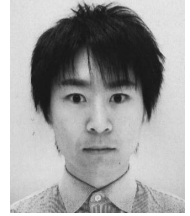


# 初代宇宙線の加速

大 平 豊

〈東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: y.ohira@eps.s.u-tokyo.ac.jp



宇宙線が発見されてから100年以上が経過した。現在の宇宙では、宇宙線と同様に非常に高エネルギーな非熱的粒子が至る所に存在し、その非熱的粒子がさまざまな作用を及ぼすことがわかってきた。宇宙誕生後、いつ、どこで、どのようにして宇宙線は初めて加速されたのか？ 最初の宇宙線（初代宇宙線）の最高エネルギーはどれくらいか？ 現在の宇宙線との違いは何か？ といった興味をそそる問いについて全く議論されていないことに気がついた。これらについての筆者の最近の研究を報告する。

## 1. 現在の宇宙に存在する宇宙線

マクスウェル分布の裾では説明できない高エネルギーの非熱的粒子は、現在の宇宙の様々な天体（惑星、恒星、白色矮星、中性子星、ブラックホール、連星系、星団、球状星団、銀河、銀河団）に存在することがわかっている。その代表例は宇宙線である。地球に降り注ぐ宇宙線の典型的なエネルギーは約 $10^9$  eV（最高エネルギーは約 $10^{20}$  eV）と、銀河内の熱的なプラズマの温度である約1 eVに比べてはるかに高い。宇宙線は熱的な粒子に比べて非常に希な（数密度が少ない）粒子だが、その銀河内のエネルギー密度は、約 $1 \text{ eV/cm}^3$ 程度と銀河内を満たす熱的ガスのエネルギー密度と同程度である。そのため、宇宙線は銀河進化に重要である銀河風を駆動したり、銀河内の分子雲の電離度を決めたりと現在の銀河を理解するためには必要不可欠な存在となっている。銀河団スケールでも宇宙線による銀河間ガスの加熱の重要性が指摘されている<sup>1)</sup>。より身近な地球スケールの自然現象でも、バンアレン帯の内帯粒子の供給源<sup>2)</sup>や低層雲生成<sup>3)</sup>に宇宙線が重要な役割を果たしていると指摘されている。最近で

は、宇宙線が地球大気と相互作用する事で作られるミュー粒子を使って、火山やピラミッド内部を診断するミューオントモグラフィーが他の分野に多大な貢献をしている。

このように現在の宇宙のあらゆるスケールで現れる宇宙線は、今から約100年前にヘス（Victor Franz Hess）によって発見された。ヘスはその功績によりノーベル物理学賞を受賞した。しかし、宇宙線が宇宙のどこでどのようにして加速され、どのようにして地球まで伝播してくるのかはいまだに謎のままである。エネルギーが少なくとも $10^{15.5}$  eV以下の宇宙線は、銀河宇宙線と呼ばれ、「われわれの銀河内の超新星残骸の無衝突衝撃波で、衝撃波統計加速によって加速され、銀河内の乱れた磁場の中を拡散運動して地球まで伝播してきた」という標準シナリオが、約100年間にわたる先人たちの研究によって構築されている<sup>4)</sup>。

では宇宙誕生後いつ、どこで、どのようにして最初の宇宙線は加速されたのだろうか？ その最初の宇宙線の最高エネルギーはどれくらいだろうか？ 最初に加速された宇宙線は、その後どうなったのだろうか？ 不思議なことに、このような疑問についての研究は全く行われていない。ま

