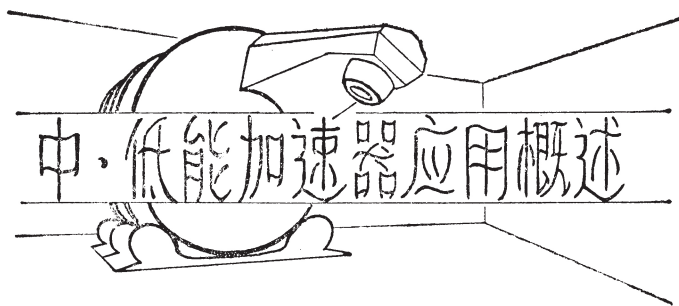




冯 锡 璋

(1) 加速器是一种能将带电粒子加速的设备：这些带电粒子一般是稳定的或是寿命比较长的，它们可带正电如质子、正电子、 ^2H 、 ^3He 、 ^4He 、正分子离子以及一些重离子如 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{20}Ne 一直到 ^{92}U ；也可带负电如反质子、电子、负离子如 H^- 等。加速过程中让带电粒子通过各种频率的电场来获得能量，并且常用磁场来约束它们在一定的轨道上运行。加速器的种类很多，倘使以运行轨道分，有直线的和环行的，前者如静电加速器、直线加速器等，后者如回旋加速器、同步回旋加速器和同步加速器等；若以所加速的粒子类别分，有电子加速器、质子加速器和重离子加速器等；若以粒子能量分，则有高、中、低能之别。

(2) 中(低)能：能量的高低只是相对而言，并且对各种粒子也不一样。对质子，目前可能以 10 京电子伏为线，以上为高能，以下为中(低)能。

(3) 次级粒子：被加速的粒子叫初级粒子，初级粒子通过对撞、变速或轰击各种靶（如氢、铍、碳、铜一直到铀）而产生的不同于初级粒子的粒子，如光子、中微子、 μ 轻子、各种介子、中子和重子等称作次级粒子，它们的寿命有长有短，目前比较有实际应用的有光子、 μ 轻子、 π 介子和中子。

(4) 束流：初、次级粒子的运行被约束在一定方向（实际上约束在这一方向周围的较小空间角范围内），就形成束流。通量一般以粒子/秒·厘米²或粒子/秒表示。聚焦和准直可以使束流集中，散射和扫描则可使它分散。粒子的能量的分散程度和纯度是衡量束流质量的标准，采用各种分离方法可以使质量提高，但通量将相应降低。一般在加速器内部运行的束流称内束，被引出到外部的则称外束，它们可以是连续的或是脉冲的。

(5) 不同质量、能量和通量的各种粒子束流各具它们的用途，且范围很广。本文只限于讨论近几年内可能在北京建成的一个能加速质子到 93 兆电子伏的质子直线加速器和一个能加速质子到 2 京电子伏的增强器所产生的初、次级粒子束的应用。

(6) 中子治癌：能量为 66 兆电子伏左右的质子

束轰击铍-碳靶能产生方向略倾向于向前的连续谱中子，其平均能量在 15—30 兆电子伏间。这样的中子束适合于治癌。美国费米国立实验室和芝加哥大学医院等已累积了不少这方面的经验。与 γ 射线相比，中子有两个优点：1. 在 RBE‘生物相对效应’方面，中子约为 γ 的三倍，2. 在 OER‘氧增比’即对肿瘤深处大量存在的缺氧细胞的杀伤力方面，中子约为 γ 的两倍，另外在表面剂量方面，中子也比 γ 稍低。因此，

中子治癌很可能收到提高治愈率，降低复发率的良好效果。

(7) 质子照相和治癌：中能质子束可用于检查早期的癌变和工业探伤，较之 X 射线，有辐射剂量小和图象清晰（质量分辨率较高）等优点。质子束（一定能量）有确定的射程，在其末端呈高剂量布拉格峰，能使剂量集中于肿瘤区，对正常组织的损伤较小。用 50 兆电子伏质子治疗眼部肿瘤颇有成效。治疗深部肿瘤则需能量为 150—200 兆电子伏的质子。

