

# 粒子加速器

*lizi jiasugi*

1979年全国加速器技术交流会论文选集

TK5-53

1  
2

# 粒子加速器

一九八〇年五月

# 目 录

|   |     |
|---|-----|
| 一、前 言 .....                                   | 1   |
| 二、1979年全国加速器技术交流会开幕词 .....                    | 2   |
| 三、国外高能加速器发展现状和我国高能加速器方案概况 .....               | 5   |
| 四、兰州重离子研究装置 .....                             | 15  |
| 五、中国科技大学电子同步辐射加速器的主要设计考虑 .....                | 27  |
| 六、高压型加速器 .....                                | 35  |
| 1. 6兆伏串列静电加速器的设计和研究 .....                     | 35  |
| 2. 4.5兆伏静电加速器 .....                           | 43  |
| 3. 质子静电加速器改建方案与工作进展 .....                     | 52  |
| 4. 高压型加速器的生产及改进 .....                         | 61  |
| 5. 6兆伏串列加速器注入器束流光学设计 .....                    | 68  |
| 6. 静电加速器脉冲化装置及有关特性 .....                      | 75  |
| 7. 2.5兆伏质子静电加速器毫微秒束流脉冲化装置 .....               | 85  |
| 8. 质子静电加速器毫微秒脉冲束流的测量 .....                    | 94  |
| 9. 多电荷重离子冷阴极端引出 <i>PIG</i> 源实验特性 .....        | 98  |
| 10. 双等离子体负氢离子源的实验研究 .....                     | 103 |
| 11. <i>ЭГ-2.5</i> 静电加速器的运行 .....              | 109 |
| 12. 束流相图仪的设计与性能 .....                         | 115 |
| 13. 静电加速器高梯度加速管段的特性试验 .....                   | 120 |
| 14. 引出400千伏电压的绝缘套管 .....                      | 124 |
| 15. 4.5兆伏静电加速器聚焦系统的设计 .....                   | 125 |
| 16. 质子静电加速器运行与改进 .....                        | 126 |
| 七、电子直线加速器 .....                               | 127 |
| 1. 强流短脉冲电子直线加速器设计的若干问题 .....                  | 127 |
| 2. 强流短脉冲电子直线加速器模型的纵向粒子动力学计算和设计 .....          | 134 |
| 3. 20 <i>Mev</i> 医用电子直线加速器 .....              | 141 |
| 4. <i>BJ-10</i> 医用电子直线加速器三均匀段盘荷波导加速管的设计 ..... | 150 |
| 5. 多周期驻波加速结构的一种耦合腔的研究 .....                   | 158 |
| 6. 电子直线加速器盘荷波导耦合器的匹配 .....                    | 163 |
| 7. 螺旋波导加速腔的静态实验 .....                         | 170 |
| 8. 20 <i>Mev</i> 医用电子直线加速器的微波系统 .....         | 175 |
| 9. 20 <i>Mev</i> 医用电子直线加速器电子枪 .....           | 182 |
| 10. 低注入电压的电子直线加速器 .....                       | 189 |
| 11. 20 <i>Mev</i> 医用电子直线加速器频率稳定系统 .....       | 197 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 12. 56MW脉冲调制器 .....                   | 209        |
| 13. 测定高压脉冲顶部变化的一种特殊方法 .....           | 213        |
| 14. BJ-10 医用电子直线加速器的设计调整和运行 .....     | 217        |
| 15. 20Mev医用电子直线加速器治疗头机械设计 .....       | 231        |
| 16. 20Mev医用电子直线加速器控制系统 .....          | 232        |
| <b>八、回旋加速器 .....</b>                  | <b>233</b> |
| 1. 建造中的分离扇回旋加速器磁铁 .....               | 233        |
| 2. 分离扇回旋加速器(SSC)中主磁场缺陷的理论研究 .....     | 243        |
| 3. 兰州分离扇回旋加速器的主体结构设计 .....            | 254        |
| 4. 1.7米回旋加速器1/3模型磁铁实验 .....           | 263        |
| 5. 1.2米回旋加速器改进概况 .....                | 270        |
| 6. 1.5米回旋加速器的改进和运行 .....              | 279        |
| 7. 高频加速腔的不均匀性问题 .....                 | 286        |
| 8. H-120回旋加速器技术改造方案 .....             | 292        |
| 9. H-120回旋加速器高频系统设计与模拟 .....          | 297        |
| 10. H-120回旋加速器中心区的计算与实验 .....         | 304        |
| 11. 回旋加速器中心区的改进 .....                 | 313        |
| 12. H-120回旋加速器引出轨道计算 .....            | 321        |
| 13. 同轴线圈垫补1.2米回旋加速器平均磁场 .....         | 330        |
| 14. 可变能量回旋加速器磁场测量装置 .....             | 338        |
| 15. 高精度大电流稳流电源的研制 .....               | 343        |
| 16. 回旋加速器谐波线圈供电设备 .....               | 348        |
| 17. H-120回旋加速器磁场设计与模拟 .....           | 352        |
| 18. 分离扇加速器注入系统的弯转磁铁 .....             | 353        |
| 19. 分离扇形回旋加速器主磁铁52°极心断面研究 .....       | 354        |
| <b>九、加速器部件研制、实验装置、理论探讨及其他 .....</b>   | <b>355</b> |
| 1. 电子束磁扫描装置 .....                     | 355        |
| 2. 用于电子直线加速器的S波段脉冲大功率速调管 .....        | 363        |
| 3. 碳剥离膜寿命的初步研究 .....                  | 371        |
| 4. 用有限元素法计算二维磁场 .....                 | 377        |
| 5. 电磁铁的正交回归设计和计算机辅助分析 .....           | 384        |
| 6. 高磁场高分辨率磁极边界研究 .....                | 392        |
| 7. 可变能量回旋加速器的磁场计算 .....               | 399        |
| 8. 带有稳频器和匀场装置的核磁共振稳场系统 .....          | 407        |
| 9. 束流输运计算中模拟机的应用 .....                | 412        |
| 10. 串列加速器脉冲束的六维传输理论 .....             | 415        |
| 11. 设计束流输运系统的一个六维计算方法 .....           | 420        |
| 12. 质子直线加速器横向相空间束流匹配方法 .....          | 430        |
| 13. 255°双聚焦质量分析磁场——离子光学设计和场成形计算 ..... | 438        |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 14. 计算四极透镜聚焦参数的一种方法 .....    | 446        |
| 15. 600KV 高压倍加器高频离子源 .....   | 447        |
| 16. 阻尼振荡降优值电路的设计 .....       | 448        |
| 17. 脉冲高频离子源 .....            | 449        |
| 18. 一个与直流发电机配合的晶体管稳流线路 ..... | 450        |
| 19. 核磁共振测磁仪 .....            | 451        |
| <b>十、全国主要低能加速器一览表 .....</b>  | <b>452</b> |

