

講座

相対論的プラズマ物理学

Relativistic Plasma Physics

1. はじめに

プラズマ物理学とはどんな物理学なのだろうか。学生を相手に「宇宙の物質の99%以上はプラズマ状態にあり、プラズマを学ぶことは万物の自然なありようを学ぶことである」のようなステレオタイプの話で講義を始めることがよくある。「プラズマ」を名乗る本学会がその99%の素顔を公平に伝える媒体となっているかどうか疑問ですが（それは学会の本務ではないと言われそうですが）いずれにせよ、プラズマ物理学が向学心に富んだ優秀な若者に魅力的であることは、私にとって重要です。そんな気持ちで学生と話していると「量子力学も相対論も必要ないような物理なんて、物理じゃありませんよ、先生」と生意気な言葉が返ってくる。そこで、「いや違う」から言葉を続けていけるほどに現状のプラズマ物理に満足しているわけでもない私は、その学生の気持ちが良くわかってしまうのです。

十数年前、当時京大の航空工学科でCFD（数値流体力学）を研究していた松田卓也さん（専門は宇宙物理、現在は神戸大理）が超新星の研究会で「物理学にも土農工商がある。量子力学は武士の学問、流体力学は商人の学問。ところが、この商人の学問が一番儲かりますのや」のようなことを言っていた。私が付け加えるならば量子力学に加え相対性理論が武士の学問となろう。いくら強がりと言おうと、このような表現の背景には先ほどの学生が持っている素朴な先入観がある。ところが最近、知人から「量子力学も相対性理論も既に死んだ学問でしょ。武士の学問など学生のファッション指向に迎合しているだけじゃないですか」のような厳しい指摘を受けた。確かに、MeVを超える電子が出てきたからといって、相対性理論の教科書をなぞるような議論をしたところで死んだ学問にしかならない。大切なことは、今まで、加速器などで生成した高エネルギー粒子ではどうしても見ることのできなかつた「相対論が本質的な集団現象の物理」を

見出していくことができるかどうかであろう。

このような背景の下、では、プラズマ物理学をいかに優秀な若者に魅力的な物理学としていくか。これは何も私だけに突きつけられた課題ではなく、読者の皆さんが自分のフィールドで答えを出していくことを求められていると思います。僭越ながら私の考えを述べさせていただくなら、この課題への答えは二通りあるのではないでしょう。第一は、プラズマ物理学が武士の学問に頼らずに、まったく新しい学術として魅力あるものに脱皮していくこと。たぶん、この講座に引き続いて吉田善章さんが旗振りをされる講座「プラズマ理論の技法」[1]は、そのような試みを読者の皆さんに呼びかける企画でしょう。新しい学術のあり方を他分野に発信する契機として大いに期待しています。さらには、例えば「ITERにおける燃焼プラズマの科学」[2]のように、核融合研究を学術として捉えなおそうという世の動きがあり、大変好ましいことだと考えています。が、このような巨大プロジェクトに結びついた学術において問われるのはコストパフォーマンスではないでしょうか。例えば、試験管の中で見られる現象と似たような非線形現象を巨費を投じて解明したからといって評価はされないでしょう。ここでは、政池先生が指摘する巨大科学の3つの成立条件を改めて問い直す必要があります[3]。

一方、第二の方法は武士の学問もプラズマ物理に取り込んでしまうことです。そのためには実験室に相対論や量子力学が本質的であるエキゾチックなプラズマを創り出す技術的な裏打ちが必要です。さらに、その研究が自然に宇宙の極限プラズマ解明をめざす高エネルギー宇宙物理の最前線に結びついていくような研究展開が求められます。私は本講座がそのような展開のきっかけになればと思い、協力者に主旨を理解していただき企画しました。

