

連携記事

高エネルギー宇宙線の起源と特性

Origin and Properties of High-energy Cosmic Rays

瀧田正人
Masato Takita

東京大学 宇宙線研究所
准教授

1 初めに

宇宙線ミュオンを用いる高炉内測定の新たな可能性及びその実用化が最近の鉄鋼業界で話題になっており、宇宙線ミュオンの親粒子である高エネルギー宇宙線の起源とその特性についてわかりやすい紹介記事を書いて頂きたいという趣旨の電子メールが、鉄鋼業界とはほど遠い職場に勤務している私に執筆依頼者より届いた。もう少し正確に書くと、執筆依頼者と私の共通の知人を介して届いたと書くべきである。何れにせよ、今回の連携記事はこの不思議な縁から始まる。

2 宇宙線 (cosmic rays) の発見¹⁾

宇宙線は地球外から飛来する放射線である。宇宙線の発見者は、ヴィクトール・フランツ・ヘス (Victor Franz Hess は、オーストリア生まれで、後にアメリカ合衆国に移住した物理学者) である。当時、金箔検電器に蓄えられた電荷が自然放電して次第に金箔が閉じていく現象は、地球内部にある放射性元素起源のガンマ線が金箔検電器内の空気を電離することによって説明できると考えられていた。しかし、エッフェル塔の上や海上でも同様な測定結果が得られることがわかったので、大地に原因を求めることは不可能となった。1912年から1919年にかけて、ヘス達は気球に乗って高度(最高で5kmから9km程度)と放射線の強さの関係を多数測定した。その結果、上空に行くほど放射線強度が増加することを見出して、放射線が宇宙起源であることを示した。ヘスはこの功績で1936年のノーベル物理学賞を受賞した。

3 宇宙線の正体¹⁾

その当時知られていた放射線としては、アルファ(ヘリウム原子核)、ベータ(電子)、ガンマ線(波長の短い光)の3種

類が知られていた。そのうち貫通力の大きいものは、ガンマ線だったので、ヘス達の発見した宇宙線はガンマ線ではないかと思われていた。

しかし、地球上の様々な場所で宇宙線の量を計測したところ、緯度による変化が観測され、高緯度ほど宇宙線の量が増えることが示された。これは、宇宙線の緯度効果と呼ばれ、コンプトン効果(光と自由電子の散乱)で有名なコンプトン卿などが測定した。地球は大きな磁石と考えられるため、電気的に中性なガンマ線が宇宙線の正体だとすると、緯度による変化は現れないはずなので、宇宙線は電荷をもった放射線であると考えられた。そうするとアルファ線よりは貫通力の大きいベータ線=電子ではないかと思われた。ただし、宇宙線の貫通力の大きさ(地球大気上空から地表まで到達するのに重さ約 10^4kg/m^2 の空気=1気圧を貫通する必要がある)から、非常に高いエネルギーを持つと予想された。

さて、ここで地球磁場がもう一度活躍する。荷電粒子が宇宙から地球に侵入すると、地球の方向へ曲げられるか、跳ね返す方向に曲げられるか、電荷符号(正か負か)によって決まる。その効果が最もよく現れるのは、地球磁場に垂直な東西方向である。宇宙線の電荷符号により、東方向からの量と西方向からの量に差が表れる。この宇宙線の東西効果は、1930年頃ロッシにより指摘された。ここで、もう少し詳細に東西効果を説明する。皆さんは理科の時間にフレミングの左手の法則を習ったと思うが、それを思い出して頂きたい。左手の中指を電流の方向(I)に、人差し指の方向を磁場の方向(B)にとると、この電流に働く方向(F)は、親指の方向になるという法則である。宇宙線は正電荷とすると宇宙線の進行方向が電流方向となる。すなわち、西側から入ってくる正電荷の宇宙線には地球に対して外向きの力が働き、東側から入ってくる正電荷の宇宙線には内向きの力が働く。これは、東側には正電荷の宇宙線が入れない死角があるということを意味する。実際の測定では、西からやってくる宇宙線の数の

