

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

《科学家谈物理》第三辑

——粒子世界探秘



## 前 言

自然界是一个形形色色、丰富多彩的物质世界，人类自古以来就在不断地进行探索，以便了解这个物质世界是由什么构成的，是怎样构成的。在古代人们就已经对物质世界的构成提出过许多种理论，但是由于科学技术水平的限制，这些认识一直停留在非常粗浅的水平上。直到近代，工业革命使得科学技术获得了突飞猛进的进步，为科学实验的开展提供了前所未有的条件，也带动了科学理论的飞速发展。

微观世界一直是人们进行研究的一个主要方面。因为宏观世界是以微观世界为基础的，研究微观世界及其规律不仅可以使人们对自然界的结构及运动知其然，而且可以知其所以然。

19世纪以前，由于化学和经典物理学的发展，使人们对微观世界的物理学规律有了许多本质的认识。虽然当时的人们认为科学理论已经发展得日臻完美，但是，那些理论毕竟仍然受到当时的实验技术水平的限制，还不可能在实验上接触到大量经典物理学所未涉及到的领域。一直到19世纪末，人们才逐渐注意到一些用经典物理学所不能解释的自然现象。

历史进入了20世纪，随着相对论的诞生、量子力学的建立，人类对微观物质世界的认识又登上了一层新的台阶。物理学家们通过大量的实验和理论研究，逐渐认识到组成物质世界的分子和原子并不是微观世界的最小单元，并且进而建立了原子结构的模型，在这个基础上建立和发展了原子物理学和原子核物理学，从此，物理学就以前所未有的速度向前飞跃发展。

30年代以来，人类对微观物质世界探索的前沿推进到粒子物理学。物理学家们通过大量的不断涌现的新实验进展和理论研究，60年代又进一步认识到组成物质世界的基本粒子并不是微观世界的最小单元，基本粒子并不“基本”，它们还是由更深层次的粒子组成，认识到物质间的错综复杂的相互作用都可以还原为粒子间的三种最基本的相互作用，实现对微观物质世界结构和运动基本规律认识的巨大飞跃。建立和发展了强子结构理论、量子色动力学和电弱统一理论，形成了粒子物理的标准模型。

本书力图用浅显易懂的语言，介绍粒子物理学的起源以及近年来的重大进展，使读者能够对微观世界有一个直观和感性的认识。在书中涉及了从有关微观物质世界和粒子物理学的最一般的知识，到粒子物理学方面的前沿进展。

希望本书能够增加读者对粒子物理学发展的了解。本书撰写中的缺点和不足之处在所难免，请广大读者不吝指正。

## 序二 柳斌

自然科学是生产实践和科学实验经验的总结，是人类征服自然、改造社会的有力武器。物理学则是自然科学中一门重要的基础学科。

十七世纪前后物理学发生了一次巨大的飞跃。以牛顿为代表的一批科学家用观察和实验的方法研究自然现象，他们建立了以经典力学、热力学、统计物理学、经典电动力学为基础的一个完整、严密的经典物理学的理论体系。这个理论体系的建立，大大扩展了人类对客观世界物质结构及其运动规律的认识，在科学技术领域和哲学领域均产生了划时代的影响，推动了自然科学和工业革命的迅猛前进。

十九世纪末二十世纪初，物理学再一次发生巨大飞跃。以爱因斯坦为首的一批卓越的物理学家创立了相对论、量子力学，为现代物理学奠定了坚实的理论基础。现代物理学克服了经典物理学形而上学的局限。相对论揭示了物体在高速（接近光速）运动状态下的各种规律；量子力学打开了微观世界的大门，发现了微观物质运动的规律。现代物理学在更深的物质结构层次和更广阔的时空领域内扩展了人类对自然界的认识，揭开了伟大的现代自然科学革命的序幕。

在现代物理学的基础上，原子能、电子计算机、新型材料、空间技术、海洋开发等新技术相继产生，新技术革命蓬勃兴起。

现代科学技术的发展是现代经济发展的基础和前提条件。当前世界各国为了争夺二十一世纪在世界上的有利地位，无不把发展现代科学技术作为战略重点。我国人民长期以来遭受帝国主义的侵略和剥削，近百年来沦于贫穷落后的殖民地半殖民地地位。为了迅速缩小我国与发达国家在经济上的差距，为了把我国建设成为一个社会主义的现代化强国，中国人民在中国共产党的领导下，奋斗了七十多年。积正反两个方面的经验，我们深知，人民大众在取得政权以后，必须大力改革各种束缚生产发展的政策、法令、规章、条例以及各种不合理的管理制度，以更大地解放生产力；必须高度重视科学技术工作和教育工作，尊重知识、尊重人才，以更快地发展生产力。1983年，邓小平同志为北京景山学校题词：“面向现代化，面向世界，面向未来”，高瞻远瞩地指出了教育工作、实际上也包括科学技术工作的奋斗方向。老一辈科学家艰苦奋斗，为祖国的现代化事业立下了汗马功劳。现在的中学生是跨世纪的一代，是二十一世纪我国各项事业的生力军，肩负着人民的重托和历史的重任。当代中学生要有志气，继承老一辈科学家们的未竟事业，从小热爱包括物理学在内的各门自然科学，做到爱科学、学科学，用现代科学技术装备我国的工业、农业和国防，加速四个现代化的历史进程，使我们的祖国尽快繁荣昌盛起来。

《科学家谈物理》丛书的出版，对当代中学生来说是件喜事，年轻的朋友们不仅可以从中学习许多宝贵的知识，进一步掌握打开科学殿堂的钥匙，而且可以从中学习科学家们那种为科学事业而执著探索的精神，那种自觉献身的精神，以及那种实事求是的宝贵品质。我相信，这套丛书的出版，必将

受到读者的欢迎。

1992年7月30日

## 序一 朱光亚

中国物理学会主编、湖南教育出版社出版《科学家谈物理》丛书，是一件很有意义的工作。半个世纪、特别是近二、三十年来，物理学从亚核世界到整个宇宙广阔领域的探索研究，又取得了惊人的进展和成就。物理学在理论方法和实验技术上的新突破，使它同数学、生物学、化学、材料科学等邻近学科的结合与相互作用更密切了，促进了许多边缘、交叉学科以及高、新技术与产业的诞生及迅速发展，出现了步伐越来越快的新的技术革命。这一切不仅广泛而深刻地丰富了人们对自然界规律的认识，并预示下世纪将会出现新的重大突破，而且已使人们的社会生活在短短的几十年间发生了从前难以想象的变化。

当然也应当看到，这种变化还只限于一部分发达国家和地区，而且变化的程度是很不平衡的。全人类的社会进步并不是仅由科学技术的进步所能决定的。我们面对的仍是一个充满矛盾和激烈竞争的世界。即使是自然科学基础之一的物理学的重大发现，例如 20 世纪 30 年代关于铀核裂变现象的发现，揭示了人类有可能从自然界获取一种巨大新能源的美好前景，然而它却不幸地被首先用于军事和争霸，带来了危及人类生存安全的严重威胁。

由我国一批著名科学家撰写专文，向广大读者介绍物理学思想、物理学发展，特别是近代和现代物理学发展，让大家获得新知识，增加对物理学各分支学科的主要内容及其作用和影响的认识和理解，激励大家为追求美好未来而努力奋斗，无疑是非常有益的。

《科学家谈物理》丛书侧重以广大青少年读者为对象，这又有特殊意义。人类社会正在动荡和不安中准备迎接世纪之交，国际上的种种竞争，关键是科学技术的竞争，进一步说又在于培养科技人才上的竞争。“科技增强国力。青年开创未来”，下一世纪在我国科技领域承担开拓前进重任的，只能是当前正在学习的青少年一代。种种事实表明，包括近年来我国中学生参加国际数学、物理学、化学、信息学奥林匹克竞赛不断取得优异成绩在内，我国青少年聪明勤奋，是大有希望的一代。青少年处在长知识、增才干的时期，既要努力学习，又要善于学习，勤于思考，重视实践，勇于探索，并注意拓宽知识面。希望《科学家谈物理》丛书能对献身科学、立志攀登高峰、振兴中华、实现祖国四化的青少年朋友们的茁壮成长有所帮助。

1992 年 7 月 27 日

## 编者的话

科学技术的发展，改变着人们的意识，改变着国家的战略，更加速了世界各国综合国力的激烈竞争。

全球性科学技术的竞争，实质上是人才的竞争。我们的国家，学校每年在校人数逾两亿，他们都是 21 世纪的主人，这些人的文化科学素养，标志着国家未来的盛衰强弱，标志着我国在世界之林的竞争能力，尽多尽快地培养科技人才，是时代的当务之急。自 17 世纪以来，物理学一直为自然科学的领头学科，推动着各学科的发展，诱发出许多交叉分支学科和技术领域。物理学作为一门基础学科，又总是向人类智慧提出一些最深刻的挑战。因此，向青少年介绍一些现代物理前沿科学、物理学思想，将有利于青少年开阔眼界、诱发思维、启迪心智，有利于吸引和培养优秀的青少年从了解科学到热爱科学，早日选定自己的志向从而献身科学。有鉴于此，在 1991 年中国物理学会第五次全国会员代表大会期间，由中国物理学会和湖南教育出版社共同主持，正式成立了《科学家谈物理》编委会，讨论并制定了丛书宗旨、编写目的、编写原则和编写计划。

丛书内容包括物理学新知识博采、物理学新领域探奇、物理学重大发现觅踪、物理学佯谬的启示，著名物理学家成才轨迹等。作者将以严谨的科学内容、活泼的物理思想、通俗流畅的文字表述，为广大青少年提供一套优秀的科普读物。

经过四年的努力，作者和编者，殚精竭虑，丛书终于与广大读者见面了。本丛书的编辑出版，得到“国家杰出贡献科学家”钱学森的关怀和指导；中国科协主席、中国工程院院长朱光亚和国家教委副主任柳斌在百忙中为丛书作序；中国老一辈著名科学家、中国科学院院士严济慈、谢希德、王淦昌、

钱三强，中国科学院院长周光召，中国物理学会理事长、中国科学院院士冯端为丛书题词，寄托了他们对新一代科技人才成长的殷切希望；中国物理学会、中国科学院物理研究所给予了大力支持，中国物理学会副秘书长程义慧做了大量工作，在此一并表示衷心感谢。本丛书作者都是卓有成就的学者，对他们从繁忙的教学、科研和社会工作中挤出时间，花费大量精力，满腔热情来撰写这套科普读物的精神表示敬佩。

古今中外有不少的名人、专家、学者，就是因为在青少年时代受过一些优秀科普读物的熏陶、感染，从而早日选定了自己的志向，终生为之奋斗，终于功成名就，为后世留下可歌业迹。倘若读者能从这套丛书得到启示，在若干年后出现这样的成果，我们将感到无限欣慰。

《科学家谈物理》编委会

1992 年 9 月

《科学家谈物理》第三辑

粒子世界探秘

高崇寿 著

责任编辑：谭清莲

湖南教育出版社出版发行

湖南省新华书店经销 湖南省新华印刷二厂印刷

850×1168毫米 32开 印张：5 字数：100,000

1994年12月第1版 1996年12月第2次印刷

ISBN7—5355—2132—0/G·2127

定价：7.00元

本书若有印刷、装订错误，可向承印厂调换

## 第一章 走向原子世界

### §1 历月而莅原子世界

人类在探索自然奥秘时的一个重要方面是探索研究物质世界的微小结构。当把一把钢尺截成两把时，每一把钢尺仍表现出铁的性质，除了在数量上减少外，别的并没有什么不同。这样的分割原则上可以一直继续下去，问题在于是不是可以这样地无限分割下去，是不是分割到一定程度就不能再分了。中国古代有一句话：

一尺之椎，日取其半，历万世而不竭。

中国古代的这句话，包含着很丰富的数学上极限的思想，也反映对物质微小结构的认识。设想有一把一尺长的钢尺，每天截去一半，留下一半，3天后，只剩下八分之一尺长，再过3天，只剩下六十四分之一尺长。这样地截下去，钢尺一天天地截短，有没有完的时候？“历万世而不竭”就是说钢铁无论截到多么小的时候仍然是钢铁，所以可以无穷尽地一直截下去。然而，19世纪物性学和物理化学的研究发展表明物质的微观结构并不是物质的宏观结构的简单地缩小，各种物质都是由分子构成的，分子又是由一个或多个原子构成。分子的性质是物质物理性质和化学性质的基础。如果把单个分子再加以分割，物质的物理性质和化学性质就会明显地变化。钢尺是由铁原子所构成，当钢尺被截到只有一个铁原子长时就不能再截了，因为再截时就必须把铁原子打碎，也就不再是钢尺了。铁的密度是每立方厘米7.87克，原子量是55.85，可以估算出钢铁中相邻铁原子的距离平均为一百亿分之二点三米。一尺长的钢尺，日取其半地截了30天后，就只剩下一百亿分之三点一米长，这时就不能再截了。实际上，截了27天后，剩下的钢尺只有11个铁原子排起来长，已经难以保持钢铁原有的固体性质了。因此，从现代科学来看，“一尺之椎，日取其半”，不是“历万世而不竭”，而是“历月而莅原子世界”。



## § 2 原子和分子

事实上，“原子”这个名字本身就具有不可再分的含义。提出它的古希腊人德谟克利特 (Democritus) 认为物质是由一些不可再分的原子构成的，不同的物质是不同的原子组合而成的。虽然，这种观点当时遭到一些人如亚里士多德 (Aristotle) 的反对，但在今天看来，这种观点却是非常合理的。

我们知道，自然界的物质都是由分子构成的。不同分子的大小和结构很不相同。有的分子只由单个原子组成；而绝大多数分子是由多个原子组成的，并且组成它们的原子的数目和种类也是不同的。许多种物质的分子是由不同种元素的原子构成的，它们被称为化合物。

自然界已知存在着几千几百万种化合物，分别由各自的分子组成。在原子世界中来看，虽然这些化合物的分子千差万别，但它们都是由 111 种元素的原子结合而成。在这 111 种元素当中，最轻的元素是氢，化学符号为 H，它的原子序数为 1，原子量为 1.00794，是宇宙中含量最丰富的元素；最重的已经确定化学符号的元素则是符号为 Mt 的人造元素，它的原子序数为 109，原子量为 266.1378，它是不稳定的，半衰期为 3 微秒。1994 年 11 月发现了原子序数为 110，原子量约为 269 的元素，它也是不稳定的，半衰期约为几千分之一秒，其化学符号还未规定。一个月之后又发现了原子序数为 111，原子量约为 272 的元素，它也是不稳定的，半衰期约为千分之四秒，其化学符号也还未规定。

这 111 种元素原子的质量相差很大，但他们在固体状态下平均每个原子所占体积却相近。把某种固体物质的分子量用阿伏伽德罗常数去除，就得到以克为单位的每个分子的质量。再用以每立方厘米克为单位的这种物质的固体密度去除，就得到固体状态下这种物质每个分子所占的体积。我们可以这样来考察固体状态下各种元素每个原子所占的体积。原子世界的尺度是非常小的，常用埃作为长度的单位。例如，在常温下是固体的元素中，原子量最小的是锂，锂的原子量为 6.941，金属锂的密度很小，是每立方厘米 0.534 克，这样，金属锂中每个原子所占的体积相当于边长为 2.78 埃的立方体。铀原子量为 238.0289，是锂原子量的 34.3 倍，金属铀的密度很大，是每立方厘米 18.95 克，这样，金属铀中每个原子所占的体积和锂几乎相等，也相当于边长为 2.75 埃的立方体。取从锂到铀的 14 种常温下为固体的元素，按上面的方法计算固体中平均每个原子所占体积立方体的边长，结果列如下表。从表中可以看到，尽管各种元素的原子量不同，但其中每个原子所占体积的边长都在 2.00 埃到 3.12 埃之间。

---

元素	原子量	密度 (克\立方厘米)	立方体边长 (埃)
Li 锂	6.941	0.534	2.784
Be 铍	9.0122	1.848	2.008
C 石墨	12.011	2.265	2.065
Al 铝	26.9815	2.7	2.551
Si 硅	28.0855	2.33	2.715
Ti 钛	47.88	4.54	2.597
Fe 铁	55.847	7.87	2.276
Cu 铜	63.546	8.96	2.275
Ge 锗	72.61	5.323	2.829
Sn 锡	118.710	7.31	2.999
W 钨	183.84	19.3	2.510
Pt 铂	195.08	21.45	2.472
Pb 铅	207.19	11.35	3.118
U 铀	238.0289	18.95	2.753

阿伏伽德罗 (AmeIdeo Avogadro) 是意大利自然科学家, 曾提出著名的阿伏伽德罗定律, 即在同温同压的条件下, 具有相同体积的任何气体所含的分子数都相等。化学上以他的名字命名的阿伏伽德罗常数指的就是 1 摩尔物质所含的微观微粒数目, 它是一个普适常数, 给出了宏观世界和微观世界的联系。

### § 3 原子的有核结构

#### 原子的有核结构

物质在固体状态下平均每个原子所占体积相近的特点是与原子的结构有着密切的联系。一般说来，原子的直径大约是 1 埃；原子中心有一个带正电的原子核，原子核带的正电是单位正电荷的整数倍，这个整数就是这种原子的原子序数；在原子核的周围有原子序数个带负电的电子在围绕它运动；原子核很重，原子核外的电子的总质量只占原子质量的万分之二到万分之六；原子核的直径大约是十万分之几埃，而一个电子的直径则小于一亿分之一埃。如果把原子放大到一个足球场那样大，原子核就像一粒小米到黄豆那么大，而电子就比最细的土粉还要细。由此可见，原子内部的结构情况是很稀松的，物质粒子所占的空间只是原子所占空间的很小的一部分。

#### “ 布丁模型 ” 和 “ 行星模型 ”

然而，原子的这种类似太阳系的内部结构并不是一开始就被确立起来的。1897 年，英国物理学家汤姆生（Joseph John Thomson）通过演示在真空管放电时，阴极所发出的粒子可以被电场所偏转，从而确定了人类认识到的最早的几种粒子之一——电子的存在。

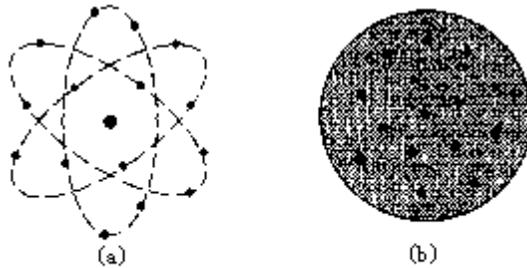


图1-1

(a) 卢瑟福的“行星模型”  
(b) 汤姆生的“布丁模型”

到了 20 世纪初，人们通过许多实验的结果已经认识到原子并不是不可再分的，在一定条件下原子会放出电子。因此，原子应当是由电子和与电子电量中和的带正电的部分构成的。当时汤姆生认为正电荷在原子中均匀分布，而电子则散布在其中，被称为原子结构的“布丁模型”（见图 1-1）。与此同时，来自新西兰的英国物理学家卢瑟福（Ernest Rutherford）利用  $\alpha$  粒子（氦的原子核，带两个单位正电荷，质量约为 4 个原子单位，即约为质子的 4 倍）去轰击金属箔做成的靶。 $\alpha$  粒子带正电，当它射入到原子内部时，由于与原子中带正电的部分和电子之间存在的库仑力的共同作用，会产生散射，使它在射出原子时方向偏离原来的入射方向。如果原子内部的正电荷像汤姆生所认为的那样是均匀地分布在原子内部的，那么通过计算可以证明，散射的角度，即  $\alpha$  粒子的出射方向与入射方向之间的夹角是很小的。若要达到  $1^\circ$  左右的偏转角度， $\alpha$  粒子在金属箔中前进时必须与金属原子碰撞许多次；而要达到  $90^\circ$  左右的散射角的几率几乎等于零。然而，卢瑟福的实验显示出  $\alpha$  粒子通过金属靶时的大角度的散射的几率远远大于汤姆生模型给出的结果，甚至存在有的  $\alpha$  粒子的散射角度达到了  $180^\circ$  左右（见图 1-2 所示的示

意图)，而这对于“布丁模型”来说几乎是不可能的。就好像高射炮的炮弹打中了蚊子后被弹回来了。据此，卢瑟福提出了原子结构的另外一个模型，“行星模型”（见图 1-1）。他认为原子核虽然包含了几乎全部的原

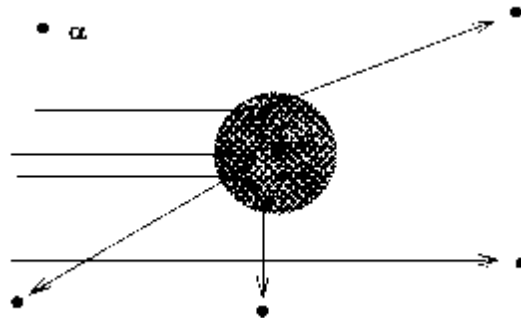


图1-2 卢瑟福  $\alpha$  粒子散射实验示意图

子质量，但它所占有的体积却是原子中很小的一部分；原子核处于原子的中心，而电子就像行星环绕太阳一样环绕带正电的原子核运动。“行星模型”的最重要的意义是揭示了原子内部的核式结构。在此基础上，逐渐发展成我们今天所熟知的原子结构的图象。

## 原子核

各种元素原子之间的不同首先表现在原子核的不同，从而决定在原子核的周围运动的电子数目也不同，但各种元素的原子所占的体积大体是相同的。原子核是由质子和中子组成，质子带一个单位正电荷，中子不带电。质子的质量大约是电子的 1836.15 倍，也是人们最早认识的粒子之一；中子的质量比质子略重，大约是电子的 1838.68 倍，是英国物理学家查德威克 (James Chadwick) 于 1932 年发现的。原子序数就是指原子核中质子的数目，原子量近似地是原子核中质子数和中子数之和。原子的化学性质主要由原子序数决定，质子数相同而中子数不同的原子是同一种化学元素的不同同位素，化学中测定的各种元素的原子量实际是该种元素的各种同位素原子量按其所占比例的平均值。

## 第二章 原子世界

### § 1 原子稳定性问题

从一个静止的原子来看，原子核很重，在中心基本不动。而电子则在原子核周围作有心运动。既然原子核中的质子带正电，而中子不带电，那么为什么这些带正电的质子不会因为彼此间的库仑排斥力而分散开来，从而导致原子核的破裂呢？原来，在质子和中子之间有很强的相互作用力，称为强相互作用。在两个质子和中子之间的强相互作用在距离为十万分之一埃或更近时很强，远比两个质子间的电磁相互作用要强几十倍。但当距离为一万分之一埃或更远时，强相互作用迅速减弱，减弱到和电磁相互作用相比微不足道、完全可以忽略的地步。质子和中子靠这种近距离很强的强相互作用结合成原子核，但原子核和核外电子之间主要是电磁相互作用，靠这种相互作用结合成原子。

原子核带正电，电子带负电。它们之间的电磁相互作用主要是库仑吸引力。库仑吸引力的大小与距离平方成反比，这种行为和万有引力相同。这自然启示我们原子的结构应该像一个微小的太阳系，原子核相当于原子世界中的一个太阳，电子相当于原子世界中的行星。太阳系中各行星在太阳的万有引力下沿着各自的椭圆轨道作稳定的周期运动，一般说来，行星的能量取的值可以在相当大的范围内从很小到连续地变化。这样原子也应该是电子环绕原子核作稳定的运动，电子的能量可以取的值也应该可以在相当大的范围内从小到连续地变化。然而电磁学告诉我们，带电粒子作变加速运动的时候，将不断地向外辐射能量。这样如果电子在原子核的库仑吸引力作用下，环绕原子核作椭圆运动，则将不断地辐射能量，能量不断地减少，最后势必掉到原子核上去，根本不可能成为稳定的系统。因此，原子中的电子并不是简单地绕原子核作椭圆轨道运动。

20 世纪初，物理学家探讨原子世界物质结构基本规律时，遇到了几个基本的原有的经典物理学理论不能解释的实验结果，这些问题都和原子结构的规律有关，这些问题的研究导致对原子世界物质运动基本规律认识的革命。

## § 2 黑体辐射疑难

### 黑体辐射

第一个问题是黑体辐射的规律。

物体加热到高温时，就会发光，随着温度的升高，发光的颜色也不断变化，开始时是红光，然后逐渐变黄、变绿、变蓝、变白。实际上物体表面总是在不断地吸收接收到的电磁辐射，同时又不断地向外发射电磁辐射。物体表面吸收电磁辐射的能力和发射电磁辐射的能力成正比，吸收能力最强的物体发射能力也最强。光是一种电磁波，热辐射也是一种电磁波，但它和光不同，它不能被直接看到。黑色的物体对各种颜色的光都不反射、都吸收，对热辐射也是都不反射、都吸收。电磁辐射包括的范围很广，波长长的是通常的无线电长波、中波、短波、超短波、微波，波长再短的是红外线，即热辐射，然后是可见光：红、橙、黄、绿、青、蓝、紫，接着又是不可见的紫外线，波长更短的是 X 射线，然后是伽玛射线（见图 2-1）。如果某物体对所有各种波长的电磁辐射都完全不反射、都完全吸收，就称为“绝对黑体”。绝对黑体是吸收电磁辐射能力最强的物体，也就是发射电磁辐射能力最强的物体。当然，实际存在的物体中没有一个是绝对黑体，有些黑色的物体看起来比较接近黑体，但和严格意义下的绝对黑体仍然有相当的距离。人们发现，如果有一个有小窗口的黑色内壁闭合空腔，一束电磁辐射从小窗口射进去后，就很难经过在腔内通过多次反射再穿过小窗口射出来。因此，这个闭合空腔的小窗就可以近似地看作是一个绝对黑体的表面。

### 紫外灾难

研究具有一定温度的黑体发射电磁辐射的规律，发射的电磁辐射包括的波长从很长到相当短的都有，辐射能量随辐射的频率形成一定的分布。如果黑体的温度很低，发射的电磁辐射主要是频率较低的，即波长较长的电磁辐射。如果黑体的温度较高，发射的电磁辐射主要是频率较高的，即波长较短的电磁辐射。1893 年德国物理学家维恩（Wilhelm Wien）发现辐射能量最大的频率值正比于黑体的绝对温度，并给出辐射能量对频率的分布公式，这个公式在大部分频率范围内都与实验符合得很好，只在频率很小时与实验符合得不好（见图 2-2）。既然黑体辐射讨论的是电磁波的发射问题，电磁学中已经知道，带电粒子或电流作简谐振动时就将辐射电磁波，黑体辐射问题就应该可以在电磁学的理论基础上讨论解决。1899 年，英国物理学家瑞利（Third Baron Rayleigh）和天体物理学家金斯（James Hopwood Jeans）在电动力学和统计物理学的基础上从理论上又普遍导出一个辐射能量对频率的分布公式。在这个公式中，当辐射的频率趋于无穷大时，辐射的能量是发散的。实际上，这个公式在频率小时与实验符合得很好，但在频率大时与实验严重不符合（见图 2-2），在这里，经典物理学理论碰到了严重的困难。由于频率很大的辐射处在紫外线波段，故而这个困难被称为“紫外灾难”。

