基本粒子

〔日〕汤川秀树　片山泰久　福留秀雄 编著

科学出版社

53.83
3-06

基本粒子

〔日〕汤川秀树 片山泰久 福留秀雄 著

张 昭 译

科学出版社

1975

内 容 简 介

基本粒子是目前物理学中研究的重要问题之一。本书是介绍基本粒子的中级科普读物。全书共分三部分，第一部分是历史回顾，概略地回顾了原子、原子核物理学的发展史；第二部分是关于基本粒子的概述，介绍了各种基本粒子的发现、实验装置、衰变过程、相互作用、性质、模型以及谱系等；第三部分是理论解说，定性地说明了基本粒子理论中的几种重要理论。关于汤川本人所提出的非定域场理论和基本空间理论，有较为详细的解说。

本书可供中学教师、大专院校师生、一般科技工作者参考。

湯川秀樹 片山泰久 福留秀雄 著

素 粒 子

[第 二 版]

日本岩波書店， 1972

基 本 粒 子

〔日〕汤川秀树 片山泰久 福留秀雄 著

张 质 贤 译

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1975 年 8 月第 一 版	开本：787×1092 1/32
1975 年 8 月第一次印刷	印张：5 1/16
印数：0001—16,900	字数：112,000

统一书号：13031·247

本社书号：401·13—3

定 价： 0.42 元

中 译 本 前 言

基本粒子是当前物理学中研究的重要课题．自从三十年代开始建成了各种粒子加速器和发明了各种探测工具后，随着加速器能量的提高和探测技术的改进，陆续不断地发现了许多新的基本粒子．目前利用能量越来越高的粒子相互碰撞，还在继续不断地发现各种新的粒子．人们通过研究基本粒子的相互作用和相互转变来了解它们的性质和内部结构，以加深对物质结构的认识．因此，基本粒子物理学是探索物质结构的最重要学科之一．但目前基本粒子物理学尚处在探索阶段，还有许多问题有待于进一步的深入研究．

本书深入浅出地介绍了人类认识物质结构的历史发展过程和目前对基本粒子的初步了解．本书作者之一汤川秀树是介子场理论的提出者，这一理论使人们对于把原子核内的质子和中子结合在一起的核力有了一个新的认识．书中还详细地阐述了作者近年来提出的非定域场理论和基本空间理论．本书对于了解基本粒子物理学的现状和今后的发展有一定参考价值．

遵照毛主席关于“**洋为中用**”的教导，我们翻译出版了这本书．在翻译过程中，有些地方曾由译者作了一点删节．译文不当之处，欢迎读者批评指正．

作 者 前 言

无论是不是科学家，人们对于自己所生活的世界总是希望有较深的了解．有些人只希望详细了解世界某一有限部分或某种特殊事物．另有一些人则相反，希望概括地了解我们所生活的整个世界．前者是专门家(狭义科学家)倾向较强的人，例如，其中有的人把一生献给研究某种植物而不后悔．后者是哲学家(正确说自然哲学家)倾向较强的人，他们是属于曾经说过“万物皆为水”的泰勒斯一类的人．

人们经过了多少代的努力，才获得了今天的成果．无论是狭义科学家倾向较强的人，或自然哲学家倾向较强的人，他们都以不同的研究方法相互补充，为建立今天以基本粒子为基础的物质观作出了贡献．虽说如此，这些也还不是最后的定论．也许是因为这个缘故吧，我们对于“基本粒子是什么?”这个问题，也还不能作出满意的回答．最近二十年来，基本粒子的种类迅速增加，为此已提出了几种统一描述基本粒子的方法；然而，任何一种方法也还不能说是确立的理论．至于哪种方法比较接近于真理，客观的判断也是很困难的．从某种意义说，这可能意味着必须对基本粒子概念进行根本的改造，同时也意味着各种基本粒子背后可能存在着某种使它们存在、产生和湮灭的因素，这些因素到底是什么，也需要进一步探索．

本书的目的并不是把基本粒子看作是某种已知的东西，率直地反映现有情况，而是在于阐明尽管我们已经知道了有关基本粒子的许多事实和经验规律，但基本粒子本身本质上还是未知的东西．

本书第一版写成于 1961 年，在此后不到八年的时间内，就出现了许多需要补充和改写的新内容．去年以来，我们就认为应该出新版的时期已到了．第一部分叙述的是到三十年代为止物理学家探索基本粒子的情况，所以几乎没有必要改写．第二部分介绍目前所知道的有关基本粒子的许多事实和大多数基本粒子研究工作者的共同想法．这次还把第一版第三部分的部分内容并入了第二部分．从 1960 年以来，陆续发现了许多寿命极短的新粒子，即所谓共振态，最近又从各种观点在广泛地议论着雷吉假说，因此第二部分补充了这两方面的新内容．第三部分介绍目前有关基本粒子的知识和想法还有哪些不能令人满意之处，同时讨论了基本粒子背后还可能存在着什么更基本的规律．特别从 1966 年以来，我和片山逐步地发展了基本领域的理论，对这方面的问题也作了比较详细的介绍．

和第一版一样，第一部分由福留执笔，第二部分由片山执笔，第三部分由我执笔，第三部分也有一部分是由片山执笔写的．就全书来说，我们当然力求能够首尾一贯，但是也没有特意消除由于执笔者个性不同而出现的一些特点．如前所述，本书的目的不是在提供有关基本粒子的个别知识，而是要阐明有关基本粒子的各种思想方法．因此，我们认为在某些章节内出现一些执笔者个人的见解是完全可以的．特别是在第三部分，强烈地反映了我个人的一些主观见解，这一点不得不预先声明．

汤川秀树

1969 年 2 月于京都

目　　录

中译本前言 …… i
作者前言 …… ii
一、基本粒子图象的形成 …… 1
1. 原子论的发展 …… 1
1.1 古希腊的原子论 …… 1
1.2 十七世纪机械的、力学的原子论 …… 3
1.3 化学的原子论 …… 4
1.4 气体分子运动论 …… 8
1.5 原子间作用力的本质 …… 9
1.6 电子的发现 …… 11
2. 力和场 …… 14
2.1 媒递作用和超距作用 …… 14
2.2 光的波动说 …… 15
2.3 电磁学和场 …… 16
2.4 麦克斯韦理论 …… 20
2.5 光的电磁波说 …… 21
2.6 洛伦兹电子论 …… 22
2.7 以太和相对论 …… 23
3. 原子结构和量子力学 …… 26
3.1 量子论的诞生 …… 26
3.2 光量子说 …… 27
3.3 放射能和原子 …… 28
3.4 原子模型的确立 …… 31
3.5 线光谱的量子理论 …… 33
3.6 自然界的连续和不连续 …… 34
3.7 物质波和量子力学 …… 35
3.8 相对论量子力学和正电子 …… 38

3.9 发散的困难 ……39
4. 原子核结构和介子 ……41
4.1 中子的发现 ……41
4.2 β 衰变理论 ……43
4.3 核力和介子 ……45
二、基本粒子世界……47
1. 基本粒子的出现 ……47
1.1 基本粒子的故乡 ……47
1.2 宇宙线中的基本粒子 ……48
1.3 第一代基本粒子 ……50
1.4 大量出现的第二代粒子 ……53
1.5 大型加速器时代 ……55
1.6 汽泡室和放电室 ……57
1.7 第三代基本粒子——共振态 ……60
1.8 巨大的科学 ……62
2. 基本粒子的一生 ……64
2.1 基本粒子的诞生和死亡 ……64
2.2 寿命的测定 ……66
2.3 基本粒子的家族 ……69
2.4 奇异数 ……72
2.5 带电空间的设想 ……75
2.6 基本粒子的相互作用 ……77
2.7 相互作用的性质 ……79
2.8 宇称不守恒 ……81
3. 基本粒子的性格 ……83
3.1 基本粒子也有结构 ……83
3.2 核子的电磁结构 ……85
3.3 核子间的作用力 ……87
3.4 基本粒子的共振态 ……89
3.5 基本粒子反应的分析 ……91
3.6 雷吉假说 ……94
3.7 基本粒子的关联性 ……96

3.8 由衰变现象探索基本粒子的图象 ……99
4. 基本粒子的谱系 ……101
4.1 基本粒子数能减少吗? ……101
4.2 坂田模型 ……102
4.3 基本粒子的对称性 ……104
4.4 基本粒子的排列 ……106
4.5 奇异的夸克粒子 ……108
4.6 探索轻粒子 ……111
三、基本粒子的规律性 ……113
1. 基本粒子的统一描述 ……113
1.1 理论的贫困 ……113
1.2 历史会重演吗? ……114
1.3 海森堡的一元论 ……115
1.4 负几率 ……118
1.5 S 矩阵理论 ……121
1.6 基本粒子图象的抽象化 ……123
2. 基本粒子的广延性 ……125
2.1 定域场理论不包含矛盾吗? ……125
2.2 非定域相互作用 ……128
2.3 非定域场理论 ……130
2.4 具有无限分量的场 ……132
2.5 内部自由度的力学效果 ……134
3. 基本粒子和基本领域 ……136
3.1 狭义相对论的时空 ……136
3.2 广义相对论的时空 ……138
3.3 几何学对象和量子力学对象 ……140
3.4 刚体、弹性体模型和非定域场 ……141
3.5 基本领域的概念 ……143
3.6 四维基本领域的理论 ……146
3.7 时空和量子化 ……148
基本粒子表 ……151
简略年表 ……153

一、基本粒子图象的形成

1. 原子论的发展

1.1 古希腊的原子论

我们眺望大自然界，可以看到无限变化多端的物质以及这些物质所产生的各种复杂现象. 然而，大自然并不仅仅是复杂的，通过这些多种多样的物质和现象，还可以认识到它们具有完美的秩序和规律. 这样，在大自然界的多样性和规律性的背后，必然存在着把它统一起来的基本原理，这种想法自古以来就在人们的头脑中萌芽了. 人们对大自然的探究有两种方法，一种方法是借助于神，因而产生了神话和宗教；另一种方法是不借助于神，而是以物质为根据寻求自然界的基本原理，这种唯物论的想法自古以来就形成了.

为了统一地说明自然界的多样性和规律性，曾思考出了一些原理，其中最古老的有在中国和印度流传的“万物皆由地、水、火、风、空形成”的五行说，以及公元前六世纪希腊密来多斯学派的泰勒斯所提倡的“水为万物之本”的说法，等等. 这些说法，从现在的眼光看来，都是非常朴素的，但是可以承认，这是以物质为根据寻求自然界的基本原理，对大自然界作理性探究的雏形. 这种思想的要点是，认为多种多样的物质是由少数的基本实体构成的，并且企图用它来说明自然界的统一性和多样性.

这样，认为一切物质都是由基本实体构成的这种思想，可

以说从有史以来就形成了；但是，在泰勒斯以后的古希腊时代，它才达到了哲学上的成熟和精练．在泰勒斯以后，以物质、存在、生成的概念为中心而发展的希腊哲学，在公元前五世纪产生了来乌起保斯、德谟克利特的原子论． 爱来阿学派主张物质是一个单一不可分的全体；阿那科萨哥拉斯认为物质是由可以无限分割的无数种类的“种子”构成的；而来乌起保斯和德谟克利特提出了原子论，他们认为，在物质中存在着不能再分的最小单位，物质就是由这种最小单位——原子构成的[原子（atom）一词来自希腊语，意思是不能再分之物]．按照他们的想法，原子是永远不变的，是不能破坏的终极粒子，分散地存在于空虚的空间．这样，物质不仅可以由“充实”的原子构成，而且也可以由空虚的空间构成，因此，物质的运动和变化都是可能的．原子可以由形状和大小来加以区别，在空虚的空间还可以占有不同的位置，除此之外，不具有其他任何性质． 他们还认为，人们的感官所能感觉到的物质的多种多样的性质，都是由原子的各种排列和各种结合形式产生的． 德谟克利特曾经说过这样的话：“一个物体只是在表观上具有颜色，而且还具有甜味或咸味，只有原子和空虚的空间是真实的存在．”来乌起保斯还认为，原子的运动不是偶然的，而是按照完全的因果关系发生的． 这种想法可以从他的下面一段话看出来，他说：“不能无中生有，一切事物都有根据，因而产生必然结果”．他认为，原子的运动是它本来就有的，这种运动能引起碰撞，由这种碰撞产生了成为世界开端的“涡动”．

从我们现代的知识看来，来乌起保斯、德谟克利特的原子论，也有许多方面是正确的．然而，当时还没发明能证明原子实际存在的方法，因此他们的原子论当然只是思辨上的臆说．证明原子的实际存在，是很久以后十八世纪末期和十九世纪

初期的事情.

来乌起保斯、德谟克利特的原子论，由爱比克劳斯（公元前四一三世纪)所继承. 在古代,原子论的最后代言人是公元前一世纪罗马的路克来杜斯. 在这以后,由于基督教的兴起,除亚里斯多德的哲学以外，其他一切希腊哲学都被看成邪说而被禁止了. 在神学支配下的漫长中世纪中，成为古希腊唯物论顶峰的原子论完全被遗忘了.

1.2 十七世纪机械的、力学的原子论

在中世纪宣告结束之后,文艺复兴开始了,古代希腊哲学才重见天日. 但是,原子论的复兴,却是在形而上学的自然哲学转变为近代自然科学之后的十七世纪才实现的. 和伽利略同时期的加桑迪复活了原子论,以后玻义耳、牛顿等人又加以发展. 在十七世纪发展的自然科学主要是力学，当时的原子论也反映了这种情况,是机械的、力学的原子论. 当时给予原子以力学性质,完全以力学概念为中心来说明原子的性质.在初期由于动力学尚未完成,专以静力学的图象来说明原子.例如,为了说明原子的结合,假定原子具有特别的钩、棘、突起等部分,认为原子的结合也和普通物体的连结一样,是由这些部分实现的.

最初用原子论解释物理学、化学现象的是玻义耳,他认为多数的物质可以由其他物质通过化学反应来合成，但是也有一些物质不能由其他物质通过化学反应来合成. 他把这种不能由其他物质合成的物质称之为“元素”. 他认为，对应着各种元素存在着各种原子,元素的差异在于原子结构不同.他首先引人的元素概念，对使点金术转变为近代化学作出了巨大贡献.

到了牛顿,原子论中的力学图象由机械的、静力学图象转

变为动力学的图象. 牛顿发现了万有引力定律，圆满地说明了天体运动，建立了有概括性的首尾一贯的力学理论体系.在万有引力定律中，引入了空间中互相离开的物体之间也存在着互相作用力的概念. 他根据这种力的概念，认为物体结合时并不一定需要互相接触. 牛顿把这种力的概念应用于原子论，在天体和原子的图象之间建立了对应关系，把原子从不自然的钩、棘等解放出来，认为它是很小的球状粒子，在这些原子之间有和万有引力相类似的力在作用着. 于是他认为气体、液体是球状原子的集合体，并且把他的力学定律应用于这些原子，试图来说明气体、液体的运动.

1.3 化学的原子论

到十八世纪的后半期，化学的实验技术有了进步，相继地发现了氢、氮、氧等元素，而且不仅已能进行定性的实验，还能进行定量的实验了.

1772 年，拉瓦锡精密地测定了化学反应前后的物质质量，发现在化学反应前后，物质质量的总和不变. 这说明物质的性质虽然因化学反应而发生变化，但是物质是守恒的. 对于认为原子不可分的原子论来说，这是一个很好的证据.

1799 年，普劳斯特发现，参与化学反应的物质质量成一定的整数比(定比定律). 例如，一克氢和八克氧化合成九克水，不按照这样的比例使氢和氧进行反应时，氢和氧不能完全变成水，多余的要剩下而不化合. 道尔顿在 1804 年发现，两种元素的化合物有两种以上时，在这些化合物中，如果一种元素的量是一定的，和它化合的另一种元素的量成为简单的整数比(倍比定律).

这样，在化学反应中元素的量成一定的整数比这一事实，暗示物质是由某种可数的最小单位构成的. 道尔顿曾把上述

事实用下述的原子假说来说明，即纯粹的物质都是由具有一定质量的原子构成的，和元素相对应的原子不能创造也不能破坏；和化合物对应的原子是由成为该化合物成分的元素的原子结合而成的.

1809 年,盖·吕萨克发现,在气体的化学反应中，在同温等压下,参与一个反应的气体的体积成简单的整数比;如果生成物也是气体，它的体积也和反应气体的体积成简单的整数比(气体反应定律). 例如,两公升的氢和一公升的氧化合时，生成两公升的水蒸汽.

盖·吕萨克认为,如果假定不论哪种气体在同温等压下，在相同体积内含有相等的原子数，就可以用道尔顿的原子论说明气体反应定律. 然而道尔顿自己发现，这项假定和他的原子论有矛盾. 这就是说，如果这项假定正确，在上述例子中，两个氢原子和一个氧原子应当生成两个原子的水，这样，在一个水原子中就只能含有半个氧原子了.

1811 年，阿伏加德罗在道尔顿的原子论中又引入了“分子”的概念,这样就解决了上述的矛盾.他认为,不论气体是化合物，还是元素，构成气体的要素不是不可分的原子，而是由几个原子相结合而成的分子；元素的分子是由同种原子构成的,化合物的分子是由几种不同的原子构成的. 例如,氢的分子是由两个氢原子构成的，水的分子是由两个氢原子和一个氧原子构成的. 于是他假定，不论哪种气体，在同温等压下，在相同体积中所含的分子个数是相同的（阿伏加德罗假说），这样就圆满地说明了气体反应定律. 阿伏加德罗假说的正确性，以后被很多事实所证明，现在已认为是完全确定的事实了.

和以前的原子论相比,道尔顿、阿伏加德罗的原子论是很大的进展. 在以前的原子论中,原子是构成物质的单位,宏观

物质是多数原子的集合体，在原子和宏观物质之间没有任何过渡阶段. 这样，要从原子推知各种物质的性质是非常困难的. 然而，道尔顿、阿伏加德罗的原子论认为，宏观物质的化学性质，是由少数原子构成的分子这个单位决定的；因此，知道了分子的性质，就能够知道由它所构成的物质的性质. 在物质结构中发现存在着原子、分子这样的层次，这对于从物质的微观结构的要素来推导物质的性质，起了巨大的推进作用.

如果以阿伏加德罗假说和定比定律为线索，来分析化学反应，就可以决定构成各种气体分子的原子的种类和个数，决定各种原子或分子的质量比. 如果规定氧原子的质量为 16，这样得到的原子或分子的质量比都是整数值，如所周知，这个值就是该原子(分子)的原子量(分子量). 普劳特以这一事实和氢的原子量近似地等于 1 为根据，于 1815 年提出了所有原子都是由氢原子构成的这一假说. 这个假说虽然不正确，但是却成了后来原子核结构理论的先驱.

一物质的分子量以克为单位时称为该物质的克分子，按照阿伏加德罗假说，克分子气体中所含有的分子数，不论哪种气体都是一定的. 这个数叫阿伏加德罗数. 以后由多数实验知道，这个数是一个非常大的数字，是六千万亿的一亿倍 (6×10^{23}). 例如分子量为 2 的氢的克分子为 2 克，在 2 克氢中有 6×10^{23} 个氢分子.

十九世纪的化学家用上述方法，对许多物质的分子进行了研究，决定了构成这些分子的原子数和种类. 他们还提出了表示分子结构的分子式. 例如用 H_2O 表示水的分子，这个分子式表示一个水的分子是由两个氢原子 (H) 和一个氧原子 (O) 构成的.

在研究许多物质的化学反应和分子结构的过程中，又发

现各种原子都是以一定方式和其他原子相结合的．这种结合能力可以用原子伸出的结合手来表示．可以认为，原子间的结合是由两个原子的手和手连接而发生的，在稳定的分子中，所有的手都被占满了，没有闲着的手了．一个原子所具有的结合手数目，称为该原子的原子价．凯库勒和佛兰克朗基于原子价的想法，于1858年研究了原子在分子中的结合状况，提出了表示这种结合状况的结构式．这里曾有过一段有名的故事，据说苯的龟壳形结构式是凯库勒在睡梦中想出来的．原子价和表示原子价的结合手，使我们回想起十七世纪所设想的原子钩；至于它的本质是什么，起初一直不明了；到了二十世纪，量子力学诞生之后，出现了用电子交换说明化学结合的理论，这时才明了原子价的本质．

由于发现了原子价，人们知道原子的结合是依照简单的规律进行的，所以这是一项重大的发现．此外，化学结构式对于分析复杂的有机化合物的分子，也发挥了巨大的作用．

门德列夫于1869年发现，把各种元素按照原子量大小顺序排列，它们的各种物理、化学性质作周期性的重复．也就是说，元素的原子价随着原子量的增大逐次增大到7为止；下一个原子量较大的元素的原子价，又回到1而进入下一个周期．这样就知道了，在原子量和原子价之间存在着一定的函数关系．这件事暗示原子具有某种周期结构，这种结构对决定物质的性质具有重大意义．门德列夫认为，他的周期表上的空位是当时尚未发现的元素，并预言了这些元素一定存在（例如锗），他还根据周期律详细地预言了这些元素的物理和化学性质，结果也都和事实相符合．根据原子论发现的周期律，能够作出令人惊异的预言，这表明原子论已经不是为了说明实验事实而创造的假说，而是正确地掌握了物质内部结构的理论．

1.4 气体分子运动论

和化学中的原子论发展同时，物理学中的原子论也平行地发展．玻义耳、牛顿曾试图用原子论说明气体的物理性质，这项工作到了十八世纪被伯努利所继承．进入十九世纪之后，随着热力学和化学原子论的发展，关于气体分子运动论的研究也正式开始了．

在十九世纪初期，关于热现象的说明，热素说占主导地位，即认为热现象是由热素这种物质引起的．但是，买厄在1841年发现，力学运动能够转化为热，1854年焦耳加以证实之后，热素说才被完全否认，并且承认热是构成物质的微粒子的动能的说法是正确的．

用肉眼看来，气体中好象没有任何变化，但是它的分子却是在不停地运动，许多分子以极大的速度飞来飞去，这种动能来自热能，而分子又经常互相碰撞，因而沿着复杂的迂迴曲折的道路运动．这样，即使每个分子都遵守一定的运动方程，但是就总体来说，还是完全不规则的运动．因此统计理论适用于这种现象．根据这种想法来研究气体的物理性质的学问，就是气体分子运动论．

气体分子运动论，从十九世纪中期开始，经过克劳修斯、麦克斯韦、玻耳兹曼等人加以发展，获得了巨大的成功．例如，玻义耳-查理定律能够用来很好地说明气体的压力、体积和温度的关系，也能够正确地说明气体的粘性、扩散等性质．气体分子运动论对原子论的最大贡献，在于用它能决定阿伏加德罗数的数值以及原子的绝对质量和大小，这些数值用化学方法是得不到的．根据气体分子运动论所决定的氢的直径和质量，分别为 1.4×10^{-8} 厘米（约为一亿分之一厘米）和 1.7×10^{-24} 克（1克的一万亿分之一再乘六千亿分之一），这

是非常小的数值.

分子运动论的正确性,在1827年由植物学家布朗所发现的布朗运动的研究也得到了确认. 用显微镜观察水中的小花粉,可以看到花粉在不停地作微小的不规则运动. 可以认为这种运动是由作不规则运动的水分子和花粉相撞击而引起的. 因此,知道了花粉的运动状况,就能知道水分子的运动状况. 这样就想出了用布朗运动决定阿伏加德罗数的方法,所得结果和上述结果一致.

后来又找到了决定阿伏加德罗数的其他各种方法,这些方法都给出了相同结果. 由此可知,原子的存在是不容置疑的了.

1.5 原子间作用力的本质

由于化学以及气体分子运动论的发展,证明了构成物质要素的原子的存在. 但是,这些研究没有揭露出原子间的作用力是什么,也没有揭露出原子或分子以什么样的作用力构成了宏观物质. 有关原子间的作用力的本质的知识,是从物质的电学性质,特别是电化学性质的研究得来的.

在十八世纪末期,医学家伽伐尼在解剖青蛙时偶然发现,把连结两种金属的金属线两端和青蛙的神经和筋肉相接触时,筋肉发生收缩现象,他确认这是由电的作用引起的. 伽伐尼的这项发现受到了许多人的注意,伏打指出,伽伐尼所发现的电的发生,不只是动物体特有的现象,把两种金属和潮湿物体的两面接触时也能带电. 例如,他证明了把锌版、铜版和用酸浸湿了的纸交互地重迭起来,能够产生多量的电;这就是所说的伏打电池.

在伏打发明伏打电池的同一年,即1800年,尼科尔松发现,在伏打电池的锌板上有氧发生,在铜板上有氢发生,并且

知道氧和氢是由水的电解而来的.尼科尔松的这一发现,使人们预想到伏打电池的电动势是由化学作用产生的. 戴维又把尼科尔松实验加以发展, 发现伏打电池的电动势与电解析出的氧和氢的量成正比, 于是知道化学的结合力和电的作用力是相同的. 戴维和哥劳萨斯根据这种观点建立了电解理论. 他们认为水的分子在电力作用下分解为带正电的氢原子和带负电的氧原子, 两种原子分别被正、负电极所吸引, 电荷在电极上中和而析出氢和氧. 倍路捷留斯也曾提出了这种想法.

