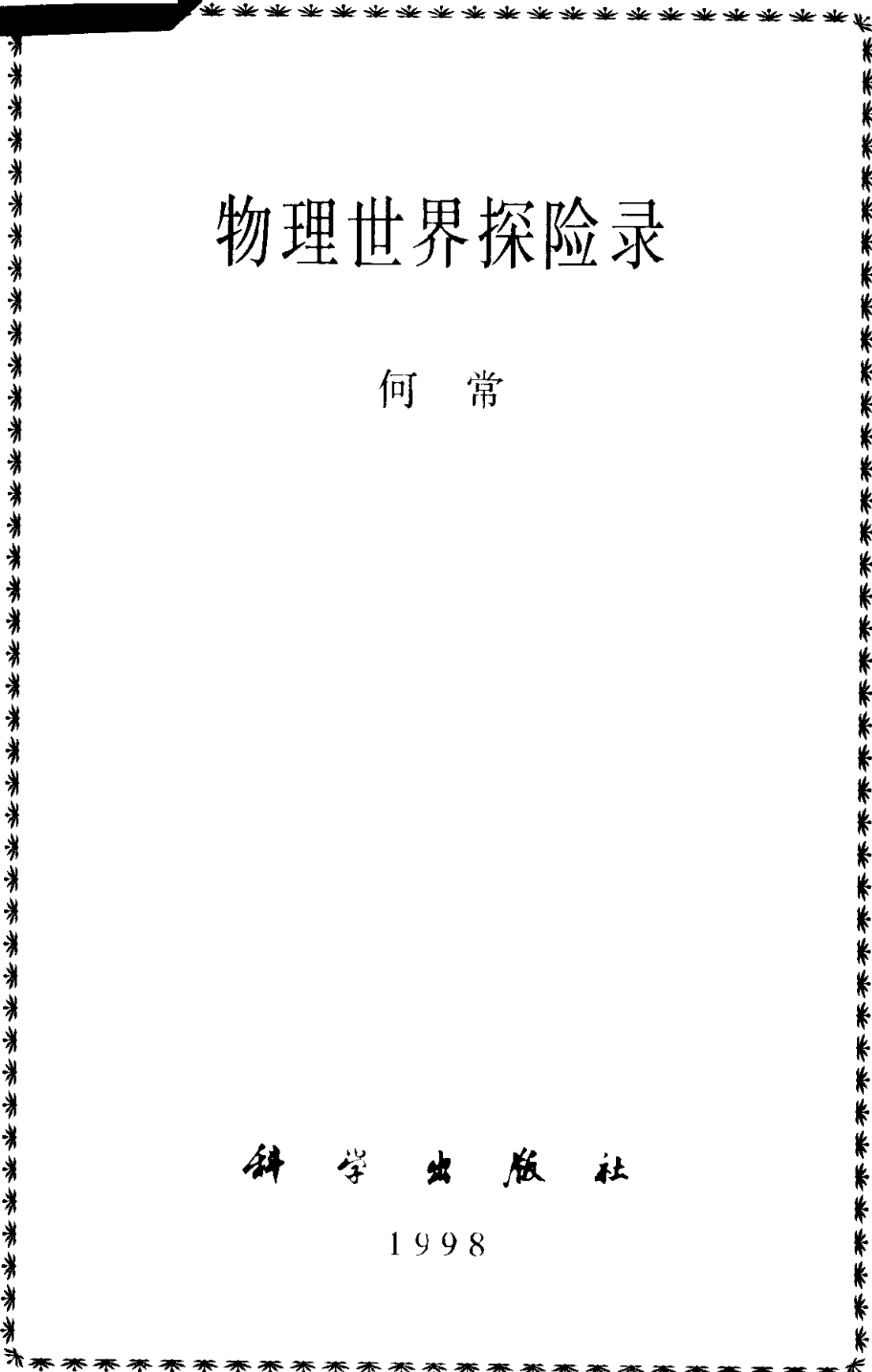
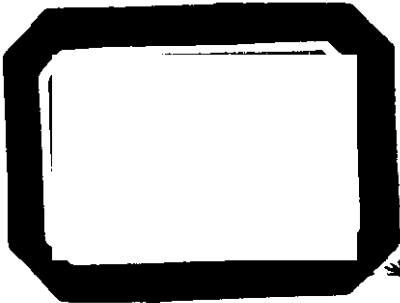