19 世纪末，经典物理学体系已经在几乎所有方面都取得了巨大的成功。当时在许多科学家心中普遍存在着一种乐观的情绪，认为宏伟的科学大厦已经基本建立起来了，当然还有一些小问题没有解决，后辈的物理学家只要对

现有的理论进行一些小小的补充和修正就能够解决了。的确，那时经典物理学已经成为一套相当完美的体系，人们能够用它来解释大到天体运行，小到烧一壶开水等形形色色的物理现象。但是，正如英国物理学家开尔文（Lord Kelvin）所说的，在物理学晴朗的天空的远处，还存在着两朵“乌云”。其中一朵指的是迈克尔孙-莫雷实验，它的结果否定了“以太”的存在，最终导致了相对论的诞生，我们在本书的后面还会提到它；另一朵指的就是“紫外灾难”，它使物理学家们最终建立了量子力学。这两朵乌云的存在，正在开始动摇经典物理学的基础，从而引发物理学史上一场伟大的革命。

### 普朗克的量子假说

为了解决瑞利-金斯公式遇到的困难，1900年，德国物理学家普朗克（Max Planck）提出量子假说：频率为  $\nu$  电磁辐射的发射是按照最小能量单位  $h\nu$  的整数倍进行的。这里  $h$  是一个普适常数，称为普朗克常数。在这个假说的基础上，普朗克普遍导出一个新的辐射能量对频率的分布公式，这个公式在频率小时自动回到瑞利-金斯公式，在频率大时又自动回到维恩公式，对所有频率都与实验符合得很好（见图 2-2）。

这个假说太富于革命性了，在它刚被提出时，没有人

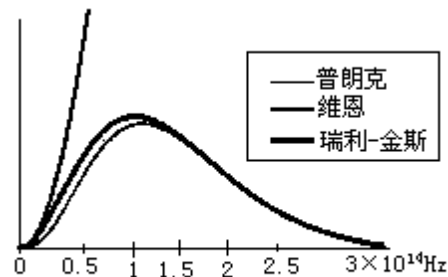


图2-2 黑体辐射频率分布

赞同它，甚至连普朗克本人都不喜欢它。的确，在经典物理学的思想里，能量是连续的，而在量子假说中，能量只能是一份一份地被发出来，这看上去是不可思议的。普朗克认为这个假说破坏了物理学的完美，实际上，他还曾经花费了 15 年的时光来试图找到一种能从经典物理学导出的方法来代替量子假说以解决科学家们在黑体辐射方面所遇到的困难。但是这个试探没有成功，只有采用量子假说，黑体辐射的理论才能与实验很好地符合。直到 5 年以后，瑞士美籍德国物理学家爱因斯坦（Albert Einstein）的努力才真正使人们注意到了量子假说所闪现的光芒。

### 普朗克常数

既然能量是量子化的，那么为什么我们平时观察到的能量的传递都是连续的呢？问题的关键在普朗克常数上面，它的数值是

$$h=6.6260755 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$$

这个数值实在是太小了，一般可见光的频率在  $10^{15}$  赫兹的数量级，也就是说可见光的光量子的能量大约在  $10^{-19}$  焦耳的数量级，这对于我们平时所接触到的宏观世界来说实在是微不足道的。就好像我们能望见一望无际的汪洋大海，却看不到海水里的水分子。同样，我们感觉不到量子的存在，除非

我们进入到了原子的尺度，从原子的角度来看待问题，量子效应就变得十分重要了。



### § 3 光电效应

第二个问题是光电效应的规律。

从 19 世纪末到 20 世纪初的几年中，物理学家发现一个重要的新现象，金属板在紫外线照射下会发射电子，这个现象称为光电效应，这样发射的电子称为光电子。经典物理学认为紫外线是波长很短的电磁波，金属板受到电磁波照射时，从电磁波中接收到能量，而这个能量的大小则取决于电磁波的强度。当金属板中电子接收到的能量超过电子从金属板中脱出来所需要的能量时，就会从金属板中脱出而表现为光电子。这样光电子的发射应该与入射光的频率没有直接关系，而光电子的能量则应该直接由光的强度所决定。按照这样的光电子产生机理，如果入射光的强度很弱，只要照射的时间足够长，电子吸收的能量也可以积累到足以从金属板中脱出而成为光电子。然而光电效应的实验显示出：对于确定的金属板，用频率低于某个阈频率的电磁波照射时，无论其强度多么大，无论照射的时间多么长，都不会产生光电子；但用频率高于该阈频率的电磁波照射时，不论电磁波的强度多么小，都会立即产生光电子，光电子的能量由电磁波的频率决定，光电流的强度正比于照射电磁波的强度。光电效应的这些实验规律性和经典物理学理论的预期完全不符。

1905 年，爱因斯坦发展了普朗克的量子理论，对光电效应的规律在量子理论的基础上给以解释。爱因斯坦认为，不仅电磁辐射的发射是按照最小能量单位的整数倍进行的，而且在电磁波的传播过程和被吸收时，也都是按照这个最小能量单位的整数倍进行的，这个电磁波的最小能量单位的实体就称为光量子。当电磁波照射到金属板上时，金属板上接收到的是大量光量子。如果电磁波的频率较低，一个光量子的能量小于电子从金属板中脱出所需要的能量时，电子吸收了一个光量子后也不能从金属板中脱出而表现为光电子，这样就没有光电流出现。如果电磁波的频率较高，一个光量子的能量大于电子从金属板中脱出所需要的能量时，电子吸收了一个光量子后就能从金属板中脱出而表现为光电子，这样就有光电流出现。当然，在这时入射电磁波的频率越高，光电子的能量越大；入射电磁波的强度越大，光电流的强度也越大，爱因斯坦关于光电效应的光量子理论很好地解释了光电效应的实验规律。

按照经典物理学的观念，带电物体和电流的周围空间中充满了电磁场，在空间每一点都有一定的电场强度和一定的磁场强度。如果有一个带电粒子作简谐振动，就将造成周围的电场强度和磁场强度周期性地变化，这种电磁场的周期性变化传播出去，就是辐射电磁波，通过电磁波把能量传出去。简谐振动的频率就是辐射电磁波的频率，简谐振动的振幅大小决定辐射电磁波的强弱。如果发射电磁波的带电粒子的振动减弱，电磁波的强度也就随之减弱，通过电磁波传送出去的能量也就减少，原则上可以连续地减弱到零。按照普朗克和爱因斯坦的量子理论，电磁波不仅仅是电磁场周期性变化的传播，而且电磁波的发射、传播和吸收的能量都是不连续的，它有一个最小单元，称为光量子，电磁波的发射和吸收都是按光量子为单位来进行的。电磁波有双重属性：电磁波是波动，具有波长、频率、位相传播速度等属性，同时电磁波由光量子组成，光量子是微粒，具有动量、能量、速度等属性，电磁波的这两方面的属性是紧密联系的。

## § 4 氢原子光谱

第三个问题是氢原子光谱的规律。

不同颜色的光之间的差别是它们的频率不同，可见光的频率从小到大是红、橙、黄、绿、青、蓝、紫，白光则是这七种颜色光的混合，光谱就是指光的强度按频率的分布情况。用各种不同元素的蒸汽充实制作的光源发出的是该种元素的特征光线，各种元素发的光线并不相同，钠光是黄色的，汞光则是青白色的，各种元素的光谱是识别该元素的特征。各种元素的光谱都不是连续光谱而是分立的线光谱，到 1885 年时人们已经在可见光和近紫外光谱区观察到了氢原子的 14 条光谱线，波长最长的一条是红线，以后各条谱线的强度和谱线间的间隔都随频率的增加而递减，其中可见光的范围内有四条。

1884~1885 年，瑞士巴塞尔女子中学教师兼巴塞尔大学讲师巴耳末 (Johann Jakob Balmer) 提出了氢原子光谱波长的经验公式

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{4}{B} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

公式中只有一个经验参数  $B=3645.6$  埃，参数  $n=3, 4, 5, 6, \dots$ ，就精确地给出了氢原子光谱各谱线的波长值，这个光谱线系后来称为巴耳末系 (见图 2-3)。1889 年瑞典物理学家里德伯 (Johannes Robert Rydberg) 给出了一个氢原子光谱各谱线波长普遍的公式

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

这个公式中仍只有一个经验常数  $R_H=4/B$ ，但出现两个正整数参数  $m$  和  $n$ ，其中  $n$  要大于  $m$ 。 $m=2$  的光谱线就是位于从可见光到紫外线区域的巴耳末系光谱线； $m=1$  的光谱线位于紫外线区，1914 年由赖曼 (Theodore Lyman) 所发现，称为赖曼系； $m=3$  的光谱线位于红外线区，1908 年由帕邢 (Friedrich Paschen) 所发现，称为帕邢系； $m=4$  的光谱线位于近红外区，称为布喇开 (F. Brackett) 系 (见图 2-3)； $m=5$  的光谱线位于远红外区，称为芬德 (H.A. Pfund) 系； $m=6$  的光谱线位于远红外区，称为汉弗莱 (C.S. Humphreys) 系。里德伯公式普遍概括了氢原子光谱线的分布，它给出氢原子光谱的任何一条谱线的波数都是两个“光谱项”之差，光谱项等于里德伯常数被一个正

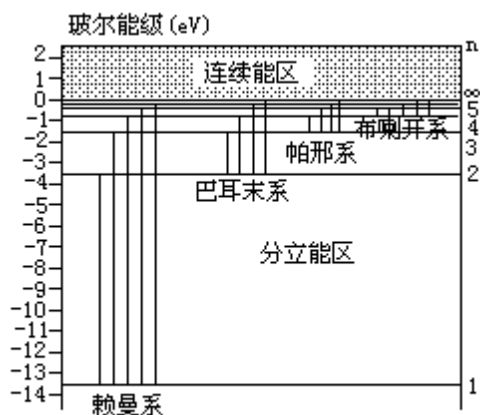


图2-3 氢原子光谱线系

整数的平方去除，而各光谱项的差别仅在于正整数所取的值不同，这个普遍的经验公式为探索氢原子结构提供了启示和基础。

按经典物理学的观念，电荷或电流的振荡就会发射电磁波。实验显示所有的原子光谱都是线光谱，这表明原子内部电荷应该可以作相应频率的振荡。在可以产生振荡的力学系统中，除了有基本频率的振荡外，常常还可以发生倍频振荡。然而在各种元素的原子光谱中，尽管有很强的规律性，但并没有观察到倍频光谱线。这表明在经典物理学的基础上很难理解原子光谱显示的规律性。

## § 5 氢原子结构的玻尔模型

1913年，丹麦物理学家玻尔（Niels Henrik David Bohr）提出一个氢原子模型理论，认为氢原子的原子核是一个质子，原子核带正电，原子核外有一个电子，带负电，它们之间的电磁相互作用主要是与距离平方成反比的库仑吸引力。玻尔提出，电子环绕原子核运动时，只有满足一定条件时，运动才是稳定的。这个稳定性条件称为量子化条件，量子化条件要求电子环绕原子核运动时的角动量不能取任意值，只能取约化普朗克常数的整数倍。约化普朗克常数是普朗克常数  $h$  被  $2\pi$  除，用符号  $\hbar$  代表。在许多理论中，大量出现的是约化普朗克常数，有时也把它简称为普朗克常数。量子化条件的要求相应地导致稳定氢原子的能量可取值也不能在一定的范围内从小到大连续地变化，而只能是某些特定的分立值。按照这个模型，稳定状态的氢原子的能量是负的，并且其值与某一正整数的平方成反比，这个正整数称为主量子数。

玻尔提出，当氢原子从一个能量高的稳定状态变到能量较低的稳定状态时，多余的能量就要以电磁辐射的形式放出，表现为一个有确定能量的光量子。在玻尔的理论中，除了量子论中新引进的普朗克常数外，没有引进任何新的常数。按照玻尔的氢原子模型理论，严格地、精确地导出了普遍描述氢原子光谱的里德伯公式。

玻尔的氢原子模型理论是人们认识原子世界的重大的一步，是一个里程碑。再经过 15 年，物理学家们对原子世界物质运动的基本规律有了崭新的认识，建立了量子力学。

## § 6 量子力学的建立

### 物质粒子的双重属性和量子力学的建立

1924年，法国物理学家德布罗意（Louis Victor deBroglie）提出在原子世界中不仅电磁波有双重属性，既是波动，又是微粒，而且所有的物质粒子也都普遍有双重属性，既是波动，又是微粒。例如电子，人们熟知它是微小的带电微粒，但它又有波动性质。在电子运动传播时，既表现为一个个电子的运动传播，又表现为某种“电子波”的运动传播，可以表现出波的干涉、衍射等现象和特征。正因为物质粒子的这种基本性质，不仅是光量子，一切物质粒子都只能一个个地被发射和吸收，同时一切物质粒子运动时又都遵循波动运动传播的基本规律。德布罗意提出具有能量  $E$  和动量  $P$  的物质粒子又表现为频率  $\nu$  和波长  $\lambda$  的波动，它们之间由普遍公式

$$E=h\nu, P=h\lambda,$$

所联系。1927年，美国物理学家戴维孙（Clinton Joseph Davisson）、革末（Lester Helbert Germer）用电子束投射到镍单晶上，结果观察到和X射线照射同样的衍射现象。英国物理学家汤姆生（George Paget Thomson）通过快速电子穿过薄金属片，也观察到了衍射图样。他们的实验证实了德布罗意的假设。

1925年，德国物理学家海森伯（Werner Karl Heisenberg）提出了矩阵力学，1926年，奥地利物理学家薛定谔（Erwin Schroedinger）提出波动力学，并且证明矩阵力学和波动力学是等价的，它们是微观世界物质粒子运动的基本规律，量子力学的不同表述。从1924年到1926年，物理学经历了一场巨大的变革，物理学家们认识到微观物质粒子运动的力学规律不再是以牛顿三定律为基础的经典力学，而是反映物质粒子双重属性的量子力学。

物质粒子的双重属性使其运动行为和过去通常的了解很不相同。如果有一个电子，以一个确定的动量运动。按经典力学的了解，粒子将会沿一个直线轨道做匀速直线运动，并且在任一时刻粒子位置在哪里都是完全确定的。但是电子的双重属性表现为，当电子以一个确定的动量运动时，也表现为一个确定波长的电子波沿动量方向传播。然而具有确定波长的波动是一个无穷长平面波描写的电子，但在任一时刻粒子的位置在哪里却是完全不确定的。物质粒子的双重属性的一个重要表现是物质粒子的动量的不确定度  $\Delta P$  和位置不确定度  $\Delta x$  之间满足关系式

$$\Delta P \cdot \Delta x > \frac{h}{4\pi}$$

因此物质粒子不可能同时具有确定的动量和确定的位置，物质粒子的动量越确定，位置就越不确定。这个关系式称为不确定关系，反映了原子世界物质粒子的普遍基本特性。

### 粒子的全同性

原子世界物质粒子的另一个基本特性是粒子的全同性。粒子的全同性就是指同一种粒子是完全相同的，不可区分的。考虑两个电子，它们都是带一个单位的负电荷，具有相同的质量。在开始时给这两个电子编号为一和二，

如果电子运动有特定的轨道，就可以随着时间的变化沿着电子的轨道追踪，始终能辨认得出第一号电子和第二号电子。但是由于不确定关系，不能沿着电子的运动轨道追踪和辨认电子。如果两个电子有微小的差别，比如第一个电子的质量略重一些，就可以用这个微小差别来区分和辨认两个电子。所有的电子都是完全相同的，如果发现有一个电子的质量比别的电子确定地重一些，可以用质量把它和其他电子区分开，则这个重一些的电子实际上并不是电子，而应该是某种新粒子。物质粒子的全同性还决定了，当几个全同粒子在一起运动时，可以存在的运动状态只能是能体现物质粒子全同性的状态，不符合这要求的运动状态根本不能存在。

原子世界物质粒子体系的运动状态用状态函数描写，能体现物质粒子全同性的状态有两大类。一类是完全对称状态，这时任意两个全同粒子互相交换就导致整个状态函数不变，1924年印度物理学家玻色（Satyendranath Bose）首先研究了这类粒子的统计物理规律。还有一类是完全反对称状态，这时任意两个全同粒子互相交换就导致整个状态函数变符号，正变负，负变正，1926年美籍意大利物理学家费米（Enrico Fermi）首先研究了这类粒子的统计物理规律。

所有的粒子都可以有自旋，量子力学给出普遍要求，粒子的自旋角动量可以用一个称为自旋量子数的量  $s$  来标志， $s$  的值可以取  $0, 1/2, 1, 3/2, 2, \dots$ 。它的物理意义在于以约化普朗克常数为单位来表述自旋角动量时，自旋角动量数值的平方等于  $s(s+1)$  乘约化普朗克常数的平方，自旋角动量沿某一特定方向投影的可取值为  $s, s-1, \dots, -s+1, -s$  乘约化普朗克常数，共  $2s+1$  个值。各种粒子按自旋角动量的性质分成两大类：自旋量子数  $s=0, 1, 2, \dots$  的全同粒子运动状态是完全对称状态，这类粒子称为玻色子；自旋量子数  $s=1/2, 3/2, 5/2, \dots$  的全同粒子运动状态是完全反对称状态，这类粒子称为费米子。光子的自旋量子数  $s=1$ ，是玻色子，电子、质子、中子的自旋量子数  $s=1/2$ ，都是费米子。

## § 7 电子的壳层结构

1925 年美籍奥地利物理学家泡利 (Wolfgang Ernst Pauli) 提出电子的不相容原理：一个多电子系统中，不能有两个或两个以上电子具有相同的单粒子运动状态。按照这个不相容原理，在同一个原子中的两个电子不可能同时具有相同的轨道量子数、角动量量子数和自旋量子数。这个原理是对费米子普遍适用的，后来被称为泡利不相容原理。

量子力学建立后，物理学家们将玻尔提出的原子模型理论建立到严格的量子力学基础上，认为原子中心是一个很重的带正电的原子核，原子核外有一些带负电的电子运动，它们之间主要是库仑吸引力。电子环绕原子核运动时，只有满足一定条件时，运动才是稳定的，相应地电子的能量可取的值也只能是某些特定的分立值，称为能级。按照这个模型，原子各能级的能量是负的，并且其数值与主量子数  $n$  的平方成反比，同一主量子数的  $2n^2$  个运动状态属于同一能级。

氢原子的原子核外有一个电子，能量最低时电子在  $n=1$  能级。氦原子的原子核外有两个电子，能量最低时两个电子都在  $n=1$  能级。锂原子的原子核外有 3 个电子，能量最低时两个电子在  $n=1$  能级，这个能级的运动状态都已各有一个电子，根据泡利不相容原理，不能再容纳电子，再有一个电子在  $n=2$  能级。铍原子的原子核外有 4 个电子，能量最低时 2 个电子在  $n=1$  能级，这个能级的运动状态都已填满，再有两个电子都在  $n=2$  能级。这样随着原子序数的加大，原子核外的电子数逐渐增多，能量最低时电子按主量子数从小到大分层排列。只是当原子序数大时，核外电子数比较多了，电子之间还有库仑排斥力的作用，造成同一主量子数的各运动状态的能量随电子运动的轨道角动量不同而能量也有所不同。量子力学给出，电子运动的轨道角动量平方的可取值是约化普朗克常数平方的  $l(l+1)$  倍，这里  $l$  称为轨道量子数，可取值是零或正整数，同一轨道量子数  $l$  下，轨道角动量沿某一特定方向投影的可取值为  $l, l-1, \dots, -l+1, -l$  倍约化普朗克常数，共有  $2l+1$  个不同的运动状态。由于电子是自旋量子数为  $1/2$  的粒子，自旋角动量沿某特定方向的投影可以有两个不同的取值。同一轨道量子数  $l$  下共可以有  $4l+2$  个不同的运动状态。在原子中电子所处运动状态的主量子数给定下，轨道量子数只能比主量子数小，这时同一个能级分裂成几个能级，轨道量子数越大的能级越高。考察原子序数大的原子，原子核外的电子分层地分布在原子核的周围运动，能量最低时，电子首先进入能量最低的运动状态，按照能级的高低形成按主量子数和轨道量子数从低到高填充分布。原子结构的电子分层分布，是决定各种元素的原子化学性质的物理基础，是元素化学性质周期律的物理基础。

## § 8 元素周期律的物理基础

到了 19 世纪，人们已经知道，物质是由不同的元素构成的。在每一种元素被发现的同时，它的原子量也被尽量精确地测定。随着被发现的元素的增多，科学家们也越来越感到迷惑，因为每一种元素的化学性质都不相同，于是他们就开始逐渐寻找这些元素之间的联系。19 世纪 60 年代，俄国化学家门捷列夫(Dmitry Ivanovich Mendeleev)和德国化学家迈耶(Julius Lothar Meyer)在前人工作的基础上发现，尽管当时已发现的元素已经有几十种，但是它们的化学性质并不是杂乱无章的，而是可以找到一定的规律的，比如最轻的金属锂的化学性质就与食盐中所含的一种元素钠的化学性质相仿。他们总结了这种规律性，而且将当时已经发现的每一个元素按照这种规律性排列成了一个表格，这就是著名的化学元素周期表。门捷列夫的这个表基本是按照原子量的顺序排成的，具有类似的性质的元素被排在了同一组。当某一个元素的性质并不符合它按照顺序应当符合的一组时，他就在这个元素之前留出一个空位，并且宣布这个空位所在的地方必定被某一个还未被发现的新元素占据着，这个元素将来一定会被发现，同时他还根据这张表预言了这些元素的性质。后来，门捷列夫所预言的三个待发现的元素镓、钪、锗都很快就被发现了，并且它们的性质也证实了门捷列夫的预言。随着时间的推移，元素周期表中空缺的位置被一个一个地填充，迄今为止，表中的元素已经增加到了 111 种。

量子力学的建立使人们对化学元素周期表有了本质的认识。由于原子核外的电子按泡利不相容原理，依次按能量由低到高占据不同的轨道，而每当具有某一量子数的轨道全部被占满，而余下的电子则开始占据具有更高量子数的轨道，在最外层具有相同电子数目的元素就会表现出类似的性质。比如镁的第一、二层( $n=1, 2$ )已被电子填满，第三层( $n=3$ )只有两个电子，即所谓的“价电子”，而钙的第一、二层( $n=1, 2$ )已被填满，第三层( $n=3$ )也已被填入 8 个电子，属于部分地填满了，第四层( $n=4$ )有 2 个电子，由于结构的相似，这两种金属就表现出了相似的化学性质，都是正二价的碱土金属。于是，由于原子物理学的发展人们已经能够从本质上理解门捷列夫的周期表了。

原子光谱的研究对原子的能级结构分布给出丰富的信息，它显示电子还要有自旋角动量，是自旋量子数为  $1/2$  的费米子，同时还显示出电子还要有与自旋角动量成正比的自旋磁矩。量子力学普遍给出，带电粒子做轨道运动时，将要有与轨道角动量成正比的轨道磁矩，比例系数应是该带电粒子电荷与质量之比的一半。实验显示，电子自旋磁矩与自旋角动量的比例系数则是电子电荷与质量之比，即是轨道运动时的 2 倍。电子自旋磁矩的这个性质显得“反常”，但却是实验显示的结果。

原子核外的电子在广阔的天地中非常活跃地运动。如果测量这些电子的运动速度，就会发现它们的平均速度至少达到每秒 2188 公里。不同元素的原子核外的电子数目不同，它们都在大体差不多的区域内运动。原子内部的结构虽然是很稀松的，但是原子相互之间还是有很强的不可入性，很难把两个原子压缩使它们重叠起来。当两个原子结合成一个分子时，只在两个原子的边界区有少量的重叠。



## §9 真空光速疑难

前面说过，19 世纪末 20 世纪初，物理学晴朗的天空中飘着两朵乌云，一朵是前面已经提到的“紫外灾难”，另一朵指的就是迈克尔孙-莫雷实验的结果，与当时物理学家们的期望相反，它否定了“以太”的存在，同“紫外灾难”一起，猛烈地摇撼着经典物理学大厦的地基。

### 伽利略变换

我们知道在牛顿的经典力学体系中，一切物理规律在相互作用无加速运动的参考系中都是相同的。空间任何一个质点在两个相互作用匀速直线运动的参考系中的坐标是有一定联系的。假设参考系  $S'$  相对于参考系  $S$  的  $x$  轴的正方向以速度  $v$  作匀速直线运动，如图 2-4 所示；并且，我们在两个坐标系中使用同样的计时系统，即  $t'=t$ 。在经典物理学的思想里，时间是绝对的，也就是说，时间的度量可以和参考系的选择无关。因此，这个关于时间的假定也是完全合理的。这时，如果观察一个质点的运动，那么对于此质点在参考系  $S$  和  $S'$  中的坐标，我们能够得到变换关系式

$$\begin{aligned}x &= x' + vt', \\y &= y', \\z &= z', \\t &= t',\end{aligned}$$

这个变换关系式被称为伽利略 (Galileo Galilei) 变换。从这个关系式我们还可以得到该质点速度的变换式

$$\begin{aligned}v_x &= v'_x + v, \\v_y &= v'_y, \\v_z &= v'_z,\end{aligned}$$

在能够用伽利略变换联系起来的参考系中，物理规律的形式是不变的。

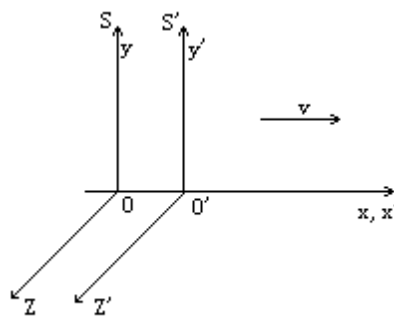


图2-4 参考系  $S'$  和参考系  $S$

### “以太”

很久以来，光的微粒说与波动说展开了旷日持久的论战。到了 19 世纪末，波动说已完全占了上风，这要归功于英国物理学家麦克斯韦 (James Clerk Maxwell) 的卓越贡献，他把经典物理学中的电磁理论发展到了近乎完美的程度，并预言了无线电波的存在。既然光是一种电磁波，那么它显然应当是一种波动。至此，波动说似乎已经取得了决定性的胜利。但坚持光的波动说的

