

# 粒子加速器中的 超导磁体技术

徐庆金

(中科院高能物理研究所 100049)

## 一、环形加速器能量的提升依赖于更高磁场的超导磁体

在高能物理实验研究领域,粒子加速器是一个必不可少的重要装备。数十年来,粒子加速器的规模越来越大,能量也越来越高。科学家们为什么要造如此大型的加速器?它到底能够给我们带来什么?

高能粒子的研究,涉及宇宙的诞生和演化、质量的起源、物质的构成、能量的交换等基础科学问题,是人类探索未知的重要窗口。例如,通过研究高能粒子碰撞过程,就可以研究微观相互作用的机制和物质的基本组成单元。

如何获得高能粒子?只有两种途径:“靠天吃饭”和“靠人吃饭”。靠天吃饭比较省事:在地面或地球轨道上放置粒子探测装置,等着接收来自天上的宇宙射线。但是这种方式,可研究的粒子通量很低,意味着事例的累计非常慢!而高能物理实验研究,必须有一定数量的事例积累,达到足够的置信度,才能做出一个较为准确的判断。“靠天吃饭”赌运气之外,更加高效的途径就是“靠人吃饭”——利用人造高能粒子加速器,通过对撞来批量产生想要研究的粒子!一个常规的高能粒子对撞机可以在一秒钟产生数百万次甚至更多的粒子对撞,这样就有机地很快地积累足够多的分析事例,大大提高了高能物理研究的效率。

目前世界上最大的粒子加速器是位于瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机

LHC,周长27千米,位于地下100米左右。LHC对撞能量可以达到14 TeV,是目前世界上人造加速器里面能达到的最高能量。LHC最重要的一个发现就是2012年发现的Higgs玻色子,俗称“上帝粒子”,该实验证实了赋予粒子质量的Higgs场的存在。

为什么粒子加速器要追求越来越大的规模?环形粒子加速器的最高能量,与两个参数有密切关系,其一是加速器里面偏转粒子的磁场强度,其二是环形加速器的尺寸。想把环形加速器的粒子能量提高,就需要尽量提高这两个参数。在没有更强加速器磁体的情况下,提高能量的唯一办法就是把加速器建得尺寸非常大:从几千米、几十千米到上百千米,甚至有人提出过绕地球赤道做一个巨型加速器。在科幻小说《三体》里,还描述了围绕太阳的环日加速器。

显然单纯靠增大加速器的规模并不十分可行,这不仅意味着建设成本的急剧增加,还难以寻找到满足如此大型粒子加速器的各种苛刻条件的建设场所。事实上,目前运行的最大加速器的尺寸也就几十千米,计划建设的加速器规模基本在100千米范围内。因此,在有限的规模情况下,想要获得更高的粒子能量,同时又要节约建设和运行成本,就必须要用到更强的加速器磁体。加速器磁体分为两大类:传统的电磁铁和超导磁体。由于加速器磁体结构的特殊要求和加速环的空间限制,传统电磁铁加速器磁体磁场最高为2.2 T,这足以让电子加速到GeV量级。如北京正负电子对撞机、中国散裂中