方が、東側に比べると多くなっている。そして、この東西効果の測定により、宇宙線の電荷は正の電荷が優勢であると決定された。

宇宙線は一次宇宙線と二次宇宙線に大別される。一次宇宙線は地球大気に突入前の「生の」宇宙線であり、二次宇宙線は一次宇宙線が地球大気(窒素や酸素)と反応を起こすことによって生ずる二次的な宇宙線の総称である。ヘス達が観測した宇宙からの放射線や宇宙線ミュオンは典型的な二次宇宙線である。その後、二次宇宙線と気圧や温度の関係、二次宇宙線と雷の関係、二次宇宙線強度の高度変化、天頂角分布、方位角分布などが測定されたが、一次宇宙線の性質はなかなか明らかにできなかった。他方、二次宇宙線のなかに陽電子、ミュオン、パイ中間子(湯川中間子)など新たな素粒子が続々と発見された。しかしながら、このような素粒子の研究は、大型加速器による研究にその座を譲っていくことになる。

他方、宇宙物理学的な観点からの宇宙線研究、すなわち一次宇宙線の研究は、地球突入前の一次宇宙線の直接観測を助ける飛翔体(気球、ロケット、人工衛星など)の発展に伴い、盛んになっていった。東西効果から正の電荷をもった粒子が一次宇宙線の大部分を占めることが明らかにされ、水素原子核(=陽子)宇宙線であると考えられていた。その後、写真乾板や霧箱を気球に載せた実験により、宇宙線の中には水素よりもさらに重たい原子核が含まれていることがわかった。そして現在では量の多い少ないはあるが、周期律表に載っている自然界に存在するほとんどの元素の原子核が宇宙線中に観測され、ほぼ等方的に地球に降り注いでいる。要約すると、一次宇宙線の大半は原子核であり、電子は全体のおよそ1%程度、陽電子は0.1%程度、ガンマ線成分は電子の数桁下である。(ここで、宇宙から飛来するニュートリノはどうしたのかとの声が聞こえてきそうであるが、膨大な数(約 10^{10} 個/cm²)の太陽起源のニュートリノ等は伝統的な意味での一次宇宙線に入っていないので割愛させて頂く)

4 一次宇宙線の起源と伝播

通常、物理の授業で教わるSI単位系ではエネルギーの単位はジュール(J)であるが、宇宙線のエネルギーは電子ボルト(electron volt = eV)で表されることが多い。1電子ボルト = 1eVは 1.6×10^{-19} Jという小さなエネルギー(単位電荷が1Vの電位差で加速される時に得るエネルギー)である。しかし、本記事ではあえて1eVを大雑把に 10^{-19} Jに置き換えて、SI単位で記述してみることにする。

さて、一次宇宙線の話に戻ると、地球磁場の影響で、 10^{-10} J以下の一次宇宙線は地球に侵入できない。大雑把に書

くと、一次宇宙線はおよそ 10^{-10} Jから10Jという広いエネルギー範囲に、一次宇宙線のエネルギー $E^{-2.7}$ に比例するエネルギースペクトルで分布しており、積分すると 10^4 個/m²程度の頻度で地球に飛来している。その一次宇宙線の加速源としては、太陽、我々の銀河系内の超新星爆発及び超新星残骸(飛散中の星の欠片)、銀河外の活動銀河核やガンマ線バースト等が考えられるが、高炉内測定に関連のある宇宙線ミュオンの親となる一次宇宙線(約 10^{-4} J以下のエネルギーを持つ)は我々の銀河系内にある超新星爆発・残骸起源であると考えてよい。銀河系内の一次宇宙線の起源が超新星爆発・残骸であるとする重要な根拠の一つは、銀河系内宇宙線のエネルギー収支である。また、宇宙線の化学組成が宇宙平均の元素比と比較して重元素が多いことも超新星爆発の過程で原子核に中性子や他の原子核等が詰め込まれると解釈できる。