## 一、前 言

粒子加速器自从 1930 年左右出现以来,无论是做为核物理、基本粒子物理研究的手段,还是国民经济、国防建设等方面的应用,它在世界范围内都得到异常迅速的发展。我国在解放之初,加速器处于一穷二白的状态,三十年来在党的关怀下,从无到有,从小到大,取得了很大的成绩。许多研究所、大学和工厂都开展了加速器的研制和生产,培养出千人以上的专业队伍,建成了 60 余台各种类型的低能加速器,并为科研和应用做出了贡献。粉碎“四人帮”以后,三个规模较大的加速器工程,高能加速器、重离子加速器和同步辐射加速器,也都开始筹建,在我国加速器科技领域出现了一片繁荣昌盛的景象。为了进一步促进我国加速器科学技术的发展,提高我国加速器工作者的水平,于 1979 年 4 月,中国科学院二局组织全国加速器工作者在成都召开了全国加速器技术交流会,广泛开展了科技成果的交流和学术讨论的活动。会议委托粒子加速器学会筹委会负责会议报告的选编和出版工作。粒子加速器学会筹委会委托谢家麟、徐建铭、陈佳洱、刘乃泉、张素忱等五位同志组成编委会,负责该会议集的编辑出版工作由谢家麟同志担任主编。

关于会议论文集的编选工作,首先由各提供论文的单位负责将本单位在该会议上的报告进行初选,然后交由编委会编审。稿件中有的已在或即将在其他杂志刊物发表,有的内容或形式不适合会议集的出版要求,这些我们只好割爱。另外,由于篇幅的限制,有些论文只好以摘要形式发表。

最后,由于编辑水平有限,加以时间仓促,乖误之处,在所难免,尚望读者批评指正。

# 1979 年全国加速器技术交流会开幕词

章 洪 琛

代表们、同志们：

中国科学院主持召开的全国加速器技术交流会，经过一年多的筹备，今天正式开幕了。参加这次会议的共有 58 个单位、200 多名代表，还有特邀代表 2 名。首先，我代表中国科学院向代表们表示热烈的欢迎。对前来参加今天开幕式的省委书记杜兴元等省市领导同志表示热烈的欢迎。对领导和组织筹备这次会议的四川省委、省科委、省教育局和成都分院等领导机关以及为筹备这次会议付出了辛勤劳动的四川大学的领导和同志们表示衷心的感谢。

我们这次会议，是根据一九七七年十月全国自然学科规划会议代表们的倡议确定的。党的十一届三中全会决定从今年起全党工作的着重点转移到社会主义现代化建设上来。为了进一步贯彻三中全会和中央工作会议精神，中央确定要对国民经济进行三年的调整、改革、整顿、提高，在这样重要时刻召开这次会议意义是很大的，我们应当不失时机地迅速实现这个战略转移。这次会议的目的，主要是为促进我国加速器技术的发展，总结交流我国二十多年来有关加速器的理论、设计、制造、改建和加速器维护使用的经验以及加速器的新原理、新技术、新工艺等问题。同时，在调研国际上加速器的基础上，探讨我国加速器发展的新途径，为赶超世界先进水平做出贡献。

为了开好这次会议，许多单位做了大量的准备工作，提出 118 篇学术报告，并对这些报告进行了认真的审查。如北京 401 所领导十分重视这次会议，今年一、二月份，就在本所范围内多次举行学术报告会，在群众广泛评议的基础上选出较好的学术报告，提交大会交流。这种做法，对提高本单位的学术水平和开好这次交流会都是一个促进。为了适应全党工作着重点的转移和形势发展的需要，今后要大力开展国内外学术交流活动。

我们大家知道，人们对物质微观世界的认识，基本可分为三个阶段。第一个阶段是对原子、分子的认识；第二个阶段是对原子核的认识；第三个阶段是对基本粒子的认识。目前，人们对原子核和基本粒子结构和变革规律的研究，其重要实验手段之一，就是低能、中能和高能加速器。从 30 年代人们制造出第一台加速器开始，至今 40 多年间相继研制了各种类型加速器。随着科学技术的发展，加速器不仅在基础科学研究方面是重要的实验手段，在工业、农业、国防、医学、材料等方面都得到了广泛的应用，引起了各方面的重视。例如用电子打靶产生的 X、Y 射线进行无损探伤，以及目前进一步发展到利用中子或质子作透视照像，拍出的照片层次非常清晰；用重离子加速器作为一种特殊辐射源，可以代替中子，对反应堆材料和其它防辐射材料进行辐照损伤实验研究等，这对某些有特殊要求的工业材料是极为重要的；再如利用  $\gamma$  射线对某些高分子材料(塑料、化学纤维等)的辐照改性收到很好的效果。还有对半导体材料进行离子注入后，提高了半导体元件的成品率，这对发展大规模集成电路非常重要。在农业方面，利用加速器产生的  $\gamma$  射线或中子辐照种子，可以提高发芽率，同时可以消灭病虫害；另外，我们的放射性同位素虽大量是反应堆生产的，但从品种上来说，

