

发现顶夸克的最新证据

李 卫 国

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

介绍了美国费米国家实验室 CDF 合作组关于顶夸克的证据。从 19.3 pb^{-1} 积分亮度的质子反质子对撞的数据中, CDF 找到了一些顶夸克对的可能事例。其中包括两个双轻子事例, 10 个轻子加带 b 夸克标记的强子事例, 其中三个事例中 b 夸克由次级顶点标记, 四个事例由半轻子衰变标记, 另外三个事例同时由次级顶点和半轻子衰变标记, 共 13 个标记。这些事例由本底引起的几率为 0.26%。由这些事例拟合得顶夸克质量为 $174 \pm 10^{+13}_{-12} \text{ GeV}/c^2$, 其产生截面为 $13.9^{+6.1}_{-4.1} \text{ pb}$ 。

关键词 顶夸克, CDF, 标准模型

Abstract

This article describes the analyses about the evidence of top quark by CDF collaboration at Fermi National Lab. From a data sample of 19.3 pb^{-1} integrated luminosity, CDF found some candidates of top production. There are two dileptonic events, 10W plus jets events with b tagging, 3 tagged by second vertex, 4 by b leptonic decay, 3 tagged by both. There are total 13 tags. The probability that these events are due to background is 0.26%. By a maximum likelihood fit, the top mass is $174 \pm 10^{+13}_{-12} \text{ GeV}/c^2$, and the top cross section is $13.9^{+6.1}_{-4.1} \text{ pb}$.

Key words t quark, CDF, Standard Model

1994 年 4 月 26 日, 英国费米国家实验室召开了一个记者招待会, 由费米实验室所长 John Peoples 和 CDF (Collider Detector Facility) 合作组的发言人宣布了发现顶夸克的证据, 并给出顶夸克的质量为 $174 \pm 10^{+13}_{-12} \text{ GeV}/c^2$ ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$, c 为光速)。此事在全世界高能物理学界引起了很大兴趣。那么顶夸克真的发现了吗?

大家知道, 原子核由质子和中子组成, 而质子和中子由夸克组成。按照现在的物质结构和相互作用的标准模型^[1], 基本粒子由三代轻子(电子, μ , τ 和它们相应的中微子), 三代夸克[(u, d)或(上, 下)夸克对, (c, s)或(粲, 奇)夸克对, (t, b)或(顶, 底)夸克对], 和它们之间相互作用的传播子[即光子, 中间玻色子(W 和 Z)和胶子], 以及引起粒子质量的 Higgs 粒子组成。在此以前, 顶夸克和 Higgs 粒子还没有

在实验中发现。

标准模型在实验上取得了巨大的成功。几乎所有的实验结果都和标准模型的预言一致。例如, 在欧洲核子研究中心(CERN)的正负电子对撞机上通过测量 Z 粒子的宽度表明, 质量小于 Z 粒子质量的中微子只有三代, 这和标准模型符合。因此, 寻找顶夸克和 Higgs 粒子是高能物理学界最重要的目标。

在现有的正负电子对撞机上寻找顶夸克的努力, 其结果都是否定的。原因是由于顶夸克很重, 现有的正负电子对撞机还不足以产生顶夸克。由于量子数守恒, 强作用中顶夸克必需成对产生。对撞能量二倍于顶夸克质量才有可能产生顶夸克。因此, 寻找顶夸克的任务就自然地落到了位于美国芝加哥的费米国家实验室中的现今世界上能量最高的质子反质子对撞机上。需要说明的是, 在 CERN 的实验中虽不能

直接产生顶夸克,但通过对 Z 粒子产生的共振形状参数和 Z 粒子的衰变特性可间接推算出顶夸克的质量为 $177 \pm 11^{+10}_{-12} \text{GeV}/c^2$ 。

费米实验室的质子反质子对撞机上的对撞能量为 1800GeV 。上面有两个大型的通用探测器在做物理实验。它们分别被命名为 CDF 和 $D\phi$ 。CDF 在 1985 年初步建成,已有九年取数和做物理分析的经验。 $D\phi$ 是 1992 年建成投入运行的。对撞机经过不断改进,其亮度一年比一年高。CDF 用来分析顶夸克的数据是在 1992—1993 年度获取的,其积分亮度为 19.3pb^{-1} ($1 \text{pb}^{-1} = 10^{36} \text{cm}^{-2}$)。而同期 $D\phi$ 由于对撞机轨道的原因,其积分亮度比 CDF 要少 40%。