电学的作用力和化学的结合力是同种类的作用力, 这种想法由戴维的学生法拉第加以发展. 法拉第没受过正规的大学教育, 他一面从事装订工作,一面自己钻研科学, 以后被戴维发现,才得以专门从事科学研究工作,对电磁现象进行了很多实验研究,留下了不小的功绩.

法拉第详细地考察了多种物质的电解,于 1833 年发现电解时析出物质的质量与所用的电量及析出物质的原子量成正比, 与析出物质的原子价成反比 (法拉第电解定律). 根据法拉第电解定律知道,电解时析出物质的量与电极的形状,析出物质的种类以及浓度无关, 只由物质的原子性质 (原子量、原子价)决定. 由这个结果可以确信,原子的化学结合力是由电力产生的. 法拉第把电解的物质命名为电解质, 把电解质分子分解后在溶液中产生的一种带电粒子命名为离子. 法拉第电解定律还指出,析出一克当量的物质所需要的电量,只与该物质的原子价有关. 如果把这个结论和阿伏加德罗假说结合起来考虑, 可以推知每一个离子所带的电荷是某种单位电荷的整数倍(原子价倍). 于是把法拉第电解定律和物质的原子结构联系起来,使人们预想到电荷中也存在着最小单位.以后 J. J. 汤姆逊发现了电子, 这一预想得到了明确的验证.

在法拉第以后,在电解方面最重要的发现,是阿来纽斯于

1887 年提出的有关离子的假说. 他认为电解质的分子在稀薄溶液中总是分离为带正、负电荷的离子;这个假说不久就被证实了.由于电解的研究,进一步弄清了物质的原子能够以带电的粒子——离子方式存在，而且原子的化学结合力是由这种电荷产生的电力.

1.6 电子的发现

在原子论的历史上最重要的革命性发现之一，是在研究稀薄气体放电现象中诞生的. 在封入稀薄空气的玻璃管的两端加上较高电压后,就发生放电现象,放出美丽的光辉. 这种现象是十九世纪初期的电学家发现的. 法拉第也在 1838 年观察了放电现象，并指出研究放电现象对电的本质可能得到重要的发现. 但是直到十九世纪中期，在稀薄气体中放电的研究,几乎没有什么进步,这是因为产生高真空的技术还不发达的缘故. 1855 年盖斯勒发明了水银空气泵，由此能够得到高的真空,从此关于放电现象的研究才有了很大的进步.

在盖斯勒发明水银空气泵三年之后，普留卡开始用新的技术研究稀薄气体中的放电现象. 他发现放电时在阳极方面的玻璃上发生荧光，于是他想到象有某种东西从阴极上飞出打在玻璃上. 他还观察到，这些东西受到磁场作用时路径发生弯曲. 1869 年普留卡的学生希特路夫发现，从阴极出来的东西沿直线方向进行,如果在它的通路上放上一个小的物体，就在阳极方面的玻璃上出现这个物体的阴影. 1876 年哥尔德斯坦确认了这项发现，把从阴极放射出来的放射线命名为阴极射线.

关于阴极射线的本质，巴来和克鲁克斯认为阴极射线是从阴极放出的带负电的粒子流. 这样阴极射线在磁场中弯曲的现象就能很容易说明了. 他们认为这种带负电的粒子是气

体分子在阴极上得到电荷而成为离子，由于斥力作用从阴极飞向阳极.这种说法是根据电解质的电解理论类推出来的,是一种很自然的想法,受到了许多人的承认,并加以发展.

以后从很多方面证明了这种想法的正确，放电的确能在气体中产生离子．但是认为阴极射线是这种离子流的说法,却有很多可疑之点．其中一个是,如果阴极射线是离子,它不可能通过金属膜,但实际上能通过．另一个是,阴极射线在磁场中弯曲的状况与气体种类无关，是一定的． 离子的质量随着气体种类而不同,因此，如果认为阴极射线是离子流动，在磁场中产生的弯曲状况应该是不同的.

为了消除这种困难，J. J. 汤姆逊于 1897 年大胆地提出了一个假说,认为阴极射线是比原子、分子轻得多的带负电荷的粒子的高速流动.汤姆逊在提出这个假说之后不久,发现阴极射线在电场作用下也能发生弯曲现象，并且提出了利用阴极射线在电场和磁场同时作用下发生弯曲的状况，来测定阴极射线粒子的速度以及它的质量 m 和电荷 e 之比 m/e 的方法．他用这种方法测得阴极射线的速度为每秒一万五千公里左右，m/e 的值与气体的种类无关，约 10^{-7} 克/静电单位左右.把这样测出的 m/e 值与电解时测得的氢原子的 m/e 值相比，这里的 m/e 值很小，只是氢原子的 m/e 值的二千分之一左右.因此,如果假定氢离子的电荷和阴极射线粒子的电荷相等,则阴极射粒子的质量只是氢原子质量的二千分之一左右.

汤姆逊为了证明阴极射线粒子的电荷和氢离子的电荷相等这一假定，并且为了知道这个电荷的大小，曾作了下述实验．用紫外线照射气体,气体分子电离形成离子,在加上一定强度的电场后，测定电流强度，就可以知道这些离子的总电荷．这样,如果知道了生成离子的个数,就可以知道每一个离子的电荷． 为了求得离子的个数，他使气体在饱和水蒸汽中

电离，电离时离子周围的水蒸汽凝聚成雾，通过测定雾的沉降比率，求得了离子的个数．这样求得的电荷与气体的种类无关，和电解时求得的氢离子电荷大小相等．然后他又用紫外线照射氢气，测定了所产生的负电流的 m/e，结果和阴极射线的 m/e 完全一致，这时流过的负电荷和电解质中流过的氢原子的正电荷大小相等，于是得到这样一个结论，即阴极射线粒子的电荷和氢离子的电荷大小相等，符号相反．所求得的电荷大小为 6×10^{-10} 静电单位．

根据法拉第电解定律，可以预言电荷中也存在着最小单位，这一预言就这样得到了确证．汤姆逊弄清了阴极射线粒子的存在和性质之后，曾借用了以前斯特尼对电荷最小单位的命名，称之为电子．此后就把这一名称应用于阴极射线粒子，而且已广泛地通用了．

阴极射线是带负电的电子流，和带正电荷的粒子流有本质上的不同．1886 年哥尔德斯坦发现，带正电荷的粒子流射向阴极的后方，因此称之为极隧射线．汤姆逊测定了极隧射线的 m/e，指出它的值随着气体种类而不同，对于氢来说，则和氢离子的 m/e 一致．这样，汤姆逊就证明了极隧射线是带正电的气体离子流．

汤姆逊对电子的发现，可以说是原子论历史上最大的革命性发现．由于电子的发现，人们弄清了原子不是物质的不可分的最小单位，它自身也具有结构，是由带负电的电子和带正电的粒子构成的；电子的质量非常小，原子质量的大部分都集中在带正电的粒子内（后来称为原子核）；电子与原子的种类无关，都是一样的，而带正电的粒子则随着原子种类而不同．

在十九世纪末期，由于电子的发现，原子论以飞跃的速度进入了新的阶段；进而围绕着原子结构的问题，又进入了二十世纪的量子理论时代，这是人们的物质观大变革的时代．在

讨论这个问题之前，先回顾一下和原子论平行在十九世纪发展起来的电磁学.

2. 力 和 场

2.1 媒递作用和超距作用

没有任何物质占据的空虚空间——真空是否存在的问题，自古以来就是哲学家争论的焦点. 真空问题是在古代希腊通过它的存在与否以及成为它的对立面的运动和变化是否可能的问题提出的. 如前所述，站在原子论的立场上，是积极承认真空的，认为原子是分散在真空中运动的物体. 在十七世纪，随着近代科学的出现，真空问题在物理学中成为原理性的问题，占有着重要的地位.

讨论物体的运动有一个根本问题，这就是象天体、磁铁那样，互相离开的两个物体如何能发生相互作用. 有人认为下述方法是使互相离开的物体发生相互作用的方法之一，即在两个物体之间存在着某种连续媒质，作用从一点开始，通过这种媒质逐渐向周围空间扩展，在有限时间内到达其他地点.例如落在水面上的石块引起的波纹逐渐扩展，很快就使浮在远处的木片运动. 象这样以有限速度从一点向周围空间传递的作用，叫做“媒递作用”. 比牛顿略早一些，笛卡儿曾经企图创造一种描述自然的体系，他对作用的传递就是采用了这种见解. 他认为在宇宙间，在具有重量的物体之间的空间内，充满着一种非常稀薄的用感官感觉不到的物质，互相离开的物体之间的作用，就是以它为媒介而传递的，这种媒质被称之为“以太”.

在笛卡儿之后，牛顿对于这个问题给出了不同的解答.他认为，在两个互相离开的物体之间，存在着只与两者之间的距

离有关而不需要传递时间的作用力. 他从这种见解出发，引入了作用于天体之间的万有引力的概念，圆满地说明了行星的运动. 他引入的万有引力，是通过空虚的空间并不以任何物质为媒介而作用于互相离开的物体之间的，这种作用以无穷大速度一举传达到远离的场所. 这样的作用叫做“超距作用”.

超距作用力的概念是牛顿力学中的最基本概念之一. 如果给出了力作为物体之间的距离的函数，物体的运动就可以完全由牛顿运动方程决定. 也就是说，如果给出了物体在某一时刻的位置和速度，就能正确地决定它在未来任意时刻的运动.

牛顿所引入的超距作用力的概念，获得了巨大的成功，此后被广泛地接受下来. 长时期以来，它和牛顿力学体系一同被看做是描述自然的不可动摇的原理. 站在承认原子间存在空虚空间的原子论立场上，自然要把原子间的作用力看成是牛顿的超距作用力. 如前所述，这种想法牛顿自己也曾尝试过，后来被气体分子运动论继承下来.

2.2 光的波动说

在牛顿以后，笛卡儿的媒递作用概念并没有完全消失. 围绕着光的本质问题，这两种立场形成了尖锐的对立. 牛顿提出了粒子说，他认为光是由发光体发射出来的粒子；同时期的胡克、惠更斯站在笛卡儿的立场上提出了波动说，认为光是以太的波动. 在牛顿以后的一段时期内，波动说不受欢迎，粒子说占了优势；但是，到了十九世纪初期，杨发现了光的干涉现象，菲涅耳又发现了光的衍射现象，于是波动说又复活而且确立了，粒子说被放弃了.

由于光的波动说得到了确证，物理学家又认为物体之间

的空间不是完全空虚的，而是充满了能够传播光波的媒质．笛卡儿的以太说又复活了． 由于发现了光的偏振现象，知道光波是具有垂直于传播方向的两种分量的横波． 由此可知，如果认为光是以太波，就必须承认以太不是象空气、水一类的流体，而是对弯曲力具有抵抗力的弹性体一类的物质．

当时牛顿力学已经有了较大的进展，而且以它为基础，推导出来了有关弹性体的理论．物理学家把以太看做弹性体，用弹性体理论研究以太，企图说明有关光的一些现象．但是，他们所想出的理论都以失败而告终，因为在弹性体中出现的波，它的振动方向总是和传播方向一致，即所谓纵波，这和光的性质有矛盾．

2.3 电磁学和场

经过摩擦的琥珀能够吸引纸片，磁铁矿能吸引铁，这一类事实是自古以来就知道的．但是，一直到十八世纪中期以至于进入十九世纪，关于电磁现象的科学研究才有了较大的进展．1785 年库仑发现，两个带电球体之间以及两块磁铁之间的作用力大小，和万有引力一样，与距离的平方成反比．泊松根据这个结果，于 1812 年完成了静电学和静磁学的数学理论．在静电磁力的范围内，它和牛顿力学没有任何矛盾．

电磁学方面的本质性的发现，不是从静的现象开始的，而是从动的现象开始的． 在伏打发现电池二十年之后的 1820 年，奥斯忒发现，如果把磁针放在导线旁边，导线内通过电流时磁针发生偏转． 在此以前，总是把电的现象和磁的现象分别考虑，现在这一发现指出了两者是有关联的，所以这是一项重要的发现．在发现这种现象大约一个月之后，毕奥、萨伐尔就决定了这个力的大小和方向．这个力和牛顿力学中的力不同，它不仅和电流与磁铁之间的距离有关，而且还和两者的相

互方向有关.

安培紧接着又发现两个电流之间也有作用力. 他指出，如果认为沿环状导线流动的电流和垂直于这个导线所决定的平面的磁铁是等价的，就能说明电流和磁铁以及电流和电流之间的作用力. 根据这个结果,他认为磁不是一次现象,而是由电流引起的二次现象;在构成磁铁的物质的原子中,有电流沿小圆环流动,磁现象就是由这个电流发生的. 这样,安培认为,如果知道了电流间的作用力,一切电磁现象就都能用牛顿力学来说明，这种力学称之为电动力学. 这种思想代表了企图完全用牛顿力学来说明电磁现象的一贯方针.

1831 年法拉第又发现了电磁现象的一个重要定律，它和奥斯忒定律同为电磁学的基础. 法拉第根据奥斯忒定律预想到,如果说磁是电流引起的,相反地,磁也可能引起电流;他根据这种预想进行了实验. 他发现磁铁在没有电流的导线附近移动时，导线内有电流流通;并且知道了，如果导线所在场所的磁力强度一定,导线内便没有电流,只有在磁力变化时才有电流流通. 这就是说，磁力自身不能引起电流，磁力强度的变化才能引起电流. 他为了把电流的磁感应定律作定量的表示,想出了表示磁力状态的新方法.

把铁粉薄薄地散布在纸上,再把磁铁放在纸下,铁粉就会排列成整齐的曲线. 这是自古以来就知道的表示磁力在磁铁周围空间分布状态的方法. 铁粉显示的曲线方向和磁力在这一点上的方向一致,在磁力较强之处,曲线密度较大. 法拉第从这一事实得到启发,想出了用“磁力线”表示磁力状态的方法. 他设想一种曲线,这种曲线上任意一点的切线方向,都和磁力在这一点上的方向一致，他把这种曲线叫做磁力线. 这样,磁力线可以布满全空间. 磁力线的一部分进入磁铁内部,如果认为它在磁铁内部也是连续的，所有磁力线就都是闭曲

线. 在空间内取任意闭曲线，通过这条闭曲线的全部磁力线就构成一个管子，这个管子称为“磁力线管”. 磁力线管的截面积随地点而不同，但是仅就一个磁力线管来说，它的截面积和磁力强度的乘积与场所无关，而是一定的. 由此可知，磁力强度和磁力线的密度成正比. 这样，用磁力线就可以把磁力在空间的分布状态完全表示出来.

法拉第利用以磁力线表示磁力的方法，定量地表示出了磁感应定律. 这个定律是：在环状导线内由磁感应产生的电流与通过环内的磁力线的时间变化率成正比（法拉第磁感应定律）.

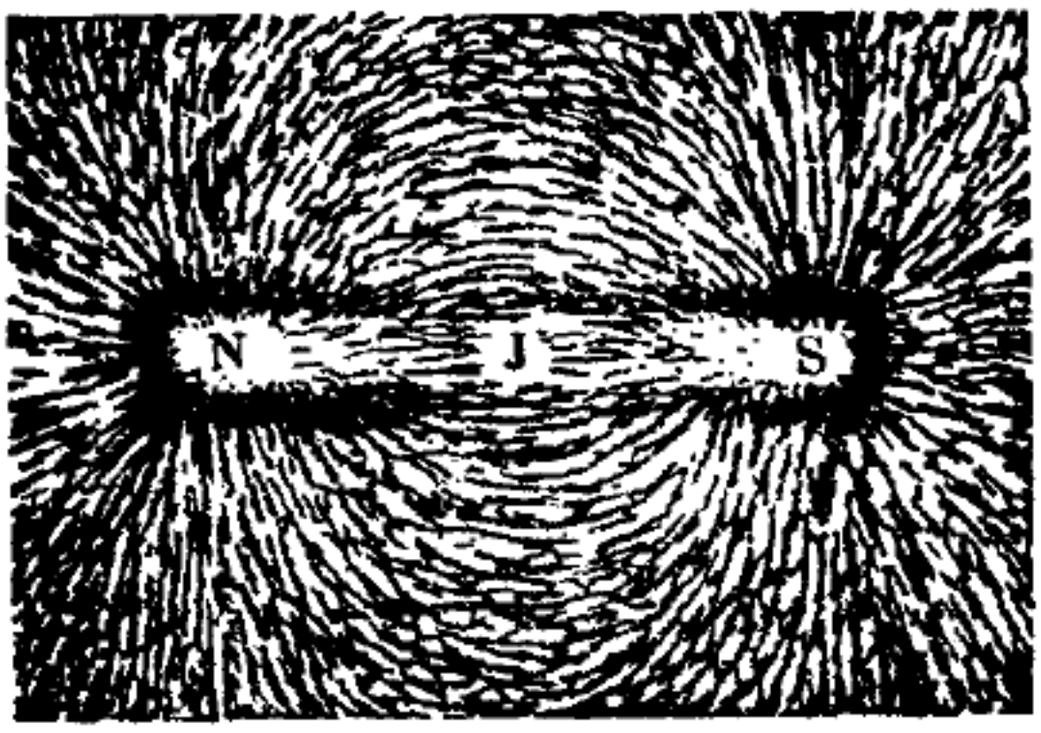


图 1　散布铁粉后出现的磁力线状况

利用奥斯忒定律，可以求出电流产生的磁力线. 把这定律和磁感应定律结合起来，还可以说明法拉第在发现磁感应定律同时发现的一个事实，这就是，把两根导线平行放置，一根导线内有电流流过或改变这个电流的强度，或者移动这根导线时，在另一根导线内就会有电流流过.

由于磁力线的想法获得了成功，法拉第又把同样的想法应用于电力，引入了“电力线”的概念. 可以认为，磁力线或电力线是表示磁铁或带电体所产生的磁场或电场的一种便利手段. 但是法拉第并没有这样想. 相反地，他认为磁力线或电力线和磁铁或带电体是独立的，都是空间自身所具有的性质. 于是他认为，不是磁铁或带电体产生了磁力线或电力线，而是由于放入了磁铁或带电体，空间内存在的磁力线或电力线才改变了状况.

法拉第曾企图用电力线或磁力线来说明带电体或磁铁之间的作用力. 他指出，如果认为电力线或磁力线具有互相排斥的性质，又由于这种性质尽可能地取稳定状态，就能够说明静电荷所产生的力的分布以及同号带电体互相排斥，异号带电体互相吸引的现象. 他还认为能够被磁铁吸引的物质——顺磁体，是磁力线容易通过的物质；和顺磁体相反，受到磁铁排斥的物质——反磁体，是磁力线不容易通过的物质；这样就能够说明这些物质对磁铁显示出的性质.

站在牛顿力学的立场，认为力是已知的，至于它是怎样产生的，则无法说明，而且认为力是物质的附属质性，和脱离了物质的空虚空间没有任何关系. 法拉第对力的看法和牛顿力学有本质上的不同，是一种革命性的看法. 法拉第认为，电力、磁力是脱离了物质的空间的性质，物质间的作用力需要由空间的性质来说明. 法拉第的力不是越过空间作用于物体之间的牛顿力；法拉第的力是空间的属性，是遍及空间各点而存在的“力场”的力.

在牛顿力学具有强大的势力的当时，法拉第的这种革命性思想，当然不能立即为人们所接受. 另外，法拉第自己没有用数学方法把他的想法表达出来，这也是他的想法难于被人们接受的一个原因.

十九世纪中期，在法拉第发展他的力线想法同时，牛顿力学的信奉者沿着安培所指出的路线发展了电磁学. 从牛顿力学立场发展电磁学的，主要是诺埃曼和韦伯. 他们指出，可以从安培立场把法拉第的磁感应定律公式化. 诺埃曼和韦伯的电磁学的主要特点在于用原子论的观点研究电磁学，菲西那曾经认为，“电流是带电粒子的流动”.他们所采取的就是这种观点. 诺埃曼、韦伯的原子论观点，后来通过洛伦兹的电子论，和法拉第的“力场”的观点统一起来了.

2.4 麦克斯韦理论

麦克斯韦于1861年把法拉第“力场”的概念用数学方法加以公式化，并以此为根据完成了电磁学的理论体系. 当时把光波作为以太的弹性波，麦克斯韦由于受到法拉第力线想法的启发，也同样采用了这种方法，他企图以力学模型为基础，把电磁力的场用数学方法表示出来. 当时对他启发最大的是 W. 汤姆逊所指出的弹性体的位移速度场和磁力场之间的类似关系.

麦克斯韦为了表示法拉第的电磁力线，设想了下述模型. 按照法拉第的想法，磁力管在任意点的截面积和该点的磁力强度的乘积是一定的，他认为全空间都充满了这样的磁力管. 而且各磁力管都具有向横方向扩展和向纵方向收缩的性质. 磁力管的这种性质恰好和旋转液体的相似，旋转液体受离心力作用，对旋转轴来说，在横方向扩展，在纵方向收缩. 麦克斯韦设想各磁力管内都充满了以太，而且都作旋转运动. 这样，全空间就被对应于磁力管的以太旋涡所充满. 但是，这样挤得满满的以太旋涡，它自身不能很好地同时在同一方向旋转. 因此，麦克斯韦设想，在各旋涡之间夹有象滚珠轴承那样的粒子. 在这样的模型中，磁场相当于旋涡的角速度，电场相当于旋涡发生形变时所产生的弹性力，电流是相当于滚珠轴承的粒子的流动.

今天看来，这样的模型是非常奇妙的，而麦克斯韦就是用这种模型导出了他的电磁场方程. 在以后的著作中，他没有再使用这种模型，而是用奥斯忒和法拉第定律推导出了电磁场方程. 这样推导出来的方程是一组偏微分方程，表示电磁场在空间各点上有什么值以及它们如何随时间变化. 在牛顿方程中力是已知的，麦克斯韦方程与此不同，它是把力作为未

知函数．从麦克斯韦方程能够很容易地推导出奥斯忒和法拉第定律．但是，麦克斯韦理论并不只此，它还包含着更为丰富的内容．

2.5 光的电磁波说

麦克斯韦方程的基本特点，是电磁力的变动和牛顿的超距作用力不同，不是一举传达到远方的，而是以有限速度从变动点逐渐地传达到远方．麦克斯韦在推导他的方程时发现，电磁力是以波动方式在空间传播的．这样，根据他的理论所预言的电磁波速度，和不久以前斐索所求的光速完全一致；而且电磁波是以横波方式在空间传播，这也正好和光的波动性质一致．于是麦克斯韦想到，难道不可以把和光具有相同性质的电磁波看成是光吗？他认为光的本质就是电磁波．从而诞生了光的电磁波说．

麦克斯韦理论所预言的电磁波的存在以及它和光具有同样的性质的问题，由赫兹从 1886 年到 1888 年用实验证明了．他把感应线圈连结在圆弧形导线上，发现蓄电器通过线圈放电时，在导线间隙有火花发生，而且还发现，在离开一点的地方放置一个形状相同的第二个导线时，在它的间隙内也同时发生火花．这是因为放电时对第一导线的间隙加上了正负交变的电压，因而发生电磁波，它通过空间传递到第二导线，在第二导线中也产生正负交变的电压，因而引起火花．

赫兹确认了在第二导线内能够产生和第一导线相同的振动电压，并且进而测定了振动频率，由此知道，电磁波的速度和光的速度是相等的．他还发现电磁波和光一样，遵从相同的反射、折射定律，和偏振光有相同的性质．

光的电磁波说就这样得到了证实．光的电磁波说是麦克斯韦理论的最大成果，也是法拉第关于力能够在脱离了物质

的空间独立存在的思想的确证. 电磁力正是通过光才能在空间表现自己的形态. 和电磁力相对应的力场——电磁场的存在，以及它作为电磁波——光而独立存在的性质的思想，是法拉第、麦克斯韦理论的基础，对现代的基本粒子论也有不可估量的影响.

2.6 洛伦兹电子论

麦克斯韦的理论以光的电磁波说获得了最初的巨大成果. 这是关于电磁波在没有物质存在的空间内传播的理论. 至于如何处理物质和电磁波的相互作用，则成为麦克斯韦理论的第二大课题. 麦克斯韦认为，具有重量的物质是布满全空间的以太的一部分，有物质的地方只是由于各种电磁常数值不同，才和空间其他部分有区别. 赫兹又发展了这种想法. 但是后来理解到这种想法不足以说明运动物体和电磁场之间相互作用. 而且这种想法和原子论发展中所指出的物质结构也有矛盾.