三分之二是用加速器生产的。在医疗方面，用加速器治癌，有独特的疗效。近年来不仅用直线加速器或中子发生器来治癌比较普遍，而且用中能加速器产生的 $\pi$ -介子治癌效果更好。预料用重离子加速器治癌其效果会更令人满意。在能源研究方面，受控热核反应装置，是人类探索研究新能源的重要途径。现在有人提出试图用高能重离子束向心打氘靶“点火”，认为较用等离子体点火更有希望。还有利用各种加速器进行固体物理研究，用各种离子束做为探针研究物质的超精细结构是非常优越的手段。加速器在国防上的应用更为广泛，如用强流电子加速器模拟核爆炸或提供有用的反应截面数据，以便于更好地设计武器。最近，还有人提出“粒子武器”等等。总之，加速器对国民经济、国防建设和科学技术现代化是必不可少的实验手段。

我们知道，国外对加速器技术已有四十几年的发展历史。但我国的加速器仅从五十年代才开始的。当时在赵忠尧同志率领下，在北京建造的  $2.5\text{Mev}$  质子静电加速器和谢家麟同志带领下于六十年代初在北京建造的  $30\text{Mev}$  电子直线加速器，是我国同类型加速器中最早的两台加速器，其中  $30\text{Mev}$  加速器仍是我国同类型加速器中能量最高的一台。

我国加速器技术，较普通的是从五十年代末和六十年代初开始发展起来的。当时我们与国外的差距只有十几年的时间。六十年代初，我国的科研工作者，在苏修撕毁合同撤走专家的情况下，自力更生将兰州的一台 1.5 米回旋加速器安装调试出来，于一九七二年又改为能加速碳、氮、氧的重离子加速器并合成了镆、镎、铷元素；在国家科委、一机部和二机部领导下，我国研制成功三台 1.2 米回旋加速器。同时，还研制了许多高压倍加器，电子和质子静电加速器以及电子医疗加速器等。为我国在低能核物理和同位素生产以及工农业生产、国防建设做出了重要贡献。最近一机部自动化所与无锡彩印厂联合研制成功工业辐照用电子加速器，为我国辐照化学工业提供了一种有力的手段。

我国的加速器虽然初具规模，并做出了一定成绩，但与世界先进水平比较起来，还有很大的差距。我国目前只有低能加速器，没有中能和高能加速器。有的同志指出可能是落后二、三十年的历史，这是符合实际的。按照学科发展规划，我们计划建造的 500 亿电子伏质子同步加速器，于 80 年代建成后，只能算进入高能加速器的行列。计划建造的分离扇和螺旋波导重离子加速器和电子同步辐射加速器，如按计划完成，其中有的将可达到 70 年代的水平。为了使加速器出束以后能立即进行实验物理工作，希望有关单位在研制加速器的同时，要抓紧进行各种探测器的研制和实验物理人员的培养工作。为了组织实现上述规划和加强学术讨论，学科规划会议期间，有的代表建议在全国要有个抓总的单位，对此建议，我们表示积极支持。

为了开好这次学术交流会，向代表同志们提出几点要求：

一、要充分发扬学术民主、贯彻百家争鸣的方针。没有民主就没有科学。因此我们这次会议，在安排好大会和小会交流的同时，要特别强调开展讨论，只有通过充分讨论、集思广益，才能对问题认识得更深入更接近实际。

二、要持谦虚谨慎的学习态度。参加这次会议的代表都做了不少工作，取得了一定的经验和成绩。有整机运行的经验，有改进安装的经验，有整机和部件研制的经验，还有新技术，新工艺和新原理方面的经验。这是在加速器技术方面实现赶超的重要途径。例如彭桓武、庄杰佳同志关于激光加速器的研究，这是一项尝试性的科学工作。其意义是将会找到一种用激光加速粒子的机制，其每米加速的能量可达 800 亿电子伏（通常电子直线每米可加速一千万



电子伏),这样就可以大大地缩短加速器的长度,降低造价。另外,也有联系实际为科研、工农业生产、国防服务的经验。我们要善于发现别人的长处,虚心学习别人的经验,才能不断改进自己的工作。

三、要联系我国实际,有批判地吸取国外的先进经验。国外的加速器技术发展很快。在美国的费米高能加速器已达 5000 亿电子伏。目前美国和西欧正在研制的对撞机,其能量可达上万亿电子伏。他们的超导技术和电子冷却技术在加速器上也得到应用。总之,国外的一切先进技术都应当学习。

同志们,我们这个会议之所以顺利召开,是和川大 720 工程同志们的努力分不开的,是和四川省委、川大党委领导的重视和支持分不开的。在这里,我再次代表科学院、会议领导小组和全体代表向他们表示感谢。预祝大会圆满成功。

### 三、国外高能加速器发展现状和我国高能加速器方案概况

谢家麟

中国科学院高能物理研究所

#### 摘要

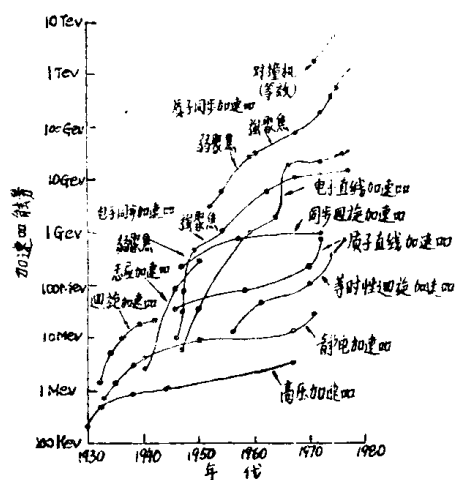
报告中首先介绍国外高能加速器在建造、技术、理论和应用各方面在70年代的主要发展情况。然后,在这个基础上,简略讨论我国目前正在建造的高能加速器——50GeV 质子同步加速器的设计方案和有关问题。