1994 年 4 月 26 日,当 CDF 公布其发现顶夸克的证据时, $D\phi$ 组表示,不认为由现有的数据中可作出顶夸克是否存在的结论。考虑到二者在获取数据的积分亮度上的差别和在数据分析上的差异,二者的结果是不矛盾的。下面着重介绍 CDF 在顶夸克寻找上的分析工作^[2]。

在质子反质子对撞中顶夸克的产生和衰变可由图 1 表示。其中顶夸克衰变为 $W + b$ 夸克。 W 可衰变为夸克对,在探测器中表现为强子喷注。 W 也可衰变为轻子加中微子。由于 W 衰变产生的电子或 μ 子为高横动量的孤立带电粒子,其在探测器中的特征信号很清楚。因此,CDF 在寻找顶夸克中,或利用两个 W 都衰变为电子或 μ 子的事例(称双轻子事例),或利用一边 W 衰变为电子或 μ 子,另一边衰变为强子的事例(称轻子加强子事例)。前者占顶夸克对衰

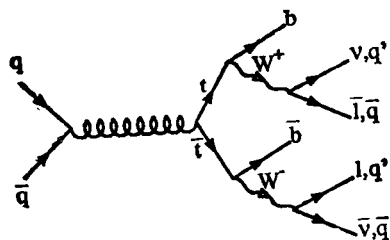


图 1 典型的顶夸克的产生和衰变图
(q, q' 为夸克, t 为顶夸克, b 为低夸克; l 为轻子, ν 为中微子; $-$ 代表反粒子,如 \bar{t} 为反顶夸克)

变的 4/81,而后者占 24/81。

由于顶夸克很重,其产生截面很小^[3]。当顶夸克质量为 180GeV 时,理论产生截面为 4.2pb , ($1 \text{pb} = 10^{-36} \text{cm}^2$)。对 19.3pb^{-1} 的积分亮度而言,产生的顶夸克事例不超过 100 (事例数 = 积分亮度 \times 产生截面)。考虑到可用的分支比和探测效率,能找到的事例数是很少的,在 10 个左右。而在质子反质子对撞中,总的反应截面为几十毫巴,为顶夸克产生截面的 10^{10} 倍。可见寻找顶夸克难度之大。

高能物理实验用的通用探测器一般包括下面一些主要的探测装置:(1)测量带电粒子在磁场中偏转轨迹位置的径迹探测器,由此推算出带电粒子产生时的顶点位置和其动量的大小和方向;(2)用于鉴别电子和光子并测量其能量和方向的电磁量能器;(3)用于测量强子喷注能量和方向的强子量能器;(4)用于鉴别和测量 μ 位置的 μ 探测器。在对撞实验中,探测器围绕对撞束流线而建,根据粒子在物质中的穿透力的不同,径迹探测器离对撞点最近,由里到外,依次为电磁量能器、强子量能器和 μ 探测器。中微子在探测器中不留下任何信号,不可能被直接探测到。在质子反质子对撞中,很大一部分能量被质子反质子中没有参加碰撞的夸克和胶子沿束流线方向带走,总的对撞能量是不确定的。但对撞产物总的横动量矢量和近似为零,可利用测量除中微子外的其他所有粒子的能量和方向来间接测量中微子的横动量,在实验中称为丢失横动量测量。

CDF^[4] 是一个大型通用探测器(图 2)。它有一个中心磁场为 1.4T 的超导螺旋线圈。其内部的径迹探测器从内到外依次为:四层用于测量次级顶点的硅条探测器(SVX),其单丝位置分辨率为 $13 \mu\text{m}$,用于测量强子喷注顶点的横向位置分辨率平均为 $130 \mu\text{m}$;稍外为测量顶点 z 向位置的顶点探测器(VTX), z 向位置分辨率为 1mm ;再外面为中心漂移室(CTC),其 84 个丝层用来测量带电粒子的轨迹。各径迹探测

