

斯坦福大学的高能加速器

STANFORD HIGH ENERGY ACCELERATOR

赵 午

前 言

有一次，一位老先生问我学什么的，我答以加速器。他竖起大拇指勉励我多多努力，把加速器研究清楚，美国就不必每年进口这么多石油了。我糊涂了好一阵子之后才弄清楚，原来老先生把加速器和核能混为一谈了。

其实老先生也不算错，加速器与核能虽然是两回事，但对过去核物理与今天核聚变的研究发展，加速器确实有它的贡献。只是，加速器并不限于供做核物理研究用，其它如医疗、生物、X光源、材料研究等，也都用到加速器。电子显微镜基本上是一座电子加速器：电视机的萤光管也是由一个小型的加速器构成。老先生误以为我是学核物理的，其实若说我是学电视机的还更妥贴一些。

除了上述种种重要的应用之外，现代加速器最显眼的用途是用作高能物理实验的工具。座落于美国加州旧金山之南约35公里的斯坦福直线加速器中心(Stanford Linear Accelerator Center, 简称SLAC)即是一所专做高能物理研究的加速器中心。本文的目的是简单介绍SLAC以及其附设的高能实验设备。

SLAC既然是专门研究高能物理的实验室，它过去的历史与未来的发展都必然和高能物理息息相关。高能物理这二三十年来的演变和进展，实起源于核物理的研究。当初核物理研究的成果是有目共睹的，如今我们自然希望高能物理的研究也能象核物理一样，提供一些能实际应用的成果。然而至目前为止，高能物理研究的实用成果还有待开发，下一代的高能加速器所需人力、物力却已达到天文数字。高能物理何去何从是许多人关心的问题，SLAC未来的发展与这个问题的关系也是本文要讨论的。

前代史——直线加速器

要谈SLAC的历史，自然先得从斯坦福大学说起。电子直线加速器逐步由小到大的演进，斯坦福大学的功劳不可湮灭。

电子直线加速器最初的发展，本是为了X光与核物理的研究，用来产生高能量电子束流的，但由于加速电子所需的微波工艺落后，进展缓慢。二次大战期间由于防空雷达的需要，大大的刺激了微波工艺的发展。在这期间斯坦福大学的研究工作者所发明的用作高功率微波源的“速调管”即其中一项重要的突破。这项发明经过逐步改进一直沿用至今。

战后，斯坦福大学的研究工作者念念不忘微波工艺在加速电子方面的应用。首先用战时发展的工艺造成了第一部高能的电子直线加速器，取名斯坦福一号(Stanford Mark I)。与此同时，他们更继续改进速调管技术，两年以后建成了高效率的斯坦福二号。不久又用与二号基本上相同的技术造成斯坦福三号。以后三号逐年改进，长度增加，电子能量也越来越高(参考表1)。

这时，由于大步向前迈进的核物理研究仍有其解决不了的问题，斯坦福三号的电子能量渐显不足，建造一座更大的加速器的呼声越来越高。同时，战后的科学界，挟原子弹试验成功之余威，对基础研究的要求较能得到有远见的政治家们和一般公众的支持。于是在1957年斯坦福大学向美国政府提出了成立SLAC，建造一座两英里长的直线加速器的计划。此后，经过四年多严格的讨论和审核，终于获得批准，并由斯坦福大学和政府部门的原子能委员会签订合同，由斯坦福大学拨地，原子能委员会拨款，建成之后由斯坦福大学负责管理，但对全国其它研究机构公开。合同规定

SLAC 只做基础科研，所有资料和研究成果可以自由发表，完全没有保密的限制。合同五十年期满后 SLAC 由斯坦福大学收回。到 1966 年，SLAC 建成，当时的造价超过 1.1 亿美元。

值得一提的是，SLAC 在得到政府批准之前是经过严格的反复审查的。譬如造价，就不止一次经过第三者的工程公司分头估计，证实斯坦福大学的估价是准确的，而后来的事实也证明 SLAC 的造价与估价是极为接近的。再譬如防火防震的问题，也是经过工程公司反复研究，证实斯坦福大学的设计是可行的。此外，加速器对环境的污染也在审查范围之内。这也部分地说明为什么从提出设计到获得批准要四年多的时间。

表 1 中还列有斯坦福四号小加速器。与前不同的是，它主要用于医疗研究，同时，一些准备装入 SLAC 的重要零件也曾预先在此测试。斯坦福一至四号如今已功成身退，不复存在，SLAC 的前代史于此结束。至于两英里长的大型直线加速器，除了做本身的高能物理实验之外，又做了母亲，一连生下两个下一代的圆形电子加速器。

