

大型レーザーを用いた磁化プラズマ中の無衝突衝撃波の生成実験

正治 圭崇 (青山学院大学大学院 理工学研究科)

Abstract

銀河系内宇宙線 ($\sim 10^{15.5}$ eV) の加速源の最有力候補として、超新星残骸における無衝突衝撃波が挙げられる。その加速メカニズムとして、粒子が電磁波で散乱されて衝撃破面を往復することでエネルギーを得る、フェルミ加速などの理論的モデルが考えられている。しかし、フェルミ加速には注入問題や粒子を散乱させるための電磁波の励起方法等の問題が指摘されている。注入問題の解決方法としては、波乗り加速といった加速機構がシミュレーションによって示唆されている。[Hoshino & Shimada (2002)]

宇宙線の加速メカニズムの研究として、理論的研究および観測的研究が主な方法として行われてきたが、我々は第三の方法として、大型レーザーを用いた地上実験によって宇宙線加速のメカニズムを解明する。我々の第一目標は磁場中の無衝突衝撃波を生成することである。

実験の準備として、イオンのジャイロ半径・Alfven マッハ数・クーロン散乱の平均自由行程より無衝突衝撃波生成の条件を考えた。その条件を満たすためのターゲットを決めるために輻射流体シミュレーションである ILESTA1D を用いて計算を行ったところ、Al の 5~10 μm の厚さが最適であるとわかった。そして考えたパラメータ条件を用いて、実験を行った。昨年度の実験では、無衝突衝撃波の生成には至らなかったが、結果より求めた ejecta の速度が生成条件を満たすことを確認した。また、生成条件を満たすためのターゲットおよびレーザー条件を輻射流体シミュレーション ILESTA1D を用いて調べた。

1 Introduction

地球には高エネルギーの粒子が絶えず飛来しており、これを宇宙線と呼ぶ。地球で観測した宇宙線のエネルギースペクトルは図 1 となっており、べき乗の分布となっている。そのため宇宙線の加速起源と加速方法が問題となっている。宇宙線の加速起源の候補としては、中性子星・ γ 線バースト・活動銀河核などが考えられている。特に、銀河系内宇宙線 ($< 10^{15.5}$ eV) の加速起源の最有力候補として、超新星残骸 (SNR) により駆動される無衝突衝撃波が挙げられる。

衝撃波における粒子の加速メカニズムとしては、フェルミ加速というモデルが考えられている。フェルミ加速は、粒子が衝撃波面を大きく超えて、上流-下流を何度も往復することでエネルギーを獲得するモデルであるが、はじめに仮定する非熱的粒子の生成方法 (注入問題) や上流と下流で粒子を反射させるための電磁場の励起方法等の問題を含んでおり、未だ完全に解明されていない。

これまで、宇宙線の加速メカニズムについての研究

は、理論的研究や観測的研究が主な手法として行われてきたが、我々は大型レーザーを用いた実験により地上で宇宙に近い物理現象を起こすことで、宇宙線の加速機構を解明しようと考えた。第一の目標は、無衝突衝撃波を生成することである。

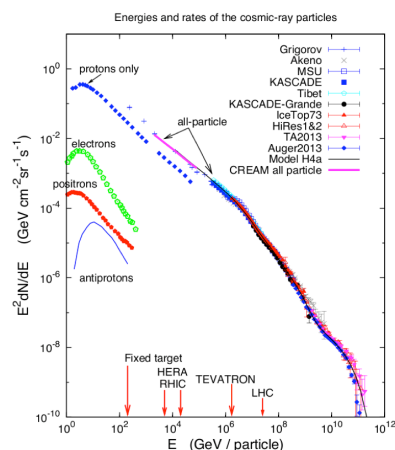


図 1: 宇宙線のエネルギー分布 (BLASI 2013)

2 Methods/Instruments and Observations

実験は、大阪大学レーザーエネルギー学研究所にあるレーザー XII 号を用いて行った。

実験方法について説明する。ガスを注入したチャンバー内にターゲットをいれ、ターゲットの下に強磁場生成装置 (TOP-B) のコイルを設置する。ターゲットにレーザーを照射すると、ターゲットは電離されるが、一部の電子は再び原子核に捕獲されることで X 線を放射する。この X 線によって雰囲気ガスを電離して、磁化プラズマを生成する。磁化プラズマ中を、吹き飛ばされたターゲットプラズマ (ejecta) が超音速で運動することによって、無衝突衝撃波を生成する。観測には、ノマルスキー式干渉計を利用した干渉計測、プラズマの自発光計測、シャドウ計測等を用いた。

