

等离子体型的粒子加速器

以接近光速飞行的带电粒子群以及高能加速器,使我们对物质的结构、自然界基本力的作用、宇宙起源的认识,都有了长足的进步。在本世纪30年代,能产生百万电子伏特(MeV)能量的回旋加速器,模拟了巨星核心的条件,提供了研究原子核反应的实验环境。后来出现的可产生十亿电子伏特(GeV)能量的同步加速器和直线加速器,揭示了中子量内部的环境,并证实了反物质的存在。今天,质子同步加速器的能量达万亿电子伏特(TeV),用于探测宇宙诞生时的十亿分之一秒内的环境。建造世界上最大的加速器——超导超级对撞机(SSC)的计划已经拟定。这个对撞机所使用的技术,在实际上已趋于它的极限。幸运的是,一种新的加速器技术——等离子体型的粒子加速器技术已经问世,它为达到更高能量开辟了一条充满希望的道路。

投资为44亿美元的超导超级对撞机将需要一个周长为87公里的加速环,使粒子的能量提高到40TeV。把超导超级对撞机建成一个庞然大物的原因是,它的工作原理仍然沿用了已使用50年之久的加速器技术,即它借助于磁场引导粒子,用强电场加速粒子。如果要建造一台与超导超级对撞机能量一样,但体积比它小的加速器,就需要增大引导磁场和加速电场的强度。但是,实际上常规的加速器技术不能大幅度提高场强。这有两个原因。首先,磁场力变得比使磁物质结合在一起的内部引力更大。产生强磁场的磁铁将使磁铁本身被撕得粉碎。其次,电场产生的能量达到原子束缚电子的能量,将使加速器的支承系统内部的电子脱离它们的核。

等离子体型的粒子加速器可以克服上述的电场困难。它的工作原理是:用等离子体内部产生的电场来加速粒子。等离子体是一种加热到一定温度(高达上亿度)的物质新形态。在这种状态下许多电子从原子中分离出来。因为等离子体已经离子化了,所以等离子体型的粒子加速器对电子离解并不敏感。在理论上它们维持的电场比常规加速器技术允许的电场高出几千倍。如果能在远距离产生这么强大的加速电场,那么一个几百米长的等离子体型加速器就能达到周长为87公里的超导超级对撞机所能达到的能量。

二

总体上说,等离子体是电中性的。但是电子与带正电的离子是分开的,一个扰动就可以产生负电区域(电子高度集中的区域)和正电区域(正离子高度集中的区域)。电荷的这种不平衡分布建立了一个电场,这个电场的方向是从正电区域指向负电区域。电场以相等的力同时排斥电子和离子。因为电子质量比离子质量小得多,电子向正电区域运动,而离子基本上静止不动。

当电子被拉向正电区域时,它们容易获得速度与动量,此动量比电子能到达正电区域所需要的更大,它能使电子越过正电区域,于是电场反向,

阻止电子运动,使它们的速度减慢下来,然后再把它推回去。这个过程本身是反复的,产生了所谓的电子摆。

这种在等离子体中由扰动产生的大量的电子摆,可以产生一个加速带电粒子的电场。设想一个细圆柱形等离子体,它的轴线与水平平行。每一个电子摆的中心在这个圆柱体的不同位置上,并沿着轴线向左、向右振荡。假设电子摆相继振荡,例如,在等离子体左端点上的一个电子摆处在振荡的最左边的位置上,沿着轴线与它间隔最近的电子摆处在自己的中心位置,接下去的处在最右边的位置,下一个在它的中心位置,再下一个在它的最左边的位置。如果所有这些电子摆同时开始以同一频率振荡,都有相同的最大振幅,那么负电区域(或正电区域)似乎是以行波形式沿着圆柱体运动。这个效应很像剧院大门罩上的灯光,尽管每个灯泡只是相继地开和关,但灯光似乎在向前传播着。

三

电子摆以这种联合运动的方式在等离子体内部形成了负电区域和正电区域的纵波,这种波称为等离子波。换言之,正电和负电区域建立了一个电场,这个电场与等离子波一起运动。如果一个带电粒子以近似于等离子波的速度注入等离子体,它将留在电场中并从电场中获得能量,容易得到加速。这种现象是等离子体加速粒子的基础。

以这样的方式加速粒子,在概念上与带电粒子在常规的加速器中增加速度不同。带电粒子在今天的高能加速器中差不多以光速运动。

从 50GeV 的加速器中射出电子的速度比光速仅小千亿分之五。如果它与光脉冲进行绕地球竞赛,那么电子到达终点时仅落后光脉冲十分之一毫米。当粒子以这样的速度前进时,从电场吸收能量并在下述意义上得到加速:根据爱因斯坦的相对论,它们的质量增加了,但是粒子的速度增加得很少。为了加速一束已经以很高速度运动的粒子(增加它们的能量),等离子体型的粒子加速器必须建立一个波速差不多达到光速的等离子波,这样,带电粒子不能从与等离子波一起运动的电场中跑出去。

