

第一章 超导材料妙用

超导材料的主要特征是有零电阻性，抗磁性和约瑟夫森效应，这也是它们的主要优点。就目前情况看，超导产品已经成功应用的是用低温超导材料制成的各种仪器，主要包括：

(1) 高能物理强磁场、大孔径的超导磁体，如加速基本粒子磁体，汽泡室磁体，等等。

(2) 临床医学的超导磁共振成像 (磁共振 CT)

(3) 振动样品磁强计 (VSM) 和其他需要强磁场的科技仪器。

(4) 超高灵敏的科学仪器，这些仪器以超导量子干涉器件(SQUID) 为基础。这些仪器往往也同时配有超导磁体，如 SQUID 磁强计。

(5) 超导电压基准。基本原理是超导约瑟夫森效应。

更多的应用正在研究开发之中，其中，许多应用的样机已经完成。其中的一部分即将在本书介绍。本书没有介绍或者没有详细介绍的不代表它们不重要，主要是因为篇幅有限。例如，超导计算机、超导发电机、超导电动机、超导变压器，等等，都是科技界讨论很多的有影响的項目。

高温超导材料问世以来，超导转变温度有了显著提高，使超导技术有可能不再依赖液氦，从而避免了技术复杂、设备庞大、制冷费用过高等缺点。虽然高

温超导材料还正在发展阶段，但是它们的成材工艺，应用技术已经日臻成熟，性能/价格比不断提高，说明正处于大规模应用的前夜。可以说高温超导体的出现不仅会扩大已经有的超导应用领域，而且会在能源、交通、采矿、环保等需要大量电能的产业，在无线通讯、生命医学、无损检测等需要超高灵敏度的产业等方面开辟新应用领域，使整个社会生产力发生重大的、革命性的变化。

§ 1.1 高效的超导磁体

制造实验室超导磁体是超导材料获得的最早应用之一。人们在发现超导电性以后就想到用超导材料来做磁体。可惜，那时候还没有发现高临界参数超导体，用当时的材料制作的超导磁体产生的磁场强度很低，没有使用价值。发现高临界参数超导体以后，经工程技术人员、科学家、实业家们的共同努力，现在世界上各实验室的超导磁体成百上千、不计其数。

有人可能会问各国的实验室为什么要装备这么多磁体。人类在生活、生产、科研和军事等许多方面都和物质的磁性有关。比如说，在传说中的黄帝打败蚩尤的大决战中，黄帝发明的指南针就起了很大的作用。指南针就是利用物质磁性制成的一种仪器，也可能是最早的磁强计——一种测量地磁方向的仪器。是我国古代的一项伟大发明。因此，研究物质磁性是很重要的。研究物质磁性就需要磁场。磁体是产生磁场的设备。由于磁体广泛的用途，磁体的种类和数量很多。

我们在研究物质的磁性时一定要将它磁化（永久

磁铁一类材料除外），磁体的磁场提供一个磁化场，在磁化场的诱导下物质被磁化。磁化程度由物理量磁化强度描述，测量磁化强度与其他参量（如磁场、温度、压强等）的关系就知道了物质的磁性质。例如我们研究超导体的磁性质就是这样做的。磁体的更多用处是提供外磁场，外磁场也叫背景磁场。物质在一定的背景磁场中不仅磁性质会发生变化，其他许多性质也会变化。拿超导材料来说，它们的抗磁性是把它们放在磁化场中才表现出来的。它们的临界电流密度也随着磁场的变化而改变，一般是随磁场增加而减小。又譬如说，从 20 世纪末兴起，现在仍在积极进行研究的一个科学题目叫巨磁电阻（包括超大巨磁电阻、庞磁电阻等）性和巨磁电阻材料。巨磁电阻材料的电阻率在强度稍微不同的磁场中会产生几个数量级的变化。由于磁场的微小变化会引起电阻的巨大变化，所以叫它巨磁电阻。科学家们立刻想到，磁电阻对磁场的极度敏感性是一种宝贵的性质，它有可能在信息技术和产业领域有巨大的开发潜力。例如可能在磁头读出技术方面发挥巨大作用。我们还知道，相变是物质从一种状态到另一种的变化，是物理学研究的一项重要内容。相变总是要在一定条件下发生的。磁场就是许多相变的条件之一。临界磁场就是促使超导材料发生正常 超导相变的磁场强度。不仅是无机材料，甚至是生命体的许多变化利用一定的磁场就可以被探测出来。已经广泛应用于临床诊断软组织肿瘤等疾病的“磁共振 CT”（磁共振断层扫描成像 就是超导磁体磁场应用的一个很好的例子。中医方法中还有直接用一定磁场治疗疾病的说法。此外，我们下面将会看到，强场磁体在工