#### (一) 引言

做为研究“基本”粒子内部结构和相互作用的主要工具高能加速器,一般是指在50年代初期开始发展的能量约为1GeV 以上的质子或电子加速器。它们出现至今已有近30年的历史了。为了建造和使用高能加速器,必须组织大量的不同专业的科研人员和工程技术人员,在现代科学技术最新成就的基础上,集中他们的智慧和技巧,为一个共同的目标而努力。它是一种规模庞大的科研设施。以美国为例,发展至今即已投资30余亿美元。它的演变过程,内容繁浩,这里只将主要是70年代的情况简单地谈一谈,然后,在了解国外在建造、技术、理论和应用各方面的发展的基础上,介绍我国第一台高能加速器——50GeV 质子同步加速器的设计方案,说明它与国外最新发展的联系并讨论一些有关的设计问题。

#### (二) 国外高能加速器建造情况

为了说明加速器向高能发展的过程,可参阅图三-1〔注〕,它表示不同类型加速器的能量随年代而提高的情况。由图可以看出:在向高能发展的过程中,在质子方面,直流加速器(高压、静电)受到击穿的限制而为回旋加速器所代替;回旋加速器受到相对论质量增长的限制而为同步回旋加速器所代替;同步回旋加速器受到体积庞大的限制而为同步加速器所代替;而在同步加速器中弱聚焦型磁铁过大又为强



图三-1 各种加速器的能量随年代的演变

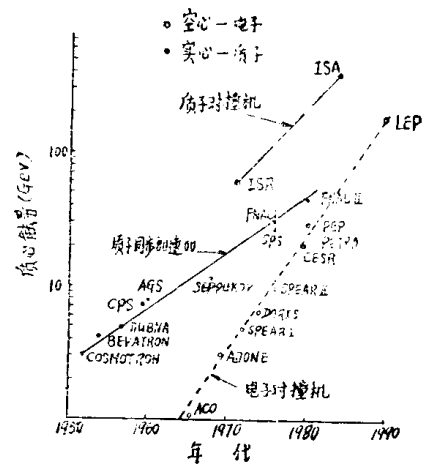
〔注〕 图三-1、三-3、三-4取自 W. K. H. Panobaky, proc. 9th International Confereuce on Higl Energy Accelsaton(1974)曾加适当补充。

聚焦型所代替。与此类似，在电子方面：感应加速器因磁体庞大而让位于同步加速器；同步加速器因辐射损失而让位于电子直线加速器。因此，到目前为止，能量最高的质子加速器和电子加速器分别为质子强聚焦同步加速器和电子直线加速器。

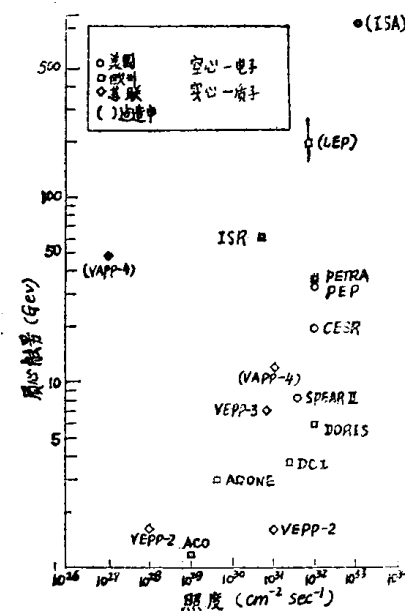
由图还可以看出，加速器的能量增长率为每十年一个数量级以上。如果我们对每单位能量的造价进行比较，就还会发现它是大致以每十年一个数量级的速率下降，这是加速器科学技术进步的结果。

尽管在实验室坐标系中加速粒子能量提高很快，但在质量中心坐标系中高能加速器能量的提高三十年来却只有一个数量级。（参阅图三-2〔注〕）实际上只有质心能量才是产生新粒子或散射实验的有效作用能。这就使人想到，如果使两束加速粒子对头相撞，则因有效作用能是两束粒子的动能之和，它将会远远大于同样一束加速粒子打在静止靶上的作用。这个考虑导致对撞机的发展。近年已先后建成：电子-电子，电子-正电子，质子-质子对撞机，而质子-反质子和电子-质子对撞机也都分别处于研制和讨论的阶段。由图三-2曲线可见，对撞机的出现，大大提高了有效作用能，它是探索新的高能现象的有力工具。

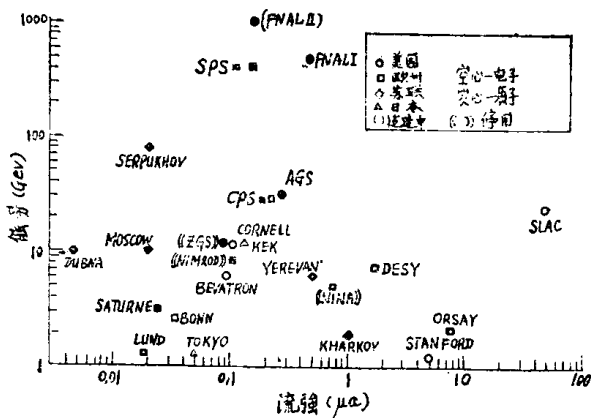
对撞机既然能如此提高有效作用能，那么，为什么不用对撞机来代替加速器呢？原因在于：为了产生稀有事例和进行统计性好的实验，必须有很强的束流以产生较多的事例。图



图三-2 质心能量随年代的演变



图三-4 对撞机质心能量与照度分布图



图三-3 高能加速器能量与流强分布图

三-3和图三-4分别给出加速器能量与流强和对撞机质心能量与照度的分布。如果将加速器流强也用照度  $L_{\text{加速器}}$  表示，则可得到：

$$L_{\text{加速器}} \approx (10^4 \div 16^6) L_{\text{对撞机}}$$

式中  $L_{\text{对撞机}}$  表示对撞机的照度。上式说明使用对撞机做实验取得数据的速度是远远不能与使用加速器相比拟的。当然，除了取得数据速度的考虑之外，加速器可以提供次级束、三级束，

〔注〕 图三-2取自 J. R. SANFORD IEEE NS-24, 1845(1977)

同时实验本底较低，这些也是对撞机不能做到的。因此，对撞机只能是加速器的补充或实验装置，而不能代替加速器的作用。在本文中，我们将把对撞机和加速器一同考虑，不另区分。