1) 引自 M. Martinez 1994 年的来华报告。

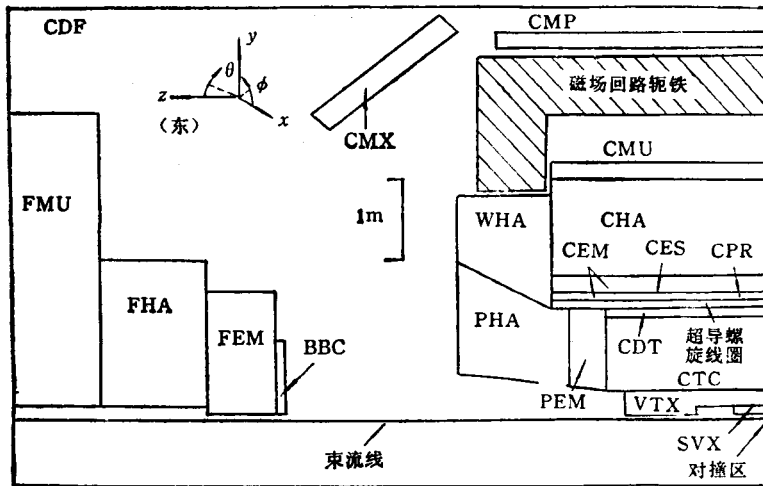


图2 CDF 探测器 1/4 剖面图

SVX——硅条探测器;VTX——顶点探测器;CTC——中心漂移室;CDT——中心漂移管;CES——中心正比计数器;CEM——中心电磁量能器;CES——中心条探测器;CHA——中心强子量能器;CMU——中心μ探测器;CMP——中心μ探测器升级;PEM——端盖电磁量能器;PHA——端盖强子量能器;WHA——端盖强子量能器;CMX——中心μ探测器延伸;BBC——束流探测器;FEM——前部电磁量能器;FHA——前部强子量能器;FMU——前部μ探测器

器组合后测量带电粒子横动量 (p_t) 的分辨率为

$$\frac{\delta p_t}{p_t} = \sqrt{(0.009 p_t)^2 + (0.0066)^2},$$

p_t 的单位为 GeV/c 。

在超导线圈之外依次为电磁量能器和强子量能器。量能器的结构为塔状的夹层探测器,由相间的吸收层和信号层组成。信号层在中心部分为闪烁体,端部和前部为气体探测器。电磁量能器由中心部(CEM),端部(PEM)和前部(FEM)组成,其能量分辨率分别为 $14\%/\sqrt{E_i}$, $22\%/\sqrt{E}$, $26\%/\sqrt{E}$, 这里 E_i 和 E 分别为电磁簇射的横向能量和总能量。在CEM中有测量电磁簇射位置的气体探测器(CES)。强子量能器也根据位置分为CHA, WHA, PHA和FHA几部分,其能量分辨率分别为 $50\%/\sqrt{E_i}$, $75\%/\sqrt{E}$, $106\%/\sqrt{E}$ 和 $137\%/\sqrt{E}$ 。量能器覆盖了大部分的立体角 $|\eta| < 4.2$, $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$ 。最外层的μ探测器(CMO, CMP, CMX和FMU)被用来探测和物质作用

物理

截面小的μ子,而其他粒子大部分被量能器和μ计数器中的物质(主要为铁)吸收掉。

顶夸克事例的特征为孤立的高横动量 ($> 20\text{GeV}$) 的电子和μ子,高丢失横动量 ($> 20\text{GeV}$) 和强子喷注。实验中孤立高横量电子和μ子是比较容易鉴别的,在这方面CDF通过研究W和Z粒子积累了经验。丢失横动量

$$E_{/t} = -\sum_i E_{ti},$$

E_{ti} 为量能器各单元中沉积能量的横矢量。 $E_{/t}$ 的测量误差为

$$\delta E_{/t} = 0.7 \sum_i E_{ti}.$$

而强子簇射能量由围绕能量中心立体角范围

$$\Delta R = \sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2} < 0.4$$

内量能器所有单元能量相加求得。这个能量和需修正后才相当于强子喷注的能量,修正率平均为 130% [5]。

双轻子事例的选择条件为:两个孤立的横动量 $> 20\text{GeV}$ 的电子或μ子;总电荷为零;对 e^+e^- 对和 $\mu^+\mu^-$ 对,将其不变质量在 $75-105\text{GeV}$ 之

