

宇宙と実験室の無衝突衝撃波 ー粒子加速と磁場生成・増幅ー

Collisionless Shocks in the Universe and Laboratory Particle Acceleration and Magnetic Field Generation/Amplification

1. はじめに

1. Introduction

坂和洋一¹⁾,高部英明²⁾ SAKAWA Youichi¹⁾ and TAKABE Hideaki²⁾ ¹⁾大阪大学レーザーエネルギー学研究センター,²⁾ドイツ・ドレスデン・ヘルムホルツ研究機構 ^(原稿受付:2015年11月24日)

1.1 緒言

今回は、無衝突衝撃波に焦点を当てて特集を組んだ.その中でも、粒子加速、磁場生成・増幅、不安定性の励起といったトピックの、観測・理論・シミュレーションおよびレーザー実験による最新の成果を紹介する.

無衝突衝撃波とは、荷電粒子間のクーロン衝突がほとん ど起きない無衝突プラズマ中に生成される衝撃波であり、 荷電粒子間のクーロン衝突の平均自由行程よりもはるかに 短い領域で衝撃波が生成される.無衝突衝撃波の生成に必 要な散逸過程は、粒子間衝突以外の過程、すなわち、プラ ズマの集団現象によって生成される電場や磁場と荷電粒子 との相互作用である.宇宙で観測される衝撃波は、ほとん どが無衝突衝撃波である.

Balogh&Treumannの本から引用すると[1], プラズマ中 の無衝突衝撃波は, 1948年に Courant & Friedrichs によっ て初めてその存在が指摘され, 1950年に De Hoffman & Teller によって初めて磁化プラズマ衝撃波の理論が示さ れ, 1963年に Sonett & Abrams, 1964年に Ness 等による観 測衛星によって初めて自然界(地球のバウショック(後 述)) での存在が確認され, 1965年に Kurtmulaev 等と Paul 等によって初めて実験室での生成に成功し, 1968年に Dawson & Shanny によって初めて静電的な無衝突衝撃波の シミュレーションが行われた, とされている. 我が国でも, 坂上と山中によって1965年に無衝突衝撃波生成実験が報告 されている[2]. 2章で詳しく述べられるが, 無衝突衝撃波 が半世紀以上も観測衛星, X線・ガンマ線観測, 理論・シ ミュレーションによって精力的に研究され続けているの は、これが宇宙における高エネルギー荷電粒子、すなわち 宇宙線の生成に重要な役割を担っているからである.

通常の(衝突)衝撃波では,衝撃波の上流における超音 速の粒子の運動エネルギーが,粒子間衝突によって散逸 し,粒子は減速して亜音速となり,衝撃波下流で「加熱」さ れ熱エネルギーに変換される.一方,無衝突衝撃波では, 荷電粒子とプラズマ中の電磁場との相互作用によって,荷 電粒子の「加熱」に加えて非熱的成分の生成「加速」が起 こる.無衝突衝撃波における様々な「加速」機構によって, 宇宙物理学の最も重要な課題の一つとされる宇宙線の生成 が行われる.その加速機構にはプラズマの集団現象によっ て生成される様々な不安定性や波動が関与し,その結果, 磁場生成や増幅も行われる.

本小特集では、まず本章の次節以降で、宇宙における無 衝突衝撃波と宇宙線加速、および本小特集で取り上げられ る三種類の無衝突衝撃波の説明と、これまでの無衝突衝撃 波研究の歴史的経緯を示す(高部).第2章では、プラズ マ・核融合学会誌では比較的なじみの薄い、「無衝突衝撃 波における宇宙線加速と磁場増幅の観測・理論・シミュ レーション」について3小節で説明する.2.1では超新星残 骸における無衝突衝撃波での銀河宇宙線加速の理論・モデ ル・観測結果についてまとめる(山崎).2.2では超新星残 骸の衝撃波において観測されている磁場増幅の物理機構と して有力視されている Richtmyer-Meshkov 不安定性研究 の、最新のシミュレーション結果を示す(佐野).2.3では