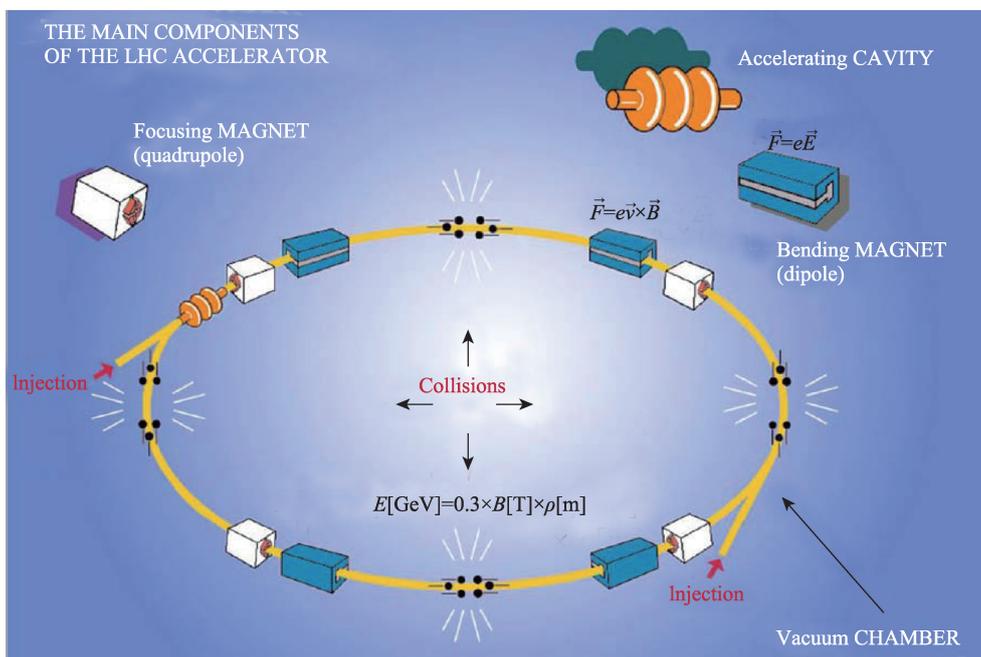


图1 LHC加速器布局示意图(CERN Lucio Rossi 供图)

子源、北京高能同步辐射光源等在粒子加速器部分都是用的传统电磁铁。想要获得 TeV 甚至更高的粒子能量,就必须采用承载电流能力更强的超导磁体。例如 LHC 用到的超导磁体为 8.3 T。可以说,超导磁体的应用,迅速提高了环形加速器的能量,并且节约了巨大的成本,是新一代高能粒子实验研究的神兵利器。

## 二、粒子加速器中的超导磁体和其他超导磁体有何不同

超导材料具有零电阻效应,在低于其临界电流密度和上临界场的情况下,可以在不产生热效应情况下承载很大的电流和磁场,是建造高场磁体的理想材料。通常实验室用的超导磁体都是螺线管结构,在一些物性测量平台比较常见。然而,粒子加速器磁体结构要更加复杂,它们用到的超导磁体,和其他地方用的有明显区别。

加速器超导磁体分为几种,最常见的两种叫作二极磁体和四极磁体。在环形加速器里面,若想让高能粒子在环里不断转圈最后发生对撞,首先要不

停地给它提供一个足够大的向心力,它才能在环里转起来,而不是直接撞到加速环内壁上。提供向心力的磁体叫二极磁体;其内部有一个与粒子束流成 90 度角的强磁场,使带电粒子在该强磁场里面穿过时受到一个指向中心的向心力。

但是,粒子束流在二极磁体加速转圈过程中还会不断发散,这就需要另一种磁体——四极磁体来帮忙。简单来说,我们想要加速器中粒子对撞的事例越多越好,粒子束流的尺寸越小、密度越大就越好。两团方向相反、近光速飞行的粒子束流,如果尺寸非常大、非常疏松的话,粒子对撞的可能性也是很低的。如果把束流尺寸压缩到 1/100 或者 1/1000 大小,粒子致密度非常高,粒子间对撞的可能性将大大增加。所以四极磁体的作用就是把粒子束流聚焦,压缩粒子束流的尺寸,提高对撞可能性,科学术语叫作提高加速器的对撞亮度。可以说二极磁体是粒子的“领航员”,而四极磁体则是粒子的“对焦仪”。粒子对撞机的能量和亮度的提升,在很大程度上取决于加速器磁体所能达到的强磁场的的能力。

