もある。

ということで、本稿では、2節で宇宙最大のエネルギー現象について、3節で最大光度の天体について、4節で最高温度の場所について、5節で最大速度のプラズマ流について、6節で最高エネルギー宇宙線について、それぞれ簡単に紹介していきたい。

2. 最大エネルギー現象

エネルギーの大きな現象といえば、重力エネルギーを効率よく解放するという点では、ブラックホール周辺の現象なのかもしれないが、まあ、一般的には爆発現象だろう。そして宇宙で爆発現象といえば、当然、超新星爆発ということになろう。

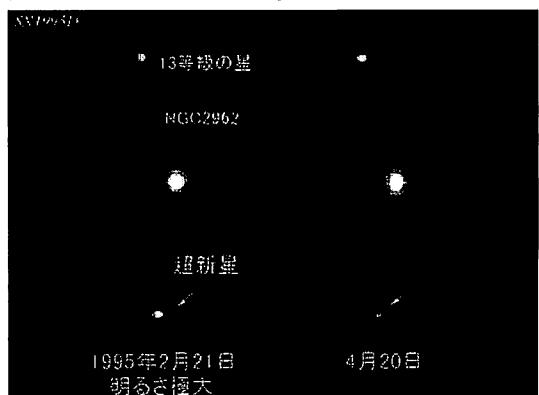


図2 超新星 SN1995D（大阪教育大学 & 『宇宙スペクトル博物館』）

新星（白色矮星表面での核爆発）のように星が急激に輝き出す現象だが、規模が桁違いで、新星の100万倍も明るくなり（太陽光度の1000億倍くらい）、1年から2年ぐらいかかると暗くなる現象が「超新星(supernova)」である。極大期の明るさは銀河全体にも匹敵するほどで、遠くの銀河の超新星も観測できる（図2）。

超新星は、比較的重い星の進化の最後の段階で核反応の暴走が起こり、星“全体”が大爆発したものである。爆発ガスの膨張速度は数千km/s、放出エネルギーは

10の44乗ジュール

にもなる。この放出エネルギーは、吹き飛ばされるガスの運動エネルギーで、可視光として放出されるのはこれの1割程度である。一方、この放出エネルギーの100倍程度のエネルギーが、ほとんど相互作用をしないニュートリノによって持ち去られる。ニュートリノが運び去るエネルギーまで含めると、超新星爆発のエネルギーは、10の46乗ジュール程度というべきかもしれない。

一方、超新星の一種だが、きわめて規模が大きなタイプを、最近、「極超新星(hypernova)」と呼ぶことが多い。上で述べたように、通常の超新星のエネルギーは10の44乗ジュールくらいだが、極超新星では

10の45乗～46乗ジュールくらいのエネルギーになる（図3）。

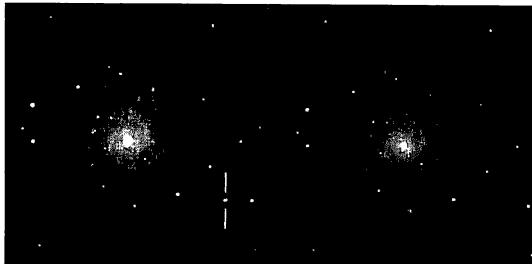


図3 漩状銀河M74で発見された極超新星SN2002ap（ぐんま天文台）

極超新星は、おそらく誕生時に太陽の40倍以上の質量をもっていたような非常に重い星が、進化の果てに最終的に重力崩壊を起こしたものだろうと思われている。そのため、太陽の10倍程度の質量の星が重力崩壊して起きる“通常”的超新星に比べて、10倍以上の膨大なエネルギーを発生するのだ。また中心にはブラックホールが残されるだろう。いわゆる「ガンマ線バースト(gamma-ray burst)」の原因になっているかもしれない。

さらに理論的には、「窮極超新星(ultranova)」という天体も想定されている（“窮極”というのは、いま振った訳語で、ultranovaに対して、まだ日本語の適訳はない）。

