

强流相对论电子束的应用

杜文甫

(中国科学院高能物理研究所)

强流相对论电子束的产生和传输,在六十年代后期获得了很大的进展。已能获得能量超过兆电子伏(MeV),强度兆安(MA),脉冲宽度100毫微秒(ns)范围的脉冲大功率($10^{11}\sim 10^{12}$ 瓦)电子束。这类脉冲电子加速器,是由通常的高压冲击电源,形成高压脉冲的同轴传输线,和具有场致等离子体阴极的二极管式电子枪三部分组成。通过阳极薄膜输出的高功率电子束,被外加轴向压缩磁场,或充气锥形金属筒所聚焦。这种强流相对论电子束,有很多实际用处,而且用途越来越广,有可能成为七十年代的新技术。现将主要应用叙述如下:

一、对带电粒子的集团加速

我们知道,在常规带电粒子加速器中,是应用外加电磁场来加速粒子的。所用电场的作用,是为了使被加速的粒子在加速过程中获得能量;磁场的作用,是为了控制被加速的粒子按照设计的轨道运动。在现有的技术条件下,能做到的能量增益(单位路径上粒子获得的能量值)不大(直线加速器不超过10兆电子伏/米,圆形加速器约40兆电子伏/米)、控制磁场也不高(限制在2万高斯以下)。要做能量很高的加速器,不仅加速器的个子越来越大,技术工艺要求越来越高,而且束流强度也越来越低,难于满足高能物理工作对超高能(1,000千兆电子伏以上)加速器的要求。应用超导新技术(超导加速腔、磁铁),有可能提高能量增益(估计2倍)和缩小加速器的体积。但是,目前在超导材料,工艺技术等方面困难还相当大,在现阶段利用超导是否经济和满足要求还有待进一步地探讨。CERN(西欧中心)准备1976年建成的4000亿电子伏质子同步加速器,原计划用超导磁铁改成10,000亿电子伏;由于技术和经济上的考虑,已在1973年6月决定不用超导磁铁。)再者,对高脉冲功率源的需要也相当大。如 10^{11} 离子被千兆电子伏/米的电场加速,离子每秒钟吸收的功率将达到5,000兆瓦,而总的加速器功率要求将提高1—2数量级。所以,作超高能加速器,不仅要寻求提高能量增益,而且还要解决高脉冲功率源的问题。这必需从新的加速原理上找出路。

利用强流相对论电子束实现对带电粒子的集团加速的新加速方法,是解决问题的一种很有可能的途径。基本设想是:利用大群带电粒子集团(比如 10^{13} 电子)的自身场(电、磁场)而不是外加场来加速带电粒子。类似想法^[1]很早就提出来了,由于没有所需要的强流相对论电子束,工作没法开展。目前,随着这方面工作的迅速发展,用强流相对论电子束开展集团加速原理的研究,在苏联、美国、西德、意大利等国家相继开展起来。根据加速方法,大体可以将强流相对论电子束的集团加速分成三大类:

1. 电子束俘获离子,电子和离子作为整体被外加场加速。1968年出现的电子环加速器就是它的代表。
2. 电子束在慢波结构(或等离子体介质)中激励加速场。根据激励方式,又可以分成横向激励、纵向激励和横向纵向耦合激励(旋转电磁场)三种。
3. 相干加速。“相干”是指获得的能量和被加速的粒子数目成正比。

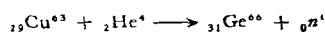
现将已有实验结果和比较有前途的方案叙述如下:

1. 电子环加速器

让我们看一种理想情况。假设一个半径1厘米的球形电子团,均匀分布 10^{13} 电子,如果其中俘获有质子的话,质子处于场强高达600兆电子伏/米的位阱之中。用外加场将俘获了质子的电子团加速,由于质子被紧紧地约束在电子团中,所以一起也被加速。集团中粒子速度一样,获得之能量正比于粒子的质量。为此,理想情况下,质子就有可能比电子获得大1830倍的加速场。可惜实际上办不到。因为电子间的库仑静电斥力,使得 10^{13} 个电子不能构成一个球形团。作相对论运动的电子团,虽然可以由于其中俘获少量的质子而抵消库仑斥力作用,运动电荷的自身磁力会使电子团的横向运动稳定,但是球形电子团在纵向加速运动中是不稳定的,加速场和位阱作用使电子团最后还会散开。研究表明,旋转的环形电子束是稳定的。当10 MeV的电子束垂直入射到一定空间分布的磁场中时,可以形成电子环。电流自身磁力可以99.9%地平衡静电斥力,只要电子环中俘获少量的质子(0.1%电