洛伦兹在 1892 年把麦克斯韦理论和物质的原子结构理论结合起来，提出了说明电磁场和物质相互作用的完善理论. 洛伦兹采取了原子论的观点，和诺埃曼、韦伯一样，认为物质是由带电粒子构成的. 但是洛伦兹的想法和他们的有本质上的不同，诺埃曼、韦伯认为带电粒子间的相互作用是超距作用，洛伦兹没有采用这种观点，他认为荷电粒子间的相互作用，是由充满了粒子间的以太传达的媒递作用. 在这一点上他采用了麦克斯韦理论. 这样他就把不连续物质和连续的电磁场统一成了一个理论. 他的观点和以前的原子论以及笛卡儿派不同，他是同时采取了两种观点的二元论者.

洛伦兹电子论是以物质由带电粒子构成和以太为基础的二元论学说，在说明物质的电磁性质方面获得了巨大成功. 他

从电子论的观点研究了金属的导电问题，提出了固体电子论.

他的理论的最大意义在于为处理物质和光的相互作用问题开辟了道路. 物质发出光和吸收光是日常常见的现象. 很早以来就知道，放在火焰中的物质发出该物质所特有的波长的谱线. 至于光的发出和吸收的机构是什么，当时还不知道. 洛伦兹认为，既然原子含有电子那样的带电粒子，这些电子在原子中振动时，原子的机能就和赫兹用于发现电磁波的电振子一样，能够发出或吸收电磁波. 然而，因为原子是非常小的，原子内的电子振动时发出或吸收的电磁波的波长，要比赫兹振子发出的电磁波的波长短得多，恰好是光的波长程度. 于是洛伦兹指出，物质发出光和吸收光是来源于原子的内部结构，对研究物质和光的相互作用指出了正确方向.

洛伦兹的理论综合了十九世纪的几项重大发现——原子论的确立，电子的发现，法拉第、麦克斯韦的电磁学、光的电磁波说等，总结了十九世纪末期的理论，是经典物理学的最高理论.

2.7 以太和相对论

象十九世纪的物理学家所想象的那样，如果认为电磁波是布满全空间的假想媒质——以太的波动，则考虑运动的物体和电磁场的相互作用时，以太和物体的相互关系就成了问题. 对于这种情况有两种想法. 第一种想法是，运动物体带动它周围的以太一同前进；另一种想法是，物体对以太没有任何影响，只是在其中通过. 第一种想法在说明光学的实验事实上在很多方面要出现矛盾. 洛伦兹在他的理论中采用了第二种观点，并且指出，除了一个实验——著名的迈克耳逊-莫雷实验之外，在其他方面不存在任何矛盾.

迈克耳逊和莫雷企图通过实验直接了解以太的运动. 他

们认为，如果说光是以太的波动，从对以太静止的系统和对以太运动的系统测得的光速应当是不同的．这和海中的波浪一样，从静止船上来看和从航行船上来看，波浪的速度是不同的．由于光速是每秒三十万公里这样大的数字，最好是在快速运动的物体上观测．于是他们决定利用地球的运动来进行观测，使光在东西方向和在南北方向通过同一距离，由于地球运动的影响，在两个方向光通过的时间应当不同．但是，他们所预期的结果完全没有出现．无论从对以太静止的系统来看，或从对以太运动的系统来看，光的速度是相同的．

这个实验看来好象支持运动物体带动以太的观点，但是，这种观点和许多实验事实有矛盾．而且第二种观点，除了迈克耳逊-莫雷实验以外，不存在任何矛盾．于是，以太和运动物体的相互关系就变成了一个难题，在很长时期内使物理学家大伤脑筋．

最先找到解决这个问题的线索的，是洛伦兹和斐兹杰惹．他们指出，采取物质只是在以太中通过的观点时，如果假定物体在它的运动方向以适当比例缩短，就能够说明迈克耳逊-莫雷实验．

洛伦兹和斐兹杰惹的假定，解决了洛伦兹理论中物体和以太的相互关系这个难题．但是，另一方面，由这件事知道，考虑以太这种媒质是否有意义就有疑问了．根据洛伦兹理论，物体在以太中运动时对以太没有任何影响．因此，为了了解物体和以太的关系，除了观测被看做是以太波的电磁波以外，没有其他方法．但是，电磁波的速度无论怎样观测都给出同一数值．由此可知，以太对我们是运动还是静止，我们没有任何线索能够决定．反过来说，以太的运动对我们来说是怎样说都可以的，因为我们没有任何方法来观测它．

这样就逐步地认识到，为了说明电磁波和光而引入的以

太，实际上没有任何意义. 因此在物理学家之中出现了这样一种倾向，即不用以太说明电磁场，承认电磁场自身是实际存在的，以迈克耳逊-莫雷的实验结果，亦即光速从任何作等速直线运动的系统看来都是一定的这一事实为基础，重新建立理论.

为了说明以太在运动物体的电磁学中所起的作用，诞生了斐兹杰惹、洛伦兹、彭加勒等人的先驱理论，爱因斯坦以这些理论为基础，于1905年建立了狭义相对论.

一个物体是在运动还是静止的，本来就是相对的事情，只有相对于另外一个物体，才能判断它在运动还是静止的.随着所采取的基准不同，对一个物体是运动的还是静止的判断也不同. 十九世纪的物理学家曾引入以太这种布满全空间的特殊媒质；如果这种媒质是实际存在的，一切物体的运动都可以以它为基准. 十九世纪的物理学家曾认为，以太可以作为物体运动的绝对基准. 但是，迈克耳逊-莫雷实验从根本上推翻了这种想法. 于是爱因斯坦放弃了作为运动的绝对基准的以太，认为运动完全是相对的(根据这种思想，他把这一理论命名为相对论)，又根据迈克耳逊-莫雷所指出的光速是永远不变的这一事实，建立了新的力学理论. 他的理论从根本上改变了牛顿力学中的时间、空间概念，导出了许多值得惊异的结果.

根据他的理论，任何作用都不能以超过光速的速度传递，因此，不存在牛顿所考虑的以无穷大速度传递的超距作用.在自然界里，只存在以小于光速传递的媒递作用，于是法拉第、麦克斯韦场就成了这种媒递作用的媒质，是抛开了假想媒质以太而独立存在的场.

他的理论还预言，时间在运动物体中比在静止物体中要慢一些；运动物体的质量大于静止物体的质量；质量和能量是

等同的，是可以互相转化的等等.

这些预言的正确性不久就被证实了. 在日常经验的范围内，由于物体的运动速度比光速小得很多，所以相对论的效应非常小，几乎无法检知. 但是基本粒子的运动速度和光速几乎是同一数量级，在这样的世界里，相对论的效应具有重要意义. 实际上，在基本粒子的现象中，相对论的一切预言几乎都证实了是正确的.

3. 原子结构和量子力学

3.1 量子论的诞生

十九世纪的最后一年，即 1900 年夏末的一天，普朗克和儿子一起到柏林郊外的哥鲁内瓦尔特森林里去散步. 他在这长时间的散步过程中，对儿子热心地谈到了他在这一年夏天得出的关于热辐射问题的新构想. 据说，他曾对儿子说，他作出了第一流的发现，是革命性的发现，恐怕只有牛顿的发现才能与之相比. 实际上，他这时对自己工作的认识是正确的，物理学就以这个时期为境界，进入了一个大革命的时代，量子论的时代.

被加热的物体能放出红光，随着温度上升，光亮程度增加，光的颜色逐渐变为蓝白色，这样的热辐射现象是随时随地都可以见到的. 但是，到了十九世纪末期，才对热辐射问题进行了科学的研究. 不能忽视的是，这种研究是由于生产上的迫切要求而进行的.

至十九世纪末期，已能对热辐射产生的光谱进行测定. 在十九世纪末期，瑞利和金斯曾经企图用经典统计力学方法从理论上说明热辐射光谱，结果遇到了重大困难. 他们的结果在光谱的长波长方面和实验结果符合一致，在短波长方面

则完全不符合. 而且用他们的结果进行计算时，热辐射的总能量变成无穷大. 因此，把牛顿力学和统计方法结合起来以说明热辐射现象的经典统计力学，似乎存在着某种本质上的缺陷. 另一方面，维恩用一种根据不十分明确的方法导出了一个公式. 维恩的公式在短波长方面和实验结果很好符合，但在长波长方面不一致.

普朗克认为一定能找出一个在短波长方面和维恩公式一致，在长波长方面和瑞利-金斯公式一致的公式，实际上，他确实找到了满足这项要求而且和实验完全一致的公式（称为普朗克辐射公式）. 然后他想从理论上推导出这个公式. 这时他采用了洛伦兹的思想，认为可以把物质发出的光看成原子发光的集合.

这时他注意到，如果认为原子不是连续地一点点地放出或吸收能量，而是每次以特定大小断续地放出或吸收能量，就能说明他的公式. 这种思想和已知的经典物理学的思想完全不同，因此，连普朗克自己也不能立即接受. 但是经过 1900 年夏天的热心研究之后，他确信无论怎样也迴避不了这个结论，“能量子”的概念就是这样诞生的.

3.2 光量子说

普朗克量子假说指出了能量的发射和吸收，不是取连续的数值，而是取不连续的分立值. 这一假说的进一步发展，是在相对论发表的那一年，即 1905 年由爱因斯坦实现的. 他是一个勇于放弃旧概念采取新概念的科学家. 他把量子假说应用于两个问题，都获得了成功.

一个是光电效应问题. 用光照射金属时，有电子从金属表面逸出，逸出电子的能量和光的强度无关，只与光的波长有关. 光的波长越短，逸出电子的能量越大. 用以前的电子连

续地吸收光能的理论，怎么也不能说明这个问题. 爱因斯坦采用了普朗克的假说，指出如果认为光是具有和它的频率成正比（和波长成反比）的特定能量的能量块——能量子，我们就能说明这个实验事实(光的量子说).

另一个问题是固体比热问题. 很早就知道，固体比热在低温下的变化，用经典统计力学是怎么也不能说明的. 爱因斯坦指出，如果把固体原子的热振动能看成不是连续的，而是取不连续的分立值，就可以说明固体比热在低温下的变化情况了.

3.3 放射能和原子

在实验物理学方面，在 J. J. 汤姆逊发现电子的前后，也已有了一系列和原子结构有关的重大发现. 1896 年贝克勒尔发现了铀能放出穿透性很强的放射线. 居里夫妇紧接着在 1898 年发现了具有和铀同样的放射性的元素钋和镭；1900 年迪贝尔发现了锕. 1899 年 J. J. 汤姆逊的学生卢瑟福发现，铀放出的放射线至少是由两种放射线构成的，一种是穿透性较弱的 α 射线，一种是穿透性较强的 β 射线. 1900 年毕拉德发现，在镭放出的放射线中，除了 α 射线和 β 射线外，还有一种穿透性更强的放射线，即 γ 射线. 1900 年居里夫妇利用 β 射线在磁场和电场中弯曲的现象，按照 J. J. 汤姆逊的方法，决定了 β 射线的荷质比 e/m，证明了 β 射线就是高速电子流. 1903 年卢瑟福发现，α 射线和 β 射线相比，虽然非常难于弯曲，但是在磁场或电场中，能在 β 射线的反方向弯曲；1908 年他以确实的根据证明了 α 射线就是氦的正离子. γ 射线不受电场和磁场的偏转，它是波长极短的电磁波，这是在稍晚一些的 1914 年由卢瑟福和安德雷德证明的.

在发现这些放射性元素之后，紧接着又发现了氡、铀X等

放射性元素，并且发现这些放射性元素放出放射线之后，很快地就转变为其他元素. 因为铀和镭的寿命都非常长，所以没有立即注意到这种现象. 1902 年卢瑟福和索蒂证明了，放射性元素都以它固有的寿命放出 α 射线和 β 射线，逐步地转变为其他放射性元素，最后成为没有放射性的铅，结束它的衰变系列. 这样一来，就清楚了，原来被认为是不变的原子，也有一些能自行衰变而成为其他原子.

在研究放射性元素衰变系列的过程中，曾发现了很多放射性元素. 但是，在这些放射性元素中，有一些元素的化学和物理性质都非常相似，几乎无法区别. 这些元素除了原子量略有不同，放射性寿命不同以外，其他的化学和物理性质都完全相同，在门德列夫周期表内占有同一位置. J. J. 汤姆逊指出，在没有放射性的元素中，也同样存在着以原子量不同相区别的元素. 他在测定氖的阳极射线的荷质比时发现，它的轨迹分为两部分，其中一部分来源于原子量为 20 的氖，另一部分来源于原子量为 22 的氖. 阿斯顿把汤姆逊的方法加以改进，指出几乎在所有元素中都存在着原子量略有不同的元素. 索蒂把这些原子量略有不同的元素，命名为“同位素”. 阿斯顿发现了许多元素的同位素，并测定了它们的质量. 所测得的同位素的质量，大

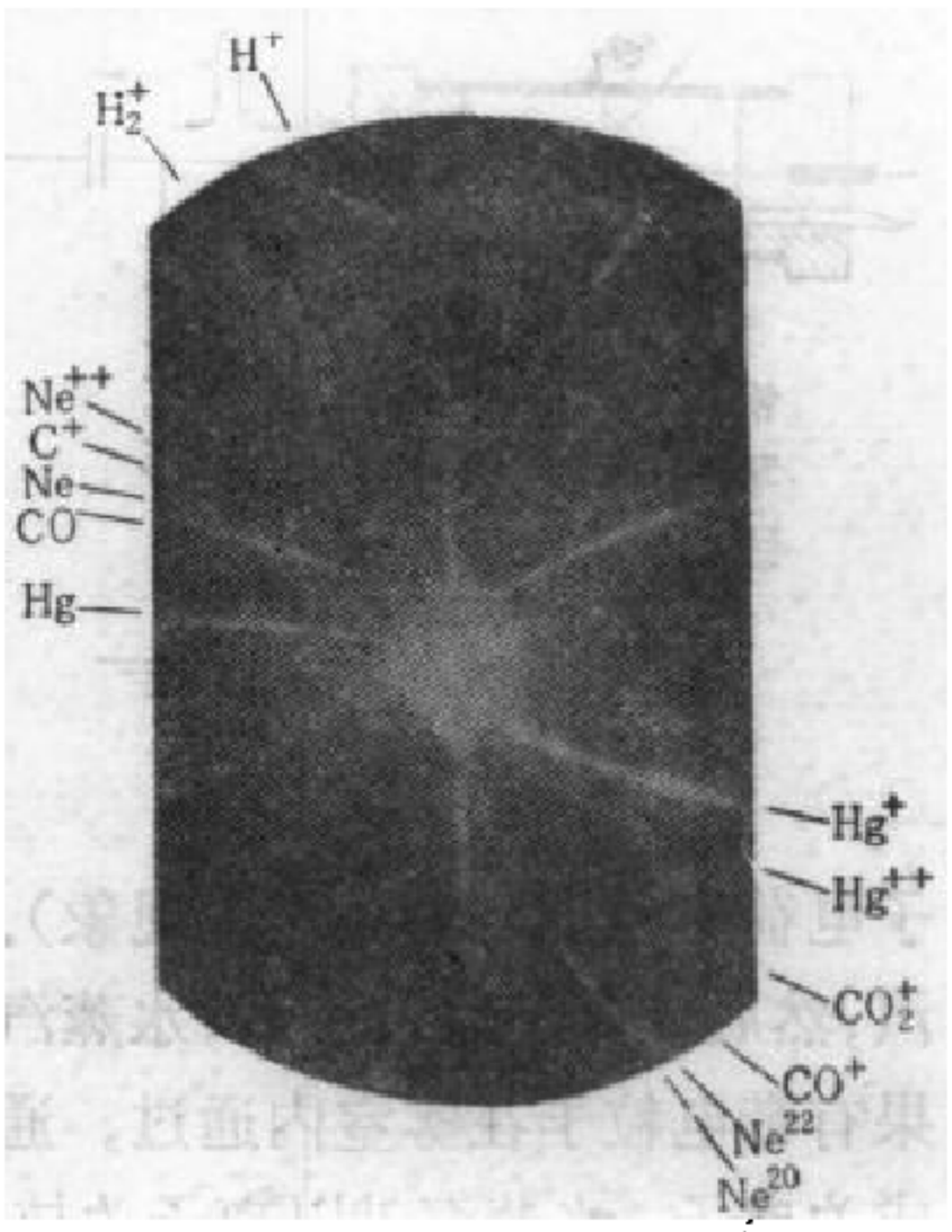


图 2　用阿斯顿的质谱仪摄得的各种物质的径迹. 氖 20 和氖 22 的同位素是分离的

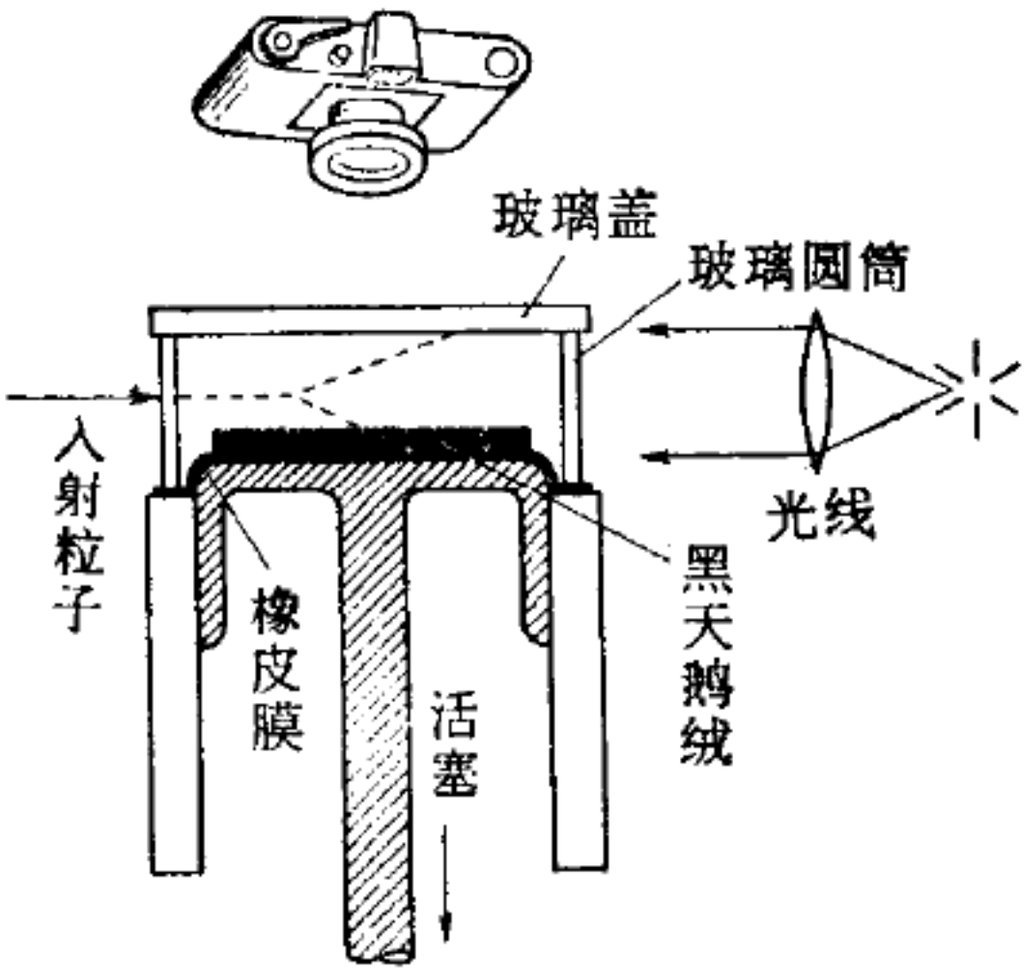


图 3　威耳孙雾室结构．活塞下降时内部蒸汽达到过饱和状态，如果这时有带电粒子通过，就在它路径出现雾线

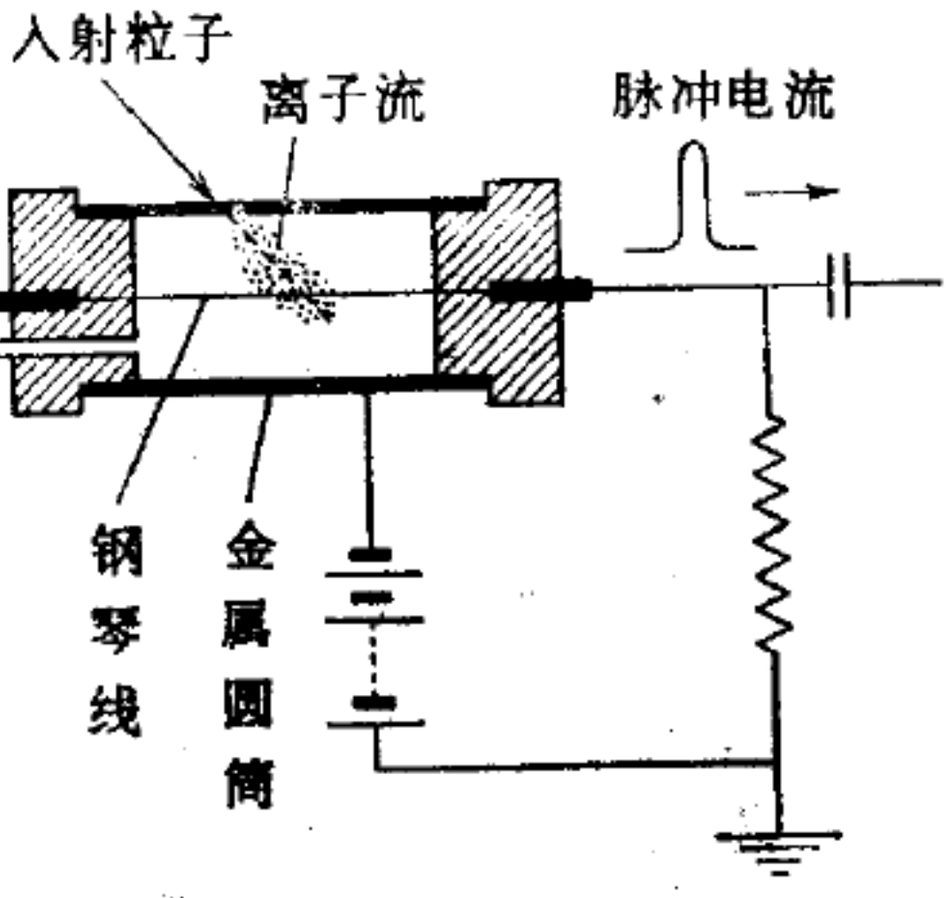


图 4　计数器结构

体都是最轻的氢原子（氢原子中有原子量为 2 和 3 的两种同位素）质量的整数倍．用化学方法测得的原子量和整数值略有偏差，这是因为化学上测得的原子量是同位素原子量的平均值的缘故．

另一方面，在实验技术上也有了划时代的进步，在这以前，不能直接观察原子和电子的轨迹，也不能直接地数它的个数．但是，威耳孙在 1912 年发明了雾室，盖革在 1908 年发明了计数器，使这些都成为可能了．

威耳孙雾室是利用在过饱和水蒸汽中产生离子，水蒸汽就以这些离子为核心形成水滴的现象制成的（以前汤姆逊测定离子电荷时也曾利用过这一现象）．在减压的雾室内充满水蒸汽，然后使雾室急速膨胀，水蒸汽便成为过饱和状态．这时如果有带电粒子在雾室内通过，通路附近的气体分子便电离而成为离子，水蒸汽就以离子为核心凝结成云雾，就象飞机云*

---

* 指飞机飞过时后面的烟雾（译者注）．

那样，于是就出现带电粒子的径迹．这样我们就能看到电子、α粒子的径迹．

盖革计数器是在减压的金属管中封入导线，在导线和管壁之间加上适当电压的装置． 如果带电粒子在管内通过，通路上的气体分子便发生电离而成为离子．这些离子被管壁和导线之间的电场加速，和其他气体分子碰撞而产生新的离子，于是离子数象滚雪球一样地增加，产生离子雪崩，就在管壁和导线之间发生脉冲电流（只在很短时间内流动的电流）．把这种脉冲电流取出放大，观察脉冲发生的次数，就能知道有几个带电粒子在管内通过．

3.4 原子模型的确立

卢瑟福在1908年用盖革计数器计量了由镭放出的α粒子个数，这时他注意到，通过金属薄膜的α粒子有一部分改变了行进方向．他认为这是由于α粒子通过金属膜时和金属原子碰撞受到散射引起的，并详细地观察了α粒子被金属原子散射的情况．这时他发现了一个令人惊异的事实，有相当多的α粒子被金属膜弹射回去，回到原来方向．卢瑟福用威耳孙雾室拍摄了照片，确认了这种大角度的散射是α粒子和金属原子的一次碰撞引起的．

