

自然科学小丛书

基、本 粒 子

罗辽复 陆 埏

北 京 出 版 社

编辑说明

《自然科学小丛书》是综合性科学普及读物，包括数学、物理、化学、天文、地学、生物、航空和无线电电子等学科。主要介绍这些学科的基础知识，以及现代科学技术成就。编写上力求深入浅出，通俗易懂，使它具有思想性、知识性和趣味性，可以作为中学的课外辅导读物，并适合具有初中文化水平的广大读者阅读。

自然科学小丛书
基 本 粒 子
罗辽复 陆 垓

北 京 出 版 社 出 版
(北京崇文门外东兴隆街51号)
新华书店北京发行所发行
北 京 印 刷 三 厂 印 刷

787×1092毫米 32开本 3.5印张 54,000字

1981年11月第1版 1981年11月第1次印刷

印数 1—7,000

书号: 13071·136 定价: 0.27元

目 录

一 粒子世界一瞥..... (1)

从庄子的哲理说起(1) 今天的基本粒子有哪些(2) 粒子的重要性质(4) 粒子的相互作用(11) 基本粒子有哪几大类(14) 粒子过程的“反应式”(16) 高能物理的实验手段(20)

二 基本粒子可以再分吗? (28)

原子结构的发现(28) 原子核内部也有结构(31)核子是点粒子吗?(35) 看看核子内部(36) 部分子能看到吗?(39)

三 基本粒子的周期表..... (41)

粒子家族中的孪生兄弟(41) 什么是同位旋(43)奇怪的奇异数(45) 同位旋和奇异数守恒吗?(49)用“八卦”来分类强子(51) 短命的共振子(53) 基本粒子中的“冥王星”(59)

四 层子模型..... (63)

哪些粒子是最“基本”的?(63) 从介子八重态分析起(64) 奇怪的名字——夸克(66) 重子

是怎样构成的? (68) 从夸克层次来了解基本
粒子(70) 第四种和第五种层子(74) 层子的
“色”和“味”(76) 层子——实验上找到了吗?
(78)

五 轻子之谜..... (81)

$e-\mu$ 之谜(81) 捕捉中微子(84) 中微子是“跛
足”的吗? (86) τ 子出场了(91) 轻子与层
子是什么关系? (93)

六 粒子家族未来的新客..... (97)

胶子(97) 中介玻色子(99) 超重规范粒子
(100) 黑格斯粒子(101) 磁单极子(103)

附录：粒子物理的历史回顾..... (105)

一 粒子世界一瞥

从庄子的哲理说起

我国古代有个哲学家，叫做庄子，他说过：“一尺之棰，日取其半，万世不竭。”这句话说的是一个哲理，说事物总是可以分的。至于怎么个分法，其中却有许许多多的学问，也有许许多多的妙处。实际上，按照日取其半的分法，今天取一半，明天再取剩下那一半中的一半，……这样，无需一世，更不必万世，只要三十几天，剩下的就只有一个原子大小的东西了。到了原子，已经不能再按一半一半来分，因为世界上不存在“半个原子”这种东西。原子是由一个原子核与若干个电子所组成。原子核的半径还不到原子半径的万分之一，电子就更小了。原子再分就得分成电子和原子核，这不是一半对一半的分法。原子核固然可以再分，但也分不了几次。即使自然界里最重的原子核， U^{238} ——铀的一种同位素，也不过是由92个质子和146个中子组成的。分到了质子和中子以后，该怎么

