

# 电磁力和弱力的统一

Paul Langacker and Alfred K. Mann

1983年标志着粒子物理发展史中特别引人注目十年的结束。在从1973年开始的这十年中,有三个特别重要的,或许可以说具有历史意义的成就。它们是:

1. 理论上与实验上实现了控制所有电磁现象和弱相互作用的力的统一。

2. 认识到强相互作用粒子(核子、介子和其他强子)事实上是由称为夸克的更小的组分构成的,并发展了一种关于夸克之间作用力的初步理论。

3. 承认存在着除了质量外其它性质几乎完全相同的三代基本粒子族。每一代包括两个夸克,一个带电轻子(电子、 $\mu$ 子和 $\tau$ 子)和一个中微子。

电磁力和弱力的这种统一理论与强相互作用的初步理论一起,称为“标准模型”。在精确地描写基本粒子和它们之间的相互作用方面,这个模型取得了相当大的成功。与广义相对论引力理论结合在一起,又使它成为能够预言或至少能描写地球物理或天体物理的通常条件下物质所有性质的一种数学上自洽的理论。它的适用范围直到 $10^{-16}$  cm,这是到目前为止最强大的粒子加速器曾经探测过的最小距离。

尽管标准模型取得了惊人的成功,把它当作物质终极理论的候选者来看待的物理学家却

高半导体电子学及光电子学器件反应速度的一个重要机制。

综上所述,既灵活又具有高精度的飞秒光电子学,将进一步揭示半导体光学和电学性质之间的关系,并为高速器件的发展铺平道路。

- [1] C. V. Shank, *Ultrashort Light Pulses*, Springer-Verlag, New York, (1988), 5.  
[2] P. C. Becker et al., *Appl. Phys. Lett.*, 53(1988),

很少。原因是这个理论实在太复杂,它解释不了的东西太多。例如,它的基本常数和参量太多(在最简单的理论模型中,也有21个),其中包括基本粒子的质量和各种力的强度。虽然这些参量的数值可以从实验数据分析中得到,但是模型本身不能对它们给出预言或更深层次的解释。同样,对于质子的电荷与电子的电荷符号相反、大小精确地相等的这个事实,标准模型只能做到承认,却不能给出任何解释。

基本粒子按代来分类,特别令人迷惑不解。通常条件下的物质几乎完全由三代中最轻的第一代组成。虽然比较重的两代都是在实验室中按正规实验办法产生出来,我们却仍然没有能够理解它们究竟有什么意义,起什么作用。此外,描写夸克和强子的数学理论——量子色动力学的定量实验检验远没有完成。

## 一、电弱统一理论

在这十年的成就当中,实际上能够看作自洽理论的是电弱统一理论。它经过了实验很好的检验,并且可以正式写入物理教科书。它是一种相对论量子场论。对于能量范围跨越几个量级的所有已知的电磁现象和弱作用现象,它都能以直接而且自然的方式给出了漂亮的定量

2089.  
[3] J. Shah et al., *Phys. Rev. Lett.*, 59(1987), 222.  
[4] D. H. Auston, *Ultrashort Light Pulses*, Springer-Verlag, New York, (1988), 183.  
[5] J. A. Valdmanis, *Electron. Lett.*, 23(1987), 1308  
[6] C. J. Madden et al., *Appl. Phys. Lett.*, 54(1989), 1019.  
[7] M. C. Nuss et al., *Phys. Rev. Lett.*, 58(1987), 2355.  
[8] K. Meyer et al., *Appl. Phys. Lett.*, 53(1988), 2254.

(陈辰嘉、高蔚根据 *Physics Today* 1990年 第2期第46—54页编译)

的描写。同 19 世纪麦克斯韦的电动力学融合了经典电学与磁学一样，电弱理论把量子电动力学和量子弱动力学融合在一起。

电弱理论是一种规范理论。这意味着，描写物理系统的运动方程的形式不会因方程中的量作某种规范对称变换而改变，而且这种变换在不同的时空点可以独立地进行。令人惊奇的是，自由粒子的运动方程并不是规范不变的，它们的动能项在规范变换下要发生变化。规范不变性要求有某些附加项，以抵消这种变化。这些附加项对应于新的物理粒子。新粒子传递原来粒子之间的相互作用，同时彼此之间也相互作用。由于它们的自旋为 1，因此称为矢量玻色子。

