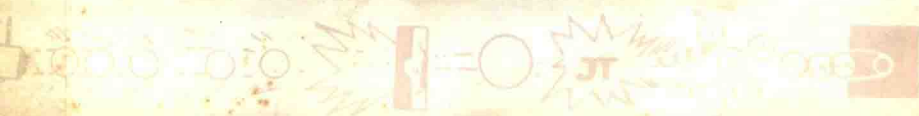


奇特原子

王蕴玉 著·原子能出版社

QI TE YUAN ZI



奇特原子

王蘊玉 著

塞井龍藏版社

内 容 简 介

奇特原子是随着基本粒子物理和高能加速器的发展而发现的一类新的原子，具有许多重要的特性。

本书是介绍奇特原子和介子化学的科普读物。从基本粒子谈起，介绍了介子原子、正子素和 μ 子素的形成、特性和实际应用的可能性。

本书可供高中以上文化程度的学生，教师和一般科技工作者参考。

奇 特 原 子

王蕴玉 著

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

张家口地区印刷厂印刷

(张家口市建国大街8号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $2^{25/16}$ ·字数56千字

1980年10月第一版·1980年10月第一次印刷

印数001—6500·统一书号：15175·238

定价：0.30元

前 言

大家熟知的原子是由质子、中子和电子组成的。这是普通的原子。如果普通原子中的一个电子被其它荷负电的基本粒子——负介子、负超子或反质子代替，这种原子就叫做“奇特原子”。还有一种奇特原子是指虽然绕原子核运动的仍是电子，但是原子核不是由质子组成，而是由其它荷正电的基本粒子——正电子或正 μ 子组成，由于这类原子的组成与普通原子不同，具有一些特异的性质，所以称之为“奇特原子”，也称为“新原子”。

奇特原子具有一些重要的特性，利用这些重要的特性不仅可以研究原子、原子核和基本粒子，而且由于奇特原子的形成几率和它的辐射特征还受化学环境——原子外层电子和更外围电子的影响，所以也为化学家们开辟了一个研究物质结构的新途径。

高能加速器是产生介子、超子和反质子的主要设备。随着高能加速器的建造和发展，可以提供足够强度的多种基本粒子，从而扩大和促进了奇特原子的研究工作，现在它已成为一个引人注目的新课题。

我国要在十年内建立一个现代化的高能物理实验基地，不久将建造一台三百亿至五百亿电子伏的质子加速器。这将带动许多学科和工业技术的发展，推动高能物理和相邻学科的相互渗透，填补我国科研工作中的一些空白。奇特原子的研究就是一项值得开展的工作。它不仅具有理论意义，而且具

有比较广泛的应用前景，是一富有多学科相互渗透特色的研究课题。为了使大家对这个陌生的领域有所了解，并引起化学家们对利用高能加速器开展化学工作的重视，本文拟对奇特原子和它与化学之间的联系做一简单的介绍。

作者 1979年7月

目 录

前 言

第一章 基本粒子和原子	(1)
一、什么是基本粒子	(1)
二、基本粒子的发现	(1)
三、基本粒子家族	(4)
四、哪些基本粒子能形成奇特原子	(5)
第二章 基本粒子的产生和衰变	(7)
一、 π 介子的产生和衰变	(8)
二、 μ 子的产生和衰变	(10)
三、K介子和反质子的产生	(10)
四、超子	(11)
第三章 奇特原子	(12)
一、什么是奇特原子	(12)
二、奇特原子与普通原子的区别	(14)
三、奇特原子的形成过程	(19)
第四章 奇特原子和介子化学	(21)
一、介子化学是基本粒子物理和化学相互渗透的边缘学 科	(21)
二、 μ 原子	(22)
三、 π 原子	(33)
四、K原子和其它强子原子	(42)
五、奇特原子在核物理和基本粒子物理研究中的意义	(43)
第五章 正电子和正子素	(45)
一、正子素	(46)