等离子波的速度是它的波长(两个相邻负电区域之间的距离)与频率(电子摆振荡的频率)的乘积。在给定的等离子体中,等离子波的频率是固有的,它是等离子体中的电子密度的函数,但是波长是变化的。所以当等离子波的波长适当时,它的波速可以等于光速。等离子波的固有频率和适当的波长确定后,注入等离子体的带电粒子可以保持在这个波的一个不变区域中,渐渐地从电场中吸收能量。

等离子波传递给一个注入电子的能量在数值上有一个限制。等离子体中产生的最强的电场由振荡的最大振幅确定。理论上预言,对于波速等于光速的等离子波,等离子体对振幅的限制是与无扰动的等离子体电子密度的平方根有关。密度为每立方厘米 10^{16} 至 10^{21} 个电子的等离子体,在实验室里是常见的,因而在理论上最强的电场是每厘米 10 亿伏特至 300 亿伏特之间。作为比较,现有的加速器产生的加速电场为每厘米 0.2 百万伏特。也已设计了每厘米 1 至 2 百万伏特的电场,用于将来的常规加速器。

目前,已有两种方法产生用于加速的等离子波。即痕迹法和差拍波法。

四

痕迹场法利用由许多电子组成

的电子群产生等离子波,加速由少数几个电子组成的电子群。正象一条船在水中驶过时把水推到旁边,留下痕迹一样,电子群通过等离子体时也产生了一个等离子波的痕迹。

当电子群进入某一区域时,等离子体内的电子就离开了原来的位置,这样等离子体与这群电子在总体上仍然呈电中性(在该区域上——译者注),当这群电子退出时,这个区域中留下了空缺,等离子体内的电子很快回来重新建立平衡,等离子体内电子的这种运动产生了电子摆的振荡,其结果是产生了一个运动速度等于电子群速度的等离子波。这个等离子波建立起一个电场,即痕迹场。当少量电子适当地进入痕迹场中时,这些电子可被加速从而得到比运动的电子群还要高的能量。

五

差拍波方法在理论和实验两方面都得到比痕迹场方法更为深入细致的研究。差拍波加速器已经在实验室里使 0.5MeV 能量的粒子加速到 2MeV,并且产生了比最高级常规加速器强 10 倍的电场。差拍波方法用两束频率不同的强激光产生等离子波。两束激光合在一起,因为它们的光波相互干涉,形成两种区域,一种是处于波幅加强的状态,另一种则是波幅相互抵消的状态。结果,出现了作为复合波的差拍波。拍波的频率等于两母波(激光)的频率差。如果复合波进入等离子体区域,那么它将产生高的和低的光辐射压强区域。如果差拍波频率等于等离子体的固有频率,那么等离子体内的电子会作出合理的反应,产生强大的等离子波。

像激光束一样,被等离子体加速的电子也必须始终聚焦在等离子体中心处的相干束中,幸好从激光束得到的等离子波不仅产生沿激光束轴心方向上的加速电场,而且产生径向电场,这个径向电场可以把电子聚焦在这个轴上。

六

在德克萨斯大学工作的丹琪玛和我在 1979 年出版了第一本关于差拍波方法的理论著作。此后不久,在渥太华加拿大国家研究委员会工作的乔希和他的合作者一起开始了他们的第一个实验。为了获得等离子体,他们将强大的二氧化碳激光照射到一片薄的碳箔上。他们没有利用两束附加的激光去产生等离子体中的差拍波,而利用了第一束激光与等离子体之间的相互作用。这种相互作用产生了次级光波,它的频率等于激光束频率与等离子频率之差,次级光波与原始激光的干涉形成了等离子波,其机制与产生差拍波的过程相似,唯一差别是用这种方法得到的等离子波在各个方向上传播。这个实验给出了粗糙的但非常令人鼓舞的结果:产生了强等离子波和每厘米 1000 万伏特的电场。乔希在加利福尼亚洛杉矶分校继续从事他的研究。它建造了能直接启动等离子波的装置,并进行定量地测量。这一次他利用两束波长分别为 9.6 和 10.6 微米的二氧化碳激光束来产生差拍波和一毫微秒长的同步脉冲。差拍波的频率接近于等离子体频率。乔希使差拍波照在由电火花产生的等离子体上。他用第三束激光与等离子波散射,从而对等离子波进行了探测,观察到的电场强度在每厘米 3 百万伏特到 1 千万伏特之间。

伦敦帝国科技学院的一个研究小组和罗瑟福-艾普雷顿实验室工作的伊文斯,现在正在做差拍波加速器的工作。这个加速器依靠钕玻璃激光产生波长近似为 1 和 1.1 微米的激光。这个小组在实验上遇到很多困难,但是最近他们已看到了产生等离子波的证据。