ところが、このようなことを言うと「そんな荒唐無稽

TAKABE Hideaki, Institute of Laser Engineering and Graduate School of Science, Osaka University, Suita 565-0871, Japan

author's e-mail: takabe@ile.osaka-u.ac.jp

な」という批判を専門家からとかく受けるものです。そこで、アインシュタインの有名な言葉を思い出しましょう[4]。「最初、専門家が不可能を立証する有力な証拠を提示する。次に、そのことをまったく知らない無学者が現れて、がむしゃらに挑戦し、やり遂げる」。しかし、この言葉を文字どおり受け止めては間違いです。サハロフが書いているように「無学者といっても現代の科学知識のほか、多くの優れた資質を持っていなければいけない。無学者が一番優れているのは、困難のあることはよく承知しているが、その困難に動じない直感を持っている点である」[4]。私もそんな無学者のはしくれになって、先ほどの生意気な学生に「いや違う」の続きの話を是非してみたいと考えているのです。

幸い、レーザーは1960年の誕生以来、技術的發展はめざましく「第二の加速器」と形容されるほど進歩してきました。結果として、レーザーの超高強度電場で加速された電子は MeV 以上のエネルギーを持った相対論的粒子群となり、非相対論の世界では考えられない現象を引き起こします。それは加速器による相対論的粒子群では見られないプラズマ現象であることが期待されます。

レーザー核融合が始まった30年前にはレーザープラズマで数々の異常現象が見られ、それが研究者の興味を誘い他分野の研究者も巻きこんだ青雲の時代がありました。ところが、核融合の成功シナリオには面白い物理はかえって邪魔で、より古典的な流体の世界を実現する方向に研究目標が設定され、また、それを実現するようにレーザーの技術革新の方向付けが成されてきたという物理にとっては苦い歴史があります。

ところが、CPA (Chirped Pulse Amplification) のアイデアが出され、もはや超高強度レーザーが大研究所だけのものではなくなったことにより、レーザー・プラズマの異常現象への回帰が90年代の初めごろから広く見られるようになりました。私にとって、そのような回帰にも近い契機は1997年8月27日から9月2日にかけて、イタリアのバレンナで開催された「プラズマ中の超高強度場」に関する第1回国際会議においてでした[5] (会議中にダイアナがパリで交通事故死するという大ニュースが飛び込んだ意味でも忘れられない会議です)。

帰朝報告を所内でした時のメモを再現してみましょう。そこには、以下のような言葉が踊っていました。

Coulomb explosion of molecule, Higher harmonics (200th) to water window, Atto second laser, Super-channel formation, Time dependent Dirac equation solver, Channel

stability, Moving mirror model, Extreme acceleration equivalent to near Black Hole, Polarization selection rule, Self-induced transparency, Photo-nuclear reaction, Self-modulated wake field acceleration, Material processing of high-explosive, VLPL (Virtual Laser Plasma Laboratory).

会議で始めて聞いて驚いたり感心したり、と少し「おくて」の私にとって超高強度レーザーの魅力をいかに見せつけられた会議でした。上のキーワードにはレーザー場による非線形効果や超短パルス効果、そして、本講座で紹介する超高強度場による相対論効果などが含まれています。

相対論が本質的である現象が実験室プラズマで観測できるようになったわけです。このような経緯もあり、今回、レーザー生成プラズマにおける相対論効果を講座のテーマにとり挙げることにしました。同時に、先ほど書いたように、そのようなプラズマがどのように高エネルギー宇宙物理とつながっていくか考えるために、後半は宇宙物理における相対論プラズマの紹介をしていただきます。

プラズマ中の相対論効果には特徴的に次の4つがあります。

- (1) 相対論効果による質量の変化：

$$m = \gamma m_0 \quad (1)$$

- (2) 相対論による粒子や流体の限界速度の存在：

$$v < c \quad (2)$$

- (3) 相対論効果による時間経過の変化：

$$t = \gamma t_0 \quad (3)$$

- (4) ローレンツ収縮：

$$L = L_0 / \gamma \quad (4)$$

ここで、 m_0 , t_0 , L_0 は運動している物体の静止系での質量、時間、長さ、 c は光速。また γ はローレンツ因子(大文字で Γ と書いたりもします)と呼ばれ

$$\gamma = 1/[1-(v/c)^2]^{1/2} \quad (5)$$

で定義されます。

もちろん、上の議論は特殊相対論に限った場合であり、また(1)~(4)式は互いに独立な関係ではありませ

ん。後の説明に便利なように併記しました。一般相対論を含めるとブラックホール周りの時空のゆがみなど、新たな興味深い話題がたくさん出てきます[6]。この講座では、レーザー生成相対論プラズマに直接関係が深い特殊相対論の話題に限ることにします。なお超高強度レーザーを用いて人工的なブラックホールを創り出し、事象の地平線 (event horizon) を観測しようという斬新な提案もなされていることを付記しておきます[7]。