表 1 在 SLAC 前代史中起作用的几座电子直线加速器
(MeV 是百万电子伏，电子能量单位；GeV 是 1000MeV 的简写。)

加速器名称	建成年代	长度	电子能量
斯坦福一号	1947	12 英尺	6MeV
斯坦福二号	1949	14 英尺	40MeV
斯坦福三号	1950	30 英尺	75MeV
	1953	210 英尺	600MeV
	1964	300 英尺	1.2 GeV
斯坦福四号	1957	20 英尺	40MeV
两英里直线加速器	1966	2 英里	20 GeV
	1980	2 英里	30 GeV

近代史——圆形加速器

用直线加速器加速电子撞击“静止靶”的物理实验有一个缺点，电子的能量无法完全利用。譬如 SLAC 的两英里直线加速器所产生的 20GeV 能量的电子，在研究电子与质子的碰撞作用时，能利用的能量仅有 30%，其余 70% 是质心运动的动能，是与碰撞作用无关的用不上的部分。如果企图用 20GeV 的电子撞击静止靶来研究电子与电子的碰撞作用，则效率更低，只有 1% 的能量是有效的。

于是有人想到，为何不设计一个圆形的加速器，把来自直线加速器的高能电子束团注入其中储存起来，让电子束团在这样的“储存环”中旋转，然后将两个储存环并排成 8 字形，使两环中的电子束团在并排相连之点对撞，如图 1（甲）所示，就可以做实验了。这样的设计，其电子能量的使用效率是 100%，因为质心运动的动能等于零。在作电子与电子的碰撞实验时，一座 1GeV 的小型储存环所提供的有效电子能量，等

于一座 2200GeV 的巨型直线加速器的有效能量，很明显是非常合算的。

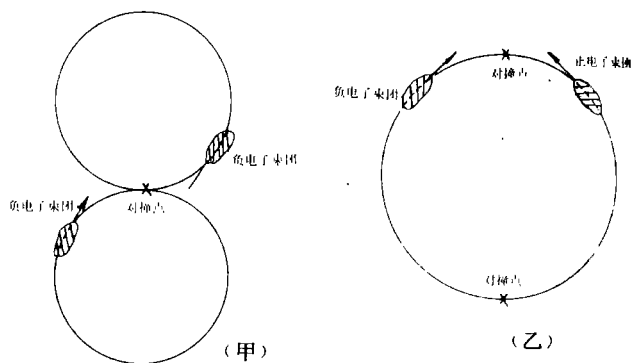


图 1 两种储存环设计的示意图。电子在束团内的分布非常稀薄，两个束团对撞时，只有极少数的电子正好撞上迎面而来的束团内的电子，其余绝大多数的电子穿过了迎面而来的束团，继续在储存环内旋转，等待下一次的对撞。

这个想法提出之后，1958 年斯坦福大学便与普林斯顿大学着手合作，在斯坦福大学校园内建起了一座如图 1（甲）所示的对撞机；注入器则用的是当时的斯坦福三号。不过不幸的是，当时这些研究工作者面临的不是他们迫切要进行的高能物理实验，而是一个接着一个的有关电子束团在储存环内的稳定性的难题。一直到 1965 年，稳定性的问题才勉强得到初步解决，做了一些差强人意的实验。终斯坦福—普林斯顿对撞机之一生，造价、操作加上实验仪器，共用去约 180 万美元。

然而，这些人的努力并没有白费。通过他们的努力，人们掌握了许多电子在储存环中运动的规律，以储存环为主体的 SLAC 的近代史才得以顺利发展起来。

图 1（乙）示意的是另一种储存环对撞机的设计。利用正负电子质量相等，电荷相反的性质，可以让它们在同一个环内反方向旋转。这样的设计只用了一个储存环，却有两个对撞点。这样一个吸引人的设计，SLAC 的工作者自然不会放过。他们于 1964 年向美国政府提出了一个如图 1（乙）所示的设计，但由于当时斯坦福—普林斯顿对撞机正给不稳定的电子束团弄得焦头烂额，储存环的想法是否能成功还没有足够的把握，所以一直到六年之后原子能委员会才同意拨款建造，并于 1972 年建成，取名 SPEAR，当时造价 600 万美元。