物理世界探险录

何 常



科学出版社



物理世界探险录

何 常

科 学 出 版 社

1998

内 容 简 介

本书汇集了作者发表的评介基础物理科学几个主要领域最新进展的文章。主要包括物质的家族、奇异物质、暗物质和反物质、引力波、夸克和粒子玄学、太空和宇宙始末、时空观等。文章尽量避免繁冗的数学推导和论证,增加可读性,使科学工作者和一般爱好者都喜欢读。

图书在版编目(CIP)数据

物理世界探险录/何常.-北京:科学出版社,1998

ISBN 7-03-006682-0

I. 物… II. 何… III. 物理学-普及读物 IV. 04-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 08399 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码 100717

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998 年 11 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1998 年 11 月第一次印刷 印张: 8 3/4

印数: 1—3 100 字数: 228 000

定价: 14.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

30年前，科学家 V. F. 韦斯科夫说过：“大自然通过人类，开始来认识自己了。”近 10 年来，作为人类认识大自然的成果和工具之一的基础物理科学，又取得了惊人的进展。笔者先后选择了几十个专题，撰写和编译相应文章，评介这种进展的情况。本书哀辑部分已发表的文章，大致能够说明基础物理科学几个主要领域的当今发展和未来趋势。

这里每篇文章论述一个专题，各篇都是相对独立的，没有非得先读前一篇才可以读后一篇那样的相关性。惟其如此，各篇之间在某些共通的基本原理上难免有交叠的地方。

文章尽量避免繁复的专业技术推导和论证，注意科学性和可读性的结合。这样也许更易于显示物理世界的本性，展现与人类感知相沟通的物理客体的丰富生动和和谐多姿，以使一般科学工作者和科学爱好者都喜欢阅读，且读后有所收益。

每个专题都展示新的发现，提出新的疑题以及解决疑题的计划。前景充满了奇异感。但是它们不是科学幻想，因而取名《物理世界探险录》。

何 常

1997. 6. 6

目 录

前 言

一、物理常数和物质家族数的变迁	(1)
基本物理常数值的变动	(1)
物质的家族数	(8)
二、寻找新物质	(20)
奇异物质和奇异星	(20)
寻找奇异物质	(27)
暗物质和引力透镜	(35)
寻觅宇宙反物质	(45)
三、捕捉引力波	(56)
引力波和天空再造	(56)
引力波望远镜	(60)
捕捉天震	(69)
引力波在宇宙微波背景辐射中的印记	(77)
四、粒子发现和粒子玄学	(83)
从搜寻到发现顶夸克	(83)
夸克新疑题	(95)
捕捉 WIMP	(100)
LEP——世界上最大的粒子加速器	(105)
LEP 的升级工程	(110)
粒子玄学	(116)
五、太空和宇宙始末	(126)
奥伯斯佯谬的历史本质和解答	(126)
亮光，黑洞	(137)
哈勃常数战和宇宙命运	(144)

探索宇宙常数	(152)
从暴胀论到纹理新说	(157)
平凡的宇宙	(164)
宇宙标准模型和蒙特卡洛模拟	(174)
六、时空观的进步	(184)
力学史概观	(184)
黑洞和离心力佯谬	(193)
时间的起始	(201)
时空的本质	(207)
“物理学面临第三次革命”	(218)
七、几个前沿和交叉课题	(222)
最简单的化学反应	(222)
太阳光束之端的飞行	(231)
生命的字节	(235)
太阳动力开发的新途径	(239)
声致发光	(245)
八、科学的哲学思考	(253)
什么是真正的“思考”?	(253)
无穷大简史	(263)

一、物理常数和物质家族数的变迁

基本物理常数值的变动

一、基本物理常数的由来

19 世纪科学的蓬勃发展，铺平了深入理解物理世界性质的道路。在世纪之交，出现了一个愈来愈明显的事实：世界上存在着若干与原子物理和量子物理相联系的不变性质。这些性质可以用一组作为基础的量来描述，这就是我们现在称之为基本物理常数的八个量（见表1.1）。