(8) 医用短寿命同位素及其标记化合物：用于临床诊断、治疗和基础生物医学研究。用 93 兆电子伏质子能生产反应堆中子所不能产生的缺中子同位素，它们的核性能优良和放射性比度高，这就可显著减少使用时病人的辐射剂量和化学毒性。由于它们一般发射正电子，可结合正电子断层照相，提高诊断质量。由于它们寿命短，还可以简化放射性废物处理，避免环境污染。如 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F 、 ^{52}Fe 、 ^{67}Ga 、 ^{81}Rb 、 ^{81}Kr 、 ^{111}In 、 ^{123}I 、 ^{127}Xe 和 ^{201}Tl 等已被普遍使用，效果良好。

(9) 低能介子和 μ 轻子：用 2 京电子伏质子轰击铍或碳靶可产生次级 π^+ 、 π^- 、 μ^+ 和 μ^- 束。

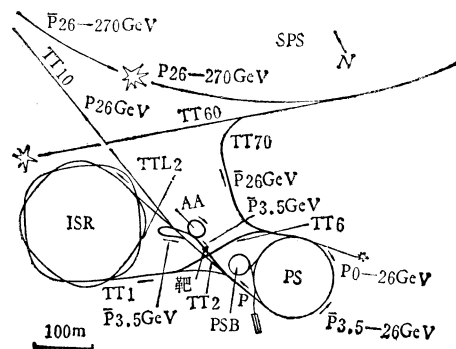
(10) 介子和 μ 轻子物理：研究范围包括 π 介子与质子和其它核的相互作用， μ^- 原子和 μ X 射线， μ 轻子衰变， μ 轻子磁矩和 μ 与核的相互作用等。

(11) π 介子和 μ 轻子用于固体物理和化学：包括 μ X 射线用于化学分析， μ^- 的俘获几率和释放的 X 射线能谱用于研究物质的化学结构， $\pi^- + \text{P} \rightarrow \pi^0 + \text{n}$ 并 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 用于含氢材料的研究， μ 子素用于化学反应动力学和分子结构的研究， μ^+ 自旋转动或 μ^+ 自旋共振 ($\mu^+\text{SR}$) 用于研究固体的结构、磁性和缺陷等。

(12) π^- 介子治癌： π^- 与质子相仿，有确定射程。由于多数 π^- 最终被核吸收释放能量，它的效果比质子要好。它的 RBE 和 OER 可能与中子相仿。

(13) 核物理和核化学研究：利用 93 兆电子伏和 2 京电子伏质子可以做一系列核物理和核化学研究，例如各种核反应的研究。

下简图所示。它由现有的质子同步加速器 PS 和超级质子同步加速器 SPS, 新增建的反质子累积器 AA, 新增建的束流输运线和实验大厅组成。这里有两个问题必须解决。第一个是反质子的寿命问题; 第二个是如何得到足够强度的性能良好的反质子束。前一个问题



PS: 26GeV 质子同步加速器 ISR: 交叉储存环
PSB: PS 的增强器 SPS: 500GeV 质子同步加速器 AA: 反质子累积器 -: 新增建的束流输运线
质子-反质子对撞机简图

比较根本, 如果反质子是 不稳定的, 质子-反质子对撞机计划就要流产。根据电荷, 宇称和时间反演不变性定理 (CPT 定理), 反质子应该跟质子一样, 是稳定的。但是, 在实验上还缺少足够的证据。过去, 人们所观测到的反质子只是瞬时的次级粒子, 还没有一个实验测量过反质子的寿命。为了解决这个问题, 1978 年 7 月 29 日西欧联合核子研究中心的科学家们作了一个实验。他们把反质子注入到一个称为 ICE 的小储存环中。三天以后, 发现在注入的 240 个反质子中, 仍然有 80 个反质子还活着。丢失 160 个反质子的原因是由于反质子和储存环中残存的气体分子散射。这个实验结果使科学家们松了一口气, 证明反质子的确是稳定的, 可以在储存环中长期地储存。