3 Setup

無衝突衝撃波を生成・観測するにあたり、3つの条件を考えた。

一つは衝撃波を生成するための条件である。磁場中の衝撃波を生成するためには Alfvén Mach 数 M_A が 1 を超えていけばよいので、

$$M_A = \frac{v_{ej}}{v_A} > 1 \quad (1)$$

ここで、 v_{ej} は ejecta の速度、 v_A は Alfvén Mach 数である。

二つ目の条件は、無衝突性である。つまりクーロン散乱すら効かないためには、イオン-イオン間におけるクーロン散乱の平均自由行程 λ_{ii} が、衝撃波の典型的サイズであるイオンのジャイロ半径 r_g よりも十分大きければよいので、

$$\lambda_{ii} \gg r_g \quad (2)$$

を満たせば良い。

三つ目の条件は観測条件である。干渉計測の視野範囲は直径約 1.2 cm であるため、これより衝撃波遷移層の厚み $\sim r_g$ が十分小さければよい。これを式で表

すと、

$$r_g < 1.2 \text{ cm} \quad (3)$$

となる。

式 (1), 式 (2), 式 (3) の条件を速度について変形し、衝撃波速度と雰囲気ガスの質量数との関係をグラフ化したものが図 2 である。

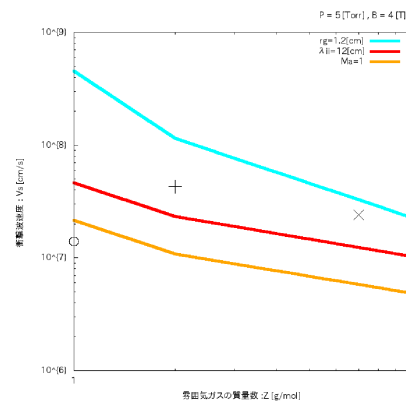


図 2: 無衝突衝撃波の生成条件

これらの条件を満たすターゲットを決定するために、一次元輻射流体シミュレーションである ILESTA1D を用いて計算を行った。レーザー条件は、レーザー XII 号のものを用いて、ターゲットの種類と厚さを変えて計算を行った。ターゲットはアルミニウム、銅、プラスチックの 3 種類を用いた。図 3 と図 4 はアルミニウム 8 μm の場合の計算結果をラム圧力-位置、速度-位置についてプロットしたものである。ターゲットの初期位置は 500 μm 、レーザー方向はマイナス方向、レーザー波形はガウシアンを仮定しており、レーザーピークは 3 ns となっている。また、この計算には雰囲気ガスをおいていない。図 3 と図 4 について、ラム圧力のピークにおける ejecta の速度は $v \sim 2.1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ となった。ターゲットの密度が低い、ターゲットが薄いといった、ターゲットの総質量が小さいターゲット条件ほど、ラム圧力ピークにおける速度は大きくなった。このような ILESTA の計算結果より、雰囲気ガスは水素及びヘリウム、ターゲットは Al の厚さ 5, 10, 15 μm に決定した。

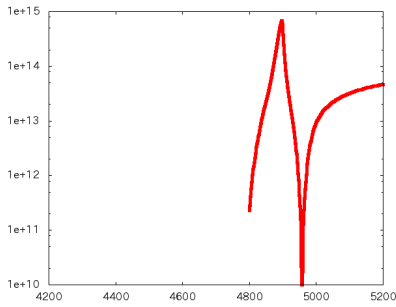


図 3: ILESTA-1D の計算結果 ($t=3.25$ ns)
 Target : Al, 厚さ : $8 \mu\text{m}$,
 初期位置 ($x=4992\sim 5000 \mu\text{m}$)
 レーザー方向 : - x 方向

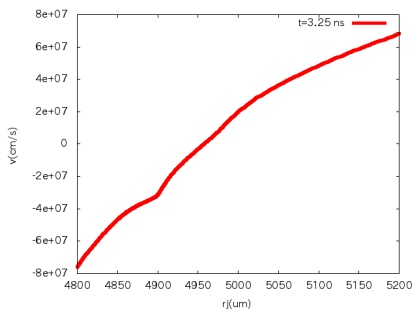


図 4: ILESTA-1D の計算結果 ($t=3.25$ ns)
 Target : Al, 厚さ : $8 \mu\text{m}$,
 初期位置 ($x=4992\sim 5000 \mu\text{m}$)
 レーザー方向 : - x 方向

