

〔苏〕B. II. 萨兰采夫 著



未来的加速器

科学出版社

未 来 的 加 速 器

〔苏〕B.Π. 萨兰采夫 著

黄高年 朱世靖 译

李 煜 校

科 学 出 版 社

内 容 简 介

这本小册子讲述了加速带电粒子的新原理，这些原理可以用于创制未来的高能加速器。作者还介绍了目前正在建造的这类加速器的新实验模型。

本书可供对原子核物理学和基本粒子物理学及其成就感兴趣的广大读者阅读。

Владислав Павлович Сарацев

УСКОРИТЕЛИ БУДУЩЕГО

Издательство «Знание», 1973

未来的加速器

〔苏〕В.П. 萨兰采夫 著

黄高年 朱世靖 译

李 焯 校

责任编辑 钟元昭

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984 年 9 月第 一 版

开本：787 × 1092 1/32

1984 年 9 月第一次印刷

印张：1 3/4

印数：0001—3,400

字数：36,000

统一书号：13031·2417

本社书号：3300·15-3

定价：0.36 元

目 录

现有加速器概述	(1)
用媒质加速带电粒子团	(28)
冲击相干加速	(30)
准中性粒子团的辐射加速	(33)

现有加速器概述

早在原子物理学的萌芽时期，就有人提出并应用了所谓试验粒子法来研究各种原子。有了这个方法，我们才获得了我们今日所掌握的关于原子和原子核的差不多全部知识。试验粒子法的发展导致一个新的广阔领域即加速器物理和加速器技术的出现。原子核物理学的历史同加速器的研制有密切的关系；原子核物理学中的一切重大发现都是在一定程度上和粒子加速技术的进步有关的。

四十年前出现的第一批加速器，开始用于对原子核的重要研究。这些研究在很大程度上决定了人类在掌握原子内部能量方面的胜利。

为了能想象出未来的加速器是什么样的，有必要从现代的观点，概略地回顾一下加速器发展的历史。这也有助于我们了解目前的现状和进一步发展的可能性。我们不打算在这里涉及电子加速器，而只讨论重粒子加速器。电子加速器是加速装置的一个单独的大类，应当专门论述。

最初的加速器是直接作用型的，即粒子被引入静电场并在它的作用下加速。图 1 是这种加速器的主要部分——加速管的示意图。来自电源的高压（在静电起电机中是严格的直流电压，在较为现代化的装置中是脉冲电压）加到图 1 中的区域 1。离子源（提供需要加速的粒子）就处于这种高电位下。电位沿加速管逐渐降低，在管端变为零。被加速粒子的能量取决于电源所能提供的电压。这个数值实际上限于 1 千万伏。这乃是这种加速方法的缺点之一。但是从以后的加速

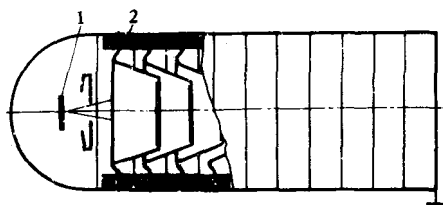


图 1 静电加速器示意图。离子源安置在区域 1，处于高电位。粒子沿着具有电位分布的管子 2 通过，从而获得与整个电位差相应的能量。

器发展历史来看，这个缺点并不是主要的。如果引入“粒子加速效率”这个概念并把它理解为粒子能量在加速系统单位长度上的增量，那么，直接作用型加速器的效率是最低的。在这种加速器中，应用各种已知的现代技术成就所能获得的静电场强度不超过 10~15 千伏/厘米。极限场强的这个限度是由加速管 2（见图 1）的介质表面的耐击穿能力所决定的。

虽然直接作用型加速器的加速效率很低，但它目前在研究工作中还是起着很大的作用，因为在这种加速器中所获得的加速粒子束，其粒子能量的零散是最小的，这在原子核结构的某些研究中是十分重要的。

