

研究简报

调相聚焦激光加速器的几个重要问题

徐 建 铭

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文指出了在调相聚焦激光加速器中,起加速作用的是与粒子同步的慢波,而不是“快波”。加速效率由激光电磁场中慢波分量所占比例决定。并且,由于是利用慢波加速,要采取适当的措施,才能保证纵向和横向运动的稳定性。

文献[1]提出调相聚焦激光加速器的设想,并指出加速电场相速大于光速,不存在横向聚焦与纵向聚焦间的矛盾。进行分析后,发现情况有所不同。

1. 如何形成能进行持续加速的电磁场。激光的波长很短,加速距离和波长之比须达到 $10^6 \sim 10^7$,才能得到够强的加速能力。因此必须能实现持续加速。而持续加速只有依靠相速与粒子速度相同的电磁波,通称为同步电磁波。

所谓同步电磁波,是指电磁场对粒子的加速作用。可以是实际存在的电磁场行波,像在盘荷波导电子直线加速器里那样。也可能没有这样一个电磁场行波,但作用等效于一个同步电磁波。例如,同步加速器环形轨道上有几个加速腔,适当控制它们的频率和相位,便能持续加速。但实际上并没有一个同步电磁波沿着环形轨道传播。

在调相聚焦激光加速器里,为了形成这样一个电磁波,只有利用聚焦激光沿加速轴线(假定为Z轴)形成周期分布的加速电场。分布的周期是 $\beta\lambda$ 。 β 是被加速粒子的相对速度, $\beta = v/c$ 。 λ 是自由空间激光波长。即

$$E_x(z, t)_{r=0} = A_s R c \exp\{i[\phi(z) - \omega t - \alpha]\}. \quad (1)$$

A_s 是幅值, α 为初始相角。而 $\phi(z)$ 为

$$\phi(z) = 2\pi \frac{z}{\beta\lambda}, \quad (2)$$

这一电磁场以 ω 的角频率随时间振荡,形成相速为 βc 的电磁波,与粒子同步。

文献[1]提出的调相方案的实际结果,正是达到上述要求。文献[1]的方案中,由于激光入射方向与z轴成 θ 角,因而激光电场沿Z轴分布的周期为 $\lambda/\cos\theta$ 。在 $\beta\lambda$ 范围内电场相角改变 $2\pi\beta\cos\theta$,还不足 2π 。不足部分靠调相光栅来补足。文献[1]要求调相光栅调相作用的周期为 $\frac{\lambda}{\beta^{-1} - \cos\theta}$,即在 $\beta\lambda$ 范围内光栅又调相 $2\pi(1 - \beta\cos\theta)$ 。两个调

相量相加,恰好使得激光加速电场沿加速轴每经过 $\beta\lambda$ 调相 2π . 未调相前,加速轴上加速电场的分布形式是

$$E_z(z, t)_{r=0} = A_s Re \exp \left\{ i \left[2\pi \frac{z \cos \theta}{\lambda} - \omega t - \alpha \right] \right\} \quad (3)$$

采用光栅调相后,如果是线性调相,即光栅调相的相角 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi(z) = 2\pi \frac{z}{\lambda} (\beta^{-1} - \cos \theta), \quad (4)$$

则轴线上加速电场的分布形式为

$$E_z(z, t)_{r=0} = A_s Re \exp \left\{ i \left[2\pi \frac{z \cos \theta}{\lambda} + 2\pi \frac{z}{\lambda} (\beta^{-1} - \cos \theta) - \omega t - \alpha \right] \right\},$$

即

$$E_z(z, t)_{r=0} = A_s Re \exp \left\{ i \left[2\pi \frac{z}{\beta\lambda} - \omega t - \alpha \right] \right\}. \quad (5)$$

所以,采用线性调相时,文献[1]的加速结构在加速轴上形成的电场只有相速为 βc 的行波. 如果进行阶跃式调相,在 $\frac{\lambda}{\beta^{-1} - \cos \theta}$ 长度内总调相角度为 2π . 那么,加速轴上电场的分布形式将是

$$E_z(z, t)_{r=0} = \sum_n A_n Re \exp \left\{ i \left[2\pi \frac{z}{\lambda} \cos \theta + 2\pi \frac{nz}{\lambda} (\beta^{-1} - \cos \theta) - \omega t - \alpha \right] \right\} \quad (6)$$

对于 $n=1$ 的分量是, $A_1 Re \exp \left\{ i \left[2\pi \frac{z}{\beta\lambda} - \omega t - \alpha \right] \right\}$. 它是相速为 βc 的电磁波,由它加速带电粒子. 其它分量的相速是,

$$v_{ph,n} = \frac{\beta c}{n - (n-1)\beta \cos \theta} \quad (7)$$

因此,一般说来,经光栅调相以后,加速轴上已没有相速为 $\frac{c}{\beta \cos \theta}$ 的快波.

