

M. Masuzaki

Department of Physics, Kanazawa University, Kanazawa, 920.

Abstract

A brief review is given on experiments on collective ion acceleration by an intense relativistic electron beam.

1. はじめに

1968年に Graybill と Uglum¹⁾ とが大強度相対論的電子ビーム (以下 IREB と略記する) を伝導中性気体中に入射し、電離されて生じたイオンが IREB と同じ方向に、ビーム電子のエネルギー以上のエネルギーに加速されることと始めて見出して以来、多くの研究が IREB によるイオンの集団加速についてなされてきている²⁾。このレビューでは、IREB 及びこれによるイオンの集団加速の実験について概観する。

2. IREB

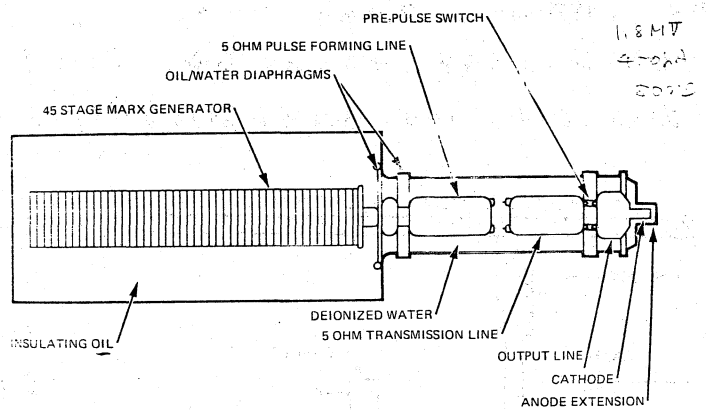
IREB の特徴的パラメータを表 1 に示す。

表 1 図には IREB 発生装置の概形的構成例を示す。油中伝インダクタンスのマルクス高電圧発生装置で発生した高電圧パルス形成回路を充電する。誘電体として主に水と鉱物油とが使われている。主ギヤップスイッチが投入されると高電圧パルスがダイオードの陰極と陽極との間に印加され、陰極から“爆発放出”された電子が加速されて IREB となる。陽極は通常金属筒である。

表 1 表 IREB の特徴的パラメータ

電子エネルギー	0.1 ~ 10 MeV
ビーム電流	0.01 ~ 10 MA
パルス中	10 ~ 100 ns
ビームエネルギー	10J ~ 1MJ

表 1 図 IREB 発生装置の構成



3. IREB の伝播

真空中に入射されると、空間電荷による電斥力が自己電流による磁斥力より大きいために、径方向に発散する。又、軸方向に強い磁場を印加して発散を抑之ても、空間電荷の成長に伴ってポテンシャルが上がり、ある臨界値以上のビーム電流の IREB は伝播しない。この電流は空間電荷制限電流と呼ばれ、近似的に次の式で与えられる。

$$I_L \cong 17 (\gamma^{2/3} - 1)^{3/2} \left\{ 1 + 2 \ln (R/a) \right\} \quad (kA)$$

ここで、 a は e^- の半径、 R は K エンローの半径である。

e^- の電流 I_b が I_e より大きい場合には、仮想陰極が生じる。これは定常的ではなく、ポテンシャルの深さ、位置共に変動する。最大の深さは、尤も加速電圧の3倍である。

空荷電荷がイオンで中和されていいる場合には、自己磁場により電流値が制限される。制限電流はアルファベータ電流と呼ばれ次の式で与えられる。

$$I_A \approx 17 \beta \gamma \quad (kA)$$

プラズマ中に IREB が入射される場合には、誘導電場により逆電流が流れ、電流中和が生じ $I_b > I_A$ となり得る。

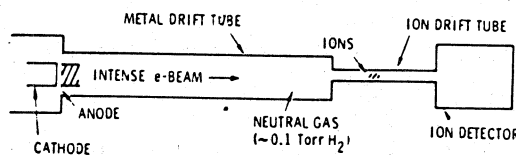
4. IREB によるイオンの集団加速

IREB によるイオンの集団加速は次のような場合に観測されている。以下で e^- の加速エネルギー ϵ_e 、イオンの加速エネルギー ϵ_i 、核子当りの加速エネルギー ϵ_n とする。

1) 中性ガス中に入射した場合 (Fig. 2)

0.1 Torr 程度の中性ガス中に $I_b > I_e$ の IREB を入射するとイオン加速が起こる。実験例としては、 $\epsilon_e = 2 \text{ MeV}$ 、陽子で $\epsilon_{i \text{ max}} = 14 \text{ MeV}$ 、 $\epsilon_e = 8 \text{ MeV}$ 、リウウムで $\epsilon_{i \text{ max}} = 40 \text{ MeV}$ 等がある。この場合の実験例は、主に軽イオンであるが、数が多く、又理論的にもほぼ説明されている。