ず次の章で現在の宇宙線加速の標準理論を紹介し、その後上記の問題についての最近の研究を報告する。

## 2. 現在の超新星残骸による宇宙線加速

初代宇宙線の加速の話をする前に、現在の銀河宇宙線がどのようにして超新星残骸の衝撃波で加速されていると思われるか簡単に解説する。最も支持されている加速理論は、衝撃波統計加速 (Diffusive Shock Acceleration; DSA) である (1次Fermi加速とも呼ばれる)<sup>4), 5)</sup>。超新星爆発によって星の外層は、星間空間のガスの音速よりもはるかに速い速度で吹き飛ぶ。その結果、爆発中心から外向きに強い衝撃波が星間空間のプラズマ中を伝播する。衝撃波静止系では、上流のプラズマは平均速度  $u_1$  で衝撃波面に向かって流入し、衝撃波面でプラズマは加熱、圧縮され、平均速度は減速して  $u_2$  で下流に流れる。現在の宇宙の星間空間には1マイクロガウス程度の磁場が存在する。宇宙線が加速されているとその磁力線は激しく乱され、荷電粒子である宇宙線の運動は拡散的になる。磁力線が乱れるほど、荷電粒子の平均自由行程 (約90度軌道が変わるまでに走る距離) は短くなり、拡散係数は小さくなる。宇宙線は一度衝撃波下流に流れても、拡散運動によりその一部は衝撃波上流に戻ることができる。上流へ戻った宇宙線は、乱れた磁場により再び拡散運動するが、衝撃波速度が一定のときは、無限上流まで流れに逆らって進むことはできず、いつかは衝撃波面を通過して再び下流へ流れる。その一部が再び拡散運動によって上流へ戻る。このように衝撃波面を何度も往復する粒子が現れる (図1)。衝撃波面ではプラズマが圧縮されているので、宇宙線は衝撃波を往復するたびにエネルギーを得ることになる。

1往復できる確率と1往復での運動量増加率は、粒子の速度と衝撃波のプラズマ流の速度のみで決

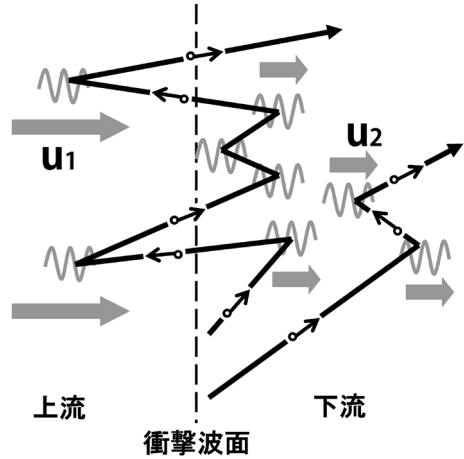


図1 衝撃波統計加速 (DSA) の説明図<sup>5)</sup>。

まっている。その結果、衝撃波面での宇宙線の運動量スペクトルは以下のべき型になる<sup>4), 5)</sup>。

$$\frac{dN}{dp} \propto p^{-s}, s = \frac{u_1/u_2 + 2}{u_1/u_2 - 1} \quad (1)$$

非相対論的強い衝撃波極限では  $u_1/u_2 = 4$  なので、DSA理論は強い衝撃波ならどこでも  $s=2$  を予言する。少ない仮定 (衝撃波と拡散運動する粒子の存在) で、荷電粒子が加速されること、普遍的な冪指数をもつべき型の運動量分布になることが解析的に示せる DSA理論は、広く受け入れられている。非相対論的衝撃波の場合、この運動量スペクトルは拡散過程の詳細にはよらず、衝撃波の速度構造のみに依存する。一方、加速時間  $t_{acc}$  は、拡散係数  $D$  に依存して、

$$t_{acc} = \frac{20D}{3u_1^2} \quad (2)$$

となる<sup>6)</sup>。衝撃波近傍の電磁場が決まれば、この拡散係数と加速時間が決まる。拡散係数は、宇宙線の最高エネルギーを決定するのに重要なだけでなく、宇宙線が加速された後にどのようにして、超新星残骸から逃げ出すかも決める<sup>7)</sup>。このように拡散係数 (またはそれを決める電磁場) は、宇宙線を理解するうえで最も重要な物理量であるが、超新星残骸の衝撃波近傍の値がどうなってい