除了上面图中给出的已经建成及正在兴建的一些主要的高能加速器外，各大中心还提出了如下的远景规划：

(1) 西欧中心在  $sps$  中产生  $p-\bar{p}$  对撞的计划已获批准。同时也考虑建造  $p-p$  对撞机 ( $LSR$ ) 和在  $sps$  隧道中增建  $25\text{Gev}$  的电子加速器产生  $e-p$  对撞。

(2) 西欧中心的  $2 \times 100\text{Gev}$  的  $e^\pm$  对撞机 ( $LEP$ ) 已通过学术审议。此机规模庞大。周长约达 30 公里。其中电子直线加速器每圈提供  $1.3\text{Gev}$  的能量，高频消耗功率将达  $200\text{Mw}$ ，目前磁铁及其他关键部件模型正在试制，但计划有待正式批准。

(3) 美费米国家加速器实验所拟在完成能量倍增器 ( $1\text{TeV}$ ) 后，使用电子冷却环提供冷却的  $\bar{p}$  与  $p$  在  $1\text{TeV}$  对撞。同时也考虑  $p-p$  对撞机 ( $POPAE$ ) 和增建  $20\text{Gev}$  电子同步加速器以产生  $e-p$  对撞。

(4) 美  $PEP$  和西德  $PETRA$  两台  $e^\pm$  对撞机都有增建质子同步加速器以产生  $e-p$  对撞的规划。

(5) 日本有三环 ( $TRISTAN$ ) 规划。拟用已有的  $12\text{Gev}$   $KEK$  注入到  $-70\text{Gev}$  常规磁铁质子同步加速器，以后改用超导磁铁提高能量至  $200\text{Gev}$ 。在同一隧道再建造一台  $16\text{Gev}$  电子同步加速器，以便  $e-p$  对撞。目前电子同步加速器的注入器  $2.5\text{Gev}$  电子直线加速器已经兴建，整个规划也已通过了学术审议。

(6) 苏联有“加速器—对撞机复合体” ( $UNK$ ) 计划。拟用现有的  $76\text{Gev}$  质子同步加速器做注入器，注入到一台  $200\text{Gev}$  常规磁铁加速器。加速后再注入在同一隧道的一台  $3\text{TeV}$  超导加速器。另外，也在考虑建造一台电子同步加速器以便  $e-p$  对撞。

此外，还有国际超高能加速器 ( $VBA \cdot 10\text{TeV}$ ) 的讨论等等，这里就不拟详述了。

### (三) 近年高能加速器技术的主要发展

下面将高能加速器技术的发展分为五个主要方面，加以介绍。

#### (1) 总体布局

根据前面讨论的加速器建造情况，我们可以看出：所有的高能加速器中心都向综合利用，即向加速器——对撞机复合体系发展。这样，既可进行高等效照度的静止靶实验，又可进行高质心能量的  $p-\bar{p}$ ， $e-p$ ， $e^-e^+$ ， $p-p$  等多种对撞实验。这可以说是总体布局的战略性的发展。

第二个重要发展就是级联式的总体结构。60 年代初期建造的强聚焦同步加速器、流强都是限于  $10^{11}$  质子/脉冲的量级。后来发现这是由于流强大时带电粒子的空间电荷力部份地抵消了磁场聚焦力，因而使自由振荡频率移动到强烈的共振线附近，从而导致束流损失的原因。(参阅图三-5(a)) 据分析，可

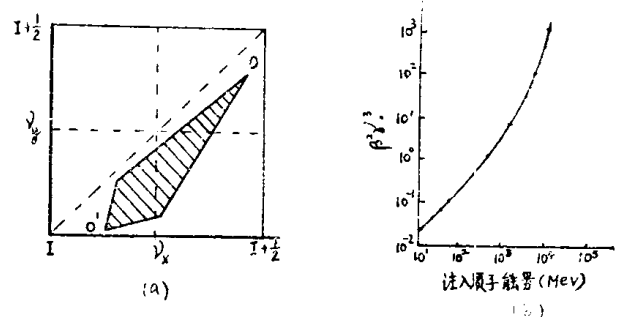


图 三-5

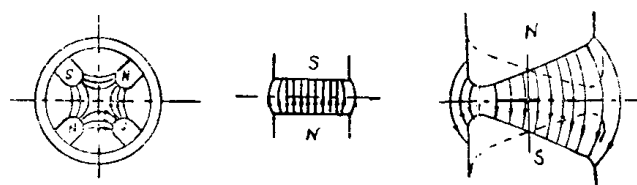
(a) 空间电荷引起的自由振荡频率 (工作点) 的移动。  
 ○ 为设计的工作点，阴影部份表示束流的实际工作面。  
 (b) 与可能被加速的粒子数成比例的量 ( $\beta^2\gamma^3$ ) 随注入能量的变化

能达到的流强与粒子注入时的  $\beta^2\gamma^3$  ( $\beta=v/c, \gamma=(1-\beta^2)^{-1/2}$ ) 成比例。因此, 提高注入能量可以大幅度地提高可能加速的粒子数(参阅图三-5(b))。在这个认识的指导下, 许多已经建成的加速器纷纷改装, 提高注入器能量, 而 70 年代新建的加速器, 则都采用级联式总体布局, 即在主加速器之前, 再用一个加速器专为提高粒子能量之用, 叫做增强器。这种方案允许在主加速器上使用较小的磁极间隙, 从而降低了造价和运行费用, 同时可以获得更大的流强。

另外, 随着高能加速器投资愈来愈大, 发展了两个与经济有关的概念。一是“一隧多用”即在同一隧道中建造两台加速器。如一台使用常规磁铁, 一台使用超导磁体, 两者能量可以相差几倍; 或者一台是质子加速器, 一台是电子加速器。这样的布局可以大大节约基建投资。另一是“分期提高”, 即在建器时先用部份磁铁, 然后增加磁铁数目或提高磁场强度, 最后改用超导磁体。这样的做法可使建造投资分摊在较长的时期内, 避免短期投资过大的困难。