业和其他方面将会有广泛的应用。比如说，发电机、电动机等从物理原理上说就是导体在磁体产生的磁场中运动感生电动势或者是把过程倒过来。所以从一定意义上说，应用和生产上和电磁现象有关的都可能涉及磁场。

超导磁体和常规磁体的差别就在于前者使用超导材料（一般是复合稳定化的线材或带材，现在也在研究和开发高温超导块材），而后者使用常规材料（一般是铜或铝材或磁铁）。超导材料本身的特点都直接或间接导致超导磁体的优点。超导材料有零电阻性，这意味着超导材料通上电流后是不消耗电能的，是一种彻底的节能材料，在强背景磁场中超导材料具有很高的临界电流密度，这个特性使较少的超导材料就可能通过很大的电流，使得强磁场超导磁体体积小，可移动性大，也有利于降低造价和运转成本。超导材料的临界磁场高，这使它们有可能成为强磁场材料。比如说，高温超导体 YBCO-123 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 系列材料) 的上临界磁场在液氮温度下有 100 特的数量级。从原则上说，用它们做成的超导磁体也可以产生同样强的磁场。总之，超导磁体的优点很多，大体上可以分为以下几方面：

(1) 节省能量。理论上讲超导磁体不消耗电能，所以超导磁体是一种“零功率热机”（只产生磁场，不消耗能量的机械）。实际上，一个能产生 10 特场强，孔径为 1 厘米数量级小型超导磁体的导线电阻很小，加上引线电阻和接触电阻等各项损耗总共不超过 200 瓦，而产生同样磁场和有同样孔径的常规磁体能耗至少 2000 千瓦。即使考虑到维持超导磁体的低温环境所需

要的能量 大型超导磁体也是比常规同类磁体节能的。

(2) 建造成本和运转费用低。对大型磁体来说这些优点特别明显。以一个直径为 35 米、产生磁感强度为 2 特的磁体为例 超导磁体和常规 铜线绕成 磁体相比, 在 20 世纪 70 年代的测算的经济情况是: 超导的建造和运转总费用是 262 万美元, 常规的是 638 万美元。

(3) 体积小、轻便。例如一个能产生直到 20 特场强的超导磁体的体积只有几升, 重量几千克 (参见图 1.1)。这样的超导磁体加上冷却系统仅仅和人体大小可比拟, 非常适合实验室使用。而且磁场质量好, 购买价格和运转成本都可以为大多数科研实验室接受, 所以已经广泛使用。然而 同样场强的常规磁体重量超过 20 吨 另需庞大的冷却系统 占据空间大 有些场合无法使用。

(4) 超导磁体还容易产生各种要求的磁场, 如匀强磁场、高梯度磁场等。磁场质量高, 有效磁场空间大, 整体体积小, 因此占用的房屋面积小, 使用费用可以接受, 这些都是磁共振 CT 选用超导磁体的主要理由。

世界上已有的实验室用超导磁体的场强最高超过 20 特, 磁场区的孔径和高度可从毫米量级到米量级。磁体用的材料, 8 特以下的磁体大部分用铌钛合金多心复合稳定材料。8 特以上的一部分是用铌钛合金多心复合材料和铌三锡材料混合绕制而成的, 叫混合超导磁体, 另外一部分是全铌三锡磁体, 如图 1.1 中的那些就是。大约 20 特以上场强的磁体采用全常规材料和超导-常规材料混合磁体。图 1.1 是实验室用