子数)就可以消除残留的静电斥力,磁收缩后,束流可以形成小半径更小的环。旋转运动的电子环在垂直的轴方向被加速。根据相对论效应,旋转后电子质量比静止的加重,外加场实际上是作用在“重”电子上面。结果理想的1830倍减少了许多,只可能获得80倍的增益。这已经是相当可观的数字。如果解决了强流的加速问题,那么在目前加速场10兆电子伏/米的水平下,质子可望获得800兆电子伏/米的加速场。提高了加速效率,缩短了加速器的长度。应该指出,外加场不能超过电子对离子的约束场,否则离子就有可能在加速过程中从环里跑掉。因此,利用电子环加速器获得百兆电子伏/米—千兆电子伏/米的加速场把离子加速到超高能的关键,在于使电子环中电子数目加多,小圈半径缩小,这相应带来许多集团不稳定性(负质量不稳定性限制电子数不超过 10^{13})。

目前获得的实验结果是:苏联杜布纳联合核子研究所利用1.5兆电子伏、100安培电子束,在磁场中成环后用感应磁场加速,被加速的 α 粒子轰击铜靶,根据核反应



产物的 γ 衰变(半衰期9.6小时),测得 α 粒子流的强度 $(3-5) \times 10^9$ 。利用铝片吸收办法判定被加速的 α 粒子能量 (29 ± 6) MeV。

2. 电子束碰撞中性气体分子获得离子加速实验

在1969年格拉贝尔(Graybill, S. E.)等实验发现^[1],用强流相对论电子束(1.6兆电子伏,4万安培电流,脉冲持续时间60毫微秒)注入低压气体中电离和加速本底气体分子离子,用磁谱仪分析被加速离子的能量,获得单位电荷5兆电子伏的加速。用核乳胶测得的离子流很强,达到 $10^{12}-10^{14}$ 粒子/脉冲。离子加速,发生在电子束部分电荷中性化以后,离开阳极很短距离(~ 10 cm)里。离子能谱窄(小于20%),说明加速粒子已发生强烈空间群聚。可以同时加速几种离子,从质子(5 MeV)直到氮(20 MeV),结果见表1。

表1 电子束加速离子实验

气体	能量 MeV	离子电荷数	离子流 A	脉冲宽度 ns
H	5-7	1	200	3
D	4-7	1	100	4
He	8-9	2	20	15
N	17-24	4-6	15	15
A	8-14	6-12	1-2	>20

根据实验结果,发展了两种理论模型。一种是行进的空间电荷波模型(PCM)^[2]。因为强流电子束在真空中传输距离很短,行进到 c/ω_p ,距离就会散掉($\omega_p = 4\pi n_0 e^2 / r m_0$ 为等离子频率, n_0 为束流电子密度, m_0 为

电子静止质量, $\gamma = [1 - (\frac{v}{c})^2]^{-1/2}$,为相对论效应

因子),能量越低(γ 小),电流越大(n_0 大),传输的距离就越短,束流散掉后,形成一行进的空间电荷波,位阱深度等于电子动能,速度为 $c/\omega_p \tau_i$ (τ_i 为电子束电荷中和时间)。离子被空间电荷波所加速。另一种是局部收缩模型(LPM)^[3]。认为电子束进入气体时,束流前沿部分引起气体电离,稍后的部分俘获所产生的离子,使得束流部分产生电荷中和而出现磁收缩,束流电子密度集中,产生一电荷位阱加速被俘获的离子。理论分别都能解释一些实验结果,但很不完善。特别是发生在很短距离里的加速过程,急需进行仔细地观察,弄清机制。能否提高已经获得的加速场(1兆电子伏/厘米),增加加速距离,以及如何有效地控制加速过程是这种加速原理能否成功的关键问题。这需要进行大量艰苦的实验和理论探讨。不过目前谈论集团加速与十几年前大不一样了,不仅具有实验的手段,的确已经看到了相当强的集团加速场。