¹)Institute of Laser Engineering, Osaka University, ²Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf (Germany)

authors' e-mail: sakawa-y@ile.osaka-u.ac.jp, h.takabe@hzdr.de

宇宙における磁気流体的無衝突衝撃波の概要および様々な 加速機構を観測と理論・シミュレーションの両面からまと める(松清).第3章「高出力レーザーを用いた無衝突衝撃 波と磁場生成・増幅実験」では大型レーザーを用いた無衝 突衝撃波に関連する実験として、レーザー生成プラズマに おける磁場生成・増幅(3.1 蔵満),静電的な無衝突衝撃 波生成実験(3.2 森田),Weibel不安定性による無衝突衝 撃波生成の試み(3.3 坂和)を示す.第4章で「まとめ」 として、レーザーを用いた宇宙プラズマ物理研究の歴史を 振り返り、今後の展望を示す.(坂和)

1.2 無衝突衝撃波研究の背景と歴史抄

1.2.1 宇宙線と超新星残骸

まず,宇宙物理学における無衝突衝撃波と粒子加速について簡単に歴史をひもとく.

最近,宇宙物理学では系外惑星の探査が盛んに行われて いる.太陽系外に地球と同じように生命現象が見られる惑 星があるか.天文台の某氏は「ALMA が完成すれば,生命 の起源は顕微鏡でなく望遠鏡で探る時代が到来するかもし れない」と言っていた.しかし,地球という理想的な環境 を考えると生命の存在する惑星を探すのはかなり難しいよ うに思われる.その一つの原因が宇宙線である.宇宙線の 一部は,太陽表面から放出されるプラズマで,太陽からの 高エネルギー粒子の最高エネルギーは数 GeV に達する.

宇宙線は Hess により100年以上前に発見された. という より,宇宙から来ていることがHessの観測の結果明らかと なった. 当初,この放射性粒子は地下から来たと思われて いた.それを確認するためHessが上空での宇宙線減少を確 認しようと気球で上昇したところ,逆に増加したことから 宇宙起源とされた[3].

私たちの地球は太陽光エネルギーの恵みで進化を遂げ, 生命がDNAで進化して高度な文明をもつ人類が生まれた. 地球誕生から常に太陽表面からの宇宙線が地球に降り注い できたが,それは地磁気で受け止められ,無衝突衝撃波で 減速されることで,地球に直接放射線粒子が衝突すること を防いできた.地球という惑星自体に宇宙からの高エネル ギー粒子の侵入を防ぐ仕組みが備わっていて,生命現象が 可能となったのである.また,大気圏に突入した宇宙線は 幸いにも大気の原子核に衝突し,「シャワー」と呼ばれる 他の素粒子への崩壊などを通し,大気中でエネルギーを失 う.

図1に「宇宙線 (Cosmic-Rays)」のエネルギースペクト ルを示す[4]. このエネルギーが E = 10²⁰ eV にまで広がる 荷電粒子(主に陽子)のうち,数 GeV 以下は主に太陽起源 である.高エネルギー成分の起源は超新星残骸(Supernova Remnants: SNRs)であると1934年に唱えたのが Baade & Zwicky[5]である.超新星残骸は宇宙のX線源で あり,時間と共に爆風波が球状に広がっていく特徴をも つ.彼らは超新星爆発のエネルギーの10-20%が宇宙線の エネルギーに変換されるだろうと予言した.そして,宇宙 線の加速機構としてE.Fermiは1949年に今日でいう統計加 速の基本概念を提案した[6].



その Fermi の加速機構のアイデアを基礎に,超新星残骸 の波面のような無衝突衝撃波を挟んだ領域で統計加速が起 これば観測されているエネルギースペクトルのべき乗則が 導出されることを,1978年に英国のBell[7]と米国のBlandford &Ostriker [8]が同時に独立に定式化した.そして,そ の観測的証拠は小山により1995年の Nature 論文に掲載さ れた[9].ただし,宇宙線の超新星残骸起源は,電波天文学 分野でシンクロトロン放射が観測された時代からわかって いた.電波シンクロトロンはマイクロ・ガウス程度の星間 磁場に対しては,GeV くらいの電子が放射しているからで ある.小山の1995年の論文で初めてわかったことは,電子 の最高エネルギーが TeV 以上まで達し,knee と呼ばれる スペクトルの折れ曲がるエネルギー(=3×10¹⁵ eV)の近 くまで超新星残骸で加速されているという観測的検証が行 われたことである.