的三个超导磁体 它们产生的磁场强度分别可达到(自左向右) 15 特、18 特和 20.1 特。

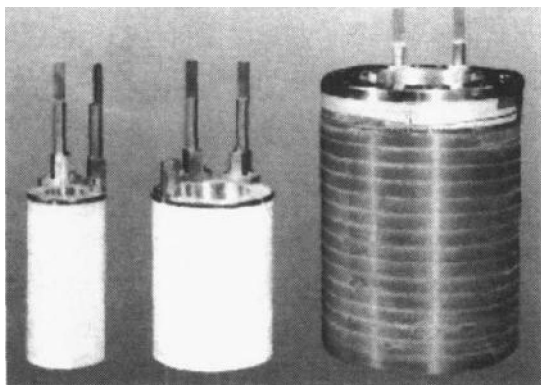


图 1.1 能产生 15 特(左) 18 特和 20.1 特(右)的小型超导磁体

电磁铁心式的常规磁体提供的背景场的强度只能达到 2.5 特左右 而且孔径很小(厘米量级) 大孔径的, 比 2.5 特更强的磁场用常规材料那是可以的, 一般就不使用铁心了. 正如上面所说, 这样的常规磁体体积大, 占地多, 建造成本高, 运转费用贵. 超导磁体发明以前, 能提供 2.5 特以上磁场的实验室在世界上也算不错了. 可是现在中小型超导磁体广泛分布于世界各国实验室中, 作为高级科学研究设备的组成部分而提供各种需要的磁场, 仅南京大学物理系就有国内外生产的小型磁体 5 个, 场强为 6~8 特, 工作时使用液氦冷却. 这个大学的超导磁体数和场强将随着我国综合国力的增强而增加.

利用超导磁体作背景场, 场强可以高达 20 特的磁强计有许多种, 但是最重要, 也是最普遍的是超导量子干涉仪(SQUID 和振动样品磁强计(VSM).

说，SQUID 和 VSM 的测量原理和提拉法测量样品的磁矩相似，用弱连接超导体环(SQUID 或常规导体线圈 VSM)做传感线圈 探测样品相对传感线圈运动时的磁通量变化，经过读出电路，这种变化转化为电压输出。把这两种仪器配上低温条件和超导磁体就是现在最先进的磁强计了。低温条件既是为了超导磁体，也可以使样品的温度更低。这两种仪器的差别在传感器，从外形上是看不出的。VSM 操作方便，价格低，背景磁场强度原则上不受限制。SQUID 灵敏度高，价格高，磁场在 7 特以上时灵敏度急速下降。图 12 是正在工作的南京大学固体微结构物理国家重点实验室的 VSM 设备 这套 VSM 有一个实验室用的小型超导磁体，可以产生 8 特的磁场强度。测量的温度范围从 1 开到 300 开，是这个实验室自己研制的。我国已有几台 SQUID，但都是进口的。由于 SQUID 有灵敏度特别高的优点，用途日益广泛，后面还要介绍。

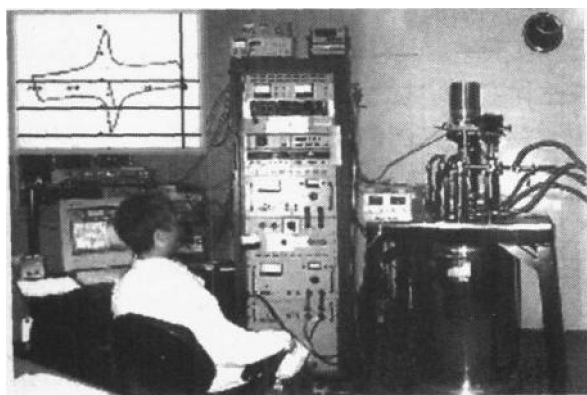


图 12 正在低温和强磁场下进行测量的振动样品磁强计

人类增加知识的重要方法是进行科学实验。科学

实验就是在各种自然的或人造的条件下探索社会和自然界的客观规律。比如说在一定的磁场和温度下进行的各种物理实验。有些科学发现是在现在地球甚至自然界既不存在，人类也没有实现过或不容易实现的条件下完成的。这样的条件称为“极端条件”。举例来说，科学家利用激光制冷技术将金属钠原子这类物质冷却到微开以下温度就是一种极端条件，在这种极端条件观测到了理论预言的玻色-爱因斯坦凝聚现象，这一成果获得了诺贝尔物理学奖。与极低温条件一样，强磁场也是一种极端条件。称得上极端条件的磁场不仅要看磁场强度大小，还要看磁场存在的时间（静态和脉冲磁场）、均匀度、空间大小（磁体的孔径）、漂移、稳定度等。