人们面临着一个难题，光传播时所依靠的媒质究竟是什么。我们知道，任何形式的波动都是要依赖于某种媒质而传播的。例如，声波的传送就是依靠空气进行的。然而，光波的传送似乎是不依赖于什么物质，在几百万光年、几千万光年，甚至几亿光年之外的恒星所发出的光能够安安全全地抵达地球，而光波所穿过的宇宙空间实在是十分空的，甚至平均 1 立方米不到一个原子，这么稀薄的空间中的物质怎么能够用来转播光线呢？因此，物理学家们假设，有一种物质，它的存在我们至今没有证明，它就是光的传播所依赖的物质，这种物质被命名为“以太”。“以太”所在的参考系是绝对静止的惯性系。根据“以太”的存在所必须肩负的一系列的使命，科学家们总结了“以太”所应具有的一些特殊性质，例如，由于光是横波，“以太”必须是固体，而且强度必须非常大，密度极小，充满在所有物质中，并且与任何物质之间的摩擦力都几乎是零，等等。能够同时具有这些特征的物质简直太不可思议了，然而，没有“以太”的存在，光的传播问题就无法得到合理的解释。于是，物理学家们便投入了极大的热情、做了许多的实验去寻找这个传奇般的物质——“以太”。

### 迈克尔孙-莫雷实验

由于地球在太阳系中环绕太阳在公转，并且地球还有自转，地面参考系相对于“以太”显然有运动。光在“以太”中以光速传播，这样地面参考系相对于“以太”的速度就应该可以在地面的实验中察觉出来。为了测量地面参考系相对于“以太”的运动速度，1897年，美国物理学家迈克尔孙（Albert Abraham Michelson）和化学家莫雷（Edward Williams Morley）设计了一个实验。由于光是一种波动，所以光也具有干涉现象。它们利用迈克尔孙干涉仪中的一个半透明半反射的平面镜将一束单色光分解成两束并经过两段结构相似但方向垂直的光路，如图 2-5 所示。这样，当这两列光波存在一定的位相差时，就会发生干涉。假设地球相对于“以太”以一定的速度运动，那么，当整个迈克尔孙干涉仪沿着水平面转动一定角度时，这两列波的位相差就会随着发生变化，这样干涉条纹也就会随之产生一定的位移。他们将整个仪器放在浸泡在水银中的一块大石板上，从而避免了由于仪器在转动时发生的畸变对实验造成的影响。同时通过增加光的反射次数使得条纹的观察变得比较容易。他们根据伽利略变换对这个实验的结果进行了估计，尽管估计出的位移是很小的，但却是能够测量的。然而，实验的结果却显示，无论干涉仪旋转到什么角度，干涉条纹都不会发生变化。换句话说，光的速度是不依赖于参考系的，同时，“以太”的存在也成了一个问题。在此之后，许多人又反复重复了这个实验，得到的结果仍然同迈克尔孙和莫雷得到的一样。直到后来，爱因斯坦建立了相对论，物理学家们通过大量的实践，终于认识到“以太”是不存在的，从此“以太”便退出了历史的舞台。

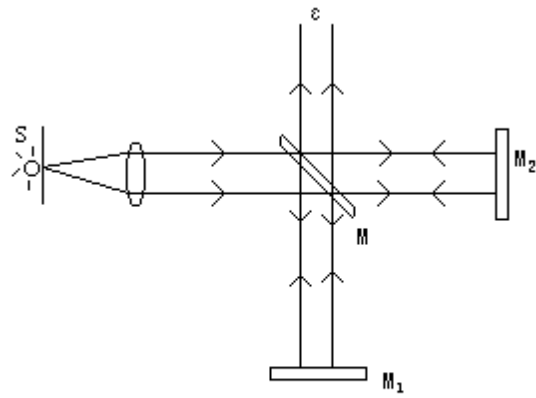


图2-5 迈克尔孙-莫雷实验的示意图  
 其中，S为光源，M为半透半反  
 射平面镜， $M_1$ 和 $M_2$ 为反射镜，  
 E处为接收(观察)器

## § 10 狭义相对论

为了解释迈克尔孙-莫雷实验的否定性结果，爱因斯坦于 1905 年发表了一篇题目为《论运动物体的电动力学》的论文。在文中爱因斯坦做了两个假设：一个是相对性假设，他认为在一切相互作用匀速直线运动的参考系中，物理规律都相同；另一个假设就是真空光速恒定假设，他认为真空中光的传播速度与光源的运动无关。基于这样两条假设，爱因斯坦创立了狭义相对论。对于第二条假设当时有许多人并不赞同，但是在随后进行的大量实验结果，都证实了这个假设的正确性。同时，由于真空中的光速具有不变性，它也就成为自然界的基本常数之一。最新确定的真空中的光速为

$$c=299792458\text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

在狭义相对论中，不再使用伽利略变换，而是利用荷兰物理学家洛仑兹 (Hendrik Antoon Lorentz) 提出的更普遍的变换，即洛仑兹变换，实际上，伽利略变换就是洛仑兹变换在低速情形时的极限。为了简单起见，同样假设参考系  $S'$  相对于参考系  $S$  的  $x$  轴的正方向以速度  $v$  作匀速直线运动，并且假设两个坐标系的三个坐标轴的方向都相同，如图 2 - 4 所示；而且当  $t'=0$  时两个参考系的坐标原点重合，这时  $t=0$ 。这样在时刻  $t=0$  时，从  $S$  参考系和  $S'$  参考系共同的坐标原点发出的球面光波的波前在  $S$  参考系中满足方程

$$c^2t^2 - (x^2+y^2+z^2) = 0;$$

同样，这个波前在  $S'$  参考系中满足方程

$$c^2t'^2 - (x'^2+y'^2+z'^2) = 0. *$$

由此，我们可以导出

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

这就是洛仑兹变换。它的逆变换是

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$y = y',$$

$$z = z',$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

这就是狭义相对论所依赖的基本关系式。

理论物理学曾研究两个相对做匀速直线运动的参考系之间的坐标变换关系的普遍形式。如果不假定时间是绝对的，但是假定时间是单向的、均匀的，空间是均匀的、各向同性的，则可以推导出两个相对做匀速直线运动的参考系之间的坐标变换关系的普遍形式就是洛仑兹变换，只是其中出现的参数  $c$  是一个量纲为速度的普适常数。它的物理意义是一切物体运动的极限速度，任何一个物体在任何参考系中的运动速度都不能超过  $c$ 。如果一个运动物体在一个参考系中的运动速度为  $c$ ，则它在相对于这个参考系做匀速直线运动的任意参考系中的速度都是  $c$ 。如果这个极限速度趋于无穷大，洛仑兹变换就还原到伽利略变换。由此可见，洛仑兹变换是更普遍的变换，伽利略变换只是它的一个特殊情形。狭义相对论中的真空光速恒定假设实际上就是确认了真空光速就是洛仑兹变换中的极限速度。

## § 11 时间和空间的相对性

狭义相对论最重要的思想就是否定了时间和空间的绝对性。在狭义相对论的理论中，只有真空中的光速是不变的，事件的因果关系是绝对的。爱因斯坦放弃了经典物理学中绝对时间和绝对空间的概念，建立了一套全新的时空观，认为时间和空间是紧密相连的，统一称之为“时空”。并且由此可以引出同时的相对性、运动物体沿运动方向的长度收缩和运动时钟延缓等现象。这些现象虽然在我们的日常生活中是很难被观察到的，但是在现代物理学和天文学的研究中却起着极为重要的作用。

### 同时的相对性

由于时间的相对性，“同时”的概念也就具有了相对性。在一个参考系中的不同地点同时发生的两个事件，在另外一个相对于它运动的参考系中观察却是先后发生的。这是怎么发生的呢？当人们说两个事件是同时发生的，必定是指他们通过某种方式“观察”到了两个事件的同时发生，也就是说，当他们处于两个事件的中点时，或者是他们听到了两个事件发出的声音，或者是他们看到了两个事件发出的光线。假如有一个很长的火车站，有一个观察者站在站台中点进行观察，在站台两端各用闪光灯闪了一下，如果观察者同时接收到这两个闪光信号，则这个观察者必然作出结论说这两个闪光是同时发生的。但如果在这个过程中有一列高速火车开过站台，在火车上中点处也有一个观察者，他就将先接收到迎面来的信号，后接收到从车尾方向追过来的信号，他就会作出结论说这两个闪光不是同时的，车头方向的闪光先闪。这样，同时性就不再具有绝对的含义了，它是与参考系的选择有关的。一般说来，如果在不同时间、不同空间位置发生的两个事件 A 和 B，在一个参考系中观察是同时发生的，在另一个参考系中观察就可能是 A 先于 B 发生，再换一个参考系中观察又可能是 B 先于 A 发生。时间是否同时，先后次序都是相对的了，这就是时间的相对性，同时的相对性。

### 因果关系的绝对性

如果两个事件 A 和 B 之间是可以有因果关系的，事件 A 和 B 之间一定可以通过小于或等于真空光速的信号联系起来，这时事件 A 和 B 的时间顺序就是绝对的了。在任何参考系中来看，都是“因”在前，“果”在后，不会因果时间顺序互换，不会在某个参考系中就“倒因为果”，这就是因果关系的绝对性。

### 四维时空间隔

如果有两个事件 A 和 B，在某个参考系中进行观察，把它们空间距离的平方减去时间间隔的平方乘真空光速的平方称为这两个事件的四维时空间隔的平方。这个量的值是不随参考系的选择而变的，反映了事件 A 和 B 的联系。如果四维时空间隔的平方大于零，则称间隔是类空的，这反映事件 A 和 B 之间不会有因果联系。如果四维时空间隔的平方小于零，则称间隔是类时的，

这反映事件 A 和 B 之间可以有因果联系。如果四维时空间隔的平方等于零，则称间隔是类光的，这反映事件 A 和 B 之间可以有通过真空光速传播的信号的因果联系。同时的相对性发生在类空间隔的事件之间，因果关系的绝对性出现在类时间隔和类光间隔的事件之间。

### 运动方向上的长度收缩

运动物体沿运动方向的长度收缩是由狭义相对论可以导出的一个重要的现象。假如有一把尺沿着 x 轴放置，在相对于它静止的 S 参考系中长度是  $L_0$ ，称为自然长度或原长，那么在相对于它运动的 S' 参考系中观察它有多长呢？在 S 参考系中有

$$L_0 = x_2 - x_1,$$

在 S' 参考系中有

$$L = x'_2 - x'_1,$$

由洛伦兹变换关系式，并考虑  $t'_1 = t'_2$ ，有

$$L_0 = x_2 - x_1 = \gamma (x'_2 - x'_1) = \gamma L,$$

其中

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

由此得出

$L = L_0 / \gamma$ 。由于  $\gamma$  总是大于 1，上式说明在运动的参考系中观察，在参考系的运动方向上长度收缩了。

### 运动时钟的延缓

运动时钟的延缓是由狭义相对论导出的另一个重要的现象。假设使用相对于 S 参考系静止的时钟测量一段时间间隔，且测量结果为  $t_0$ ，称为原时，则有

$$t_0 = t_2 - t_1,$$

同样，如果使用相对于这个时钟运动的 S' 参考系中的时钟来测量这段时间间隔，并且考虑到  $x_1 = x_2$ ，则有

$$t_0 = \gamma (t'_2 - t'_1) = \gamma t_0.$$

所以，总是能够得到  $\gamma > 1$  的结果。也就是说当我们在某个参考系中去观察另一个参考系中的事件过程所用的时间总是大于在那个参考系中测到的时间  $t_0$ ，这就说明，物体在运动中的物理过程的节奏会变慢。这个性质在高能物理的研究中起着很大的作用，因为，许多粒子的寿命都是非常短的，这是观测中的一大障碍，但是，当粒子以接近光速的速度相对于观察者运动时，在观察者看来，它们的寿命就会大大地“延长”，从而达到可以观测的程度。

有一种介子称为 K-介子，是一种不稳定的粒子，静止时的平均寿命是 12.371 纳秒，这样当 K-介子产生后，经过 12.371 纳秒，就衰变到只剩下原

来数量的 36.79%了。如果想要用这种 K-介子再去碰撞别的粒子以产生反应，就需要让 K-介子在产生后飞出一段距离去碰别的粒子。如果这段距离取作 5 米，按 K-介子以接近光速运动估计，不考虑时钟延缓的效应，经过 5 米后，大部分的 K-介子将衰变掉，将只剩下原来数量的 26.00%的 K-介子可以用于碰撞了，这当然是效率很低的了。然而由于相对论的时钟延缓效应，情况要有利得多。如果 K-介子产生时获得动量为  $2.0\text{GeV}/c$ ，考虑到 K-介子的质量为  $0.493677\text{GeV}/c^2$ ，可以推算出经过 5 米后，K-介子将只衰变掉很小的一部分，还剩下原来数量的 71.69%的 K-介子可以用于碰撞，这当然是效率很高的了，这高效率的来由是“相对论时钟延缓”。

由运动时钟延缓，曾经有一个关于“双生子佯谬”的有趣争论。有人问，如果对于一个观察者运动的物体的内部物理节奏都会变慢，那么，假设有一对双生子，具有一样的年龄，它们中的一个登上了宇宙飞船，以很高的速度到宇宙中去遨游，而另外一个则留在了地球上。这时对于这两个双生子来说，每一个人都看到另一个人以很高的速度离自己而去，并且对方的生理节奏都放慢了，过了一段时光，乘宇宙飞船的那一个返回了地球，这时，根据狭义相对论，好像每个人都应该觉得对方年轻了。当然，这是不可能的。实际上，那个进行旅行的双生子确实由于相对论效应而变得年轻了。他曾经通过相对惯性系作加速运动达到旅行的速度，然后逐渐减速到停止，再反向加速，再旅行，再减速，最后回到地球，于是，经过这样一个复杂的过程，他就比他的同胞兄弟年轻了一些。



## § 12 物体的极限速度

如果一辆火车以每小时 72 公里的速度开行，也就是每秒 20 米的速度前进，车上有一位乘客向前方扔一块石头，速度是每秒 10 米。那么在地面上的观察者看来，毫无疑问石头的速度是向前每秒 30 米。如果这石头是向后方扔的，在地面上的观察者看来，石头的速度实际是向前每秒 10 米。然而当速度很高时，狭义相对论告诉我们，这个速度相加公式不对了，需要从洛仑兹变换出发推导相对论的速度相加公式。如果火车以速度  $V$  行驶，火车上有一个物体以速度  $v'$  向同一方向运动，那么在地面的观察者来看，物体的速度  $v$  为

$$v = \frac{v' + V}{1 + \frac{v'V}{c^2}}$$

从这个公式可以看出，速度相加有一个上限，永远不能超过真空光速  $c$ 。如果  $V$  和  $v'$  都小于真空光速  $c$ ，则  $v$  也一定小于真空光速  $c$ 。如果  $V$  和  $v'$  中有一个等于真空光速  $c$ ，则  $v$  也一定等于真空光速  $c$ 。由此可以看出真空光速  $c$  是狭义相对论给出的物体加速时速度能达到的极限，也就是信号传播的极限速度。

### § 13 质量和能量的联系

在狭义相对论中，爱因斯坦给出了一个优美的关系式

$$E=mc^2,$$

这就是质能关系。这个关系把质量和能量联系到一起，爱因斯坦通过它向人们揭示出物体所具有的全部能量正比于该物体的质量。所以，在粒子物理学中，所有粒子的质量都是用能量标度的。另外，当一个物体运动时，它的质量也不是一成不变的，它将随着这个物体运动速度  $v$  的增加而增加。上式中的质量  $m$  就是这个变化的质量，它和我们平时所说的质量之间有如下的关系

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

在这个关系式中， $m_0$  被称为静止质量。当一个物体以接近真空光速的速度运动时，如果通过增加物体动量的办法，如燃烧燃料等，想给物体加速，那么实际上物体的速度增加不了多少，而能量都将耗费在增加物体的质量上。所以，当一个粒子以很高的速度运动时，想要继续增加它的速度往往是一件很不容易的事。

对于任何一个运动着的质点，它都具有动量

$$P=mv,$$

因此，利用质能方程，可以得到关系式

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + P^2 c^2}.$$

如果将质点的总能量分为静止能量，即静止质量  $m_0$  乘真空光速的平方，和运动能量，即动能  $T$  两部分，那么还可以得到动能的表达式

$$T = E - m_0 c^2 = \sqrt{m_0^2 c^4 + P^2 c^2} - m_0 c^2$$

一般说来，当人们说能量为多少的某粒子时，指的就是它的总能量。

质能关系是研究高能物理中粒子的运动、产生和湮灭，以及它们之间的相互作用的基础。而且，它的提出对世界发展产生了深远的影响，为核能的利用、原子武器的研制奠定了理论基础。现在核能已经成为一种最有发展前途的能量来源，如何更合理地利用核能源已经越来越受到人们的重视。

由于相对论是极具有革命性的理论，在科学界，就像普朗克的量子假说一样，在其诞生之初也遇到过怀疑。但与量子假说不同的是，爱因斯坦对自己创立的相对论始终抱着坚信的态度。同时由于爱因斯坦是犹太人，相对论还曾受到纳粹的攻击，勒纳 (Phillip Lenard) 等一批科学家曾经联合撰文，声称有 100 位教授证明爱因斯坦是错的，对此，爱因斯坦认为，只要能够真正证明相对论是错的，一个人出面就足够了。

事实上，我们在日常生活中所遇到的现象大多数用经典物理学就已经能够很好地解释了，但是在研究能量很高、速度很大的粒子的运动时，就不得不考虑到相对论性效应，而且在粒子的湮灭与产生时，也不得不利用那个优美的质能关系方程。

相对论的创立使物理学的研究摆脱了经典物理学思想的束缚，同量子力学一起完成了现代物理学上的一场深远的革命，为现代物理学和天文学的研究展示了一个广泛的前景。

### 第三章 物质的聚集状态

#### § 1 固体、液体和气体

原子之间的相互作用性质很复杂，但归根结底还是电磁相互作用。

不同元素原子的原子序数不同，核外电子数目不同，电子在核外分层分布的情况不同，和其他原子相互作用的行为也就会千差万别。原子通过这些错综复杂的电磁相互作用结合成一千几百万种化合物的分子。

#### 分子

在原子世界中我们看到了 111 种元素的原子，它们都是由一个原子核和在它周围运动的许多核外电子组成，这么多种原子虽然质量轻重相差很大，但所占的体积大体上差不多。这 111 种原子又通过复杂的电磁相互作用结合成一千几百万种化合物的分子。在原子世界中各种元素在固体状态下平均每个原子所占体积相近，但它们组成的一千几百万种化合物的分子所占的体积就千差万别了。单原子分子所占体积和原子一样大，大量原子组成的高分子的体积就非常大了，可以大到原子体积的数百万倍以上。例如聚异丁烯的分子由大量碳原子和氢原子组成，其中碳原子和氢原子的数目之比是一比二，分子量为  $5.6 \times 10^6$ 。聚异丁烯的分子的形状是长丝状，即近似地可以看作是一个很长的细圆柱体，圆柱的半径为 2.5 埃，长度为  $2.5 \times 10^5$  埃，这样一个分子所占的体积约是  $4.91 \times 10^6$  立方埃。由于聚异丁烯分子中约含  $1.2 \times 10^6$  个原子，平均每个原子约占体积为 4.1 立方埃，这大体上正是一般原子体积的量级，这也显示在多个原子结合成分子时，各个原子还是互相分开的，只在相邻原子的边界区有少量的重叠。

当人们研究生物体时，发现无论是多么复杂、多么高级的动物体还是植物体，都是由微小的细胞组成，生物体中各部分有许多种不同类型的细胞，它们分别具有不同的功能，起不同的作用。一般来说，细胞的体积是很小的，形状也是各式各样的，一般用肉眼是看不见的，要用放大几十到几百倍的显微镜才能看见。然而也有体积很大的细胞，鸡蛋、鸭蛋等各种鸟类的蛋都是单个的细胞，细胞的结构：细胞膜、细胞质、细胞核都能直接用肉眼看得一清二楚。当我们探究物质的微小结构，进入原子世界时，又碰到了非常类似的情形。各种物质都是由分子组成，形状也是千差万别的，一般的分子体积是很小的，用电子显微镜都看不见，但是也有体积很大的分子，组成它们的原子的数目往往都很大。

#### 物质聚集状态

各种物质都是由原子、分子组成。同样是水分子，可以组成水蒸气，可以组成液体的水，还可以组成固体的冰，它们的差别是水分子的聚集方式不同。自古以来，人们就熟知温度低时水要结冰，温度高时水又要沸腾成水蒸气。大量分子在一起时之所以会出现有几种不同的聚集方式是由于分子之间还有相互作用。原子通过错综复杂的电磁相互作用结合各种化合物的分子，分子又通过分子间的错综复杂的电磁相互作用而形成各种不同的聚集状态。

当温度低时，水分子具有的平均动能比较小，水分子之间由于靠得很近，相互吸引结合成固定排列的紧密聚集状态，形成结晶体，就是固体的冰。不断加高温度，水分子的平均动能不断加大。到温度达到零摄氏度时，分子之间的吸引力不再能保持各水分子的固定排列，就变为各分子可以不固定地任意活动的紧密聚集状态，这时就表现为冰的融比，转化成液体的水。在液体状态下，水分子之间仍然靠得很近。邻近的分子之间的吸引力仍然很强，保持着紧密的聚集状态。到温度升高到 100 摄氏度时，水分子的平均动能大到分子之间的吸引力不再能把他们聚集在一起时，各水分子就飞散开来，这时就表现为水的沸腾，转化为水蒸气。

一般说来，同一种物质可以以固态、液态、气态等多种形态存在，它们都是由同一种分子组成。组成物质的这些形态的最小颗粒称为组元，一般固体、液体、气体物质的组元都是该物质的分子构成的，但分子的聚集方式不同。固体和液体的组元都是处于紧密聚集状态，常常又统称为凝聚态。后来又发现在很高的温度下，有些气体的组元不是电中性的分子，而是带正电和带负电的离子，但任何一个小体积内，正离子和负离子的数目大体上相等，它们所贡献的电荷互相抵消，所以总起来还是表现为电中性。这种状态不同于过去所知的固态、液态、气态，称为等离子态，被认为是物质的第四态。以后人们又知道固态、液态也都不是单一的，实际上由于分子的聚集方式的不同，还有不同的固态。物理学中把物质的一种均匀聚集状态称为一种相，固态实际是一大类相的统称。不同相的差别在于其组元的类型不同，或组元聚集的形式不同。金刚石和石墨都是碳原子的晶体，由于结晶结构不同，是不同的相，显现出截然不同的物理性质。金刚石是已知的物质中，硬度最高的、无色、透明的晶体，石墨则是黑色晶体，硬度很低。高压下水的晶体就有六种不同的相。食盐也是晶体，但其组元不是整个分子而是带负电的氯离子和带正电的钠离子，因此它是一种等离子晶体。一般气体的组元是分子，即单原子或多原子的中性分子。如果气体的组元是带正负电的离子，则这气体就是一种等离子气体，等离子气体具有很好的导电性，通常把等离子气体简称为等离子体。

## § 2 均匀聚集状态的条件

物质形成均匀聚集状态需要一定的条件，这些必要条件可以归纳为：

(1) 有足够多的组元。如果只有少数几个组元，就谈不上聚集成一种相。所讨论系统包含的组元数应该远大于 10。

(2) 有足够大的体积。以便可以通过组元间的相互作用充分交换能量和动量达到热平衡。对于液态和气态等组元在其中可以自由运动的系统，体积的半径应该远大于组元在其中运动时的平均自由路程。这个条件的物理含义是，当一个组元穿过整个体积时，将要经历相当多次和其他组元的碰撞。对于晶体和非晶体等固态，组元的位置运动范围受到很强的约束限制，则体积的半径应远大于相邻组元间的平均距离。

(3) 有足够长的存活时间。以便可以通过组元间的充分多次相互作用实现热平衡。对于组元在其中可以自由运动的系统，存活时间应远大于相继两次碰撞平均间隔的时间。当组元的位置、运动范围受到很强的约束限制时，存活时间应远大于组元以平均速率运动到相邻组元处所需的时间。

如果这三个条件都得到满足，这个多组元系统就可形成一个较为均匀稳定的聚集状态，即形成一个相。

原子的半径量级为 1 埃。一般的固态和液态中两个相邻分子、原子或离子间距离的量级也是 1 埃，常温下气体中相邻分子平均距离的量级是 10 埃。一般即使固体或液体，其半径至少要达到几十埃的量级，才有可能形成一个相。只有在超高压下才可能在更小的体积内形成一个相。这是组元为分子、原子或离子时所给出的限制。考虑半径为十分之一毫米的小水珠，从宏观的尺度来看这是一个很小的体积，可以很容易地估算出其中约包含有 14 亿亿个水分子，其中所有的组元数当然足够多了；体积也足够大了；其中水分子以平均每秒几百米的速度运动，这样即使是一百万分之一秒也已经是足够长的存活时间，足够使这小水珠形成一个有确定温度的均匀的稳定的水珠。

### § 3 凝聚态的表面效应

大量的原子世界的分子、原子、离子聚集成各种固体、液体、气体物质，成为宏观世界构成的基础。当某种物质形成了一个相时，一般说来，这些物质的各部分有均匀的物理化学性质。然而，这只是对物质内部来说是对的。在物质表面的那些组元，所处的环境和所受的相互作用情况都和物质内部的那些组元有所不同，这就造成表面部分和内部部分的性质有所不同。对于气体来说，组元之间并不密集，表面效应不大。对于液体和固体，就会表现出表面效应。表面效应表现在处于物质表面的一层组元上，对于一般的宏观物体，表面一层的组元在组元总数中只占很小的比例，表面效应常常是完全可以忽略的。但是对于体积很小的凝聚态微粒，表面效应有时就相当重要，可以用处于表面的组元数和组元总数之比作为描述表面效应程度的系数。当微粒很大时，系数接近于零；当微粒不断减小时，系数不断加大；当微粒小到纳米范围时，系数明显增大。考虑圆珠状的铁微粒的直径从 1 纳米增加到 100 纳米，铁微粒表面效应系数的变化行为，列表如下。

直径 (纳米)	表面效应 系数(%)	直径 (纳米)	表面效应 系数(%)	直径 (纳米)	表面效应 系数(%)
1	83.82	12	10.95	40	3.375
2	53.91	14	9.439	45	3.004
3	38.96	16	8.293	50	2.706
4	30.40	18	7.395	60	2.258
5	24.90	20	6.673	70	1.938
6	21.07	25	5.363	80	1.697
8	16.11	30	4.483	90	1.509
10	13.04	35	3.851	100	1.359

当铁微粒的直径大于 100 纳米时，表面效应系数和微粒的直径成反比。从表中可以看到，当铁微粒的直径小于 50 纳米时，表面效应系数大于 2.7%，表面效应有相当大的影响。当铁微粒的直径大于 100 纳米后，表面效应的影响随直径的增大而逐渐减少。铜微粒的表面效应系数随微粒直径的变化行为和铁微粒相同，其他固体材料表面效应系数随微粒直径的变化行为也与铁和铜相近。