## (2) 磁铁系统

建造强聚焦同步加速器, 有两种不同的磁铁系统可供选择, 采用如图三-6(a) (b) 所示四极磁铁和二极磁铁分别执行聚焦和偏转功能的, 叫做分离作用。采用如图三-6(c) 所示的将聚焦和偏转功能同时在一块磁铁中执行的叫做复合作用。



图三-6 磁铁截面和磁场分布图

(a) 四极聚焦磁铁 (b) 二极偏转磁铁 (c) 复合聚焦、偏转磁铁

在 1953 年世界上第一台强聚焦质子同步加速器(AGS)建造之初, 美国布鲁克海文实验室曾就应该选择分离作用还是复合作用的磁铁系统展开辩论。最后认为复合作用没有电源同步困难、引出容易、而且器可建得比较紧凑的论点占了上风, 故采用了复合作用磁铁系统。后来其他几个高能加速器的设计也都延袭了这个看法。

在 70 年代初建成的费米实验室加速器上, 首先突破了这个传统观念的束缚, 采用了分离作用磁铁系统。后来, 事实证明, 器的大小与造价, 和使用哪种磁铁系统关系不大, 而分离作用, 既不容易饱和, 又容易调正工作点、具有很大的灵活性, 是磁铁系统的一个发展。

由于铁磁材料饱和的关系, 即便采用分离作用的磁铁系统, 偏转磁铁的最高场强也只能用到 2.5T, 而超导磁体的磁场强度却可达 5T 以上, 因此, 超导磁体早就引起加速器工作者的很大重视了。

能工作在高场强的超导合金, 是在 1961 年发现的, 但将这些合金用在产生变化磁场的加速器磁体上, 还必须解决电流分布均匀、损耗很少、性能稳定和工艺的重复性等一系列问题。至今方才基本达到可以在工厂成批生产的阶段。

目前的超导磁体, 广泛使用铌钛材料, 典型的性能指标有如下表所示:

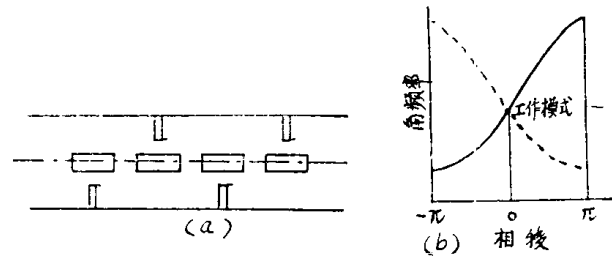
表(1) 某些超导磁体的参数

| 加 速 器   | 孔 径 (cm) | 长 度 (m) | 上 升 时 间 (s) | 中 心 磁 场 (T) |
|---------|----------|---------|-------------|-------------|
| ISA     | 8        | 4.6     | 120         | 5           |
| FNAL    | 7        | 6.3     | 30          | 4.5         |
| LBL     | 14       | 1.0     | 5           | 4.5         |
| PEP(II) | 8—10     | 5       | 20—60       | 6—8         |

与使用常规磁铁相比较，使用超导磁体后，加速器平均半径可减到一半以下，造价可大幅度降低，而运转费用则只有 $\frac{1}{3}$ 到 $\frac{1}{2}$ ，其优越性是十分明显的。尽管技术上比较复杂，但可以预言，以后建造高能加速器( $>1TeV$ )，使用超导磁体将是必然的趋势。

### (3) 高频系统

做为注入器的直线加速器是高能加速器的一个关键组成部份。它在近年的一个重要进展就是发明了双周期稳定结构(参阅图(7))的高频加速系统。采用这种结构、可使工作点附近的模式间隔增大，电磁波在结构中的群速变高，从而增加了腔体对尺寸公差和束流负载的稳定性，改进了束流的性能。



图三-7 直线加速器的双周期稳定结构

(a) 杆耦合式加速腔 (b) 双周期结构的色散曲线及工作点

在 1971 改建的 AGS 和 1972 起动的 FNAL 直线加速器上，都使用了这种结构。

注入直线加速器的预注入器，目前普遍使用 750keV 的高压加速器。这种加速器的造价随能量而指数地上升。因此，研究了在上述的直线加速器之前，增加一段使用高频同时聚焦和加速的加速腔(RFQ)，以便降低对预注入器能量的要求。RFQ 的概念提出已经很久了，但到 70 年代中才在苏联和美国分别建成注入能量为 100keV 及 250keV 的模型、从而达到了实用阶段。

高能质子同步加速器的高频加速系统，一般使用铁氧体加载的同轴线谐振腔在驻波状态工作。在西欧中心 SPS 上首先采用了与电子直线加速器类似的行波加速结构。它有足够的频宽故可避免调谐的必要。同时对电源呈匹配负载，故可将发射机放在远处，而不必担心“长线效应”。

用超导材料制成的加速腔原则上可以用很少的高频功率，产生很高的加速场强，但实际上由于电子负载、临界磁场、表面不均匀性等限制，到目前为止，加速场强并不能用得很高；不过，超导腔对于减少高频功率损耗，提高负载周期还是十分有效的，因此，在拟建的高频功率消耗很大的正负电子对撞机上(如 LEP)，计划中将予以采用。

此外，在高频功率源方面，近年也有很大的发展、西欧和美国分别建成了 600KW/500MHz 和 500KW/353MHz 的连续波速调管；苏联发明了偏转调制的 5MW/181MHz 连续波和 40MW/430MHz 长脉冲的 GYROCON 管；美国 SLAC 实现了将高频功率源的脉冲宽度转换为脉冲功率的 SLED 方案。这些发展都为加速器向更高能量发展创造了条件。

### (4) 计算机的使用

在 高能加速器的研制工作上，有两个方面与计算机有密切的关系。一方面是辅助设计，由于加速器设计工作牵扯到较复杂的电磁场分布、粒子运动和两者的相互作用问题，计算的工作量十分庞大，使用计算机辅助设计是必不可少的。近年已编制了多种关于磁铁、高频腔体、聚焦结构、粒子运动等等的计算程序，普遍地为设计工作者使用。另一方面是计算机控制。假如说在 60 年代这还是有争议的课题，到 70 年代它就已经成为与辅助设计同样地被认为是必不可少的措施了。