4.1 超新星爆発²⁾

星間空間の雲が自分自身の重力で収縮し、密度が高くなって、解放された重力エネルギーによって暖められた状態が原始星である。こうしてできた熱い雲が重力収縮を繰り返しながら、その中心温度と密度がある限界に達すると陽子は核融合によってヘリウムの原子核を作り始める。この反応によって熱が発生し、核融合反応はさらに促進されることになる。こうして水素が持続的に「燃焼」し始める。すると発生した熱により暖められたガス圧が星間雲の重力を支えることになるので、重力収縮は止まる。これが星の誕生である。星の中心部で次々に核融合反応が起きて星の進化がすすむとともに、一番外側に水素、その内側に順次ヘリウム、炭素、ネオン、酸素等の層がタマネギのように形成される。最も核融合反応が進んだ段階が鉄である。太陽質量の0.08倍から0.6倍の星の場合は、核融合が中心部でヘリウムまで進行して白色矮星となる。星の質量が、チャンドラセカール質量(太陽の質量の1.4倍)と呼ばれる限界よりも小さい場合は、軽い原子核が核融合反応で燃え尽きた後に、電子の縮退圧で重力を支える状態まで収縮する。電子の縮退圧は熱力学的な圧力とは別に量子力学的なパウリの排他律(フェルミオンである電子は同じエネルギー準位を占めることができないので、最低エネルギー状態に重力で押し込んで詰め込むわけにはいかない)からくる圧力である。この状態の星が白色矮星である。ちなみに、星の質量が太陽質量の0.08倍より小さいと中心部で水素燃焼が始まる前に縮退が起こって褐色矮星とよばれる暗い星となる。太陽質量の0.6倍から8倍までの質量を持つ星は中心部が炭素・酸素になるまで核融合が進展し、重力エネルギーを上回る核エネルギーが生じて核爆発=炭素爆燃型超新星爆発となるか、外層を徐々に吹き飛ばしながら白色矮星となる。太陽質量の8倍から12倍までの質量を持つ星は中

心部が酸素・ネオン・マグネシウムになるまで核融合が進展するが、核エネルギーが重力エネルギーを上回ることはないので、外層を徐々に吹き飛ばしながら中性子星となる。中性子星は電子ではなく中性子の縮退圧により、重力を支えている星であり、一個の巨大な原子核と思って頂ければよい。太陽質量の12倍以上の質量を持つ星は中心部に鉄が形成されるまで核融合が進展する。重力収縮により温度が 4×10^9 度を超えると、熱運動による衝突の力が核力に勝るようになり、原子核の分解が始まる。鉄の分解が始まる吸熱反応なので、急に中心部の圧力が下がり重力に対する支えを失って、星の質量は中心部に向かって落下していくことになる。この現象を重力崩壊と呼ぶ。重力崩壊後、太陽質量の12倍から30倍の質量を持つ星は重力崩壊型超新星爆発を起こして、中心に中性子星を残し、太陽質量の30倍以上の質量を持つ星は、核力で重力止めることができずにブラックホールの形成に至る。つまり、「重い星」の一部は進化の最後の過程で超新星爆発を引き起こすことになる。超新星爆発は星の誕生ではなく、星の最期なのである。

星の重要な役割の一つは、宇宙における元素合成である。標準的な宇宙論によると元素合成(核融合)に必要な高温高密度の環境が実現される機会は、ビッグバン(宇宙開闢の爆発)後の初期宇宙と星の内部に限定される。初期宇宙で元素合成される期間は時間的に短いためにヘリウムやリチウム等の軽元素しか合成できない。従って、現在我々の宇宙に存在する炭素以上の元素は全て星の内部で合成されたものであると考えられる。超新星爆発の際には、非常な高温、高密度な環境が実現されるので、多種類の重元素が合成される。こうして合成された元素の一部が、超新星爆発によって宇宙にまき散らされて一次宇宙線となると考えられている。宇宙線の話は別にして、我々の身体を構成する炭素、窒素、酸素などの原子やふえらむ読者の関心事である「鉄」が一度ならず星内部の高温・高密度な環境をくぐり抜けてきたことになる。

4.2 銀河系内一次宇宙線の寿命と伝播³⁾

我々が、地球で観測する一次宇宙線の元素組成は、源での元素組成、源から地球に到達するまでに宇宙線の通過する物質質量で決まる。一次宇宙線には宇宙線源(超新星爆発でまき散らされる元素)にはほとんど存在しないと考えられるリチウム、ベリリウム、硼素やヘリウムの同位元素 ^3He がかなり含まれる。これは、一次宇宙線に含まれる重い原子核が星間空間にある物質(主として陽子で 10^6 個/ m^3 程度の密度である)と衝突して、原子核破砕が起きるために生ずる。原子核破砕反応確率は測定されているので、それを用いて観測値に合うような通過物質質量(約 $50\text{kg}/\text{m}^2$)が計算できる。

一次宇宙線のほとんどは 10^{-7}J 以下と考えてよいので、銀河円盤の磁場(約 0.03Tesla)の中で描くスパイラル半径は 0.001 光年 $=10^{13}\text{m}$ 以下であり、一次宇宙線は十分長い時間銀河円盤(半径 5×10^4 光年、厚み 1000 光年)の中にトラップされていると考えて良い。実際、一次宇宙線のエネルギー密度は約 $10^{-13}\text{J}/\text{m}^3$ であり、これは銀河磁場のエネルギー密度にほぼ等しい。つまり、宇宙線と銀河磁場が十分長い時間をかけて相互作用を行い、エネルギー的に平衡状態になっていると解釈できる。