量子电动力学是一种典型的规范理论，光子就是相应的矢量玻色子。电弱理论有更大的规范对称性。除光子外，它还要求有三个重的矢量玻色子，即  $W^+$ 、 $W^-$  和  $Z^0$ 。这三种粒子的存在，于 1983 年在欧洲核子研究中心 (CERN) 的超级质子同步加速器 (SPS) 上第一次得到了证实。

电弱理论及相应的实验现象曾有广泛的介绍和专门的评述。但是，在如此广泛的物理过程中和如此宽的能量范围内，理论和实验的显著的定量符合以及自洽性，只是在最近才表现出来。

## 二、历史的回顾

量子电动力学 (QED) 无疑是科学史上最成功的理论。它的基本形式是 1930 年完成的。但是直到 40 年代，经过 Bethe、费因曼、朝永、施温格 (Schwinger) 和 Dyson 等人的卓越的努力，才真正成为一个数学上自洽的、没有发散困难的理论。近几年来，它的实验检验，已经达到了不可思议的精度。

弱相互作用的最早的数学理论，是 1933 年费米为讨论中子的  $\beta$  衰变而提出来的。考虑到泡利的中微子假说，仿造量子电动力学中电流的相互作用，他建议将四个费米子之间的弱相

互作用哈密顿量写作

$$H = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{i=1}^4 J_i J_i^\dagger, \quad (1)$$

其中  $J_i$  是描写  $n \rightarrow p$  跃迁的矢量流， $J_1$  是描写  $e^- \bar{\nu}$  产生的矢量流，费米常数  $G_F \approx 1.166 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} (\hbar c)^3$ ，量度着弱相互作用的基本强度。 $J_1^\dagger$ 、 $J_1$  都使粒子电荷改变一个单位，因而称为“带电流”(charged currents)。在量子电动力学中，电流的作用不会改变粒子的电荷，这是与弱矢量流明显不同之处。费米理论中四个费米子在同一空间点相互作用，而量子电动力学中粒子之间通过光子传递相互作用，这是它们的另一明显区别。

1956 年，弱作用中宇称不守恒的重大发现，大大地改进了费米理论，使它对大量的弱作用过程都能给出近似正确的描写。但是这个理论毕竟只是一个近似理论。在高能极限下，由它给出的总的跃迁几率加起来不为一。理论上称之为破坏了么正性。通常，人们预期把高阶过程包括进来可以使么正性满足。但是，费米理论中高于一阶的过程给出的偏偏都是无法消除的无穷大。这样的理论称为不可重整理论。

为了解决费米理论的困难，汤川在 1935 年提出了中间玻色子理论，1957 年施温格进一步改进了这一理论形式。按照这种理论，弱作用由两个带电的矢量玻色子  $W^+$  和  $W^-$  传递。计算表明，只要这两个  $W$  粒子足够重，由于在低能下有  $\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8M_W^2}$ ，这个理论就回到了费米

理论(其中  $M_W$  为矢量玻色子的质量， $g$  是  $W$  粒子与费米子流的耦合常数)。这样，弱作用理论形式上便完全类似于电磁理论。可惜的是，它仍然是不可重整的。不久，人们发现，要解决这个难题，至少还需要假设存在一个  $W^0$  粒子。为使理论自洽， $W^0$  粒子与费米子以及其他  $W$  粒子的耦合强度不能随意选择，必须取严格确定的值。幸运的是，规范原理自然地实现了这一点。

1961 年，格拉肖 (Glashow) 在  $SU(2) \times U(1)$  群的基础上，建立了一个比较现实的模

型。规范不变性要求有四个矢量玻色子，其中两个带电的 ( $W^+$  和  $W^-$ ) 和两个中性的 ( $W^0$  和  $B$ )。光子是由  $W^0$  和  $B$  组合得到的，

$$A = \cos\theta_w B + \sin\theta_w W^0. \quad (2)$$

它与电磁流耦合。 $\theta_w$  为弱混合角，它的定义式为  $\tan\theta_w = g'/g$ ，其中  $g$  和  $g'$  分别是确定  $SU(2)$  和  $U(1)$  的矢量玻色子与费米子相互作用强度的耦合常数。基本电荷  $e = g \sin\theta_w$ 。 $W^0$  和  $B$  的另一个线性组合，给出了另一个物理的中性玻色子：