るかは観測的にも理論的にもよくわかっておらず、宇宙線加速研究の最重要課題となっている。

### 3. 初代星の超新星残骸による宇宙線加速

現在の宇宙線は、超新星爆発の残骸である超新星残骸で加速されるというのが標準モデルである。そこで非常に単純に、宇宙で最初の超新星残骸が初代宇宙線を加速したのではないかと想像できる。ここ最近の初代星に関する研究<sup>8)</sup>によると、初代星は $z=20$ 程度（宇宙年齢が約2億年のとき）で形成され、その質量は $M=10-10^3 M_{\odot}$ と幅広い分布をもち、そのうち約70%は星の外層を吹き飛ばす超新星爆発を引き起こす。初代星の寿命は約100万年から1,000万年程度なので、おおよそ $z=20$ で最初の超新星残骸が作られ、初代宇宙線が加速されると期待される。

初代星は超新星爆発を起こすまでに大量の紫外線を放出する。それによってその周辺のガスは電離されH II領域と呼ばれる温度1 eV程度、密度 $1 \text{ cm}^{-3}$ 程度の希薄なプラズマになる<sup>9)</sup>。この温度と密度は現在の超新星残骸が広がる星間ガスとほとんど同じである。ただし現在の星間ガスと違って、初代星周辺のH II領域の磁場は非常に小さいと思われる。宇宙線を加速するには拡散運動する荷電粒子が必要なため、乱れた磁場が必要となる。つまり、初代星の超新星残骸の衝撃波近傍で、宇宙線を加速するのに必要な磁場の乱れが作られるかどうか？ が問題となる。

#### 3.1 $z=20$ の超新星残骸の無衝突衝撃波

$z=20$ の初代星の超新星残骸の無衝突衝撃波の電磁場構造がどうなるかを考察する。超新星爆発によって、星の外層は光速 $c$ の約1%ほどで吹き飛ぶので、同程度の伝播速度 $v_{sh} \sim 0.01 c$ をもつ衝撃波が数密度 $n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$ のH II領域を伝播する。この衝撃波で上流のプラズマは強い加熱と圧縮を経験するが、その散逸過程でクーロン散乱は無視できるほど希になる。荷電粒子は個々の電場

ではなく、多数の荷電粒子が集団的に振る舞うことで作り出す電磁場によって、軌道が乱され衝撃波で散逸される。このようにクーロン散乱が無視できる衝撃波は、無衝突衝撃波と呼ばれ、宇宙線加速器の最有力候補として盛んに研究が行われている。

どのようにして無衝突衝撃波が形成されるか？ どのような電磁場が作られるか？は、現在の超新星残骸の無衝突衝撃波でもわかっていないことが多い。現在の星間空間には無視できない磁場が存在するために、さまざまなプラズマ不安定性が同時に不安定となる。またその波長がプラズマ慣性長に比べ非常に長いために、その非線形発展を第一原理計算であるプラズマ粒子シミュレーションで調べるのが困難となっている。 $z=20$ では衝撃波上流の磁場が無視できるため、無衝突プラズマ系の線形解析から、磁場を作る不安定性はワイベル(Weibel)不安定性<sup>10)</sup>のみとなる。そのため $z=20$ の初代星の超新星残骸の衝撃波は、ワイベル不安定性によって作られた磁場で散逸される無衝突衝撃波となると予想される。衝撃波速度がほとんど光速に近い相対論的無衝突衝撃波( $v_{sh} \approx c$ )では、ワイベル不安定性によって作られた磁場で散逸される無衝突衝撃波となることがプラズマ粒子シミュレーションで確認されている。またワイベル不安定性の特徴的波長はプラズマ慣性長程度となるため、その非線形成長を3次元プラズマ粒子シミュレーションで調べることが可能であり、非線形発展の結果作られる磁場の最大スケールは、 $\lambda_{dB} \approx 10 c/\omega_p$ と慣性長の10倍程度になることが示された<sup>11)</sup>。ここで $\omega_p$ は、プラズマ振動数である。