1.2.2 三種類の無衝突衝撃波

無衝突衝撃波の波面は荷電粒子間のクーロン散乱で決ま る平均自由行程より桁違いに薄い.超新星残骸の衝撃波だ けでなく,たとえば地球磁場に向かって降り注ぐ太陽風は 船首(bow)の形をした無衝突衝撃波(バウショック)で, 減速・圧縮される.太陽風の平均速度は400 km/s程度もあ り,直接,地球に衝突すると全ての生命はDNAの破壊など により死滅してしまう.この速度と密度を入れると平均自 由行程は太陽と地球の距離(AU=1.5×10¹¹ m)よりも長 くなる.衛星観測によると地球のバウショックは約100-1000 kmの厚さで,地表から約9万 km の位置に存在する.

このような無衝突衝撃波は中性ガスの衝撃波と異なり, 極めて多様である.しかし,敢えて大別すると以下の3つ の場合がある.ただし,それぞれ必ずしも独立ではない.

① 磁場のない静電的無衝突衝撃波

② 磁気流体的無衝突衝撃波

③ 磁気乱流が支える無衝突衝撃波

これら3つの無衝突衝撃波の違いを定性的に説明しよう.

①や②では、1次元圧縮の弱い衝撃波の層流的な解が存 在する.弱い衝撃波ではプラズマの流体近似で衝撃波の構 造を求めることができる.①の衝撃波の厚さはデバイ長 Special Topic Article

 $\lambda_{\rm D}$ 程度

$$\lambda_{\rm D} = \left(\frac{k_{\rm B}T}{\varepsilon_0 n_{\rm e} e^2}\right)^{1/2} = 7.4 \times 10^3 \left(\frac{T_{\rm eV}}{n_{\rm e}}\right)^{1/2} [\rm m] \qquad (1)$$

1. Introduction

である.ここで, n_e は[1/m³]単位である.②の衝撃波では 電子のスキン長程度

$$\lambda_{\rm S} = \frac{c}{\omega_{\rm pe}} = 5.3 \times 10^6 \frac{1}{\sqrt{n_{\rm e}}} [\rm m] \tag{2}$$

である.③の衝撃波の波面のサイズを決めるのはイオンの ラーモア半径であり、その値は陽子に対して非相対論と相 対論的なエネルギーの場合について、それぞれ

$$r_{\rm L} = 1.0 \times 10^6 \frac{(T_{\rm eV})^{1/2}}{B_{\mu \rm G}} \ [\rm{m}]$$
(3)

$$r_{\rm L}^{\rm R} = \frac{\gamma m c^3}{eB} = 10^{-15} \frac{E_{\rm eV}}{B_{\mu \rm G}} [\rm pc] = 310 \frac{E_{\rm eV}}{B_{\mu \rm G}} \ [\rm m] \qquad (4)$$

である.ここで、 $B_{\mu G}$ はマイクロ・ガウス単位での磁場、 E_{eV} は相対論的陽子のエネルギー、(4)式は相対論的陽子 に対する公式である. $E_{eV} = 10^{15}$, $B_{\mu G} = 1$ で、 $r_{L}^{R} = 1$ pc (=3.26 光年=3.1×10¹⁶ m)である.

層流的な衝撃波は、プラズマ流体の運動方程式の対流項 と、電子・イオン間の電荷分離に起因する分散性が釣り合 うことで維持されている.衝撃波ができるのは、たとえば Landau減衰など散逸を伴う場合であり、散逸が全くない と孤立波 (Soliton) として存在することができる.

上の③の無衝突衝撃波は、例えば無衝突プラズマ同士が 対向流としてすれ違う際、揺動による微弱な磁場によりわ ずかに軌道が変化して磁気不安定が成長し、非線形効果で 電流フィラメントが成長し不安定となる.するとフィラメ ント同士は合体し、磁場が強く成長していくと、イオンの ラーモア半径が、乱流の平均的な磁気島のサイズ程度にな る.その結果、対向流は自由に流れることができずに磁場 の強いところで乱れた衝撃波面を形成する.しかし、これ もマクロなスケールで見るとラーモア半径の数倍の幅をも つ無衝突衝撃波として観測できる.