爆発する前の最初の星の質量が大きければ大きいほど、超新星爆発のエネルギーは大きくなる。さて、宇宙のごく初期には、その後、星の内部で生成されることになる重元素は非常に少なく、ほとんど水素と1割程度のヘリウムからなるガスが収縮して初代の星が形成されたと考えられている。ガスに含まれる重元素量が少ないと、ガスのさまざまな冷却過程が効きにくくなつて、星は収縮しにくくなる。その結果、重元素が少ないガスが収縮してできた星の質量は、一般に大質量なものとなる。すなわち、宇宙の最初期に形成された初代の星は、ほとんど水素からなる大質量の星だったのだ。おそらく太陽質量の100倍を優に超えるような星が形成されたはずだ。このような初代の星を、今日、「種族III(population III)」の星と呼んでいる。そして種族IIIの星が進化の果てに超新星爆発を起こしたものが、窮極超新星なのだ。

種族IIIの星もまだ見つかっていないし、窮極超新星ももちろんまだ未発見だ。エネルギーもどれくらいになるか、寡聞にして知らない。質量が大きくなるほど輻射圧が効いて星が不安定になるし、質量放出や回転の効果や電子陽電子対不安定など、さまざまな影響

が入ってきてややこしいのである。

これで間違いないよなあ（疑）。何かあればMLで補足してください>山岡さま。

3. 最大光度の天体

爆発のエネルギーというのは、比較的短い時間の間に放出される全エネルギーを意味している。一方で、天文学においては、長期間にわたって、単位時間当たりに放出されるエネルギー＝光度の大小を比較することも少なくない。

たとえば、太陽は、単位時間当たりにだいたい4かける10の26乗ジュールぐらいのエネルギーを放出しているが、これが太陽の光度である。単位はワット（ジュール／秒）である。そしてこの太陽光度でもって、太陽の寿命である約100億年の間、太陽が輝き続ければ、太陽はその全寿命の間に、超新星爆発に匹敵するだけのエネルギーを放出することになる。

で、この光度という基準でもって、最大光度の天体となると、まあ、定義的には、太陽のような星が1000億個集まってできた「銀河（galaxy）」ということになろう（銀河の光度は、当然、太陽光度の約1000億倍になる）。しかし、これじゃあ、一つも面白くないので、やはりここはブラックホールに登場していただこう。「ブラックホール降着円盤（black-hole accretion disk）」の出番である。あ、余談だが、いま同名の“Black-Hole Accretion Disks”という学術書の改訂作業を、奈良産業大学の加藤正二先生と京都大学基礎物理学研究所の嶺重慎さんと進めている。英語のテキストだもんで、骨が折れることこの上ない（ヘロヘロ）。日本語の方が、はるかに表現力が豊かで、素晴らしい言語なんだけどなあ。閑話休題。

さて、まず、降着円盤から。

原始星・白色矮星・中性子星・ブラックホ

ールさらに超巨大ブラックホールなど、重力をおよぼす天体に周囲から降り積もってきたガスによって、中心天体の周囲に形成されたガスの円盤を「降着円盤（accretion disk）」と呼んでいる（図4）。

降着円盤は、原始惑星系・激変星・X線星・活動銀河など、宇宙における活動的な天体において、その活動の中心的な役割をなっていると考えられている。そして降着円盤は、しばしば活動天体の強烈なスペクトルや活動天体から噴出するジェットの起源になっていると信じられている。



図4 ブラックホールのまわりの幾何学的に薄い降着円盤。円盤ガスの表面温度は中心ほど高温で、周辺に行くにしたがい、大雑把に中心からの距離の $-3/4$ 乗で低下する。ブラックホール（中央の球）のごく近傍では、ブラックホールの強大な重力のためにガスはすぐに落下するので、ガス円盤は存在できない。

降着円盤は、一般に電離した水素ガスからできていて、名前の通り円盤状で不透明であり、直感的には平たい星だと考えることができる。ガスは降着円盤の中を、太陽系の惑星のように、中心ほど速い回転角速度で回っている。降着円盤の中では、ガス同士が互いに接しているため、隣接するガス層の間で摩擦が働く。その結果、ガス同士が擦れあって、ガスは激しく加熱される。さらに、高温になったガスはついには光を放射して輝き始める。この降着円盤からの強烈な電磁放射が活動銀河などの明るさの根源だ。このエネルギーは、