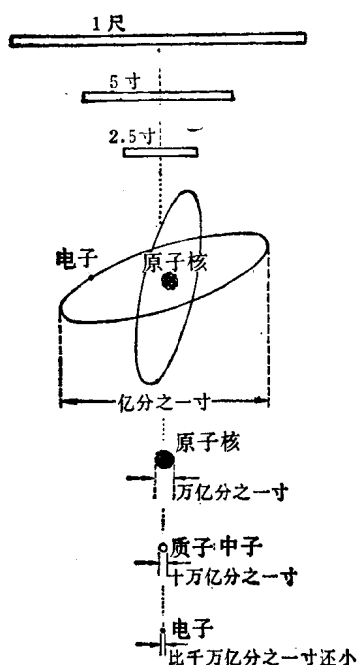


图1 一尺之棰，日取其半……

再分，人们至今没个办法。因而，质子和中子被称为“基本粒子”。同样，电子也被称为“基本粒子”。

由此可见，“一尺之棰，日取其半”，一个多月的时间已经分到了难以再分的地步，“万世不竭”该是多么艰难的路程啊！

今天的基本粒子有哪些

人们建造了愈来愈大的设备，用了愈来愈高的能量，花了很多时间和精力，试图将质子、中子再分割，试图把它们击碎，至今却仍未获得成功。然而，人们的努力并不白费，在这种奋斗过程中，一门新兴科学——粒子物理学蓬勃地发展了起来。

虽然人们尚未能直接分割质子、中子，但却发现了愈来愈多的与质子、中子属于同一级的许许多多“基本粒子”（现在，人们也常简称它们为“粒子”）。

那么，从今天的认识水平来讲，已经发现的基本粒子究竟有哪些呢？这个问题在大约五十年前是比较容易回答的。那时，粒子物理学还在刚开始发展的襁褓年代。比如 1930 年吧，那时知道的基本粒子只有电子、质子和光子三种。到 1932 年，发现了正电子和中子，基本粒子数目就增加到五种。如果把那时理论预言的粒子都算在内，也不过八、九种，即：电子、正电子、质子、反质子、中子、反中子、中微子、反中微子和光子。但是，这个问题到今天就很难确切回答了。

这里，正电子、反质子、反中子、反中微子都是相应粒子(电子、质子、中子、中微子)的反粒子。每一种粒子均有相应的反粒子，只有少数例外（或者更确切地说是特例），比如光子，它的反粒子也就是它自己。可以说，反粒子是粒子家族中的“半边天”。由反质子和反中子可以组成反原子核，由反原子核和正电子可以组成反原子，由反原子可以组成反分子，进而组成反物质、反世界。

1950 年前后和 1960 年前后是粒子物理发展的两个重要时期。1950 年前后发现了与过去已知粒子十分不同的许多新粒子，称为奇异粒子*。这些粒子的寿命很短，大体上在亿分之几至百亿分之几秒附近。

1960年前后发现了更大量的寿命更短的新粒子，称为共振子*。这些粒子的寿命竟可短到几千万亿亿分之一秒，比如 ρ 介子的寿命只有 4.3×10^{-24} 秒，即1亿亿亿分之4.3秒，真是瞬息即逝。这类短寿命粒子每年都要发现很多。有的虽然发现了，但其性质还没有测定，因此还不能完全肯定。然而，即使比较肯定的粒子，也已有一百余种。如果包括它们的反粒子，就差不多有三百种。其中，百分之八十以上是共振子。显然，这还不是粒子家族中的全部成员。随着新一代更高能量加速器的建成和运转，人们一定还会发现更多的基本粒子。总共究竟有多少种基本粒子，现在还很不清楚呢！

粒子的重要性质

几百种基本粒子，它们的性质不同，“脾气”各异，因而可以相互区别。那么，有哪几种性质是最重要的呢？

第一：质量

粒子物理中，人们习惯用 MeV（百万电子伏特）或 GeV（十亿电子伏特）来作为质量的单位

$$1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-6} \text{ 尔格} = 1.783 \times 10^{-37} \text{ 克}$$

* 奇异粒子和共振子的命名由来及其特性，后面将作介绍。

$$1\text{GeV}=1000\text{MeV}=1.602\times 10^{-3}\text{尔格}$$

$$=1.783\times 10^{-24}\text{克}$$

这里要作两点说明。首先，关于单位。电子伏特(eV)的原意是一个电子通过1伏特的电压所获得的能量，它是能量的单位。但根据相对论，能量和质量有一个简单的正比关系

$$E(\text{能量})=m(\text{质量})\times [c(\text{光速})]^2$$

这是著名的爱因斯坦公式，它对于原子能的释放和利用，有着极为重要的指导意义。据这个关系，1克物质中包含的能量约为90万亿焦耳；反之，一定的能量也同样可以用克表示出来。这样，质量和能量就可以用相同的单位来度量了。在粒子物理中，人们习惯于用能量的单位 MeV 或 GeV 来表示质量。