间的事例作为 Z 衰变排除；丢失横动量 $E_{\perp} > 25\text{GeV}$ ；两或两个以上能量在 15GeV 以上的强子喷注。CDF 在数据中选择到二个双轻子事例，均为 $e\mu$ 事例。而对本底，包括 WW ， $Z \rightarrow \tau^+\tau^-$ 和 $b\bar{b}$ 等，估算应为 $0.31^{+0.11}_{-0.10}$ 个事例。从两个信号和本底可推算在 95% 可信度下，顶夸克质量 $> 118\text{GeV}$ 。

从轻子加强子事例中寻找顶夸克需从大量直接产生的 W 粒子中筛选，这类和顶夸克对产生无关的 W 粒子其产额比顶夸克对产生大得多，其中部分 W 粒子直接产生时伴随着强子喷注，和需要寻找的顶夸克对事例的特征相似。利用选择高横动量的孤立电子或 μ 子加上高的丢失横动量可得到一个 W 样本，在此样本中，伴随 W 的强子喷注数分布见表 1。

表 1 W 事例中强子喷注数分布

强子喷注数	e^{\pm}	μ^{\pm}	总数	模拟
0	10563	6264	16927	—
1	1058	655	1713	1571
2	191	90	281	267
3	30	13	43	39
≥ 4	7	2	9	7

表 1 中最后一列为模拟产生的 W 事例中强子喷注数。从表 1 中可见，绝大部分 W 粒子伴随着较少的强子喷注。数据中强子喷注数 ≥ 3 的事例有 52 个，估计其中非 W 粒子的本底为 12.2 ± 3.1 。由表 1 可见，模拟的预期和真实数据符合比较好。因此，要求事例中强子喷注 ≥ 3 ，可大大压低直接产生的 W 的本底，而保留大部分顶夸克对的信号。

但是，和预期的顶夸克产生截面相比，在 52 个轻子 + ≥ 3 强子喷注事例中，仍有很大一部分不是顶夸克事例。进一步压低本底的方法是鉴别顶夸克衰变中产生的 b 夸克，而在直接产生的 W 事例中强子喷注以轻夸克为主。

CDF 利用两种方法来鉴别 b 夸克。由于 b 夸克的衰变寿命比轻夸克长，可用测量次级顶点的方法来鉴别。另一种鉴别 b 夸克的方法是探测 b 夸克衰变中产生的较低能量的电子或

μ 子。

CDF 用硅条探测器来测定次级顶点。把强子喷注中各带电径迹内推到束流线，选出偏离初级顶点在横向上三倍于标准偏差以上的径迹，由两条或两条以上这样的径迹可计算出这些径迹交点偏离初级顶点的横向飞行距离。例如，横向飞行距离大于三倍标准偏差（其平均值约为 $130\mu\text{m}$ ），则找到了次级顶点。

在 52 个轻子 + ≥ 3 强子喷注的事例中找到六个带次级顶点的事例。为检验上述次级顶点寻找方法的正确性，CDF 采用了另两种不同的方法来确定次级顶点。比较这三种方法找到的事例表明，第一种确定次级顶点的方法是可靠的，而由模拟估计的本底事例数为 2.3 ± 0.3 。

寻找低能电子和 μ 子的方法所用的选择参数和寻找高横动量电子、 μ 子的方法相似，但一些选择条件比较松。这种方法的可行性在 B 物理和 J/ψ 物理分析中得到了验证。用这种方法找到了七个 b 标记事例，而估计的本底为 3.1 ± 0.3 。

在六个次级顶点和七个低能电子、 μ 子事例中，有三个事例是共同的。因此，独立的事例只有 10 个。

至此，一共找到三类顶夸克对衰变的事例：双轻子事例，次级顶点事例，低能电子、 μ 子事例。CDF 用统计学的方法来估计顶夸克信号的可信度。单独地说，双轻子事例找到两个，本底估计为 $0.31^{+0.11}_{-0.10}$ ，信号由本底引起的几率为 0.12。次级顶点事例有六个，估计本底为 2.3 ± 0.3 ，信号由本底引起的几率为 0.032。低能电子、 μ 子有七个事例，本底为 3.1 ± 0.3 ，信号由本底引起的几率为 0.038。总的独立事例数有 12 个，估计本底为 $5.7^{+0.9}_{-0.8}$ ，信号由本底引起的几率为 0.016。考虑到第二、三类事例有三个重复的标记，而这两类事例相互关联，利用模拟方法，CDF 的最后结果是，这些事例由本底引起的几率为 0.0026。