二、正电子的特性	(47)
三、正子素的形成和湮没	(49)
四、实验技术	(53)
五、正电子湮没技术的应用前景	(62)
第六章 μ 子素	(72)
一、什么是 μ 子素	(72)
二、 μ^+ 子的来源和特性	(72)
三、 μ 子素的形成和 μ^+ 退极化	(74)
结束语	(76)

第一章 基本粒子和原子

由于奇特原子的组成中包括大家不熟悉的一些基本粒子，所以在谈到奇特原子之前，先向大家介绍有关的几种基本粒子。

一、什么是基本粒子

回答这个问题，要从组成万物的原子谈起。世界上千变万化的物质都是由原子组成的。原子又由质子、中子和电子组成，所以当时人们曾把质子、中子和电子看做是组成万物的基本单元，以为这是再也不能分割的最基本的东西了，称它们为基本粒子。但是，随着科学技术的发展，发现基本粒子的数目愈来愈多（至今已有二、三百种），而且也不再是不能分割的基本单元了，它们具有尚未被了解的层次和结构。因而，“基本粒子”现在已成了一个不科学的术语。然而，在高能物理学家尚未给出更科学的命名之前，我们仍然使用这一传统的名词。

二、基本粒子的发现

1897年被汤姆逊发现的第一个基本粒子是电子—— e 。这是一个革命性的发现。从此人们才明瞭原子并不是组成物质的不可分割的最小单元，而是由带负电的电子和带正电的

粒子按照一定的结构组成的。电子质量非常小，原子的质量大部分集中在带正电的粒子内。1911年卢瑟福提出一个原子模型，他认为原子中心有一个带正电的粒子，直径约为 10^{-13} 厘米，电子围绕着它旋转，轨道半径比带正电的核心大得多，约为 10^{-8} 厘米（图1）。

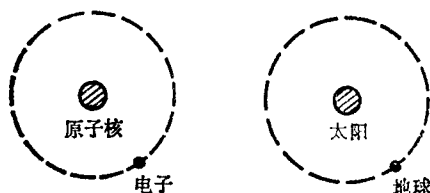


图1 卢瑟福的原子模型

也就是说，原子具有和太阳系非常相似的结构。带正电的核心好比是太阳，电子像是绕太阳旋转的行星。卢瑟福把这个位于原子中心，具有原子绝大部分质量，并且带正电的部分命名为“原子核”。最轻的原子核是氢核。他把这个最轻的核定名为“质子”，符号是 p 。其它原子核的质量大体是质子质量的整数倍。由此看来，质子是继电子之后发现的另一个基本粒子。但是原子核是不是仅由质子构成的呢？以质子的电荷做为原子核的电荷单位，如果原子核的电荷数与它的质量数正好相等的话，即表明原子核内只有质子。但实际上，原子核的质量数大约是它的电荷数的两倍，甚至更多一些。根据这一事实，卢瑟福预想到原子核内除了质子之外，还存在着一种质量和质子相近，但不带电荷的中性粒子。1932年初英国学者查德威克证实了这种中性粒子的存在，并

被他命名为“中子”，符号是 n 。

这时已经知道了三种基本粒子：电子、质子和中子。它们是组成原子的主要物质，在基本粒子世界中占有重要的地位。

随着实验技术的改进，人类对物质结构的认识逐渐深化。二十世纪六十年代，人们用高能电子轰击质子时，发现质子也有某种结构。所以不能再把基本粒子理解为是组成物质的不可分割的基本单元了，那么，基本粒子又是由什么组成的呢？这个问题目前尚未解决。

中子的存在被证实之后不久（1932—1933）美国物理学家安德逊在宇宙中发现了另外一个新的粒子——正电子。它的质量和电荷的大小都与电子相同，但电荷的反符号相。所以，它是电子的反粒子，用 e^+ 表示。正电子的发现第一次证实了反粒子的存在。