1.2.3 磁気乱流による無衝突衝撃波形成

ちょうど,小山氏の論文が出た頃,宇宙物理ではガンマ 線バースト (GRB)[10]という謎の爆発現象が多数観測さ れていた.しかし,起源は何かを探る段階であった.GRB の距離が宇宙論的だと確定したのは1997年であり,相対論 的速度で宇宙空間に爆発的に広がる Fireball モデルを用い ると,観測の説明が可能であった.それは,電子・陽電子 の塊がジェット状にローレンツ因子100-1000で膨張すると きに,内部に無衝突衝撃波と共に磁場が形成され,相対論 効果でそのシンクロトロン放射がガンマ線となり放射され るというモデルであった.

2000年以降,宇宙物理の計算物理研究者達はこの現象を 粒子シミュレーションで研究し始めた.分布関数の形状が 非等方であることに起因する Weibel 不安定[11]が起これ ば磁場生成と衝撃波形成が同時に起こるはずだと Medvedev & Loeb が主張した[12].その後,粒子シミュレーショ ンで、欧州ではポルトガルの Silva 達が[13], 我が国では 加藤が[14], 米国では Spitkovsky [15] らを中心に、衝撃 波が形成される様子を研究した. GRB の場合, 荷電粒子が 電子・陽電子と質量が同じであることと相対論的なジェッ トであることから,数値計算の負荷が比較的小さいため, 多くの研究が行われた.

加藤と高部は,超新星残骸のようにイオンと電子という 質量比が2000倍近くある場合について,非相対論的な速度 でのWeibel不安定性による衝撃波形成のシミュレーショ ンを行った[16].長時間シミュレーションの結果,電子運 動ではなくイオンのゆっくりした運動で磁場が生成し,非 線形段階に成長し,磁気結合により磁場のサイズが大きく なり,イオン流が磁場により散乱を受けて衝撃波ができる ことがわかった.このように超新星残骸のようなプラズマ 高速流が自己磁場生成を行い,自ら生成した磁場による ローレンツ力で軌道が乱れ,流れがせき止められ,その結 果衝撃波ができるというシナリオを明らかにした.また, それが実験可能であるかの考察を行った[17].その結果を ベースに大型レーザーを用いた無衝突衝撃波実験が坂和の グループにより開始され,本小特集に見るように大がかり な国際共同実験として実施されている.

1.2.4 無衝突衝撃波の実験と観測

ここで,実験室の無衝突衝撃波実験について歴史を簡単 に説明しておこう.1960年代は非線形プラズマ物理学の対 象としてソリトン,無衝突衝撃波の研究がされていた.70 年代初めにはその実験も行われていた[18].しかし,理論 的に解析できる衝撃波は弱い衝撃波に限られていた.それ は,基礎プラズマ装置の限界もあった.

ここで、イオン波ソリトン、イオン波の無衝突衝撃波に ついて説明する.これは、静電的波動である.詳しい理論 と実験の比較はたとえば佐伯氏の記事[19]にある.Taylor の実験結果を図2に示す[18].密度の飛びはせいぜい20% という弱い衝撃波の実験結果である.これは、1974年刊の F.F. Chen の教科書の8.3節「衝撃イオン音波」(p.220) に 理論が詳しく書かれている[20].また、Sagdeev ポテン





シャルの式も詳しく説明されている.教科書にはマッハ数 *M*が1.6より小さい時に解が存在し,それより*M*が大きい 場合は解が存在しないと書いている.この教科書の範囲で 実験データ図2を解釈することは可能である.