由这些事例可计算顶夸克产生的截面。但是，由于接收度和本底估计都和顶夸克质量有关，顶夸克的产生截面将在推算出顶夸克质量

后给出。

对每一可能的顶夸克事例可拟合得到一个顶夸克的质量值。顶夸克对下列的产生和衰变过程被用来拟合顶夸克质量：

$$\begin{aligned} p\bar{p} &\rightarrow t_1 + t_2 + X \\ t_1 &\rightarrow b_1 + W_1 \\ t_2 &\rightarrow b_2 + W_2 \\ W_1 &\rightarrow l\nu \\ W_2 &\rightarrow j_1j_2 \end{aligned}$$

由以上五个方程两边四动量守恒可得20个约束条件。拟合中W质量设定为 80.2 ± 2.1 GeV^[6]。初始的质子、反质子 (p, \bar{p}) 四动量已知, 终态轻子 (l)、两个b夸克喷注 (b_1, b_2) 和两个一般强子喷注 (j_1, j_2), 其四动量可测量得到。X为除顶夸克对 (t_1, t_2) 外末态的其余粒子, X的横向动量由事例的丢失横动量求得。其质量和z向动量为两个未知数。 t_1, t_2, W_1, W_2, ν 的三动量有15个未知数, 加上顶夸克质量一共有18个未知数。从20个约束方程中可拟合出包括顶夸克质量的各个未知数。

在拟合中, 至今需有四个强子喷注, 为增加可用于拟合的事例数, 适当降低了第四个强子喷注的选择条件至横动量 >8 GeV。共有七个事例有四个或四个以上的强子喷注, 可分别拟合出顶夸克质量。

在对事例进行拟合前, 需对各强子喷注能量进行修正。CDF对一般的强子喷注有一套修正公式。在拟合顶夸克质量时, 再利用模拟方法对b夸克形成的喷注作进一步的修正。这种修正方法对由模拟产生的W衰变为二强子喷注事例和顶夸克对事例进行了检验, 重建后的W质量和顶夸克质量和产生时的质量值很接近。因此, 这种强子喷注能量修正的方法被用于拟合顶夸克的质量上。

事例中, 重建的强子喷注和 b_1, b_2, j_1, j_2 有很多种对应关系。拟合中选择误差最小的组合。

七个事例拟合得到的顶夸克质量(GeV)分别为 $172 \pm 11, 162 \pm 11, 158 \pm 18, 180 \pm 9, 188 \pm 19, 169 \pm 10, 132 \pm 8$ 。

如把这七个事例作为整体, 对顶夸克质量进行最大自然法拟合, 可得到最大自然函数值的对数 ($-\log L$) 和顶夸克质量 ($M_{t,op}$) 之间的对应关系, 见图3。图中的曲线是对其中八个点作三次曲线拟合而成。曲线的最低点在 $M_{t,op} = 174$ GeV处, 拟合的误差用 $\log L$ 由极值改变0.5来确定。因此 $M_{t,op} = 174 \pm 10$ GeV。

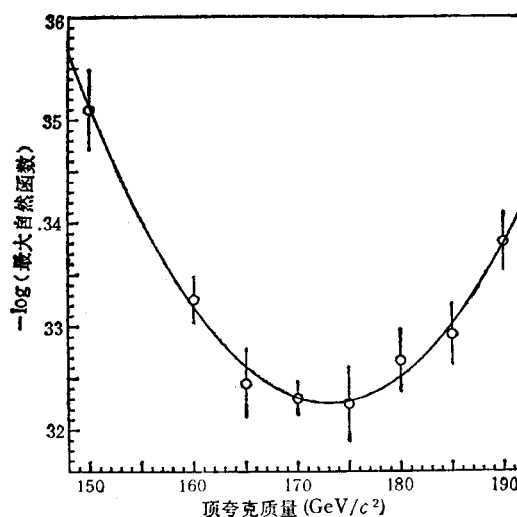


图3 顶夸克质量的最大自然法拟合

拟合得到的顶夸克质量的系统误差来自下列一些因素: 强子喷注能量的不确定性, 胶子辐射造成的夸克能量不确定性, 不同的本底估计, b夸克标记引起的误差, 不同的最大自然法拟合。包括这些系统误差的顶夸克质量为

$$M_{t,op} = 174 \pm 10^{+13}_{-12} \text{ GeV}/c^2.$$

由前所述, 相应的顶夸克产生截面为

$$\sigma_{t\bar{t}}(M_{t,op} = 174 \text{ GeV}/c^2) = 13.9^{+6.4}_{-4.6} \text{ pb}.$$