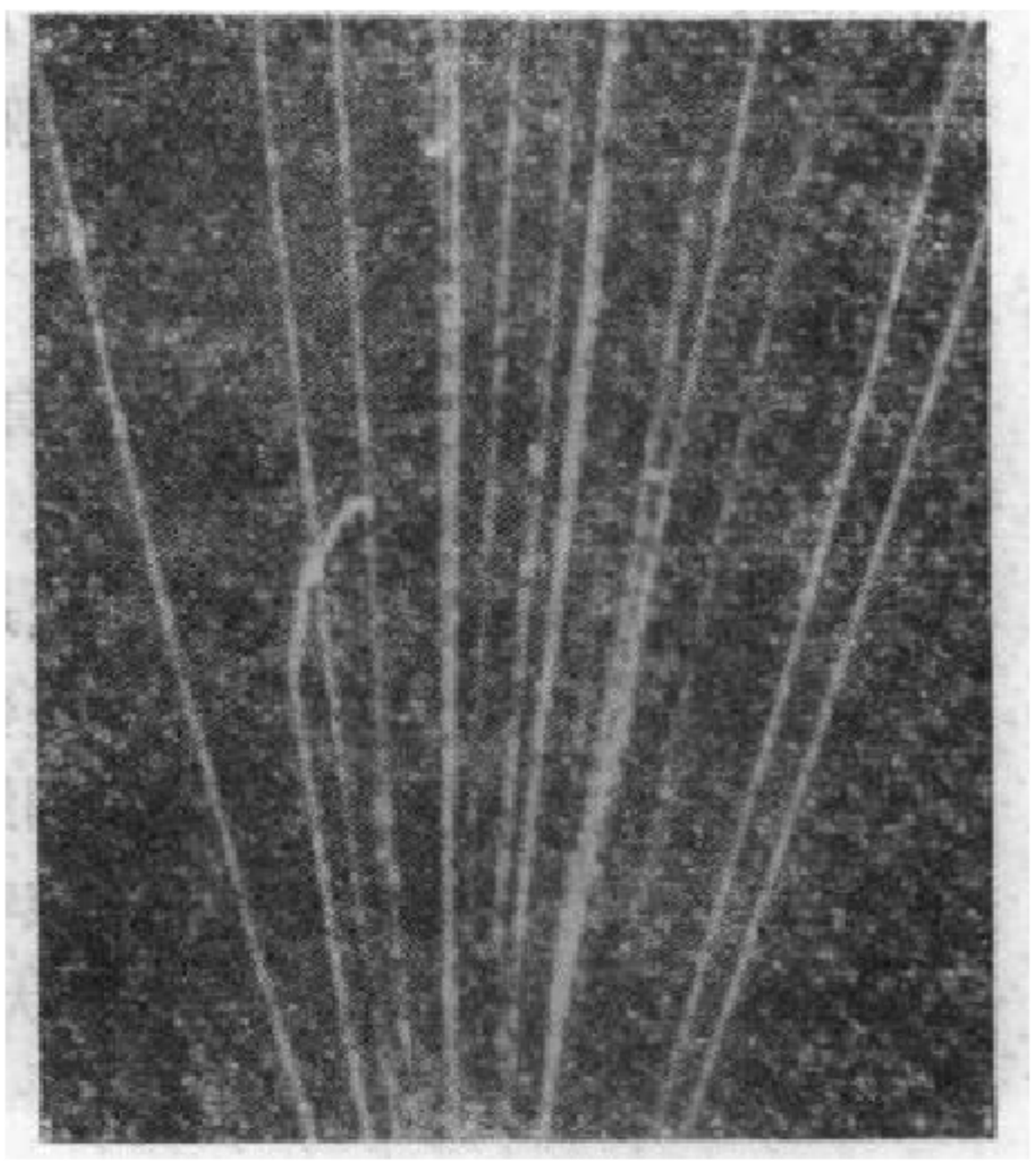


图5　α射线被氧原子散射的状况

关于原子结构，当时普遍承认汤姆逊于1903年提出的模型．由于原子是中性的，显然，它是由带负电的电子和带正电的粒子构成的，而且原子的质量大部分集中在这个带正电的粒子内．汤姆逊认为这个带正电的粒子和原子的大小大体相同（10^{-8}厘米），小的电子埋没在这个粒子内部．这种想法从经典电磁学的观点，能很好地说明原子的稳定性．

但是，用这个模型不能说明卢瑟福的实验．在汤姆逊模型中，电子埋没在原子内部，正、负电荷几乎完全被中和，因此α粒子不可能因受电力作用而发生大角度的散射．卢瑟福实验暗示出，带正、负电荷的粒子在原子内是分离存在的．

卢瑟福在1911年作出了他的最大发现，并且提出了一个原子模型．他认为在原子中心有一个带正电的粒子，大小约为三万亿分之一厘米（3×10^{-13}厘米）；电子围绕着它旋转，轨道大小约为一亿分之一厘米（10^{-8}厘米）．用这个模型能圆满地说明α射线的散射和他的学生马斯登研究的β射线的散射．这样就明了了，原子具有和太阳系非常相似的结构．另外，长冈半太郎在1904年也提出了一个和卢瑟福原子模型非常相似的模型．

卢瑟福把这个位于原子中心、具有原子大部分质量、并且带正电荷的粒子，命名为“原子核”．他从α射线被原子散射的比率与原子核电荷的平方成正比这一事实出发，认为原子核电荷的大小是电子电荷的原子序数（原子在门德列夫周期表中从氢开始的顺序数）的倍数，围绕着原子核旋转的电子个数等于原子序数．他把氢的原子核特别称为“质子”．质子是最轻的原子核，其他原子核的质量大体是质子质量的整数倍．看来质子是某种非常基本的粒子．

3.5 线光谱的量子理论

从很早以来就知道，各种元素都能发出或吸收几种特定波长的光．到了十九世纪末期，巴耳末、里德伯等人发现，这些元素的线光谱系列的波长具有简单的规律性．

从汤姆逊发现电子以后，物理学家企图把线光谱和原子结构结合起来，用洛伦兹建立的经典辐射理论加以说明，结果都归于失败．用哪个原子模型，也不能说明线光谱的规律性．

把卢瑟福的原子模型和经典辐射理论结合起来考虑时，发现这个模型存在着重大的疑难问题．根据经典辐射理论，围绕着原子核旋转的电子，因连续发光而损失能量，沿螺旋状轨道向原子核接近，最后落到原子核内．只要以经典辐射理论为根据，卢瑟福原子模型不仅不能说明线光谱，甚至也不能说明原子的稳定性．

1913 年玻尔对这个问题给出了正确的解答．玻尔把量子假说应用于卢瑟福原子模型，建立了能同时说明原子的稳定性和线光谱公式的理论．

按照经典理论的思想，电子可以沿以原子核为一个焦点的任意椭圆轨道运动．但是，玻尔假定，电子不能在任意轨道上运动，只能在一组特定的分立轨道上运动．这些分立轨道由量子化条件决定，即轨道角动量只能取与不连续整数成正比的值．对应着这些特定的分立轨道，原子具有特定的分立能态．在通常情况下，电子处于和最低能态相对应的轨道上，根据量子化条件，在这个轨道的内侧不能再有轨道，这样就可以说明原子的稳定性．他还假定电子可以从能量低的轨道向能量高的轨道跃迁，也可以从能量高的轨道落到能量低的轨道．这时原子要吸收光或发出光，光的能量等于电子轨道间的能量差．他又把爱因斯坦光量子说中的能量和频率的关系

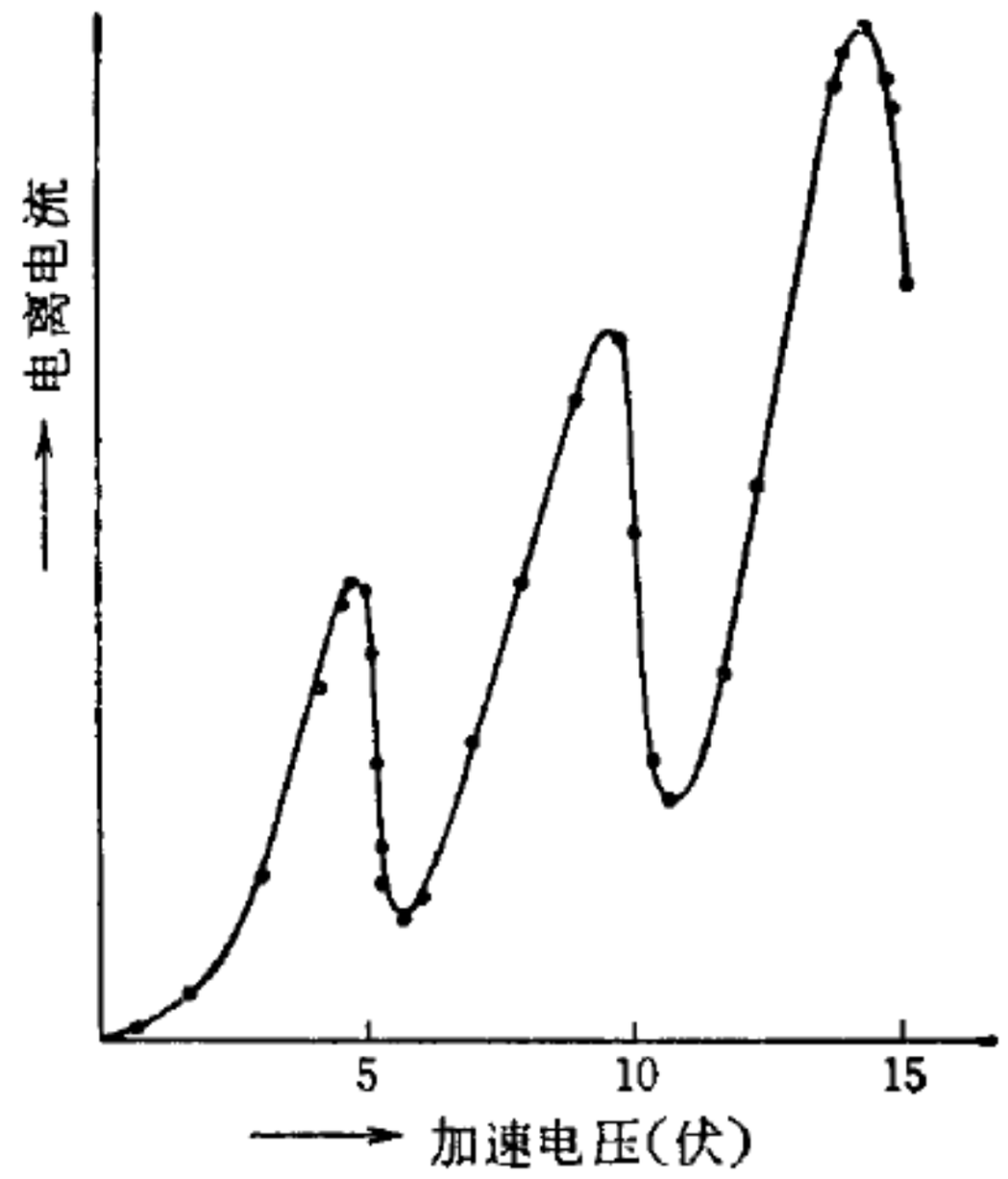


图 6　夫兰克-赫兹实验

应用于原子发出光或吸收光，这样就能求出光的频率，也能求出波长．这样玻尔就圆满地说明了原子线光谱的公式.

象玻尔所想的那样，电子在原子内只存在于特定的分立能态内，这一设想在玻尔理论提出后不久，就由夫兰克和赫兹用实验证明了．他们测定了使电子离开原子核所需要的能量，确认原子只在玻尔所说的特定分立能态内,才能显著地发生电离现象.

3.6　自然界的连续和不连续

由于量子假说在说明热辐射、光电效应、固体比热、原子光谱以及其他多数现象方面,都获得了巨大成功，因此，关于量子假说的正确性是不容置疑的了． 但是，量子假说和以前的经典理论在性质上显然是互不相容的． 在经典理论中，能量本来可以取连续的数值;而在量子理论中,能量只能以特定的不连续值存在，这个问题从经典理论的观点是怎么也不能理解的．从经典理论来说,电子轨道是无数连续分布的轨道,而且都具有同等的可能性；从量子论来说，电子只能处于玻尔所说的特定轨道；因此这两种观点是互不相容的． 经典理论认为光是连续的波动，光的发出和吸收也是连续过程； 而普朗克谐振子的吸收光和发出光是伴随着不连续的能量跃迁而进行的,以及玻尔所说的电子可以在轨道间跃迁等,这些问

题用经典理论是完全不能理解的.

经典理论中的连续性和量子理论中的不连续性的对立和矛盾,决不是把前者放弃就能简单解决的问题;这样的问题在光量子说中也以极为尖锐的形式出现过. 爱因斯坦假定光是具有特定能量的粒子,说明了光电效应;康普顿效应的发现,更加证实了光的粒子性.康普顿发现,X射线照射在电子上发生散射时,散射后的X射线波长比原来的长一些,他把光量子说应用于X射线,并指出如果认为X射线是具有从爱因斯坦的能量和频率关系决定的特定能量,以及由动量和波长关系决定的特定动量的粒子,就能很好地说明上述事实. 但是,另一方面,光既然能产生干涉、衍射条纹,它具有波动性也是不可动摇的事实. 这样就不得不承认光同时兼备波动和粒子两种互相矛盾的性质.在表示光的粒子性的爱因斯坦关系式中,也使用了和粒子性相矛盾的频率、波长这样的波动的名词.

3.7 物质波和量子力学

由量子理论产生的光的波动性和粒子性的矛盾和对立,不是表面上的,而是深刻的矛盾和对立. 认识到这样的问题之后,许多物理学家开始意识到,这种矛盾和对立可能是自然本身所具有的性格.

德布罗意采取了这种观点,于1924年大胆地提出了一条假说. 他考虑到,如果说光的二象性是自然本身所具有的性格,那么,构成物质的基本粒子即电子和质子等,不是也可以具有二象性吗? 他认为,如果被看做波动的光具有粒子性,那么被看做粒子的电子和质子等也可以具有波动性. 于是,他把爱因斯坦能量和频率的关系反过来应用,认为具有一定能量的粒子伴随有正比于这能量的频率的波动(物质波). 这样他指出,玻尔给出的轨道长度,恰好是伴随着电子的物质波的

波长的整数倍，存在的轨道表示物质波的驻波形式，而在其他被禁止的轨道上，物质波由于干涉而消失．这样他就指出了能够用物质波说明玻尔提出的轨道量子化条件．

德布罗意物质波动说的实验证明，是由戴维孙、革末、G. P. 汤姆逊、菊池给出的．他们曾观察到在结晶表面上被反射回来或者穿过结晶薄膜的电子束产生的衍射条纹．

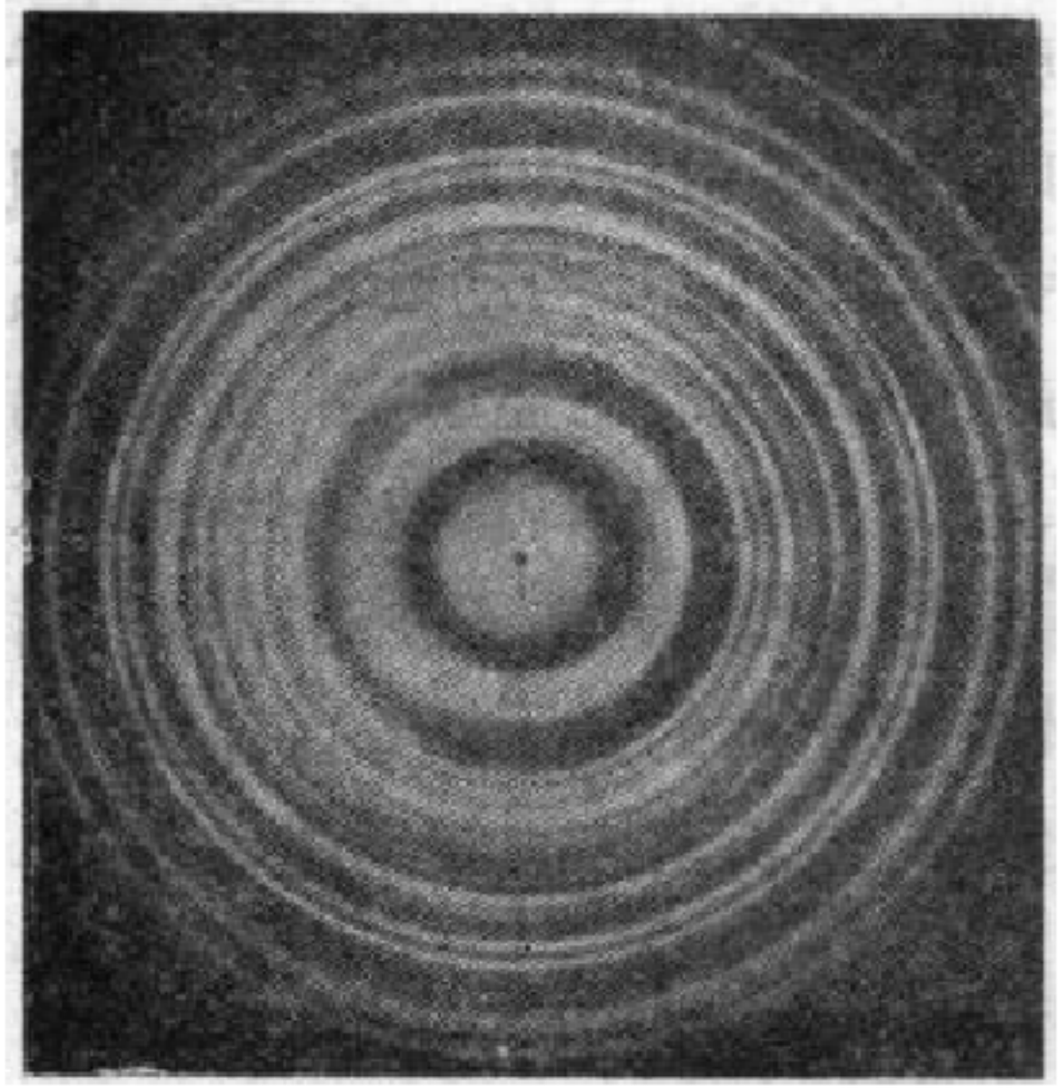


图 7　电子束被锡膜衍射时出现的条纹

这样就知道了，物质同时具有经典理论认为是相互矛盾的两种性格，即波动性和粒子性．在这以前意义还不清楚的量子化条件，实际上正是反映了物质的这种二象性．只要坚持经典理论的思想方法，这种二象性是怎么也不能调和的性质．原子或基本粒子世界的法则告诉我们，它和我们在日常生活中总结出来的经典概念有本质上的不同．在经典理论中，波是连续地在全空间扩展的；而粒子是不连续的，集中存在于空间的一小部分内．在全空间扩展的波又怎能同时集中存在于空间的一小部分呢？

能够明确地表示物质的二象性，而且满足量子理论的数学理论——量子力学，是由海森堡于 1925 年，薛定谔于 1926 年独立建立的，他们的理论在形式上完全不同，但是不久就认识到，数学意义是完全相同的．至于如何解释量子力学的数学表示式，当时没有立即解决，但是不久以玻尔为中心的哥本哈根学派说明了它的意义．

在量子力学中，电子、质子等粒子的状态，可以用一个表示波动的函数来表示；但是，这不是普通的波，而是按几率变化的波．在量子力学适用的原子和基本粒子世界里，和在经典力学适用的宏观物质的世界不同，对于一切事件都不能作出确定的预言．我们所能说的，只是某种事件以什么几率出现．而且这个几率由物质波的波函数给出．物质波可以说是几率波，是描述原子或基本粒子时出现的一个完全新的物理量（也可能不实现），在经典物理中没有和它相对应的量，是存在于可能性和已经实现的现实事件之间的一种奇妙的物理实体，物质波遵循的方程，能够决定某种事件将来以什么样几率出现，它和经典力学的运动方程不同，不能对某种事件的发生作出因果性的、决定性的预言．在原子或基本粒子的微观世界里，经典的因果律不成立，代替它的是几率的因果律．

我们通过观测电子或质子等，可以发现这些粒子以粒子形式存在于空间的特定场所．但是，到进行观测以前的一瞬间为止，电子、质子等可能存在于空间的所有场所，这种可能性作为几率波在空间传播，这时对于可能性一词，不能以经典意义理解为：它实际存在于空间的某一点，只是我们不知道．对于电子、质子等，我们不能认为它们有确定的经典理论的轨道，这些粒子到通过观测查明它存在于某一点之前，是完全以波动形式出现的．

量子力学的出现从根本上改变了人们对物质世界的认识，这是一个革命性的事件，使人们认识到支配微观世界的法则和支配宏观世界的经典物理学的法则有本质上的不同；经典物理学的法则是由宏观存在的人建立的经典概念来描述的，而支配微观世界的法则是用完全不同的概念表达的．量子力学诞生之后，一个接一个地应用于各方面的现象，曾获得了许多的辉煌成果．可以说，它是以破竹之势前进的，在今

天如果不掌握量子力学这项武器，就不能理解物理学了.

3.8 相对论量子力学和正电子

量子力学虽然获得了很多的辉煌成果，但是也存在着一些缺点.在量子力学中，电子和质子的状态是用表示几率波的波动场来描述的，这个波动场所满足的方程不满足相对论的要求. 而且电子之间、质子之间的电磁相互作用，是通过库仑力来处理的，这仍然是牛顿力的范畴，没有把电磁力作为相对论的场来处理. 1928 年狄拉克建立了相对论的量子力学，把电子和电磁场作了相对论、量子论的处理，克服了这些缺点.

狄拉克给出的电子波动场方程指出，电子具有很多在过去理论中所没有的新性质. 首先狄拉克方程指明了电子就象一个自转的粒子，具有本征角动量，这个角动量称之为“自旋”. 关于自旋的存在，在研究线光谱的精细结构时就预想到了，但是，在狄拉克理论出现之后，才能从理论上满意地推导出来. 其次，狄拉克理论还指出，电子具有和它的自旋成正比的本征磁矩. 由这些事实可以知道，电子的行动和一块小磁铁一样. 于是可以说电子也就是磁原子.从以后的研究知道，物质的磁性主要来源于电子的磁矩.

不久还明了了，狄拉克电子论还包含着许多没有预想到的新内容. 解狄拉克方程就可以知道，除了表示通常的正能状态的电子的解之外，还存在着表示负能状态的解. 起初曾认为这是狄拉克理论的困难之点. 如果存在着负能状态，则处于正能状态的电子发出光之后，就会落入负能状态，这样就不能保证电子的稳定性了.

狄拉克为了克服这种困难，曾提出了下述的卓越见解.在这以前，认为真空是完全不存在电子的空虚状态. 但是，如果

认为真空不是不存在电子的空虚状态，而是充满了负能电子的状态，则因为负能状态已被完全占满，所以处于正能状态的电子就不能落入负能状态．这样就可以说明电子的稳定性．另外，如果有一个电子从真空的负能电子海洋中脱出而形成空穴时，表观上这个空穴将显示出带正电的粒子的性质，它的电荷和电子的电荷相同．这个“空穴”的质量和电子质量相等，这个“空穴”粒子称之为狄拉克“正电子”．因为正电子是在负能的电子海——真空中的空穴，所以当它和通常的正能电子碰撞时，电子就发出光而落进这个空穴，于是电子-正电子对湮灭．相反地，当真空中的负能电子吸收光而跃迁到正能状态时，就可能遗留下一个空穴．这时就象光在真空中形成了电子-正电子对一样．

于是狄拉克就预言了一个新粒子——正电子的存在，并且还预言了电子-正电子对能够由光在真空中创生出来；反之这种电子-正电子对在撞碰后又能发出光而湮灭．

狄拉克的这项预言，1932 年由安德逊在实验上证实．他发现在宇宙线中存在着性质和狄拉克所预言的正电子完全相同的粒子，而且这种粒子能够和电子成对地产生．

电子-正电子对的产生和湮灭，使人们认识到一件过去未曾想到的事实，即基本粒子不是不变的，而是可以互相转化的．

早就有人想到，质子也可能象电子那样，存在着“空穴”粒子，但是，这种粒子的存在到最近才得到证实．近来人们把这种“空穴”粒子称为“反”粒子．

3.9 发散的困难

狄拉克的理论虽然获得了很多出色的成果，但是在研究电子和磁场的相互作用过程中，却发现理论内部隐藏着极为

深刻的困难.

按照狄拉克的理论,电子和电磁场发生相互作用时,它的质量和电荷比没有相互作用时要增大. 计算结果表明,这个值是无穷大.也就是说,根据狄拉克电子论,电子的质量和电荷都是无穷大.实际测定的结果,电子的质量和电荷都是有限的,这个结论完全是荒谬的.