在一个由许多相组成的系统中，有时表面相的存在会变得十分重要，它会影响各个相之间的平衡条件。我们平时能够遇到的与表面效应有关的一个典型的例子就是水滴的形成。在饱和或过饱和蒸汽中的水滴，如果它的半径足够大，那么周围的水蒸气就会逐渐凝聚到这个水滴上，于是水滴也就逐渐地变大。若是水滴本来就很小，那么，由于表面效应的影响，要想维持水滴的存在，外界就必须有很高的蒸汽压，这样，在一般的蒸汽压条件下，水滴便不会增大，而会逐渐地蒸发掉。天空中飘着的云就是由许许多多这样的微型水滴构成的。在雨即将到来的前夕，外界的蒸汽压力增高，这些微型水滴通过互相碰撞逐渐结合成越来越大的水滴，最后，当空气的浮力和运动的阻力再也承受不了它们的重量时，它们就向地面掉下来，成为了雨滴。由此也可以看出，如果在过饱和蒸汽中掺入一些杂质颗粒如尘埃等，将有助于水滴

的形成。如果天上已经有了很厚的云，这时用飞机在云层中散布一些杂质微粒就会加快雨滴的形成，从而达到降雨的目的，这就是人工降雨。

同样，在我们平时烧开水时用的自来水中含有许多气体，它们以小气泡的形式存在。当水的温度逐渐升高接近 100 摄氏度时，水蒸气就会不断地通过这些小气泡的表面进入到其内部，使小气泡逐渐加大，同时气泡由于受到水的浮力而逐渐地上升，一直达到水面而破裂，并将其内部的水蒸气释放到空气中。当这种气泡大量地产生时，水就沸腾了。然而，如果小气泡本来就非常非常小，由于表面相的存在，这个气泡就很可能无法增大。当这种情况发生时，水即使被加到很热的程度也不会沸腾，这就是过热液体。

在研究原子核时，由于处在原子核表面的核子与原子核内部的核子的受力情况不同，表面效应往往也是一个不容忽视的方面。

凝聚态的微粒可以有较大的表面效应，凝聚态的薄膜也可以有较大的表面效应。凝聚态的表面层具有特殊的物理性质，可能有特殊的用途，研究凝聚态表面层的性质和规律的物理学分支是表面物理学，已成为现代物理学迅速发展的重要前沿学科之一。

原子世界物质结构的基本组元是原子，原子世界的基本特征尺度为十分之一纳米，即埃。原子结合成分子，大量分子或离子聚集成各种固体、液体、气体、等离子体等聚集状态，构成各种宏观尺度的物体。然而许多凝聚态的微小颗粒，表面效应的影响使它们具有特殊的物理性质，不同于宏观尺度时该凝聚态的性质。因此，在比原子世界基本特征尺度大一个量级以上，从 1 纳米到 100 纳米范围内，有一个介观世界，即介于宏观世界和微观原子世界之间的世界。研究介观尺度下物质性质和运动规律的物理学分支是介观物理学，也已成为现代物理学迅速发展的重要前沿学科之一。

## 第四章 原子核世界

### § 1 原子核的组元

原子核的体积很小，原子核直径的量级是十万分之一埃。在研究原子核和粒子世界问题时，常用费米作为长度的单位，一费米等于十万分之一埃，也就是一千万亿分之一米。原子核是由质子和中子组成的，质子和中子通过只在 10 费米以内的近距离时才有很强的强相互作用吸引力结合成原子核。在人们发现中子以前，不清楚原子核是由什么粒子构成的，这些粒子又是怎么样构成原子核的。

30 年代初期，人们知道原子核的性质可以由原子序数和原子量两个量描写。原子序数是该原子核所带的正电荷，是单位正电荷的倍数，原子量则正比于原子核的质量，并且大体上是氢原子量的整数倍，而氢原子核就是质子。当时已经发现的基本粒子有质子、电子和光子，质子带单位正电荷，电子带单位负电荷，光子不带电。质子的静止质量很重，是电子的 1836.15 倍。当时曾有一个原子核的结构模型，认为原子核是由质子和电子所组成，原子量就是原子核中包含的质子的数目，原子核中电子的数目则是原子量减原子序数，这样原子核所带有的正电荷的数目自然就等于原子序数。

这个模型可以对原子核的原子序数和原子量给以很好的解释，但进一步的分析研究就碰到了一系列基本的困难。

第一个困难。原子核的结合很紧，说明把原子核的各组成成分结合在一起的相互作用很强，特别是在距离为 1 费米附近时，应该远比电磁相互作用强。如果原子核是由质子和电子组成，原子核和电子之间应该有这种相互作用。然而当把电子射向原子核时，接近到几费米甚至 1 费米距离附近时始终没有察觉到超过通常电磁相互作用的更强的新型的相互作用存在。

第二个困难。如果原子核中包含电子，电子的位置就被限制在原子核的体积内，即在半径为几费米的球体积内。由于微观粒子运动普遍满足位置和动量的不确定关系，电子的动量就不能很小，相应地电子所具有的动能也不能太小。例如，氧原子核的半径约为 3 费米，从不确定关系给出在氧原子核中电子动量的不确定范围，从而可以估计出电子具有的动能值至少达到 16.3 兆电子伏特。具有这么大动能的电子不可能被束缚在原子核里，将会很快地从原子核中穿出来，这表明由质子和电子组成的原子核不可能是稳定的。

第三个困难。质子和电子都是自旋量子数为  $1/2$  的费米子，当它们组成原子核时，可以根据角动量的相加规则很容易地估计出原子核自旋角动量的性质，判断原子核是费米子还是玻色子。由于每一对质子和电子的自旋角动量之和可以是总自旋量子数为 0 或 1，所有的配了对的质子和电子的自旋角动量的总和的自旋量子数必然是整数，因此，原子核的自旋类型应完全由原子序数决定。原子序数为奇数的原子核应该是费米子，原子序数为偶数的原子核应该是玻色子。然而这个规则并不对，氮的原子序数是 7，但实验测得氮核的自旋量子数为整数，是玻色子。



## § 2 原子核的结构

### 原子核的结构

1932年查德威克在实验中发现中子,中子不带电,质量是电子的1838.67倍,自旋量子数是 $1/2$ ,中子和原子核之间在近距离有很强的相互作用。中子被发现后,很快就确立了原子核是由质子和中子所组成的。

原子核中包含的质子数就是原子序数,原子量则大体等于原子核中的质子数和中子数的总和。原子核大体是球形,综合从很轻到很重的各种原子核的体积值,得到原子核的体积约等于原子量乘 $7.24$ 立方费米,这表明原子核的粒子数密度大体上是个常数,每个粒子,不论是质子还是中子都平均占体积 $7.24$ 立方费米。原子量越大,占的体积也越大。

自由的中子的质量比自由的质子略重,但它们之间的质量差只占质量值的千分之一点四,可以近似地看作相等。质子与中子的差别在于质子带电而中子不带电,然而它们的强相互作用性质和行为相似,都是原子核的组成粒子。这表明质子和中子可以看作是同一种粒子的不同带电状态,质子和中子统称为核子。各种原子核的粒子数密度大体上是常数也反映了各种原子核的质量密度大体上也是个常数。这个现象一方面显示核子之间的相互作用是只在短距离内才有很强的吸引力,另一方面也显示核子都具有很强的不可入性。

### 结合能

在核子结合成原子核时,原子核的质量并不是全部核子质量的相加,在这个过程中,会释放出一定的能量,这就是结合能。相应地生成的原子核将损失一部分质量。原子核中平均每个核子的结合能称为平均结合能。例如,氦原子的原子量是 $4.002602$ ,一个原子质量单位相当于 $931.494\text{MeV}/c^2$ ,它的原子核是由两个中子和两个质子组成的。一个中子的质量是 $939.566\text{MeV}/c^2$ ,一个质子的质量是 $938.272\text{MeV}/c^2$ ,因此,在中子和质子结合成氦原子核时,由于释放了结合能,相应地质量损失了 $27.276\text{MeV}/c^2$ 。

### 原子核的能量尺度和原子核结构模型

原子世界中能量常常采用电子伏特作为单位,电子伏特就是一个电子的电量经过一伏特的电压降所获得的能量。对于一个氢原子,如果要把电子从氢原子中拉出去,需要加进去 $13.6$ 电子伏特的能量。原子世界中其他的能量变化,一般也是电子伏特的量级。原子世界中能量变化的尺度是电子伏特。

原子核的能量变化的尺度是兆电子伏特,比原子世界中能量变化的尺度大 $100$ 万倍。原子核的结构有它特有的特点。最轻的原子核是氢核,它就是一个质子,最重的原子核由 $272$ 个核子组成,原子核中包含的核子数从很少到很多都有。原子核的组成结构上的这个情况显示出几方面的特点。

一方面,许多核子相互吸引结合在一起,很像原子核外许多电子运动组成原子的情形。人们期望,核子的能级分布也将和原子中的电子能级分布类似,也是分层的。实际上,确实发现有些原子核显得特别稳定,有些原子核

则很不稳定。根据这方面的特点发展了原子核结构的壳层模型理论，对原子核结构的许多性质给了成功的描述和预言。

另一方面，重原子核由许多核子组成，其现象是由核子作为组元的微观聚集状态。根据这方面的特点发展了原子核结构的费米气体模型理论，对原子核的许多性质和行为给了成功的描述和预言。

再一方面，原子核既然是许多核子聚集的系统，必然会表现出大量核子组成的集体的运动，例如原子核整体的转动和振动，都是典型的集体运动，不能归结为单个核子的运动。根据这方面的特点发展了原子核结构的集体模型理论，也对原子核的许多性质和行为给了成功的描述和预言。

这几方面的理论各自从一方面反映了原子核结构的特点，在它们的基础上，发展了许多理论，进一步揭示原子核结构的运动行为和动力机理。

### § 3 原子核的衰变和反应

很久以来，人类一直梦想着能够将一种物质转变成另外一种物质，连英国物理学家牛顿（Sir Isaac Newton）也把他后半生的许多精力投入到炼金术当中，幻想着某一天能够把普通的金属变成黄金。历史进入了 20 世纪，不同物质之间的转化已不再是一个神话了。科学家们利用原子核反应不仅已经实现了从一种元素向另一种元素的转化，甚至可以去制造新的元素。在已经发现的 111 种元素中，第一到第九十四号元素是自然界存在的，从第九十五号元素开始都是人造元素。

1896 年，法国科学家贝可勒尔（Antoine-Henri Becquerel）通过对含铀物质的研究发现了放射性，原子核物理学从此诞生了。后来，1898 年，法国的物理学家居里夫妇（Pierre and Marie Curie）又发现了放射性元素钋和镭。1899 年，卢瑟福发现铀所发出的射线分为两种，一种是穿透力较弱且较易被吸收的  $\alpha$  射线，后来证明它的成分是  $\alpha$  粒子，即氦原子核；另外一种是  $\beta$  射线，它的成分实际上就是电子。1934 年，法国物理学家约里奥-居里夫妇（Frederic and Irene Joliot-Curie）发现了人工放射性。人类的历史逐渐进入了原子时代。

#### 衰变的一般规律

在自然界中，许多元素的原子核都是不稳定的，它们能够通过放射出某种射线而变成另外一种元素的原子，这就是放射性衰变。放射性衰变有一定的衰变规律。假设某一放射性物质所含的放射性粒子数为  $N$ ，在  $dt$  的时间间隔里有  $-dN$  个粒子衰变掉，这里使用负号是因为这些粒子已经衰变成了其他的粒子，这个数目应当与粒子的总数  $N$  成正比。由此可以得到

$$-dN = \lambda N dt,$$

式中的  $\lambda$  是比例常数，一般被称为衰变常数。如果用  $N_0$  代表粒子最初即  $t=0$  时的数目，则有解  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ ，

这就是放射性物质的粒子数随时间变化的规律。有时，在原子核物理学中也习惯采用平均寿命  $\tau$  来作为比例常数，它就是衰变常数的倒数，即

$$\tau = 1/\lambda,$$

那么，也就可以得到  $N = N_0 e^{-t/\tau}$ 。

从此式我们还可以得到该放射性物质的半衰期  $T_{1/2}$ ，

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda,$$

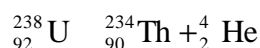
这就是放射性物质衰变掉一半所需要的时间。衰变常数  $\lambda$ 、平均寿命  $\tau$  及半衰期  $T_{1/2}$  都是放射性物质的特征量，它们反映了该放射性物质的一部分衰变性质。

#### 衰变的种类

最常见的原子核的放射性衰变有三种。

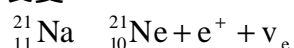
第一种是  $\alpha$  衰变，它是某种元素的一个原子核通过放射出一个  $\alpha$  粒子，而变成另外一种元素的原子核的衰变。原子核在进行  $\alpha$  衰变时，放出一个

粒子,并且原子序数减去2,质量数减去4,成为原子序数比它小2的原子核。其中,衰变前的原子核称为母核,而衰变后生成的原子核称为子核。例如,衰变

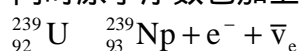


就是一种  $\alpha$  衰变。式中左上角的数字代表该原子核的质量数,左下角的数字代表它的原子序数。

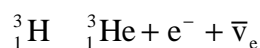
第二种放射性衰变是  $\beta$  衰变,它的特点是原子核的原子序数改变而质量数不变。它主要分为三种类型: $\beta^+$ 衰变、 $\beta^-$ 衰变和轨道电子俘获。在  $\beta^+$ 衰变中,原子核中的一个质子放出一个正电子和一个中微子而成为中子,同时原子序数也减去1。例如,衰变



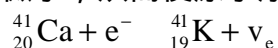
就是一种  $\beta^+$ 衰变;在  $\beta^-$ 衰变中,原子核中的一个中子放出一个电子和一个反中微子而成为质子,同时原子序数也加上1,又例如,衰变



和



都是  $\beta^-$ 衰变;轨道电子俘获是指原子核俘获了核外内层电子轨道上的一个电子,并同时放出一个中微子,从而使原子序数减去1,再例如,衰变



就是一个轨道电子俘获的过程。对  $\beta$  衰变的研究导致了中微子的发现。

第三种放射性衰变  $\gamma$  衰变往往是伴随着  $\alpha$  衰变或  $\beta$  衰变而产生的。原子核经过  $\alpha$  衰变或  $\beta$  衰变后一般处在激发态,这时就会发生  $\gamma$  衰变,使原子核跃迁到基态,同时放出一个高能光子。

除此之外,原子核的放射性衰变还包括原子核的自发裂变、质子放射性等许多形式。只有很重的原子核才会有显著的原子核的自发裂变,1940年最早发现的可以自发裂变的原子核是铀核,现在已知的可以自发裂变的原子核主要是比铀重的原子核。

## 核反应

类似于分子、原子的化学反应,原子核也具有核反应。用具有一定能量的粒子去轰击原子核时,原子核的性质就有可能发生改变,这个过程就称为核反应。从1919年卢瑟福完成了世界上第一个人工核反应起,人们已经实现了许许多多的核反应。对各种核反应的研究使科学家们能够更深入地了解原子核内部的构造,这已经成为研究原子核的一个重要手段。

## § 4 原子核的裂变

核反应的两个特殊情形就是重核的裂变和轻核的聚变。

原子核的裂变就是重原子核通过核反应分裂成两个或几个中等质量的原子核，并同时释放出大量的能量的过程。例如，核反应



就是一种典型的重核裂变过程。1938年，德国放射化学家哈恩（Otto Hahn）和他的助手斯特拉斯曼（Fritz Strassmann）发现，当他们用中子照射铀时，会产生中等质量的钡原子核。次年，奥地利和瑞典物理学家迈特纳（Lise Meitner）和她的外甥弗里施（Otto Robert Frisch）向哈恩指出，在他们的实验中，铀确实发生了裂变而产生了钡。由此，人们第一次发现了原子核的裂变现象。重原子核在裂变时不仅会产生其他原子核和中子，还会放出大量的能量。而且，在裂变过程中产生的中子又能够轰击其他原子核而实现新一轮的裂变，这就是所谓的链式反应（如图4-1所示）。重核裂变的这个特性是制造原子弹的基础，原子弹就是能够发生裂变的重放射性物质材料通过链式反应在瞬间释放出大量的能量，从而达到具有极大的破坏力与杀伤力。

当重原子核发生裂变时除了裂成两个或多个较轻的原子核外，还会释放

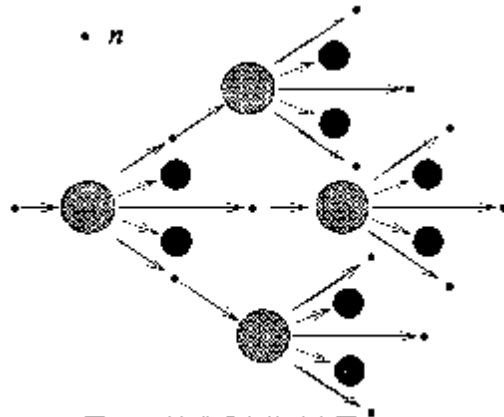


图4-1 链式反应的示意图

出几个中子，这些中子又可以去引发新

的裂变。每次裂变释放出的中子中，平均实际用于实现下一次裂变的的中子数，称为增殖因数  $k$ 。如果  $k < 1$ ，链式反应就不能维持进行；如果  $k > 1$ ，链式反应就能进行；如果  $k \gg 1$ ，链式反应就能迅速发展扩大进行，实现迅速大量集中释放能量，即核爆炸。

能够用于链式裂变反应的原子核材料称为“核燃料”。如果有了一定量的核燃料，它的增殖因数取决于核燃料的纯度和体积。因为核燃料中混的杂质对于裂变反应产生的中子有吸收作用，会降低增殖因数。核燃料中产生的中子有一部分会穿出核燃料的表面，不参加引起下一次裂变，表面积大也会降低增殖因数。当核燃料体积越小时，表面积占的比重就较大，增殖因数也就较小。对于确定纯度的核燃料，它的增殖因数等于1的体积称为临界体积。当核燃料的体积小于临界体积时，增殖因数就小于1，链式反应就不会进行；当核燃料的体积大于临界体积时，增殖因数就大于1，链式反应就会迅速进行。

原子弹的原理是通过实验和理论的研究，确定某种核燃料的临界体积。

然后制造几块都小于临界体积的核燃料材料，分开放，到爆炸时突然将它们并到一起成为一块大于临界体积的核燃料，这样立即实现核裂变的链式反应，发生迅速释放能量的爆炸。为了能迅速实现几块核燃料的合并，需要用烈性炸药做原子弹的雷管。

如果要用原子核的裂变产生的巨大能量作为稳定的能源，就要实现增殖因数维持为 1 的核裂变链式反应，人们通过建造原子核反应堆来实现。原子核反应堆在核燃料中插有一些能够迅速吸收中子的可调节位置的控制棒来控制增殖因数的变化，使它保持在 1 附近。控制棒一般用镉制作，因为镉具有很强的吸收中子的能力。当发现增殖因数过大时，把控制棒插入深一些，增殖因数立即就降低下来。当发现增殖因数过小时，把控制棒往外拔一些，增殖因数马上就提高上去。控制棒是控制原子核裂变反应堆正常运行的重要部分。

## § 5 原子核的聚变

除了通过重核的裂变可以获得原子能外，另外一种方法就是通过轻核的聚变。较轻的原子核通过核反应结合成较重的原子核并释放出大量能量的过程称为聚变。例如，核反应



就是一个轻核聚变的过程。通过轻核的聚变往往能获得比重核裂变多得多的能量。由于轻核聚变时所利用的原子核都是原子序数很小的元素，如氘等，它具有比重核裂变丰富得多的原材料来源。轻核聚变最大的困难就是反应条件比较难以达到，往往要在高温高压下才能实现。氢弹就是先用一个原子弹爆炸，形成极高的高温，实现轻核的聚变反应。原子弹就是氢弹的雷管。

如果要用原子核的聚变产生的巨大能量作为稳定的能源，就要实现在一定的空间范围内维持几千万开尔文以上高温的技术，显然这样的空间范围不能用任何固体材料做器壁。现在人们在研究的是实现高温等离子体，在高温等离子体中进行原子核聚变反应。等离子体的组元是带电粒子，它们在磁场中的运动是绕磁场方向的螺旋线，即磁场对带电粒子有横向的约束作用。这效应对等离子体整体的影响是磁场对于等离子体的压强有贡献，称为磁压强，可以利用磁压强来约束高温等离子体。还利用强激光照射来实现惯性约束。现在物理学家们正在研究实现可控制热核反应，实现以后，人类就将有一个取之不尽、用之不竭的能源宝库。

## 第五章 粒子世界

### § 1 正电子、中子、反质子和反中子

原子世界物质结构的基本组元是原子，原子世界的基本特征尺度为十分之一纳米，原子世界的能量标度是电子伏特。

#### 最初认识的基本粒子

再把特征尺度缩小十万倍，小到百万分之一纳米，就进入了粒子世界。20 世纪初在研究原子结构规律时，就已经认识了最初的几个基本粒子。质子、电子、光子是最早被认识到的几个基本粒子，这三种粒子都是稳定的粒子，质子带单位正电荷，电子带单位负电荷，光子不带电，质子和电子有放出和吸收光子的能力，它们通过电磁相互作用互相联系起来。当时实验上还显示不出它们的体积大小，看不到它们有内部结构，可以认为是“点”粒子。人们认为这些粒子是物质结构的最小的单元，把它们统称为基本粒子。

20 世纪初，物理学中已清楚地认识了物质的基本相互作用有两种：引力相互作用和电磁相互作用。它们之间有共同点又有不同点，它们都是与距离平方成反比的长程力，引力相互作用总是吸引，电磁相互作用则遵循“同性相斥、异性相吸”。质子和电子之间既有电磁相互作用，又有引力相互作用。英国天文学家和理论物理学家爱丁顿 (Arthur Stanley Eddington) 曾认为基本粒子就是质子、电子、光子三种，而宇宙就是由总数约  $10^{79}$  个质子和电子构成，是一个有限无边的正在膨胀的宇宙。从这种理论出发，也就提出了一系列需要研究解答的基本问题：为什么电荷有最小单位？为什么电荷最小单位所决定的精细结构常数值约为  $1/137.036$ ？为什么正电荷的最小单位比负电荷的最小单位质量重 1836.15 倍？为什么宏观上正负电是对称的，但正负电荷的最小单元又非常不对称？然而物理学实验和理论的发展很快地打破了这个格局，陆续发现了几个新的基本粒子，展示了粒子世界的丰富多采的新局面。

#### 狄拉克的理论和正电子的发现

1928 年英国物理学家狄拉克 (Paul Adrien Maurice Dirac) 提出了一个电子运动的相对论性量子力学方程，即狄拉克方程。利用这个方程研究氢原子能级分布时，考虑有自旋角动量的电子作高速运动时的相对论性效应，给出了氢原子能级的精细结构，与实验符合得很好。从这个方程还可自动导出电子的自旋量子数应为  $1/2$ ，以及电子自旋磁矩与自旋角动量之比的朗德  $g$  因子为轨道角动量情形时朗德  $g$  因子的 2 倍。电子的这些性质都是过去从分析实验结果中总结出来的，并没有理论的来源和解释。狄拉克方程却自动地导出这些重要基本性质，是理论上的重大进展。利用这个方程还可以讨论高速运动电子的许多性质，这些结果都与实验符合得很好。这些成就促使人们相信狄拉克方程是一个正确地描写电子运动的相对论性量子力学方程。

既然实验已充分验证了狄拉克方程的正确，人们自然期望利用狄拉克方程预言新的物理现象。按照狄拉克方程给出的结果，电子除了有能量取正值



的状态外，还有能量取负值的状态，并且所有正能状态和负能状态的分布对能量为零的点是完全对称的。自由电子最低的正能态是一个静止电子的状态，其能量值是一个电子的静止能量，其他的正能态的能量比一个电子的静止能量要高，并且可以连续地增加到无穷。与此同时，自由电子最高的负能态的能量值是一个电子静止能量的负值，其他的负能态的能量比这个能量要低，并且可以连续地降低到负无穷。这个结果表明：如果有一个电子处于某个正能状态，则任意小的外来扰动都有可能促使它跳到某个负能状态而释放出能量。同时由于负能状态的分布包含延伸到负无穷的连续谱，这个释放能量的跃迁过程可以一直持续不断地继续下去，这样任何一个电子都可以不断地释放能量，成为永动机，这在物理上显然是完全不合理的。

针对这个矛盾，1930年狄拉克提出一个理论，被称为空穴理论。这个理论认为由于电子是费米子，满足泡利不相容原理，每一个状态最多只能容纳一个电子，物理上的真空状态实际上是所有负能态都已填满电子，同时正能态中没有电子的状态。因为这时任何一个电子都不可能找到能量更低的还没有填入电子的能量状态，也就不可能跳到更低的能量状态而释放出能量，也就是说不能输出任何信号，这正是真空所具有的物理性质。按照这个理论，如果把一个电子从某一个负能状态激发到一个正能状态上去，需要从外界输入至少两倍于电子静止能量的能量。这表现为可以看到一个正能状态的电子和一个负能状态的空穴。这个正能状态的电子带电荷 $-e$ ，所具有的能量相当于或大于一个电子的静止能量。按照电荷守恒定律和能量守恒定律的要求，这个负能状态的空穴应该表现为一个带电荷为 $+e$ 的粒子，这个粒子所具有的能量应当相当于或大于一个电子的静止能量。这个粒子的运动行为是一个带正电荷的“电子”，即正电子。狄拉克的理论预言了正电子的存在。

1932年美国物理学家安德森(Carl David Anderson)在宇宙线实验中观察到高能光子穿过重原子核附近时，可以转化为一个电子和一个质量与电子相同但带有的是单位正电荷的粒子，从而发现了正电子，狄拉克对正电子的这个预言得到了实验的证实。正电子的发现表明对于电子来说，正负电荷还是具有对称性的。狄拉克的空穴理论给出了反粒子的概念，正电子是电子的反粒子。

## 反粒子

这样自然提出了一个新问题：究竟反粒子的存在是电子所特有的性质，还是所有的粒子都具有的普遍的性质。如果所有的粒子都有相应的反粒子，首先检验的是应该存在质子的反粒子、中子的反粒子。这个问题在24年之后从实验上解决了，1956年美国物理学家张伯伦(Owen Chamberlain)等在加速器的实验中，发现了反质子，即质量和质子相同，自旋量子数也是 $1/2$ ，带一个单位负电荷的粒子。接着又发现了反中子。后来发现，各种粒子都有相应的反粒子存在，这个规律是普遍的。有些粒子的反粒子就是它自己，这种粒子称为纯中性粒子。光子就是一种纯中性粒子，光子的反粒子就是光子自己。在粒子物理学中，已不再采用狄拉克的空穴理论来认识正反粒子之间的关系，而是从正反粒子完全对称的场论观点来认识。