その後, M>1.6 の強い衝撃波の実験はどうなったのだ ろうか. 著者の知る限り論文が見当たらない. 想像するに, 図2の実験に使われた基礎プラズマ実験装置では M>1.6 のような強い衝撃波を時間的に定常に作ることが難しかっ たと思われる. さらに,私信であるが,1973年後半から半 年の間に原油価格が1バレル3ドルから12ドルに跳ね上 がった第1次石油危機の影響で,多くのプラズマ物理学者 が核融合プラズマの研究へ移動したため,上記のような基 礎研究に多大な影響があり,無衝突衝撃波という基礎研究 の空白期が到来した.それが,1970年から2010年頃まで40 年間の空白期である.その間に,先に書いたように宇宙物 理では GRB の物理機構解明に関して無衝突衝撃波の高度 な研究へ進展した.

一方、磁化プラズマの無衝突衝撃波に関しては、地球磁 気圏のバウ衝撃波や巨大な太陽フレアに伴うプラズマ放出 でできる無衝突衝撃波の研究は脈々と続いていた. 1957年 10月,人類初の人工衛星「Sputnik I号」が地球の軌道に 乗った.そこで、60年代には特に、地球磁場と太陽風との 相互作用による磁化プラズマの無衝突衝撃波実験をテータ ピンチや高速プラズマ風洞などで研究する動きがあった. しかし、磁化プラズマでは「whistler波」など多数の波が介 在するためはっきりした成果は得られなかったようであ る. むしろ, この分野では1980年から90年代にかけてGEO-TAIL (1992年に打ち上げ) に代表される観測衛星が、衝撃 波や太陽から見た地球背後の磁気中性点での磁気リコネク ションやそれに付随したオーロラ観測などの詳しいデータ を送ってきた.同時に地球磁気圏で衛星が衝撃波面を通過 する時の磁場など物理量の変化が観測された[1]. そのよ うな背景もあり、地上での磁化無衝突衝撃波の実験という よりも観測データの解析に理論家達は重点を置き、物理を 解明していく時代になった.

1.2.5 計算機シミュレーションによる研究

1970年代には J. Dawson 達により開発された PIC (Particles in Cell)のシミュレーション手法で、様々な非線形で集団的なプラズマの現象を研究する動きが加速した.それは、1970年代末のCray-1によるスパコンの時代の到来でさらに加速していった.

Morse 達が一次元の電子・イオン系の静電衝撃波生成の シミュレーションを行い[21],引き続き Forsland 達が電 子温度とイオン温度の比が大きい(電子温度がより高い) 場合にはイオン音波波面でイオンの一部が反射され,その 動圧が後面の電子の圧力とバランスする静電衝撃波が可能 であることを示した[22].この*M*>3の高マッハ数のシ ミュレーション結果が正しいことは,高マッハ数衝撃波が 生成可能となった40年後,本小特集の3.2章に詳述されて いるように,中国上海光機所の神光 II レーザー実験で初め て確認された.これは,Weibel 不安定成長計測をめざした 実験であったが,一種のセレンディピティで,偶然にも実

験確認された.

最近では、ポルトガルのSilvaのグループが精力的に二 次元や三次元の無衝突衝撃波シミュレーション研究を行っ ており、色々な条件下で静電的衝撃波や、Weibel 不安定を 伴う衝撃波などの存在条件を明らかにしている[23].

さらに Princeton の Spitkovsky のグループがイオンは粒 子,電子は流体というハイブリッドな粒子シミュレーショ ンで,長時間の衝撃波の発展から,磁場乱流が発生し,非 熱的なイオンの加速が起こるまでの大型シミュレーション を行い,多数の論文を書いている[24].その精力的な研究 には頭が下がる.

他にも重要なシミュレーション研究が過去45年間に間欠 的に報告されているが、少なくとも、レーザー生成プラズ マや超新星残骸など実験室、宇宙でのプラズマを対象に精 力的な研究が行われだしたのはここ10年程度である.私た ちの超新星残骸衝撃波関連のレーザー模擬実験の積み重ね が、実験室と宇宙物理をリンクさせる世界的な研究の流れ を喚起してきたと自負している.