在这个阶段，高能物理正以全速向前发展。加速器的造价虽高，以一国之力来建造总还不是大问题，因此世界上有条件的国家之间竞争非常激烈。在 SPEAR 提出计划之后的几年里，世界上其它地方已有几座类似的储存环抢先建成，并投入使用了。它们的成功充分说明了储存环的想法是可行的，SPEAR 也因而获得了批准。但起步已是慢了一步。

所幸 SPEAR 后来居上，它的一个实验组领先于

1976年发现了粲粒子(ϕ 粒子,或叫J粒子)。同时发现粲粒子的,还有纽约附近的布鲁克海文实验室的一个实验组。这个重要的发现,把当时沉寂已久的高能物理向前大大推进了一步。

然而,SPEAR的电子能量又显得不够用了,高能物理要研究的问题是无穷无尽的,物理学家们又需要更大的对撞机了。1974年,SLAC和伯克利加州大学的劳伦斯实验室合作,提出了建造一座周长超过两公里的储存环对撞机的计划。有了发现粲粒子的成绩,加上当时对于储存环的有关技术的掌握比起建造SPEAR之前又提高了许多,伸手要起钱来自然理直气壮。果然,1976年美国政府就批准了这个计划,同意拨款。四年之后设备建成,取名PEP,造价7800万美元。SPEAR与PEP都是以现成的两英里直线加速器做注入器的。

表2 在SLAC近代史中起作用的几座储存环

储存环名称	建成年代	全周长(米)	粒子能量(GeV)
斯坦福-普林斯顿	1965	25	0.5
SPEAR	1972	234	2.5
	1974	234	4
PEP	1980	2200	18

目前的应用——同步辐射储存环

前面提到,高能物理实验只是加速器许多用途之一。以电子储存环为例,除了做对撞机外,它的一项副产品——同步辐射——使它摇身一变,成了材料科学研究的重要工具。

一个湿的车轮高速旋转时,水滴沿着车轮切线方向射出。同样,一个电子在储存环内旋转时,沿切线方向是要放射出电磁波来的,这种电磁波就是同步辐射。对作为对撞机的电子储存环而言,同步辐射是不受欢迎的,它带走了一部分电子能量,这些能量必须用加速系统给以补充。这个问题我们在后文讨论未来的超高能电子储存环时还要提起。

同步辐射电磁波的频率一般在紫外光到X光的范围内,光谱范围宽,准直性能好,强度又高,所以电子储存环是非常理想的紫外光和X射线源,在材料科学研究中很有实用价值。目前世界各地,同步辐射储存环雨后春笋般地成长,其中一部分是由已退休或半退休的对撞机修改而来,另一部分是专为同步辐射新建的,后者比前者自然更能适合同步辐射实验的需要。

以SPEAR为例,自1974年以来,申请做同步辐射实验的计划以每年翻一番的速度增长,目前就有三、四百个实验计划在等待批准。SPEAR同时可进行十多个同步辐射的实验,每个实验所需时间从几天到几年不等。

除了直接利用储存环的同步辐射之外,我们还可以很容易地利用一些特殊的磁铁结构来改造同步辐射

的频率范围与频率分布,或增加同步辐射的强度,而不必增加储存环电子的能量。采用这些技巧之后,一个中小型的储存环可以承担大型储存环的工作,这一点是与高能加速器越造越大的情况不同的。

电子与电磁波所构成的物理系统应用广泛,目前电子同步辐射的应用还只是一个起步,但一个成功的起步也同时准确地指出了有希望的方向。例如,在加入上述的特殊磁铁构造之后,若再加一个激光源,则这一套设备或许可以用来产生高强度的“自由电子”激光,这就是朝这个方向发展的可能的收获之一。

加速器之外

几个单独的加速器与储存环,并不构成一所实验室。在这里,我们暂时将有关加速器的讨论搁下,来谈一下有关SLAC的一些组织上的和附属设备的情况。

SLAC共有1200多员工,其中行政人员约150人,秘书、采购、图书管理等约150人,物理学家150人,工程人员将近300人,技术工人将近400人,计算机管理操作及程序编写约100人,此外还有30名左右的研究生,由各地到此做实验的不属于SLAC的人员则不包括在内。以上的划分不是很精确的,譬如行政人员中很多是由业务人员兼任,将他们划为行政人员是有些随意性的。

SLAC的经费在1981年度大约是6000万美元,其中70%左右是员工的工资与福利,其余则用于购买材料与增添设备。操作加速器要用大量的电,SLAC一年的电费超过400万美元。若有额外的加速器项目,例如PEP,则另行申请拨款建造。