表1.1

名 称	符号	数 值	单 位	相对不 确定度 (ppm)	近似值
基本电荷	e	1.60217733(49)	10^{-19} 库仑	0.30	1.602
光 速	c	299792458	米/秒	精确	2.998×10^8
普朗克常量	h	6.6260755(40)	10^{-34} 焦耳·秒	0.60	6.626
电子质量	m_e	9.1093897(54)	10^{-31} 千克	0.59	9.110
质子质量	m_p	1.6726231(10)	10^{-27} 千克	0.59	1.673
阿伏加德罗常量	N_A	6.0221367(36)	10^{23} 摩尔 $^{-1}$	0.59	6.022
宇宙引力常量	G	6.67259(85)	10^{-11} 米 3 千克 $^{-1}$ 秒 $^{-2}$	128	6.672
玻尔兹曼常量	k	1.380658(12)	110^{-23} 焦耳/度	8.5	1.381

（注：上表系 1986 年推荐值；ppm 为 10^{-6} ）

如果不列入最后两个常数，这一组量常被称作基本原子常数。

由于用来求出各未知基本常数值实验测量方法很多，因此有必要通过合理的方法把各个测量结果综合起来，以得出一组唯一的基本物理常数推荐值。60 多年前 R. T. 贝治首创了这项工作。他第一次为基本物理常数定值，发表在 1929 年《现代物理评论》第一卷上。由贝治首创的这一做法，被物理学家们沿袭下来，每隔几年都要为改进基本物理常数值而做新的评定。

二、定值方法

基本物理常数值改进来自实验测量方法和计算方法的改进。现在，常数值确定已由国际科技数据委员会的基本物理常数组 (CTOG) 负责，总结世界各地的科学家历年所做的数以百计的物理测量，然后得出结果。首先是收集和审查已在出版物中作过详细研究的有效数据，再从有关科学家那里了解他们未写入著作的各数据的额外细节。之所以要如此细致，是因为许多事实证明，在把数据简化成最终值时，或者将数据同别的计算结果组合起来时，是难免不出错的。

入选数据一经确定，就必须同时考虑好怎样去确定它的不确定度。任何简化数据的统计方法都归结于应用最小二乘法，即按结果的标准偏离不确定度的负二次方加权。这意味着，如果一个结果的不确定度远大于最精确值的不确定度 3 倍，对最后的推荐值且只有很小的影响。这里有一个困难是，实验人员无法估算实验不确定度到好于 10% 的水平。这是因为总有一些效应的实际大小只能凭猜测去确定。

定值时的入选数据确定之后，就必须选择某种最小二乘法去把它简化成唯一的一组推荐值。这一方法必须同时满足统计者的要求和实验者的直觉。1987 年 CTOG 应用泰劳和柯汉的新方法，他们测算得到的最终值最多约有一个标准偏差的改变，并不怎样受所用统计方法的影响。这种方法是一个实验一个自由度，从而

允许不确定度“测不准”。贝治用的一个参量叫贝治比 R_B ，它是以 X^2 除以自由度数所得的商。它有统一的期望值，所赋予的不确定度可以按照自由度数在计算机处理中进行修正。也就是说，应用诸量测量中的差值以重新计算它们所赋予的不确定度。

三、基本物理常数的特殊重要性

基本物理常数广泛应用于公式计算之中，如 $E = h\nu$ 中的 h ， $\lambda = \frac{h}{m_0 p \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ 中的 h 和 c ，等等。然而基本物理常数的特殊重要性还在于：

1. 如果把基本常数相互组合，就可以形成更多的常数，其中还包括某些无量纲常数。

例如，有量纲的里德伯常量 R_∞ 是由下式给出的：

$$R_\infty = m_e c \alpha^2 / 2h$$

而无量纲的精细结构常数 α 则由下式给出：

$$\alpha = \mu_0 e^2 / 2h$$

由于 α 是无量纲量，所以它更适合于一般计算。当我们的知识要求更多的小数点位数时，总是一再用它来进行计算的尝试。30 年代，它的倒数 $\frac{1}{\alpha}$ 曾经被认为恰好等于 137；它作为爱丁顿的数字逻辑理论中自由度 $(136 + 1)$ 的角色而显露头角。现在我们求得 $\frac{1}{\alpha}$ 的值是 137.036……。