这些科学工作者利用光子迅速轰击气体状的每个原子,使电子脱离原



物理学家库尔恰托夫

● 徐载通

И. В. 库尔恰托夫是前苏联著名的物理学家,苏联原子核科学和原子核技术工作最早的组织者和领导者。1943年起为苏联科学院院士。1903年1月12日生于车里雅宾斯克州锡姆村。1920年进入克里米亚大学学习。1923年大学毕业。1925年在列宁格勒物理技术研究所工作。从1930年起任该所实验室主任。1943年,他创建苏联科学院第二实验室。1955年,该实验室被改建成规模宏大的科研中心—原子能研究所。他在去世前一直担任该所所长。1960年该所称库尔恰托夫原子能研究所。他于1960年2月7日去世。

库尔恰托夫一生中主要在电介质物理学、半导体物理学、原子核物理学、中子物理学、重核裂变和受控热核反应诸领域从事科研活动,获得了许多重大的科学成果。

在电介质物理学方面的研究

1925年,库尔恰托夫开始从事电介质物理学方面的研究。1926年研究固体的电解和慢电子通过金属箔等问题。1927年研究岩盐晶体中离子迁移率、固体电介质中高电压极化作用和电介质绝缘强度等问题。1928至1929年研究固体的离子导电性和混合导电性、固体电介质的击穿机制、若干盐的单极导电性、击穿和整流机制等问题。

1929年底,他和П. П. 科别科合作研究酒石酸钾钠极高电容率的现象。1930年他研究酒石酸钾钠的电介质性质和电学性质,发现并研究了该晶体的自发定向作用。他指出:该晶体由自发带电区域所组成;每个区

域含有相同方向的电偶极子;整块晶体呈电中性,这是邻近区域带电方向相互交替排列的结果。当加上外电场以后会使弱场区域改变方向,整块晶体就产生大的电矩。1931年他采用短电脉冲作用的方法研究酒石酸钾钠的介电常数,发现:当优质晶体相互良好接触时,它们弱场的微分介电常数可达190,000单位的数值。1932年他做了大量实验研究酒石酸钾钠同晶混合物和酒石酸铵盐的物理性质;研究过酒石酸钾钠内产生的效应跟其结晶方向的关系和长时间的电场作用对晶体效应的影响。他详细地研究过酒石酸钾钠的自发极化机制,发现:厚度比较大的酒石酸钾钠晶体极化率比较高。阐明了该晶体极化率(单极性)非对称性的起因。他分析了大量实验资料后得出结论:酒石酸钾钠电体中的内场 $E = E_0 + \gamma P$,式中系数 γ 近似等于 $4/3\pi$ 。他测定了酒石酸钾钠电体的居里点,发现了它的下居里点,研究了它在居里点范围内的性质和高于居里点的行为。他还发现:在酒石酸钾钠电体自发定向区域之外的电场力跟经典的德拜公式和赫尔维格-德拜公式相同。他对纯酒石酸钾钠转化为固溶体和具有铁电体性质的复杂化合

子而产生一种均匀的、完美无缺的等离子体,形成一个高品质的等离子波。如果要在差拍波加速器和痕迹场加速器中产生一个几米长的等离子波,那么它是十分需要的。

奎巴克大学的马丁小组进行了一个非常像乔希做的实验。这个实验有两个等离子体,一个提供被加速的电子脉冲,另一个用差拍波方法进一步使电子脉冲加速。在开始时,类似于乔希第一个实验过程,使电子加速后的能量大于0.5百万电子伏特。然后,一束激光使一固体靶点火,产生一种高电子密度和高温的等离子体。分离出来的大能量的电子被注入第二台等离子体,电

子以很快的速度在其中运动,被差拍波进一步加速。当研究小组分析来自差拍波区域的电子时,他们记录下电子能量高达2MeV。因为差拍波区域的长度仅仅只有1.5毫米,所以等离子体中应存在一个场强约为每厘米1千万伏特的加速电场。

七

除了为加速粒子设计新工具的原始目的以外,在其他一些领域也看到了此项研究的希望。例如,脉冲星被认为是其中产生了一种强烈的等离子波,在相当短的距离中使粒子加速,得到巨大的能量。

进一步研究差拍波加速器可以

导致新的X射线和 γ 射线源的产生。由差拍波加速的电子引入到钨箔上,从而产生X射线。电子也可以注入到一个垂直于电场方向的等离子波中,这些电子在垂直于运动方向上被加速,使它们辐射X射线和 γ 射线。

等离子波技术也将为研究电场与等离子体的相互作用提供新的机会。等离子波可以产生特别强大的电场,类似的技术可以产生同样强大的磁场。正象许多领域中的科学研究一样,研究等离子体加速粒子,其最重要的成果可能是完全出乎意料的。

(根据 J. M. 道森原作编译)