为了增大加速效率和能量，就必须放弃使用直线加速器。人们很快就找到了解决的办法：利用磁场。具有一定能量的粒子在磁场里作圆周运动。在加速时，粒子的轨迹将由圆形变成外旋的螺旋线形（图 2）。先让粒子进入特制的两个 D 形盒中央，使之在磁场的作用下作圆周运动。D 形盒与高频振荡器相接，所以在两个 D 形盒之间的间隙当中将有高频电场，而不是静电场。这样一来，粒子每次通过间隙时都能处于高频场的加速相位，从而就可得到加速，同时运动半径亦因而有所增大，使圆形轨迹变成外旋的螺旋线形。这种加速器称为回旋加速器，它在原子核物理学中的作用是最重要的。

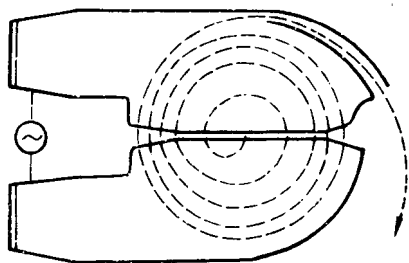


图2 回旋加速器的示意图和工作原理。虚线表示粒子在磁场中的运动轨迹。粒子在高频回路内运动，高频回路保证粒子能量的增长。

不过，回旋加速器也不是没有缺点的。在加速过程中粒子所作圆周运动的半径会不断增大，为使粒子不致飞出磁场，就需要很大的磁铁。回旋加速器还有其他缺点：随着速度的增大，相对论效应也逐渐增强，从而就会破坏圆周运动与高频电场发生器之间调配得很好的同步。结果，粒子由回旋加速器获得的能量（与直接作用型加速器的粒子能量相比）总共只增加几倍；如果把回旋加速器磁铁的圆周长度取为加速长度，则加速效率实际上依然照旧。

现在看来，可以这样说：回旋加速器在加速器发展中的主要功绩是把磁场引进了加速器。不仅如此，从后面的叙述中我们将会看到，回旋加速器是最早的谐振型加速器（甚至这个系统的名称就包含了这个意思）。在这类加速器中，粒子的最终能量已经不仅取决于所加电压的电位差，而且还取决于粒子通过这个电位差的次数。这是采用了交变电压的结果，因为交变电压的频率是与粒子在磁场中的回旋频率相一致的。

此后，加速技术的全部发展都是沿着改善这种系统的途径前进的。在这方面也曾遇到若干困难。为了改善这种加速系统，就需要加深对加速过程的理解，需要认识新的自然规律。自动稳相原理就是其中之一。现将粒子在加速器中的这

个运动规律简述如下：当粒子周期性地进入电场的一定相位时（几乎和在回旋加速器中一样），在相当大的相位区内，它的运动是稳定的。粒子向一方或另一方偏离正确相位时，所引起的粒子运动状态的相应变化，将迫使粒子返回原相位。

图 3 所示的是使粒子进行谐振加速的正弦电压。设相位 1 相当于粒子通过时电压发生器的相位。如果某一粒子由于某种原因，提早（比如在相位 2 时）进入了加速间隙，那么这个粒子必将受到较小的加速电压 V_2 的作用，使它在下一圈中的运动速度比在相位 1 时进入的粒子为慢。这个“误入”的粒子将滞后于自己的相位并向那些在相位 1 时进入的粒子靠拢。具有相位 3 的粒子也会经过类似的过程。因此，在相位 1 时进入的粒子是稳定的，离开稳定相位的任何粒子都将被迫返回稳定相位。

现在当我们谈论粒子按正弦电压相位运动的图象时，自动稳相原理似乎非常简单。然而，在 B. И. 维克斯列尔最先领悟到这个原理的那个年代，它确是在加速器研制史上引起了一次革命。首先，出现了回旋加速器进行现代化改造的可能性。由于应用了自动稳相原理，以前使回旋加速器中加速效率降低，并使被加速粒子的最大能量受到限制的那些