2. 基本物理常数显得如此重要的又一原因是，长期以来它被方便地用作基本的物理单位。许多计算问题的开头和中心部分用的是原子单位（或称哈特里单位），直到计算的结尾才化成 SI 单位的表述，这体现了基本物理常数作为自然科学单位的作用。早在 1887 年，斯通耐在他的第一篇论文中所用的单位制即是一例：

$$c = G = e = 1$$

它预示了基本电荷（即质子电荷）的存在。

3. 高精度的实验一般比基本物理常数要多。这样，我们就可以应用关于基本物理常数的各种实验测量来最精确地检验我们对基础理论的理解程度。在授予诺贝尔奖的工作中，给予小数点最后一位的重视比起对小数第一位的关注来毫不逊色，这就是有力的说明。

量子电动力学（QED）是理论和实验相结合的重要基础。这样的理论和实验通常都涉及精细结构常数。因为它是无量纲量，我们就毋须为表达测量中的单位而操心。

由狄拉克粒子理论所要求的电子磁矩 μ_e 为

$$\mu_e = eh/2m_e$$

这里 $h = h/2\pi$ 。把理论计算结果和实验测量结果相比较，相差只有0.1%。因此， $eh/2m_e$ 提供了一个有用的“单位”——叫玻尔磁子 μ_B ，使 μ_e 的实验测量结果可以同它的理论计算进行比较。与此相关的两个量是电子反常磁矩 a_e ：

$$a_e = \mu_e/\mu_B - 1$$

和电子 g 因子：

$$2g_e = \mu_e/\mu_B$$

QED 的成就之一是它具有计算电子反常磁矩 a_e 的能力，算式是一个包含精细结构常数的幂级数：

$$a_e = (\alpha/\pi)/2 + c_2(\alpha/\pi)^2 + c_3(\alpha/\pi)^3 + c_4(\alpha/\pi)^4 + \cdots + \delta a$$

δa 项是非 QED 贡献，如强子真空极化和弱相互作用。上式各项计算在一定意义上说是力的迭加。肯纳薛塔求得 $c_2 = -0.328478444$ ； $c_3 = 1.1763(13)$ ； $c_4 = -0.8 \pm 2.5$ ； $\delta a = 1.69(4) \times 10^{-12}$ ，从而改善了它的计算精度。

上面的理论计算同华盛顿大学迪克等 3 人所做的实验结果有着惊人的符合。他们已在超导磁体所产生的高磁场四极离子收集器中捕捉到单个电子，历时为 10 个月。他们测量了电子自旋进动频率与回旋加速器频率之比 (μ_e/μ_B)，精度达到 10^{-11} ，这是

对基本物理常数的最精确的测量。他们还测量了质子质量与电子质量之比 m_p/m_e ，精度高达 10^{-8} 。

正电子和 μ 子的反常磁矩也已用类似的方法测量和计算出来，不过精度还比较差。

以上都是用基本常数的实验测量来检验我们对基本理论理解程度的事例。

四、常数不“常”

从 1929 年对物理常数首次定值以来，每隔 10 年左右都要重新进行一次定值工作。现在，我们关于基本物理常数值的知识已大为改进，精度从原来的百分率水平向越来越多的小数位数推移，不确定度逐步减小，改进的幅度大约每 10~15 年提高 10 倍。

由于人类知识的增加，用 SI 单位表述的推荐值在改变。在这个意义上，它们不是“常数”。它们一般在事先赋予的不确定度内变化。但是已经证明，我们对基础理论的理解有时并不正确，而有时证明实验的不确定度是最有利的。不管这种变化是否真实，建立不确定范围对于科学进步毕竟是重要的。

基本物理常数的可变性，主要是指“大爆炸”开始瞬间的情况。这里大统一理论起着作用；所谓大统一是指一种用与能量相关的“常数”来统一引力、电磁力和核力的理论。所以基本物理常数的变化是时间的函数；但它们在宇宙中处处相同，在这个意义上它们又确是常数。

今天测量精度已达到能在实验室可能的时间范围内测试物理量的变差至小数以后 12 位的数量级。这样的变化足以同宇宙年龄的 10% 的变化相比拟。这一情况使宇宙理论得以重新核查和发展。与此相似，高精度的卫星测距、月球测距和行星测距实验使引力常量 G 的时间变化率能够得到测试（ G 每年有小于 10^{-11} 的变化）。不论变化的原因是什么，变化确实是产生了。