#### 3.2 $z=20$ の超新星残骸による宇宙線加速

衝撃波上流の磁場がない場合の相対論的無衝突衝撃波は、ワイベル不安定性によって作られた磁場で散逸される無衝突衝撃波となり、そこで粒子が衝撃波統計加速によって加速されることが、プラズマ粒子シミュレーションで確認されてい

る<sup>12)-14)</sup>。後ほど示すが、ワイベル不安定性によって作られた磁場 $\delta B$ で決まる陽子のジャイロ半径は、磁場の最大コヒーレント長 $\lambda_{\delta B} \approx 10 c/\omega_p$ より大きくなる。これは陽子がワイベル不安定性によって作られた磁場 $\delta B$ に束縛されないことを意味する。一様にそろった磁場がない $z=20$ の初代星の超新星残骸の衝撃波近傍では、陽子は $\delta B$ によって拡散運動することになる。したがって $z=20$ の初代星の超新星残骸の衝撃波では、衝撃波統計加速に必要な条件がそろっているので、初代宇宙線が加速されるはずである。

次に初代星の超新星残骸で加速される初代宇宙線の最高エネルギーを見積もる。そのためにワイベル不安定性で作られる磁場の大きさを見積もり、次に拡散係数を見積る。衝撃波付近で生じるワイベル不安定性は、衝撃波下流から上流に染み出す陽子の電流が駆動源である。ビオサバルの法則 ( $\nabla \times \mathbf{B} = 4\pi \mathbf{j}/c$ ) より、

$$\delta B \sim \frac{4\pi e f_{\text{leak}} \lambda_{\delta B}}{c} \quad (3)$$

となる。ここで $f_{\text{leak}}$ は、衝撃波下流から上流へ染み出す陽子の流速である。この流速を評価する為に、上流へ染み出す陽子のエネルギー流速と衝撃波に流入する上流の運動エネルギー流速の比 $\eta = f_{\text{leak}} v^2 / (n v_{\text{sh}}^3)$ を導入する。ここで加速している陽子は非相対論的として、 $v$ は加速している粒子の速度である。現在の銀河宇宙線を説明する為には、現在の超新星残骸の衝撃波では $\eta \sim 0.1$ が要求されるので、本研究でも $\eta \sim 0.1$ を基準値とする。式(3)からパラメーター $\eta$ を用いて、ワイベル不安定性で作られる磁場の大きさを見積ることができる。その磁場を使って、加速している粒子のジャイロ半径 $r_g$ を評価すると

$$\frac{r_g}{\lambda_{\delta B}} \sim 0.1 \left( \frac{\eta}{0.1} \right)^{-1} \left( \frac{v}{v_{\text{sh}}} \right)^3 \quad (4)$$

となる。粒子の速度 $v$ が衝撃波速度の3倍程度より早い粒子は、ジャイロ半径の方が磁場のコヒー

レント長より大きく ( $r_g > \lambda_{\delta B}$ ) なることがわかる。ジャイロ半径の方が磁場のコヒーレント長より大きい場合の拡散係数 $D$ は、

$$D \sim \frac{2\pi v r_g^2}{\lambda_{\delta B}} \quad (5)$$

と与えられるので<sup>15)-17)</sup>、式(2)、(4)、(5)から加速時間は

$$t_{\text{acc}} \sim 4\pi \left( \frac{\eta}{0.1} \right)^{-2} \left( \frac{c}{v_{\text{sh}}} \right) \left( \frac{v}{v_{\text{sh}}} \right)^7 \omega_p^{-1} \quad (6)$$

となる。衝撃波速度の依存性が非常に強い為、超新星残骸が自由膨張している時間

$$t_{\text{sedov}} = 1.95 \times 10^{10} \text{ sec} \left( \frac{M_{\text{ej}}}{10^{34} \text{ g}} \right)^{5/6} \left( \frac{E_{\text{SN}}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{-1/2} \left( \frac{n}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/3} \quad (7)$$