一次宇宙線の速度を v 、通過物質質量 l 、星間空間密度を ρ 、一次宇宙線が銀河円盤中に滞在する平均時間(逆に言うと宇宙線が銀河円盤から漏れだしてしまう平均寿命)を T とすると $l(50\text{kg}/\text{m}^2) = \rho(1.7 \times 10^{-21}\text{kg}/\text{m}^3) v T$ となる。宇宙線の速度 v は光速($3 \times 10^8\text{m}/\text{sec}$)としてよいので、 T の値は約 3×10^6 年となる。今回は紹介しなかったが、ベリリウムの同位体元素 ^{10}Be を用いた精密な実験によると T の値は 10^7 年というのが業界のコンセンサスである。つまり、 10^7 年後には宇宙線は銀河系から消失することになる。ちなみに宇宙の年齢は約 1×10^{10} 年である。ところが、様々な年代の地球の地層や月、隕石、宇宙によって生成される塵に含まれる宇宙線起源生成原子核種を調査してみると、一次宇宙線強度は過去 10^9 年にわたってほぼ一定であると考えられる。従って、どこかに一次宇宙線の供給源がなければならないが、その供給源は超新星爆発である。

銀河系内の一次宇宙線エネルギー密度($10^{-13}\text{J}/\text{m}^3$)、銀河系の体積(半径 5×10^4 光年、厚み 1000 光年の円柱なので、 10^{61}m^3)から銀河系内に蓄えられている一次宇宙線エネルギー量は、 10^{48}J となる。また、一次宇宙線が銀河円盤から漏れ出す平均寿命は 10^7 年なので、毎年 $10^{48}\text{J}/10^7\text{年} = 10^{41}\text{J}/\text{年}$ の宇宙線エネルギーが失われることになり、その損失分を何かが補填しなければならない。これを補填できるのは、超新星爆発が尤もらしいシナリオである。銀河系内における超新星爆発の頻度は30年に1回程度と見積もられ、エネルギー放出量は(超新星爆発ニュートリノが担う分を除いて) 10^{44}J である。従って、毎年 $10^{44}\text{J}/30\text{年} = 3 \times 10^{42}\text{J}/\text{年}$ のエネルギーを供給することになる。つまり、超新星爆発の数%のエネルギーで宇宙線のエネルギーを説明できることになり、超新星爆発が最も有力な宇宙線の起源とされている重要な根拠の一つとなる。

5 一次宇宙線の加速³⁾

前章までに一次宇宙線の起源と伝播について解説したが、最後に宇宙線ミュオンの親となる一次宇宙線の加速機構について述べたい。超新星爆発に伴って急激な物質放出がプラズ

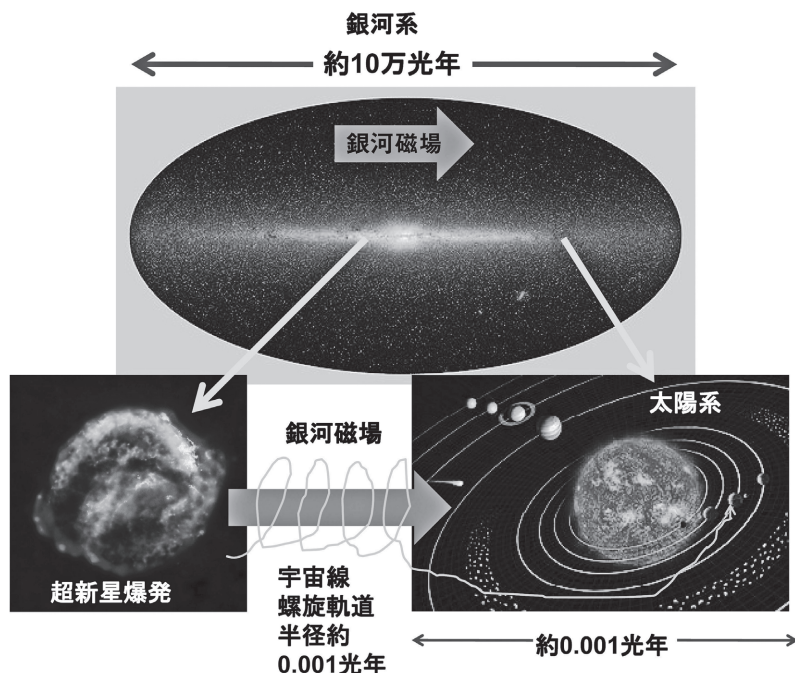


図1 銀河系(上段: Wikipedia より)、太陽系(下段右図: NASA 提供)、超新星爆発(下段左図: NASA 提供)と 10^{-7}J のエネルギーを持つ宇宙線伝搬の模式図