4 result

昨年度の実験では 9 通り、全 22 通りの実験を行った。レーザーの故障によって磁場ありの雰囲気ガス水素の実験はできなかった。また、ここでは結果を比較的綺麗に観測できた雰囲気ガス He, Target: Al, 厚さ $5\mu\text{m}$ での実験結果について載せる (図 5, 6)。図 5 は干渉計測の結果でレーザー照射から 25ns 後の画像である。図 6 はプラズマの自発光をストリークで計測したものを 2 ns ごとを縦にずらしたものである。図 6 この shot では 8 ns までのプラズマの速度は 4.3×10^7 cm/s である。その後、減速しているように見える。図 5 を見ると画像上部の干渉縞が歪んでいることが分かる。つまりこの部分ではプラズマの密度が濃いことが予想されるが、図 6 の

自発光計測のデータからはプラズマの密度の急激な立ち上がりなどの目立ったピークは見られなかった。

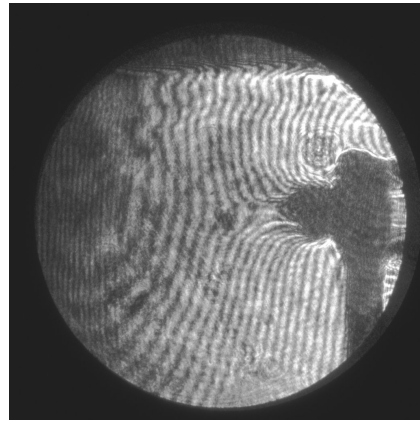


図 5: 干渉計測の結果 ($t = 25$ ns)
 Al $5 \mu\text{m}$ /He/磁場 4 T

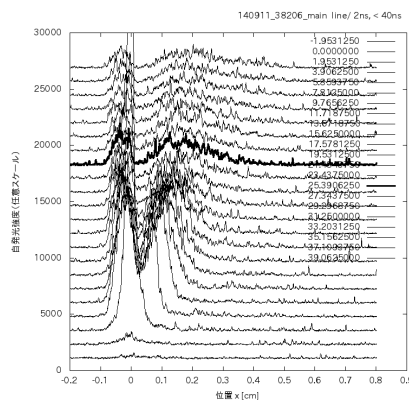


図 6: 自発光計測の結果 ($t = 25$ ns)
 Al $5 \mu\text{m}$ /He/磁場 4 T

5 Discussion

ジャイロ周期について考える。ジャイロ半径は

$$r_g = \frac{m v}{q B} \quad (4)$$

と書ける。磁場:4 T 雰囲気ガス:水素の場合のジャイロ周期は

$$\tau = 2\pi \frac{r_g}{v} = 2\pi \frac{mc}{qB} \quad (5)$$

$$= 16 \text{ ns} \times \frac{4(T)}{B} \quad (6)$$

である。雰囲気ガス:ヘリウムの場合、ジャイロ周期は2倍の32 nsである。干渉計測のdelay timeは20~30 ns程度であったので、干渉計測のデータ画像では粒子はまだジャイロ運動を1回程度しかしていないことになる。

雰囲気ガス He, Target: Al, 厚さ 5um での実験結果より求めた ejecta の速度は 4.3×10^7 cm/s であり、これは無衝突衝撃波生成の条件をみたしているが、8 ns 程度で減速しているため、ジャイロ運動を1回転もしていない。衝撃波を形成するのにジャイロ周期数周期分かかると考えると、我々の実験ではまだ衝撃波ができていない可能性が高い。

ジャイロ周期の考察から、今年度の実験では雰囲気ガスに水素を用いるべきである。また、昨年度の実験結果より ejecta が減速しないためにターゲットを厚くし、速度を維持するためにレーザーエネルギーを上げる予定である。Setup は ILESTA1D1 を用いて決定する。

6 Conclusion

昨年度の実験では、初めての実験であったことやトラブルがあったため無衝突衝撃波の生成を観測するには至らなかったが、次回の実験へ繋がる結果を得られた。

現状、我々の実験モデルは無衝突衝撃波生成の条件を満たし得るが、ejecta が衝撃波を生成する前に減速してしまっているという問題がある。ejecta の質量(噴き出したターゲットの質量)が掃き集めた雰囲気ガスの質量と等価になったとき、ejecta が減速し始めると考えると、ターゲットを厚くしレーザーエネルギーを大きくすれば、ejecta が減速しにくくなると予想される。このことを考慮し、ILESTA1D1 によって計算を行うことで、ejecta が衝撃波を生成するまでに減速しないためのセットアップを考えた。

Reference

- Hoshino & Shimada 2002, APJ, 572:880-887
PASQUALE BLASI, 2013, arXiv:1312.1590