此后，经过一段漫长而曲折的过程，直到1947年才从宇宙线中找到了早在1935年被日本物理学家汤川秀树预言过的，负责传递核力的粒子—— π 介子。 π 介子比电子重得多，它的质量是电子质量的273倍。它与核子之间有很强的相互作用，是传递核力的媒介物。 π 介子是不稳定的粒子，平均寿命为 2.6×10^{-8} 秒，衰变时放出 μ 子和中微子 ν 或反中微子 $\bar{\nu}$ 。

$$\pi^{\pm} \longrightarrow \mu^{\pm} + \nu \text{ (或 } \bar{\nu} \text{)}$$

μ 子虽然是 π 介子的衰变产物，但是它的发现比 π 介子早十年。在汤川秀树预言了存在着介子大约二年之后，即从宇宙线中发现了 μ 子， μ 子的质量是电子质量的207倍，而汤川秀树预言的传递核力的介子的质量恰好在这个范围。所以当时误认为 μ 子就是预期的介子，因此称它为 μ 介子。但是它与核子之间没有强相互作用，性质与电子非常相似，并不是传

传递核力的媒介，在基本粒子的分类中它是轻子。所以现在已不称它为 μ 介子，而叫 μ 子。

μ 子的平均寿命是 2.2×10^{-8} 秒，它衰变放出电子、中微子和反中微子。

$$\mu^{\pm} \longrightarrow e^{\pm} + \nu + \bar{\nu}$$

在发现 π 介子之后不久，又发现了质量比电子大一千倍的K介子。它的寿命 $\tau_K = 1.2 \times 10^{-8}$ 秒，K介子形成的奇特原子对研究核性质很有帮助。我国即将建造的高能加速器就适于产生K介子。

除了核子（质子和中子）和介子与核有强相互作用之外，超子也是一种与核有强相互作用的基本粒子，它们的质量比质子和中子的质量还大。像 Λ 超子和 Σ 超子的质量大约为质子的1.2倍， Ξ 和 Ω 超子更重。 Σ^- 超子的反粒子就是我国著名的物理学家王淦昌于1959年发现的。

质子的反粒子—— $\bar{p}$ 是1955年发现的，也是一个能形成奇特原子的基本粒子。

随着高能加速器的建造和实验技术的发展，基本粒子家族不断扩大，至今已发现了三百个左右。

三、基本粒子家族

基本粒子按其质量可分成四族(表1)。这些粒子组成了具有自己的规律和特点的基本粒子世界。如基本粒子的质量比质子重的属于重粒子族。 π 介子以及比它重的具整数自旋*

*自旋是基本粒子的一种运动。自旋的粒子就像是一个转动的陀螺，绕着自己的轴而旋转。描述自旋的量子数有0, 1/2, 1, 3/2……。

表1 基本粒子家族

族类	基本粒子名称	符 号	静止质量		寿 命 (秒)	自旋
			m_e^*	MeV**		
光子族	光 子	γ	0	0	稳 定	1
轻子族	电 子	e^+, e^-	1	0.511	稳 定	1/2
	μ 子	μ^+, μ^-	206	105.7	2.2×10^{-8}	1/2
	中微子	$\nu_e, \bar{\nu}_e$	0	0	稳 定	1/2
	μ 中微子	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	< 4	< 2.1	稳 定	1/2
介子族	π 介子	π^+, π^-	273	139.6	2.6×10^{-8}	0
		π^0	264	135.0	0.9×10^{-16}	
	K 介子	K^+, K^-	966	493.8	1.2×10^{-8}	0
		K_1^0	973	497.8	0.9×10^{-10}	
		K_2^0	973	497.8	5.3×10^{-8}	
	介子共振态					
重子族	中 子	n	1839	939.6	1×10^8	1/2
	质 子	$p, \bar{p}$	1836	938.3	稳 定	1/2
	Λ 超子	$\Lambda, (\bar{\Lambda})$	2182	1115.4	2.5×10^{-10}	1/2
	Ξ 超子	Ξ^-	2580	1321.3	1.7×10^{-10}	1/2
		Ξ^0	2575	1314.9	2.9×10^{-10}	
	Σ 超子	Σ^+	2328	1189.5	0.8×10^{-10}	1/2
		Σ^0	2334	1192.5	$< 10^{-14}$	
		Σ^-	2342	1197.5	1.6×10^{-10}	
	Ω 超子	Ω^-	3272	1672.4	1.3×10^{-10}	3/2
	重子共振态					