$$Z^0 = -\sin\theta_w B + \cos\theta_w W^0. \quad (3)$$

它传递一种新的中性流弱相互作用。

格拉肖的模型自然地统一了弱相互作用与电磁相互作用，但是仍不是一个现实模型。原因在于，规范不变性要求所有的矢量玻色子都必须是无质量的，而弱作用的极短力程要求  $W^\pm$  和  $Z^0$  粒子一定很重。这个问题在 1967 年由温伯格 (Weinberg) 和萨拉姆 (Salam) 各自独立地解决了。他们把希格斯 Higgs 的一个思想引入到这个模型中来。他们认为，运动方程中的矢量玻色子确实都没有质量，但是由于它们与一种标量粒子 (希格斯粒子) 有耦合，体系的最低能量态中， $W^\pm$  和  $Z^0$  都获得了有效质量。这种现象，物理上称为对称性自发破缺。1972 年，特霍夫特 ('t Hooft) 等证明了对称性自发破缺不破坏理论的可重整性。1973 年，欧洲核子中心 (CERN) 和美国费米实验室都观察到了中性流弱相互作用。因此，这个模型引起了人们极大的兴趣。

当时，这个理论还遇到一个严重困难。中性流弱相互作用的存在，预言了一些在实验上几乎完全看不到的过程。格拉肖等人曾引入了一个新的基本粒子，称为粲夸克 (c 夸克)，通过某种机制，抵消一些中性流的作用，以便与稀有衰变过程的实验一致。直到 1974 年，在这个夸克被找到以后，这个弱电统一理论才最后站稳了脚跟。在其后的十年中，经过了大量令人信服的定量实验检验，它的正确性终于得到了公认。

### 三、实验的检验

#### 1. 中微子-核子非弹性散射

第一个被观测到的弱中性流相互作用过程，是高能中微子打在固定靶上，被靶核子非弹性散射。中微子束是由高能加速器产生的  $\mu$  子衰变得来的。由中性流导致的反应为

$$\nu_\mu N \rightarrow \nu_\mu X$$

(其中  $X$  为一个任意的强子)，它的终态没有  $\mu$  子。由于直接测量  $\nu_\mu$  是几乎不可能的，而  $\nu_\mu N$  反应中占绝对优势的是由带电流导致的

$$\nu_\mu N \rightarrow \mu^- X,$$

所以只有从  $\nu_\mu N$  反应探测结果中可靠地把无  $\mu$  事例分离出来，才能鉴别出中性流的信号。实验测量的是中性流过程与带电流过程截面的比  $R_\nu$ ，由它可以计算出  $\sin^2\theta_w$ 。最近，欧洲核子中心超级质子同步加速器 (SPS) 的两个组给出的最精确的  $R_\nu$  值，分别为  $0.3072 \pm 0.0032$  (CDHS 实验组) 和  $0.3093 \pm 0.0031$  (粲粒子组)。

#### 2. 中微子弹性散射

中微子弹性散射过程  $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)e^- \rightarrow \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)e^-$ ，是纯轻子的弱中性流过程。由于不涉及因强子参加而带来的强作用修正，它能更清楚地检验弱电理论。运动学要求出射电子相对于入射中微子的散射角平方小于  $10^{-3} \text{ rad}^2$ 。在布鲁克海文实验室中，研究者用几个 GeV 的中微子和  $k$  中微子做了实验，他们观察到，电子散射角分布在小角度处确实有清晰的峰。他们给出了比值 (为了消除系统误差)

$$R = \sigma(\nu_\mu e \rightarrow \nu_\mu e) / \sigma(\bar{\nu}_\mu e \rightarrow \bar{\nu}_\mu e),$$

得到具体的结果为  $1.38^{+0.40}_{-0.31} \pm 0.17$ 。由它可以算出  $\sin^2\theta_w$ 。

1983 年，在欧洲核子中心，再次有人用 15 GeV 的中微子做了这个实验，给出的  $R$  是

$$1.26^{+0.72}_{-0.45}.$$

尽管这两个实验室用的中微子束的能量相差一

个量级,结果却是相当一致的。

### 3. 宇称不守恒

电弱理论告诉我们,凡是交换虚光子的过程,都可能同时交换一个虚 Z 粒子。因此,光子交换的振幅和中性弱流振幅应当有干涉效应。在最早观测到中性流的中微子散射之后不久,人们就急切地在重原子过程或极化电子被氦核散射实验中寻找弱电干涉效应。