これらに加え、相対論的量子力学が教えるように、電子が核のまわりで相対論的な運動をすると、ディラック方程式から予言されるように反物質が生成されます。陽電子 (ポジトロン) の創生です。昨今の宇宙物理最大の話、ガンマ線バーストは超相対論的電子・陽電子プラズマの「火の玉 (fireball)」が原因と考えられています[8, 9]。この「玉」の温度は10MeVにも達すると考えられています[8]。この数年で「玉」ではなく、どうも「ジェット」のようだ、と説は変わってきたものの、その主役が電子・陽電子プラズマであることには変わりはありません。さらに、一部の銀河で見られる活動銀河ジェットは銀河のサイズの数倍にまで伝播する相対論的ジェットであることが観測でわかっています[8, 10]。これは、銀河中心にある太陽質量の一億倍程度もある質量の巨大ブラックホールに吸い込まれる降着円盤から放出されるガンマ線がガンマ-ガンマ衝突により電子・陽電子対に代わり、それがジェット状になって銀河を突き抜けて伝播していると考えられています。電子・陽電子プラズマの研究はパルサー風などの話題も含め高エネルギー宇宙物理の根幹をなすものです[11]。

一方、10 MeVにも達する相対論的電子を効率良く高密度に生成できることから、このような電子やその制動輻射でできるガンマ線を用いて、核物理という量子の世界に切り込もうという提案もさせていただいています[12]。本講座では、レーザー核物理 (LNP) の話題は取り扱いませんが、簡単に紹介しておきましょう。まず理学研究へのLNPの応用として理化学研究所を中心に進められている不安定核の研究[13]への応用を考えています。不安定核は核破砕で作られ、電子が数個ついたイオン状態で分離され、その半減期や核構造が研究されています。KEKとJAERIの共同プロジェクトの大強度陽子ビーム計画ではより重元素の不安定核が実験的に調べられる予定です[14]。そのような時、超高強度レーザーで数個の残った束縛電子 (波動関数はボーア半径よりずっと小さくなっている) を10 MeV近くのエネルギーで振動させ、仮想光子 (virtual photon) で巨大核共鳴を励起

したり、中性子の磁気モーメントによる電子散乱を計測することにより、核構造やそのエネルギー準位を調べることができるのではないか。また、ハローを持つ中性子過剰核の中性子離脱エネルギーなどのデータが得られないか。このような研究は天体核物理における中性子過剰核がr過程により重い元素を核合成していく物理過程[15]の研究に不可欠の情報を提供してくれるでしょう。

工学的には、レーザー核物理の小特集[12]に紹介したように、中性子に代わってレーザー振動電子が放射性廃棄物の長寿命核を安定核に核変換してくれる可能性があります。これについては効率計算など、レーザーと電子の相互作用、電子と核の相互作用を相対論的に解析していく必要があります。現在進めているところです[16]。

さて、話をレーザー生成相対論プラズマに戻しましょう。実験に先立って、粒子シミュレーションを中心に研究が盛んに行われました。代表的にはリバモア研のWilks[17]、独MPQのPukov (現在Dusseldorf大学)[18]、阪大の千徳 (現在、米国General Atomics社)[19]を挙げることができます。また、独自のVlasov-Maxwell解法による独Darmstadt工科大のRuhl (現在、米国General Atomics社)の研究も特筆に値します[20]。これらの研究は、現在は、空間3次元での相対論的電子プラズマの振る舞いや、イオンとの結合の話題に移っています。相対論的電子による両極性電場を利用することにより薄膜の裏面構造に垂直でエネルギーの揃ったMeVイオンビームを生成できることはシミュレーションで示され[21]、実験で確認されています[22]。近い将来、加速器のイオン源がレーザー生成相対論的電子によるイオン加速に置き換わるであろう、と私は予想しています[23]。