不同的粒子种类,在同样的加速磁体下,获得的加速能力是有很大区别的,以此分为电子加速

器、质子加速器、重离子加速器等。中国科学院高能物理研究所正在运行的北京正负电子对撞机就是一台电子加速器,粒子能量为2~5 GeV,国际上绝大部分同步辐射光源也都用的是GeV量级的电子加速器。如前所述,对于电子加速器来说,因为电子比较轻,质量没那么大,它的大部分二极和四极磁体是不需要超导材料的,因为很小的磁场就可以满足偏转或聚焦束流的要求了,所以基于常规铜线圈的磁体就可以。但是对于对撞点附近的四极磁体来说,因为关系到加速器的对撞亮度,所有的加速器都希望亮度越高越好,所以即使电子加速器中,对撞点附近的四极磁体也会使用到超导技术,使其聚焦粒子束流的能力满足高亮度的要求。

对于质子或者重粒子而言,它们的质量要重许多倍,想要偏转或聚焦这些粒子,需要极高的磁场强度。如果要基于这些高能粒子的对撞开展粒子物理研究,加速器中的二极或四极磁体就需要尽可能

能地用到超导技术,达到的磁场强度越高越好。

### 三、超导技术推动粒子加速器性能持续升级

欧洲核子研究中心的大型强子对撞机正在进行一项重要的性能升级工程,叫作 High-Luminosity LHC(HL-LHC),就是加速器的高亮度升级。如上节所述,对撞亮度是加速器上一个最重要的概念,亮度的指标直接反映了粒子对撞事例的多少。只有不断提高亮度,每秒钟产生的对撞事例越多,获得的数据才越好。

HL-LHC 其实就是在 LHC 的基础上,通过替换 CMS 和 ATLAS 两个对撞区附近的超导磁体等一些重要部件,使它的峰值对撞亮度提高到目前的5倍以上。升级以后,同样的1年时间,新加速器得到的对撞事例数是以前5年的事例数总和,有望更快地