のみ効率的に初代宇宙線の最高エネルギーを増やしていくことができる。ここで $E_{\text{SN}}$ と $M_{\text{ej}}$ は、超新星爆発のエネルギーと放出される質量である。したがって、初代宇宙線の最高エネルギーは $t_{\text{acc}} = t_{\text{sedov}}$ より得ることができ、

$$E_{\text{max}} \sim 1.9 \times 10^8 \text{ eV} \left( \frac{\eta}{0.1} \right)^{-4/7} \left( \frac{M_{\text{ej}}}{10^{34} \text{ g}} \right)^{-19/24} \left( \frac{E_{\text{SN}}}{10^{51} \text{ erg}} \right) \left( \frac{n}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{1/21} \quad (8)$$

となる。現在の超新星残骸のガンマ線観測から、少なくとも宇宙線は超新星残骸で $10^{13}$  eV程度までは加速していることがわかっている。それに比べ、初代宇宙線の最高エネルギーは5桁も低いことがわかった。銀河の進化とともに星間空間の磁場も生成・増幅され、超新星残骸で加速される宇宙線の最高エネルギーも増えていくと想像できる。

#### 4. 宇宙論的構造形成に伴う降着衝撃波による宇宙線加速

$z=20$ で初代星が超新星爆発する前から、宇宙

の構造形成に伴う降着衝撃波は存在する。もしそこで宇宙線が加速されれば、宇宙誕生後最初の宇宙線となる。宇宙膨張に逆らって重力崩壊できるハローの質量は、重力崩壊したときの宇宙年齢が若いほど小さくなる。ハローの質量が小さいほど重力ポテンシャルが浅くなるので、降着衝撃波の速度も遅くなる。宇宙が再電離する以前 ( $z \geq 7$ ) では物質は電離していないので、宇宙線を降着衝撃波で加速する為には、衝撃波下流からの放射で上流を電離する必要がある。衝撃波上流を電離する為には、衝撃波速度が  $10^7$  cm/s 程度必要となる<sup>18)</sup>。3シグマの揺らぎ内では、質量が  $10^{10} M_{\odot}$  程度のダークマターハローが  $z \leq 10$  で重力崩壊して上流を電離する降着衝撃波を作ることができる。つまり構造形成に伴う降着衝撃波で宇宙線を加速し始めるのは早くても  $z \leq 10$  となり、 $z = 20$  の初代星の超新星爆発より遅い。

$z \leq 10$  で形成される降着衝撃波は、初代星の超新星残骸の衝撃波と同様に、ワイベル不安定性によって散逸される無衝突衝撃波になる。加速される陽子の最高エネルギーは、超新星残骸の場合と異なり、粒子加速とクーロン散乱によるエネルギー損失が釣り合うところで決まる。その結果、最高エネルギーは

$$E_{\max} \sim 3.3 \times 10^5 \text{ eV} \left( \frac{\eta}{0.1} \right) \left( \frac{v_{\text{sh}}}{3 \times 10^7 \text{ cm/s}} \right)^4 \left( \frac{n}{0.1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/4} \quad (9)$$

となる。粒子加速がクーロン散乱によるエネルギー損失と釣り合って終わるため、衝撃波で加速された陽子は、系から逃げる前にエネルギーを失ってしまう。そのため、構造形成に伴う降着衝撃波で加速された陽子は、その周囲に影響を与えることができないことがわかった。宇宙の進化が進むにつれて、物質は電離され、磁化されていくと期待される。降着衝撃波上流の磁場が効いてくると、加速効率が良くなり、より高エネルギーの宇宙線が加速できるようになると思われる。

## 5. まとめと展望

宇宙誕生後、いつどこで最初に宇宙線が加速されるかを調べた。最初の宇宙線は、 $z = 20$  程度の初代星の超新星残骸で、衝撃波統計加速によって数百 MeV まで加速されることがわかった。構造形成に伴う降着衝撃波では、 $z = 20$  のときは衝撃波付近が電離されておらず宇宙線加速が期待できない。 $z \leq 10$  の降着衝撃波では、下流からの放射で衝撃波付近が電離され宇宙線が加速されることもわかった。