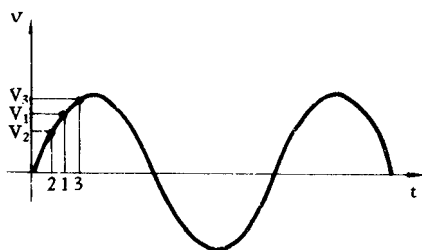


图 3 加速器中自动稳相的工作原理。时间 t 和电压 V 对应于同步条件。在点 2 和点 3 所限定的范围内，粒子的任何偏离都将导致它返回点 1。

效应，反而可以被利用来稳定粒子的轨道了。其中主要效应之一是粒子的质量随能量的增大而增长。在回旋加速器中，这个效应导致谐振加速被破坏，从而使粒子不能再加速。

自动稳相原理表明，由于有稳定相位区的存在，因而在无须担心会越出谐振加速区的情况下改变加速场的频率。这时，只要正确地选择加速相位就行了。用改变频率的方法可以很容易地补偿粒子质量的变化。此外，用改变频率的方法有可能使回旋加速器内迅速外旋的螺旋形轨道最大限度地接近圆形并把粒子一直加速到磁场强度能约束得住的程度，从而把粒子束缚在给定的半径上。

新的加速器开始被称为同步回旋加速器或稳相加速器。它在原子核实验中引起了一场革命，使粒子能达到的能量和加速效率立即提高了几十倍。以往只能在宇宙线中观测到的粒子，如今有可能用人工方法取得了，从而产生了为基本粒子物理学奠定了基础的介子物理学。原子核物理学这个领域的蓬勃发展还应当归功于另一类加速器——同步稳相加速器，这种加速器之所以能够建立，也是由于自动稳相原理的发现。尽管在建立了同步回旋加速器以后，加速器取得了巨大的进步，但是原子核物理学对增大粒子能量的要求却增长得更快。

在反质子被发现的前夕，人们已在理论上对它进行了生动的描述，在实验中也显露出许多新的神秘的现象。但是，那时候所有的人，包括物理学家在内，都只是把反物质当作科学幻想来看待的。关于在地球条件下去获取和保存反物质的任何严肃认真的建议，都曾遇到非常一致的反对，以致只有为数不多的人敢公开说出自己的想法。为了检验这些“奇怪的现象”，需要使粒子的能量比当时的同步回旋加速器所能提供的粒子能量大十倍。是什么原因阻碍着人们建立巨大的

同步回旋加速器的呢？

回旋加速器的工作原理是这样的：粒子在磁铁的中央飞离专门的粒子源，然后开始沿螺旋线加速。在同步回旋加速器中螺旋形轨道的半径不断扩大，一直到磁场能约束得住的范围为止。比如，一台直径长达 6 米的同步回旋加速器，只能把质子加速到 1 千兆电子伏。但不能用过份扩大粒子轨道半径的办法来增高粒子的能量，这是因为在能量随半径按比例增长的同时，磁铁的重量却要按半径的三次方增加。例如，列宁格勒郊外苏联最大的稳相加速器的主要参数如下：

磁铁半径	3.5 米
磁铁重量	7800 吨
粒子能量	1 千兆电子伏
加速效率	45 兆电子伏/米

因此，用这种加速器获取加速到 6 千兆电子伏（理论研究表明，这是产生反质子的最低能量）的粒子是很不合算和很难办到的。若把粒子的螺旋形轨道变成圆形轨道，只需要在圆周上有磁场就行了，这样就能大大减轻磁铁的重量并提高加速效率。

为了实现这种加速方式，必须把加速粒子时原来所用的恒定磁场代之以可变磁场，即代之以随着粒子能量增高而增强的磁场。事实证明，为了保证沿圆形轨道进行加速，必须使被加速的粒子具有相当大的初速度。这时出现了一种正好适用于对粒子进行预加速的加速器——直线加速器。这种加速器的工作原理与回旋加速器的工作原理有很多相似之处。它们的区别在于，在直线加速器中没有磁场，加速作用是靠沿直线布置的一系列加速间隙来产生的。这种加速器也是以自动稳相原理作为依据的。

在这种加速器中采用了专门的高频贮能器——空腔谐振器，这是一个很大的进步。高频振荡器在空腔谐振器中激励

起来的交变电磁波，在谐振器的空间形成所谓驻波，即只随时间变化而不随空间变化的波。粒子就在这种驻波中被加速。为了保证加速是谐振加速，就必须保证粒子只能在与自动稳相原理相符的那个正弦波相位区才受到作用，而在正弦波的所有其余的相位，粒子应当不受高频场的作用。为此，在谐振器内设置了所谓漂移管。漂移管的主要作用是使粒子在对其不利的区域中免受高频场的作用（图 4）。