一切粒子都有与之相应的反粒子，这个普遍结论被几十年的粒子物理的发展不断印证。“反粒子”已成为粒子物理学中一个重要的基本概念，并且

其本身的含义也在不断地发展和充实。

## 中子

1932年查德威克在实验中发现中子，中子不带电，质量比质子略重，是电子的1838.67倍，自旋量子数是 $1/2$ ，中子和原子核之间在近距离有很强的相互作用，中子是基本粒子家族的新成员。

中子有一个性质和质子及电子都不同，自由质子和自由电子都是稳定粒子，但自由中子却不是稳定的粒子。当自由中子产生后，平均经过887秒就要衰变掉，中子消失了，产生一个质子和一个电子，再加一个当时还没有被观察到和被发现的中性粒子，即反中微子。中子的这个性质就使人们怀疑中子是否是一个复合粒子，是由质子和电子再加另外的中性粒子组成，自由中子的衰变就是一个分解的过程，就像水分子分解成氢原子和氧原子一样。这个可能性立即就被排除掉了，当时的实验没有观察到质子的体积大小，如果质子有一定体积大小，它的半径不会大于1费米，中子的半径也是相同的数量级。如果中子中包含电子，电子的位置就被限制在中子的体积内，即在半径小于1费米的球体积内。从不确定关系给出在中子中电子动量的不确定范围，从而可以估计出电子具有的静止能量加动能值至少达到49.3兆电子伏特，这是自由电子静止能量的96.5倍。具有这么大能量的电子不可能和质子一起被束缚在中子里，这表明中子不可能由质子和电子再加其他中性粒子所组成。

中子是人们发现的第一个不稳定粒子，中子的衰变过程不是复合粒子的分解，而是粒子的转化。中子衰变时，中子消失了，同时产生了一个质子和一个电子，再加一个反中微子。在这个衰变过程中，中子、质子、电子、反中微子的数目都是可变的。

粒子的转化是粒子世界中粒子运动特有的新形式，尽管粒子世界中观察到大量的粒子反应和衰变过程，看起来很像化学中的化合与分解，但是两者的性质和机理是截然不同的。化学中的化合与分解是原子间的重新组合，粒子世界中的粒子反应和衰变则完全是粒子的转化，是粒子的湮没和产生，一般并不能归结为粒子的重新组合。

## § 2 $\mu$ 子、 $\pi$ 介子、中微子和反中微子

### 汤川的介子场理论

1935 年日本科学家汤川秀树提出了核力的介子场理论。按照汤川理论，质子和中子之间、质子和质子之间以及中子和中子之间的核力相互作用都是通过交换一种有静止质量的媒介粒子来实现的，正如带电粒子之间的电磁相互作用是通过交换静止质量为零的光子来实现的一样。媒介粒子有静止质量决定了这种相互作用是短程的，也就是说，当距离超过某一称为“力程”的长度时，相互作用的强度就迅速减少到可以忽略的地步。决定质子、中子放出和吸收媒介粒子能力的耦合常数很大，这就决定了在近距离时这种核力远比电磁相互作用要强。根据实验观察到的核力力程的数量级约为 1 费米，估计出这种媒介粒子的静止质量应该约是电子的 200 到 300 倍，介于电子和质子之间。汤川把这种媒介粒子称为介子。

### $\mu$ 子

1936 年安德森在宇宙线实验中发现了一种质量约为电子质量 206.77 倍的带正或负单位电荷的粒子。当时人们曾认为它就是汤川预言的核力的媒介粒子，称之为  $\mu$  介子。但是以后多年的研究发现， $\mu$  介子与原子核的相互作用很弱，即使在非常近的距离也没有表现出有超出电磁相互作用以外的其他相互作用，它不可能是汤川所预言的那种介子。

由于  $\mu$  介子实际上并不是原来含义下的介子，它被称为介子乃是历史的误会。因此后来就统一称之为  $\mu$  子而不再称它为  $\mu$  介子， $\mu$  子也是不稳定粒子，自由  $\mu$  子的平均寿命是 2.197 微秒，是中子平均寿命的四亿分之一。在迄今为止所发现的不稳定的粒子中， $\mu$  子是除中子外平均寿命最长的粒子。 $\mu$  子衰变时转化为一个电子、一个中微子和一个反中微子。

### 介子

1947 年英国物理学家鲍威尔 (Cecil Frank Powell) 在宇宙线实验中又发现了一种质量约为电子质量 273 倍的带正或负单位电荷的粒子，它与原子核之间有很强的相互作用，称为  $\pi$  介子。 $\pi$  介子也是不稳定粒子，平均寿命是 26.03 纳秒，也就是 1 亿分之 2.603 秒。人们认为  $\pi$  介子才是汤川理论所预言的粒子，汤川理论经过 12 年得到了实验的证实。1950 年发现中性的  $\pi$  介子，它比带电  $\pi$  介子质量轻一些，也是不稳定粒子，平均寿命是 1 亿亿分之 0.84 秒。

### 中微子和反中微子

中子和  $\mu$  子衰变时都要产生中微子或反中微子，但是它们的发现却经过很长的时间。中微子和反中微子都不带电，它们都不参与电磁相互作用，它们也都与原子核之间没有核力相互作用。这样它们运动时和所遇到的各种物质分子、原子、原子核、电子都没有可以察觉的相互作用，各种物质对于它

们都是近于透明的，当中微子穿过地球时，也有一百亿分之一中微子被吸收掉。因此，即使中微子或反中微子已经存在了，也很难被观察和检测到。

1896年贝可勒尔发现铀原子核具有放射性，后来发现许多原子核有放射性。原子核的 $\beta$ 衰变是发射一个电子，同时这原子核转变为原子序数增加1的新原子核。按这样的机理来分析，原子核的 $\beta$ 衰变是从一个粒子到两个粒子的衰变过程。如果开始时原子核是静止的，动量守恒要求衰变时产生的电子和新原子核所获得的动量大小相等、方向相反。再加上能量守恒的限制，又要求发射的电子的能量是确定的值。然而大量原子核 $\beta$ 衰变的实验显示发射出的电子的能量并不是确定的值，而是可以在从零开始一直到某一个最大能量值之间的一个范围内连续变化。这个结果曾被人们认为是表明原子核的

$\beta$ 衰变过程中能量动量守恒遭到了破坏。1931年泡利为了解释原子核 $\beta$ 衰变中的能量动量守恒上的疑难，提出原子核 $\beta$ 衰变时除了发射一个电子外，可能同时还发射某种未知的轻的中性粒子，这样原子核的 $\beta$ 衰变就是从1个粒子到3个粒子的衰变过程。这样能量守恒要求电子的能量加这个轻的中性粒子的能量之和是一个常数，电子的能量自然可以在从零到某一个最大值之间的一个范围内连续变化。1933年费米进一步研究了这一假设，并把这种中性粒子命名为中微子。

1956年美国物理学家科恩(C. L. Cohen)和莱因斯(Fred Reines)发现反中微子，这样光子、电子、正电子、质子、反质子、中子、反中子、 $\mu$ 子、 $\pi$ 介子、中微子、反中微子就是初期认识的一批基本粒子。在这些粒子中，光子、电子、正电子、质子、反质子、中微子、反中微子是稳定粒子，它们占大部分，中子、反中子、 $\mu$ 子、 $\pi$ 介子则属于不稳定粒子。

### § 3 从基本粒子到粒子

对基本粒子性质的实验研究主要是观察基本粒子在相互碰撞时的运动行为，碰撞的能量越高，能够辨认的空间距离越小。在 50 年代以前，由于实验上没有能够测出这些基本粒子的空间大小，基本粒子被认为是物质微观结构的最小单元，因此一直统称为基本粒子。在这以后，凡是和已发现的基本粒子可以相互作用和相互转化，并且在当时实验认识水平上被认为同属于物质微观结构最小层次的粒子，都统称为基本粒子。

60 年代以来，实验上陆续发现了大量新的基本粒子，几年内新发现的基本粒子数目成倍地增加。随着实验能量的不断提高，实验和理论研究的发展，测出质子的电磁半径，也就是电荷分布半径为 0.8 费米，以后又定出  $\pi$  介子的电磁半径也是同一数量级，比质子的电磁半径略小。后来又观察到虽然中子所带电荷为零，但中子内部电荷还是有一定的分布，中子的电磁半径大体上和质子的电磁半径相等。这些结果表明，这些可以直接参与强相互作用的基本粒子肯定不能被看作是点粒子，它们的空间分布有一定的大小，肯定有内部结构，它们是由更深层次的粒子所组成。然而加速电子的高能碰撞实验却表明，把电子加速到能量达到约 100GeV 的数量级，仍然完全可以把电子当作点粒子来对待。表明即使电子的半径不为零的话，也应小于一千分之二费米。这显示对于电子等基本粒子，仍然观察不到它们占据的空间大小，仍然可以把它们看做是“点”状的粒子。这些进展说明，已经发现的这些基本粒子并不属于微观结构的同一层次。因此自 60 年代起，国际上就把基本粒子中的“基本”两字去掉，统称为粒子，基本粒子物理学改称为粒子物理学、“基本粒子”这个名称已经成为历史的陈迹。

## § 4 粒子世界运动的特点

### 粒子运动的基本特点

粒子的运动有它的独有的特点，描写粒子运动的理论必须充分反映了这些特点。粒子世界中粒子运动性质有三个特有的基本特点：

第一，粒子是微观尺度的客体，运动是微观尺度的运动。描写微观尺度运动的特征量是普朗克常数  $h$ ，描写微观粒子运动的规律的是量子力学。

第二，粒子运动是高速运动，粒子速度的变化常常可以达到和真空光速相比拟的数量级，相应地能量的变化常常达到相当于甚至远大于粒子静止能量的数量级，运动是相对论性的。描写高速运动的特征量是真空光速  $c$ ，描写粒子高速运动规律的是狭义相对论。

如果粒子的运动特点只有这两个，自然可以推论出粒子物理的基本规律应该是相对论性量子力学。但是粒子的运动还有第三个重要的不可忽视的特点。

第三，粒子运动过程中，常常表现出粒子之间的相互转化，粒子数目是可变的，粒子可以产生和湮没。换言之，观察到的粒子系统的自由度数在粒子运动时是可变的。

只有具有无穷多自由度的系统在运动中才能自然容纳或显现出有限多自由度的变化。而物理学中研究的“场”就是这样的具有无穷多自由度的系统，因为“场”是充满全空间的客体，全空间有无穷多的点，每个点对应至少一个自由度。描写场的运动规律的理论是场论，因此描写粒子运动基本规律的理论是相对论性量子场论。

### 自然单位制

正因为粒子运动的这些特点，在描写粒子的运动规律时，不可避免地经常遇到普朗克常数  $h$  和真空光速  $c$  的各种幂次。针对这种情况，高能物理学中常采用一种特殊的单位制，称为自然单位制。自然单位制中规定约化普朗克常数  $\hbar$ （即普朗克常数  $h$  被  $2\pi$  除）、真空光速  $c$ 、玻耳兹曼常数  $k$  都等于 1。这样在描写粒子的运动规律时，这些常数就自动地不再出现，所有的公式都大大地简化了。

在自然单位制中，只剩下一个独立的量纲，通常取能量做基本的量纲。物理量的量纲分析大大地简化了，许多物理量具有相同的量纲。例如：能量、动量、质量、温度、频率、波数的量纲相同；长度、寿命、磁矩、电矩的量纲相同，是能量量纲的倒数；速度、角动量、电荷都是无量纲量。

质子的质量是  $m=1.6726231 \times 10^{-27}\text{kg}$ ，也可以通过能量的单位 MeV 给出为  $m=938.27231\text{MeV}$ 。温度可以用能量的单位来描写，这时有换算关系为  $1\text{eV}=11,604.448\text{K}$ 。太阳表面的温度约为  $6,000\text{K}$ ，这是在地面上罕见的高温，但是它还不到一个电子伏特，从粒子物理世界来看是极低的温度。太阳中心的温度约为  $20,000,000\text{K}$ ，即两千万开尔文，这是地面上只有在核爆炸时才能达到的极高温，它还只有  $1.723\text{keV}$ ，从粒子物理世界的尺度标准来看仍然是相当低的温度。在很高能量的粒子的碰撞中可以达到在直径为 1 费米的小体积范围内实现温度约为  $140\text{MeV}$ ，这相当于 1.625 万亿开尔文，比太

阳中心的温度约高八万一千多倍。

速度是无量纲物理量，自由粒子的速度沿无论任何方向的投影都只能取从-1到+1之间的值，以反映速度的大小不能超过真空光速。角动量也是无量纲量，任何粒子运动时的轨道角动量沿无论任何方向的投影都只能取整数值，而任何粒子自旋角动量沿无论任何方向的投影都只能取整数或整数加二分之一的值。由于电荷是无量纲量，精细结构常数也是无量纲量，它的值等于  $1/137.036$ 。

## § 5 粒子的普遍内在属性

粒子的一个普遍特性是全同性。各种粒子分别有各自的内在属性，这些属性不随粒子产生的来源和粒子的运动状态而变化。一切内在属性的总和是判别和区分粒子种类的依据，属于同一种粒子的内在属性完全相同，它们之间互相不可分辨。各种粒子的千差万别反映在粒子的运动和相互作用性质的不同，通过反映粒子特征的许多种物理量表现出来，其中重要的有以下几种。

### 质量

所有的粒子都有确定的质量。粒子运动的速度可以很快，按相对论给出，粒子的质量是速度的函数，随速度的增加而增加。如果粒子的静止质量不为零，当速度增加到真空光速时，粒子的质量将趋于无穷大。如果某种自由粒子以真空光速运动，质量为有限值，则这种粒子静止质量为零，并且粒子只能以真空光速运动，速度不能减下来，光子就属于这类粒子。

粒子物理中所说的粒子质量都是指粒子的静止质量。现在已经发现的粒子质量分布在一个很大的范围内，已发现的具有静止质量的粒子中最轻的是电子，其质量为  $m=0.51099906\text{MeV}$ 。质子的质量为  $m=938.27231\text{MeV}$ ，已发现的粒子中绝大多数质量在电子的 200 倍到 21600 倍的范围内。最重的粒子是 Z 粒子，其质量为  $m=91.187\text{GeV}$ ，约为电子的 178448 倍。光子、中微子和反中微子是永远以真空光速运动的粒子，它们的质量都为零。

许多粒子是不稳定粒子，粒子的微观本性决定了：实验上测量不稳定粒子的质量实际得到的不是确定的一个值，而是在某一值附近有一定分布。这个分布可以用两个参数来描写，一个参数是实验里测量粒子质量值的平均值，通常仍称为粒子的“质量” $m$ ；另一个参数是实验测量粒子质量值在平均值附近的分布宽度，称为粒子的宽度。粒子的平均寿命越短，越不稳定，粒子的宽度也就越大。已发现的粒子中绝大多数宽度小于  $400\text{MeV}$ 。最宽的粒子是 Z 粒子，其宽度为  $2.490\text{GeV}$ 。

现在实验还没有测到光子、中微子、反中微子的质量，因此认为它们是静止质量为零的粒子。直接的实验测量确实没有测量到光子的静止质量，现有的理论也认为光子的质量为零。然而，光子是不是可能有很轻的质量，只是由于太轻，在一般情况下完全可以忽略，这个问题需要从实验上来解决。现在实验上得到光子的质量小于  $3 \times 10^{-27}$  电子伏特，也就是说光子有可能没有静止质量，如果有的话，其值也要小于这个值。这个质量值太小了，它所对应的能量值不仅远小于粒子世界的能量变化数量级，远小于原子世界的能量变化数量级，也远小于宏观世界中温度接近绝对零度时分子平均能量变化的数量级，实际上，这能量对应的温度约为  $2.32 \times 10^{-23}$  开尔文。

物理学家做实验来测定能量怎么能得到这么高的精度呢？物理学家利用了光子是电磁相互作用的媒介粒子，因此按照量子理论知道光子静止质量的倒数等于电磁相互作用的力程长度。如果光子的静止质量等于零，力程就等于无穷大，电磁相互作用就是长程力。如果光子的静止质量大于零，它的倒数就是电磁相互作用的力程，也就是说，电磁相互作用就是一种短程力。在地球上的实验中观察不到电磁相互作用的有限的力程，说明电磁相互作用的力程至少要比地球半径要长。为了确定电磁相互作用的力程，物理学家到天



文学中去观察,结果观察到 7000 光年的距离还没有观察到电磁相互作用的有限力程的效应。换言之,电磁相互作用的力程应该比 7000 光年要长,从而定出光子的静止质量要小于  $3 \times 10^{-27}$  电子伏特。

## 寿命和宽度

现在已经发现的粒子共有 452 种,在这些粒子中,除了光子、电子、正电子、质子、反质子、三种中微子和三种反中微子等 11 种是稳定的外,其余都是不稳定的,它们产生后经过一段时间就会自动“衰变”成两个或更多个其他类型较轻的粒子。粒子产生以后到衰变前存在的时间就是这个粒子的寿命。然而当粒子作高速运动时,由于相对论的时钟延缓效应,观测到的粒子的寿命比它静止时要长。反映粒子不稳定性的物理量是粒子静止时的寿命,所以实验上测定了一个运动粒子在衰变前存在的时间,首先要根据相对论换算成粒子静止时存在的时间。即使是这样,测量许多个同一种粒子在静止时的存在时间也是各不相同的,一般来说,存在时间短的粒子比较多,存在时间长的粒子比较少。这并不说明它们是不同类型的粒子,粒子的不稳定性表现为在它存在的任意时间间隔里都有一定的概率衰变掉。

静止的不稳定粒子在单位时间内衰变掉的概率称为粒子的宽度,这也就是测定不稳定粒子质量值分布时得到的宽度,它的倒数是不稳定粒子静止时的平均存在时间。测量某种粒子的寿命时,必须测量许多个同一种粒子在静止时的存在时间,再求出它们的平均值。不稳定粒子在静止时的平均存在时间称为平均寿命,简称寿命。由于不稳定粒子的宽度和寿命有密切的联系,它们的乘积等于 1,即  $\Gamma \tau = 1$ 。这个重要的性质决定,不稳定粒子的寿命既可以直接测定,也可以通过测量质量分布宽度而间接确定。稳定粒子的寿命是无穷大,中子是已知的不稳定粒子中寿命最长的粒子,它的寿命是 887.0 秒。不稳定粒子的寿命也分布在一个很大的范围内,Z 粒子是宽度最大的粒子,它的寿命也最短,其值为  $\tau = 2.643 \times 10^{-25}$  秒。

粒子的质量和寿命是粒子的最重要的基本属性,粒子的寿命又等于粒子质量分布宽度的倒数,粒子的质量和寿命有紧密的联系,它们常常是判断和辨认粒子的依据。

如果粒子的寿命很长,在它产生后可以存在一段时间,在空间中走一段距离。可以在这段时间里观测它的许多性质,例如粒子的电荷、能量、动量、存在时间等,就可以推算出粒子的质量,并估计出粒子的寿命。这样再和已知的各种粒子的性质比较,就可以判断这个粒子是哪种粒子。如果实验中观察到的一个粒子,这样得到的粒子性质和已知的所有粒子的性质都对不上,就可以判断发现了一种新粒子。在这种情况下,即使只观察到很少的事例,甚至只有一个事例,只要测量是可靠的,也可以做结论说“发现了一种新粒子”。在这种情况下,测出新粒子的质量值是比较准的,如果事例数少,定出的新粒子的寿命的误差会比较大,因为粒子的寿命本身就是指平均寿命,需要事例数比较多时才能定得准。

许多长寿命的粒子,特别是长寿命的带电粒子都是这样地被发现的,例如正电子、 $\mu$ 子、 $\pi$ 介子、 $\Lambda$ 重子的发现都是根据几个事例做结论的。

能够这样被发现的新粒子的寿命不能太短,至少要能在存在的时间内在空间中走一段宏观上可测量的径迹,这样才能首先显示这个粒子确实存在

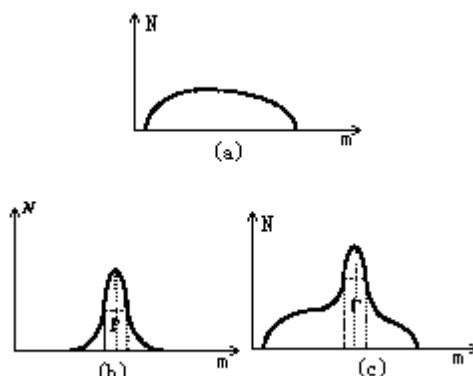
过，并提供直接观测粒子电荷、能量、动量、寿命等性质的条件。现在记录带电粒子运动径迹最精细的探测设备是核乳胶，它可以探测粒子的最短寿命是  $10^{-13}$  秒。寿命比这个更短的粒子就不能通过径迹探测的办法来直接探测和发现。

现在已经发现的 452 种粒子中，绝大多数粒子的寿命远比  $10^{-13}$  秒要短得多，这些粒子的发现都不是通过直接测量径迹的方法，是通过种种间接测量的方法发现的。其中一种重要的方法是不变质量分析的方法，大量的不稳定的介子和重子都是运用这个方法通过实验发现的。

短寿命的粒子产生后不久很快就衰变，转化成为两个或多个其他类型的粒子。由于衰变前没有走出可以观察到的径迹，没有信息可以肯定地判定这个粒子是否确实存在过。如果这粒子确实存在，并且很快衰变为几个其他类型的粒子，那么只要把这几个粒子的能量加起来，就应当等于衰变前粒子的能量。同样地把这几个粒子的动量矢量加起来，就应当等于衰变前粒子的动量。从衰变前粒子的能量和动量就可以推算出衰变前粒子的质量。这样得到的“质量”值称为这几个粒子的不变质量，它的物理意义是如果这几个粒子是由一个不稳定粒子衰变而来的，则这个不稳定粒子的质量就应该是这个不变质量。但是这里并没有说明这个不稳定粒子是否确实曾经存在过。

对于一个事例确实不能做任何判断。但如果观察了同一类的大量事例，就可以对每一个事例都算出同一组粒子的不变质量。如果在这些反应事例中，实际上并没有出现过这种不稳定粒子，则各事例算出的不变质量值是分散的，形成一个平滑的分布（如图 5-1 (a) 所示）。如果在这些反应事例中，实际上都出现了这种不稳定粒子，则各事例算出的不变质量值应集中到一个值附近处，形成一个高峰状的分布（如图 5-1 (b) 所示）。如果在这些反应事例中，实际上有一部分事例中出现过这种不稳定粒子，则各事例算出的不变质量值是既分散又有一定程度的集中，形成在一个平滑的分布的基础上又有一个高峰状的分布（如图 5-1 (c) 所示）。这样通过大量事例一起分析就可以判断在所进行的粒子碰撞反应中是否出现过某种不稳定粒子，如果出现过，还可以定出来粒子的质量、宽度、粒子衰变成哪些粒子、出现的事例数占总事例数的百分比。

如果这样定出来在反应中出现过某种粒子，而这种粒子的质量、宽度、衰变行为都和已知的各种粒子不同，就可以判断发现了一种新粒子。这种分



析探寻新粒子的方法

图5-1 不变质量分析方法示意图。其中N为事例数

就是不变质量分析方法。这种方法得到明确结果的前提是有大量的事例，事例数不够多时，难以对新粒子的存在作出确切的判断。

## 电荷

质子带有电荷  $e=1.60217733 \times 10^{-19}\text{C}$ 。所有已发现的粒子所带电荷都是质子电荷的简单整数倍，这个性质称为电荷的“量子化”。实验上对电荷的量子化进行了精确的检验，结果给出测量精确到十万亿亿分之一时仍然没有观测到和整数的差别。为什么会有电荷量子化，这是一个理论上需要回答的问题。

1931年狄拉克首先指出，尽管现在实验中没有发现磁单极，但是现有的电磁学理论允许存在磁单极，磁单极的磁荷  $g$  和任意一个和它相互作用的粒子的电荷  $e$  的乘积等于一个整数被二除。这个结果表明，如果宇宙中存在磁单极，即使只有一个，理论上就要求所有的粒子所带的电荷一定量子化。因此寻找磁单极的实验研究有特别重要的理论意义，多年来实验物理学家做了大量的工作到高空上、到很深的矿井下、在地面的实验室里，用各种方法去寻找可能存在的磁单极，到目前为止还没有能从实验上发现磁单极，还不能判断磁单极确实存在。

现在已经发现的粒子中具有的最大电荷是质子电荷的 2 倍。

## 自旋

所有的粒子都有确定的自转性质，称为粒子的自旋。粒子自旋角动量可以用一个自旋量子数  $J$  来定量描写，亦即角动量大小的平方等于  $J(J+1)$  乘约化普朗克常数的平方。粒子可以按自旋量子数  $J$  的取值分为两类：

$J$  取非负整数  $0, 1, 2, \dots$  时是玻色子；

$J$  取非负整数加二分之一  $1/2, 3/2, 5/2, \dots$  时是费米子。

粒子自旋角动量在运动方向的投影称为粒子的螺旋度。量子力学规律普遍给出，自旋量子数为  $J$  的粒子的螺旋度可以取  $J, J-1, \dots, -J+1, -J$ ，等  $2J+1$  个值。如果换成在另一个沿粒子运动方向以比粒子更高的速度运动的系统上来观察，这时粒子的运动方向反过来了，粒子的螺旋度的值也将变号。但是如果粒子的静止质量为零，则这种粒子只能以真空光速运动，并且其螺旋度只能取  $J$  和  $-J$  两个值。由于不可能通过换一个新的参考系统来观察而得到粒子的螺旋度改变符号，这两个螺旋度状态实际上是互相独立的。

电子、质子、中子、中微子的自旋都是  $1/2$ ，其中电子、质子、中子都有两个螺旋度，中微子的静止质量是零，实际上螺旋度只有  $-1/2$  一个值。光子、 $W$  粒子、 $Z$  粒子的自旋都是 1，其中  $W$  粒子、 $Z$  粒子都有三个螺旋度，光子的静止质量是零，螺旋度只有 1 和  $-1$  两个值。介子的自旋为零，当然只有一个螺旋度。现在已经发现的粒子中具有的最小的自旋量子数  $1/2$ 。

## 重子数

电子是最轻的带一个单位负电荷的稳定粒子，质子则是带一个单位正电荷的稳定粒子。电荷守恒要求电子如果能衰变的话，这个单位负电荷不能消失，必须转移到衰变后产生的某个粒子上去，但是电子本身已经是带一个单位负电荷的最轻的粒子，这样电荷守恒实际上决定了电子的稳定性。正电子

发现后，就提出了一个理论问题：质子并不是带一个单位正电荷的最轻的粒子，为什么质子不能衰变为一个正电子和一个光子。质子的稳定性可以用存在一个新的守恒量来解释，这个守恒量称为重子数。规定质子的重子数为 1，但光子和正电子的重子数为零，质子是重子数为 1 的最轻的粒子，重子数守恒决定了重子的稳定性。