3. 用电子束在介质中激励加速场

这种想法虽然仍然居于理论探索的初始阶段,但强流电子束通过盘荷波导激励出高功率微波振荡的实验已有报道,用来加速带电粒子不是不可能的事。用强流相对论电子束在等离子体介质中激励纵向的单一的非线性等离子体波加速离子的设想值得重视。当电子束与等离子体相互作用时,束流会产生振荡,等离子体中也会相应激励等离子体密度波。通常这种波的频谱相当宽,不能用来加速粒子。但是,如果附加外加场,使外加场与具有最大增长速率的某单一频率波迭加起来,产生同步振荡,只要束流的能谱相当窄,就有可能在等离子体介质中激励起幅度很强的单一频率的非线性密度波。理论估计^[4]:对于 $\gamma \approx 100$,电流密度 5×10^9 A/cm²的电子束。纵向激励的等离子体波稳定的话,可望获得10千兆电子伏/米的巨大加速场。方案的成败,在于如何控制所激励的这种非线性波,以及波和加速过程的稳定性问题。作为一种很有前途的想法,我们可以认为:对在等离子体中产生非线性波的问题给予更大注意的时刻已经到来。

最近提出的自谐振加速方案^[5](ARA)值得注意。用强流相对论电子束,浸没在直流磁场时,电子束中产生的低频回旋进电波来加速被电子束俘获的离子。用纵向空间衰减磁场使行进的电波相速与被加速的离子同步(波相速和磁场强度成反比),把行波加速和集团加速有机地融合起来,是方案的特点。电子束起着传播行波的介质,和把电子束纵向运动能量传递给离子的功率源的双重作用。计算说明,用能量12.5兆电子伏,强度10万安培的直径2厘米的脉冲电子束(已能作出),入射到进口半径1厘米(磁场200千高斯),

出口半径 8.1 厘米(磁场 2.5 千高斯),长度不到 5 米的加速装置中,在出口处将获得能量 10 亿电子伏,流强 500 安培的强脉冲质子流(脉冲宽度与电子束一样)。作为强流中能方案,有它吸引人的地方。

4. 相干加速

在 1956 年维克斯勒(Векслер, В. И.)提出相干加速原理^[1],目前未有实验结果。除了其中利用强电磁波属于激光加速原理外,其它两种方案都可以想法用强流相对论电子束来进行实验研究。

(1) 契仑柯夫反转辐射加速

原理是根据当一高速运动的介质驰过一带电粒子团时,应当把能量传递给这个粒子团。强流相对论电子束作为运动介质用辐射方法加速俘获有离子的电子环。当然与电子环加速器一样,最大加速电场受环中电子数决定,加速场强也不会很高。这里的电子束起功率源作用。

(2) 冲击加速

我们知道,质量 M_1 (重)的快速相对论运动粒子,与质量 m_2 (轻)静止的粒子弹性碰撞时,在满足条件 $M_1 \gg m_2 \gamma$ 的情况下,碰后轻的 m_2 粒子获得很大的能量: $W_2 \approx m_2 c^2 \gamma^2$ 。假定静止的 m_2 粒子由质子组成,作快速相对论运动(设 $\gamma \sim 100$)的 M_1 粒子由电子组成。这样,如果弹性碰撞实现,每个质子将得到巨额能量:

$$W_p \sim m_2 c^2 \gamma^2 \approx 10^{13} \text{eV} = 10,000 \text{ 千兆电子伏。}$$

按照目前在强流相对论电子束的理论和实验进展情况看来,一定电子数的旋转电子环是稳定的。为此,可以将冲击方案改变成电子数少(轻)与电子数多(重)的电子环的对头碰撞。为了加速质子,可类似电子环加速器,使轻的电子环俘获要加速的质子。计算表明^[5]:当轻(L)、重(H)环的电子数分别为 $N_L^e = 5 \times 10^{14}$ 、 $N_H^e = 3 \times 10^{16}$,旋转能量分别为 $r_L^e = 15$ 、 $r_H^e = 50$,电子环参数为大半径 $R = 5 \text{cm}$ 、小半径 $a = 10^{-3}R$,以及相对碰撞速度 $r_{11} = 10$ 的情况下,在碰撞有效距离 50 米时,质子获得 200 千兆电子伏的能量。理论还是相当近似的,特别是相碰中瞬时情况很复杂,比如重环中的电子会对轻环中的电子产生斥力,使轻环受到压缩,环会变形,“弹性”不能保证。但是,已经具有实验条件,可以开始初始阶段的工作,在实践的基础上推动理论工作的进展。

二、点燃小体积热核聚变反应

1968 年提出了用强流相对论电子束点燃小体积热核反应,以实现在实验室爆炸“微观氢弹”的理论^[7]。基本设想是:在极短(ns)时间里,通过电子束和热核

材料之间的能量交换,把一定范围的热核材料迅速升温,使得释放能大于逸散能量,实现热核聚变。

对于直径 1 厘米的氘(D)氚(T)靶,实现聚变反应的条件是:

1. 加热温度 $T \geq 5 \times 10^7 \text{K}$;
2. 加热范围 > 聚变反应射程, $r > 0.5 \text{cm}$;
3. 持续时间满足判据 $N\tau \geq 10^{14}$ 秒/厘米³;

对于粒子浓度 $N = 4 \times 10^{22}$ /厘米³,所需持续时间 $\tau \geq 2.5 \times 10^{-9}$ 秒。

4. 输入能量时间必需短于逸散能量时间,要求 10^{-8} 秒。

5. 输入能量总额

$$E_i = 3NkT \times \frac{4}{3} \pi r^3 \approx 10^{14} \text{ 尔格} = 10^7 \text{ 焦耳。}$$

6. 靶吸收能量流密度

$$\varepsilon > E_i / \frac{4}{3} \pi r^3 \tau \approx (1.7-3.3) \times$$

$$10^{23} \text{ 尔格/厘米}^2 \cdot \text{秒。}$$

目前若干等离子体实验室正开展这项工作。美国康乃尔(Conell)大学建立了三台强流电子加速器开展束流和靶之间能量交换方面的研究。据 1971 年报道^[8]:“产生和控制其能量足够使等离子体加热到热核温度的电子束,已被康乃尔大学等离子体实验室获得。”该实验室宣布:“ 10^3A , 500 KeV 的平均脉冲功率 400 亿瓦的电子束,可以使一定量的等离子体加热到聚变温度。”

工程上已作到 10^6 焦耳的电子束(比如 «Aurora(极光)» 机, 15—20 MeV, 1.6 MA, 180 ns), 困难是束流斑点太大,要将 10^6 焦耳束流聚焦在 1 厘米直径的 D-T 靶上,目前还没实现。但是,有关方面的实验进展也是相当快的。用介质(玻璃)杆形成和引导电子束,已经成功地把 2 MeV, 30 kA, 35 ns 的电子束聚焦成 2 毫米的斑点,而能量传输效率达到 50%,用它轰击 CD_2 靶,获得中子产额 5×10^7 中子/脉冲^[9]。弗利曼(Freeman, B.)等人同类实验^[10],中子产额超过 10^{10} 中子/脉冲。最近报道^[11],用 2 mm 直径玻璃杆阴极将 0.69 MeV 相对论电子束,聚焦成束流斑点小于 1 毫米,电流密度达到 2.71 MA/cm²,靶上功率密度 1.87×10^{12} 瓦/厘米²,功率上升速率达到 9×10^{20} 瓦/厘米²·秒。可见,强流相对论电子束在点燃热核聚变方面前途很大。与激光比较(估计能量仍需 10^7 焦耳),电子束有可能进展更快些。激光水平仍停留在 10^2-10^3 焦耳,用 10^3 焦耳巨型脉冲激光打靶,获得 10^7 中子/脉冲。

这项工作,理论上需要探讨电子束和靶能量交换机制,实验上进一步研究更高能量的电子束的传输和聚焦工作,估计,在实验室里脉冲型可望比稳态更快实现热核聚变。

三、大功率微波功率源^[12]

简略地看,类似调速管工作原理,用电子束通过慢波结构激励高频振荡。不过,由于是强相对论电子流附带若干集团效应。

美国康乃尔大学用 200—500keV, 30—40kA, 60 ns 的电子束通过圆柱对称慢波结构,获得了脉冲宽度 30ns, 频率 7.8—9.7 千兆周, 功率 10 兆瓦的微波发源。

类似工作,还有些地方也在开展,除了获得超高频射冲功率源外,工作进展将促进集团加速技术研究。

四、激励短波长脉冲激光

简放电子束通过窗口进入工作气体,由电子束承担电离气体分子的作用的电子束分子气体激光器,它效率高功率大,近来获得很大发展。除了通常所用的电子束横向激励方法外,本文主要引用强流脉冲电子束纵向激励气体分子激光的数据。这种激励不需镜子,随着电子束功率的提高,激励更短波长的激光很有可能。