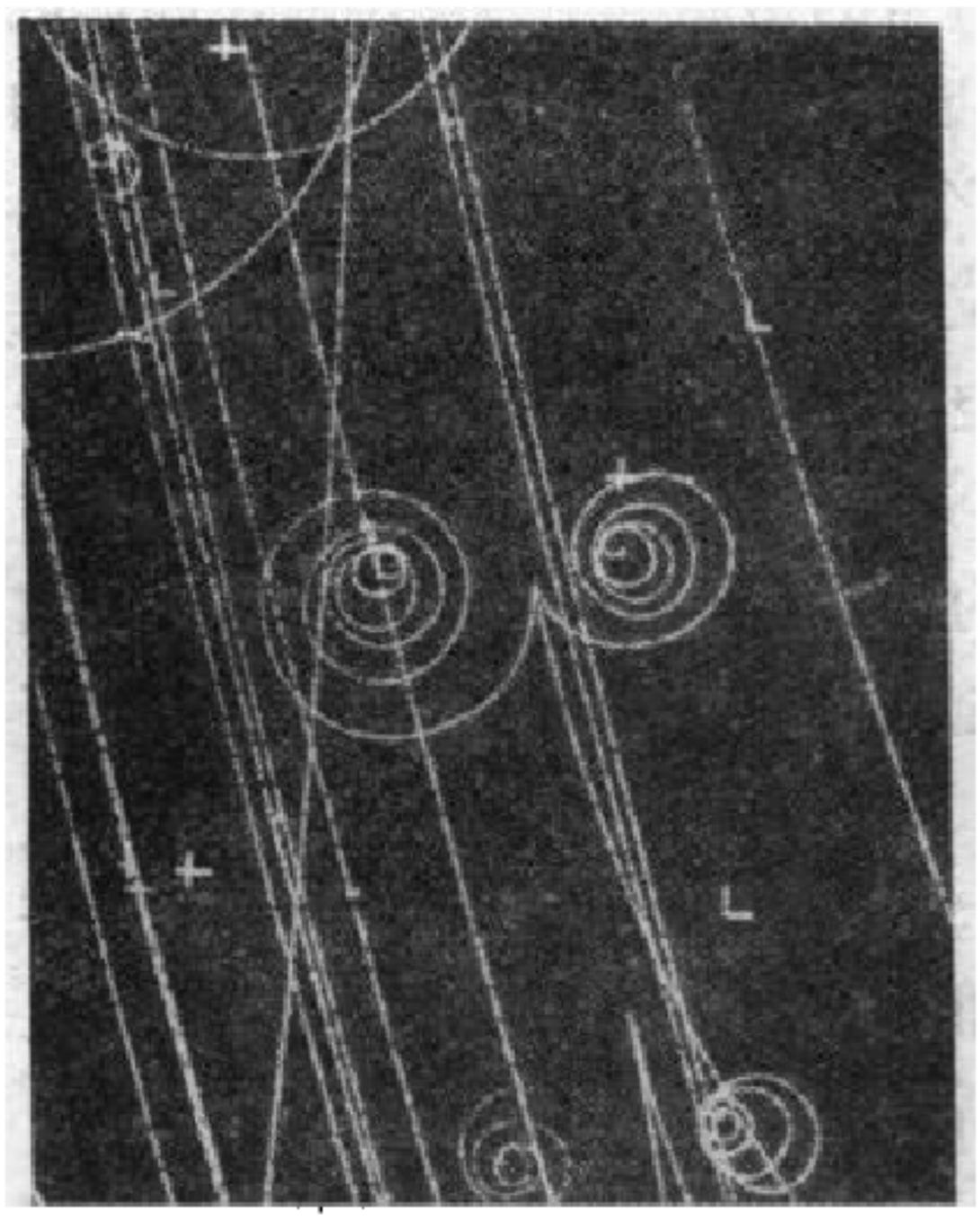


图8 γ射线产生的电子-正电子对

电子质量变为无穷大的困难,不是狄拉克理论特有的矛盾,在洛伦兹电子论中也出现过.电子和电磁场相互作用时,它的质量变化是由下述原因产生的.当电子运动时发生自感应,在它周围形成感应电场.这个电场又和电子的电荷相互作用,这种相互作用的电能加在电子质量上,使电子质量发生变化,如果认为电子是没有大小的粒子,它的自感电场的能量就变成无穷大.

电子的电荷为无穷大的困难,是由于量子理论的效应产生的,是经典理论中不存在的困难.根据狄拉克的正电子论,真空被负能电子充满,由于电场的作用,电子-正电子对能够在真空中产生,因此真空就显示出一种电介质的行为.由于电场作用而产生的电子-正电子对的现象,和在普通电介质中中性分子受电场作用而分为带正电和负电的两部分的极化现象是相对应的. 结果电子在真空中的表观电荷的变化,和放进电介质中的带电体的表观电荷的变化是一样的,这种变化的

大小是无穷大. 这就是说，狄拉克的真空是介电常数为无穷大的电介质. 这种无穷大的困难称之为发散的困难. 到目前为止，还没有找到正确的解决方法. 为了解决这个问题，曾经提出许多方案，将在第三部分中详细介绍.

狄拉克的电子和电磁场系统的相对论量子力学，虽然反映了很多的真理性，但是还不是完全正确的理论. 在什么时候将建立没有发散困难的完全正确的理论，这是谁也不能预料的将来的事情.

4. 原子核结构和介子

4.1 中子的发现

从二十世纪初期到二十世纪三十年代，经过了一系列研究，建立了原子结构的理论，已经知道，原子是由位于中心的原子核和围绕着它旋转的电子构成的，而且知道了原子核和电子以及电子之间的相互作用，是以电磁场为媒介的电磁相互作用力. 我们日常所遇到的物质，其化学的、物理的、光学的以及电磁的性质，几乎都可以用这种原子结构和电磁的相互作用来说明.关于原子结构，除了电磁相互作用的一个根本问题——发散困难没有解决外，可以说，我们已完全掌握了正确的知识. 在原子结构理论确立之后，下一步就是原子核有什么结构的问题，这个问题到了二十世纪二十年代就作为重大课题出现了.

关于原子核结构的现象，有一个很突出的特征，就是所放出的能量非常之大，和基于电磁相互作用的原子现象相比较，还可以大到一千倍以至十万倍.

铀和镭放出的放射线能量，比已知的任何现象的能量都大好几个数量级，这曾使放射能的发现者大为惊异. 这样巨

大的能量，显然不是电子和原子核间的电能所能形成的．这样大的能量既然是从原子核内放出来的，原子核内部的作用力一定是非常强的．因此，为了把原子打碎而查明它的结构，就需要用能量很大的粒子和原子核碰撞．

最初应用于这方面的粒子是原子核自身放出的高速α粒子．卢瑟福研究了α射线被原子核散射的情况，于1919年发现氮原子核受到α粒子碰撞时，氮原子核被破坏而转变为氧原子核，同时放出质子．这是最初的元素人工转变，使点金术家的梦想实现了．原子核转变时放出质子，由此可知，质子是原子核的组成部分．又由于原子核的质量大体是质子质量的整数倍，所以，有人曾认为原子核是由质子构成的．但是不久就知道了，这种想法是不正确的．如果原子核只是由质子构成的，原子核的电荷以质子电荷为单位时，应当正好是等于质量数．实际上，原子核的电荷大体只是质量数的一半或者还少一些．

卢瑟福根据这些事实，预想到原子核内可能还存在着质量大体和质子相等而不带电荷的粒子．如果原子核内存在着这种中性粒子，不但解决了原子核的电荷问题，而且还可以说明同位素的问题，同位素是原子核内的质子数相同而中性粒子数不同的原子．

中性粒子的实际存在，是1932年由查德威克证实的．1931年居里夫妇发现，使α射线和氦碰撞，能放出穿透性非常强的放射线．起初曾认为这种放射线是X射线，但是，查德威克详细地考察了这种放射线，发现它的穿透性比X射线强得多，把它打到氢原子上，氢原子核被弹回去，由此得出结论：它是具有质量的中性粒子，并且由氢原子核被弹回的状况，表明它的质量大体和质子质量相等．查德威克把这种中性粒子命名为“中子”．

恰好从这个时期开始，出现了研究原子核的有力武器，这就是劳伦斯所发明的迴旋加速器和范德格拉夫所发明的静电加速器．这些装置都是用电磁方法把质子等较轻的原子核加速到非常高的速度，然后把这些被加到高速的质子等打到其他原子核上，观察它们产生的反应，来获得有关原子核的知识，使这方面的知识有了迅速的增长．

在中子发现之后，伊凡宁科和海森堡等发展了原子核是由质子和中子构成的原子核结构理论．他们在研究原子核的自旋时指出，质子和中子应该具有相同的自旋．他们曾假定质子和中子之间作用着各种各样的力，企图推导出原子核的性质．原子核非常小，集中在大约十万亿分之一厘米（10^{-13}厘米）的范围内，因此，其中的作用力必然只能达到很小的范围．这一点和电磁力不同，电磁力能达到很大的范围．因为质子和中子在原子核内的结合能非常大，所以核内的作用力也必定是很强的．为了说明原子核的各种性质，曾假定核内的作用力具有各种复杂的性质．以后逐步认识到，原子核内的作用力的性质比已知的任何作用力都要复杂得多，因此，这些努力并没有获得显著成果．到目前为止，关于原子核内的作用力——核力，我们还没有得到能令人满意的理论．

4.2 β 衰变理论

1928 年伽莫夫根据量子力学建立了原子核的 α 衰变理论，给出了使人满意的结果．与此相反，β 衰变理论却是一个不容易解决的问题．β 衰变的结果，原子核增加了一个质子的电荷，海森堡以此为根据，推测 β 衰变可能是中子放出电子转变为质子的过程．于是他认为中子可能是质子和电子以强力结合而成的复合粒子．

但是，他立即发觉这种想法并不妥当．首先，如果这种想

法是正确的，根据能量守恒定律，所放出的电子的能量必须是一定值的；但是实际测定的 β 射线的电子能量是连续分布的，这和能量守恒定律相矛盾. 另外还知道，质子、中子、电子都具有大小相等的自旋，所以这种想法也和角动量守恒定律相矛盾. 他还指出，认为中子是质子和电子的复合粒子，也和量子力学矛盾. 根据量子力学，象电子那样轻的粒子不能停留在原子核那样小的范围内，而且除质子外，其他一切原子核都会通过 β 衰变而消失. 面临着这样的困难，甚至一时出现了悲观的说法，有人认为在原子核内部，能量守恒定律、角动量守恒定律以及量子力学都可能不成立了.

泡利于 1931 年对这个问题指出了正确的解决途径. 他指出，如果认为 β 衰变时不仅放出电子，同时还放出和电子的自旋相同、没有质量也没有电荷的粒子，能量守恒定律和角动量守恒定律就能满足. 这种不带电荷的没有静止质量的粒子，以后称之为“中微子”.

中微子的存在，在理论上虽然非常确实，但是由于它和其他基本粒子的相互作用非常弱，所以一直到最近才得到证实. 由于中微子和其他基本粒子的相互作用非常微弱，它产生的反应也很不容易看到. 为了观察中微子产生的反应，需要有大量的中微子. 为此有人利用了原子反应堆内出现的中微子. 在原子反应堆内产生大量的中子，这些中子在 β 衰变后产生大量的中微子. 把中微子束打在碳块上，我们就可以观察到中微子在碳块内产生的反应.

1934 年费米根据泡利的中微子假说，建立了 β 衰变理论. 费米虽然认为中子放出电子和中微子后变为质子，但他认为中子不是质子、电子和中微子的复合粒子. 电子发光时并不需要认为光原来就存在于电子之中. 根据量子力学、光是电子和电磁场发生电磁相互作用时从真空内发生的. 费米

以了解得很清楚的电子发光的量子力学理论为准则，建立了 β 衰变的相互作用理论．费米的 β 衰变理论能够圆满地说明实验结果，但是 β 衰变理论最近又从没有想到的方向被提了出来．关于这个问题，将在第二部分中叙述．

4.3 核力和介子

在费米的 β 衰变理论出现后，关于原子核内的作用力——核力的问题，开始从新的角度进行研究．伊凡宁科和塔姆认为，核力也许能用 β 衰变的相互作用来说明．但是这种尝试失败了，因为 β 衰变的相互作用很弱，不足以说明核力．

在这样的尝试之后，汤川于 1935 年在一个崭新方向发展了核力问题．

根据法拉第、麦克斯韦、洛伦兹的电磁学理论知道，带电粒子间的电磁作用力是以电磁场为媒介的，而电磁场又作为光波在空间传播；根据量子理论，光波具有粒子的行为（现在把光的粒子称为“光子”）．这就是说，对应着电磁场，有光子这种粒子存在，带电粒子间的作用力由一方粒子放出光子而另一方粒子吸收光子的过程产生．

汤川认为，对核力来说，也可能有和电磁场相同的情况．如果这样，就象光子对应于电磁场那样，也可能存在对应于核力的粒子，假定质子和中子互相交换这个粒子，也许就能说明核力问题．因为核力到达的范围很小，这个粒子和没有静止质量的光子不同，它应当具有约为电子质量二〇〇倍的质量．

汤川假说在发表的当时，除一部分日本物理学家以外，没有引起更多人的注意；但是，在 1937 年，安德逊和尼德迈尔在宇宙线中发现了质量为电子质量二〇〇倍的粒子之后，它便一跃而登上了舞台．安德逊和尼德迈尔所发现的粒子，实际并不是汤川所引入的作为核力媒介的粒子，而是现在说的 μ

介子，关于这种粒子将在第二部分中讲述. 汤川所预言的粒子，由泊叶尔于1947年在宇宙线中发现了，现在称之为π介子(因为它的质量介于质子和电子之间,所以叫介子).

在安德逊和尼德迈尔在宇宙线中发现介子之后，世界各地的物理学家,特别是以汤川为中心的日本物理学家,对介子理论进行了大力的研究. 现在知道介子有带正电的、带负电的和不带电的三种. 目前用介子理论能够定性地说明海森堡等人所提出的核力的复杂性质，但是理论和定量实验结果还不完全符合（第二次大战以后，在日本也有很多人致力于用介子理论研究核力,对低能现象,还能用介子理论说明实验结果;但对高能现象,目前还不清楚).

从这时候开始,在德国纳粹党威胁下,战争阴云笼罩了全欧洲,紧接着向全世界扩张. 日本军国主义也开始侵略中国. 许多著名物理学家，为了逃避纳粹党的迫害亡命到了英国或美国. 1938年哈恩和史特拉斯曼就在这样暗淡的空气中发现了铀核的分裂放出原子核能，不久，又成为制造原子弹的开端.亡命到美国的物理学家,经过认真的考虑,在1939年确认了制造原子弹的可能性. 就在这一年，纳粹德国挑起了第二次世界大战.

讲述第二次世界大战以后的基本粒子论的发展，就等于讲述现在的基本粒子论. 这个问题留给下一部分讲述.

二、基本粒子世界

1. 基本粒子的出现

1.1 基本粒子的故乡

原子世界的主角是电子和光子，我们由这两个主角作为带路人，引导到物质的深处．我们所看到的各种物质的运动、变化、性质，其中大部分都可以用这两个主角的活动来说明．在这种情况下，位于原子中央的原子核，不过是一个不引人注目的配角而已．在这里好象隐藏着一个寂静的世界．一直到本世纪初期，原子核还顽固地保持着这种寂静状态．连最初企图破坏原子核的物理学家，也没有明确地意识到，种类繁多的基本粒子的丰富多彩的世界，就是从这里展现出来的．

原子核是由质子和中子构成的，但是，由进一步的详细考察知道，它决不是一个由这种说法推想出来的井然有条的世界．在原子核内，质子不断地变为中子，中子也不断地变为质子，不但如此，而且在某一瞬间还能变为完全料想不到的基本粒子．围绕着这些粒子，我们可以设想各种各样的介子群构成旋涡而奔腾流动．因此，这个世界大概是一个完全和寂静世界相反的动乱世界．

然而，我们花费了很长的岁月，才得以确实地推测出这些情况．这是因为原子核非常坚固，其中的基本粒子很不容易释放出来的缘故．

原子核内结合质子和中子的力量叫做核力．这个力比原

子内结合电子的电力强得多，大约是它的一千倍左右． 如果把这些力换算成释放这些粒子所需要的功，以电子伏为单位，那么，例如氢原子内结合电子的能量是十三电子伏，而在原子核中，结合质子和中子的能量是它的八十万倍，即大约八百万电子伏（8 兆电子伏）． 划一根火柴点燃香烟，燃烧汽油开动汽车时，原子内的电子发生分离结合的变化，如果把它换算成交换一个电子所需要的能量，也不过是几电子伏特以至几十电子伏特而已．然而破坏一个原子核，却至少需要比这大一百倍左右的能量． 即使有了这样大的能量，也并不能随心所欲地把基本粒子从原子核内释放出来．为达到这样的目的，还需要几百倍、几千倍的能量．

1.2 宇宙线中的基本粒子

从原子核内释放出基本粒子是这样地不容易，但是，即使暂时我们作到了，我们是否能够看见它们呢？ 当然用肉眼是看不见的． 利用放大倍数很高的显微镜，可以把我们看见的范围扩大到一万分之一厘米(10^{-4} 厘米)左右．进而由于电子显微镜的发明，还可以再把上述范围扩大到一千分之一（10^{-7} 厘米）． 但是，原子大小只是一亿分之一厘米（10^{-8} 厘米）左右，结果还是看不见的，何况基本粒子还要比这小得多，人们预想它是十万亿分之一厘米（10^{-13} 厘米)左右，因此，用我们的眼睛是永远看不见基本粒子的．

幸而基本粒子大部分都是带电的，我们可以通过“听声音”、“看足迹”，来确认它的存在．

“听声音”的工具有代表性的是盖革计数器，实际上，嘎嘎响的声音是二次现象． 把装上电极的金属管加上电压后，当带电粒子在管内通过时，管内就有电流流通，我们能够测定的就是这种电流．

1920 年前后，赫斯用验电器发现了来自宇宙的有电离作用的放射线，这就是我们所说的宇宙线． 为了测定宇宙线的电离强度，发明了电离室、正比计数器以及盖革计数器．

宇宙线到底是什么呢？ 为了解决这个问题，使用了电离室和计数器． 但是只用耳朵听还不够，所以又利用了观察径迹的工具雾室． 在每边为十厘米的小箱内，封入过饱和水蒸汽和气体，当带电粒子在小箱内通过时使气体分子成为离子，过饱和水蒸汽就以它为核心凝成水珠，于是沿着粒子所通过的路径形成一条雾线，虽然看不见粒子本身，但能够看到粒子的径迹． 雾室是威耳孙在 1912 年发明的，以后它在揭示原子世界的秘密方面起了重大作用，由于使用了雾室，宇宙线令人惊异的秘密被一个接一个地揭示出来．射到地面上的宇宙线，有很大一部分是电子，但是我们知道，在宇宙线中除电子外，还有正电子．

雾室能使我们看到粒子的径迹，所以，它适于从空间来判断现象，根据电子和正电子的径迹，能够判断这些粒子是不是在同一点发生的，其精确度达到十分之一毫米左右． 利用计数器时，因为管内到处都发生离子，所以判断位置时所能达到的精确度只能是管的大小． 但是，对时间的判断，计数器却有很大的优越性． 雾室的动作时间至少需要千分之一秒左右，而计数器只需要十万分之一秒左右，因此，判断电子-正电子对是不是同时发生的，计数器比较可靠；而判断电子-正电子对的发生，则需要同时使用雾室和计数器．

正电子的存在是从理论上预言的，以后在宇宙线中得到了发现，从而使宇宙线的研究受到了人们的重视． 但是，宇宙线还起了更大的作用． 介子本来应当潜伏在原子核内，1937 年安德逊在宇宙线内发现了和它相似的粒子，于是人们逐渐地认识到，宇宙线是探索原子核内部世界的有力武器，而只用

人工破坏原子核的方法,是不容易了解它的.

已经知道，通过宇宙空间到达地球的宇宙线的母体是高能的原子核. 宇宙线中的粒子具有多大能量虽还不明了，但是其中确实存在具有一兆亿电子伏（10^5 千兆电子伏，1 千兆电子伏 $= 10^9$ 电子伏)以至一万兆亿电子伏(10^9 千兆电子伏)能量的粒子. 大部分宇宙线具有几亿以至几十亿电子伏（10^2 兆电子伏～10 千兆电子伏)的能量. 宇宙线有充分的能力破坏原子核而把基本粒子释放出来，可以说它是大自然给予我们的最好礼物.

1.3 第一代基本粒子

汤川根据核力预想的介子质量，大约是电子质量的二百倍. 在汤川作出这项预言两年之后,在宇宙线中发现的粒子，质量大体和它相同. 在一个时期内，人们认为两者是同一粒子,这是不奇怪的. 但是，把宇宙线现象详加考察之后，才知道存在种种不能说明的问题. 核力介子，正象在宇宙线中所见到的那样,发生的比率虽然很大，但是可以预想，它通过物质时也容易损失能量而被吸收掉. 实际上，在宇宙线中所见到的基本粒子,都以相当强的穿透力穿过物质,所以被吸收的比率很小,也就是说,它一出生时就不一样了. 为什么会发生这样奇妙的现象呢？这是介子理论所遇到的第一个难题.

1942 年坂田昌一、谷川安孝、井上健成功地解决了这个难题. 他们认为,核力介子在原子核内有很强的结合力,而在宇宙线中见到的介子几乎没有这种迹象，因此必须把它们区分为核力原因的介子和宇宙线的介子. 但是，宇宙线中原子核碰撞产生的基本粒子,和核力介子应有同样的发生比率,于是他们又提出了下述的产生机制. 在宇宙线中，原子核之间相互碰撞产生核力介子,这个介子在很短时间内发生衰变,改

变其形态成为宇宙线介子．这种介子和原子核几乎不发生相互作用，可以长时间地在物质中穿行，最后和原子核的 β 衰变一样，衰变为电子和中微子．在两种介子理论诞生的当时，全世界正被战争阴云所笼罩，世界各国物理学家都被动员从事军事方面的研究，因此，都不知道这个理论，也没机会验证这项理论是否正确．

1947 年泊叶尔利用了原子核乳胶这个新武器，首先确认了两种介子的存在．大家知道，带电粒子通过普通照像底片的感光乳胶时，在它通过的路径上就会出现径迹，但是，由于灵敏度很低，而且速度很慢，只能记录下电离能力很强的粒子径迹，因此没有象雾室那样被广泛地使用．但是，使用物质密度比雾室气体大得多的乳胶，就能够增加记录现象的机会．泊叶尔为了提高灵敏度和清楚细致地记录下粒子的径迹，曾使用了大量溴化银，由于银粒子很小，而且很均匀，在增加乳胶厚度后，就可以改进这一技术，这就是原子核乳胶．在南美洲安迪斯山脉和法国辟来内山脉中放置的原子核乳胶，经宇宙线照射几个月后，清楚地记录下了坂田等人所预言的两种介子的机制(图 9)．

除了日本物理学家外，对泊叶尔以及全世界大多数物理学家来说，两种介子的存在是出乎意料的大事件．于是贝特和马尔夏克立即提出了二介子理论．他们的理论和坂田等人早已提出的理论相比，并没有什么先进之处．

发现两种介子之后，基本粒子物理学才开始走上正轨．人们为了不依靠宇宙线，利用人工方法释出介子，曾经投入了几亿、几十亿美元的资金来建设大型迴旋加速器．美国加利福尼亚州伯克利辐射研究所的八十四英寸的大迴旋加速器，于 1949 年最初以人工方法从原子核内产生了汤川所预言的介子．

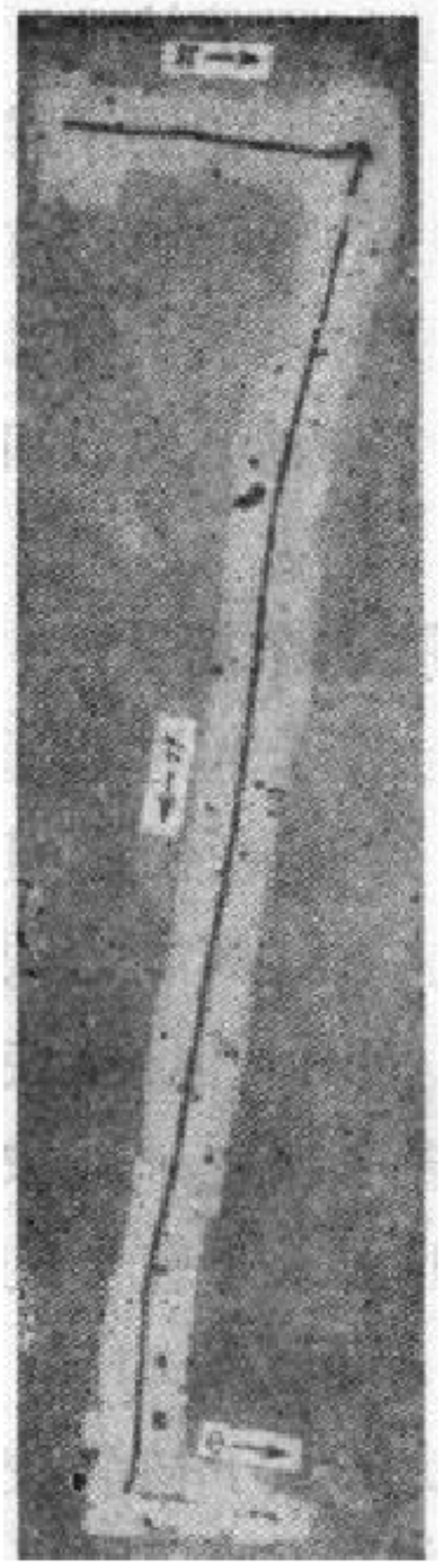


图 9　π、μ 介子的衰变

这样，构成基本粒子世界的主要角色好象都已齐全了。原子世界的主角有电子及其反粒子——正电子，也有作为电波和光的本体的光子，而代表原子核性质的质子和中子及其反粒子——反质子和反中子，也在稍后时期出现了。从原子核的 β 衰变所预言的中微子和反中微子，人们也已确信它们的存在，再加上核力源泉的核力介子（普通称为 π 介子）和宇宙线中穿透力很强的成分宇宙线介子（普通称为 μ 介子）以及它们的反粒子。这些粒子的存在都和理论物理学家的预言一致，而且每种粒子都有各自的作用。如果认为在探索基本粒子世界方面已经走上了正轨，恐怕也不能认为是夸张。但是，其实这不过是暴风雨到来之前的安静而已。