中子的重子数也是 1。在中子衰变成一个质子、一个电子和一个反中微子的过程中，电荷是守恒的，重子数也是守恒的。中子不带电，是一种中性粒子，但中子的重子数是 1，这表明它不是纯中性粒子。中子的反粒子是反中子，反中子也不带电，自旋量子数也是  $1/2$ ，但它的重子数是  $-1$ ，重子数把中子和反中子区分开了。

## 同位旋

质子和中子的质量相近 [ $m_p=(938.27231 \pm 0.00028) \text{ MeV}$ ,  $m_n=(939.56563 \pm 0.00028) \text{ MeV}$ ]，自旋都是  $1/2$ ，重子数都是 1，它们参与强相互作用时，耦合常数相近，行为也相近。它们的差别主要表现为所带的电荷不同，从而电磁相互作用性质不同。它们质量的微小差别也可以归之于是与电荷不同有关的。这种情况在  $+$ 、 $0$ 、和  $-$  介子之间也可以明显地看到，它们的质量相近 [ $m_{\pm}=(139.56995 \pm 0.00035) \text{ MeV}$ ,  $m_0=(134.9764 \pm 0.0006) \text{ MeV}$ ]，自旋都是 0，重子数都是 0，它们的强相互作用性质相近。后来发现这个分族相似的特性是能够直接参与强相互作用的粒子所具有的普遍特性。德国物理学家海森伯 (Werner Karl Heisenberg) 提出，由于质子和中子如此相似，我们可以把它描写为一种粒子，即核子 N 的两个不同的带电状态。这就引进了“同位旋”的概念；并且，在强相互作用中，同位旋守恒。

“同位旋”是指在某种抽象空间中的“角动量”，在概念上与“自旋”的概念相似，只是它们隶属于不同的空间。同位旋和自旋有极大的相似性，它们的数学结构完全相同，同位旋守恒的数学表述也和角动量守恒的数学表述相同。它们的不同在于，自旋作为角动量，与普通三维空间中在旋转下的行为有关，因此说自旋在某一特定方向的投影时，是指普通三维空间中的某特定方向，在现实三维空间来看，这特定方向的选取并不固定，它可以是粒子的运动方向，也可以是空间外磁场的方向，还可以是别的方法确定的某个具体方向。然而，同位旋守恒定律的存在表示这抽象的同位旋空间尽管抽象，仍具有现实的物理意义，当说同位旋在第三轴上的投影时，它的值和粒子所带电荷有关。质子和中子统称为核子，核子是同位旋为  $1/2$  的粒子，它在第三轴上的投影等于  $1/2$  时是质子，带单位正电荷；它在第三轴上的投影等于  $-1/2$  时是中子，不带电。 $\pi$  介子是一个同位旋为 1 的粒子，它在第三轴上的投影取  $1$ 、 $0$ 、 $-1$  时分别是  $\pi^+$  介子、 $\pi^0$  介子、 $\pi^-$  介子。

同位旋守恒定律的确立表明要对粒子的运动状态进行完全的描写，还需引入更多的自由度。这些自由度通常称为内部自由度，同位旋自由度是人们最先认识的粒子运动的内部自由度。

除了质量、寿命、电荷、自旋、重子数和同位旋以外，还有许多表征粒子特性的物理量。这些物理量的取值反映了粒子参与的相互作用性质和行为。粒子的不同直接反映在参与的相互作用性质和行为的不同。

## § 6 场、粒子和真空

在物理学的发展过程中，人们对于物质存在形式的认识是在不断变化的。最初认识到微粒是物质存在的基本形式，微粒在空间占有一定的体积，有不可入性，有质量，有能量，有动量，有角动量，场是作为描述微粒间的相互作用的辅助概念引入的，并不能脱离微粒而独立存在。后来电磁学的发展使人们认识了电磁场，又认识到场不能只看作是为了描述物理规律方便而引入的概念，场本身也是物质存在的基本形式。场也具有质量，有能量，有动量，有角动量，这些性质和微粒是一样的。但是场是充满全空间的，没有不可入性，可以互相重叠地一起存在，这些性质和微粒是不一样的。场可以脱离微粒而独立存在，独立地运动、传播和演化。这时，微粒和场被认为是物质存在的两种基本形式。

粒子世界各种粒子丰富多彩的运动、相互作用、相互转化使人们对物质存在形式有了新的认识。量子场论给出了物质存在形式的一个基本物理图象，可以描述如下：

与每种粒子相对应存在一种场，场没有不可入性，充满全空间。对应各种不同粒子的各种场互相重叠地充满全空间。例如与光子相对应存在电磁场、与电子相对应存在电子场、与中微子相对应存在中微子场、与质子相对应存在质子场、与中子相对应存在中子场，它们同时存在于全空间。

各种场的能量最低的状态称为这种场的基态，当一种场处于基态时，这种场就不能通过状态的变化释放能量而输出任何信号，从而不会显现出直接的物理效应，这时表现为看不到存在粒子。场处于激发状态时表现为出现相应的粒子，场的不同激发状态表现为粒子的数目和运动状态的不同。例如电磁场的激发状态表现为出现光子，电子场的激发状态可以表现为一个电子，也可以表现为多个电子。

按照这样的认识，物质的两种存在形式中，场是更基本的，粒子只是场处于激发状态的表现。

一般说来，场的运动状态用一个复数量来描写，场的激发也通过复量来描写，互相为复共轭的两种激发状态表现为粒子和反粒子互换的两种物理状态。例如，电子场的一种激发状态表现为存在一个电子，这种激发状态的复共轭的激发状态表现为存在一个能量、动量、自旋角动量相同的正电子。如果有某种场是用实数量来描写的，相应地场的激发也用实量描写，这时复共轭就是它自己，粒子就是它自身的反粒子。这种场就是纯中性场，这种粒子就是纯中性粒子。电磁场就是用实数量来描写的纯中性场，光子的反粒子也就是它自己。

反粒子的概念最初是狄拉克提出的，狄拉克提出空穴理论预言正电子的存在。按照空穴理论的认识。尽管正电子的性质和电子的性质在物理上是高度对称的，正电子的地位和电子并不对称，电子是粒子而正电子是“空穴”。现在的认识就不同了，他们处于完全对称的地位。正电子是电子的反粒子，电子也是正电子的反粒子，它们之间是复共轭的关系。

现在知道，一切粒子都有相应的反粒子，反粒子的质量、寿命与自旋与粒子相同，但带的电荷、重子数等都和粒子符号相反。只有中微子有所不同，中微子的质量为零，自由中微子永远以真空光速运动。中微子的螺旋度只有  $-1/2$ ，也就是说只有“左旋”中微子。反中微子的质量也是零，也永远以真

空光速运动。但反中微子的螺旋度只有  $1/2$ ，也就是说只有“右旋”反中微子。纯中性粒子的反粒子就是它们自己，已知的纯中性粒子的自旋量子数都是整数。光子和中性  $^0$  介子都是纯中性粒子。

当所有的场都处于基态的时候，任何一个场都不可能释放出能量而给出信号，显现出粒子，这时是物理上的真空。由此可见，真空并不是“真”的“空”无一物。真空状态时，全空间充满了各种场，物理真空并不空。

互相重叠充满全空间的各种场之间有相互作用，无论是处于基态还是处于激发状态的场都同样地与其他场相互作用。

## § 7 相互作用

### 相互作用的场论机理

粒子是场处于激发状态的表现，因此粒子间的相互作用来自场之间的相互作用。场之间的相互作用是粒子转化的原因。

场论对粒子间的相互作用的机理给出了清楚的图象。现在考虑中子的衰变过程。自由中子为什么会自动衰变？一个自然的回答是中子通过相互作用而衰变。再问中子为什么会自动衰变？自然的回答是中子和质子、电子以及反中微子相互作用的结果。然而当中子存在的时候，质子、电子以及反中微子都还不存在。而当质子、电子以及反中微子存在时，中子却已经不存在了。中子和质子、电子以及反中微子没有一个时刻同时存在，它们之间又怎么能相互作用呢？这个物理图象和物理概念上的表观上的矛盾，在场论中自然地解决了。

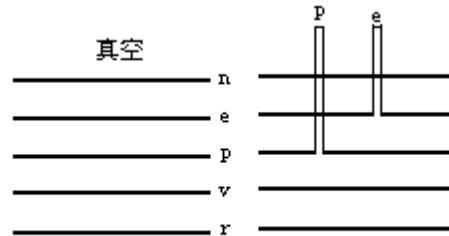


图5-2 根据场论给出的真空和粒子基本物理图象

根据场论给出的基本物理图象，反过来再看中子的衰变过程。在图 5-2 所示的示意图上，我们用一条线代表一种场，水平直线代表场处在基态，水平线上的隆起峰代表场的激发，表现为一个粒子。左边为真空，即所有场都处于基态的情形，右边为有一个质子和一个电子的状态。图 5-3 描写  $n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$  的衰变过程。开始时，中子场处于激发状态，表现为存在一个中子，而质子场、电子场和中微子场则处于基态，表现为没有质子、电子和中微子（或相应的反粒子）。经过中子场与质子场、电子场和中微子场之间的弱相互作用，中子场可以跃迁到基态把激发能量传过去而引起质子场、电子场和中微子场的激发。表现为中子消失而产生了一个质子、一个电子和一个反中微子。这就是中子衰变过程的场论图象。在这个图象中，衰变过程得以发生的原因是场之间的弱相互作用。正因为中子场与质子场、电子场和中微子场之间存在弱相互作用的联系，才使中子场的激发状态的改变引起质子场、电子场和中微子场激发状态的改变而表现为中子衰变过程。

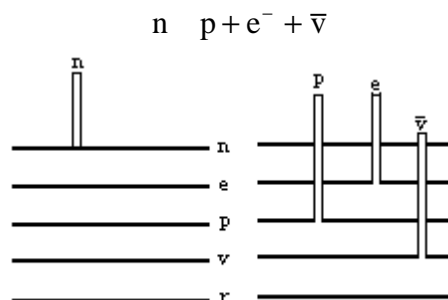


图5-3 中子衰变过程的场论图象

## 四种相互作用

粒子之间存在相互作用。粒子间的相互作用是通过交换媒介粒子来实现的。不同的相互作用的区别在于媒介粒子的不同以及粒子放出和吸收媒介粒子的能力不同。粒子间相互作用随距离的减弱行为用相互作用力程描写，力程的物理意义是相互作用的有效作用范围，相互作用力程的数值正比于媒介粒子质量的倒数。如果媒介粒子的质量用吉电子伏特为单位，力程用费米为单位，则力程的值可以由 0.197 被媒介粒子的质量去除得出。粒子放出和吸收媒介粒子的能力用相互作用耦合常数来描写，不同的相互作用的耦合常数不同，常常在数量级上有很大的差别。

现在已经发现的粒子之间的相互作用有四种。一种是电磁相互作用，其媒介粒子是光子，一种是引力相互作用，其媒介粒子是引力子。这两种媒介粒子的静止质量都是零，这就决定了这两种相互作用都是长程作用，即力程等于无穷大的相互作用。正因为它们是长程作用，随距离的增加而减弱得不快，在宏观世界中就可以观察和研究，并且在 19 世纪就已经在宏观世界中研究得相当清楚了。再一种相互作用是弱相互作用，它的媒介粒子是带正电荷和带负电荷的 W 粒子和不带电的 Z 粒子。这三种粒子都有很重的静止质量，W 粒子的质量是质子质量的 85.5 倍，Z 粒子的质量是质子质量的 97.2 倍。这就决定了弱相互作用是力程很短的短程力，其力程约为一千分之二点四费米，即一百亿亿分之二点四米。还有一种是强相互作用，它的媒介粒子是分子和胶子，最轻的介子是  $\pi$  介子，它的质量是质子质量的 0.149 倍。这就决定了强相互作用也是短程力，其力程比弱相互作用的力程约大三个数量级，约为 1.4 费米，即一千万亿分之一点四米。这四种相互作用的媒介粒子中， $\pi$  介子的自旋可以是零或 1，引力子的自旋是 2，其他的媒介粒子自旋都是 1。

四种相互作用的强度有很大的差别。如果有两个质子相距约为 2.5 费米，即一千万亿分之二点五米的距离，两个质子之间这四种相互作用的有效耦合常数的比较可以从下列表中看出。

相互作用类型	强作用	电磁作用	弱作用	引力作用
媒介粒子	介子、胶子	光子	W、Z	引力子
媒介粒子自旋	0, 1	1	1	2
质量 ( GeV )	0.13960	0	80.2, 91.2	0
力程 ( 费米 )	1.413		0.00246	
宏观表现	无	有	无	有
相互作用强度	0.15	0.0073	$6.34 \times 10^{-10}$	$5.90 \times 10^{-39}$



## § 8 粒子世界的对称和对称性

### 对称和破缺

对称性是人们在观察自然和认识自然过程中所产生的一种观念。在自然界物质世界千变万化的运动演化过程中，显现出各式各样的对称性。太阳是一个球体，而球体在绕过中心的任意轴旋转某一角度后，其形状和位置都不显现任何可以察觉的变化。球体的这种性质称为绕球心的旋转对称性。正是因为如此，没有人会说看到太阳横过来或倒过来了。如果要想确切判断球体是否绕通过中心的任意轴转了一个角度，就需要在球面上添加某些记号，根据这些记号的位置变化来判断球是否作了转动。太阳表面上的黑子就可以起到这种记号的作用，人们通过观察黑子的运动判断太阳是有自转的。实际上，这些记号的作用就是使球不再具有严格的旋转对称性，亦即在一定程度上破坏了旋转对称性。物理学上称这种情况为对称性破缺。

自然界物质世界千变万化地运动演化，从一个侧面来说，就体现为显现出各式各样的对称性，同时又通过这些对称性的演化和破缺来反映出运动演化的特点，为认识物质世界运动演化的基本规律提供线索。日夜交替是人们最熟知的自然现象，24 小时的昼夜循环，在时间上显现出具有周期性的平移对称。进一步的研究弄清昼夜循环的周期对称性的来源在于地球的自转。但是，我们无法根据日夜交替的特点来区分任何两天，为了能够区分和判断它，就需要找到对称性破缺的表现。人们在长期的生活中，发现昼夜的时间长短比例和夜间星群的分布都有相似的周期性变化，而且月亮每天的位置和形状也不相同，后来，逐渐有了年的概念并产生了历法。四季交替的年的周期对称性的来源在于地球的公转以及地球自转轴对公转平面有一定的倾斜。从对称性的角度来看，地球上的生活环境显现出以 24 小时为周期的时间平移对称性，但正是由于地球自转轴对公转平面的倾斜，使得这个对称性又有了微小的破缺，它提供了不同的两天之间的区分依据，同时通过这个破缺又显现出年的周期对称性和农历月的周期对称性。如果日的周期对称性严格的不破缺，如果地球自转轴垂直于公转平面，那就不可能显现出四季交替的年的周期对称性和农历月的周期对称性。

从一定意义上来说，运动的多样性的一个重要表现是自然界同时显现出多种不同类型的对称性。这些对称性互相交织在一起，在演化过程中不断有对称性发生破缺，同时往往又显现出新的对称性来。因此研究自然现象中显现的各种对称性，研究它们产生和破缺的演化规律，是人们认识自然规律的一个重要方面。

### 变换和对称的分类

一个球具有绕球心的旋转对称性，这是把球在转动前和绕球心转某一角度后的情况进行比较而得出的结论。由此可见，无论什么样的对称现象，都是与把两种不同的情况加以比较分不开的。在数学上，将两种情况间通过确定的规则对应起来的关系，称为从一种情况到另一种情况的变换。物理学中对称性的观念可以概括为：如果某一现象或系统在某一变换下不改变，则说该现象或系统具有该变换所对应的对称性。

既然每一种对称性都和某种特定的变换相联系，那么对称性的千差万别也就集中反映在与之相联系的各种变换上。因此，可以根据变换所涉及的对象以及变换的性质来对对称性进行分类。对空间性质进行变换所对应的对称性统称为空间对称性，例如在三维空间中描述物体位置和运动的参考系的原点平移的变换对应的是空间平移对称性，参考系的坐标架绕过坐标原点的任意轴旋转的变换对应的是空间旋转对称性；对时间性质进行变换所对应的对称性统称为时间对称性，例如计时原点平移的变换所对应的是时间平移对称性。空间对称性和时间对称性是最基本、最常见的对称性，但并不是所有的对称性都能归入到这两类对称性之中。

各种物体的性质及其运动的不同，不仅体现在对空间和时间的描述上，还体现在一些与空间和时间的描述相独立的其他性质上。物理学中把通过与空间和时间相独立的其他性质的变换所体现的对称性，称为内部对称性。在宏观物理学的范围里，内部对称性常常具有很大的直观性，因此认识其存在并没有很大困难。在微观范围里，内部对称性的直观性减弱了，这并不表明内部对称性的重要性减少了。事实上，随着物理学对微观世界的探索日益深入，认识到的内部对称性也越来越多，如同位旋、奇异数、粲数、底数、轻子数、重子数、P宇称、C宇称、G宇称、CP宇称……等。

### 内特尔定理

在物理学规律的探索过程中，对称性的观念起了非常重要的作用。当人们熟悉了对称性的观念之后，便想要弄清对称性和自然规律的关系是什么，如何通过已经观察到的对称性来探索未知的事物。

德国女数学家内特尔（Amalie Emmy Noether）在这方面探索研究中证明了一个重要定理，即内特尔定理。这个定理的得出是理论物理学的重要进展，这个定理首先是在经典物理学中普遍证明的，后来经过推广，很快证明在量子力学范围内也能普遍成立。这个定理指出：如果运动规律在某一不明显依赖于时间的变换下具有不变性，必对应存在一个守恒定律。

按照内特尔定理，物理规律如果具有空间坐标平移不变性，则相应地存在一个守恒定律，即动量守恒定律；物理规律如果具有空间转动不变性，则相应地存在一个守恒定律，即角动量守恒定律；物理规律如果具有时间平移不变性，则相应地存在一个守恒定律，即能量守恒定律。这些守恒定律是在经典物理中早已熟知的，这些对称性涉及的变换都是时空性质上的变换，这些对称性可以分类为时空对称性。粒子物理学的发展揭示出微观粒子（和相应的场）的运动规律具有许多过去不认识的内部对称性。前面已讲到的同位旋和重子数，就是内部对称性所决定的守恒量。

## § 9 粒子世界的守恒量

在对物质运动基本规律的探讨过程中，守恒定律的研究占了重要的地位。从历史发展过程来看，无论是经典物理学还是近代物理学，一些重要的守恒定律常常早于普遍的运动规律而被认识。质量守恒、能量守恒、动量守恒、电荷守恒就是人们最早认识的一批守恒定律，这些守恒定律的确立为人们认识普遍运动规律提供线索和启示，是人们最终认识普遍运动规律是不可缺少的重要环节。

能量、动量、角动量、电荷……等是人们在经典物理学中就已熟知的守恒量。在微观物理学中，特别是在粒子物理学中，除了这些守恒量之外，还出现许多新的守恒量，如同位旋、奇异数、粲数、底数、轻子数、重子数、P宇称、C宇称、G宇称、CP宇称……等。

微观物理学中遇到的守恒量，从其与经典物理学的关系来说，又可以区分为两类：有经典对应的守恒量和无经典对应的守恒量。能量、动量、角动量、电荷等都是经典物理学的研究中早已熟知的守恒量，它们都属于有经典对应的守恒量。有经典对应的守恒量都是相加性守恒量。同位旋、奇异数、粲数、底数、轻子数、重子数、P宇称、C宇称、G宇称、CP宇称都是无经典对应的守恒量。

从守恒量的数学表述来看，基本的守恒量可以区分为两大类：第一类守恒量，一个复合体系的总守恒量是其各组成部分所贡献该守恒量的代数和，例如多个粒子组成的系统，它的总电荷等于所有粒子的电荷之和，它的总角动量等于所有粒子的自旋角动量和轨道角动量之总和；第二类守恒量，一个复合体系的总守恒量是其各组成部分该守恒量的乘积，一般说来，这类守恒量的可取值只能是+1或-1。这两类守恒量可以分别称为相加性守恒量和相乘性守恒量。从物理学上考察，对称性所涉及的变换可以是连续变换，也可以是分立变换。连续变换不变性所决定的守恒量是相加性守恒量，即守恒性质表现为系统中各部分该守恒量的代数和和运动过程中不变。分立变换不变性所决定的守恒量是相乘性守恒量，即守恒性质表现为系统中各部分该守恒量的乘积在运动过程中不变。能量、动量、角动量、电荷、同位旋、奇异数、粲数、底数、轻子数、重子数都是相加性守恒量；P宇称、C宇称、G宇称、CP宇称、全同粒子交换变换都是相乘性守恒量。

有经典对应的守恒量都是相加性守恒量。相乘性守恒量都是无经典对应的守恒量。

既然守恒定律的表现形式为一个孤立系统某物理量的总量在运动过程中不随时间改变，那么守恒定律的成立与否就直接和该孤立系统的运动规律有关，特别是与相互作用有关。从这个关系上来考察，又可以把守恒定律分为两类，从而把守恒量也分为两类。如果一个守恒定律对各种相互作用都成立，则称为严格守恒律；如果一个守恒定律对某些相互作用成立，但对另一些相互作用则不成立，并且在运动过程中后者影响是次要的，则称为近似守恒定律（或部分守恒定律）。

按照上述区分，能量、动量、角动量、电荷是有经典对应的相加性严格守恒量；轻子数、重子数都是无经典对应的相加性严格守恒量；同位旋、奇异数、粲数、底数、顶数是无经典对应的相加性近似守恒量，同位旋只在强相互作用下守恒，奇异数、粲数、底数、顶数在强相互作用和电磁相互作用

下守恒，但在弱相互作用下可以不守恒；全同粒子交换变换是无经典对应的相乘性严格守恒量；P 宇称、C 宇称、G 宇称、CP 宇称是无经典对应的相乘性近似守恒量，G 宇称只在强相互作用下守恒，P 宇称、C 宇称在强相互作用和电磁相互作用下守恒，但在弱相互作用下可以不守恒，CP 宇称在强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用下都守恒，但在弱相互作用下可以含有约千分之二的不守恒。

## § 10 左右对称性和宇称守恒问题

在宏观范围内运动规律具有很好的左右对称性，亦即在空间三个坐标轴都反向的空间反射变换下具有不变性，但在宏观范围内这种不变性并不对应存在守恒定律。在微观范围内如果运动规律具有左右对称性，则对应存在 P 宇称守恒定律，这时系统的 P 宇称值将在整个运动过程中恒为+1 或-1。

1956 年前后，在对最轻的奇异粒子衰变过程的研究中遇到了一个疑难问题，即“ $\theta - \tau$  疑难”。这个疑难表现为：实验中发现了两种质量、寿命和电荷都相同的粒子和，衰变时，衰变为两个介子，衰变为 3 个介子。实验结果的分析表明，3 个介子的总角动量为零，宇称为负；而 2 个介子的总角动量如为零，则宇称只能是正。因此从质量、寿命和电荷来看，和似乎应是同一种粒子，但是从衰变行为来看，如果宇称是守恒量，则和就不可能是同一种粒子。

1956 年美籍华裔物理学家李政道和杨振宁全面分析了与  $\theta - \tau$  疑难有关的全部实验和理论工作之后指出，这个疑难的关键在于认为在微观粒子的运动过程中宇称是守恒的。他们指出，在强相互作用和电磁相互作用过程中宇称守恒是得到了实验的判定性检验的，但是在弱相互作用过程中宇称守恒并没有得到实验的判定性检验。李政道和杨振宁提出，这个疑难产生的原因在于弱相互作用过程中宇称可以不守恒。他们进一步建议可以通过钴 60 的衰变实验来对这一点进行判定性检验。实验的原理是利用核磁共振技术使钴 60 的原子核极化，也就是使原子核的自旋方向沿着确定的方向排列，然后观察钴 60 通过  $\beta$  衰变放出电子的方向分布。如果宇称是守恒的，则包含自旋轴正向的半球方向内射出的电子数应与包含自旋轴负向的半球方向内射出的电子数相近，即左右对称；反之如果这两个半球方向内射出的电子数不相等，即表现出明显的左右不对称性，则表明弱相互作用过程中宇称可以不守恒。1957 年美籍华裔物理学家吴健雄精确地进行了这个实验，证实了李政道和杨振宁提出的分析判断。

过去人们对于守恒定律的理解比较简单，弱相互作用宇称不守恒的确立告诉人们：各种守恒定律的适用范围可以是不同的，有些物理量在一切相互作用过程中都是守恒的，而有些物理量则只在某些相互作用过程中才是守恒的。宇称就是人们认识的第一个只在某些相互作用过程中才守恒的相乘性守恒量。在研究各种守恒定律时，无论涉及的是相加性守恒量还是相乘性守恒量，都需要注意和研究这些守恒定律的适用范围。

P 宇称在强相互作用和电磁相互作用过程中守恒，但在弱相互作用过程中不守恒。因此对不直接参与强相互作用和电磁相互作用的中微子，没有确定的 P 宇称。

## § 11 CP 守恒和 CP 破坏

粒子世界有三个基本的分立变换：一个是粒子和反粒子互换的正反粒子变换，简称 C 变换；一个是空间三个坐标轴都反向的空间反射变换，简称 P 变换；一个是时间反演变换，简称 T 变换。

理论上可以证明一个重要的基本定理，即 CPT 定理，即在正反粒子变换、空间反射变换、时间反演变换的联合作用之下，满足因果关系和自旋统计关系的点粒子的运动规律是不变的。如果运动规律在空间反射变换下是不变的，在 C 变换下也是不变的，并且在时间反演变换下也是不变的，那么 CPT 定理显然是成立的；但是，如果宇称是可以改变的，即在空间反射变换下运动规律不具有不变性，而按 CPT 定理，运动规律在 CPT 联合变换下是不变的，那么就可以判断运动规律至少在 C 变换或时间反演变换其中的一个之下不再保持不变。

在李政道和杨振宁发现弱相互作用中宇称可以不守恒之后，经过物理学家的研究，很快就确认弱相互作用的运动规律是在 C 变换下不再保持不变。但是弱相互作用的运动规律在正反粒子变换和空间反射变换的联合变换，即 CP 变换下仍然是不变的。在此基础上，1958 年建立了正确描写弱相互作用的普遍理论。

1964 年克洛宁 (J. W. Cronin) 等在实验中证实弱相互作用中 CP 变换不变性也不再保持，进一步的研究表明，弱相互作用中 CP 破坏的部分只占千分之二。为什么在弱相互作用中会有 CP 破坏的部分，为什么 CP 破坏的部分只占千分之二，这种 CP 破坏的机理是什么，一直是现代粒子物理理论研究的重要课题之一。