电子的质量约 0.5 MeV，质子或氢原子的质量约 1 GeV。基本粒子大家族中，最轻的要算光子，它的质量是零；迄今所知最重的要算 *T* (读作宇泼西龙)了，它是 1977 年才发现的，质量约 9.5 GeV，约为质子质量的十倍。

在这本小册子中，质量均指静止质量，即粒子静止时的质量。根据相对论，粒子运动时的质量是会增大的，比静止时增大 $1/\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ 倍， v 为粒子的运动

速度。

第二：寿命

质子和电子都是稳定的基本粒子，它们具有无限长的寿命。但是稳定粒子并不多，除质子、电子外，还只有少数几种，即反质子、正电子、中微子、反中微子和光子。其余粒子都是不稳定的，其中最长寿的要算中子和反中子，其寿命约为15分钟；次长寿的便是 μ 子，它的寿命已经很短，只有约百万分之二秒(2×10^{-6} 秒)。大体上说，在基本粒子家族中，寿命在 10^{-8} 秒到 10^{-10} 秒范围的都已经算是长寿的了。大部分基本粒子都是短命的“共振子”，它们的寿命还不及上述长寿粒子的一万亿分之一，一般在 10^{-23} 秒附近(图2)。

第三：自旋

基本粒子都象陀螺一样，能绕着自身的一根轴线快速自转。自转的快慢用叫做“自旋”的角动量来描述，它是基本粒子的一个重要特性。自旋以 $\hbar$ 为单位($\hbar = h/2\pi$, $h = 6.626 \times 10^{-27}$ 尔格·秒，称为普朗克常数)，可以取 $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2}, 3, \dots$ 等值，整数或者半整数。自旋的数值表示自转的快慢，其值愈高表示自转愈快。自旋为0的，表示没有自转运动。

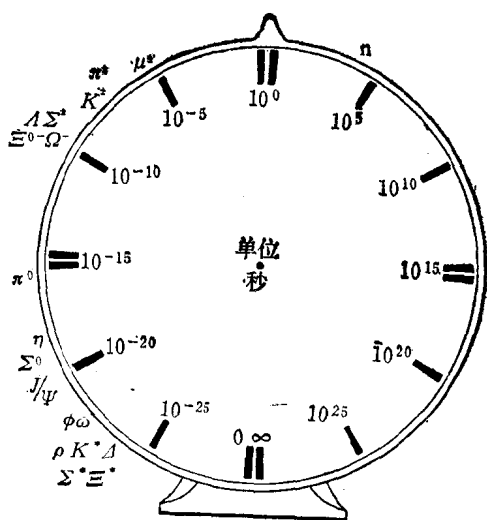


图2* 基本粒子的寿命

常见的基本粒子，自旋都取 0、1/2 或 1。自旋值高的一般都是共振子。自旋为 0、1、2……等整数值的粒子，叫做玻色子；自旋为 1/2、3/2、5/2……等半整数值的粒子，叫做费米子。玻色子和费米子的性质是很不相同的。

基本粒子的自转与常见的陀螺也不尽相同。陀螺的转动轴可以指向任何方向，而粒子自转的方向则不能任意取。比如自旋为 1/2 的粒子，它只能有两种可

* 图上的希腊字母的读音是： μ 读作缪， π 读作派， κ 读作卡帕， Λ 读作兰姆达， Σ 读作西格马， Ξ 读作克西， Ω 、 ω 读作奥米伽， η 读作艾塔， ψ 读作普西， ϕ 读作斐， ρ 读作洛， Δ 读作德耳塔。