初代星の超新星残骸で加速された初代宇宙線はその周辺へ広がって周囲を加熱する。その加熱は、21 cm の観測によって確かめられる可能性がある<sup>19), 20)</sup>。現在の宇宙に存在する宇宙線は、さまざまな天体スケールにおいて影響を及ぼしている。初代宇宙線の研究は始まったばかりであり、初代宇宙線が与える影響や、初代宇宙線と銀河磁場や銀河間磁場の進化との関係など、まだまだ謎だらけである。現在の宇宙線には銀河宇宙線だけでなく、最高エネルギーが  $10^{20}$  eV にもなる銀河系外起源の超高エネルギー宇宙線が存在する。この超高エネルギー宇宙線がいつから加速され始めたのか？ 最高エネルギーはどのように進化してきたのか？ 観測的に調べることができるのか？ などの疑問も湧いてくる。いつ非熱的宇宙は始まったのか？ どのように非熱的宇宙は進化したのか？ という謎にこれからも挑戦したい。

## 謝辞

本稿の内容は、現在投稿中の論文<sup>21)</sup>に基づいているので、詳しくはそちらをご覧ください。ここでは割愛した初代宇宙線電子の最高エネルギーや、加速後の宇宙線の逃走についても議論している。天文月報編集員の岡部信広氏には本稿の執筆の機会をいただき感謝いたします。

本研究は MEXT/JSPS 科研費 JP16K17702 と MEXT/JSPS 卓越研究員事業の助成を受けています。

## 参考文献

- 1) Fujita, Y., & Ohira, Y., 2011, ApJ, 738, 182
- 2) Li, X., et al., 2017, Nature, 552, 382
- 3) Svensmark, H., 2007, A&G, 48, 1.18
- 4) 大平豊, 山崎了, 寺澤敏夫, 2012, 日本物理学会誌, 67, 832
- 5) 山崎了, 馬場彩, 2009, 日本物理学会誌, 64, 196
- 6) Drury, L. O., 1983, Rep. Prog. Phys., 46, 973
- 7) Ohira, Y., et al., 2010, A&A, 513, A17
- 8) 平野信吾, 2015, 天文月報, 108, 337
- 9) Kitayama, T., et al., 2004, ApJ, 613, 631
- 10) Weibel, E. S., 1959, Phys. Rev. Lett., 2, 83
- 11) Ruyer, C., & Fiuza, F., 2018, Phys. Rev. Lett., 120, 245002
- 12) Spitkovsky, A., 2008, ApJ, 682, L5
- 13) Martins, S. F., et al., 2009, ApJ, 695, L189
- 14) Sironi, L., et al., 2013, ApJ, 771, 54
- 15) Shalchi, A., & Dosch, A., 2009, Phys. Rev. D, 79, 083001
- 16) Kirk, J. G., & Reville, B., 2010, ApJ, 710, L16
- 17) Plotnikov I., et al., 2011, A&A 532, A68
- 18) Dopita M. A., et al., 2011, Astrophys Space Sci., 335, 345
- 19) Sazonov, S., & Sunyaev, R., 2015, MNRAS, 454, 3464
- 20) Leite, N., et al., 2017, MNRAS, 469, 416
- 21) Ohira, Y., & Murase, K., 2018, submitted

## Acceleration of First Cosmic Rays

Yutaka OHIRA

*Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: It has been over 100 years since cosmic rays were discovered in 1912. In the current universe, non-thermal high-energy particles like cosmic rays present in everywhere. There are a lot of observations and studies about the cosmic rays to understand their origin. However, it has not been well studied that when, where, and how cosmic rays are first accelerated since the Big Bang. In this paper, we would like to introduce my recent study about the first cosmic rays.