十年前,在斯坦福直线加速器中心进行的极化电子实验,第一次证实了弱中性流对电子与核的相互作用有贡献。来自砷化镓源的极化电子,在氦气中发生非弹性散射。由于一个宇称不守恒过程与电磁散射发生干涉,散射电子的产额依赖于入射电子的极化方向,所以有不对称性存在。观测结果表明,不对称性的确存在,而且与电弱理论的估计完全一致。

弱中性流会使原子的 s 轨道和 p 轨道混合,它使由圆偏振光诱导的磁偶极跃迁几率,有一个正比于宇称破坏的弱作用产生的电偶极跃迁振幅的小的交叉项。这个交叉项的符号随着入射光子圆偏振方向变化而改变,因此可以测量。但是,这个微小的效应大致与原子序数的立方成正比,所以要看到这种宇称破坏效应,必须使用重原子。最近,有人用铯原子成功地进行了这类实验。

### 4. 电子-正电子湮没

十年来,在美国的康奈尔、斯坦福,德意志联邦共和国的汉堡以及日本的正负电子对撞机上,都对正负电子湮没进行了广泛的研究。在这些机器上,  $e^+e^- \rightarrow \bar{f}f$  反应(其中 f 是夸克或轻子)主要是通过重的虚光子的产生和衰变而进行,即  $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \bar{f}f$ 。但是,按照电弱理论,一个虚的 Z 粒子也可以传递这种相互作用,即  $e^+e^- \rightarrow Z^* \rightarrow \bar{f}f$ 。两者对振幅的贡献的干涉效应,必然导致前后不对称性。碰撞能量在 35 GeV 附近时,这种不对称性可以大于 15%。而且,由于这种不对称性来自 Z 粒子与费米子的轴矢量流耦合,与  $\sin^2\theta_w$  无关,因而作为该理论的绝对预言,宁可采用这种不对称性而不采用  $\sin^2\theta_w$ , 尽管它对 Z 粒子质量还有微小的依

赖。对于  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ,  $\tau^+\tau^-$  和  $c\bar{c}$  及  $b\bar{b}$ , 都测到了这种不对称性。所有的结果都与标准模型的预言符合得相当好。

1989 年建成了两个新的  $e^+e^-$  对撞机,一个是美国斯坦福的 SLC,另一个是欧洲核子中心的 LEP。它们的最大束流能量都超过 50 GeV,能够产生实的 Z 粒子。在这样的能量下,弱振幅压倒了虚光子振幅。所以,这些机器应能提供的  $\sin^2\theta_w$  非常精确的测量。

### 5. 中间矢量玻色子

存在传递弱作用的矢量中间玻色子,对于电弱理论是极为重要的。人们很早就期望在实验中找到它们。最先完成的中性流实验给出了  $\sin^2\theta_w$ , 从而导致了 W 和 Z 粒子质量为 80—95 GeV 的预言,远远超过了当时任何加速器达到的质心能量。然而人们认识到,如果能把欧洲核子中心的 270 GeV 的超级质子同步加速器 SPS,由固定靶加速器变成对撞束储存环,则质心能量可以提高 20 多倍,从 23 GeV 提高到 540 GeV,足可以产生这种重的玻色子。1982 年,鲁比亚等人成功地完成了这一工作。次年,他们就找到了所有这三个中间矢量玻色子,质量就在电弱理论所预言的范围内。到现在为止,在费米实验室的 Tevatron 对撞机上和新的 SLC 及 LEP Z 粒子工厂已产生了大量的  $Z^0$  粒子。

### 6. 规范不变性

由表 1 可见,迄今所进行的涉及面很广、能量大小相差达十几个量级的各种实验观测结果,与标准模型的理论预言的符合是极令人满意的。由此也证明了这个理论的自治性和适用范围的广泛性。

特别惊人之处还在于,这种检验不仅仅是在最低级计算中得到的,而是考虑了高阶辐射修正。由表 1 最后一列可见,  $\sin^2\theta_w$  的不同实验值彼此并不一致。辐射修正大约有三个标准偏差。它虽然不象量子电动力学那样,高阶修正达到那么高的精度,对电弱理论来讲,能够计算而且得到有限值的结果,已经很不容易了。如果不是规范原理,它们本来都是无穷大,因而毫