## § 12 奇异粒子和奇异数

### 奇异粒子

1947 年，罗彻斯特 (G. Rochester) 和巴特勒 (C. Butler) 在宇宙线实验中首先观察到了后来被称为奇异粒子的一类粒子，但是只有在加速器实验中大量产生了奇异粒子后，它们的“奇异”特性才充分地展现出来并得到系统的研究。这些新粒子有一些重要的、过去已发现的强子所没有的奇异特性，所以被统称为“奇异粒子”。在这以前已经发现并已被熟知的核子和介子等强子则统称为普通强子，普通强子和光子、电子、正电子、 $\mu$ 子、中微子、反中微子等合起来统称为普通粒子。奇异粒子具有以下几个明显的特性：

(1) 它们是协同产生、独立衰变。也就是在高速粒子的碰撞过程中至少两个奇异粒子一起产生，然后每个奇异粒子再分别独立地衰变掉，最终衰变成的粒子都是过去已知的粒子，即普通粒子，而不再有奇异粒子了。

(2) 它们是快产生、慢衰变。也就是说奇异粒子产生于粒子的高速碰撞，碰撞经历的时间数量级为  $10^{-24}\text{s}$ ，而它们衰变的平均寿命则长得多，时间数量级为  $10^{-10}\text{s}$  或更长，两个时间数量级的差别约为  $10^{14}$  倍。

1953 年美国物理学家盖耳-曼 (Murray Gell-Mann) 和日本物理学家中野董夫、西岛和彦彼此独立地提出奇异粒子的这些特性可以用客观上存在一种新的守恒量子数来概括。这种新守恒量子数称为奇异数，它只能取整数值。过去熟知的普通粒子的奇异数都定为零。奇异粒子的奇异数不为零。在强相互作用和电磁相互作用过程中，奇异数守恒，在弱相互作用过程中，奇异数可以不守恒，也就是说在弱相互作用过程中奇异数可以不改变，也可以改变 1。奇异粒子的产生是通过强相互作用的碰撞来实现的，碰撞的整个过程时间很短。由于实验只能通过普通粒子的碰撞来实现，所以强相互作用过程中奇异数守恒决定了末态中奇异粒子必须协同产生，这样才有可能使产生的奇异粒子的奇异数互相抵消。奇异粒子的衰变是通过弱相互作用实现的过程，因为相互作用很弱，所以需要的时间较长，但不再要求奇异数守恒了，这样每一个奇异粒子可以分别独立地衰变成几个普通粒子。

因此，奇异粒子“奇异”性质的来源在于奇异数  $S$  的近似守恒性质：对于强相互作用和电磁相互作用过程， $S=0$ ；对于弱相互作用过程， $|S|=0, 1$ 。

### 奇异数

各种粒子奇异数  $S$  的值是根据奇异数守恒的要求以及实验结果分析所赋予的。从这两方面的要求来说，各种粒子的奇异数  $S$  的值并没有完全确定下来。事实上如果把已经确定的各种粒子奇异数  $S$  的值都乘一共同常数值作为新定义的奇异数  $S$  的值，则上述奇异数守恒的要求仍然能够满足；如果把上面所给出各粒子的  $S$  值再加一个强相互作用过程中守恒的相加性守恒量作为新定义的守恒量，上述奇异数守恒的要求亦仍然能满足。为了避免这些不确定性带来的任意性，粒子物理学家实际上采取了自然的约定，即以最初确定的几个奇异粒子的奇异数的值为标准来确定其他粒子的奇异数的值。

盖耳-曼和西岛和彦提出强子的电荷  $Q$ 、同位旋沿“第三方向”（注意这是指抽象的同位旋空间而言）的投影  $I_3$ 、重子数  $b$  和奇异数  $S$  有以下关系：

$$Q = I_3 + \frac{1}{2} (b + S) ,$$

称为盖耳-曼-西岛关系。以后的实验充分证明这个关系的普遍性，这个关系在 60 年代强子对称性研究及强子分类理论的探索中是一个重要的基本关系式。盖耳-曼-西岛关系中的重子数  $b$  和奇异数  $S$  总是相加在一起出现，有时人们又引入超荷  $Y=b+S$  来代替奇异数。

奇异数的引入很好地解释了奇异粒子的特性。在这以前，粒子物理学所认识到的守恒量除能量、动量、角动量、电荷外，按加法计算的守恒量只有同位旋的分量，但是同位旋的概念和粒子的电荷有一定的联系，而奇异数则完全是根据实验的规律性独立地总结出来的客观存在的守恒量。

奇异量子数的下述两个特点对粒子物理学的发展是有启示意义的：（1）它是一个“近似”守恒的相加性守恒量，在强相互作用和电磁相互作用下严格守恒，但是在弱相互作用下可以不守恒；（2）与电荷不同，奇异数本身不是某种相互作用的“荷”，奇异数不代表某种相互作用的作用强度，因此它的确定只能通过实验的分析总结，不能像电荷那样通过它所体现的相互作用性质的动力效应来测定。奇异数的存在和被认识给人们以启示：粒子物理中丰富多彩的内容表现之一就是自然界中客观上还可能存在其他一些反映粒子内部性质的量子数，它们有可能是“近似”守恒量，有可能并不是某种相互作用的“荷”。

1974 年以后发现了粲数  $C$ ，1977 年以后发现了底数  $B$ ，1995 年发现了顶数  $T$ ，都是属于类似于奇异数的这类量子数。考虑到强子物理的这些发展，盖耳-曼-西岛关系已经推广为

$$Q = I_3 + \frac{1}{2} (b + S + C + B + T) 。$$



## § 13 粒子的分类

现在已经发现的可以自由状态存在的粒子按它们参与相互作用的性质分为以下几类：

(1) 规范玻色子：各种相互作用的媒介粒子。

已经发现的可以自由状态存在的规范玻色子有 4 种：一种是电磁相互作用的媒介粒子，即光子；另外 3 种是弱相互作用的媒介粒子，即带正电荷和带负电荷的  $W$  粒子以及不带电的  $Z$  粒子。

原始的强相互作用称为色相互作用，它的媒介粒子称为胶子，胶子有 8 种。有实验证据表明在粒子参与强相互作用时，胶子确实在相互作用过程中存在并且确实在起作用。但是迄今为止还没有发现自由状态下的胶子。由于引力相互作用太弱，实验上也还没有发现自由状态下的引力子。

(2) 轻子：不直接参与强相互作用的粒子

已经发现的带电轻子有 3 种，即电子、 $\mu$  子、 $\tau$  子，它们都带一个单位的负电荷，还有 3 种分别和电子、 $\mu$  子、 $\tau$  子对应的不带电的中性轻子，即 3 种中微子，它们的静止质量可能都是零。这 6 种粒子和它们的反粒子（通常称为反轻子）共 12 种轻子，它们的自旋都是  $1/2$ 。

电子是最早被发现的带电轻子，后来到 1936 年又在宇宙线实验上发现了  $\mu$  子后，人们发现电子和  $\mu$  子的相互作用性质完全相同，它们都是带一个负电荷的自旋量子数为  $1/2$  的粒子，都是不直接参与强相互作用，但都可以直接参与电磁相互作用和弱相互作用，并且相互作用行为完全相同。它们之间的唯一的不同在于质量不同， $\mu$  子的质量是  $105.658389\text{MeV}$ ，即是电子的  $206.7683$  倍。它们运动行为的不同都可以归结为来自于质量的不同， $\mu$  子可以被看作是一个“重电子”。为什么相互作用性质完全相同的电子和  $\mu$  子质量差  $206.7683$  倍，这就成为粒子物理发展中的一个重大的理论疑难问题，称为  $e-\mu$  疑难。

人们曾经推测，可能  $\mu$  子能参与某种新的相互作用，而电子不能直接参与这种新的相互作用，这种新的相互作用性质造成它们之间质量上的差别。如果是这样的话，这种相互作用会造成  $206.7683$  倍电子质量的质量差，它应该是远比电磁相互作用要强得多的相互作用。对  $\mu$  子进行了大量的细致的实验研究来寻找存在这种新的相互作用的证据，始终没有找到。这个疑难问题一直没有解决，又发现了  $\tau$  子，它的相互作用性质和电子以及  $\mu$  子完全相同，然而它的质量是  $1777.1\text{MeV}$ ，是  $\mu$  子的  $16.8193$  倍，是电子的  $3477.7$  倍，过去的  $e-\mu$  疑难又发展成为三代轻子问题。

$e-\mu$  疑难提出时的依据是电子和  $\mu$  子的相互作用性质完全相同，它们都不直接参与强相互作用，电磁相互作用性质相同反映在它们都带一个单位负电荷上，弱相互作用性质相同反映在它们参与的弱相互作用行为相同和耦合常数相同上。这个情况又称为带电轻子弱相互作用的普适性。 $\tau$  子发现后，这种情况再次出现显示出电子、 $\mu$  子和  $\tau$  子的弱相互作用性质具有普适性， $e-\mu$  疑难又发展成为三种带电轻子弱相互作用普适性的问题和三代轻子起源问题。

带电轻子弱相互作用普适性的问题集中表现在  $\mu$  子和  $\tau$  子的弱相互作用耦合常数比值为 1。耦合常数的值可以通过测量衰变的寿命值估算出来，由于它们的质量相差很远，必须充分估计到质量差带来的影响。 $\mu$  子和  $\tau$  子的

弱相互作用耦合常数比值和三个物理量的精确测量值有关：第一个是  $\mu$  子的质量值；第二个是  $\mu$  子的寿命值；第三个是  $\mu$  子衰变到电子、中微子和反中微子的这种衰变方式在所有的衰变中所占的百分比。80 年代后期，综合粒子物理实验得到  $\mu$  子和  $\tau$  子的弱相互作用耦合常数比值明显地偏离 1。如果这个结果被确认下来，就意味着带电轻子弱相互作用普适性遭到破坏，这问题成为粒子物理实验和理论研究注视的一个重要问题。90 年代初期，中国和美国物理学家合作在北京正负电子对撞机上以远比前人高得多的精度重新测量了  $\mu$  子的质量，再加上  $\tau$  子寿命值的测量值的改进，显示带电轻子弱相互作用普适性仍然保持。因此留给理论的需要解决的问题仍然是带电轻子弱相互作用普适性的问题和三代轻子起源问题。

(3) 强子：可以直接参与强相互作用的粒子统称为强子，它们又按自旋量子数和重子数分为两类。

介子：自旋量子数为零或正整数，重子数为零的强子。

重子：自旋量子数为零或正整数加二分之一，重子数为+1 或-1 的强子。

现在已经发现的介子共 160 种，重子数为+1 的 138 种重子和它们的反粒子（重子数为-1，通常称为反重子）共 276 种。现在已经发现的粒子总数为 452 种，其中 436 种是强子，占了其中的绝大多数。

在所有这些强子中，只有质子和反质子是稳定粒子，其他强子在自由状态下都要衰变。有少数几个强子主要是通过电磁相互作用衰变，有一批强子是通过弱相互作用衰变，绝大多数的强子是通过强相互作用衰变。自由中子衰变的平均寿命是 887.0 秒，但是当中子和质子结合成原子核时，中子就可以成为稳定的了。氦核是由一个质子和一个中子结合而成的，但在氦核中的中子却是稳定的。这是因为质子和中子结合成氦核时，已经放出了大量的能量，这样氦核所具有的能量比一对自由质子和自由中子能量之和要低。如果氦核内的中子衰变，氦核将衰变为两个质子、一个电子和一个反中微子，但是两个质子不能结合成一个复合态，而两个自由质子、一个电子和一个反中微子的能量之和大于氦核所具有的能量，这样就造成氦核实际上不能衰变。正是由于这个原因，尽管自由中子是不稳定的，但是在各种元素的原子核中却有大量的中子稳定地存在着。也正是由于同样的原因，尽管自由质子是稳定的，但和中子一起组成原子核的质子在特殊条件下却可以是不稳定的。例如，钠 21 原子核可以衰变为氦 21 原子核加一个正电子和一个中微子，这个过程正是因为有一个组成钠原子核的质子衰变成一个中子加一个正电子和一个中微子，而这个中子仍然留在原子核内作为组成氦原子核的中子，并不成为自由中子飞出来。

## § 14 强子结构的夸克模型理论

60年代初期,实验上发现了大量的新强子。在对大量强子及其运动性质分析的基础上,1964年美国物理学家盖耳-曼和兹韦格(George Zweig)相互独立地提出了强子的结构模型,认为所有的强子都是由更深层次的粒子所组成。对于这种更深层次的粒子,盖耳-曼称之为夸克,兹韦格称之为爱司,现在一般都称之为夸克,称这个强子的结构模型为夸克模型。盖耳-曼和兹韦格当时提出夸克有3种,称为三“味”,即“上夸克”、“下夸克”、“奇异夸克”,分别用符号u、d、s代表。夸克的自旋量子数为二分之一,重子数为三分之一,上夸克带有正三分之二单位的电荷,下夸克和奇异夸克都带有负三分之一单位的电荷。上夸克和下夸克的奇异数为0,奇异夸克的奇异数为-1。重子由3个夸克组成,反重子由3个反夸克组成,介子由一对夸克和反夸克所组成。夸克模型可以很好解释当时已发现的所有强子及其运动性质,并给出许多预言。

1963年粒子物理实验中已经发现了9个极不稳定的自旋量子数等于 $3/2$ 的重子,质量都在1230MeV到1535MeV范围内,平均寿命都只有几千万亿亿分之一秒。按夸克模型,将这9个重子的组成记入符号后的括弧内为(uuu)、(uud)、(udd)、(uud)、(uus)、(uds)、(dds)、(uss)、(dss)。夸克模型认为,这9个粒子应该属于由10个粒子组成的一族。从这9个重子出发,预言还应该存在一个由3个奇异夸克(sss)组成的自旋量子数也等于 $3/2$ 的重子。理论预言重子带一个单位的负电荷,其质量约为 $m=1678\text{MeV}$ ,平均寿命约为一百亿分之一秒,这个寿命值比已经发现了的9个粒子的寿命值长了约12个数量级,从粒子物理世界的标准来说是相当稳定的粒子。理论还预言重子衰变时的主要衰变方式有3种:一种是衰变为一个重子和一个带负电荷的介子;另一种是衰变为一个中性的重子和一个带负电荷的介子;再一种是衰变为一个带负电荷的重子和一个中性的介子。

夸克模型认为介子和重子都是分族地存在的,每一族粒子具有相同的自旋量子数,它们的相互作用性质相近。当时已经知道自旋量子数为0和1的介子都已有8个粒子组成一族,自旋量子数为 $1/2$ 的重子也已有8个粒子组成一族。这几族粒子都是族内粒子性质相近,表现在平均寿命上,或者都是长寿命粒子,或者都是极不稳定的短寿命粒子。夸克模型对重子的这个预言使物理学家们非常兴奋,因为预言所依据的已经发现的9种粒子都是极不稳定的、寿命极短的粒子,然而预言其应该存在的却是一个衰变行为和它们极不相同,和它们比起来寿命长得出奇,要长12个数量级的粒子,这在粒子物理学的发展中还是初次遇到。在实验上检验具有这些性质的重子是否确实存在就成为对强子结构的夸克模型理论的一个判定性检验。

1964年,美国Brookhaven国家实验室的粒子物理实验中发现了一个带单位负电荷的重子,其质量为 $m=1672.45\text{MeV}$ ,平均寿命为0.822乘一万亿分之一秒。这种重子衰变时的主要衰变方式果然是理论所预言的那3种。粒子的质量、寿命、主要衰变方式都完全符合夸克模型的预言,这样强子结构的夸克模型理论得到了判定性检验。

夸克和反夸克结合成强子是通过比电磁相互作用强得多的相互作用而实现的,这种相互作用称为色相互作用。色相互作用的媒介粒子是胶子,夸克

和反夸克通过交换胶子而结合成强子，夸克和反夸克的可以放出或吸收胶子的能力来自于它们具有色荷。夸克可以具有的色荷有 3 种，即每味夸克和反夸克又都分别各有 3 “色”。夸克放出和吸收胶子时其所带色荷可以改变，也可以不改变，这反映为胶子有  $3 \times 3 - 1 = 8$  种，带有 8 种复合色。强子结构的夸克模型还进一步给出，除了重子和介子外，还可能有两个或三个胶子组成的强子，称为“胶球”；还可能由两个夸克和两个反夸克组成的强子，称为“四夸克态”；还可能由一对正反夸克和一个胶子组成的强子，称为“混杂子”。如果确有胶球、四夸克态或混杂子存在，它们显现出来的实验行为和一对夸克和反夸克组成的介子有极大的类似性，要把它们区分开来，需要做大量的实验研究和理论分析工作。实验和理论的分析给出，现在实验已发现的 160 种介子中，有两种粒子是胶球的有希望的候选者，有一种粒子有可能是四夸克态。

## § 15 强子结构的基本图象

在 70 年代中期，由于实验和理论的研究工作都取得了一系列重要的进展，使人们对强子内部结构规律的认识逐渐地明朗和深入。概括起来，可以归结为以下几点：

(1) 强子是由更深层次的粒子夸克和胶子组成的复合粒子。夸克按电荷、弱相互作用性质以及在相互作用中显现的质量加以区分，可以分成为若干“味”。现在实验上已表明，组成强子的夸克不止三味，而是有六味。它们分别用  $u, d, s, c, b, t$  表示。

(2) 每种味的夸克按其在强相互作用中的地位又区分为 3 种，称之为三“色”，即每种味的夸克又都分为“红”、“蓝”、“绿”三色。

(3) 带电粒子之间的电磁相互作用是通过交换光子来实现的，与之类似，夸克（或反夸克）之间的相互作用是通过交换胶子来实现的。带电粒子所带电荷的多少决定它参与电磁相互作用的强弱，相应地，夸克所参与的强相互作用的行为和强弱是由夸克所带色荷的大小来决定的。电荷只有一种，决定了光子只有一种。夸克的色荷却有 3 种，这决定了胶子可以有 8 种。

(4) 从最低级近似来看，介子由一个夸克和一个反夸克所组成，重子由 3 个夸克组成。这些夸克和反夸克通过交换胶子而相互作用。在强子内部，总是不断地有胶子被放出和被吸收，并处于统计平衡的状态。因此，在强子内部除了有上面所说的夸克和反夸克外，还存在数目未知然而却是确定的胶子。在强子内部既然存在胶子，胶子就可以转化为夸克、反夸克对，而夸克、反夸克对又可以湮没为胶子，因此，在强子内部也还存在数目未知然而却是确定的夸克、反夸克对。这样存在的每一个夸克、反夸克对在强子内部并不要求结合成一个小集团，但总起来说，夸克的数目总和反夸克的数目相等。为了将上述两处所谈的夸克加以区分，把前者称为价夸克，而把后者称为海夸克或微夸克。“价夸克”的名称是从化学中借来的，化学中称原子结构最外层没有填满壳层的电子为价电子，它决定原子的化学性质。价夸克则是强子中少数味和数目都完全确定的夸克（或反夸克），它们决定该粒子的性质。换言之，各种强子的不同反映在它们的价夸克（或价反夸克）的不同上。每个强子内部所有价夸克（或价反夸克）的色性质是保证其总合为“白色”，即整体对外来说相当于无色的（所有色都消光）。每个强子内部所有价夸克（或价反夸克）的味性质则不一定是无味的。海夸克是强子中数目不定的夸克和反夸克，任何时刻其总合为“无色无味”的。海夸克的数目稳定是统计平衡的结果。

(5) 介子是由一对价夸克和价反夸克组成的强子（如图 5-5(a) 所示），重子是由三个价夸克所组成的强子（如图 5-4 所示）。事实上，胶子也能起到价粒子的作用，称为“价胶子”，胶球就是由两个、三个或多个价胶子所组成的（如图 5-6 所示）。四夸克态是由两个价夸克和两个价反夸克组成的强子（如图 5-5(b) 所示）。混杂子是由一对价夸克和价反夸克以及一个价胶子所组成的强子（如图 5-7 所示）。

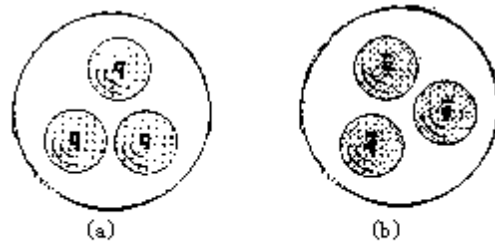


图5-4 重子和反重子，  
(a)代表夸克  
(b)代表反夸克

(6) 尽管强子是由夸克和胶子组成，但是迄今为止，实验并没有直接观察到自由的（即单独存在的）夸克或胶子。这是因为色相互作用具有“禁闭”的性质，即带色的粒子之间的色相互作用并不随距离增加而迅速减弱从而使粒子最终互相独立而处于自由状态。换言之，只有由夸克和

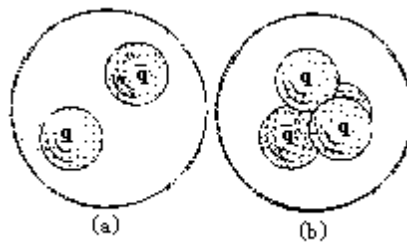


图5-5 (a)介子 (b)四夸克态

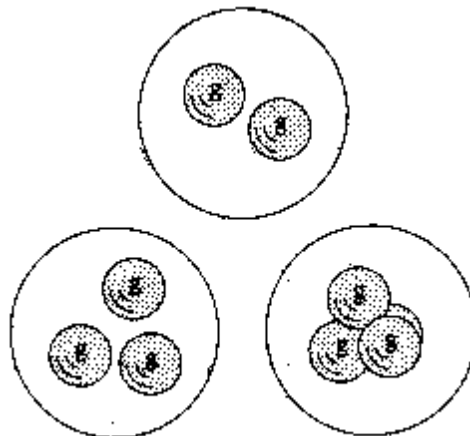


图5-6 胶球 图中小球代表胶子

胶子组成的无色系统才可以自由地单独存在，带色的夸克和胶子只能存

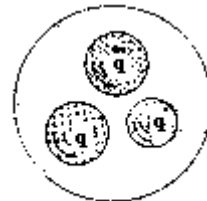


图5-7 混杂子

在于这个系统的内部。色相互作用的这种禁

闭性质最先是根据实验结果的启发而提出的理论假设，随后理论上作了很多试探去证明，但是至今在理论上并没有最后严格地证明。尽管如此，在现今对强子结构的研究中，色禁闭仍然是被普遍接受的基本假定。

虽然夸克和胶子被禁闭在强子的内部，但是在高能的物理过程中，被禁闭的这些夸克和胶子在强子内部又近似



图5-8 质子结构示意图

地可以看作无相互作用。色相互作用的这个性质称为“渐进自由”，它可以从理论上导出，它的许多推论已经得到实验的验证。

对高能实验结果的分析得出，高能质子内部胶子和价夸克所带的动量分别约占质子动量的一半，海夸克所带的动量只约占质子动量的百分之五左右。这个结果也表明，如果认为质子只是由价夸克所组成，这种看法是过于简单了。

如上面的质子结构的示意图所示，质子有3个价夸克  $U, U, D$ ，我们用大写的符号代表；用小写的符号  $u, d, s, c, b, \dots$ ，代表海夸克；用夸克符号上面加一小横代表相应的反夸克；用  $g$  代表胶子。这些粒子在质子内部的分布是分散的，色禁闭的性质使它们局限在一定的边界之内。价夸克的种类和个数确定，即只是图中的  $U, U, D$ 。海夸克的个数不确定，但由于总起来要满足“无色无味”的要求，平均来说，三种色的海夸克（和海反夸克）数目相等，各种味的海夸克（和海反夸克）数目相等。

## § 16 粲夸克、底夸克和顶夸克

1974 年美籍华裔物理学家丁肇中和美国物理学家里希特 ( Burton Richter ) 互相独立地发现了第四味夸克, 称为“粲夸克”, 用符号  $c$  代表, 它是通过发现  $J/\psi$  粒子实现的。 $J/\psi$  粒子是粲夸克和反粲夸克所组成的, 质量是质子的 3 倍多, 平均寿命比其他质量相近的重介子要长 1000 倍左右。1977 年美国物理学家莱德曼 ( Leon Max Ledermann ) 发现了第五味夸克, 称为“底夸克”, 用符号  $b$  代表, 它是通过发现  $\psi'$  粒子实现的。 $\psi'$  粒子是底夸克和反底夸克所组成的, 质量是质子的 10 倍多, 平均寿命比  $J/\psi$  粒子还长。理论上预言还应存在第六味夸克, 称为“顶夸克”, 用符号  $t$  代表, 实验上从 1977 年以来一直在寻找顶夸克, 直到 1995 年终于在实验中发现了顶夸克。

狭义相对论给出粒子具有的能量等于粒子的质量乘真空光速的平方, 因此粒子静止质量的大小可以用相应的静止能量来表示。上夸克的值为  $5.6\text{MeV}$ , 下夸克的值为  $10\text{MeV}$ , 奇异夸克的值为  $200\text{MeV}$ , 它们统称为轻夸克。粲夸克的值为  $1350\text{MeV}$ , 即  $1.35\text{GeV}$ , 底夸克的值为  $5000\text{MeV}$ , 即  $5.0\text{GeV}$ , 统称为重夸克。过去理论上对还未发现的顶夸克的相互作用性质和运动行为给出了详细的预言, 但对于它的质量则完全没有预言。1977 年发现底夸克后, 人们从已发现的各夸克质量变化的趋势, 曾猜测顶夸克的质量可能是底夸克质量的 3 倍左右, 即  $15000\text{MeV}$  附近, 但在这质量附近并没有找到顶夸克。从 1977 年以后的十几年间, 先后在德国汉堡的正负电子对撞机 PETRA、美国斯坦福的正负电子对撞机 PEP、日本的正负电子对撞机 TRISTAN、瑞士日内瓦的质子对撞机 SPS、美国斯坦福的正负电子对撞机 SLC、瑞士日内瓦的正负电子对撞机 LEP 上都进行了大量的工作来探寻顶夸克, 但都一直没有找到。每一次否定的实验结果都给出顶夸克质量的一个下限。随着实验的不断进展, 顶夸克质量的下限不断提高。后来综合各方面的实验结果、结合理论分析, 已经能够推测出如果顶夸克确实存在, 其质量应该为

$m = (169 \pm 27) \text{GeV}$ 。直到 1995 年 3 月, 美国的费米实验室才正式宣布发现了顶夸克。顶夸克的质量为

$m = (180 \pm 12) \text{GeV}$ 。至此全部六种夸克都已经被发现了。

顶夸克是粒子世界中现在已经发现的最重的一个组元, 它的质量远比现在已经发现的其他粒子重得多, 就是和原子世界中的原子来比, 也是相当重的。如果用原子量来表示顶夸克的质量, 顶夸克的“原子量”为 193.24。作为对比, 铀的原子量是 192.22, 铂的原子量是 195.08, 金的原子量是 196.96654, 顶夸克的原子量和它们接近。然而顶夸克具有的重子数只是  $1/3$ , 铀的重子数是 192, 铂的重子数是 195, 金的重子数是 197, 在重子数的值上的差别就显现出来它们分属于物质结构的不同层次。