中心のブラックホールなどに対して、ガスが持っていた位置エネルギー（重力エネルギー）である。本来は非常に暗いはずのブラックホールや中性子星が、その周りの降着円盤の存在で非常に明るい天体に変身し、観測可能になる。

降着円盤は星に比べるとはるかに単純な天体で、エネルギー発生の機構もブラックホールの落下するガスがもっていた重力エネルギー（位置エネルギー）の解放なので、量子力学の必要な核反応と異なり、高校の物理で十分に理解できるものだ。また、降着円盤がかりにブラックホールのまわりに形成されていたとしても、相対論を使わなくてニュートン力学だけで、だいたいのエネルギー発生量の見積もりもできる。

降着円盤が単位時間当たりに放出するエネルギー量－光度－は、数式は書かないが、中心天体の質量と、毎秒当たりに周囲から降り注いでくるガスの量（質量降着率と呼ばれる）の積に比例する。このことは、降着円盤による重力エネルギーの解放が、本質的には水力発電と同等なもので、中心天体の質量がダムの落差に相当し、質量降着率が降水量に相当するといえば、直感的にもわかるだろう。

ただし、中心天体の質量を固定したときに、降り注いでくるガスの量が多すぎると、降着円盤はその重力エネルギーを十分に解放できなくなってしまう、ガスの一部を吹き飛ばしたり、重力エネルギーを光に転換しないままガスを吸い込んだりしてしまう。ダムの例でいえば、降水量が多すぎると水門を開放してしまうのと似ている。その結果、中心天体の質量を固定したときには、降着円盤が解放できる光度にはある限界が存在する。その限界光度を「エディントン光度（Eddington luminosity）」と呼んでいる。

具体的には、太陽質量の 10 倍のブラックホールの場合、エディントン光度は、

約 10 の 32 乗ワット～100 万太陽光度となり、太陽質量の 1 億倍の超大質量ブラックホールでは、

約 10 の 39 乗ワット～10 兆太陽光度ぐらいになる。

前者は典型的なブラックホール X 線連星の光度であり、後者は典型的な活動銀河中心核の光度である。そしてクエーサーなど、典型的な活動銀河の光度は、実は、典型的な銀河の明るさより 100 倍くらい明るいのだ。ということで、最大光度の天体は、銀河ではなく、クエーサーなど活動銀河なのであった。

なお、活動銀河については、『天文教育』の以前の連載記事[1]や『銀河にひそむモンスター』[2]などを参照していただきたい。

4. 最高温度の場所

つぎの高エネルギー状態として、プラズマガスの温度を考えてみよう。とはいいうものの、“温度”という概念は、そんなに単純なものではない。温度計で気温を測ったり、体温計で体温を測ったり、日常生活ではごく普通に使っている「温度（temperature）」。直感的にはとてもわかりやすそうな言葉だが、専門的にみれば、これほど複雑で奥が深い用語もないかもしれない。

たとえば、常温（20°C）で保管していたベイリーズに氷（0°C）を入れて作った直後のベイリーズ（ロック）の温度は何度だろうか？

これは何度でもない。0°C から 20°C の間でさえない。氷が溶けて冷えつつあるベイリーズ（ロック）では、通常の意味では温度が定義できないのだ。

いわゆる“熱平衡”になった物質（ガス）や輻射に対しては温度が定義できるが、熱平衡になっていない状態では普通の温度は定義できない（別の温度を定義することはある）。そして世の中は熱平衡でない状態の方が圧倒的だから、世の中の現象では温度が決められ

ない状態の方が圧倒的に多い。いかん、いかん。温度や熱平衡について書いていくと長くなるので、これまた、『最新天文小辞典』[3]や『科学の国のアリス』[4]などをご覧いただきたい。

さて、温度が定義できるような高温のプラズマガスがあったとして、そして宇宙初期を除いて、最高温度の場所は、これは理論的にも観測的にもはつきりしている。ブラックホールの近所である。