また,時期を同じくして,Weibel不安定は高速点火核融 合の加熱の物理にも深く関与していることから,研究が行 われている点に注意しよう[25].異なる点は,我々は理学 的研究,つまり,より複雑な物理現象がWeibel不安定の非 線形性を通し,自己組織化などとどのようにつながって, 非熱的加熱粒子を生成するかを研究しているのに対し,高 速点火は「どのようにしてWeibel不安定を工学的に押さえ て,古典的な電子流れに制御するか」という,工学的研究 の点である.しかし,大切なことは,理学・工学を問わず, 自然の現象に素直に耳を傾ける謙虚な姿勢が両研究の進展 には必須という歴史的教訓である.

1.2.6 プラズマ物理学としての無衝突衝撃波研究

様々な宇宙・天体プラズマおよび実験室のプラズマに共 通で極めて重要な非熱的粒子加速(宇宙線など)を実験室 宇宙物理のテーマとして掲げ,より広い分野へのインパク トを期待し,2008年のシミュレーション[16]および実験の 国際共同研究(3.2節),NIF実験(3.3節)と,約7年の月 日を経て,ようやく全体像が明らかになりつつある.同時 に問題意識を共有する世界の仲間が30人以上集まった.国 際化と学際化が今後の研究型大学に求められており,本小 特集を通して,未来志向の研究形態の生の声をお届けした い.

7年経ち,研究を振り返ってレビューを書いていたら, 無衝突衝撃波の物理は,プラズマの教科書で相互の関係が 素人には判然としない「運動論」「非線形物理」「波と粒子 の相互作用」「プラズマ乱流」「自己構造形成」などが一つ のシナリオとして語られる,大変教育的な研究テーマであ ることを見いだした.本小特集には「プラズマ物理学」の 上級コースのエッセンスが背景にあることを見いだしてほ しい.(高部)

参考文献

[1] A. Balogh and R.A. Treumann, *Physics of Collisionless* Shocks -Space Plasma Shock Waves- (Springer, New York, Special Topic Article

1. Introduction

2013).

- [2] 阪上幸男,山中千代衛:核融合研究 15,191 (1965).
- [3] 木舟 正:宇宙高エネルギー粒子の物理=宇宙線・ガ ンマ線天文学(培風館, 2004).
- [4] S.W. Swordy, Space Sci. Rev. 99, 85 (2001).
- [5] W. Baade and F. Zwicky, PNAS 20, 259 (1934).
- [6] E. Fermi, ApJ 119, 1 (1954).
- [7] A.R. Bell, MNRAS 182, 14 (1978); A.R. Bell, MNRAS 182, 443 (1978).
- [8] R.D. Blandford and J.P. Ostriker, ApJ 221, L29 (1978).
- [9] K. Koyama et al., Nature 378, 255 (1995).
- [10] 村上敏夫:宇宙最大の爆発天体ガンマ線バースト (ブ ルーバックス新書, 講談社, 2014).
- [11] E.S. Weibel, Phys. Rev. Lett. 2, 83 (1959).
- [12] M.V. Medvedev and A. Loeb, ApJ 526, 697 (1999).
- [13] L.O. Silva et al., ApJ 596, L121 (2003).
- [14] T.N. Kato, Phys. Plasmas 12, 080705 (2005); T.N. Kato, ApJ

668, 974 (2007).

- [15] P. Chang *et al.*, ApJ **674**, 378 (2008).
- [16] T.N. Kato and H. Takabe, ApJ 681, L93 (2008).
- [17] H. Takabe *et al.*, Plasma Phys. Cont. Fusion **50**, 124057 (2008).
- [18] R.J. Taylor et al., Phys. Rev. Lett. 24, 206 (1970).
- [19] 佐伯紘一: プラズマ・核融合学会誌 83,74 (2007).
- [20] F.F. Chen, 内田岱二郎訳: プラズマ物理入門 (丸善出版, 1977).
- [21] R.L. Morse and C.W. Nielson, Phys. Fluids 12, 2418 (1969).
- [22] D.R. Forslund and C.R. Shonk, Phys. Rev. Lett. 25, 1699 (1970).
- [23] F. Fiuza *et al.*, Phys. Plasmas **20**,056304 (2013); A. Stockem *et al.*, Science Report **4**, 3934 (2014).
- [24] D. Caprioli and A. Spitkovsky, ApJ 783, 91 (2014).
- [25] A.P.L. Robinson et al., Nucl. Fusion 54, 054003 (2014).