表1 从各种反应确定的  $\sin^2\theta_w$

反应	$\sin^2\theta_w^*$	$\sin^2\theta_w^{***}$
深度非弹性 $\nu_\mu N$ 散射	$0.233 \pm 0.003 \pm [0.005]$	0.242
$\nu_\mu p \rightarrow \nu_\mu p$	$0.210 \pm 0.033$	0.208
$\nu_\mu e \rightarrow \nu_\mu e$	$0.223 \pm 0.018 \pm [0.002]$	0.221
W和Z质量	$0.229 \pm 0.007 \pm [0.002]$	0.214
重原子中的宇称破坏	$0.220 \pm 0.007 \pm [0.018]$	0.212
极化 eD 散射	$0.221 \pm 0.015 \pm [0.013]$	0.226
所有数据平均	$0.230 \pm 0.0048$	

\* 有两个误差值：第一个是实验误差，第二个是在方括号中的理论误差。后者包括了由于顶夸克和希格斯粒子的未知质量取了很宽的范围而带来的效应。中心值取的是： $M_t = 45\text{GeV}$ ,  $M_H = 100\text{GeV}$ 。

\*\* 从未经辐射修正的数据求得值。

无意义。

#### 四、遗留下的不确定性

在统一理论与实验的惊人的符合之中，还有几处裂隙。为了完成基本粒子三代的最后一代，还缺一个“顶夸克”，至今未能找到。它的质量究竟应该有多大，理论上还给出明确的预言。由于迄今  $e^+e^-$  和  $p\bar{p}$  反应都没有找到它，这使得人们普遍认为，它的质量至少要大于 80 GeV。根据各种中性流及玻色子质量的实验值，还可以求得  $M_t$  的上限为 170—200 GeV (90% 置信水平)。如果  $M_t$  小于 100 GeV，那么它

应在今后几年内，在  $p\bar{p}$  对撞机上直接测得。如果  $M_t$  在 100—200 GeV，那么它对于该理论未来高精度、高阶过程的检验，会有很大贡献。

另一个不确定性是希格斯粒子。电弱理论对它的质量没有提供任何线索。实验上也没有发现任何可能的候选者。迄今的这些实验，都只对小于几个 GeV 的希格斯粒子敏感。不幸的是，辐射修正对希格斯粒子的质量，也很不敏感。到底存在一个还是几个希格斯粒子呢？阐明这个问题本身，就是对粒子物理学的挑战。值得指出的是，许多物理学家怀疑基本的希格斯场的存在。他们猜测，某种复杂的束缚态或其它动力学效应，可以起到与希格斯粒子相同的作用。

如果取  $M_t$  小于 100 GeV，则  $\sin^2\theta_w$  的总的平均值为  $0.230 \pm 0.0048$ 。把它与各种大统一理论的预言相比较是令人感兴趣的。最简单的大统一模型预言： $\sin^2\theta_w = 0.216^{+0.003}_{-0.004}$ ，它比这个实验值低约 2.5 个标准偏差。由于这些模型预言的质子衰变迄今未能观察到，因此它们实际上是被排除了。超对称大统一模型给出了更好的预言。

中性流和玻色子质量的数据，对于研究或限制偏离标准模型的理论是很有用的。例如，很多扩充模型中预言还存在一个  $Z^0$  玻色子。从实验可以间接地推测，这个新的中性玻色子质

表2 计划中的和已建议的高精度电弱理论的检验

测量	$\Delta \sin^2\theta_w^*$	地点	日期
$\Delta M_Z = \pm 20\text{MeV}$	0.0004	LEP	1990年
$\Delta M_Z = \pm 45\text{MeV}$	0.0005	SLC	1990年
$\Delta M_W = \pm 350\text{MeV}$	0.002	SPS, FNAL	1990年
$\Delta M_W = \pm 100\text{MeV}$	0.0006	LEP 200	1995年
$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$	0.002	LEP	1990年
$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ (极化 $e^-$ )	0.0004	SLe, LEP(?)	90年代
$\nu_\mu e \rightarrow \nu_\mu e$	0.005	CHARM II	1991年
$\nu e \rightarrow \nu e$	0.002	LCD (LANL)	90年代
原子宇称破坏	0.003	ILA Boulder, ENS 巴黎	90年代
$ep \rightarrow eX$	0.005	HERA	90年代
$ep \rightarrow ep$ (极化 $e^-$ )	0.002	CEBAF (?)	90年代
$\nu_\mu N \rightarrow \nu_\mu X$	0.004	FNAL (?)	90年代
$\bar{\nu}_\mu N \rightarrow \bar{\nu}_\mu X$			