マ中で起きたり、中性子星やブラックホールに向かってガスが激しく降り積もる時に衝撃波が発生する。急激な物質放出を伴う超新星残骸の速度は 10^4km/sec に達する。それに対して周囲の星間物質中での音速は 10km/sec 程度なので、超新星残骸の速度は超音速となり、超音速ジェット機と同様に衝撃波を生ずる。衝撃波と衝突して反跳した粒子(=宇宙線)は加速される。加速された宇宙線の一部は星間磁場の作用でスパイラルを描いて再び衝撃波面と衝突してさらに加速される。この過程を繰り返しながら最高エネルギーとして Z (原子番号) $\times 10^{-5}\text{J}$ 程度まで加速される。この加速機構をショック加速と呼ぶ。従って、陽子は最高で $1 \times 10^{-5}\text{J}$ まで、鉄は $26 \times 10^{-5}\text{J}$ まで加速されることになる。一次宇宙線の加速エネルギー源は超新星爆発のときに解放される超新星残骸の運動エネルギーであると解釈できる。このときのエネルギースペクトルは一次宇宙線のエネルギー E^{-2} に比例するエネルギースペクトルで分布しており、実際に地球で観測される $E^{-2.7}$ に比例するエネルギースペクトルとは形が異なる。この差は、実は一次宇宙線の伝播に関係があり、銀河磁場に巻き付きながら星間物質と衝突して地球に到達する途中でエネルギーを失うことでうまく説明される。

6 終わりに

いままでに記述したことを簡潔にまとめると「宇宙線ミュオンの親となる一次宇宙線の起源は銀河系内超新星爆発であ

り、超新星残骸でショック加速された後に銀河磁場に巻き付いてスパイラル運動しながらはるばる地球に到達することになる(図1)。しかし、実はどの超新星残骸から宇宙線がきているのかは、未解決問題である。銀河磁場の影響で宇宙線は方向に関する情報を失ってしまい、ほぼ等方的(非等方性は0.01%から0.1%程度)になるために一次宇宙線の起源天体はまだ特定されていない。同様に一次宇宙線の加速機構も観測的にはまだ決着がついていない問題なのである。

超新星爆発を起源とする我々の太陽系の元素組成とよく似た化学組成を持つ一次宇宙線が地球大気に突入し、地球大気(窒素・酸素)と衝突して、二次宇宙線として多数のパイ中間子を生成する。発生したパイ中間子の中で電荷を帯びている荷電中間子は宇宙線ミュオンとニュートリノ(ほとんど物質と反応しないので素通りすると考えてよい)に崩壊し、宇宙線ミュオンの一部は地表に到達する前に電子/陽電子と2個のニュートリノに崩壊する。また、電氣的に中性な中性パイ中間子は2本のガンマ線に崩壊し、そのガンマ線が電子と陽電子の対を生成し、生成された電子や陽電子が空気と反応して再びガンマ線を放出するという連鎖反応が起きる。これらの粒子が全て混ざった現象を「空気シャワー」と呼ぶ。宇宙線ミュオンは一次宇宙線が大気中で引き起こす「空気シャワー」中に含まれる典型的な二次宇宙線である。宇宙線ミュオンは、地表では手の平くらいの面積に毎秒1個程度の頻度で飛来している。この宇宙線ミュオンが高炉内測定の新たな可能性を秘めたプローブとなるのである。自然の粒子加速器

からのミュオンビームと考えてもよい。

遠い将来の可能性として、先ほどほとんど反応しないとして無視したニュートリノを利用して地下鉱脈を探索するのも面白いかもしれない。移動型大強度ニュートリノビームを建設することと移動型ニュートリノ観測装置を作成しなければならぬので、技術的問題・費用対効果等を考えると現状では夢物語に過ぎないが…。

参考文献

- 1) 小田稔：宇宙線（改訂版），裳華房，物理学選書，5（2002）
- 2) 岡村定矩編：天文学への招待，朝倉書店，（2003）
- 3) Malcom S. Longair：High Energy Astrophysics, Cambridge University Press, 1 & 2（1992）

（2009年8月3日受付）