すなわち、ブラックホールの落下するプラズマガスの温度は、ブラックホール近傍で、

約 1 兆度

に達する。これは、ブラックホールの質量が太陽の 10 倍程度（普通のブラックホール）か、太陽の 1 億倍程度（超大質量ブラックホール）かなど、ブラックホールの質量に寄らない温度である（専門的には“ビリアル温度”と呼ばれる）。星の中心部でさえ“たかだか”1 千万度であることを思うと、1 兆度という温度がいかに尋常でないかがわかるだろう。

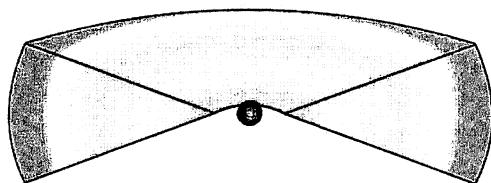


図 5 ブラックホールのまわりの幾何学的に厚い降落円盤。円盤ガスの表面温度は中心ほど高温で、周辺に行くにしたがい、おおざっぱに中心からの距離の $-1/2$ 乗で低下する。ブラックホール（中央の球）のごく近傍では、ブラックホールの強大な重力のためにガスはすぐに落下するのだが、降落円盤ではそもそもガスが回転しながら落下しているので、ブラックホールの表面まで円盤がつながっているかもしれない。

通常の降着円盤では、円盤内のガスは中心

天体のまわりを回転していて、中心へ向けての落下運動は非常に小さい。しかし、ガスの密度が非常に希薄な場合や、逆に、大量のガスが降り積もってきた場合などは、落下運動も大きくなり、回転しつつ、回転速度と同程度の速度で落下しているようなガス円盤になることがわかってきた。そのようなタイプの降着円盤は 1980 年代後半から精力的に調べられたのだが、通常の降着円盤と区別して、「移流優勢降着流／降落円盤 (advection-dominated accretion flow ; ADAF)」と呼ばれた（図 5）。

中心の天体、たとえばブラックホールに降り積もってくるガスの量で、降着円盤を物理的に分類したとき、中心の天体の質量で決まる「臨界質量降着率」というものがある。中心天体の質量が太陽質量の場合には、臨界質量降着率は毎秒 140 兆 kg ほどだ。この臨界降着率は中心天体の質量に比例して大きくなる。それぞれの天体の臨界降着率と比べて、実際のガスの降着率が十分小さいと、円盤のガスが希薄になり、ガス粒子同士の衝突が減ってエネルギー放射も減るので、ガスが冷却しにくくなつて、結果、円盤ガスは高温となり、希薄で高温な ADAF となる。臨界降着率よりガス降着率がやや小さい程度だと、ガスの冷却もうまくいって、幾何学的に薄く光輝くふつうの降着円盤となる。そしてガス降着率が非常に大きければ、大量のガスがどっと落ち込む超臨界降着円盤—ガスがどっと落ちているという意味では一種の ADAF—になるのだ。

ガスの降着率が小さい場合について、もう少し詳しく述べよう。

ガスが回転しながら中心の天体に向かって降り積もる間に解放される重力エネルギーのうち、一部は回転のエネルギーになるが、他は摩擦や乱流などを通して、一旦ガスの熱エネルギーすなわち内部運動のエネルギーになる。この内部運動のエネルギーは、質量の重

いイオンが事実上担う。水素ガスの場合は陽子が担う。さらにイオンの熱エネルギーは、イオンと電子の間の電磁的な衝突「クーロン衝突」などで、電子の熱エネルギーに移動する。最後に、熱エネルギーを得て熱くなった電子は、イオンとふたたびクーロン衝突してエネルギー光子を放出したり（熱制動輻射）、磁力線と衝突してエネルギー光子を放出したり（シンクロトロン放射）、さらには光子と衝突してエネルギーを失って（逆コンプトン散乱）、冷たくなる。