* m_e 是电子的静止质量, 为 9.1×10^{-28} 克。为了方便, 把电子的质量表示为 1。

** MeV (兆电子伏) 是能量单位, 一般也以它为单位表示基本粒子的质量。

的基本粒子构成介子族。轻粒子族包括中微子、电子和 μ 子。最后剩下一个光子，自成一个光子族。

四、哪些基本粒子能形成奇特原子

是不是任何荷负电的基本粒子都能代替电子或是荷正电的粒子都可以“代替”质子而形成可观测到的奇特原子呢？当然不是这样。

首先，要想形成可以观测到的奇特原子，这种粒子的寿命就不能太短。因为粒子射入物质后，经过慢化到形成奇特原子，这个过程大约需要 10^{-10} 秒。如果基本粒子的寿命比 10^{-10} 秒短，还没来得及形成奇特原子就已经衰变了；另外一个限制是必须能够获得一定数量的这种粒子。如果这种粒子十分稀少，即使用高能加速器也只能产生很少的数量，由于它们本身很难测到，再去研究由它们形成的奇特原子那就更困难了。当然，随着测量技术的改善，研究的领域和对象也

表2 几种能形成奇特原子的基本粒子

粒 子	自 旋	质量 (MeV)	寿 命 (秒)
e^+, e^-	1/2	0.511	∞^*
μ^+, μ^-	1/2	105.7	2.2×10^{-6}
π^+, π^-	0	139.6	2.6×10^{-8}
K^-	0	493.8	1.2×10^{-8}
Σ^-	1/2	1197.4	1.6×10^{-10}
Ξ^-	1/2	1321.3	1.7×10^{-10}
Ω^-	3/2	1672.4	1.3×10^{-10}
p^-	1/2	938.3	∞

* e^+ 虽然是稳定粒子，但它遇到 e^- 要发生湮没，放出 γ 射线。

会不断扩大。

目前只有表 2 中列出的几种基本粒子能形成可观测到的奇特原子。

至于由中性粒子，像 π^0 , K^0 代替中子形成的奇特原子，这种原子的化学效应不明显，即使能够形成，其化学性质与正常原子差别不大，所以并没引起人们的特别兴趣。

第二章 基本粒子的产生和衰变

前面已经讲到，原子的结构很像太阳系，电子像行星一样绕着原子核旋转。是什么力量约束着电子绕原子核转而不跑出去呢？这个力量有多大呢？我们知道，原子核是荷正电的，电子荷负电，它们之间有互相吸引的力量，称为电磁作用力。就是这种力量把电子约束在核的周围，跑不出去。这种作用力是不强的，大约 10 电子伏的能量就能把原子外层的电子打出去。所以，点燃一根火柴就能引起原子中的电子发生分离和结合的变化。但是，把一个质子或中子从原子核内打出去却难多了。因为质子和中子结合成原子核是通过核力的作用。核力是一种很强的作用力，它比电磁相互作用要强几百倍。要想从核内打出一个质子或中子，至少要用 8 兆电子伏 (MeV) 能量的粒子做“炮弹”去轰击原子核。

要想从核内打出传递核力的 π 介子或 K 介子，需要的能量就更高了。一般要用几百到几千兆电子伏的粒子做“炮弹”去轰击原子核。这些做“炮弹”的粒子必须由中能或高能加速器产生。所以，高能加速器的重要用途之一就是用来人工