在各种极端条件实验室中，强磁场实验室是很重要的一种。就目前情况而论，全世界稳恒强磁场实验室约有半打，主要分布在北美、西欧和东亚。我国正在筹建近期场强 40 特，远期为 60 特甚至更高的稳恒强磁场实验室。具有世界一流的科学实验室是一个国家发达程度的标志之一。现在，世界上最强的人为的稳恒磁场是在美国佛罗里达的强磁场实验室中实现的：2000 年 1 月，这个实验室实现了 45 特的稳恒磁场。这个设备中的磁体是超导和常规材料共同做成的混合型磁体。一般是超导材料放在场强低的地方（磁体的外部，那里场强低，超导材料可以承载大超导电流），常规材料在场强高的部位（内部，那里磁场强，常规材料载流能力受磁场影响很小）。北美的强磁场实验室过去是在著名的麻省理工学院，但是因为要更新和升级，主要出资单位美国国家基金委员会决定采用招标方式

来新建。结果，新的也就是世界上现在的最强磁场实验室就是总部设在佛罗里达州的塔拉哈西的实验室了。这个实验室由三个单位的强磁场实验室组成：佛罗里达大学、佛罗里达州立大学和洛斯-阿拉莫斯国家实验室。这三个单位中的每一个都有功能不同的若干实验室。例如佛罗里达大学部分有佛罗里达大学神经研究所的一台大型高级磁共振成像和波谱学仪、Shands 医院的一台临床应用的磁共振波谱仪和佛罗里达大学物理系的强磁场设备。美国国家强磁场实验室现在的主要工作是从事世界最强磁场中工作仪器的研发和建设以及开发各种应用。举例来说，这个磁场的均匀性就不适合磁共振成像和摄谱的要求。适用于磁共振成像和摄谱仪用的磁体要求特别高，建造起来就要求特殊技术。仅在美国国家强磁场实验室目前已经有几台磁共振成像和摄谱仪，其中有一台 600 兆赫的大孔径(9 厘米直径)的仪器。这样的设备全世界上还有几台。而且这台设备也是正在建造的世界最大的一台 900 兆赫-11 厘米孔径磁共振成像和摄谱仪工作的一部分的。该仪器已于 2001 年末完成。关于强磁场实验室我们在后面还将有介绍。可以预见 超导磁体今后不仅数量会增加 而且品种和质量也会有稳步的发展

§ 1.2 临床磁共振 CT

生物医学应用的超导磁体越来越广泛，而且还在快速发展。磁共振断层扫描成像仪已经是许多医院都配备了的大型医学诊断设备，是大众用得起的“普及设备”，也是超导材料直接和人民大众接触，为大众

服务的最好的例子(图 13)。这个仪器的关键是一个超导磁体。因采用超导磁体，磁场稳定性好、不均匀度的品质能够足以确定人体待测量软组织的位置，磁场区体积大，磁场强，大大改善了系统的灵敏度、分辨率。该项设备在我国的医院虽已日渐普及，但主要依赖进口。近年来国内亦已开始组织试生产。