所谓计算机控制，至今为止，其主要作用是做为运行人员与加速器之间的媒介，使操纵大为集中和简化，如开关机、状态和参数的显示和调正、事故处理、诊断测量等。另外，也对某些系统进行实时、在线控制，如闭轨控制等。计算机控制提高了加速器运行的效率，但

也要为此付出代价，就是操纵人员必须同时掌握加速器原理、监测元件性能、接口、网络、语言、程序等，需要很长的训练过程。

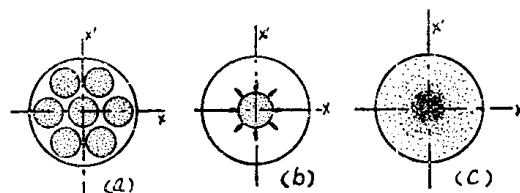
在计算机系统的设计思想上，70年代初期建成的美国 *FNAL* 加速器采取集中控制；中期建成的西欧中心的 *SPS* 上，采用分布式控制；70年代后期建成的西德的 *PETRA* 采用非集中式；而即将建成的美国 *PEP* 上则采取广泛使用微处理机的非集中式控制。由于微处理机的大量使用，集中式与分布式的界线已逐渐变得模糊，上述情况又与各加速器及实验室的具体条件与要求有关，但是大体上还是代表了高能加速器计算机控制设计思想的发展趋势。

### (5) 负氢离子( $H^-$ )注入

负氢离子穿过固体薄膜时，可因碰撞而损失电子，由  $H^-$  转变为质子。当离子运动速度大于轨道电子速度时，这种转化的效率接近百分之百。

加速  $H^-$  在回旋加速器和静电加速器上早已实现，但使用在高能加速器上，却是在70年代  $H^-$  离子源发展的基础上由美国阿贡实验室和 *FNAL* 先后试验成功的。

$H^-$  注入的主要优点在于下列几个方面。首先由于  $H^-$  穿过剥离薄膜转化为质子是一种不可逆过程，李维定理不再适用。因此同步加速器真空盒中质子束的亮度可以超过注入器直线加速器中束流的亮度(参阅图三-8)。其次， $H^-$  可连续注入到同步加速器中，直到累积了足够的粒子数，因此，注入电流不必很大。这就减少了予注入器和直线加速器的束流负载效应，另外， $H^-$  束流注入装置的部件和控制也都是比较简单的。美国 *FNAL* 的增强器使用  $H^-$  时，最大引出粒子数为  $3.93 \times 10^{13}$ ；而使用  $H^+$  时最大粒子数为  $3.06 \times 10^{13}$ ，即采用  $H^-$  注入使加速器流强提高了约 30%。



图三-8 在横向相空间质子与  $H^-$  注入的比较  
(a) 质子多圈注入相空间填充情况 (b)(c)  $H^-$  注入相空间填充情况

高能加速器技术上的主要发展除了前面介绍的五个方面以外，需要提到的还有束流强度、位置、形状的无阻拦监测技术；磁场和电场的自动测量技术；大体积高真空技术；磁体和腔体的准直技术；电子冷却和随机冷却技术；极化源、极化靶和加速极化粒子技术等等，但为篇幅所限，这里就不能一一讨论了。

## (四) 近年高能加速器理论的进展

在环形同步加速器中，设计理论的任务是研究粒子在三维势垒中振荡运动的稳定性。纵向振荡是在高频加速场中的相振荡；横向振荡是在聚焦、偏转磁铁系统中的自由振荡。早期理论工作主要是研究单个粒子的振荡运动。其结果是明确了共振线、稳定区、公差影响等表征粒子运动的基本特征，为设计工作奠定了理论基础。

当加速器流强逐渐增大时，就发现单粒子运动理论的结果，不足以说明实际上遇到的各种现象。这就导致以研究强流效应为主要对象的近年加速器设计理论的发展。首先，根据加速粒子数目增大时会引起横向势垒的变化，发现了存在着“空间电荷限”，而提高注入能量可以显著地提高加速粒子数目(见前(三)(1)总体布局一节)。这个认识为设计强流高能加速器提供了重要的指导。另外，随着流强的提高，陆续发现了许多种的不稳定性，导致束流在加速过程中损失或发射度增加。其中最常遇到的有电阻壁不稳定性、头尾不稳定性和束、腔不

稳定性等，理论分析表明：这些不稳定性都是束流的动态自场与环境(真空盒、加速腔、阀门、管道接头等)相干作用的结果。原则上使用由富拉索夫方程和汉米顿方程导出的分布函数方程，就可以解出表征运动稳定性的色散关系，可给近年发现的一些不稳定性以很好的解释，并可据以提出克服的办法。这种对强流效应的认识是加速器理论在 70 年代的主要成就。

在微波电子学中，研究的对象同样是束流与环境的相互作用，尽管它感到兴趣的是产生不稳定性(放大)的条件而不是加速器中抑制不稳定性的条件，不过基本原理是十分相似的。另外，一些天体物理的问题，如蟹状星云的光和无线电发射、土星光环等也与加速器理论有关。这说明尽管在各学科领域表现不同，带电粒子束与电磁场的相互作用有共同的物理实质。近年将电子光学、微波管、加速器、等离子体物理、激光物理等某些问题联系起来统一处理的理论，可能是很有意义的发展方向。

在新的加速原理方面，利用束团集体场的加速方法，在 70 年代初期一度引起很大的期望，但实际上进展不大。烟圈加速器(ERA)做到每米加速几十兆电子伏；线型束集体离子加速可产生能量为几十兆电子伏的质子束，这都在进行实验研究之中。其他等离子波、扫描束、自加速、激光加速等原理，也都有所探讨。