除该文提出的调相方案外,还有多种可能. 例如激光垂直入射,利用周期为 $\beta\lambda$ 的光栅调相(即在 $\beta\lambda$ 长度内调相 2π),也能达到同样的目的. 只是斜入射能减轻光栅的调相量,延长光栅周期的长度.

有人提出沿加速器管壁周期地安放聚焦透镜,使得沿加速器轴线每隔一定间距形成一个激光焦斑,以加速粒子. 在这一方案中,只要焦斑大小在波长以下,相邻焦斑间距为 $N\beta\lambda$ (如果相邻焦斑激光的光程差是整数波长,则 N 为整数. 不然,要调节 N 以补偿此光程差. 例如光程差为半波长,则 N 为整数加 $1/2$.), 就能实现持续加速. 起加速作用的是相速为 βc 的第 N 次谐波. 这是以 $N\beta\lambda$ 为调相周期的方案.

同样,垂直入射时调相光栅的周期也可以采用 $N\beta\lambda$. 这时,如果采用线性调相,则光栅调相的相角 $\Delta\phi$ 是

$$\Delta\phi(z) = \frac{2\pi z}{N\beta\lambda}. \quad (8)$$

则所形成的加速电场为

$$E_z(z, t)_{r=0} = A_s Re \exp \left\{ i \left[\frac{2\pi z}{N\beta\lambda} - \omega t - \alpha \right] \right\}. \quad (9)$$

电场的相速为 $N\beta c$, 不能持续加速. 采用这种调相光栅时, 只能阶跃调相, 即在 $N\beta\lambda$ 内阶跃调相, 总调相相角为 2π . 这时所形成的电场将是

$$E_z(z, t)_{r=0} = \sum_n A_n R c \exp \left\{ i \left[2\pi \frac{nz}{N\beta\lambda} - \omega t - \alpha \right] \right\}, \quad (10)$$

对于 $n = N$ 的分量, 相速是 βc , 可以进行持续加速, 其他分量都不能持续加速.

2. 加速效率 由于激光的干涉衍射和光学器件加工安装误差, 在加速轴上得不到完全清晰的相位分布或焦斑. 另外, 在调相周期为 $N\beta\lambda$; 或虽然是 $\beta\lambda$, 但不是线性调相的情况下, 还会形成一些非同步电磁波. 这些因素都会降低这种加速器的加速效率. 加速效率完全由在加速轴线上实际形成的加速电场中, 分布周期为 $\beta\lambda$ 的分量的场强来决定.

3. 运动的稳定性问题 对粒子进行持续加速的是相速为 βc 的同步电磁波, 相速小于光速. 在这种电磁波里, 带电粒子横向聚焦和纵向聚焦存在矛盾. 文献 [1] 提出的方案也不例外, 并未能消除这一矛盾.

由于入射能量很高, β 已接近于 1. 同步电磁场对粒子的聚焦或散焦作用已很弱. 但由于加速波长和加速器有效孔径都比较小, 即使采取措施, 解决了这一矛盾, 激光加速器的接收度也很小. 例如, 假定横向振荡波长按有效孔径比例减小. 则横向每个方向的接收度将正比于孔径. 那么, 这种加速器一个横向方向的接收度, 将为常规加速器的 $10^{-3} \sim 10^{-4}$. 如不解决上述矛盾, 接收度将会进一步减小.

为了解决这个矛盾, 要采取一些措施. 例如, 把周期调相机构再分成若干个超周期, 每个超周期内有 n 个调相周期. 各超周期之间形成 $\pi/4$ 相差, 使粒子交替地在横向聚焦纵向散焦及横向散焦纵向聚焦区里运动. 或者, 除了沿加速轴调制加速电场外, 还沿 φ 方向进行调制, 以解决聚焦问题.

参 考 文 献

- [1] 彭桓武、庄杰佳, 中国科学, 10(1979), 953.

ON SOME IMPORTANT PROBLEMS OF THE PHASE ADJUSTED FOCUSING LASER ACCELERATOR

XU JIAN-MING

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

In this paper, it is pointed out that in the phase adjusted focusing laser accelerator, particles are accelerated by "slow wave" (synchronizing with the accelerated particles) but not "fast wave". (waves whose phase velocity is faster than the speed of light). Some measures should be taken so as to get stability in both longitudinal and transverse motion.