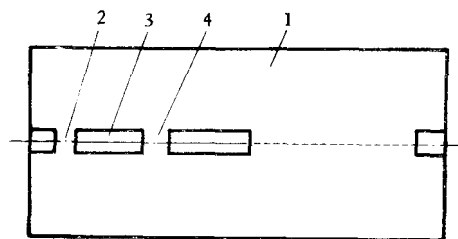


图 4 直线加速器的示意图。高频谐振器内装有漂移管。

粒子进入谐振器 1 后，就受到空间 2 中高频场的加速作用。在谐振器振荡周期的其余时间，粒子在漂移管 3 中避开了高频场的作用，然后，恰好在与选定的加速场相位相应的时刻出现在间隙 4 中。沿加速方向改变漂移管的长度，就可以实现对粒子的谐振加速。

这种加速器能为粒子提供足够的能量，从而就可以通过在具有恒定半径的圆形轨道上使磁场逐渐增强的方法来进一步使粒子加速。

这样就出现了同步稳相加速器，这种加速器一直到目前还是很有用的。虽然这种加速器的历史还不到 20 年，但现在的同步稳相加速器已与最初大不相同。看到建造在杜布诺的 10 千兆电子伏的同步稳相加速器（属于这种加速器的第一代）时，人们会被这个建筑物的宏伟规模所震惊。三万六千吨重

的磁铁井然有序地布置在二百米长的圆周上。磁铁内是进行粒子加速的真空室。直径达两米的巨大真空室，使专家们也感到惊讶。这些尺寸表明，磁铁系统是多么笨重。因此，缩小真空室的尺寸就成了这种加速器在以后多年内发展的方向。在技术上，缩小尺寸似乎并不难办。但是，由于加速粒子的数量直接依赖于加速室的尺寸，为了缩小加速室，必须解决下列极为复杂的问题：建立一种磁铁系统，以便能在尺寸小得多的加速室中控制同样数量或更多数量的加速粒子。对加速器的注入器也提出了全新的要求。

所有这些问题很快都解决了。人们根据建造磁铁系统的新原理，建成了一台新加速器，它的体积比在杜布诺的加速器小。新原理称为“强”聚焦。迄今为止，所有加速器中使用的都不是均匀磁场，而是随半径的增大而逐渐略有减弱的磁场，这种磁场能够在加速时控制粒子束的横向尺寸。选择微弱的磁场变化是为了在径向和磁力线方向控制粒子束的横向尺寸。如果磁场的变化太急剧，粒子束的横向尺寸在一个方向上就要减小，而在另一个方向上就要增大。如果将磁铁倒置，对粒子束的作用也将随之相反，即原来变大的那个横

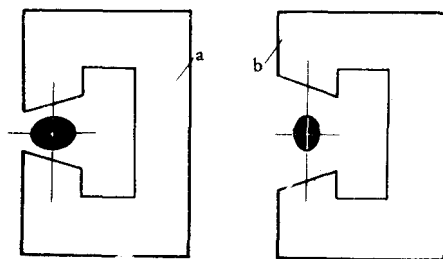


图5 磁极倾斜角不同时，对被加速粒子束的不同作用。由于聚焦磁极倾斜角不同，粒子束横截面的形状也不同。

向尺寸将变小，而原来变小的那个横向尺寸则会变大。随半径减弱或增强的磁场，对粒子束的不同作用如图 5 所示。

如果在加速器中交替地使用磁极方向不同的磁铁，那会有什么结果呢？许多国家对这个问题进行了大量的研究。结果得到了如下答案：磁铁的相互交替可以更有效地控制粒子束。同时，磁铁的加速室尺寸可以减小到几分之一。