しかし、このような粒子シミュレーションなどが計算できる空間、時間領域はまだ世界最高性能のスパコンを用いても限られており、境界条件の取り方や、計算領域の広さ・深さによって結果が異なるという不確かさが残されています[24]。シミュレーションをベースに高速電子群が単一ビーム状に融合するのか、ばらばらに分裂するのか予測できる段階にはまだ達してないと言わざるをえません。

本講座では、このようなレーザー生成相対論プラズマの物理の現状レビューを起点に、レーザーによる陽電子生成の物理[25]、そして、電子・陽電子プラズマの相対論的振る舞いなどを紹介します。相対論的プラズマの物理というと、どうしても宇宙の高エネルギー現象と結び付けたくするのが人情であり、読者も当然それを期待しているでしょう。そこで、後半は相対論的流体の振る舞

いから宇宙線に見られる相対論的粒子加速, 超相対論のガンマ線バースト現象と話題を広げました。以下に各章のタイトルと執筆者を紹介します。

1. 序章 (阪大: 高部英明)
2. 超高強度レーザー場中の荷電粒子の相対論的運動 (同上)
3. 相対論的レーザー・プラズマ相互作用 (1) (原研関西研: 永島圭介)
4. 相対論的レーザー・プラズマ相互作用 (2) (独 MPQ: Meyer-ter-Vehn, 阪大: 高部英明)
5. 相対論的電子・陽電子プラズマ (米 GA 社: 中島健一, Thomas Cowan)
6. 相対論的流体力学と宇宙ジェット (阪大理: 水田 晃, 山崎達哉)
7. 相対論的粒子と宇宙線の起源 (東大理: 星野真弘)
8. 超相対論的プラズマとガンマ線バースト (阪大理: 小林史歩)

第1章は本原稿です。第2章から第5章までが最新のレーザー生成相対論プラズマの話題。第6章から第8章は、高エネルギー宇宙物理の最近の話題です。

第2章では超高強度レーザー場中の荷電粒子の相対論的運動の解析とその特徴について述べます。この章では荷電粒子は質点として扱い、まず、通常の電磁波中の電子の「8の字」運動について説明し、その後、相対論的力学を議論します。先に述べた核との相互作用など考える場合には、電子に対するディラック方程式を直接解くことが必要となります。その結果、核のクーロン場のもとでの電子の散乱や負エネルギー成分の発生(陽電子の生成)などを研究することができます。しかし、本講座では量子論には触れず、質点の相対論的力学に限りしました。

第3章は系の多次元性が本質ではなく、レーザー場により電子が相対論的運動をするときに初めて現れる現象を中心に説明していただきます。主に、1次元の相対論的レーザー・プラズマ相互作用に関する研究です。実験結果もかなり出揃っているため、それらについても紹介していただきます。この章では、前に書いた“Self-induced transparency”などが議論されます。これは、(1)式に示した相対論的質量の増大が、プラズマの誘電率を変えることにより引き起こされます。遮断密度より高い電子密度のプラズマをレーザーが透過する現象で

す。また、“Super-channel formation”も同様に、レーザー強度が相対論的に強くなると伝播路の誘電率(つまり屈折率)が変化し、自分でガラスファイバと同様の屈折率分布を伝播軸の径方向に形成し、長距離に亘りレーザーが伝播することを助けます。これは“Relativistic self-focusing”と同類であり、その概念自身は70年代に示されていた[26]のが、最近になって実験的に確認されたのです。

第4章は空間が2次元、3次元であることが本質的なレーザー生成相対論プラズマについて紹介します。これについては、多次元の粒子コードで精力的に研究がなされてきており、独 MPQ の Pukov の共同研究者であった Meyer-ter-Vehn 博士の講義ノート[27]を高部が訳出し、加筆する形で書き上げます。レーザー照射で発生する大電流の相対論的電子群が引き起こす Weibel 型の電流駆動不安定に起因する線形から非線形段階を経る様々な現象を中心に紹介します。現象は当然、超強磁場を伴い、荷電粒子の軌道は複雑になります。