(上接第 2 页)

(14) 远离 β 稳定线核素的研究: 中能质子 (如 2 京电子伏) 和原子核间的散裂、爆裂和裂变反应可以产生大量未知的远离 β 稳定线核素。此类短寿命核素可能尚有千种以上未被发现。鉴定这些新核并测量其核性质对进一步了解原子核结构有意义。国际上对 2 京电子伏能区质子尚未进行探索, 因此有其特点。用在线同位素分离器可研究寿命短到几十毫秒的同位素。引出的分离后离子束可用于鉴定新核以及测量其寿命、衰变性质、核质量、自旋、磁矩和电荷半径等。

(15) 脉冲散裂中子源: 中子在固体物理、化学、生物、冶金和材料科学等诸领域中有广泛应用, 其范围遍及各工业、农业、医学卫生和国防等部门。中子散射 (包括衍射和非弹性散射) 技术为研究金属、合金、无机晶体、高聚物、生物大分子、无晶型和玻璃物质以及金属氢化物、超导体、电解质、液晶等材料的结构和性质

至于第二个问题, 困难在于高能质子束打靶产生的反质子束强度既弱, 角散度和能散度又都很大。这样的反质子束注入到环形真空中去后, 绝大部分反质子都将会飞向真空室壁而损失掉。为了解决这个问题, 他们建造了反质子累积器 AA, 利用近几年发展起来的电子“冷却”技术, 终于获得了性能良好的足够强度的反质子束。反质子累积器 AA 是质子-反质子对撞机的关键, 它的成败起着决定性的作用。

西欧这个质子-反质子对撞机的工作大致是这样的。由 26 京电子伏质子同步加速器 PS 引出的质子束打在一个直径几毫米, 长 11 厘米的钨靶上, 产生能量为 3.5 京电子伏的反质子束。然后, 反质子束被注入到反质子累积器 AA 中。随着一束团接着一束团的反质子被注入, 反质子束在累积器 AA 中, 逐步增强, 性能也由于“冷却”而大为改善, 达到一定强度后, 它再被注入到质子同步加速器 PS 中去。在这里反质子由 3.5 京电子伏被加速到能量 26 京电子伏。两条不同的束流输运线分别把 26 京电子伏的质子和 26 京电子伏的反质子束注入超级质子同步加速器 SPS。由于质子和反质子所带电荷符号相反, 所以在加速器环中它们以相反的方向运动。大加速器 SPS 同时把质子和反质子加速到能量 270 京电子伏, 并使它们在特定的位置发生对撞。

西欧联合核子研究中心的质子-反质子对撞机计划的实现, 相当于把实验室系的人射粒子能量提高到了 150000 京电子伏, 但是还是远远不能满足高能物理学家们的要求。美国费米实验室正在计划建造一个能量更高的质子-反质子对撞机, 每束的能量为 1000 京电子伏, 相当于实验室系的人射粒子能量 2000000 京电子伏。随着人们对微观世界认识的不断深入, 要求加速器的能量也就越来越高。加速器的发展必然会有新的成就。

的良好方法。快中子还用于材料的辐射效应, 包括损伤的研究, 为寻找热核反应堆等所需材料服务。由增强器加速的 2 京电子伏脉冲质子束轰击铅或铀靶, 每个质子可分别产生约 43 个和 70 个快中子。这种中子源的特点是脉冲式, 并处于次临界态, 慢化控制方便, 可以得到高脉冲通量的超热中子、快中子、热中子束和冷中子。尤其重要的是其超热中子通量可高过反应堆的一至几个数量级, 为非弹性散射研究物质结构开辟广阔前途。

(16) 以上还只是讨论了质子中能加速器的部分应用。

(17) 低能加速器产生的每核子约 ≤ 10 兆电子伏的粒子束也具广泛用途。除用于一些精度较高的核物理研究外, 可用于成分分析 (特别是表面分析) 如背散射、质子荧光分析、定年代考古等和物质结构分析如沟道效应等, 并且用途还在不断扩展。