计算机是重要的附属设备,SLAC在1967年曾买了一台IBM-91型的计算机,以后在1972年又增购了两台IBM-370,并将三台计算机联合起来操作。这些装备陆续用去2000多万美元。初步设想,明年可能再添加一台,以应付日渐增加的工作量。

计算机的使用是完全开放的,为了尽量提高计算机的使用率,SLAC各处都设有终端机,与主机相连。工作者只要需要,随时都能在附近的角落里找到一个终端机进行运算,极为方便。

除了上述较大型的计算机之外,还有许多控制加速器的小型计算机。一般说来,直线加速器并不需要计算机自动控制,两英里加速器至今仍主要靠人工操作。储存环则因对粒子束团稳定性的要求较高,计算机控制是需要的,例如SPEAR就有简单的计算机控制,而大型储存环,如PEP,所用的计算机控制就比较复杂了。此外,有些实验者自备了小型计算机,作取数据之用。

图书馆二十四小时开放。为了提高图书使用率,所有书籍、刊物都是开架陈列的,借书只需签个字,也没有数目的限制。周末与晚间,图书馆虽然不派值班的人看管,却仍照常开放,供人自由使用。

SLAC共有10台左右复印机。它们的使用也是完全开放的,在资料的交流方面起着巨大的作用。

提起交流,在一所实验室里,交流就象人体内的血液循环一样重要。交流的形式除例行开会之外,小组之间与个人之间的讨论占有更大的比重。工程师要知道了加速器设计者所定的规格才能动手设计,加速器设计者要知道实验者的需要以及加速器设计上的种种限制才能决定要做的实验,这些全要靠交流——大量的交流,迅速的交流。

以加速器的磁铁设计为例,加速器的理论组定下了制造与安装时的误差范围,工程师若觉得范围定得太窄,技术上无法达到,或可以达到但费时费钱太多,就必须与加速器理论组反复讨论,在电子束团运动稳定的条件下,将误差范围尽可能地放宽。写到此处,想起西欧核子研究中心所建的第一座质子储存环。十年前这座储存环刚刚建成,第一次尝试注入原子束团就成功了。外行人对此津津乐道,认为是一件了不起的成就;内行人却大摇其头,因为这说明了这座储存环设计的规格定得过严,误差范围定得太窄,因而浪费的时间与金钱一定不少。在加速器的设计中,真正懂得尖端技术或精密技术的行家一定尽量避免用这把昂贵的牛刀来杀鸡。他们的原则是:能不尖端,必不尖端;能不精密,必不精密。

新计划——直线加速器对撞机

虽然SLAC在提出PEP储存环的计划后,只用了两年的时间就得到美国政府的批准,但已是慢了一步了。联邦德国的一所实验室在PEP之前一年半就建成了一座类似的电子储存环,并在PEP开始运转之前,早就把几个最重要的实验快马加鞭地做了。PEP仅以一年半之差,建成之后已是二流的加速器了,“竞争”的鞭子是毫不留情的。

电子储存环这一代加速器的成长,大约每隔六七年设计能量增加10倍,但是高能加速器是永远不够大的。目前西欧中心已提出建造一个周长30公里,设计能量90GeV的超级电子储存环的计划,这个取名LEP的计划一旦付诸实施,造价将达10亿美元,造成之后的运转费用,光是电费一项每年就值半个PEP。

面对激烈的竞争与急速上升的加速器造价,SLAC的工作者感到储存环的老办法不再能满足需要,新一代的加速器必须诞生,于是提出了一个“斯坦福直线加速器对撞机”(简称SLC)的设计来,这个设计得到了美国政府的批准,已动工建造。

前面我们提到电子在储存环内经同步辐射所损失的能量,必须用加速系统给以补充。一般说来,储存环的设计能量越高,同步辐射带走的能量就越高,为补充能量所需的加速系统就越复杂,越昂贵。同时为了减低同步辐射,储存环的半径还必须尽量增大,因此电子储存环的造价随设计能量急速上升(质子储存环没有这个问题)。SLC针对这个问题提出的方案是

利用来自直线加速器的正负电子直接对撞,省却了储存这一步,就可以省去与同步辐射有关部分的用项了。SLC的简单示意图,以及它与SLAC其它加速器的相对位置,如图2所示。