第5章では、電子、陽電子、原子核からなる数 MeV から数十 MeV の相対論的電子・陽電子プラズマの特徴を説明していただきます。相対論的電子・陽電子プラズマ中では様々な量子電磁相互作用が発生します。これらの相互作用による対生成と対消滅が電子・陽電子プラズマでは重要な役割を果たします。宇宙において平衡状態にある電子・陽電子プラズマは、詳細釣り合いの成り立つ熱力学平衡ではなく、対生成率と対消滅率がうまくバランスを取った状態であると考えられています。プラズマの温度が上昇するにつれ、対生成率は大きくなり、対消滅率は小さくなるため、電子・陽電子プラズマが平衡状態を保つことのできる温度には上限が存在します。これらの限界温度について説明していただきます。さらに近年、超高強度レーザーを用いた電子・陽電子生成の研究が進んでおり、実験室において相対論的電子・陽電子プラズマが生成される可能性が議論されています。レーザー生成相対論的電子・陽電子プラズマについても説明していただきます。

第6章では宇宙物理における相対論的な流体现象を解説していただきます。まず、非相対論的流体方程式と相対論的流体方程式の本質的な違いを式の導出を通して説明していただき、例として強い衝撃波を考え、相対論効果がどのように現れるか紹介していただきます。理想流体における衝撃波のランキン・ユゴニオ関係は、強い衝撃波極限での密度の飛びは比熱比5/3の理想プラズマで4倍に制限されています。ところが、相対論的な衝撃波

では、(2)式に示される速度の光速による制限のため、衝撃波を作るピストンに相当する流体運動が光速に近づくと、衝撃波面と近接し密度の飛びはローレンツ因子の増大とともにどこまでも増大します。この章では相対論的爆風波の解析解を紹介していただき、爆風波が薄っぺらの殻状になることを示していただきます。宇宙における相対論的流体の典型的な例として活動銀河核について紹介していただき、巨大ブラックホールからの相対論的ジェット生成過程とジェットの伝播過程を解説していただく予定です。

第7章では宇宙線の起源に関して相対論的粒子加速過程を解説していただきます。これまで宇宙線の加速としてフェルミ加速が一般的であり、エネルギーが 10^{15} eV [knee (ひざ) と呼ばれるエネルギー] までの加速は、超新星爆発で形成された爆風波の波面を何度も横切ってはエネルギーをもらいつづける荷電粒子(陽子)の統計加速(フェルミ加速)によると言われています[28]。この爆風波は星間磁場により形成される無衝突衝撃波で、波面の前後での電磁場乱流で散乱され、波面を通過する際エネルギーが増大していきます。この加速機構の利点の1つは、宇宙線のエネルギー分布がエネルギーのべき乗であることをうまく説明してくれることです。しかし最近ではフェルミ加速以外でもべき乗のエネルギー分布の非熱的高エネルギー粒子が形成されるメカニズムが議論され始めています。例えば、磁場のエネルギーを効率よく開放する磁気リコネクションはそのひとつです。また統計的フェルミ加速を介さずに衝撃波の波面領域でのサーフィン加速も高エネルギー粒子加速の有力候補と考えられています。これらの最近の話題にも触れながら相対論的粒子加速の基礎を解説していただきます。

第8章は、ガンマ線バーストのようなローレンツ因子が 10^3 にも達する電子陽電子流体と物質の相互作用の話です。ガンマ線バーストの描像はここ数年で大きく変遷しています。未だに、“Central Engine”(瞬時に 10^{50-52} エルグのエネルギーを出す)と呼ばれるコンパクトなエネルギーの源がどのような宇宙現象なのか不明です。しかし、秒やミリ秒の間に膨大なエネルギーがガンマ線として宇宙空間に放出されていることは確かです。これは光速の99.9%にも達する物質流から放出されるシグナルが光速の有限性のために圧縮され観測者には非常に短時間の現象として観測されるのです。この章では話題性より、超相対論の世界でどのような物理が考えられ、どのように観測と結びつくのかをわかりやすく解説していただきます。