目前，由其它常数的组合还不能得到宇宙引力常量 G 。虽

然现在测量得到的不确定度已成倍减小，但在实验室里对引力常数进行测量还是非常困难的，因为地球的引力比实验室的引力约大 10^9 倍。还有一个新问题是所谓第五种力的可能存在。果如其然，则它将修正实验室距离下通常的平方反比定律。现在的定值对这一效应仍然忽略不计。由于实验很难达到符合灵敏度要求，所以测量所得的数据连续不断地出现矛盾。

因测量精度的改进而改变常数值的事例很多。1986 年对精细结构常数的测量是由氦的光谱测量得到的；以后也可以用介子素的超精细结构来得到 α 值，只要知道 μ_n/μ_p 的值就行。有些单位已测量出硅的晶格常数，它同硅的克分子容积组合起来就可以得到阿伏加德罗常量的值。量 h/e^2 是电阻的原子单位。自从 1929 年首次定值以来，关于 h/e^2 的知识已着实赶上用作单位的欧姆实现的准确度。这意味着有朝一日可以用 h/e^2 的稳定性来检验欧姆的稳定性，尽管目前还没有找到有效方法。

另外，有人对在这组量中仍然保留着质子质量提出疑问，认为原子中的夸克已扮演了更为基础的角色，质子质量就不再具有基本的意义了。不过，我们至今还确实不能准确地测定和表述夸克的质量，即便它是在核子之外能单独存在的粒子。这一问题大概要等搜寻到被认为是“质量之源”的未知夸克——顶夸克之后才能解决。

总之，常数不“常”既反映着某些宇宙性质，也反映着测量技术和条件的进步。这里有广阔的未知领域有待探索。

五、SI 单位的困难

电单位的实现对于现代基本常数的定值具有重要意义。由于所有的测量都有一个精度的限制，许多国家标准实验室中保留的电单位并不恰好等于它们 SI 单位的对应量。它们之间有着百万分之几的差额。保留安培是 K_A 安培，保留欧姆是 K_Ω 欧姆，保留伏特是 K_V 伏特。保留安培用保留伏特和保留欧姆来表示，即

$$K_A = K_V/K_\Omega$$

用于定值的测量量用未知量 α , K_Ω , K_V 来表示, 这些量一经评定, 就可推出基本物理常数的值。由 $e/h = E/K_V$, 并给出 α , 就可以解出 e 和 h ; m_e 可以由 R_∞ 得出; m_e 与 m_p/m_e 组合得到 m_p ; m_p 与 m_p/m_n 组合得到 m_n , 随之可得出 N_A (或 M^θ/m_n , 这里 $M^\theta = 10^{-3}$ 千克/摩尔), 等等。

如上所述, G 的测量是与其它各量的定值分开的。玻尔兹曼常量 k 要求 N_A 与声热测量的气体常量 R 相组合, 对所得的值及其相关的不确定度作出选择。

现在已强烈地感觉到基本物理常数中 SI 单位已遇到的困难。我们关于 h/e^2 的知识受到欧姆实现的限制, $h/2e$ 受到伏特实现的限制, h 受到瓦特实现的限制。

1986 年定值时提出在世界各国实验室保留和通用的电压单位约有 7.59 微伏的误差, 电阻单位约有 1.56 微欧的误差。后者说明每年出现 0.0566 微欧的向下偏移 (这是国际协议值, 真正的值还多少取决于各有关国家)。随后这些误差得到承认。当许多实验室确信它们的 SI 值时, 同时却在所有国家按国际协议改变保留单位。为了保留和推广电单位, 1988 年 10 月 CCE 开会并推荐: $R_{k-90} = 25812.807(5)$ 欧姆和 $K_{J-90} = 483.5979(2)$ 吉赫兹/伏特, 它们分别联系于量子化霍尔效应和约瑟夫生效应。这里的不确定度来源于推广单位和相应的 SI 单位之差。单位的再演率好十多倍。这个推荐值得到同年的 CIPM 国际会议的确认并公布。当然, 这些量并不是打算与物理量 h/e^2 和 $2e/h$ 等同, 因为它们并不是一组协调一致的基本物理常数的组成部分。