このように、発熱はイオンが負い、冷却は電子による点がミソである。というのは、イオンと電子が熱平衡状態になっていて、イオンから電子へのエネルギーの移動がすぐに起こるならば、発生したエネルギーはスムーズに光に変わるので、ガスの温度はあまり高くなれない。しかし、たとえばガス降着率が非常に小さくなつてガスの密度が小さくなつたため、イオンと電子間のクーロン衝突が有効でなくなり、イオンから電子へのエネルギーの移動が滞ると、電子は冷えてもイオンは冷えることが困難になる、というようなことが起こる。そして降着ガスはどんどん熱くなる。そしてその結果、ブラックホールの近傍では、イオンの温度が1兆度にも達することになるのだ。一方で、電子の温度は10億度くらいになると思われている。

5. 亜光速ジェット

最高速の天体は相対論的宇宙ジェットである。すなわち、中心の天体から、天体をはさんで双方向に吹き出す細く絞られたプラズマの流れを、「宇宙ジェット（astrophysical jet）」と呼ぶ（図6）。

中心の天体は、原始星や中性子星、さらにはブラックホールなど、場合によって異なるが、その中心天体を取り巻いて降着円盤が存在しており、降着円盤のガスの一部が、ガス

の圧力や放射圧や磁場の力などいろいろな原因によって、円盤面と垂直方向に噴き出したものだと考えられている。

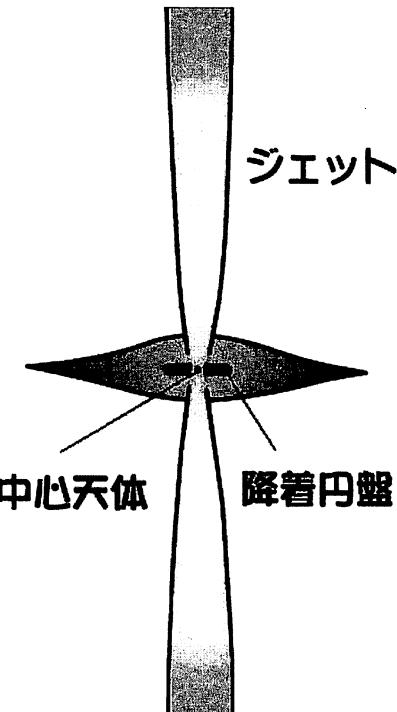


図6 宇宙ジェットのイメージ

宇宙ジェットは最初、活動銀河において発見された。すなわち、クエーサーや電波銀河において、中心核のほんの1光年程度の領域から、銀河本体を中心として双方向に、はるか100万光年もの長さにわたって銀河間の虚空を貫いて吹き出す電波構造として発見された。また特異星SS433と呼ばれる通常の恒星とコンパクト星からなる近接連星系においては、コンパクト星の周辺に形成された降着円盤から、実に光速の26%（約78000km/s）もの速度でジェットが噴き出していることが観測されている。宇宙ジェットや降着円盤は、重力天体の周辺で生じる動的な段階に伴って現れる普遍的な現象だと思われるようになってきていている。

以下、噴出速度 v だけの観点から、ジェッ

トをランク付けしてみよう。なお、以下で、 $\beta = v/c$ は光速 c を単位としたジェットの速度、

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

は速度の相対論的程度を表すローレンツ因子である。

【小結級】中程度に相対論的なジェット

$$<\beta \sim 0.26; \Gamma \sim 1.04>$$

マイクロクエーサーの一つである特異星 SS433 のジェットや Cyg X-3 のジェットなどの速度がこの程度である。ブラックホール周辺の光り輝く降着円盤から放射される光の輻射圧によって、通常の水素プラズマガスを加速すると、だいたい、この程度の速度にまで加速される。

【閑脇級】高度に相対論的なジェット

$$<\beta \sim 0.92; \Gamma \sim 3>$$

銀河系内のマイクロクエーサー、GRS 1915+105 や GRO J1655-40 などのジェットの速度がこの程度である。カーブブラックホール周辺の光り輝く降着円盤の放射圧で、電子と陽電子からなる対プラズマガスを加速すると、だいたい、この程度の速度にまで加速できる。