能，一种是自旋朝上（记为 $+1/2$ ），一种是自旋朝下（记为 $-1/2$ ），可用图3形象地表示出来。粒子自旋的本质是自转，图中所画的自旋方向，指的是与转动相应的螺旋前进方向。自旋为1的粒子，多一个横向自转状态，因此总共可以有三种状态，分别记为 $+1$ ， 0 ， -1 。一般地说，自旋为 s 的可以有 $2s+1$ 种取向状态，分别记为

$$s, s-1, \dots, -s+1, -s$$

这些数字表示自旋角动量在某一给定方向上的投影值。

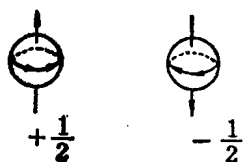


图3 自旋为 $\frac{1}{2}$ 的粒子

费米子具有一种特别的重要性质——不能有两个或两个以上的粒子处于相同的状态之中，就是说，一个费米子占据了某个状态，别的同类费米子就不能再去

占据这个状态。这个原则叫做泡利不相容原理。玻色子不遵守这个原理，因此，可以有多个玻色子处于同一个状态之中。电子、质子、中子的自旋都是 $1/2$ ，都是费米子，所以电子在原子核外面绕转时，每一条轨道上最多只能有两个电子，它们朝着相反的方向自转，否则就要违背泡利原理。光子的自旋是1，是玻色子，因此允许很多光子处于相同的状态之中。在激

光的光束中，正是由于大量光子处于同一状态，才使得激光具有很强的方向性和良好的相干性，形成了激光的独特本领。

第四：电荷

电子具有电荷 $-e$ ，其中

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ 库伦}$$

质子具有电荷 $+e$ 。中子是不带电的。所有已经发现的基本粒子，电荷都取 e 的整数倍。电荷的数值是粒子的又一个重要性质。

以上四个是基本粒子的最重要的特性。凡是质量、寿命、自旋等性质完全相同，而电荷恰恰相反的粒子，就是前面曾谈到的反粒子。比如，正电子就是电子的反粒子，反质子就是质子的反粒子……等等。中性粒子也有反粒子，不过其反粒子仍是中性的，比如中子的反粒子为反中子。反中子和中子的质量、寿命、自旋都相同，但它们是两种性质不同的基本粒子。只有极个别的中性粒子，比如光子、 π^0 介子等，它们的反粒子才是它们自己。

现在把常见的若干基本粒子的性质列成表 1，表中列举了粒子性质，它们的反粒子只给出了名称符号。这张表中的粒子(和反粒子)符号，请读者记住，以后要经常用到它们。

表 1

常 见 粒 子

名 称	符号	质 量 (MeV)	寿 命 (秒)	自旋	电荷 (e)	反粒子
光 子	γ	0	∞	1	0	γ
e 中微子	ν_e	~ 0	∞	$\frac{1}{2}$	0	$\overline{\nu_e}$
电 子	e^-	0.511	∞	$\frac{1}{2}$	-1	e^+
μ 中微子	ν_μ	~ 0	∞	$\frac{1}{2}$	0	$\overline{\nu_\mu}$
μ 子	μ^-	105.66	2.2×10^{-6}	$\frac{1}{2}$	-1	μ^+
τ 中微子	ν_τ	~ 0	∞	$\frac{1}{2}$	0	$\overline{\nu_\tau}$
τ 子	τ^-	1784	$10^{-12} \sim 10^{-13}$	$\frac{1}{2}$	-1	τ^+
π 介子	π^+	139.57	2.6×10^{-8}	0	+1	π^-
π^0 介子	π^0	134.96	0.8×10^{-16}	0	0	π^0
η 介子	η	548.8	7.7×10^{-19}	0	0	η
K 介子	K^+	493.67	1.2×10^{-8}	0	+1	K^-
K 介子	K^0	497.67	$\begin{cases} 0.89 \times 10^{-10} & (K_s) \\ 5.18 \times 10^{-8} & (K_L) \end{cases}$	0	0	$\overline{K^0}$
质 子	p	938.28	∞	$\frac{1}{2}$	+1	$\overline{p}$
中 子	n	939.57	917	$\frac{1}{2}$	0	$\overline{n}$
Λ 超子	Λ	1115.60	2.6×10^{-10}	$\frac{1}{2}$	0	$\overline{\Lambda}$
Σ 超子	Σ^+	1189.36	0.8×10^{-10}	$\frac{1}{2}$	+1	$\overline{\Sigma^+}$
Σ 超子	Σ^0	1192.46	5.8×10^{-20}	$\frac{1}{2}$	0	$\overline{\Sigma^0}$
Σ 超子	Σ^-	1197.35	1.5×10^{-10}	$\frac{1}{2}$	-1	$\overline{\Sigma^-}$
Ξ 超子	Ξ^0	1314.9	2.9×10^{-10}	$\frac{1}{2}$	0	$\overline{\Xi^0}$
Ξ 超子	Ξ^-	1321.32	1.6×10^{-10}	$\frac{1}{2}$	-1	$\overline{\Xi^-}$