霍奇森 (Hodgson, R. T.)^[13]利用 400 keV, 10kA, 3ns 束流截面 1 厘米²的电子束,入射到长 1.75 米、内径 1.9 厘米、充有 50 mmHg 气压氢气的不锈钢管内,利用 2—10 千高斯的纵向强磁场保证电子束能传递 1.6 米的距离。电子束先电离氢气分子,二次电子再与氢气体分子碰撞产生反转,用真空紫外谱仪分析,胶片记录到发射 H₂ 赖曼 (Lyman) 带 ($B^1\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$) 波长 1600 Å 的氢真空紫外激光,测定谱线强度判断:磁场 10 千高斯时获得最大激光输出功率 60kW。

利用 300 keV, 30—90kA, 30ns 的电子束,入射到长 1.75 米内径 1.9 厘米,充 20mmHg 气压的氮气的不锈钢管内,轴向 0—10 千高斯约束磁场。电子使 N₂ 分子激发到 C³π_u 态,获得 3371 Å, 6ns 宽,功率 24 MW 的脉冲激光,功率转换效率达到 0.15%^[14]。

实验都说明,加大轴向约束磁场可以提高输出激光功率和提高转换效率。

对于激励波长 (λ) 更短的激光可以定性地推论。从估计^[15]说明,维持相应增益所需激励功率与波长 λ 的 4 次方成反比。激励氢真空紫外激光 (1600 Å) 的电子束功率密度, 4×10^9 瓦/厘米²,如果我们利用玻璃杆阴极形成和聚焦 10MeV, 1MA 束流成 1 毫米斑点的

话,电子束功率密度可达 10^{14} 瓦/厘米², 激励氢气,有可能获得小于 100 Å 的 X 射线激光!

总之,随着电子束功率和聚焦水平的提高,电子束激励激光介质(除气体外还可以考虑等离子体)获得 X 射线激光不是永远实现不了的事。

强流相对论电子束,是最近获得急剧发展的新技术,有很大生命力。刚开始初步实践就已经看到有极大的应用,不仅能解决国防上的急需,而且在基础科研上也有很大的用途。工程上已能作到百万焦耳能量的水平,电子束的质量也在逐步有所改进,如果用激光轰击固体靶产生高浓度等离子体的电子源代替起初通用的场致等离子体电子源,估计会大大地改善束流的发射度。随着束流功率,质量和聚焦工作的再次提高,一定会获得更大范围的应用,在某些方面(比如,加速技术,受控,激光)还有可能作出惊人地突破。产生强流相对论电子束的加速器,主要设备是电工器材,造价低廉(例如 Hermes II 机费用 90 万美元)利于推广,与其它加速器比较有它的优越性。

参 考 文 献

- [1] Векслер, В. И., «原子能», 2-5 (1957), 17.
- [2] Graybill, S. E., Uglum, J. R., *J. A. P.*, 41 (1970), 236.
- [3] Graybill, S. E., *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 16 (1969), 1047.
- [4] Sidney Putman, *Phys. Rev. Lett.*, 25-16 (1970), 1129.
- [5] Rabinovich, M. S., Tsytovich, V. N., *Particle Accelerators*, 5-2 (1973), 99.
- [6] Sloan, M. L., Drummond, W. E., *Phys. Rev. Lett.*, 31-20 (1973), 1234.
- [7] Winterberg, F., *Phys. Rev.*, 174 (1968), 212.
- [8] *Nuclear News*, 14-4 (1971), 56.
- [9] Morrow, D. L., Phillips, J. D., Stringfield, R. M., et al., *Appl. Phys. Lett.*, 19-10 (1971), 441.
- [10] Freeman, B., et. al., *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 17 (1972), 1030.
- [11] Condit, W. C., *Phys. Rev. Lett.*, 30-4 (1973), 123.
- [12] Nation, J. A., *Appl. Phys. Lett.*, 17-11 (1970), 491.
- [13] Hodgson, R. T., Dreyfus, R. W., *Appl. Phys. Lett.*, 20-5 (1972), 195.
- [14] Patlerson, E. L., *Appl. Phys. Lett.*, 21-6 (1972), 293.
- [15] 清水富士夫, «应用物理», 42-4 (1973), 419.

(上接 263 页)

“雄关漫道真如铁,而今迈步从头越。”我们虽然前一阶段在液晶显示方面做了一些初步研制工作,这只是前进中的万里长征第一步。在制屏工艺中还存在好多问题需要通过努力,不断实践和学习兄弟单位的先

进经验进行解决。我们决心继续以党的基本路线为纲,认真学习无产阶级专政的理论,以“大庆”为榜样、猛攻关键,早日使液晶显示屏的光,亮到更多更广泛的整机上,使它为伟大的社会主义祖国闪耀出光芒。