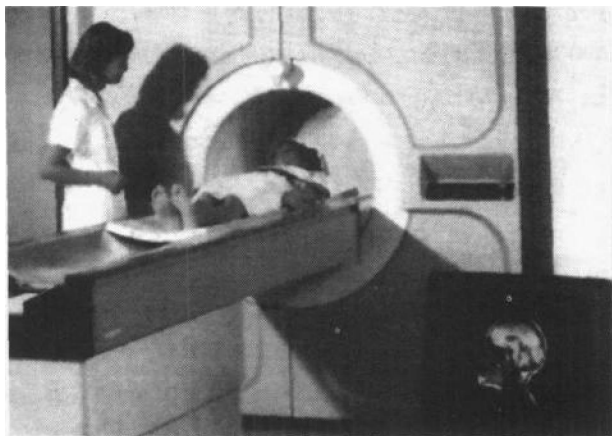


图 13 正在进行临床诊断的磁共振 CT

大家可能都知道，医院有磁共振 CT，也有 X 射线 CT(X 射线断层扫描成像仪)这两种成像仪有什么区别呢？很多人都知道，X 射线仪可以诊断骨折、结核病钙化点等。这是因为 X 射线光子的能量虽然大，但仍会被原子量比较大的各种重金属原子所吸收，因而能够留下它们的“影子”。X 射线探伤仪还可以为各种金属材料“诊断”。为金属构件照一照 X 射线，看看它们体内有没有病伤，如微裂纹、气孔等。观察 X 射线经过这些金属构件的缺陷处时有没有被吸收，

行李检查是相同的：X 射线能对重金属原子在物体中的浓度进行检测。断层扫描成像是成像平面可以变化，能看到物体内部不同深度的聚焦平面上的情形，改变焦距就得到了物体内部的立体信息。

可是原子量小的元素，像氢、氧、氮、碳、硫等对 X 射线的吸收能力非常小，因而 X 射线 CT 就不能检测这些轻元素的浓度，或者检测时的灵敏度很低，效果不好。但是，这些轻元素往往是生命体的主要元素。检查它们的浓度变化情况非常重要。例如，人体相当大的成分是水，也就是含有很多氢原子。人体中长肿瘤了，表示那地方的含水量（含氢量）有了变化。血液或淋巴液化脓了，那也一定是水的浓度有了变化。总之，氢原子的环境和浓度都有了变化。蛋白质除了含水外，还含有碳、硫、磷等。与 X 射线仪的工作原理不同，磁共振 CT 是通过测量磁场中原子核能级来测量物质。量子物理说，在磁场中核自旋能级分裂。一个能级的分裂值 ΔE 可以用频率为 f 的交变场共振来探测。如果交变磁场的频率满足 $\Delta E = hf$ 则出现共振峰， h 是普朗克常数。磁场越强能级分裂越大，吸收峰对应的频率也越高，测量灵敏度也越高。物质不同，原子量不同，核自旋共振频率不同。物质的环境和浓度不同，测出的信号的强度及其变化（例如随时间的变化）也不同。于是，原则上就可以测出物质的种类及其浓度了。实际上，这种仪器的性能对磁场的品质，对读出电路的性能等的要求都是比较高的。使用常规磁体难以和超导磁体竞争。现在医院中的“普及型”的磁共振 CT 大部分使用超导磁体，是超导材料最重要的市场之一，也是超导科学技术目前对人类的最重要的

贡献之一。

§ 1.3 审查细胞的磁共振 CT 和谱学

更强磁场和更高频率的这种仪器现在多为实验室基础研究建造，价格还很昂贵。超导生物磁共振成像和摄谱技术是正在快速发展的一门科学技术。下面我们以强磁场实验室中生物学研究用的磁共振仪为例来介绍这方面的最新情况。

原则上所有磁共振成像和摄谱仪包括上节的磁共振 CT 的原理都是相同的。仍以美国佛罗里达大学神经研究所的一套大型全超导高级磁共振成像摄谱仪为例，它的超导磁场可供 5 台仪器用，其中还包括附近医院中的一台临床应用的磁共振成像和摄谱仪，其磁场强度能达到 3 特。5 台仪器中的三台是“标准的”：500 兆赫和 600 兆赫的竖直磁场磁共振成像摄谱仪各一台以及一套 4.7 特-33 厘米的水平系统，基本上是为动物模型成像摄谱的。另外的两套是，一个 750 兆赫 - 17.6 特-9 厘米（孔径）的磁共振成像摄谱仪。这是世界第二 美国第一（其成像能力世界第一）由德国公司制造，2000 年完成。另一个是 500 兆赫-11.7 特-40 厘米水平系统。具有这样大小孔径和场强的、为磁共振研究的磁体是目前世界上最大的了，此磁体是英国公司建造，也是 2000 年完成。