图 6 是普通同步稳相加速器磁铁的剖面示意图。在电磁铁中采用倾斜的磁极，使得磁场随半径增大而逐渐略有减弱。

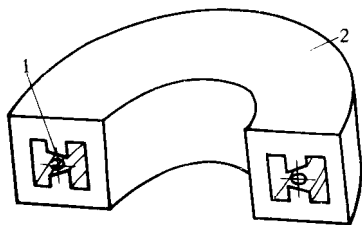


图 6 同步稳相加速器环形磁铁剖面示例。磁铁 2 的巨大尺寸使我们有可能在粒子束运动的区域 1 内建立所需要的磁场。

那么粒子束强度又怎么样呢？我们知道，在具有巨大真空室的加速器中，可以在许多圈内不断积累从注入器进来的粒子。所有这些粒子将逐渐充满巨大的真空室。但是另一方面，相对于粒子束横截面来说，真空室这时已经显得很小时，更确切点说，可能显得很小时。这就要改善加速器注入器的参量。和在环形磁铁中一样，在加速器注入器中，粒子束强度受限制的主要原因也是对粒子束横向尺寸的控制力太小。在直线加速器中，这种控制力主要取决于漂移管之间的间隙电场的特殊形状。利用专门的栅网把漂移管入口屏蔽起来，就能造成一定形状的电场。这种电场的聚焦效率显然是不够的。

那时人们已经知道了更有效的聚焦系统——四极磁透镜，于是把这种透镜装入了漂移管。在直线加速器中采用这种磁聚焦方式，就可以使粒子束强度从根本上得到提高。这样，就为建立更现代化的同步稳相加速器作好了一切准备。

在介绍具体应用这些概念所得到的结果以前，先简单叙述一下最初的同步稳相加速器的意义。至于它的缺点，前面已经说过了。最初的同步稳相加速器已经有可能实现产生反质子这一目标。现在这一点大概不会有人感到惊奇，即使在塞普霍夫的加速器中获得了反氦，也不会成为轰动一时的新闻了。目前，反质子已经可以用加速器大量生产，以致正在建立专门的通道来获取这种纯粹的反粒子束。

但是，不管怎么说，为获取反质子并研究它们与物质相互作用的最初的实验仍具有重要的意义。虽然并没有发现任何理论没有预言过的现象，但是获得反质子以及随后又获得反中子这些事实本身就开辟了研究反物质的广阔道路。

加速器技术在这以后又继续得到了发展。第一批同步稳相加速器建成后，仅仅经过了五年，强聚焦加速器就投入了使用。最初的强聚焦加速器能够把质子加速到 30 千兆电子伏。在建立磁系统时，利用新的概念可以大大减小磁铁重量。为加速粒子所需要的通道的尺寸，从两米减小到了 15 厘米。从磁系统的观点来说，原则上还可以进一步缩小粒子通道的尺寸，但这时一切取决于能否实现高度的精确性。在圆周长度愈来愈长（这些加速器中的圆周长度已经超过半公里）的情况下，在安装每一块磁铁时必须精确到这样的程度：粒子从一块磁铁过渡到另一块磁铁时不会“感到”磁场有变化。

加速器的制造工作得到了控制论的帮助。电子计算机担负起了调配磁场并迅速排除磁场中的一切故障的任务。这就使加速器的发展更前进了一步。最新、最大的同步稳相加速

器可以把质子加速到 200 千兆电子伏(美国)，其加速通道的尺寸却缩小到 12 厘米。这意味着在这方面我们已经接近合理的极限了。

为了说明加速器技术的进展，我们把 10 千兆电子伏的普通同步稳相加速器与粒子能量达 200 千兆电子伏的同步稳相加速器的主要特性作一比较。

特 性	10 千兆电子伏	200 千兆电子伏
磁铁直径	72 米	2000 米
磁铁截面	7.5×5.3 米	0.64×0.33 米
真空室截面	40×200 厘米	12.5×5 厘米
磁铁重量	36000 吨	9000 吨
加速效率	44.2 兆电子伏/米	31.8 兆电子伏/米

由上表可以看出，加速器的各个方面都已取得进展，只有粒子加速时运行的圆形轨道的直径没有减小，它随着粒子能量的增大而成比例地增大，因此，加速效率几乎保持不变。这个事实迫使人们去思考加速器继续发展的途径。下一步该如何发展？还需不需要发展？这些年，利用加速器已经解决了许多重要的物理学问题。但是，关于物质结构的基本问题好像并未变得更明朗些。关于原子核是由中子和质子等基本粒子所构成的这种简单模型已经进行过几次重大的变革，甚至认为基本粒子也完全不再是基本的了。借助于同步稳相加速器发现了大量基本粒子（基本粒子的数量早已超过了 100），致使“基本”这个概念本身已经不“基本”了。需要领会已经出现的这种现状的意义。同时也出现了美妙惊人的理论：把已知的基本粒子加以分类编号。利用这种理论有时候还能正确预言新粒子，这个事实对评价一种理论是有决定意义的。