六、未来趋势

我们关于物理常数的知识还在不断增进。由于这些量被公认为在宇宙中处处守恒, 因此用它们来作为单位颇具魅力。这么做的可行性日益明显。基本物理常数涉及大多数基本单位和导出单位, 物理学家正在小心地作出选择。因为我们关于光速的定义涉及到米的定义, 而里德伯常量测量则期待着用米表述的可见区域

内的测量精度。还有，时间的定义看来已能成功地应用氢脉塞，而不用铯钟。预期以今后 20 年的时间，原子囚禁和离子囚禁的发展可能引发另一次突变。在这一过程中，基本物理常数的测量将继续在物理世界的探索中扮演重要的动人心弦的角色，成为研究的热点。

物质的家族数

CERN 和 SLAC 用正负电子对撞实验证明宇宙间的基本粒子只有三个家族，它们是怎样得到证明的？

我们周围的宇宙由三种基本粒子组成，它们是“上”夸克，“下”夸克和电子。恒量、行星、分子、原子，甚至人类本身，都由这三种物质组合而成。它们与电子的中性的而且可能是没有质量的伙伴——电子中微子构成物质的第一个家族。

然而自然界并非如此简单，它还提供了另外两个家族，它们除了质量与第一个家族不同，其它各方面都相似。为什么自然界恰好提供物质的三种相同型式的复制品？对此我们一无所知。理论迄今没有作出回答。会不会不是三个而有更多的家族呢？最近的实验已经得出结论：没有。

1989 年春天和秋天，斯坦福直线加速器中心（SLAC）和日内瓦欧洲核子研究中心（CERN）的物理学家组都已经完成了他们的实验。两个组应用设计各不相同的机器使正负电子对撞，从而产生出大批 Z （或 Z^0 ）粒子。

Z 的质量接近一个银原子，约为质子质量的 100 倍。它是我们已观察到的粒子中最重的基本粒子。我们将看到，这个质量只是一个平均值。这是因为 Z 的寿命非常短，以致各个 Z 粒子的质量都略有差异。质量值的散布范围叫质量宽度，它是一个取决

于物质家族数的量。由于这个宽度可以用实验加以测定，因而物质的家族数就可以由宽度推得。本文综述用来计算物质家族数的实验。

让我们先考察一下这一成果的各部分联系。我们关于基本粒子及其相互作用的知识在过去 25 年里经历了非同寻常的系统化。已知粒子可分类归入费米子或规范玻色子。费米子是自旋为 $1/2$ 的粒子，即是说，它们具有本征角动量 $(1/2)\hbar$ ($\hbar$ 是常用普朗克单位： 10^{-27} 尔格·秒)。费米子可以认为是物质的要素。规范玻色子是自旋为 1 或角动量为 $1\hbar$ 的粒子。可以把它们看作是费米子之间作用力的介体。表征这些粒子的除了它们的自旋，还有它们的质量和它们相互间的各种联接（如电荷）。

全部已知相互作用可分为三类：电磁、弱和强。（第四种相互作用是引力，在基本粒子层次上予以忽略，这里就不需考虑了。）尽管三种相互作用显得不一样，但它们的数学表述却十分相似。在所有描述它们的理论中，费米子之间都是因交换规范玻色子而相互作用。

像在电子与原子核结合形成原子中所见到的那样，电磁相互作用以交换光子作为媒介；弱相互作用以重 W^+ ， W^- 和 Z 玻色子作为媒介；而强相互作用则以八个无质量的“胶子”作为媒介。例如，质子是由三个费米子夸克所组成，它们由交换胶子而结合在一起。

这些相互作用还用来描述高能碰撞中粒子的产生。一个光子转变为一个电子和一个正子，即是一例。在巨大高能下一个电子和一个正子因碰撞而湮没产生出一个 Z 粒子，为又一例。

这些规范理论的演变组成了粒子物理进步的一幅美妙的图画。1968~1971 年提出用弱电相互作用来统一电磁理论。“弱电”理论预示了中性弱相互作用，它是 CERN 在 1973 年发现的。10 年之后，还是在 CERN，发现了重中介玻色子 W^+ ， W^- 和 Z 。