## § 17 标准模型及粒子的分类

60年代以来，人们关于粒子世界物质结构和运动的基本规律的认识有了重大的突破，形成了粒子物理的标准模型。

标准模型认为，微观物质的基本相互作用有3种，即色相互作用、电弱相互作用和引力相互作用。

色相互作用是一种规范相互作用，具有很高的对称性它的实验表现为粒子间的强相互作用。色相互作用的媒介粒子是胶子，有8种，都没有静止质量。

电弱相互作用也是规范相互作用，具有比较高的对称性质，电弱相互作用的媒介粒子有4种，都没有质量。但是在能量低于250GeV的范围，这种对称性自发地破缺了，统一的电弱相互作用分解成为性质极不相同的电磁相互作用和弱相互作用。电磁相互作用的媒介粒子，光子仍然没有静止质量，然而弱相互作用的3种媒介粒子都获得了很大的质量。

引力相互作用，普遍存在于所有物质粒子之间，它的媒介粒子没有静止质量。

在已发现的452种粒子中，规范玻色子和轻子还没有被观察到有内部结构，还可以被看作是“点”粒子。强子是由夸克、反夸克和胶子所组成的复合粒子，强子和规范玻色子以及轻子不属于同一层次。现在还没有观察到夸克和胶子有内部结构，它们也还可以被看作是“点”粒子，是属于和规范玻色子以及轻子同一层次的粒子。如果把质子放大到一个足球场那样大，组成质子的夸克和胶子就都比足球还要小。由此可见，强子内部的结构也是很稀松的，物质粒子所占的空间也只是强子所占空间的很小的一部分。

在现有对粒子物理世界的认识的基础上，可以对现在认识的“点”粒子进行分类，即按标准模型对粒子进行分类。在标准模型中，粒子可以分成3大类：

(1) 规范玻色子：3种基本相互作用的媒介粒子，共13种，性质如下表。

相互作用	强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用	引力相互作用
粒子	胶子	光子	W、Z粒子	引力子
自旋	1	1	1	2
个数	8	1	3	1

实验上没有观察到自由状态下的胶子，但胶子在粒子相互作用过程中的存在已经有充分的实验验证。由于引力相互作用太弱，实验上直接观察放出或吸收引力子非常困难，现在还没有引力子存在的直接实验证据。许多年来，天体物理学家做了许多观测来探究是否有远方星体运动所发出的引力波存在，不过迄今为止还没有得到肯定的结果。

(2) 费米子：自旋量子数为 $J=1/2$ 的粒子，包括轻子和夸克。

按照电弱统一理论，自然界的费米子必须是成组地存在的，每一组费米子的电荷之和等于零。一组费米子称为一“代”费米子，其中包括一个中微子，一个带电轻子，两味夸克。其中一个夸克带 $2/3$ 单位电荷，一个夸克带 $-1/3$ 单位电荷。轻子不带色荷，不直接参与色相互作用，夸克带色荷，可以直接参与色相互作用，每味夸克有3种色荷状态。考虑到夸克有3种色荷状

态，一代费米子的电荷之和确实为零。现在已知自然界至少存在 3 代费米子，它们的性质如下表。

粒子类型	轻子		夸克	
电荷	0	-1	2/3	-1/3
重子数	0	0	1/3	1/3
色状态数	1	1	3	3
第一代	中微子 $\nu_e$	电子 e	上夸克 u	下夸克 d
第二代	中微子 $\nu_\mu$	$\mu$ 子	粲夸克 c	奇异夸克 s
第三代	中微子 $\nu$	子	顶夸克 t	底夸克 b

这样，由于每种夸克有 3 种色状态，每一代费米子包含有 8 种粒子，3 代共有 24 种费米子，再加上它们的反粒子，共有 48 种费米子。

(3) 希格斯 (Higgs) 粒子：自旋量子数为零的粒子。

按照电弱统一理论，电磁相互作用和弱相互作用本来是某种统一的电弱相互作用，具有比较高的对称性质，电弱相互作用的 4 种媒介粒子都没有质量，所有的费米子也都没有质量。但是在能量较低的范围，这种对称性自发地破缺了，统一的电弱相互作用分解成为性质极不相同的电磁相互作用和弱相互作用。同时除了中微子外，所有的费米子都获得了质量。电弱相互作用的对称性自发破缺的实现要求自然界存在一种自旋量子数为零的特殊的粒子，称为希格斯粒子。在实现电弱相互作用的对称性自发破缺后，自然界至少应有一种中性的希格斯粒子存在。理论对于这个中性希格斯粒子的所有的相互作用性质和运动行为都有精确的描绘和预言，但对它的质量却完全没有给出任何预言。现在实验上还没有发现这种希格斯粒子，从已有的实验结果来看，希格斯粒子的质量应大于 58.4GeV。从实验上去寻找希格斯粒子是当前粒子物理实验研究的中心课题之一。

按照现在对粒子世界结构规律的认识，按照标准模型，粒子世界是由 62 种粒子构成，其中有 60 种的存在已被实验所证实了，还有 2 种现在实验上还没有观察到其存在的证据。

## § 18 相互作用的统一理论

微观粒子之间存在着四种相互作用，这四种相互作用之间存在什么联系，它们是否可以从更深刻的角度统一起来，一直是粒子物理学家关心的问题。爱因斯坦在建立广义相对论后，花了很长的时间致力于统一场论的研究，他希望能建立一个把电磁相互作用和引力相互作用统一起来的理论。然而，他的这个研究并没有能取得成功，归根结底，是因为物理学的发展在当时条件下还不成熟。当时人们对电磁相互作用和引力相互作用的宏观规律已经认识得相当清楚，但是对于弱相互作用和强相互作用这两种只在微观范围内才明显显现出来的短程相互作用的规律还认识得很少。因此，在当时的条件下，爱因斯坦只能在电磁相互作用和引力相互作用的基础上探索相互作用的统一理论。粒子物理学 30 多年来的发展表明，首先成功地统一起来的是弱相互作用和电磁相互作用。

尽管弱相互作用和电磁相互作用的行为有巨大的差异，物理学家们对它们的相互作用机理进行深入的探索，找到了它们之间的联系，这推动着物理学家去探索建立弱相互作用与电磁相互作用统一理论的可能性。1961 年，美国物理学家格拉肖 (Sheldon Lee Glashow) 首先提出电弱统一的模型。1967 年和 1968 年美国物理学家温伯格 (Steven Weinberg) 和巴基斯坦物理学家萨拉姆 (Abdus Salam) 在这理论基础之上独立地把这个模型发展完善。格拉肖、温伯格和萨拉姆提出的电弱统一理论认为：弱相互作用和电磁相互作用本来属于具有同一种对称性的统一的相互作用，这种相互作用通过传递四种体现这种对称性的粒子来实现。在能量较低的范围，这种对称性自发地破缺了，统一的电弱相互作用分解成为现在所观察到的电磁相互作用和弱相互作用。后来，经过多年的研究证明，电弱统一理论取得了极大的成功。

电弱统一理论的成功促进了大统一理论的探索研究。大统一理论是指把强相互作用和电、弱相互作用统一起来的理论。70 年代以来国际上提出了许多种大统一理论，各有不同的特点。但是迄今为止，并没有任何一个大统一理论得到了实验的判定性的检验。

近十多年来粒子物理理论的另一个重要的探索方向是关于超对称理论的研究。超对称性是一种把自旋为半整数的粒子 (费米子) 与自旋为整数的粒子 (玻色子) 联系起来对称性。超对称理论的一个探索方向是建立超对称大统一理论，即在超对称性基础上的大统一理论。超对称理论的另一个探索方向是建立超引力理论即在超对称性基础上把四种相互作用都统一起来的理论。近年来，在超对称大统一理论方面，亚夸克层次的大统一模型方面，超引力理论方面以及关于超对称理论基础的研究方面都进行了不少工作，但是总起来说还处于探索研究阶段，还没有一种模型得到判定性的检验。由于在大统一理论范围内，各种可能的模型都已被试探研究过，可以作的理论探索都已比较充分地进行过，因此，理论探索的注意力已从大统一理论转移到超对称理论方面来。这个转移过程从 1980 年就已明显地表现出来，到 1982 年这个转移过程就已经比较完全了，这是近年来理论发展的一个重要动向。

70 年代末到 80 年代初，粒子物理理论的研究中曾有许多探索夸克和轻子的内部结构的工作，提出了许多可能的“亚夸克”模型，并有许多理论物理学家对这类模型在实验上和理论上所受的限制进行了普遍的讨论。这是一个十分吸引人的方向，曾一度表现得相当活跃，特别是在探索亚夸克层次建

立大统一模型方面。但是，进一步的发展遇到了困难，困难的来源之一是，迄今为止没有任何实验迹象显示出夸克有内部结构，从实验上还没有能得到任何有关夸克内部结构的信息可以作为建立理论的启示和线索，这一点和 60 年代研究强子结构时所遇到的情况完全不同。

## 第六章 粒子和宇宙

### § 1 宇宙的演化

人类在探索自然奥秘的过程中，另一个重要的基本问题是探索物质宏观结构的基本规律，天体起源、演化的规律，宇宙的结构，宇宙起源、演化的基本规律。

在大量天文学的观测和原子物理学、原子核物理学、粒子物理学基础上研究发展提出了宇宙演化的大爆炸宇宙学，这个理论得到大量的天文观测的支持，现在被称为宇宙论的标准模型。这个理论提出，现今的宇宙起源于大爆炸，宇宙演化的早期体积很小，温度极高，演化非常快，演化时体积不断迅速膨胀，同时温度不断迅速下降。当温度从极高降到一定范围时，出现夸克、轻子、胶子和其他规范粒子，形成极高温的夸克胶子等离子体。体积再膨胀，温度再降低后，夸克、反夸克又结合而成各种介子和重子，从而形成强子物质，这个过程表现为微观物质聚集状态从夸克胶子等离子体到强子物质的相变。这些迅速演化过程都发生在宇宙大爆炸之后的第一秒内。温度继续降低，到大约 180 秒时开始质子和中子结合成较重的原子核。以后体积继续膨胀，温度继续降低，到 38 万年时一步步出现各种原子、分子，一直演化到现在的世界。

## § 2 强子物质和夸克物质

现在对宇宙的早期演化不可能有直接的观测，人们期望对宇宙早期演化的某些过程可以实现在实验室里抽样进行观察。

粒子世界物质结构的组元是各种粒子，大量粒子聚集在一起形成一定的微观世界中的物质聚集状态。原子核由质子和中子所组成，原子核是组元为核子的“核物质”，可形成一个均匀相，称强子物质相。原子核内的温度是很高的，约为百亿开尔文的量级，但从微观尺度来说，这是一个很低的温度。在高能重原子核剧烈碰撞中能达到的温度，可以是这个温度的数十倍。

如果通过原子核的剧烈碰撞或其他办法提高强子物质的温度，核子和反核子又都可以吸收介子。高温强子物质表现为强子通过粒子反应过程达到平衡的强子气体。

粒子物理学告诉我们，核子还不是最小的粒子，核子的半径为  $R_N=0.80$  费米，强子，包括介子和重子都是由夸克所组成。夸克具有色相互作用的能力，色相互作用是一种新的比万有引力和电磁相互作用更强的相互作用，实验上所观察到的强相互作用实际上是色相互作用的表现。色相互作用的媒介粒子是胶子，胶子也属于规范玻色子，夸克的色相互作用能力表现在夸克可以放出和吸收胶子，夸克之间通过交换胶子而相互吸引。每个重子由 3 个夸克通过色相互作用结合而成，介子则是由一对夸克和反夸克结合而成。绝大多数现在实验上已发现的强子都是由夸克和反夸克结合而成。如果有大量的强子均匀地聚集在一起，就形成强子物质相。一般说来，强子物质相的组元是强子，也就是重子、反重子和介子，在稳定的强子物质相当中，它们之间的比例随温度的不同而不同。重原子核是稳定的很低温度的强子物质相。强子结构提供了一种可能性：如果把原子核高度压缩，使核子之间的边界都被挤压而消失掉，或加高温度新产生大量强子而使强子边界消失，这时微观物质的组元就改变为夸克、反夸克和胶子，强子物质相变为夸克胶子等离子体，即夸克物质相。

粒子理论的研究预言夸克胶子等离子体相和强子物质相之间的相变温度大约在 200MeV 到 300MeV 之间，即  $2.3 \times 10^{12}K$  到  $3.5 \times 10^{12}K$  之间。物理学家期望用高能粒子对撞来实现在某一有限体积内集中大量能量，达到很高温度，产生夸克胶子等离子体相。然后它自由膨胀而逐渐降温，到相变临界温度时，转变为强子物质相。这样就可以在实验室里实现对宇宙早期演化的一段过程的抽样模拟和观察研究。

### § 3 高能重核碰撞

考虑某种高能粒子对撞，在完全对心正撞的情形中，如果动能充分转化为热能，这些能量将集中在这种高能粒子静止时的体积内。如果产生了夸克胶子等离子体相或强子物质相，也将集中在这个体积内。考虑质子与质子对撞和氧原子核与氧原子核对撞这两种情形，用现有粒子理论计算如果在对撞体积内，实现温度从 200MeV 到 300MeV，夸克胶子等离子体相和强子物质相分别所包含的组元总数，列于下表中。从表中可以看出，不论相变的临界温度是多少，质子与质子对撞中即使能量很高，在相当于质子静止体积的碰撞体积内所产生的组元数也太少，最多也还不到 50 个，还远远不足以能构成一个均匀稳定的相。氧核与氧核的对撞中如果能量足够高，在相当于氧核静止体积的碰撞体积内所产生的组元数已相当多，至少达到 110 个，足以构成一个均匀稳定的相。因此，为了要在一定的时间间隔和一定的微观体积范围内实现超微观世界中物质的均匀聚集状态，产生夸克物质相，观察从夸克物质相到强子物质相的相变，必须使用氧或比氧更重的原子核作为被加速粒子的相对论性重离子碰撞对撞机来进行实验。

对撞区 温度 ( MeV )	质子-质子对撞		氧核-氧核对撞	
	强子物质相 体内组元数	夸克物质相 体内组元数	强子物质相 体内组元数	夸克物质相 体内组元数
200	3.446	17.420	110.091	712.696
210	3.805	19.264	129.464	812.237
220	4.231	21.298	152.468	922.110
230	4.732	23.535	179.546	1042.880
240	5.318	25.984	211.153	1175.120
250	5.996	28.656	247.758	1319.411
260	6.775	31.562	289.839	1476.343
270	7.666	34.713	337.822	1646.510
280	8.674	38.121	392.380	1830.514
290	9.812	41.796	453.826	2028.960
300	11.087	45.749	522.715	2242.462

为了探讨粒子世界中过去还没有发现的新粒子、新现象，探究物质微观结构的基本规律，物理学家们建造了许多高能粒子加速器、对撞机。近 20 年来，粒子物理学发现  $J/\psi$ 、 $\psi'$ 、 $W^\pm$ 、 $Z^0$ 、顶夸克等许多种新粒子，观察到许多新现象，验证和检验了粒子物理的标准模型理论。这些重大进展都是在高能电子正电子对撞机、高能质子反质子对撞机、高能质子质子对撞机上的实验中取得的。然而在这些高能对撞机上的实验里，难以实现超微观世界中物质的均匀聚集状态。为了要在一定时间间隔和一定微观体积范围内实现超微观世界中物质的均匀聚集状态，产生夸克物质相，观察从夸克物质相到强子物质相的相变，必须使用氧或比氧更重的原子核作为被加速粒子的相对论性重离子碰撞对撞机来进行实验。

## § 4 高能碰撞中的相变

理论研究指出，如果想要通过压缩原子核的办法来实现从强子物质到夸克胶子等离子体相的相变，需要把原子核压缩到其密度为正常原子核的 5 倍以上。如果想要通过加高温度来实现这种相变，需要把原子核提高达到 2 万亿开尔文以上的高温。因此要想实现这种相变，一个可能的办法是把重原子核加速到很高的能量使其互相碰撞，以实现在原子核尺度大小的体积内，在短暂的时间里达到很高的压力和集中很多的能量，这样就有可能达到实现相变的要求。

现在加速重原子核进行对撞实验时，已经达到理论上估计的产生相变所需要的能量值。因此需要研究的是，现在的高能重离子碰撞实验中，是不是已经确实实现了强子物质相变为夸克胶子等离子体相的相变过程。重要的问题是如何判断这相变过程是不是确实已经发生了。

粒子理论的研究提出了如果在非常高能量的重原子核碰撞中出现了夸克胶子等离子体，尽管经过演化夸克胶子等离子体还会相变回去到强子物质，最后表现为许多强子，但曾经出现过夸克胶子等离子体就会带来一些特殊的现象，这些现象可以作为夸克胶子等离子体曾经出现过的判据。理论上提出如果出现夸克胶子等离子体，实验上可能观察到的新现象有 6 种：

(1) 粒子理论的研究给出，夸克胶子等离子体的性质和强子物质很不相同，如果在某温度下，这两种相都能存在，夸克胶子等离子体的能量密度将比强子物质的能量密度大 5 到 10 倍。这样当夸克胶子等离子体在相变为强子物质时，能量守恒要求体积将要立即膨胀大 5 到 10 倍，观察到的强子都将是突然膨胀大了的体积中发射出来的，这是夸克胶子等离子体在碰撞后演化的中间过程中曾经存在过的一个特征。瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心用每个核子能量为 200GeV 的氧原子核去碰撞金原子核，观察碰撞产生的带负电的介子，显示出这些介子是从一个椭球区域中发射出来的。这个椭球的 3 个主轴长分别为 11.2 费米、13.2 费米和 22.4 费米，然而氧原子核是一个直径为 6 费米的球体。由此可见，这些带负电的介子是从一个明显膨胀大了的、相当于静止氧原子核体积大约 15 倍的区域中发射出来的。如果沿着碰撞方向来看，这个椭球的横截面也是氧原子核横截面的 8.2 倍，也显示出明显的膨胀，表明强子是从一个膨胀了的区域中发射出来的。另一些实验中则没有观察到膨胀。

(2) 发射出来的强子横向能量分布特别集中，反映了碰撞后碰撞区域的能量密度明显地增大。瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心用每个核子能量为 200GeV 的硫原子核去碰撞钨原子核，观察到碰撞产生的强子横向能量分布很集中，由此推算碰撞后中心区域的能量密度达到每立方费米 3GeV。粒子理论的研究给出，夸克胶子等离子体的能量密度将比同温度强子物质的能量密度大 5 到 10 倍，强子物质的能量密度估计小于每立方费米 1GeV，夸克胶子等离子体的能量密度估计约为每立方费米 3GeV 或更多。现在实验显示碰撞后中心区域的能量密度已经达到每立方费米 3GeV，提供了相变的可能性。

(3) 有多余的与相变温度相对应的直接光子和轻子发射出来。瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心用每个核子能量为 200GeV 的氧原子核去碰撞金原子核，观察碰撞产生的光子，和用质子去碰撞金原子核产生光子的结果相比较，确实发现有对应于更高温度的光子发射出来。



(4) 在产生的强子中，奇异粒子所占份额要明显增长。粒子理论的研究给出，在夸克胶子等离子体中奇异夸克所占的份额比强子物质中奇异粒子所占的份额要多。如果产生了夸克胶子等离子体，最后观测到的奇异粒子所占的份额要有明显的增长。美国布鲁克海文国家实验室用每个核子能量为 14.5GeV 的硫原子核去碰撞金原子核，观察碰撞产生的 K 介子和  $\Lambda$  介子产额之比。结果发现这比值比用质子碰撞铅原子核时的值大了 4 倍，确实显示出明显的增长。

(5) 理论上预言可能存在，但实验上还没有发现的一类称为“奇异态”的粒子可能会大量产生。粒子理论研究指出，有可能存在一种多夸克态，上夸克、下夸克和奇异夸克的比例接近于 1 : 1 : 0.8，而这种多夸克态虽然具有相当多的奇异夸克，仍表现为相当的稳定，这类多夸克态统称为奇异态。奇异态的特点是重子数大、电荷很小，然而奇异数的数值很大。现在还没有发现一个奇异态，但理论指出，如果产生了夸克胶子等离子体就有可能在相变时大量产生奇异态。所以，如果大量发现奇异态，既表明发现了一类新粒子，同时表明夸克胶子等离子体很有可能产生了。但现在还没有这方面的发现。

(6) 在所产生的大量强子中， $J/\psi$  粒子所占份额要被压低。瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心用每个核子能量为 200GeV 的氧原子核去碰撞铀原子核，观察到碰撞产生的  $J/\psi$  粒子所占的比例确实被压低了，提供了产生了夸克胶子等离子体的可能性。然而，美国费米实验室用质子碰撞原子核的实验中也发现了  $J/\psi$  粒子所占的份额被压低了，而在这个实验中是不可能产生夸克胶子等离子体的，所以这表明  $J/\psi$  粒子所占的份额被压低难以作为产生夸克胶子等离子体的判定性的信号。

这 6 种现象中，除了“奇异态”的大量产生还没有被观察到外，其余 5 种现象都已在实验上被观察到。但是，由于实验中存在各种复杂的本底，理论分析上还有许多不能排除的不定性，所以现在还不能判定已经在实验上实现了夸克胶子等离子体。近几年，实现加速重原子核的重离子加速器的能量还会大幅度地提高，物理学家们在期待着在那些实验中将实现微观物质的新物相，夸克胶子等离子体。

## § 5 中子星和夸克星

另一方面，在恒星的演化过程中，在一定条件下会形成中子星。中子星是一个巨大的由以中子为主的强子物质构成的密度很大的星体。理论上早就预言可能存在中子星，现在天文观测中也已发现了大批被认为是中子星的脉冲星。既然理论上提出高温时强子物质相将转变为夸克物质相，夸克胶子等离子体，那么在星体演化过程中就有可能形成一种类似于中子星的新星体，巨大的由夸克物质构成的夸克星。通过用非常高的能量的重原子核碰撞实现夸克胶子等离子体，不仅是发现了微观物质存在的一种新形态，并且为研究夸克星的性质，探讨寻找夸克星的途径提供了重要线索。

## § 6 暗物质和新粒子

宇宙中有许多螺旋状星云，这是一些巨大的星系，在引力的作用下绕星系的质量中心旋转，像一个巨大的太阳系那样，观察其中某一部分的运动速度  $v$ ，按照力学估算，引力等于向心力

$$G_N = \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r},$$

即

$$v^2 = G_N M \frac{1}{r},$$

其中  $r$  是这部分星体到星云中心的距离， $M$  是这部分星体受到吸引的总质量，也就是星云中处于以星云中心为中心，半径为  $r$  的球体内星云物质的总质量。显然  $M$  是  $r$  的函数，随  $r$  的增加而增加。如果星云质量比较集中在中心区，则靠星云外部区域内  $M$  随  $r$  的增加的变化不敏感，这样靠外部处星体运动的速度应随  $r$  增加而减少。

实际观测许多螺旋状星云给出：

- (1) 观测到的螺旋状星云质量分布确是中心密，外面稀；
- (2) 许多螺旋状星云中星体的速度平方  $v^2$  随  $r$  变化不大。

这情况表明在螺旋状星云中实际还有许多没有被观测到的物质也在起引力的作用，这些没有被观测到的物质数量很多，并且其分布范围比看到的螺旋状星云分布的范围还要大。

这些没有被直接观测到的但通过引力效应显示其存在的物质就是暗物质。暗物质就是指太空中存在的没有或不能提供任何直接的电磁作用信号但可有引力效应的物质。天文观测中已经观察到许多显示暗物质存在的现象。

暗物质是什么？有可能有些星体演化到一定阶段，温度很低，已不能输出任何可以观测的电磁信号。这样，尽管这样的星体的构成成分和其他星体类似，主要是质子、中子等重子物质，但不可能被观测到。这样的星体就会表现为暗物质。在星际弥漫的星际物质也可能有类似的情况。这类暗物质可以称为重子物质的暗物质。

还有另一类暗物质，它的构成成分是一些中性的有静止质量的稳定粒子，它们不直接参与电磁相互作用，但可以允许其参与弱相互作用。这类粒子组成的星体或星际物质，不会放出或吸收电磁信号。这类暗物质可以称为非重子物质的暗物质。

这类暗物质中，如果粒子的运动是高速的，是相对论性的时就称为热暗物质；如果粒子的运动是低速的，是非相对论性的时就称为冷暗物质。

天文学的观测表明，宇宙中有大量的暗物质，特别是大量的非重子物质的暗物质。人们当然关心，宇宙中的暗物质有多少？综合天文学上各方面的观测，给出估计：宇宙的总质量中重子物质约占 2%，非重子物质的暗物质所占比例至少要大一个数量级。在宇宙中的非重子物质的暗物质中，冷暗物质约占 70%，热暗物质约占 30%。

宇宙中存在的大量的非重子物质的暗物质的组成粒子是什么粒子？

在标准模型中给出的 62 种粒子中，有可能是暗物质粒子的只有 3 种中微子和它们的反粒子，3 种反中微子，并且前提条件是中微子的静止质量不等于零。如果中微子有静止质量，它就有可能是热暗物质粒子。多年来，粒子

物理学家做了大量的研究测量中微子的质量，到现在还没有肯定的结果。

冷暗物质粒子应该是一种质量很重的中性稳定粒子，它不直接参与电磁相互作用，但可以参与弱相互作用和引力相互作用。这种粒子肯定是超出标准模型的粒子。

人们期望能从宇宙中找到这种超出标准模型的新粒子。

1972年我国云南宇宙射线站观察到了一个奇特的宇宙射线事例，观察到一个从宇宙射线中来的能量大于 300GeV 的粒子碰撞石蜡中的粒子后，产生了 3 个带电粒子。分析表明，其中一个是中子，一个是质子，还有一个是质量大于 43GeV，寿命长于 0.406 纳秒的带电粒子。这个粒子的存在如果被证实，它将肯定是一个超出标准模型的新粒子。

分析还表明，产生这个事例的从宇宙射线中来的入射粒子应该是一个质量大于 42GeV 的稳定中性粒子。这些性质，倒是符合冷暗物质粒子的要求。如果进一步的实验确认了这种粒子的存在，将是探寻新粒子方面的重大进展。

物理学家们期望能从宇宙射线中得到来自宇宙远方的新粒子的信息。

科学探索是永远没有尽头的，人类对真理的追求也是永无止境的。随着科学技术的不断进步，粒子物理学必然会踏上更高的台阶，不断加深人们对自然界物质的本质的认识。