## (五) 近年高能加速器应用的发展

高能加速器除了是基本粒子物理研究的必不可少的工具以外，还在不同的领域有着重要的应用。例如：在能源方面的直线加速器核燃料增殖和重离子聚变；在光源方面的同步加速器辐射；在医疗方面的  $\pi^-$  介子治癌等，现摘要简述于下。

### (1) 直线加速器核燃料增殖

能量为  $1\text{GeV}$  左右的质子束打到重靶上，通过散裂及裂变反应，每个质子可以产生约 40 个中子。这些中子为  $^{232}\text{Th}$  或  $^{238}\text{U}$  俘获，即可产生核燃料  $^{233}\text{U}$  或  $^{239}\text{Pu}$ 。加速器增殖的特点是可以不用后处理，避免扩散，使铀资源利用率提高，并减轻废料处理问题。

远在 1950 年美国即建造名为“材料试验加速器”(MTA)进行核燃料生产研究。后因国内发现铀矿而终止。六十年代加拿大对此问题进行大量的工作，七十年代因功率堆及加速器技术的发展，美国又重新感到兴趣，在洛斯阿拉莫斯、橡树岭、阿贡及布鲁克海文等实验室都开展着研制工作。

最近发表的布鲁克海文实验室的直线加速器增殖装置的设计使用一个电流为  $0.3\text{A}$  能量为  $1.5\text{GeV}$  的直线加速器。他们认为建造这样性能指标的加速器，现代的技术水平是完全可以做到的。

### (2) 重离子聚变加速器

用高能重离子束轰击内含氘的靶丸产生惯性约束聚变的方案，近年受到很大的重视。重离子在物质中射程较短，故可使用较高的能量和较小的流强，这比轻离子需要较低的能量和较大的流强是更为容易实现的。例如若加速铀离子，则对  $1\text{mm}$  到  $10\text{mm}$  半径的靶丸而言，要求能量为  $20-60\text{GeV}$ ，流强为  $4-10\text{KA}$ 。产生高能重离子束，可以先将重离子在直线加速器及环形加速器中加速后注入储存环，在环内将束流聚束，然后多路引出，轰击位于环心的靶丸。这样的方法可以得到束流功率的放大。另外，也可直接采用强流直线加速器，而不必借助于储存环的功率放大。不论采用哪种方法，目前的技术都需要进一步发展，但是也看不出根本性的困难。



聚变反应提供能量的研究目前正在用磁约束和惯性约束(激光、电子束、质子束、重离子束)多种途径进行试验。除了技术问题,还有经济问题需要考虑。美国计划在80年建造能量较低的重离子聚变加速器模型装置,然后逐步向实验堆推进。

### (3) 同步辐射加速器

高能电子在环形轨道运动时产生的辐射可简称做同步辐射。它具有强度高、稳定性好、光谱可以计算并连续可调、偏振并且方向性强等一系列优点,是一种十分独特的光源,对生物物理、固体物理、原子、分子物理以及大规模集成电路制造工艺都有广泛的应用。能量为700—800MeV的电子储存环可提供真空紫外区的辐射,而能量为2—3GeV的电子储存环则可提供远紫外和硬X光的辐射。

由于同步辐射用途的广泛和重要,各国电子同步加速器和对撞机上都附带进行同步辐射的应用。美、英、日、法、西德、苏联等国,近年还建造了专用的同步辐射加速器。近年世界上已建成和即将建成的同步辐射装置共有30余台,这就说明了它的现实意义。目前中国科技大学也正在开展同步辐射加速器的各方面的预制研究工作。

### (4) $\pi^-$ 介子治癌加速器

$\pi^-$ 介子束在射程末端对生物体产生较大的破坏,而且对细胞含氧量并不敏感,因此,很适用于深度肿瘤的治疗。

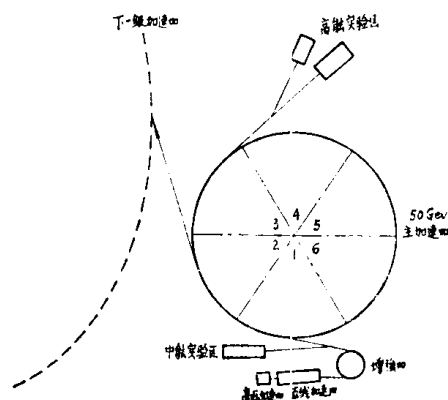
美国于1977年已建成一个医疗辐照介子产生器(PIGMI)的低能段模型。这个加速器整体将是一个135米长能量为650MeV电流为100 $\mu$ a的质子直线加速器。另外,也进行了使用电子直线加速器产生 $\pi^-$ 的设计研究。由于反应截面的不同,提供同样的 $\pi^-$ 剂量(1000cc体积,30rad/min),电子加速器的束流功率需要比质子的大25倍,但经一个专门委员会研究后认为电子直线加速器还是技术上最成熟、结构上最简单和价格上最经济的方案。

## (六) 我国高能加速器方案概况

为了加强基础研究,促进四个现代化,高能物理已经列为我国科学发展规划的八个重点项目之一。我国第一台高能加速器——50GeV质子同步加速器的预制研究工作也已全面展开。经过数百名科技人员一年多的努力,初步设计方案已基本完成。现将方案概况和一些设计考虑在下面加以简单的介绍。

图(三-9)是这台加速器总体布局示意图。后面表(2)给出它的一些主要参数。

由图(三-9)可见,这台高能加速器实际上是由四台加速器组成的。首先,由离子源产生的 $H^-$ 离子经高压加速器加速到750KeV的能量,经过低能输运段注入到直线加速器。在四个采用杆耦合稳定结构的直线加速器腔体中加速到93MeV后,又经输运系统注入到增强器,在注入处通过剥离膜将 $H^-$ 离子转换为质子。连续注入几十微秒、积累了足够的粒子数目后,增强器将粒子能量提高到 $\sim 2$ GeV,然后由快引出系统引出经另一输运系统注入到主加速器。主加速器与增强器的周长比为10,因此,需要由增强器注入主加速器10次,才能填满主器的纵向相空间。这样,主器的加速粒子



图三-9 我国50GeV质子同步加速器总体布局示意图