地产生介子。

能够做为炮弹的粒子有很多种，常用的有电子、质子、光子等。这些粒子的来源有两个：一是宇宙射线；二是加速器。宇宙射线是从宇宙空间射到地球上的粒子流。其特点是能量高，但强度小（单位面积上的粒子数目少），又不能人工控制。要想打出足够数量所需要的基本粒子，用宇宙射线中的粒子做“炮弹”是不行的，必须用加速器。因为加速器能产生强度很大的单一的粒子流，能量可控制。如果用加速器产生的高能量“炮弹”去轰击适当的靶物质，就能获得我们所需要的的基本粒子。这种粒子称为次级粒子。

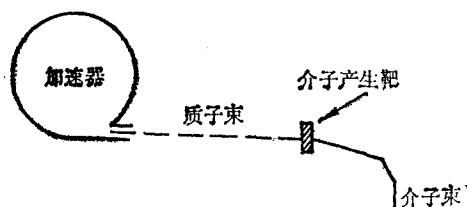


图 2 产生 π 介子的装置

下面分别谈谈这些粒子的产生和它们的衰变特征。

一、 π 介子的产生和衰变

π 介子的质量大约是 140 兆电子伏，是电子质量的 273 倍。也就是说，要想产生一个自由的 π 介子，至少要提供 140 兆电子伏的能量，但实际上需要的能量还要大。

人工首次获得 π 介子是在 1948 年，用同步回旋加速器产

生的380兆电子伏的 α 粒子轰击碳靶，得到了 π 介子。

一般用能量高于300兆电子伏的质子、电子、中子或光子轰击碳、铍、铜和铀等“靶子”，都可以得到低能的 π 介子，其中包括 π^+ 、 π^- 和 π^0 。

产生低能 π 介子最好的设备是500—1000兆电子伏的强流质子加速器（有人称它为介子工厂）。用这种设备能得到能量为几百兆电子伏，强度很大的 π 介子束流。

π 介子的衰变： π^+ 和 π^- 介子在自由空间行进时，分别衰变成 μ^+ 和 μ^- 。这就是获得 μ 子的途径。

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

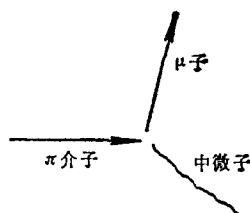


图3 π 介子的衰变

由于 π^- 与核有强相互作用，它被核俘获的可能性很大。所以，除了自由衰变放出 μ^- 之外，相当一部分 π^- 被核俘获，最后从核中打出数个粒子，这一过程在核乳胶中留下一个“星”状的径迹。

π^0 介子的寿命很短，只有 10^{-16} 秒，衰变时放出两个方向相反的67.5MeV的 γ 光子。

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma$$

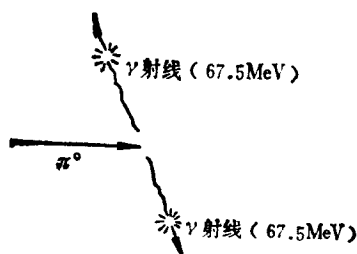


图4 π 介子的衰变

二、 μ 子的产生和衰变

不能从加速器直接获得 μ 子，只能通过 π 介子衰变得到它，这在上一节已经谈到。

μ 子的寿命比 π 介子的寿命长得多，是 2.2×10^{-6} 秒。它衰变时放出电子、中微子和反中微子。

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$$

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$$

和 π 介子相比， μ 子与核的相互作用很弱，它被核俘获的可能性比较小，主要是自己衰变放出电子。然而，有时也能被核俘获，而将核内一个质子转变成为一个中子和一个中微子。

$$\mu^- + p \longrightarrow n + \nu$$

三、K介子和反质子的产生

K介子的质量大约是电子质量的一千倍，反质子 $\bar{p}$ 的质量