【大閑級】極度に相対論的なジェット

$$<\beta \sim 0.99; \Gamma \sim 10>$$

直接的な証拠はあまりないが、さまざまなかつ状況証拠から、活動銀河中心核から吹き出すジェットの速度がこの程度だと考えられている。今までのところ、さまざまな理論的計算やシミュレーションにおいて、放射圧モデルにせよ磁気力モデルにせよ、プラズマガスを（通常プラズマであれ電子陽電子対プラズマであれ）光速の 99% まで加速することには、世界の中で誰一人成功していない。

【横綱級】超相対論的ジェット

$$<\beta \sim 0.9999; \Gamma \sim 100>$$

おそらく質量の重い星が爆発する極超新星に伴って生じるガンマ線バーストにおいて、崩壊しつつある外層を貫いて噴出するジェットの速度がこの程度だと推測されている。ガンマ線バーストは、いわゆる中心に生じた高エネルギーの「ファイアボール」モデルで通常説明されているが、ファイアボールを作る基本機構やジェットの収束機構はまだ未解決であり、ましてや、ジェットの加速も説明できていない。

ただ、宇宙最高速の天体现象としては、ガンマ線バーストに伴うジェットが東の横綱ということになるだろう。

余談だが、ぼくが大学院の頃、四半世紀前には、特異星 SS433 ジェットがジェットの世界で横綱を張っていた。この SS433 ジェットのモデルで、最初の単著論文を書いたのもいまや昔話。種々のマイクロクエーサーやガンマ線バーストの登場によって、なじみの SS433 もいつの間にか小結級である（シクシク）。自分の巣窟の力士が没落していくのを見るようで、ややもの悲しい。

6. 最高エネルギー宇宙線

2005 年のクリスマス、12 月 25 日から 26 日にかけて、第 18 回理論懇シンポジウムという研究会が、京都大学基礎物理学研究所で開催された（図 7、図 8）。



図 7 会場の湯川記念館



図8 会場風景

この理論懇（理論天文学懇談会）シンポジウムというのは、毎年クリスマスに開催されるという恐ろしい研究会である。クリスマスの予定が入っているものは、どーすんだ（ぼくはクリスマスなんて関係ないけど；；）。今年のメインテーマは、“高エネルギー天体物理学の最前線”で、まさに、ここまで書いてきたような内容について、3日間にわたり最前線の話題が議論された。学会よりも専門性が高くて、それだけ熱心に講演を聴くため、かなりハードだが充実した研究会だった（夜も毎晩十分に発散したし）。

んでもって、最高エネルギー宇宙線についても、講演があったんだけど、忘れちゃった（笑）。というか、集録も出るんで、メモとか取らずに聞いていた。正月元旦に、この原稿を書き出して、しまったあ、と思ったけど、もう後の祭りである（悔）。いや、集録は出るんですよ集録は、ただし、この原稿の締め切りよりは後にね。

仕方ないので、お粗末ながら、ネットで調べたところ、AGASA 空気シャワー観測装置（あ、研究会で聞いた名前だ）で測った範囲などでは、宇宙から飛来する粒子線の最高エネルギーは、

10 の 20 乗電子ボルト

すなわち、

100 エクサ電子ボルト

を超えてるらしい。

このような高エネルギー状態にまで宇宙線を加速する機構については、まだよくわかっていないかった、と思う。可能性としては、ビッグバンから取り残された未知の素粒子（もともと超高エネルギーをもっていた）かもしれないし、高エネルギーの粒子がガンマ線ベーストやブラックホール近傍でさらに超高エネルギーまで加速されたのかもしれない。

いずれにせよ、よくわかっていない上に、自身あまり知らないことは書かない方がいいだろう。

やれやれ、正月早々、今年が思いやられるような、話の締めくくりになってしまった（謝謝）。でも、人も物事も、わからないことがいろいろあるからこそ、生きてて面白いというもんだ。今年も一年、さまざまなことを楽しむみたいと思う正月だった。

参考文献

- [1]福江純『天文教育』Vol.17 No.3 p.22, 2005
- [2]福江純『銀河にひそむモンスター』光文社, 2005
- [3]福江純『最新天文小辞典』東京書籍, 2004
- [4]福江純『科学の国アリス』大和書房, 2005