1.4 大量出现的第二代粒子

如上所述，我们虽已获得了一些有关基本粒子世界的知识，但是从1947年开始，人们对这些知识感到有些不放心了．这一年，两个宇宙线研究家罗彻斯特和巴特拉，曾在雾室中发现了两个成V字形径迹的事例．这种径迹和已知的任何粒子都不相同，只能认为是由别的粒子产生的．两年后，布利斯特尔小组又发现了一个带电粒子分裂成三个带电粒子的事例．虽然当时知道新分裂出来的粒子有一个是带负电的π介子，但是，分裂前的母粒子是什么，一点线索也没有．由动量守恒定律知道，V字形径迹不可能是由于粒子在气体中和原子碰撞使路径发生弯曲而产生的．因此，它应当是由未知的中性粒子在倒V字形的尖端衰变为带正电和带负电的粒子而产生的；近于"〈"字形的径迹应当是由带正电的粒子衰变为带正电的粒子和中性粒子而产生的．后一种现象可以理解为是由一个带电粒子，大概是π介子，衰变为三个带电粒子产生的．关于母粒子，根据由径迹中得到的数值和能量守恒定律、动量守恒定律，能够推算出来它的质量．

以这两个发现为转机，物理学家开始大量利用原子核乳胶研究宇宙线．于是以前未曾预想到的粒子，一个接一个地发现了．为了区别于以前发现的粒子，把这些粒子称之为新粒子．这些新粒子可以分为两组，一组是呈现V字形径迹的粒子，它们属于比质子、中子重的重子族，包括Λ粒子、Σ粒子、Ξ粒子；另一组是比π介子重的重介子族．重介子经过后面所述的曲折，被归入和K介子相同的一族．

到了二十世纪四十年代，我们已经掌握了有关基本粒子世界的一些理论．这些理论虽然不算完整，但是有很多事实表明它们包含了一部分真理．1947年发现了两种介子，这说

表 1　基本粒子的预言和发现

名　称	预　言　者		发　现　者	
电　子	斯特内	(1890)	汤姆逊	(1897)
质　子	长冈半太郎	(1904)	卢瑟福	(1911)
光　子	爱因斯坦	(1905)	康普顿	(1923)
中　子	卢瑟福	(1920)	查德威克	(1932)
正 电 子	狄拉克	(1930)	安德逊	(1932)
反 质 子	[狄拉克	(1930)]	加利福尼亚小组	(1955)
中 微 子	泡利	(1931)	来因兹、柯望	(1953)
π 介 子	汤川秀树	(1953)	泊叶尔、拉迪斯	(1947)
μ 介 子	坂田昌一 谷川安孝 井上健	(1942)	安德逊、尼德迈尔 (泊叶尔、拉迪斯确认)	(1937)* (1947)
μ 中微子	同　上		布鲁海文小组	(1962)
Λ 粒 子	——		罗彻斯特、巴特拉	(1947)
Σ 粒 子	——		罗彻斯特、巴特拉	(1947)
K 介 子	——		布利斯特尔小组	(1949)
Ξ 粒 子	——		加利福尼亚小组	(1954)

* 是最初在宇宙线中发现的介子(当时没有意识到这是 μ 介子)

明我们的理论能够预言基本粒子的存在，这是值得理论物理学高兴的事情. 但是到了五十年代，突然发现了许多新的粒子，理论物理学家完全没有料到这种情况. 大致的情况如表 1 所示，由此可以看出，1947 年前和 1947 年后有显著不同. 为什么会出现这种情况呢？ 以后就会知道，这是因为没有把基本粒子理论建立在更深入的基础上.

和旧的基本粒子比较，这些新粒子并没有什么特殊的作用.重粒子族不过起着质子和中子即核子同样的作用；K 介子不过起着 π 介子同样的作用.从这种意义来说，第二代和第一代有着相同的作用，但是，反过来说，就不是这样简单了，同样的现象并不能用同一个粒子来说明，必须看到，这里隐藏着由几种粒子同时作用才能实现的深奥结构. 那么，符合这种情

况的基本粒子理论是什么呢？理论物理学家在实验物理学家的协助下，逐渐地从混乱中理出了头绪，建立了唯象理论.

1.5 大型加速器时代

宇宙线的研究是探索基本粒子世界未知现象的先驱. 很多未知现象是由高能量的基本粒子产生的.因此，为了继续这种研究，必须把研究对象转向越来越高的能量方面.但是这些高能现象都很难发现，而且能量越高越难发现. 极端的现象，即使到五千米高的安迪斯山脉观测，或者到印度、南非联邦一千米深的地下金矿观测，在一年内也观测不到几次. 由于新的发现如此稀少，因此不得不满足于定性的研究. 但是，为了从定性阶段向定量阶段发展，就不能只是依靠宇宙线. 无论怎样，也要尽可能地用人工方法在实验室内产生出宇宙线那样的高能现象.

这种要求促使用人工方法产生高能的装置——加速器一个接一个地出现. 加利福尼亚州伯克利研究所的大型同步迴旋加速器，曾经用人工方法产生了 π 介子，由于这一件事的启发，为了研究新的粒子，开始设计新的同步加速器. 同步加速器的加速原理和打秋千的加速有点相似，是使带电粒子在磁场内沿圆形轨道运动，一面和以适当周期变化的电场同步，一面沿旋涡状轨道运动，逐步加速而成为高能粒子.伯克利研究所的同步迴旋加速器，是把迴旋加速器按照麦克米伦和维克斯勒提出的相位稳定原理加以改进而成的装置。它能够产生能量约为三亿电子伏（300 兆电子伏）的质子，然后把它们打到各种原子核上. 但是要产生新的粒子，需要能量更高的加速器，迴旋加速器的能量是有限度的，于是根据相位稳定原理，建成了同步加速器. 在迴旋加速器中，因为轨道是旋涡状的，粒子的加速受到限制，同步加速器改进了这种情况，使粒

子沿半径一定的圆周运动同时受到加速. 因此，需要按照粒子的加速情况增加磁铁的强度，但由于轨道固定在一定的圆周上，可以沿着圆周装配磁铁，这要比迴旋加速器节约磁铁，而且还能得到能量更高的粒子. 东京大学原子核研究所已经建成了一台能把电子加速到十三亿电子伏的电子同步加速器，目前正在运转中.

1953 年纽约郊区建成的布鲁海文国立研究所的质子同步加速器(称为 Cosmotron)，第一次利用二十三亿电子伏 (2.3 千兆电子伏)的质子束打到原子核上，产生了新的粒子. 两年后，加利福尼亚大学六十亿电子伏 (6 千兆电子伏) 的质子加速器 (称为 Bevatron) 产生反质子获得了成功，由此证明了反物质的存在.

设在瑞士的欧洲联合原子核研究中心 (CERN) 建成的二百八十亿电子伏 (28 千兆电子伏) 的质子同步加速器以及美国布鲁海文研究所三百三十亿电子伏 (33 千兆电子伏) 的交替梯度同步加速器 (简称 AGS)，都在开展实验工作；最近，美国斯坦福大学建成的三公里长的二百亿电子伏 (20 千兆电子伏)的直线加速器(图 10)以及苏联谢尔普霍夫七百亿电子伏

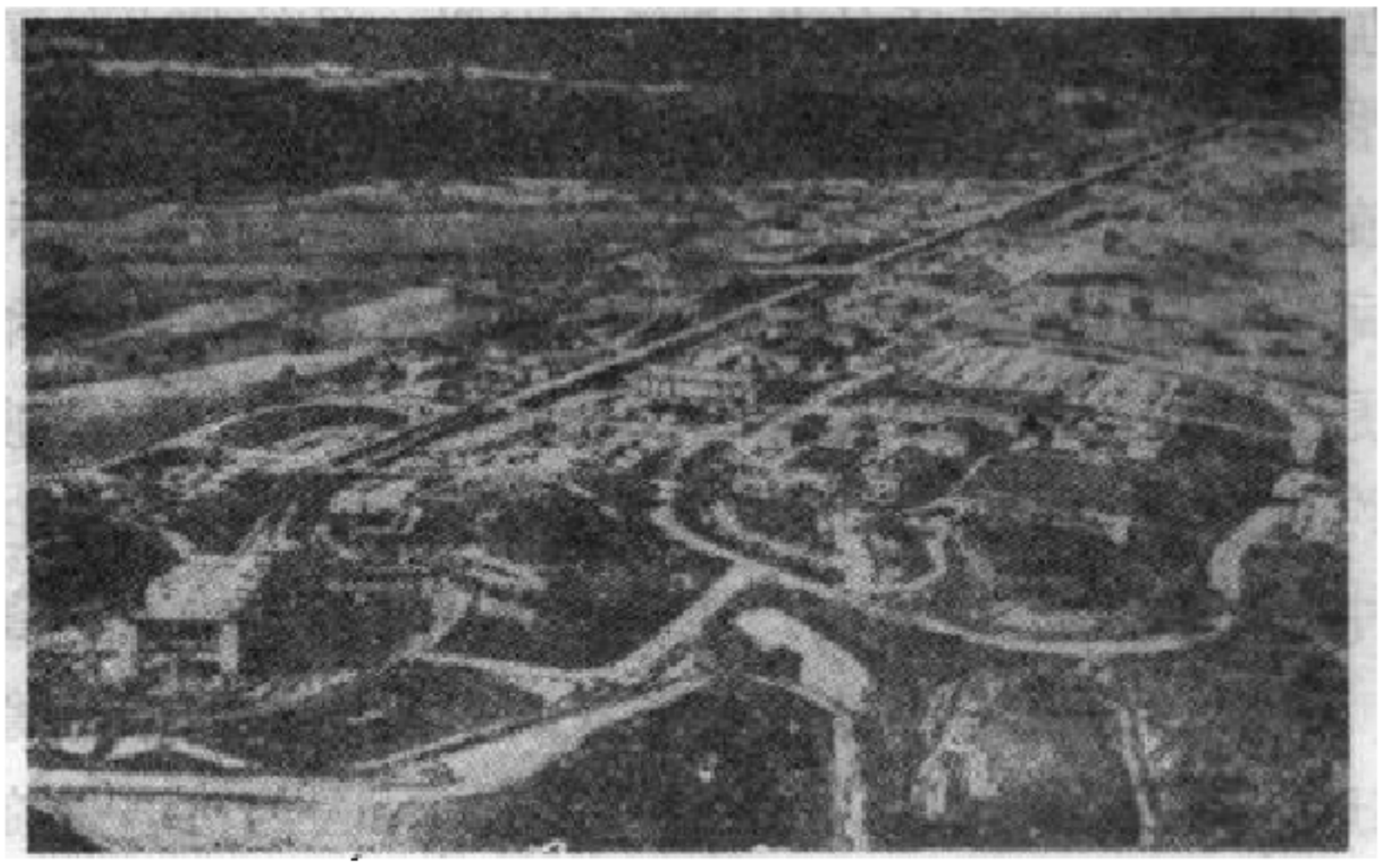


图 10　斯坦福大学的直线加速器

(70 千兆电子伏)的质子加速器,也都已开始运转. 日本的基本粒子研究所也准备建设一台四百亿电子伏(40 千兆电子伏)的质子加速器. 目前也已经开始议论建设二千亿电子伏(200 千兆电子伏)、八千亿电子伏(800 千兆电子伏)的加速器了.

用人工方法能够产生多大能量的高能粒子呢? 在实验室(说成实验工厂也许更合适一些)内究竟能把只在宇宙线中见到的现象再现到什么程度呢? 这是一个很有趣味的问题,也许不久就能给出回答了吧.然而,最重要的还是回答下面的问题,这里出现的基本粒子世界是什么样的世界? 支配这个世界的基本规律又是什么呢?

1.6 汽泡室和放电室

基本粒子的现象是非常复杂的,随着观测规模的扩大,不得不改变观察基本粒子的手段.

观察径迹时,如果参与的基本粒子比较多,就必须一个一个地加以区别, 而且需要把从起点到终点长达数米的现象都观察出来. 和雾室比较, 原子核乳胶的优点在于乳胶内的银粒小于雾室中的水滴,固体的密度大于气体的密度. 但是,原子核乳胶也有缺点,即使在玻璃板上多涂上几层乳胶,构成乳胶积层,乳胶厚度也总是有限度的, 因此, 径迹总要受到过分压缩. 盖莱塞着眼于两者的优点,于 1953 年设计出了兼备两者优点的装置——汽泡室. 带电粒子射入沸腾前后的过热液体内,液体就以电离化的部分为核心形成雾线,汽泡室就是利用这种现象制成的. 它的优点是可以利用密度大的液体代替气体,从而可以缩小现象的空间范围,而且还可以把密度足够高的液体(例如液态氢,可以看做是质子集团)作为基本粒子反应的靶. 此外,雾室的动作比较慢,从一个动作到下一个动

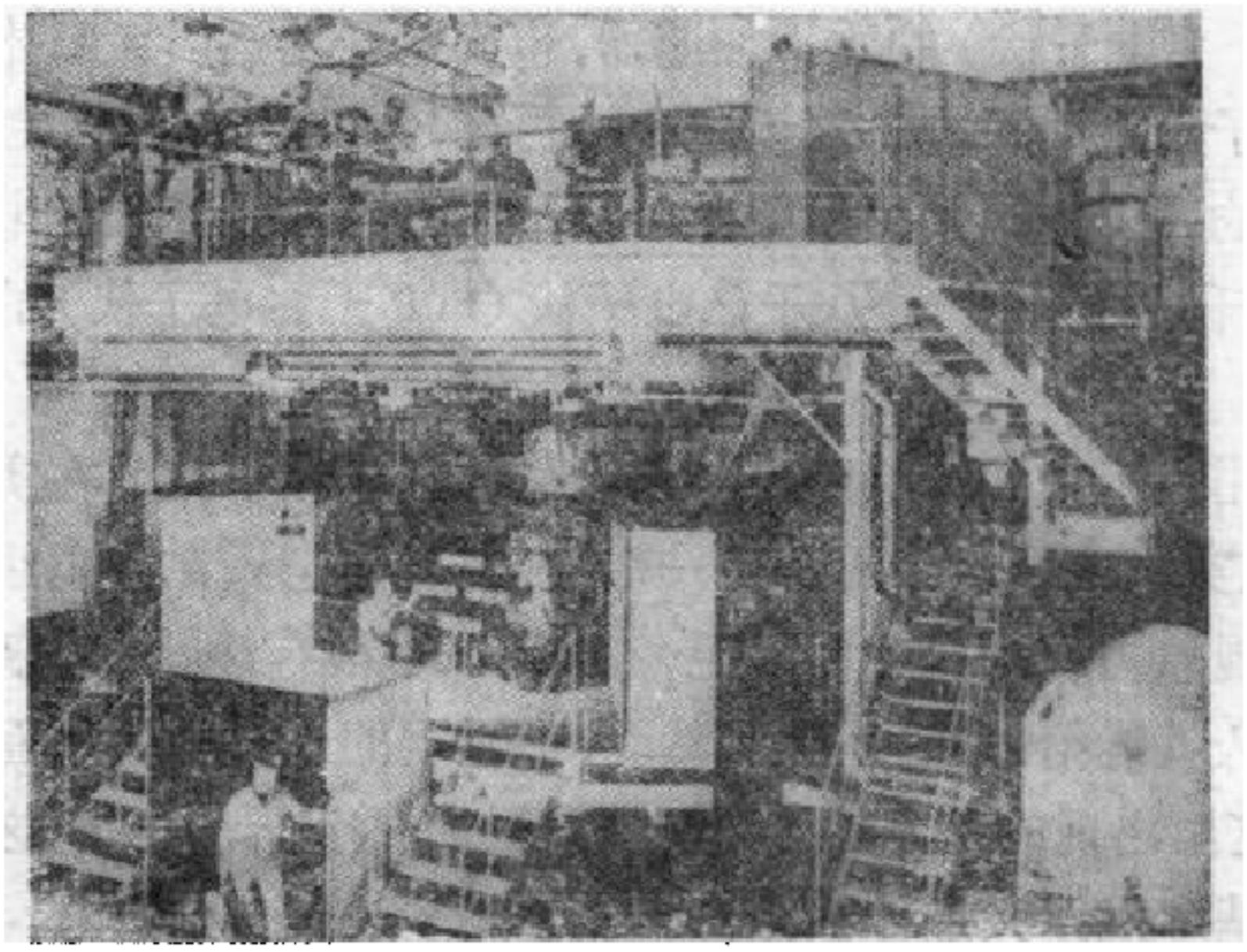


图 11　现代的大汽泡室

作需要一分钟左右．用加速器进行实验和宇宙线不同，必须节约时间，有效地利用很短的时间．这一点也是汽泡室适宜，它从一个动作到下一个动作只需要不到一秒的时间．盖莱塞最初设计成的汽泡室，长三厘米，直径不过一厘米；现在所用的汽泡室，长达二米，宽和高各六十厘米（图 11），这就说明了它是怎样有用的装置了．

装在汽泡室内的立体照像机和汽泡室的动作协调一致，每秒钟可以拍摄将近十张照片．这些照片能清楚地显示出新粒子的产生和湮灭过程．但是，在高能加速器中拍摄的照片，各种径迹互相交错，很不容易识别．汽泡室动作时，不管要拍摄的反应发生了还是没有发生，照像机总是一直在拍摄着．这样使汽泡室动作一年，就可以拍摄几千万张照片．但是怎样从这些照片中选取所需要的照片呢？用眼睛看是太费时间了．这时可以考虑利用电子计算机代替人力；但是，这种计算机必须具有识别图形的能力，目前还没达到这种程度．但至少可

以说，在不久将来，可以不用眼睛观察径迹，而可以改用计算机来观察基本粒子了.

研究长距离内的现象，可以利用听声音的工具，也就是利用计数器. 把很多计数器排列起来，然后再重叠起来，带电粒子通过时只有放在它路径上的计数器动作. 如果还想要看见它的路径，可以在计数器之间放上氖管，于是我们可以看到氖管发光. 1957 年福井崇时和宫本重德注意到，提高氖管的气压，可以使放电现象只在带电粒子通过的范围发生，而不会扩大到管子全部. 他们从这里得到启发，提出了放电室的方案，这就是对封入氖气的玻璃板，当带电粒子通过时加上高压脉冲电压，于是由于放电而显示出粒子的径迹. 他们提出的方案立即受到了国外实验物理学家的注意和研究，目前已制成了每边为一米的放电室. 放电室受人注目的原因，是它的动作时间比汽泡室还短，只有一千分之一秒左右，而且可以使它只对所要观察的现象动作. 所以，观察极少发生的现象，放电室是最适宜不过了. 布鲁海文小组把它应用于中微子的实验，

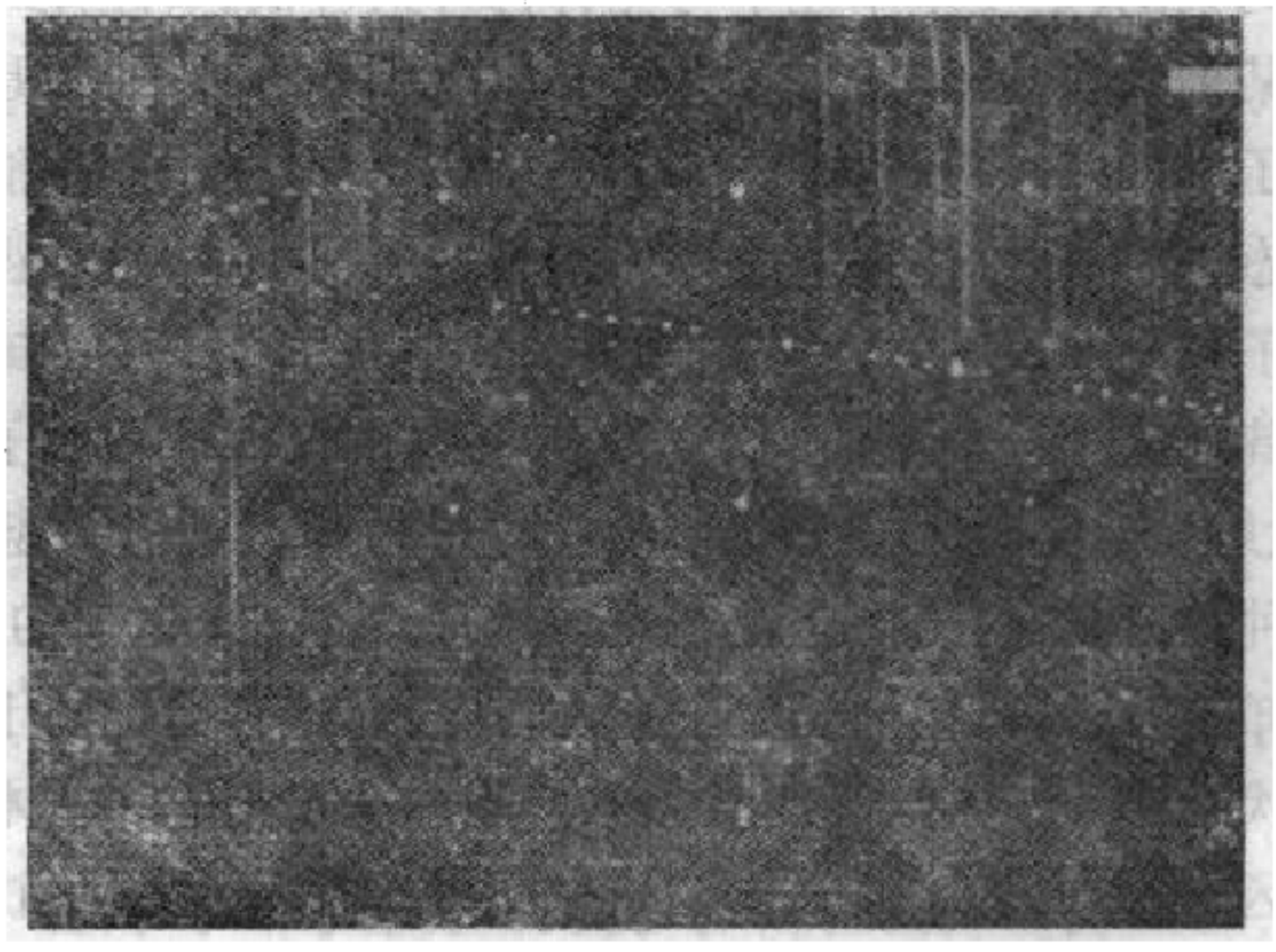


图 12　放电室的径迹照片

发现 β 衰变时发生的中微子和 π 介子衰变为 μ 介子时发生的中微子是不同的. 利用中微子的实验是非常罕见的，发现这样的事实后更提高了放电室的作用（图 12）. 放电室本来应当列入计数器的行列，在观察径迹方面，它不如汽泡室，但是，可以用它作放电检测器，把放电作为输入，直接和电子计算机连结起来. 这样就增加了从数量方面了解现象的可能性.

1.7 第三代基本粒子——共振态

在发现新粒子前后，即二十世纪五十年代初期，有人曾多次利用人工产生的 π 介子轰击质子，详细地研究了这两种粒子之间的碰撞现象. 发现当 π 介子的能量逐渐增大时，出现一种很奇妙的现象，这就是发生散射的比率不是单调地增减，而是在几处有显著的增大（图 13），这和弦振动以及声音中出现的共振现象有些相似. 可以认为，这是由于质子和一定能量的 π 介子发生了共振，π 介子受到强烈散射而引起的. 在重原子核中也发现了一些类似的现象. 这可以理解为，原子核是基本粒子的集团，这些基本粒子可能有各种组合状态，碰撞时变为其中某种状态，回到原来状态时又放出了某种粒子. 但是就基本粒子来说，一般认为一个质子只能是一个质子而不能有其他状态. 如果把上述现象按照原子核的情况类推，就不得不认为质子在某一段时间内已完全成为其他基本粒子了，或者处于和其他基本粒子相似的状态. 带正电的 π 介子被质子散射时，散射的比率最大（称为第一共振态），如果按照上述想法解释这种效应，就必须假定粒子处于具有二倍基本电荷的状态. 在已知的粒子中，包括新粒子在内，都没有这种情况. 于是把这种状态称为基本粒子的共振态，也包含了把它和基本粒子加以区别的意思. 到五十年代终期，关于核子已经确认了几种共振态，但是没有象发现新粒子那样引起注意（表 2）.