这些仪器用来研究什么呢？人们说，磁共振摄谱学和成像技术可以应用到各种各样的问题上。这样说虽然并不夸张，但是目前它们主要还是应用于生物科

学。例如可以用于神经学研究。

虽说所有磁共振技术的原理都是相同的，但应用的途径却是不同的。按照应用方式不同，系统可以分为两类：摄谱学和成像。因此实验室有两个基本目标：一个是强磁场磁共振谱学的开发和应用，另一个是磁共振成像的开发和应用。就该所而言，一个小组正在利用磁共振谱学研究神经肽在神经组织中的功能，并且取得了不少成绩。可惜，这种技术虽然精巧，相对灵敏度在目前却仍旧不高。因为磁共振技术中的信号/噪声比随磁场强度的增加而降低。因而，为在磁共振仪中获得高磁场强度的努力在近 20 年来一直持续不断，这实际上也是磁共振技术中使用的磁场强度不断提高的原因。

在这些设备上进行的生物体内摄谱研究是不断发展的。目前所能达到的时间-空间分辨率主要受到所用磁体的孔径和场强的限制。在比较大的动物身上（如兔子和老鼠）用标准的方法可以达到 0.1~0.5 毫米的空间分辨率。对于比较小的动物（小于 1 毫米）置于强磁场中时最高分辨率达到了 10~20 微米。

现在，在强磁场中对体外（在切下来的样品上）和体内（在动物身体上）磁共振成像和摄谱学能够达到获得单个细胞水平的信息。对这些信息和数据的深入研究能够查找出磁共振成像信号的源头以及它们在各种刺激下如何变化。这样，人们就可以利用这些信息和数据来提高磁共振成像和摄谱学的灵敏度和临床应用的能力。譬如说，就可以对精神病因进行研究并找出新治疗方法。

磁共振成像和摄谱用的高频率、强磁场、大孔径

磁体技术正在发展着。用于灵长类动物磁体的最小孔径约为 40 厘米，而直接为人类用的最小孔径约为 80 ~ 100 厘米。现在 900 兆赫-11 厘米的磁体正在建造中，而 1000 兆赫以上的磁共振成像摄谱仪还在计划阶段。这些仪器的磁场在 10 特左右，具体磁场的大小与用途，特别是与孔径有关。10 特左右的磁场可以采用铜稳定化的、多心扭绞的铌钛合金超导材料来制造，这仍旧是目前最经济、最成熟的技术。

磁共振成像和摄谱学设备也是其他基础科学研究的尖端仪器设备之一。例如，设在南京大学的化学、物理学等系科的各种国家重点实验室中就有多台磁共振仪。

超导科学技术在生命科学研究中的应用也不限于磁共振成像和摄谱。例如正在迅速发展的生物磁源技术将在下面介绍。

§ 1.4 高能物理大型超导磁体

中国科学院有一个高能物理研究所，顾名思义，它是研究高能物理的“国家队”。假如我们要创造各种条件进行高能物理研究，那就需要各种大型超导磁体，也就是要求磁场的空间范围大，以用作微观粒子的加速、探测、聚焦和储能等。所以，高能物理研究用的磁体的最大特征之一是磁场空间大。例如，美国国家阿贡实验室的一个气泡室磁体（探测粒子用）内径 4.8 米，高 2.8 米，场强 2 特。美欧有多个这类超导磁体。一个以巨型超导磁体为主的名为“超导超级对撞机”的特大型设备曾经准备建设，位于美国得克萨

斯州，原计划于 1999 年建成，耗资超过 82 亿美元，其中包括我国在内的其他国家也曾经打算投资，以便建成后也可利用此套设备进行研究工作。后来因耗资巨大，美国国内意见不统一而夭折了。但是，在临床磁共振仪广泛应用之前，高能物理研究的需要曾经是低温超导材料最重要的市场，而且现在仍旧是超导材料的一个重要市场。例如，美国的超导超级对撞机虽然下马了，但是他们参加了欧洲的设在瑞士的一个高能物理实验室。这个大型的称之为 Hadron 的对撞机项目将使瑞士变为世界上最大的高能物理实验室的所在地。Hadron 对撞机将是最大和最复杂的科学研究设备之一，它由 1500 个超导磁体构成的 27 公里的地下轨道构成，用于产生高能粒子“榔头”以“敲开”原子核，使原子核中“跑出”各种基本粒子，探索自然界的奥秘。24 个国家将共同在这个耗资 60 亿美元的项目中合作。图 1.4 是一个高能物理磁体的安装情形。