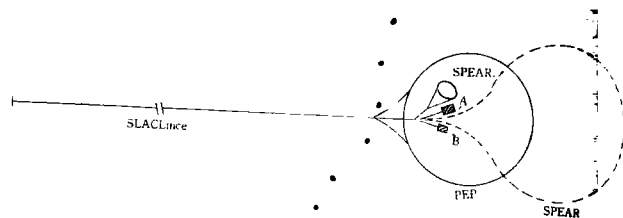


图2 SLAC加速器示意图。A与B是静止靶实验区, SPEAR与PEP是储存环对,虚线表示目前正在申请建造的直线加速器对撞机SLC。

目前两英里直线加速器的能量是30GeV,SLC计划希望将直线加速器的加速系统加以改进,可以得到50GeV的正负电子对撞,但这个能量比起LEP来仍差了一截。SLC的主要目的不是为了取代LEP,而是充当新一代加速器的开路先锋。的确,储存环到了LEP已是无路可走,在短期的未来,SLC是大有可为的。

然而,从长远看,直线加速器对撞机这一代的发展仍是有限的。SLC的成本比起LEP来虽然不算太高(原有的两英里加速器,另加9000万美元),但SLC以后的下一个直线加速器对撞机的造价却又是天文数字了。与此同时,高能物理实验所需要的粒子能量仍持续上升,于是又需要建造更大的加速器了。到那个时候,一座加速器的造价将高达100亿美元的数量级,已不是以一国之力所能负担,今天存在的激烈竞争也不再存在了。现在已经有人呼吁,希望到时候能由世界各国合作建造一座独一无二的极大的加速器。然而,100亿美元到底不是个小数目,何况建成之后高能物理中的问题是否就能迎刃而解了。若答案是否定的,则高能物理这美丽盛开的花朵变成了食之无味弃之可惜的鸡肋,将是一件多么不幸的事。

理想的情形是在这个不幸到来之前,能实现另一种完全不同的新的加速粒子的方法,大幅度降低加速器的造价,延迟经费极限的到来。但是,这也只是治标的办法,真正治本的办法仍然是要证实高能物理的实用价值,使它生产所得的利润能弥补或超过对它的投资,而所谓投资,除了有形的加速器的造价之外,也包括用在培养高级科技人才上的无形的,却可能更为巨大的投资在内。当初发展基本科研与高能物理不愧为有眼光、有魄力的构想。即是目前,中低能的核物理仍有相当的实用价值,但高能乃至超高能物理无可否认地仍缺少一个长期发展的远景。在这个远景没有出现之前,SLAC这个首屈一指的高级实验室,仍只是一艘没有罗盘的船,随波逐流罢了。

(下转第52页)

(DNA断片)，将它们从一种细胞转移到另一种细胞，复制新的DNA，指令细胞合成我们期望获得的蛋白质。要注意的是，到目前为止，并不是所有基因都可分离出来，也不是所有已分离的基因都能在它原居细胞以外的细胞中成功地合成蛋白质，但现代化遗传学工程师正朝这些目标努力。

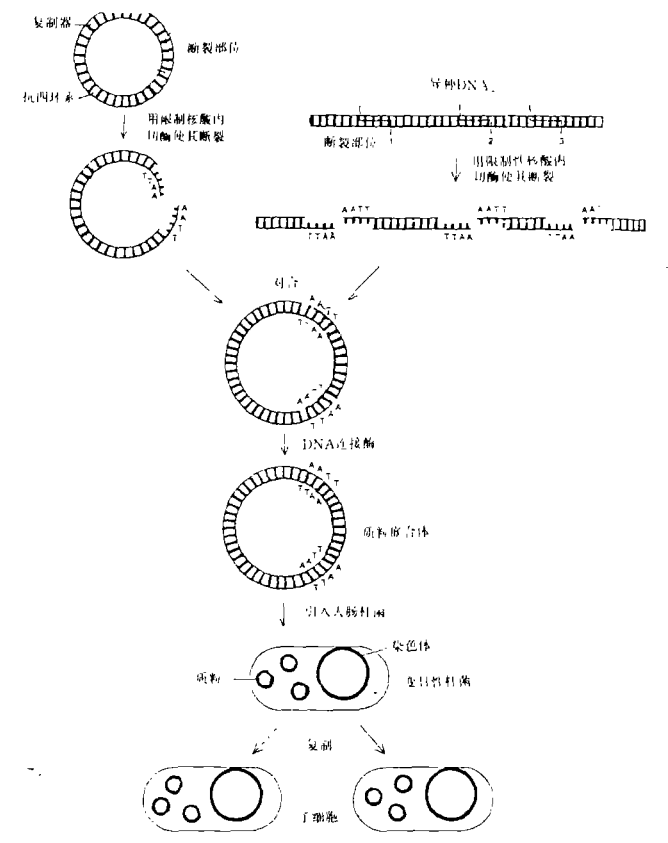
在DNA重组技术的工业应用方面，一个直接的目标是改造一种微生物，使它能够合成一种人类的基因产物，例如胰岛素。使用微生物的好处是它们具有高速繁殖的特性，可能产生大量的胰岛素，大大有利于普及使用这类贵重的药物。目前使用的微生物，大都是一种普通的肠内细菌——大肠杆菌（*Escherichia coli*）。这种微生物之所以有用，是因为对于它的遗传学和分子生物学特性，在过去数十年已进行过大量的基础研究。为了使大肠杆菌具有合成人类蛋白质如胰岛素的能力，必须从人类细胞分离出天然合成胰岛素的DNA（或者在实验室中合成它）并将其移入细菌细胞。当细菌细胞分裂繁殖时，会复制加入的DNA。由于细菌有高速繁殖的特性，可以产生大量的胰岛素DNA。这一过程被称为基因克隆繁殖（genecloning）。