Fig. 2 中性ガス中でのイオンの集団加速実験装置の概念図



2) 何らかの手段で生成された陽極プラズマを通じて IREB が真空中に入射される場合。Duca diode と呼ばれる方式が最初の実験例である。Fig. 3 に示すように、陽極として、中心に穴をあけた誘電体を用い、IREB による

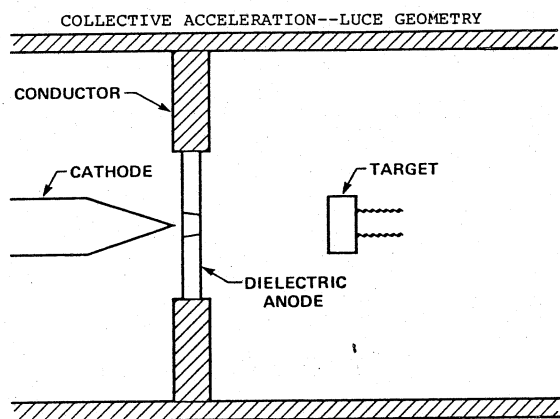


Fig. 3 ルース ダイオード

によるチャージアップ、沿面放電に依り穴の部分にプラズマを作り、その中を通じて IREB を真空中に入射し、プラズマ中のイオンを加速する。 $\epsilon_e = 3 \text{ MeV}$ 、ポリエチレン陽極の場合、陽子が 45 MeV 迄、又フロン陽極の場合、重水素イオンが 135 MeV 迄加速されている。この変形として、Fig. 4 に示すように、中心に穴をあけた金属陽極の下流側にガスバンプでガス塊を入射し、IREB で電離して中性プラズマ中のイオンを加速すると

とメリーランド大のグループが報告した。 $\epsilon_e \sim 1.5 \text{ MeV}$ で $\epsilon_n \sim 5 \text{ MeV}$ という結果を

得られる。希ガスを用いた実験が行われ、キセノンの場合、 9.60 MeV に加速されたとしてゐる。

3) プラズマダイオード中。ソ連のあとグループでは、ダイオード中にプラズマを注入し高圧パルス電圧をかけてはよりその中のイオンが加速されることが見出しとしてゐる。 $E_e = 1 \text{ MeV}$, 陽子 $G_0 \sim 6 \text{ MeV}$ という実験例がある。

以上の場合、1) おいても加速領域が短かく、又 2) 3) の場合加速機構もまだはっきりせず、加速現象の制御ができてゐないことから、制御できる方式として次のようなものが実験されてゐる。

1) IFA (ionization front accelerator) 深いポテンシャル井戸にイオンを捕獲し、下流側のガスレーザービームで制御しながら電離イオンをより、井戸の運動を制御してトラップされたイオンがこぼれ落ちないようにして加速しようとする方式で、現在、 $E_e = 1.2 \text{ MeV}$ の陽子 100 MeV , 5 kA を目標にして実験を行つてゐる。(サンディア国立研究所)

2) ARA (autoresonant acc.) 真空中で軸方向の磁場中に伝播する IREB 中に大振幅の低位相速度のサイクロトロン波を励起し、これにイオンを共振捕獲し、磁場の強さを逐次変えて位相速度を大きくすることによりイオンを加速する方式で、目下波の励起の実験を行つてゐる。(Austin Research Associates)

3) CGA (converging guide acc.) これは真空中の伝播電荷波を用いる方式である。現在波に束縛する実験及びインシュレータの開発を行つてゐる。(Cornell 大)

5. 金沢大での実験

金沢大では、上記 4) 2) の形式としてプラズマ銃でプラズマを生成し、これを陽極として IREB を発生させ、この中で通して真空中に入射することをより、このプラズマ中のイオンを加速してゐる。現在はバリウムプラズマを用いてゐる。

$E_e = 1.3 \text{ MeV}$ のバリウムイオンを約 2 GeV に加速してゐる。

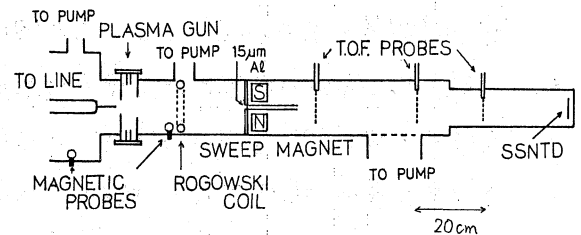


図5 金沢大の実験装置の概念図

Ref. 1) S. Graybill and J. Uglum, JAP 41 (1970) 236

2) C.L. Olson and U. Schumacher: Springer Tracts in Modern Physics: Collective Ion Acceleration, ed. G. Hohler (Springer, NY, 1979) Vol. 84

尚、詳しいことは、参考文献も含めて読者の際には述べる。