另外还出现了一种理论，它认为我们所观察到的粒子只

是一些真正基本粒子的表现。这种真正基本的粒子称为夸克。需要做一些决定性的实验，以便断定真伪。计算表明，只要具备分辨能力比现有装置更高的工具，就有希望获得这些实验结果，这就是说，需要粒子能量更高的加速器。

很快就提出了关于这种高能加速器的设计方案，但是却并没有急于动工。在发现自动稳相原理以后的时间里，加速器提供的粒子能量大约每 6 年提高 10 倍。但是，在这段时间里，加速效率几乎没有提高，这就使得加速器变成了工业上的庞然大物。

现在看一下 200 千兆电子伏加速器的几个数据。加速粒子用的磁铁周长约为 6 公里（见表）。粒子预加速需要两台辅助加速器：直线加速器——使粒子加速到 200 兆电子伏；同步稳相加速器——使粒子加速到 8 千兆电子伏（这台加速器几乎与杜布诺的第一批同步稳相加速器相同）。整套加速设备价值 2.5 亿美元。这就是说，进一步提高粒子能量所需要的经费将超过 10 亿卢布。未来加速器如此昂贵的造价迫使物理学家考虑如何去设法提高加速效率，也就是如何去降低加速器造价的问题。

现在看来，在不久的将来有希望提高加速效率的主要发展方向有三个：

首先是利用对撞粒子束，这已是较为陈旧的发展方向了。这种方法是五十年代中期产生的。那时候已经提出，在恒定磁场中被加速的粒子有可能积累起来。这种想法本身在当时曾引起激烈的争论。甚至连那些在研制新加速器方面曾作出许多贡献的老一代有威望的物理学家也不能接受这种新概念。直到那时为止，人们都以为在不随时间变化的恒定磁场中不可能积累粒子，因为这是与制造加速器时所依据的基本规律相矛盾的。事实上，这里面并没有什么矛盾。问题只是

在于如何把粒子引入磁场。

我们先分析一下这种方法的优点。利用加速器对微观世界进行分析的过程大致如下。被加速的粒子束射向靶子，然后再研究由于这些粒子与靶物质的核子(或靶物质的原子核)相互作用而得到的产物。因此，主要是要得到两种粒子相互作用的结果。大家知道，相互作用特性通常是在相互作用的粒子的惯性中心表现出来的。当飞行着的粒子与静止的靶相互作用时，与两种对飞的粒子相互对撞进行相互作用时所表现出来的特性是不相同的。相互对撞时的相互作用等效于具有大得多的能量的粒子与静止靶的相互作用。

在这里很自然会产生这样一个问题：在恒定磁场中积聚粒子的可能性与实现粒子束对撞这两个问题之间有什么关系呢？它们之间曾有最直接的关系。关于利用粒子束对撞的想法早就有了，但是对于这个想法能否实现，人们曾经怀疑过。这是因为计算表明，两个粒子束对撞时的互作用效应是极其微小的。物理仪器不可能可靠地记录到这种效应。粒子积累效应大大提高了粒子束的强度，并为利用两个粒子束之间的多次相互作用创造了条件。因此马上开始建造这种加速器的电子模型。这种加速器不仅证明了粒子积累法是可以实现的，并且给出了电子对电子散射的物理结果。这些实验又促使人们考虑利用这种新方法来解决质子的问题。现在这一可能性已经现实地存在。人们已建成了两个交叉的环形磁积累器，其中加速器的能量约为 30 千兆电子伏。在最近的一些学术会议上报导了这方面的最初结果。这相当于用粒子能量超过 1000 千兆电子伏的普通加速器所得到的结果。

这样，问题好象已经解决了——已经有办法克服被加速粒子在能量方面的壁垒。但是，一次粒子束远非在所有的相互作用中都等效于加速器与静止靶。象物质密度很低的对撞