CDF在文章中表述: “由于统计量太少, 还不能确切肯定顶夸克的存在, 但对数据合乎逻辑的解释为顶夸克的产生。”

从上述对CDF分析的介绍中, 各个读者对顶夸克是否发现了这个问题可能都有自己的看法。本文作者的个人看法为, 可对CDF的结果有保留地接受。

本文作者在1985年至1988年在CDF合作组工作。CDF合作组在发表结果时是很慎重的, 需在合作组内反复讨论、完善。在发表有

关顶夸克的结果时,提供的材料全面而详细,所作的结论也是留有余地的。

当然,正如 CDF 文章中指出的那样,这个结果还不完善,主要表现在以下几个方面:一是统计量太少;二是得到的顶夸克产生截面比标准模型预言的值(约 5pb)要大;三是顶夸克的信号是从 W + 强子喷注事例中筛选出来的,对 W + ≥ 3 强子喷注的本底估计还值得进一步推敲。

CDF 文章发出后,从电子邮件中得知 CDF 又找到一个双轻子事例,预计 1994—1995 年度取数期间将获得四倍于现有数据的数据量。另外, D ϕ 组将会有比较肯定的答案。因此,费米实验室将很快会对顶夸克是否存在作出肯定的回答。如答案是肯定的,也可得到更精确的顶夸克质量值。

预计将在 2004 年左右建成的位于 CERN 的大型强子对撞机(LHC),其对撞能量为 14000 GeV,将对顶夸克的性能进行精确的研究。预计运行一年,在 e μ 道上可清楚确定顶夸克是否存在。用和 CDF 相似的方法可确定顶夸克的质量至 3GeV 的精度。

顶夸克的发现和其质量的确定,对下一代正负电子对撞机确定其对撞能量是一个很好的参考。目前日本、美国和德国在这方面都有热烈的反响。

顶夸克质量的确定可用来间接地推算 Higgs 粒子的质量,CDF 的结果 $M_{top}=174 \pm 16\text{GeV}$ 和在 CERN 正负电子对撞机上的实验结果结合起来,可推算出 $M_{Higgs} = 70^{+1}_{-10}\text{GeV}$,或在 95% 置信度下, $M_{Higgs} < 620\text{GeV}$ 。这对在 LHC 上寻找 Higgs 粒子有一定的指导意义。

- [1] S. L. Glashow, J. Illiopoulos and L. Maiani, *Phys. Rev. D*, 2(1970), 1285.
- [2] CDF Collaboration, *Phys. Rev. D*, (1994), 待发表.
- [3] E. Laenen, J. Smith and W. L. van Neerven, *Nucl. Phys. B*, 369(1992), 543.
- [4] F. Abe et al., *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res.*, A271(1988), 387; CDF Collaboration, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res.*, (1994), 待发表.
- [5] F. Abe et al., *Phys. Rev. D*, 45(1992), 1448. F. Abe et al., *Phys. Rev. D*, 47(1993), 4857.
- [6] Review of Particle Properties, *Phys. Rev. D*, 45(1992).

分子电子器件简介¹⁾

游效曾

(南京大学配位化学研究所,微结构科学技术高等研究中心,南京 210093)

张学群 韦钰

(东南大学分子与生物分子电子学实验室,微结构科学技术高等研究中心,南京 200018)

分子电子器件是新近发展起来的研究领域之一。从化学分子结构的观点简单说明了用于分子电子器件的功能材料的特征,对这些功能分子进行有序组装的技术,以及分子电子元件的功能,并列举了几个简单的器件模型。

关键词 分子电子器件,功能材料,组装技术,器件模型

Abstract

Molecular electronic devices (MED) are one of the novel areas developed rece-

1) 国家科学技术委员会重大项目及国家自然科学基金资助项目。