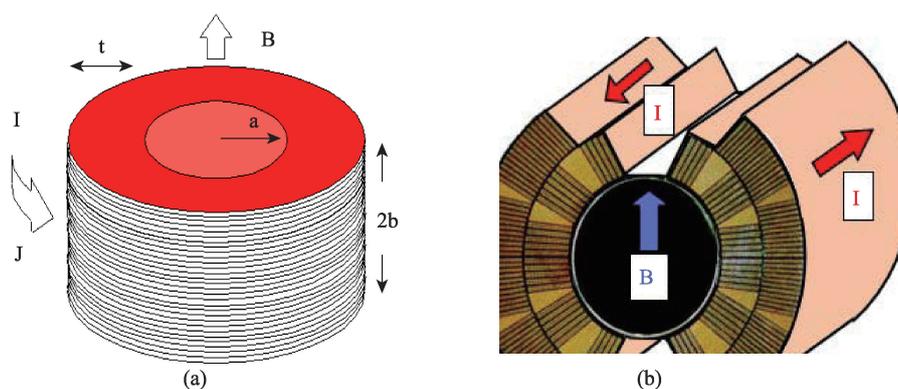


图2 (a)螺线管线圈结构;(b)二极线圈结构

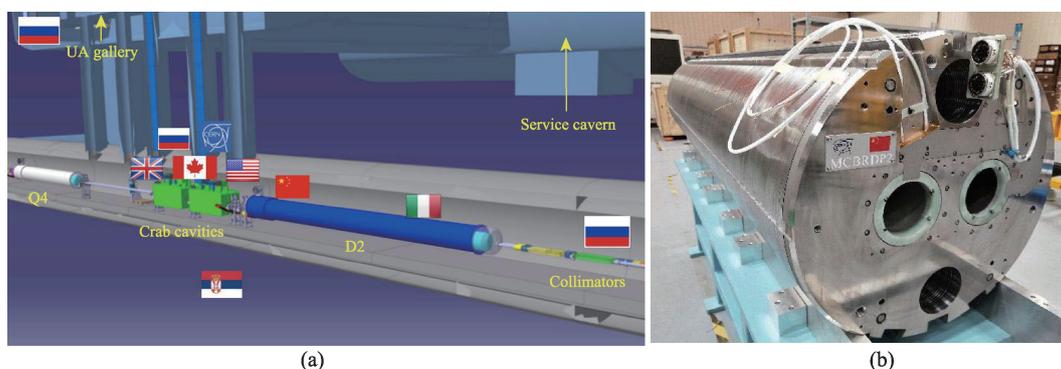


图3 (a)HL-LHC 高亮度升级中各个国家所承担超导磁体任务分布;  
(b)中国团队为 HL-LHC 研制的新型 CCT 超导磁体全尺寸样机,性能通过双边测试验证

发现一些重要的基础物理问题。在这个升级项目中,中国团队将承担一种新型斜螺线管超导磁体的研制,安装至 ATLAS 及 CMS 对撞区,用于质子束流的轨道校正。

对撞机的能量和超导二极磁体场强直接成正比,亮度和超导四极磁体的梯度直接相关。虽然数十年来,粒子对撞机的性能不断提升,但因其现有工艺水平的核心装备存在性能上限,更高更亮的对撞机亟需超导磁体的规模化应用。由于粒子加速器超导磁体复杂的结构并承载很大的应力,其技术发展一直比较缓慢,LHC 上的超导二极磁体场强是 8.3T,未来 HL-LHC 升级中少部分对撞区附近的超导磁体将提高至 11T。2019 年,费米实验室成功制备了 14 T 的单孔径加速器超导二极磁体,是目前最高的纪录。高能所团队 2021 年研制的双孔径二极实验磁体在 4.2 K 下最高达到 12.47 T。而科学家们提议建设的下一代高能量粒子对撞机,都基于更高的磁场强度,二极磁体场强要提高至 16~24 T 的水平,相关技术仍然在研发过程中。

#### 四、高能量粒子加速器推动先进超导技术的发展

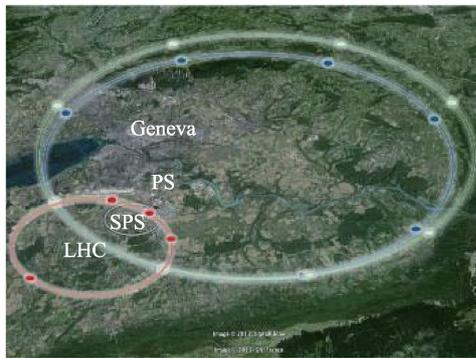
建造数十千米、甚至上百千米的高能粒子加速器,对于回答基础物理的一些最基本问题,如基本粒子的构造、宇宙的构成、暗物质、暗能量等,可能

是目前最高效的途径之一。除此以外,大型粒子加速器的建设还有另一个层面的重要作用,甚至不亚于基础物理研究本身,那就是能够推进一系列前沿技术的发展,特别是强电应用超导技术。就像大型强子对撞机 LHC,全环 27 千米,99% 的地方全是超导磁体。正是因为 LHC 以及其他几个超导加速器的建设,把超导技术从以前实验室小规模实验磁体研制,推高到一个商业大批量生产的产业化水平。在此基础上,如今才有了医院里常见的核磁共振功能成像仪。现在超导强电技术的应用已经远不止在医院,2021 年上海、深圳都建设了实用化超导输电线路,超导磁体感应加热技术在金属冶炼中已突出其独特优势,高速超导磁悬浮列车和全超导可控核聚变装置也正在快速发展。所以我们为什么要建这么大的加速器?除了回答最重要的基础物理问题,还可以推动我们前沿技术的发展,让这些前沿技术不是停留在实验室,而是推广到我们社会上,真正造福大家的医疗健康、衣食住行和生活水平。