粒子的相互作用

日常生活中我们知道物体之间有着千千万万种力(或称相互作用力)。比如,用球拍打球是靠弹性力;抽水机抽水靠的是大气压力;钟摆运动中起作用的是悬挂摆锤的绳子的张力和地球对摆锤的引力……等等。但是,从微观物理的深度来看,日常生活中所有这些相互作用,归根到底只有两种基本类型,一是万有引力,一是电磁力。实际上,弹性力也好,大气压力也好,张力也好,从分子水平来看,都属于分子之间的相互作用;而分子由原子组成,原子又由带正电的原子核和带负电的电子组成,因此分子力最后仍归结成电子与电子之间、电子与核之间以及核与核之间的电磁作用。万有引力是存在的,但只在涉及到大质量物体(比如地球对物体的作用,太阳对地球的作用)时,万有引力才是重要的。从粒子之间的作用来看,万有引力就十分微小,完全可以忽略不计。

在粒子之间,电磁作用是重要的。比如光子和电子之间的作用,质子和电子之间的作用都是电磁作用。除此而外,粒子之间还存在两种新型的作用,一是比电磁作用强百倍的强作用;一是比电磁作用弱亿倍的弱作用。

原子核内部质子与中子之间的作用力，就是强作用。正是由于这种作用很强，所以原子核内部释放出来的原子能才会大得惊人！什么是弱作用？这得多说几句。我们知道，早在本世纪初，就发现有些原子核是不稳定的，它们会放出三种类型的射线：带正电的 α 射线，带负电的 β 射线和中性的 γ 射线。 γ 射线就是光子。 α 射线是氦原子核，是由两个质子和两个中子组成的集团。 β 射线就是电子，它是在原子核内的中子转变成质子的过程

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

中放出来的。这个过程叫做 β 衰变过程。在这个过程中，中子转变成质子后仍停留在原子核内，同时放出电子和反中微子。中微子和反中微子是中性的穿透力极强的粒子，即使将千万个地球排在一起，它也可以毫不费力地穿透过去。为什么它有这样强的穿透力呢？这是因为它和物质的作用非常微弱，它在穿越千万个地球时竟没有与其中的任何一个原子发生过作用或碰撞。正是由于这个原因， β 衰变中放射出的反中微子是极难检测到的。人们观察到的只是带负电的电子束—— β 射线。 β 衰变是一种弱作用过程，这个过程中起作用的不是电磁力，也不是强作用力，而是弱作用力。

在前面的表1中，我们看到大部分基本粒子都是不稳定的，它们的寿命大多在 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ 秒的范围内。为什么会不稳定呢？就是因为这些粒子都要通过弱作用而衰变成其它粒子。

也有一些粒子的不稳定性是由于电磁作用引起的衰变，比如

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma, \quad \Sigma^0 \longrightarrow \Lambda + \gamma$$

中性的 π^0 介子和荷电的 $\pi^\pm$ 介子质量相近，自旋相同，其它很多方面都是相象的，它们属于基本粒子大家族中的一个小家庭。但是从基本粒子表中我们看到它们的寿命相差很远，差不多相差一亿倍。为什么寿命相差这么远呢？就是因为 $\pi^\pm$ 的衰变是依靠弱作用，而 π^0 的衰变是依靠电磁作用。电磁作用强度比弱作用强度大得多，所以 π^0 的衰变过程进行得比 $\pi^\pm$ 快得多。同样的，中性 Σ^0 超子和荷电 $\Sigma^\pm$ 超子也是属于基本粒子大家族中的一个小家庭，它们的寿命却相差十亿倍以上，其原因也在于 Σ^0 是电磁衰变而 $\Sigma^\pm$ 是弱衰变。

除了电磁衰变和弱衰变外，还有一些粒子的不稳定性是由于强作用的结果。比如所有共振子的衰变几乎都是强作用衰变，因此共振子一旦产生，马上就会衰变，寿命短到 10^{-23} 秒。