强相互作用的规范理论在 70 年代初期有了进步。这个理论

叫量子色动力学。这是因为它在解释强力时，夸克相互作用建立在它们的“颜色”之上。颜色在这里是徒有其名的，实际指的是一种不可见的性质。颜色之于强相互作用有如电荷之于电的作用：它是一个表征力的量。不过电动力学中电荷只有一种状态——或正或负，而色荷则有三种状态，夸克显示红、绿、蓝，反夸克显示反红，反绿，反蓝。

综合应用这两种规范理论常能以高精度预示迄今已观察到的基本现象。但是表象的全面性并不意味着这个模型就是完美无缺的。规范理论预示所谓希格斯（Higgs）粒子的存在。这种粒子被认为是粒子质量的来源。现在还不是物理学家额手称庆的时候，除非把它找到或者找到了它的替代物。规范理论还包括许多独立的物理常数，如相互作用耦合强度和粒子质量。理想的理论将解释自然界为什么建立起这些特殊值。

弱电理论中有一个法则，它要求费米子成对出现。电子和电子中微子就是这样的对。因为它们比较轻，所以把它们叫做轻子。另外还有一个法则是：每一种粒子必有它的反粒子：对应于电子的是正子，对应于电子中微子的是电子反中微子。在粒子和反粒子相碰撞时，它们互相湮没，产生次级粒子。我们将看到，这样的反应构成了这里要讨论的实验的基础。

为了避免理论中难以捉摸的故障，有必要把轻子对与相应的夸克对联系起来。电子是最轻的荷电轻子，因此它与最轻的夸克相联系，即 u 夸克（或上夸克）和 d 夸克（或下夸克）。没有发现夸克的游离状态，只发现它们与别的夸克和反夸克相结合的状态。

举例说，质子由两个 u 夸克和一个 d 夸克组成，中子由两个 d 夸克和一个 u 夸克组成。高能实验已经证明了整个第二家族和大部分第三家族的存在。在所有情况下，后一个家族的粒子都比前一个家族的相应粒子重得多（中微子可能是一种例外）。第二家族的两种轻子是 μ 子和 μ 中微子；它的夸克是粲夸克（或 c 夸克）和奇异夸克（或 s 夸克）。第三家族已证实了的成员是它的

两种轻子—— τ 子和 τ 中微子——和底夸克（或 b 夸克）。剩下的夸克叫顶夸克（或 t 夸克），它对于弱电理论有决定性的意义。

没有几个第二家族和第三家族成员是稳定的（中微子又可能是例外）。它们的寿命范围在百万分之一秒到一万亿分之一秒之间，它们以衰变为较低质量的粒子而告终。

在弱电理论的粒子分类中有两个实质性的漏洞：第一，尽管理论上要求费米子成对地出现，但并没有规定多少对费米子组成一个家族。没有理由说明何以各个家族不能有别的尚未观察到的粒子类型（除轻子和夸克外）。这种可能性引起大批物理学家的兴趣。然而至今尚未观察到新的粒子。第二，这个理论对于本文的中心问题——物质的家族数未置一词。也许由粒子建立的更高的家族太重，以致现存的加速器难以把它产生出来？

现在，物理学家除了把观察到的质量引入预定的理论基础，别无可为。然而，有一种型式能够判明了：在给定的一类粒子（即一荷电轻子或荷电 $+2/3$ 或 $-1/3$ 的夸克）中各后续家族的质量较前一家族作可观的递增。其中递增最小的是第二家族的 μ 子跳跃到第三家族的 τ 子，增加约17倍。

另一个惊人的景象是在家族内部发现的。轻子总是比夸克轻；在所有轻子对中，中微子总是明显较轻的粒子。事实上，毕竟还不清楚中微子是不是有质量，实验证据给出的仅仅是各类中微子所能具有的质量的上限。

中微子很轻这一性质对于本文报告的数出粒子家族数的方法是重要的。即使第四、第五或第六家族的夸克和轻子成员因重得厉害，以致用现有加速器难以产生出来，然而说中微子质量很小或者没有质量，这还是八九不离十。大体可以肯定，这样的中微子质量小于 Z 玻色子质量的一半。所以，如果这样的中微子存在，它们可望出现在 Z 的衰减产物之中。 Z 是大量地衰变为中微子对的独一无二的粒子。

令人遗憾的是中微子不参加电磁相互作用和强相互作用，因此难以检测。它们只通过“弱”力与物质相接触，这么说的强有