最後になりましたが、相対論的粒子挙動は磁場核融合の脱走電子でも重要な話題となっているようです[29]。ディスラプションで加速された脱走電子が相対論的なエネルギーにまで達し、(1)式に従い質量が増大しラーモア半径が大きくなる。これが、脱走電子の輸送に影響してくるのだそうです。

(大阪大学レーザー核融合研究センター、
大阪大学理学研究科物理学専攻・宇宙地球学専攻
高部英明)

参考文献

- [1] 吉田善章編「講座：プラズマ理論の技法」プラズマ・核融合学会誌 2002年8月号より連載予定。
- [2] ITER シンポジウム「ITERにおける燃焼プラズマの科学」, JA ビル 8階国際会議室, 東京, 2002年1月24日。
- [3] 政池 明: 岩波-科学- 70, 1054 (2000) p. 1058.
- [4] アンドレイ・サハロフ: 「サハロフ回想録(上)」(中央公論新社, 中公文庫, 2002) p. 234.
- [5] M. Lontano *et al.* (edited), *Superstrong Fields in Plasmas* (AIP Conf. Proc. 426) (AIP, NY, 1998).
- [6] ランダウ・リフシッツ: 場の古典論(原書第6版)(東京図書, 1978)第10章以降; S. Blinnikov, Lecture note "Astrophysics of Exploding Objects" (ILE, Osaka University, 2000) Chapter 10.
- [7] E. Carltidge, *Physics World* Vol. 15, No. 2 (2002), p. 7.
- [8] 高原文郎: 「天体高エネルギー現象」(岩波書店, 2002) 第3章。
- [9] T. Piran, *Phys. Rep.* 314, 575 (1999).
- [10] 平林 久: 日本物理学会誌 56, 308-315 (2001).
- [11] H. Takabe, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 143, 202-265 (2001), § 6.
- [12] H. Takabe (edited) 小特集“Laser Nuclear Physics”, プラズマ・核融合学会誌 77, 1094-1136 (2001).
- [13] 小沢 顕 他: 日本物理学会誌 57, 90-100 (2002).
- [14] 永宮正治: 日本物理学会誌 56, 727-731 (2001).
- [15] 林忠四郎, 早川幸男 編: 宇宙物理学 (岩波書店, 1978) 第20章; D.D. Clayton, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis* (Univ. Chicago Press, 1983), Chapter 7.
- [16] 塩屋俊直: 大阪大学理学研究科修士論文「超高強度レーザー場における相対論的電子の3次元発展ディラック方程式を用いた研究」, 2002年2月。
- [17] S.C. Wilks *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 69, 1383 (1992).
- [18] A. Pukov, Lecture note, Three-Dimensional Particle-in-Cell Simulations of Relativistic Laser-Plasma Interactions (ILE, Osaka University, 1999); A. Pukov and J. Meyer-ter-Vehn, *Phys. Plasmas* 5, 1880 (1998).

- [19] Y. Sentoku *et al.*, Phys. Plasmas **7**, 689 (2000).
- [20] H. Ruhl *et al.*, Phy. Lett. A **205**, 388 (1995).
- [21] H. Ruhl, *private communications* (2001); D. Umstadter, Phys. Plasmas **8**, 1774-1785 (2001) Fig. 5.
- [22] M. Roth, *private communications* (2001).
- [23] この方式によるイオン源については, M. Roth, T. Cowan らが原理特許を申請している.
- [24] H. Ruhl, presented at 2001 Hirschegg Meeting on "Physics of High Energy density in Matter", held at Waldemar-Petersen-Haus of Darmstadt University of Technology at Hirschegg, Kleinwalsertal, Oberseestr. 38, Austria, Jan. 28 to Feb. 3, 2001.
- [25] K. Nakashima and H. Takabe, Phys. Plasmas **9**, (2002) to be published in May issue.
- [26] C.E. Max *et al.*, Phys. Rev. Lett. **33**, 209 (1974).
- [27] J. Meyer-ter-Vehn, A. Pukov, and Zh.-M. Sheng, Lecture note "Relativistic Laser Plasma Interaction", *unpublished* (2001).
- [28] 富田 洋: 天文月報 **92**, 608 (1999).
- [29] 徳田伸二他: プラズマ・核融合学会誌 **77**, 1205-1211 (2001).