虽然这个重要的国际协议是一个新的里程碑，不过后面的路还很长。现在还不清楚这个国际实验室中的合作究竟怎么搞，所以在有些国家，对参加这个合作还有争论。美国的物理学家中广泛地认为在美国国内的超导超级对撞机下马以后美国-欧洲核研究中心协议是值得欢迎的事。可是美国国会和公众对这个国际实验室还知之甚少，不积极。1996 年，一个美国高级官员对总统科学技术顾问委员会说，“有大量的意见反对美国参加这个计划”。而该委员会的一个成员竟说，“统一（场）理论是伟大，但对一个普通人有什么意义呢？”每个国家自然为自己的利益着想，美国国会议员也是“一个铜板册成两半花”。

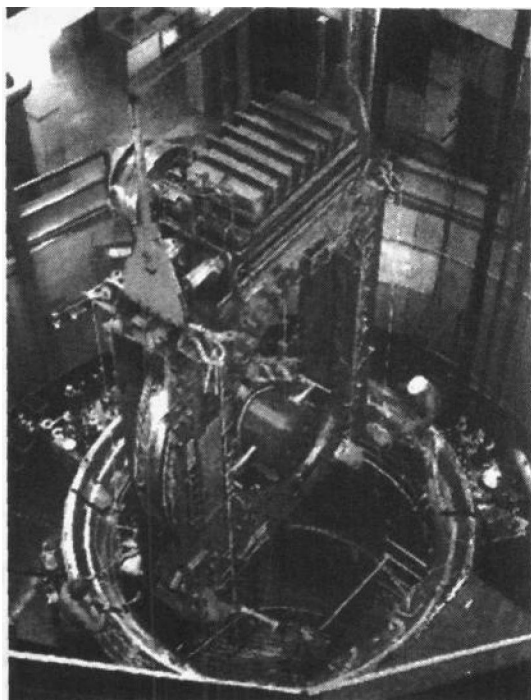


图 14 II 在建造中的一个高能物理磁体

一个和高能物理研究有关联的研究是受控核聚变反应。科学家们相信，从受控热核反应获得能量可能是未来能源问题彻底解决的主要办法之一。物理学家们说，海水中含有丰富的氢同位素。如果将氢同位素的核能用热核聚变反应释放出来，那么 1 升海水释放的能量就相当于 300 升石油的燃烧。海水可以说是取之不尽 用之不竭了吧 如果能够用安全而又经济的技术将海水中氢同位素的核能释放出来，人类能源问题不是解决了吗？而且，这样的能源是一种清洁环保型能源，其意义更大。

度高达兆摄氏度以上，耐这样高温的炉子该选用什么材料做呢？好在这样高温下物质都在电离的气体状态，叫等离子体。离子在磁场中将围绕磁力线回旋运动。磁场越强，回旋半径越小。于是就可以用强磁场来约束等离子体，这样的磁体叫约束磁体，用常规磁体来做这样的约束磁体是无法想像的。一个约束磁体就是一个“磁炉”。所以实现受控聚变热核反应必需一个超导磁体以在数十立方米的广大空间内产生十几特的磁场作为热核反应的炉子。约束磁体就不仅仅是用于高能物理研究范围了。

另一种设想中的大型超导磁体是用于磁流体发电。磁流体发电机可将火力发电的热效率从 40% 提高到 55%，它也需要大空间中有强磁场，以大型超导磁体最适合。据报道 前苏联曾设想建设 50 万千瓦的试验性磁流体发电站。

§ 1.5 超导材料与能源工业

高质量，清洁环保，使用方便是电能优于其他一些能源的突出之处。电能的使用程度是一个国家发展水平的标志之一。减少宝贵的电能在生产、输送和使用中的浪费是一项紧迫而现实的任务。超导材料在电力能源方面应用的优点是它们具有零电阻性，以及完全抗磁性。它们至少可以在以下若干方面在能源工业方面发挥作用：

电能输送超导电力电缆在理论上可以无损耗地输送电能，因为一切载流导线的能量损耗都是因为导线有电阻：能量损耗正比于导线电阻。常规输电采