过去十年中的几项关键性发现使人类基因可能实现。首先是发现了某些细菌含有一些小的遗传单位，它们并不是染色体的一部分，被称为质粒。在大肠杆菌中，这些质粒引导细胞内多种活动，包括该种细菌抵抗抗生素的能力。这种质粒可以被分离出来，在试管中使它与其它DNA组合，而且可再引入其它细菌细胞中，为该新寄主细胞所摄取并复制合成蛋白质。要使质粒与其它分离的人类DNA在试管中组合成功靠的是另一项重要发现，就是发现了一些限制性核酸内切酶（restriction endonucleases），这些酶可以在DNA的一些特定部位进行切割，产生一些小的DNA片断。因此有可能把含有成千基因（长链DNA）的染色体断裂成一些只含一个或少数几个基因（对应一个或数个蛋白质的DNA片断）的染色体。如果应用限制性核酸内切酶来断裂人类染色体，这种较小的片断就能插入细菌的质粒。该质粒现在已成为人类遗传信息的媒介者。可以把此质粒再引入细菌细胞。在细菌细胞中，此质粒被复制，复制成的基因包括引进的人类基因，可能具有蛋白质合成的功能。

并非所有插入细菌质粒的人类基因都能够释放它的遗传信息，进行蛋白质合成。这里有一个很基本的问题并且这是全世界的有关实验室集中研究的一个问题。它涉及某些开关机制（switching mechanism），接通后细胞的译码器就能辨认新基因的边界并精确地表达该基因的信息，合成蛋白质。虽然有这些困难，相信这些开关机制不久将被详细了解，使插入质粒运载体的所有基因都能够具有这种功能。

DNA重组法和遗传工程有可能提供为人类服务的新生命类型。许多方法已经应用于商业生产，如胰岛素、干扰素及某些病毒疫苗等。正在来临的分子时

代的许多成就将依赖于继续大力探索在每种类型细胞中遗传物质的功能特性。



附图将异种DNA与质粒并接，并随质粒引入大肠杆菌中。用限制性核酸内切酶断开质粒的一个部位。此部位不妨碍质粒中与复制或抗四环素有关的基因（左上）。该酶能识别的核苷酸序列也存在于其它DNA中，所以该酶也能断裂一个异种DNA，大约是在随机基础上每4,000到16,000个核苷酸对中断裂一个。异种DNA同质粒DNA的并接是靠互补碱基对（A与T，G与C）之间的氢键，新的复合分子的愈合则是靠DNA连接酶。此DNA嵌合体含有完全的质粒和异种DNA的断片，借转化而被引入大肠杆菌。靠质粒的复制功能，该异种DNA得到复制。

（上接第50页）

后 记

曾听一位朋友感慨地说：“西方国家发展尖端科技真是不遗余力。就说SLAC吧，加速器、计算机、图书馆、复印机，设备是多么齐全，难怪人家国力这样强大了”。富国强兵的道理当然大大地超出了我所知的范围，但听了这位朋友的高论，感到这或许是不够全面的说法。很希望读者在读完本文之后，不要得到类似的印象。尖端科技固然重要，其与国家富强与否的关系到底有限，若只注意到了尖端科技的“现象”，而忽略了或许还有其它方面“本质”的存在，则即便培养出一些尖端科技来，也只是供以观赏的暖房中的花朵，得不偿失。