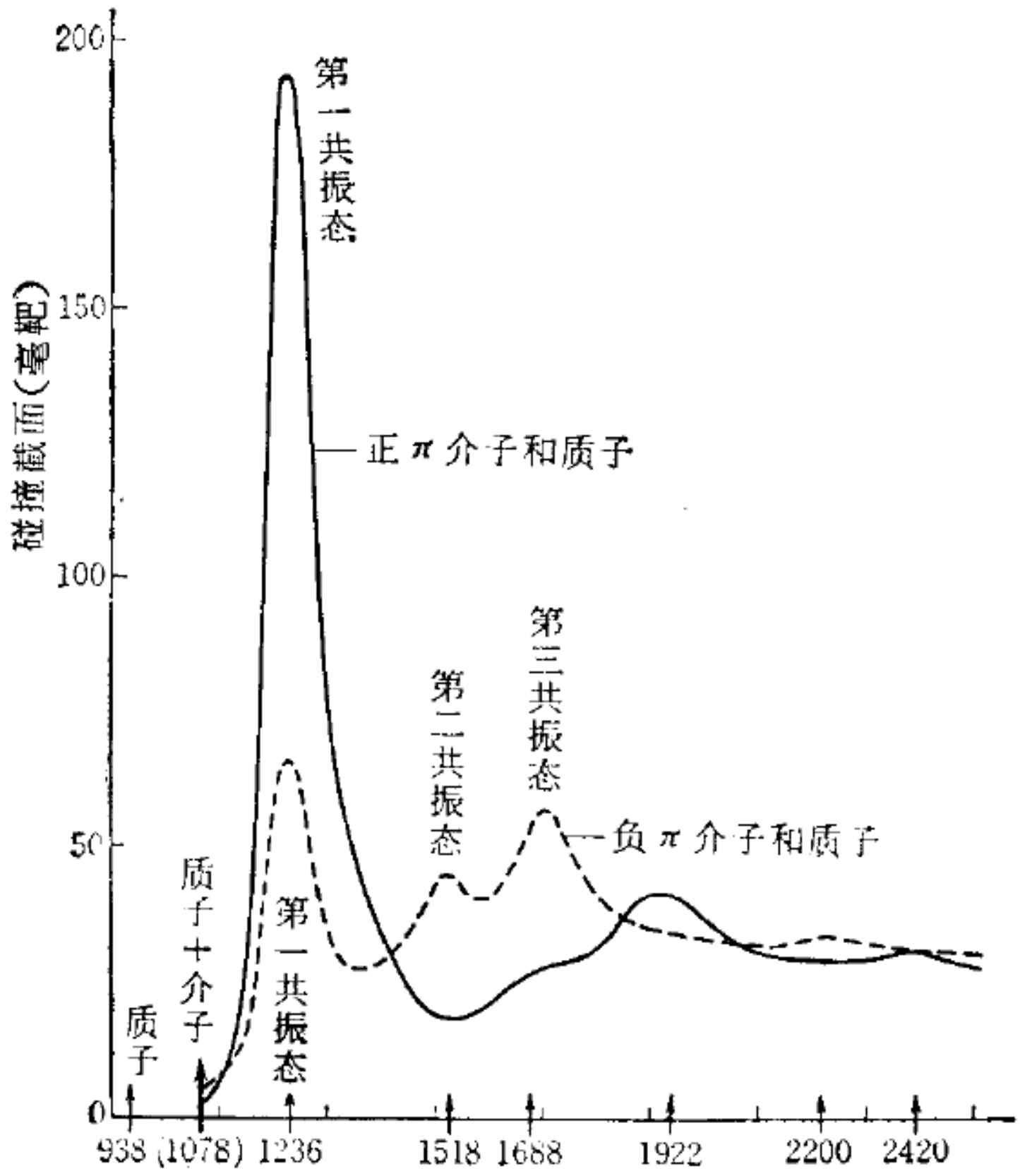


图 13　π介子和质子的碰撞

到了二十世纪六十年代，基本粒子共振态的问题有了预料不到的发展．发现了反质子的加利福尼亚大学的质子同步加速器，一个接一个地发现了各种共振态，而且还发现了π介子也有共振态．设在瑞士的欧洲联合原子核研究中心的质子直线加速器，和布鲁海文的 AGS 同步加速器，在开始运转后也陆续地发现了很多共振态．据报道，不但旧的基本粒子有共振态，新的基本粒子也有共振态，已经查明共振态是基本粒子共同具有的一种性格．

至于共振态是不是基本粒子，在这个问题上也反映了基本粒子理论的贫困．和已知的基本粒子相比，共振态的寿命非

表 2　核子的共振态(到1968 年为止)

共振顺序	名　　称	质量(兆电子伏)	自　　旋
N_1^*	Δ(1236)	1236	3/2
	N'(1470)	1470	1/2
N_2^*	N(1518)	1525	3/2
	N(1550)	1550	1/2
	Δ(1640)	1640	1/2
	N(1980)	1680	5/2
N_3^*	N(1688)	1690	5/2
	N'(1710)	1710	1/2
N_4^*	Δ(1920)	1950	7/2
N_5^*	N(2190)	2200	7/2
N_6^*	Δ(2420)	2420	11/2
N_7^*	N(2650)	2650	11/2
N_8^*	Δ(2580)	2580	15/2
N_9^*	N(3030)	3030	?
	Δ(3230)	3230	?

常短,短好几个数量级,根据这一点,可以把两者明显地区别开来. 但是,另一方面,在 π 介子受到核子散射时没有注意到的一点是,在共振态产生的过程中及其前后,基本粒子显示出不同的个性. 这就是说,共振态呈现出近于基本粒子的行动. 关于共振态是不是基本粒子的问题,我们还不能作出回答.既然如此,我们就不得不对基本粒子重新进行考虑. 关于这个问题后面还要提到,这里姑且把共振态称为基本粒子的第三代.

1.8　巨大的科学

从二十世纪五十年代开始,对基本粒子的知识有了显著的增加,这种结果完全是大型加速器带来的. 可以认为,加速器是揭开基本粒子世界的主要设备.加速器经过不断的改进,

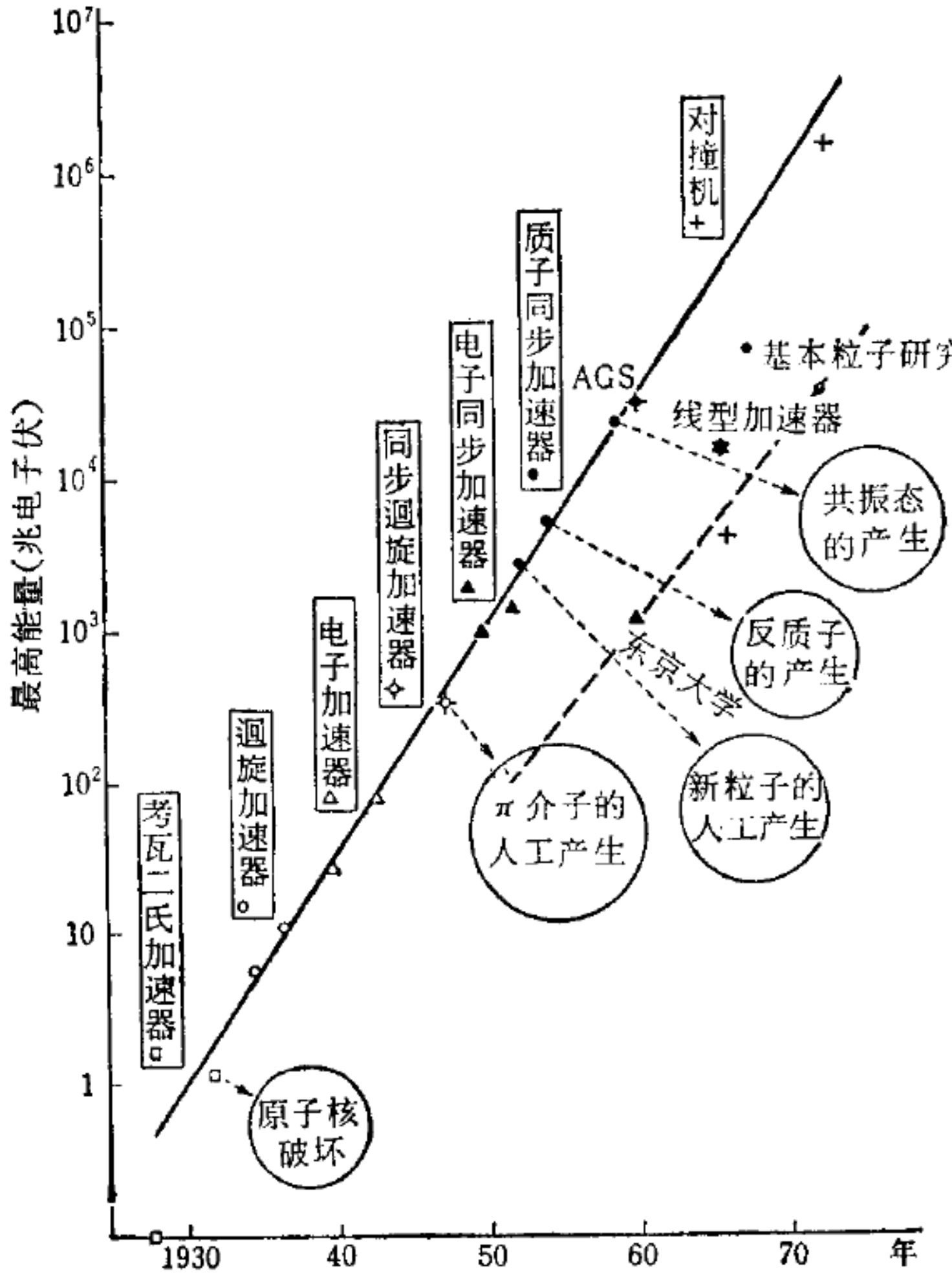


图 14　加速器的演变和能量增加

达到的最高能量也逐年增加(图 14). 为了探索基本粒子的未知世界,投入巨额资金建设加速器,似乎是不合算的,但是二十世纪的科学有一个显著的特征,就是起初没有预想到的知识,不久就迅速地发展起来,改变了科学的面貌. 原子能和固体电子学的发展,就是很好的例证. 何况探索自然界的根本法则,也是人类自有史以来的一个长期梦想.

不仅如此,和加速器建设有密切联系的基本粒子物理学,也逐渐发展为一门巨大的学科. 这门学科如果没有其他科学

技术的发展，也不可能发展．反之，加速器的建设不仅可以促进基本粒子物理学的发展，而且也能促使其他一些科学技术向前发展，例如固体物理学、电子学、原子能、医学、电工学、材料力学、土木工程等．我们以观测基本粒子用的汽泡室为例来说明这个问题．为了使用巨大的汽泡室，需要发展制备大量液氢的技术．将来的汽泡室需要六万公升左右的液氢．由于氢气在零下二百五十二度下才开始液化，目前的产量还是有限的．为了克服这一困难，就需要发展固体物理学和低温技术．同时为了更有效地利用汽泡室，还必须提高电子计算机的性能，例如必须研究电子计算机识别图形的性能．为了不使用大量钢材和强大电流而产生强的磁场，就需要发展超导磁体．为了利用超导磁体，又需要准备大量比液氢沸点更低的液氦．此外，超导磁体用的超导电线的材料，也是一个需要研究的问题．所谓巨大科学并不是等待各种科学技术发展之后才发展起来的科学，而是各种科学技术在统一计划下互相关联地同时发展，才能获得成果的科学．对基本粒子世界的探索，现在就已经具备这种性格了．其他科学技术的发展促使基本粒子物理学的发展，而基本粒子物理学的发展反过来也促进其他科学技术的发展．

2. 基本粒子的一生

2.1 基本粒子的诞生和死亡

在人们了解了原子核放出来的 β 射线的本体就是电子之后，很多人认为在原子核内可能隐藏着电子．实际上，这是因为没有考虑到象电子这样具有质量和电荷的物质，能够很快地产生出来．然而，狄拉克在他的电子理论中曾经预言，负能状态的电子吸收光能之后，能够产生电子-正电子对．泡利

和费米仿照这种想法，提出了 β 衰变理论，他们认为原子核内的中子转变为质子时同时放出电子和(反) 中微子. 此后，基本粒子能够互相转化、产生和湮灭的事实，就成为最普通的知识而接受下来了.

根据相对论的结论，物质的质量和能量是等同的，基本粒子的质量也具有和能量等同的意义. 但是，许多基本粒子除质量外，还具有其他各种性质，因此，不能说物质自身就是能量. 当电子和正电子，或者质子和反质子发生或湮灭时，物质质量以外的各种性质也同时发生或湮灭（图 15）. 所以会产生这种现象，是因为基本粒子能够与和它性质相反的粒子成对地发生或湮灭的缘故. 我们把这样的一对粒子称之为“粒子”和“反粒子”. 如果以电子为粒子，正电子就是它的反粒子. 此外，还可以更一般地说，一种基本粒子具有变为另一种基本粒子的性质. 如果着眼于某一特定的基本粒子，自然界里存在着它的发生和湮灭的机制. 在这种情况下，一般地说，同时发生或湮灭的基本粒子，不一定都具有粒子对那样的相反性质. 湮灭的母粒子的一些性质，也可能由产生的子粒子继承下来. 在 β 衰变中，中子的一部分性质就被质子继承下来.

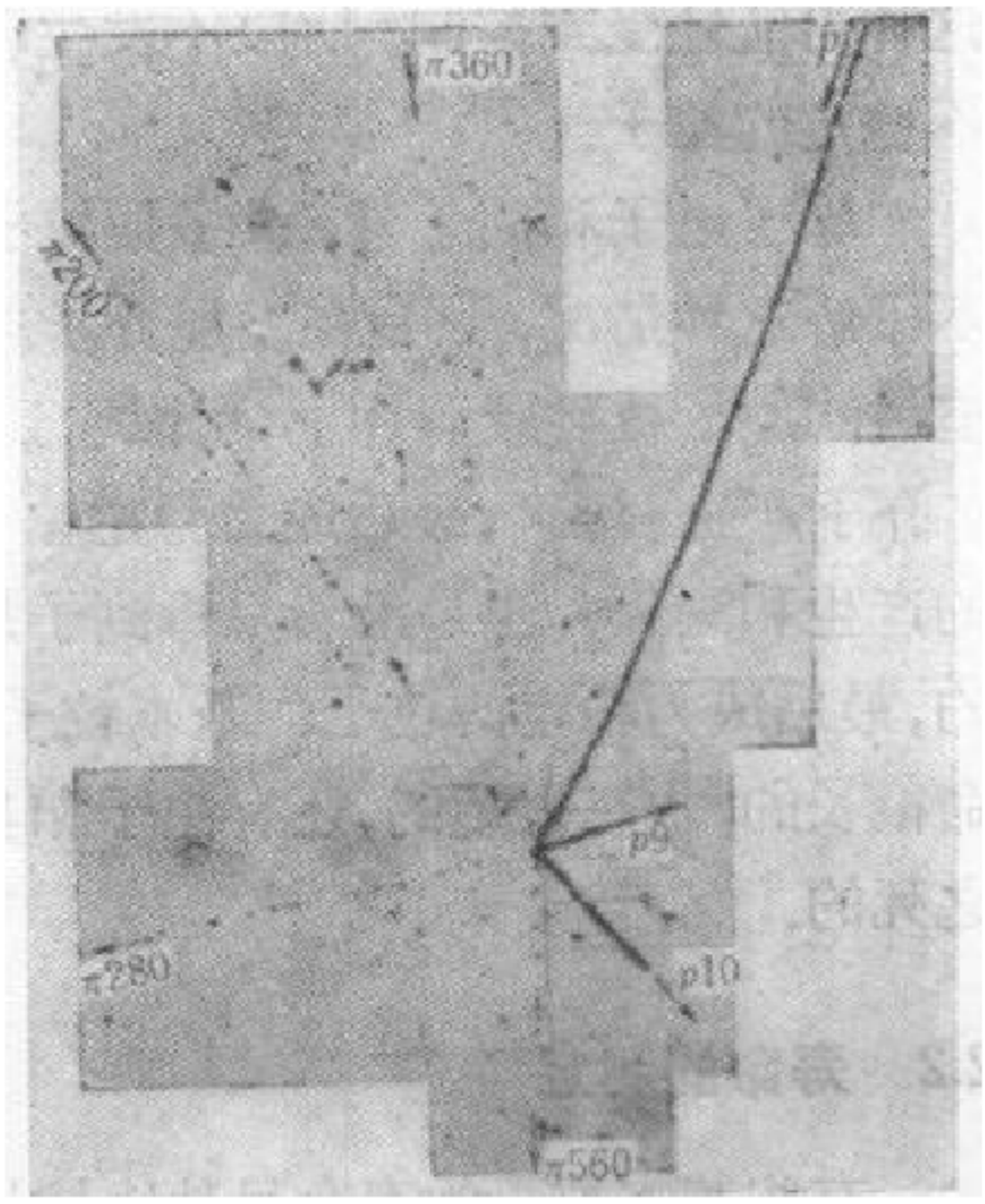


图 15　质子和反质子对的湮灭

包括我们所居住的地球在内，或者说得更大一些，包括银

河系以至宇宙空间在内，粒子和反粒子的数量是绝对不平衡的．因此，在基本粒子世界内即使出现反粒子，但只有极少一部分粒子被抵消，绝大部分基本粒子依然存在．在原子世界中，因为有电子和质子这样的粒子存在，所以我们有非常具体的形象．电子和质子称为稳定粒子．中子当然也能和反中子同时产生或湮灭，此外还能自然衰变．在稳定的原子核内，由于这种可能性受到控制，所以不发生衰变现象．中子本来也是不稳定的粒子．

除了电子和质子外，大多数粒子都是不稳定的．起初并不了解这种情况，只是在发现介子之后才了解了．我们从宇宙线的原子核乳胶照片上，可以看到 π 介子产生、湮灭，接着 μ 介子产生、湮灭，最后成为稳定粒子的情况．因此，基本粒子的产生和湮灭，也是沿着从母到子从子到孙这样的程序进行的，最后成为稳定的粒子．基本粒子和人有些相似，其中有寿命很长的，也有很短的，还有由于和其他粒子碰撞而遭到不测之死的．

2.2 寿命的测定

有些基本粒子的寿命虽然比较长，但是，用我们的尺度衡量时，也是非常短的．中子的寿命最长，也只有 16 分钟．大多数基本粒子的寿命利用我们的计时工具是不能计量的．幸而利用雾室等装置，我们能够观察到基本粒子从发生到湮灭的径迹，并以此为线索来计量它的寿命．但是，在这种情况下，必须考虑下述问题．基本粒子都是以高速运动的，由相对论知道，它的表观寿命延长了，因此为了得到一致的结果，必须换算成静止时的寿命．此外，我们所研究的是微观现象，由量子力学知道，寿命必须按照几率的意义取平均值．

我们首先测量 μ 介子的平均寿命．为此，首先利用雾室

搜集μ介子死亡的事例，其中一些事例，μ介子很快就死亡了，另有一些事例，μ介子生存的时间较长．这样的事例非常之多，只能取平均寿命．我们取适当的时间间隔，观察各区间内的生存率和死亡率之比大致相等．这样，再多观察一些事例，并把时间间隔分得更微细一些，这个比率就接近于一定值．如果所考虑的μ介子数量非常之多，这个比值在平均时虽有一些减少，但可以把它的倒数定义为平均寿命．如果取横轴表示产生后的时间，纵轴表示死亡数，并取对数刻度，在把死亡数填入之后成为一直线，由它的斜率就可以求出平均寿命．从这个结果(图16)知道，μ介子的平均寿命大体是一百万分之二秒(2×10^{-6}秒)．

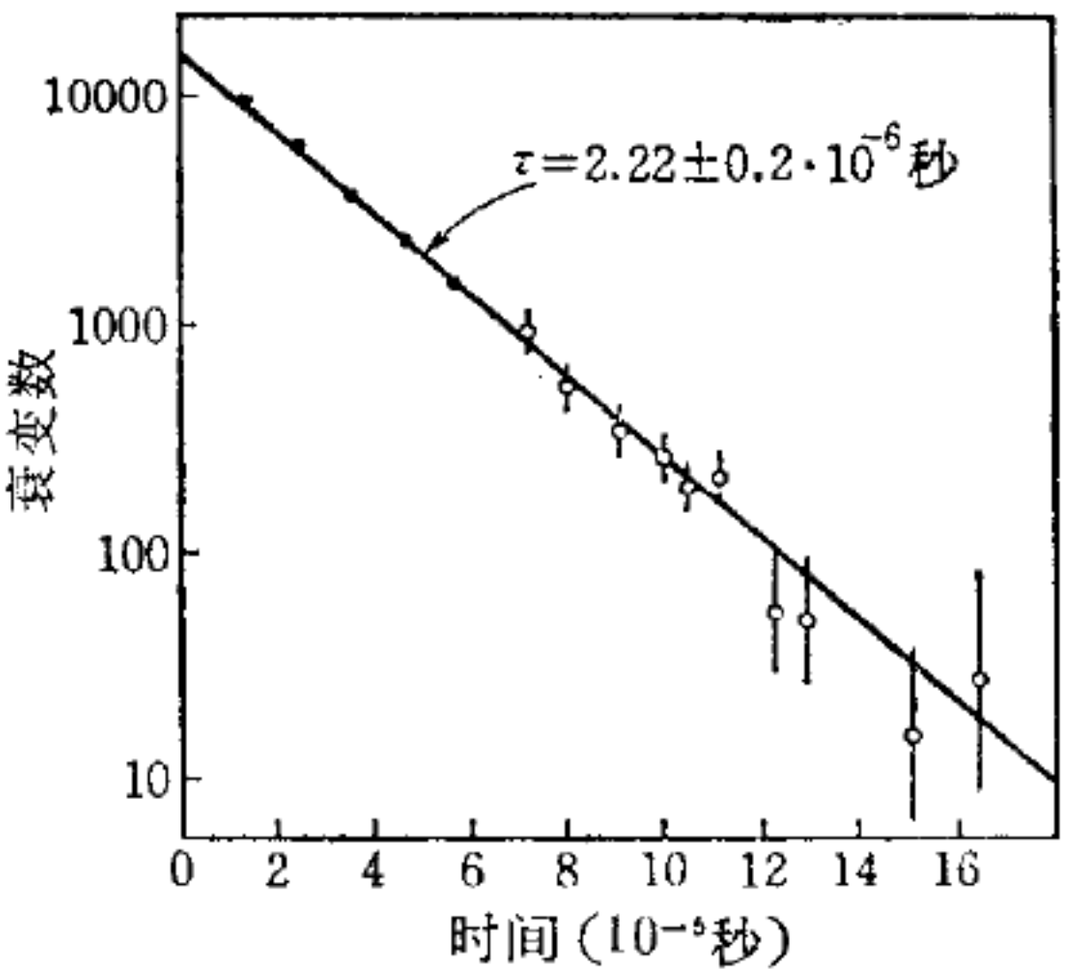


图16　μ介子的寿命

μ介子的寿命看来好象很短，但是它比π介子的寿命(10^{-8}秒)还大两个数量级．由于这一差别，曾使介子理论陷入深刻的矛盾达十年之久．二介子理论正确地指出了产生这种差别的原因，这是日本物理学界的成果．

在第二代基本粒子发现之后，知道了这些粒子的寿命之短还要小两个数量级以上(10^{-10}秒以下)(表3)．这样短寿命的基本粒子一生到底有些什么意义，这是令人怀疑的．基本粒子的寿命的确很短，但是，不要忘记它以近于光速的速度运动．例如，假定寿命为百亿分之一秒的粒子，以光速的三分之一速度(10^{10}秒/厘米)运动，它一生能够通过一厘米的距

表 3　基本粒子的质量和寿命

	基本粒子的名称	符　　号*	质量(兆电子伏)	寿命(秒)
稳定的基本粒子	光　　子	γ	0	
	中　微　子	$\nu_e, \bar{\nu}_e$	~0	
	μ 中微子	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	<2.1	
	电　　子	$e^{\mp}$	0.5	
	质　　子	$p,(\bar{p})$	938.3	
不稳定重粒子	中　　子	$n,(\bar{n})$	939.6	1.0×10^{3}
	Λ 粒　子	$\Lambda,(\bar{\Lambda})$	1115.4	2.5×10^{-19}
	Σ 粒　子	$\Sigma^+,(\bar{\Sigma}^+)$	1189.5	0.8×10^{-19}
		$\Sigma^0,(\bar{\Sigma}^0)$	1192.5	$<10^{-14}$
		$\Sigma^-,(\bar{\Sigma}^-)$	1197.4	1.6×10^{-19}
	Ξ 粒　子	$\Xi^-,(\bar{\Xi}^-)$	1321.3	1.7×10^{-10}
		$\Xi^0,(\bar{\Xi}^0)$	1314.9	2.9×10^{-10}
不稳定介子	μ 介　子	$\mu^{\mp}$	105.7	2.2×10^{-6}
	π 介　子	$\pi^{\pm}$	139.6	2.6×10^{-8}
		π^0	135.0	0.9×10^{-16}
	K　介　子	$K^{\pm}$	493.8	1.2×10^{-8}
		K_1^0	497.8	0.9×10^{-10}
		K_2^0	497.8	5.3×10^{-8}

*　字母上加有横线者表示反粒子

离. 在固体或液体中，原子所占的范围为一亿分之一厘米(10^{-8}厘米)左右. 基本粒子在固体或液体中运动时，在一亿分之一厘米的范围内碰上一个原子核，一生中就可以碰上一亿左右的原子核. 一个人在一生中要遇上成亿的人，那是一件很了不起的事情了. 假定人的寿命是一百年，平均一百平方米住一个人；如果要接触这一亿人，就需要乘时速一百公里的汽车昼夜不停地奔跑一生. 由这个比喻可以推知，基本粒子的一生是充满了变化的一生.