\* 这些估计的误差值，没有包括由于忽略了顶夸克和希格斯玻色子的质量带来的不确定性。

# 新颖的量子阱红外探测器

陈正豪

(中国科学院物理研究所,北京 100080)

本文介绍了新型量子阱红外探测器的原理、特点、性能及其在实际应用中的重要价值,与 HgCdTe 红外探测器作了比较,同时还评述了国内外的发展现状。

利用分子束外延 (MBE) 技术,将不同组分和不同禁带宽度的半导体材料 A 和 B 交替沿垂直于表面的方向 (Z 方向) 外延生长在同类单晶衬底上,形成 B-A-B-A 型结构,每层厚度几十至几百埃。宽禁带材料 B 构成势垒,而窄禁带材料 A 则形成势阱。此种最新、最重要的半导体材料称为超晶格和多量子阱结构 (MQW) 材料,如 GaAs/AlGaAs, InGaAs/AlInAs 等。随着 MBE 技术的日趋成熟,对这种新型半导体材料的性能及应用研究也蓬勃开展起来。特别是由于量子阱中载流子的量子受限作用,使这种新型材料具有比相应的体材料更加优越的线性和非线性光学性质<sup>[1]</sup>,因而它在光学开关、光学调制、光相位共轭及光探测等方面有很大的应用潜力。这一点无疑将对光纤通信、大规模集成和遥感、遥测等技术的发展具有很重要的意义。本文所要介绍的量子阱红外探测器,就是 MQW 材料的一个极为重要的应用。

所谓量子阱红外探测器,就是利用 MQW 的阱材料中导带内子带间光跃迁对红外辐射的

量的下限为 120—300 GeV。

从目前的实验结果看,至少在大于  $10^{-16}$  cm 的尺度上,标准模型正确地描写了电磁现象和弱现象。很多物理学家确信,必定存在有超出标准模型的新的物理,只不过它们要在更小的尺度上表现出来。预计新一代加速器和新一代的实验将会改进  $\sin^2\theta_w$  和其它电弱数据的测量精度。如表 2 所示,至少可以提高一个量级。这些实验包括:高精度的 Z 和 W 的质量测量,  $e^+e^-$  湮没中不对称性的测量,中微子-电子

强吸收,来探测红外辐射强度的一种新型、快速、灵敏的红外探测器<sup>[2-4]</sup>。它有以下主要特点。

1. 灵活性大:可以在材料生长过程中控制生长参数而得到所需要的器件响应波长和带宽(占中心频率的 10—50%),尤其对于 8—14  $\mu\text{m}$  大气传输窗口,更容易实现。

2. 响应速度快:可实现皮秒 ( $10^{-12}$  s) 量级的高速度响应。

3. 量子效率高:MQW 材料具有多异质结构,构成多个可以充分利用的活性界面。

4. 结构相对简单:便于集成化,便于大面积二维列阵。

以上特点是其他类型的红外探测器(如:肖脱基势垒管、本征 Si 探测器、HgCdTe 探测器和其他窄带隙红外探测器)所没有或很难实现的。特别是量子阱红外探测器还具有材料均匀性好、稳定性好、重复性好以及质高价廉等明显优点。经过短短几年的发展过程,其性能已能与有几十年发展史的 HgCdTe (8—14  $\mu\text{m}$ ) 探测器相比较。前者的探测率  $D^* = 1 \times 10^{14}$

散射,原子中弱作用与电磁作用的干涉以及深度非弹性散射等。这些实验可以使这个理论及可能的扩充理论至少在  $10^{-17}$  cm 尺度上是正确的。

不管未来会通向何方,电弱标准模型几乎肯定会存留下来。它仍将是原子核大小千分之一尺度之上的正确的定量的理论。

(丁亦兵根据 *Physics Today* 1989 年第 12 期第 22—31 页 编译)