国内的超导技术及产业发展其实也是得益于相关大科学装置的建设。以超导材料为例,过去十几年,在这一方向发展非常快!西部超导公司已经实现铌钛低温超导材料的规模化量产,它的发展也是得益于我们中国在 2003 年左右参与到国际核聚变装置 ITER 计划,投入 10 亿欧元作为该大科学装置的超导材料及装置等核心部件提供者,极大地推动了中国超导产业的发展。



(a)



(b)

图4 (a)中国科学家提议建设的CEPC-SPPC,(b)欧洲核子研究中心提议建设的FCC,均基于高场超导磁体技术,以达到 100 TeV 以上的对撞能量

在完成ITER项目指标后,西部超导公司现在已经转型,把这个技术用在医用核磁谱仪等相关技术,已经跟通用电气、西门子、飞利浦很多公司都签订了相关协议,来提供中国造的超导线材。在高温超导方面,得益于过去十几年中国对先进技术产业的扶持,有了上海超导公司、上创超导公司、苏州新材料研究所等,他们都已经能够做国产化的高质量高温超导带材。

可以说,我们国家过去十几年里,得益于大科学装置的推动,已经实现了超导材料的国产化。虽然在超导磁体技术领域,我们还尚未达到世界领先水平,但已经大大缩小了跟国际最好水平的差距。在加速器超导磁体方面,中国科学院高能物理所的团队在2021年取得12T的超导磁体的结果,迈入了世界第一梯队的行列。在螺线管超导磁体方面,中国科

学院电工研究所的王秋良团队,在2019年创造了全超导的螺线管磁体32.3 T的国际最高纪录。

过去十几年,从超导材料到超导磁体技术,中国经历了一个飞速发展的阶段。在国内各类大科学装置建设推动下,超导磁体技术还将有更加广阔的发展空间。我们期待国产超导磁体能够迅速做到国际领先水平,在基础科研和社会生活中发挥重要的作用。

### 参考文献

- ① 靳松, 娄辛丑, 阮曼奇, 徐庆金, 朱宏博, 环形正负电子对撞机: 物理、技术以及现状;《物理》;2019年03期。
- ② 靳松, 徐庆金, 大型环形对撞机中的前沿技术; 27-35;《现代物理知识》2020年01期。
- ③ 王呈涛, 徐庆金, 粒子对撞机上的超导磁体技术;《科学24小时》2020年第10期。

## 科苑快讯

### 垂死者的大脑记录揭示了什么



医生们第一次收集了突然死亡前后的脑电波活动。爱沙尼亚的医生正在监测一名87岁患者的大脑,以检测和治疗他的癫痫发作。在读数期间,病人突因心脏病发作而去世。这给研究组带来了一组独特的新数据:第一个濒死人类大脑的脑电图(electroencephalogram, EEG)记录。该团队邀请了国际合作伙伴,分析了患者心脏停止跳动30分钟前的大脑记录。

有两种脑电波最活跃:伽马波,它与做梦和记忆提取特别相关;阿尔法波,与信息处理和视觉皮层有关——研究组推测,这可能表明死亡前的瞬间“生命

在你眼前闪现”。研究人员将论文发表在《衰老神经科学前沿》(*Frontiers in Aging Neuroscience*)上。

论文作者说,这些数据可能表明,垂死的大脑正在恢复记忆并将其可视化,但他们远远不能证明任何生命闪现现象。每种不同类型的脑电波都与大量的认知功能相关——它们是广泛的大脑各种活动,而不是任何特定思想的指示器。

值得注意的是,这些观察发生在一个最近受伤的病人身上。这位87岁病人在跌倒后被送进急救中心。他有神经方面的症状,也有脑出血造成的中线偏移,即因颅内压力不平衡导致大脑偏离中心。再加上药物的作用,病人临终前的大脑活动,甚至可能无法代表其他病人可能发生的情况。而且这些通过无伦理争议方式记录下来的大脑活动,是否就是人们所说的濒死体验或生命闪现现象,还很难说,因为当事者在临终前已不能说话。

(高凌云编译自2022年2月23日Popular Science网站)