第三代基本粒子的寿命更短，短到用上述方法也不能计

量的程度. 但是，凑巧得很，表示它存在的共振曲线（图 13）在决定共振态能量的周围有一定的宽度. 由于这种状态很快湮灭，所以宽度越大，生存的时间越短. 因此，这个宽度就是寿命长短的大致标准. 反过来计算可以知道，它们的寿命比一千亿分之一的一千亿之一秒(10^{-22}秒)还短. 在这个时间内通过的距离是一万亿分之一厘米（10^{-12}厘米），好象人在幼儿时代就夭折了一样.

2.3 基本粒子的家族

有些基本粒子，它们的发生、湮灭和转化虽然相同，但是它们的作用却完全不同，例如电子和质子就是这样. 质子是氢的原子核，如果认为中子也变为质子，结果支配自然界物质重量的就是质子了. 然而，电子是很轻的，而且很容易从原子脱离出来，脱离后对物质的重量几乎没有什么影响. 基本粒子虽然能够互相转化，但是质子不可能变成电子那样轻的粒子. 在第二代基本粒子发现之后，又出现了许多和质子相似的基本粒子和比它轻的基本粒子. 在这些基本粒子之间发生各种变化，于是也可以认为质子可能经过复杂途径而变为质量较轻的粒子了. 但是后来知道，质子变化的结果，都是比它的质量还大的基本粒子. 这些粒子总括起来可以看成是一个大家族.

如上所述，和质子属于同一家族的都是比它还重的基本粒子，而且都具有半整数自旋值，称之为重粒子族. 这样一来，π 介子以及比它重的整数自旋值的基本粒子，就构成介子族；中微子、电子、μ 介子都具有半整数自旋值，这些粒子构成另外一个家族，称之为轻粒子族. 最后还剩下一个光子，构成一个光子族. μ 介子没有名副其实地列入介子族，而列入了轻粒子族.

这样，考察每个基本粒子的行动，不如考察粒子族全体的行动更简单一些.因为质子不能破坏，虽然不需要把它从重粒子族分离出来另列为一族，但是，它也容易和其他粒子族发生关系，这是因为当质子和反质子成为一对时就变为光子或π介子的缘故. 这使我们想到它是和电荷相似的一个量.

表 4　基本粒子族的区分

	重粒子数	轻粒子数	自　旋
光子族			
光　子	0	0	1
轻粒子族			
中微子	0	+1	1/2
电　子	0	+1	1/2
μ中微子	0	+1[−1]	1/2
μ介子	0	+1[−1]	1/2
介子族			
π介子	0	0	0
K介子	0	0	0
介子的共振态	0	0	0,1,2,…
重粒子族			
核　子	+1	0	1/2
Λ粒子	+1	0	1/2
Σ粒子	+1	0	1/2
Ξ粒子	+1	0	1/2
重粒子的共振态	+1	0	1/2,3/2,…

子和反质子的电荷是相反的，成为一对时电荷为零.和这种情况不同的是中子，而且必须把适用于质子的量也适用于中子. 为此，我们把正 1 适用于重粒子族中的粒子，把负 1 适用于其中的反粒子，来计算重粒子族的成员数. 这样，其他族的基本粒子数都为零. 因为粒子和反粒子的总和是零，可以说，本来

就不是这个族的成员也就变为其他族的成员了．对于这种想法，冈山大介起初使用了介子电荷的名称，而现在称之为“重粒子数”．重粒子族的限制，可以换句话说，就是重粒子数守恒，它和电荷守恒是完全一样的．说得更广泛一些，自宇宙形成以来，在自然界的一切变化中，重粒子数总是保持一定的．

例如，在中子的 β 衰变中，

中子⟶质子 + 电子 + (反)中微子，

重粒子数：(+1)⟶(+1) + (0) + (0)，

因此重粒子数守恒，这种衰变是可能的；假如质子按照下面过程进行衰变：

质子⟶电子 + 正电子 + 正电子，

(+1)⟶(0) + (0) + (0)，

这里重粒子数不守恒，所以不存在这种衰变．如果物质遵守这项规定，质子就不可能经过任何途径衰变为轻粒子了．

对于轻粒子族，也可以用正、负数来区别粒子和反粒子，称之为“轻粒子数”．光子族和介子族是单独发生和湮灭的，成员数没有一定．和重粒子数相比，轻粒子数好象不那么重要，但是，对于整理 β 衰变以及 μ 介子衰变等现象，也是一个很方便的量，因此过去一直在使用．然而，前述的布鲁海文加速器发现了两种中微子之后，就更需要详细讨论了．这个实验以高度的精确性判明，和电子成为一组的中微子与和 μ 介子成为一组的中微子完全不同，而且两种中微子的作用不能互换．如果这项判断是正确的，不但轻粒子数守恒，而且在分成 μ 粒子数和 e 粒子数两种之后，这两种轻粒子数也分别守恒．μ 粒子数是 μ 介子和 μ 中微子组的轻粒子数，e 粒子数是电子和中微子组的轻粒子数．但这项理论还没有完全确立．

2.4 奇异数

在二十世纪五十年代初期，也即是发现第二代粒子即新粒子的时候，理论物理学家不但未能预言这些新粒子，而且觉得和十年前一样，又陷入了混乱状态。在宇宙线中发现的新粒子，是在大气层中核子和 π 介子碰撞而产生的。因为新粒子

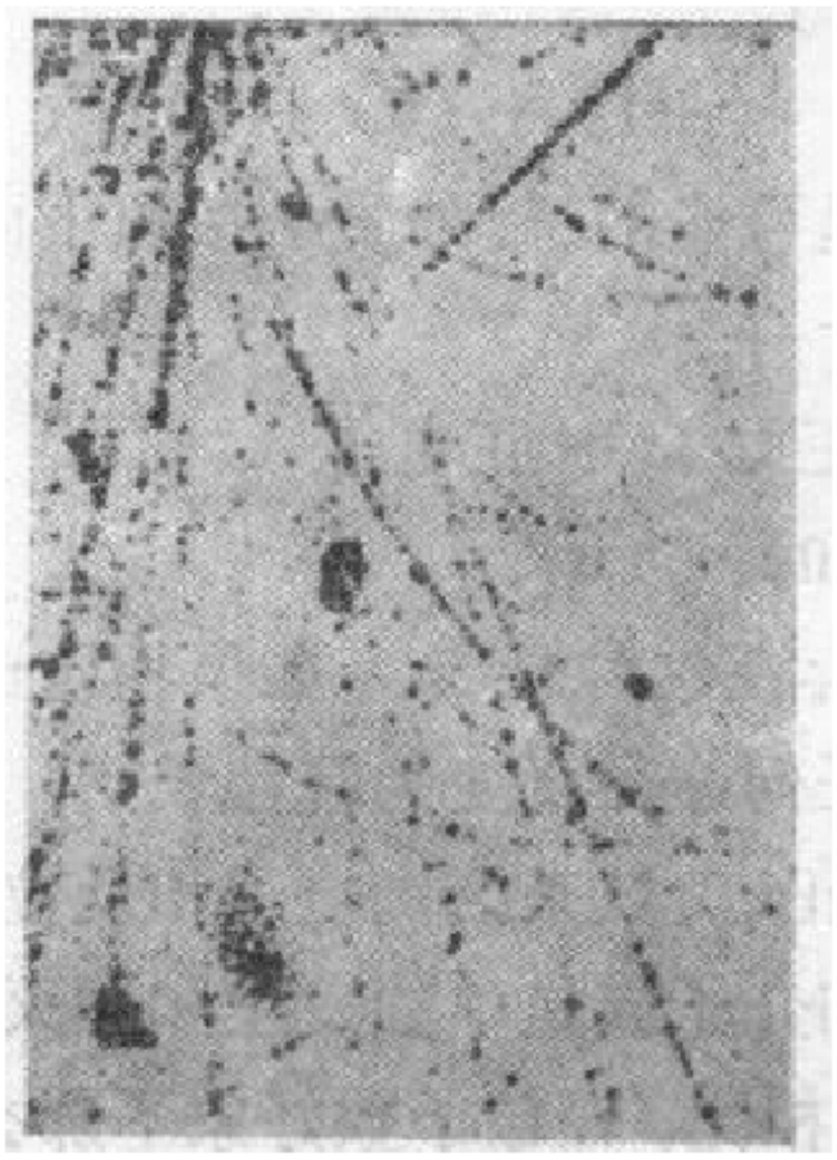


图 17　Λ 粒子的衰变

的质量很大，如果不是以很大能量相碰撞，是不可能产生的，因此，发生的机会应当很少。虽说如此，在宇宙线中发现的新粒子的发生比率和 π 介子的发生比率大体相同。这样，新粒子的寿命应当很短，但是根据观测结果知道，新粒子的寿命却都很长。例如 Λ 粒子，象在照像乳胶上看到的那样（图 17），是以下面过程来结束其一生的，即

$$\Lambda \text{粒子} \longrightarrow \text{质子} + \pi^- \text{介子},$$

根据产生率推算出来的寿命，只是实测寿命的一万亿分之一。也就是说，实测出的新粒子寿命比预期的寿命长得很多。

十年前曾遇到 π 介子的产生比率大而寿命比预期的长的难题. 后来认识到,产生比率大的是 π 介子,寿命长的是 μ 介子,从而解决了这个问题. 上述问题和这种情况有些相似,但是也有不同之处, 就是新粒子在产生和衰变时都只有核子及 π 介子参加. 也就是说, 对上述问题附加了一个出入口相同的条件. 向这个难题挑战的是日本几位青年的基本粒子物理学工作者, 他们提出了各种解决方案, 其中最有希望的是下述见解: 新粒子不是单独产生的, 而是成组产生的. 派斯于1952年指出, 在产生现象中有偶数个新粒子参加, 在衰变现象中有奇数个新粒子参加;这里偶数和奇数的不同,就决定了发生和湮灭的比率大小. 实际上, 已经得到了证实这种见解的照片(图18). 但是, 由图17可以看出, Ξ 粒子衰变为 Λ 粒子和 π 介子. 这里虽然有偶数个新粒子参加, 但是衰变过程却很慢. 那末应当如何改进偶数、奇数的规则呢?

表5 基本粒子的电荷和奇异数

	重粒子群				
Ξ 粒子	Ξ^-	Ξ^0		-2	奇
Σ 粒子	Σ^-	Σ^0	Σ^+	-1	异
Λ 粒子	Λ				数
核 子		n	p	0	
	-1	0	$+1$		
	电		荷		

	介子群				
K介子		K^0	K^+	$+1$	奇
π 介子	π^-	π^0	π^+	0	异
K介子	K^-	$\bar{K}^0$		-1	数
	-1	0	$+1$		
	电		荷		

1954年中野董夫和西岛和彦, 同时还有盖尔曼, 他们想

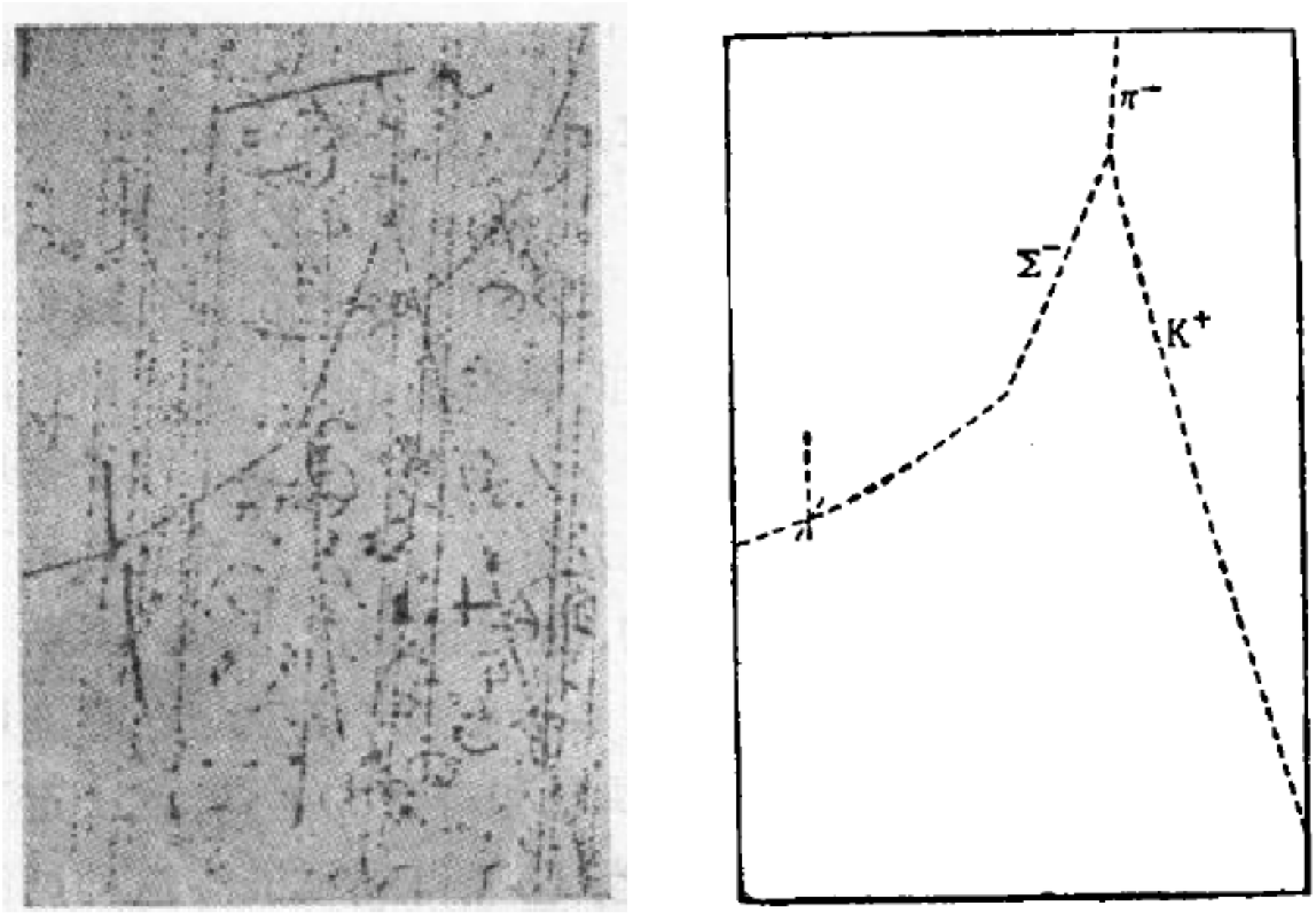


图 18　Σ 粒子对的发生

到给基本粒子加上一个“奇异数”.他们认为,基本粒子除了已知的质量、自旋、电荷、粒子数等外,还应具有“奇异数”这样一个量,而且它也是守恒的,和电荷守恒有些相似.但是,奇异数和电荷、粒子数不完全相同,它不仅有守恒现象,而且还有不守恒现象. 假定守恒现象发生的比率比较大, 不守恒现象发生的比率比较小,就可以把前者适用于新粒子的产生现象,后者适用于新粒子的衰变现象.

由表 5 给出的奇异数和电荷知道, 在图 18 的反应中, 即

$$\pi^-\text{介子} + \text{质子} \longrightarrow K^+\text{介子} + \Sigma^-\text{粒子},$$

$$\text{奇异数:}\ [0] + [0] \longrightarrow [+1] + [-1],$$

由此可知反应前后奇异数保持一定, 所以这种现象发生的比率比较大. 与此相反, 在图 17 的 Λ 粒子的衰变反应中, 即

$$\Lambda\text{粒子} \longrightarrow \text{质子} + \pi^-\text{介子},$$

$$[-1] \longrightarrow [0] + [0]$$

以及Ξ粒子的衰变反应中,即

$$\Xi^-\text{粒子}\longrightarrow\Lambda\text{粒子}+\pi^-\text{介子},$$

$$[-2]\longrightarrow[-1]+[+0]$$

两者在反应前后，奇异数都有 1 的改变，所以衰变得比较慢.

2.5 带电空间的设想

奇异数和基本粒子的电荷有密切的关系. 通常把原子核内的质子和中子总称之为核子、这两种粒子除了电荷的有无

表 6　基本粒子和同位旋

基本粒子名称		同位旋	同位旋空间的状态	奇异数	重粒子数	电　荷
Ξ粒子	Ξ^0	1/2	+1/2	−2	1	0
	Ξ^-		−1/2			−1
Σ粒子	Σ^+	1	+1	−1	1	+1
	Σ^0		0			0
	Σ^-		−1			−1
Λ粒子	Λ	0	0	−1	1	0
核　子	p	1/2	+1/2	0	1	+1
	n		−1/2			0
K介子	K^+	1/2	+1/2	+1	0	1
	K^0		−1/2			0
π介子	π^+	1	+1	0	0	+1
	π^0		0			0
	π^-		−1			−1

和质量稍有不同之外，其他性质都相同．在刚了解原子核结构的当时，海森堡就指出，质子和中子是同一基本粒子的两种不同状态，就象自旋有左旋和右旋一样．为了理解这个问题，可以设想一个“带电空间（同位旋空间）”，这是一个假想的三维空间，每一个基本粒子都象一个小的“陀螺”在这个空间内旋转．就象用自旋及其分量表示实际陀螺旋转的大小和方向一样，可以用同位旋及其分量表示假想陀螺旋转的大小和方向．如果把质子和中子与右旋状态和左旋状态联系起来，就可以认为核子有两种可能状态，同位旋的大小为 1/2，其分量为 +1/2 的是质子，分量为−1/2 的是中子．

这种想法也完全适用于 π 介子，π 介子的同位旋是 1，有三种可能状态，即+1，0，−1，分别对应于 π^+ 介子，π^0 介子，π^- 介子．核子的电荷和同位旋分量的关系，与 π 介子的这两种量的关系略有不同．π 介子的同位旋分量等于电荷数（以电子的电荷为单位），而核子的同位旋分量加 1/2 才等于电荷数．这种方法可以推广到各种基本粒子（表6）．

中野、西岛、盖尔曼在考虑奇异数时发现，基本粒子的电荷和同位旋的分量值、重粒子数以及奇异数的关系，可以用简单的公式表示出来，即

电荷 = 同位旋分量 +（奇异数 + 重粒子数）÷ 2，这个公式只是不适用于没有给予奇异数和同位旋的光子和轻粒子．在这个公式中，如果知道了电荷、同位旋分量、奇异数、重粒子数等任意三个值之后，就可以求出其他一个数值，因此，这个简单公式对于以后发现基本粒子发挥了巨大作用，例如，起初不知道有中性 Ξ 粒子的存在，但是从已发现的负 Ξ 粒子的电荷、奇异数和重粒子数中，求出了它的同位旋分量为 1/2，于是就预想到同位旋分量为负 1/2 的粒子，即中性 Ξ 粒子的存在．目前已经发现了将近三百种基本粒子，这个公

式对这些基本粒子都是适用的.

在基本粒子的各种现象中,电荷和重粒子数一定守恒;但是,奇异数在一些情况下守恒,在一些情况下不守恒. 把这些事实和上面的公式结合起来,可以知道,在奇异数守恒的反应中,同位旋分量也守恒,在奇异数不守恒的反应中,同位旋分量也不守恒. 因为同位旋的总和是带电空间中假想陀螺合成旋转运动的同位旋的分量,所以前一种情况表示假想陀螺的运动没有变化,后一种情况表示假想陀螺的运动有变化. 这样,就可以把基本粒子的现象作为带电空间中的陀螺的旋转运动来理解.

2.6 基本粒子的相互作用

基本粒子从诞生到死亡的各种现象,都说明基本粒子之间存在着各种方式的相互作用. 和基本粒子诞生有关的相互作用,与和死亡有关的相互作用显然是不同的. 电子是稳定的粒子,它在发生或湮灭时和光子的相互作用与这些相互作用不同. 在基本粒子的世界里,至少存在着三种不同方式的相互作用.

和基本粒子的诞生有关的相互作用,主要是以原子核内的作用力为代表,这是核子放出或吸收 π 介子时发生的相互作用,是由汤川首先引入的. 在第二代基本粒子发见之后,明确地知道了这种相互作用在许多基本粒子之间都可以看到. 而且知道相互作用的强度大体是相似的. 这种相互作用可归纳成下面的类型,即

$$\text{(I)}\quad \text{重粒子} \rightleftharpoons \text{重粒子} + \text{介子},$$

这种相互作用叫做"强相互作用". 在这种相互作用中,电荷、重粒子数当然是守恒的,奇异数也必须是守恒的. 强相互作用不仅支配基本粒子的诞生,而且也支配参加相互作用的基

本粒子即重粒子族和介子族所有成员在一生中的行动. 因此，这种相互作用是基本粒子世界里最重要的相互作用. 可以说，基本粒子通过强相互作用时时刻刻发生变化.

大多数的基本粒子都有唯一的一次死亡. 支配基本粒子死亡的是“弱相互作用”. 以 β 衰变、π 介子衰变、μ 介子衰变、新粒子衰变等现象为线索，详细地知道了这种相互作用的作用方式. 弱相互作用表示重粒子族、介子族、轻粒子族三种粒子族间只限一次的相互作用. 这些相互作用可以归纳成三种类型. 首先是和(I)相似的类型，即

(II) 重粒子 $\Longleftrightarrow$ 重粒子 + 介子，

虽然和(I)相似，但是奇异数不守恒. 其次是 β 衰变中出现的相互作用，即

(II′) 重粒子 $\Longleftrightarrow$ 重粒子 + 轻粒子 + (反)轻粒子，

最后一种是以 μ 介子衰变为代表的相互作用，即

(II″) 轻粒子 $\Longleftrightarrow$ 轻粒子 + 轻粒子 + (反)轻粒子.

利用(I)和(II′)，可以推导出 π 介子的衰变. 所谓弱相互作用就是相互作用较弱. 轻粒子只有通过弱相互作用才能参加重粒子或介子的世界. 轻粒子看来好象是一个平稳世界；但是，这只是就我们现在所知道的范围而言. 例如，弱相互作用的强度主要由能量决定，因此在极端的高能现象中，弱相互作用是不是真的弱，目前还不知道，有人认为，也许这里就是轻粒子活跃的世界.

根据电磁学很早就知道，光子和基本粒子有相互作用，这种相互作用叫做“电磁相互作用”. 基本粒子只要有电荷或磁矩，就一定有吸收或放出光子的电磁相互作用. 以电子的电荷为单位，基本粒子的电荷最多不过一、二个单位，因此，就基本粒子全体来说，主要与电荷成正比的电磁相互作用具有相同的强度. 和强相互作用相比，这个强度是很小的. 然而，基

本粒子在一生中总有机会吸收或放出光子，从这一点来说，电磁相互作用的强度应当是诞生和死亡的相互作用之间的强度．这个强度的特征，是它等于精细结构常数的一百三十七分之一．电磁相互作用可以用

(III) 带电粒子 ⇌ 带电粒子 + 光子

来表示．由于光子没有质量这一限制，所以反应前后只考虑同一带电粒子．光子没有质量的限制称为规范不变性，这种限制对考虑相互作用的性质，或者考虑表征这种相互作用的粒子，例如光子或 π 介子，都是一个重要的因素．通过电磁相互作用，轻粒子也能以比弱相互作用大的比率与重粒子或 π 介子相互作用．图 19 给出了这些相互作用的关系．

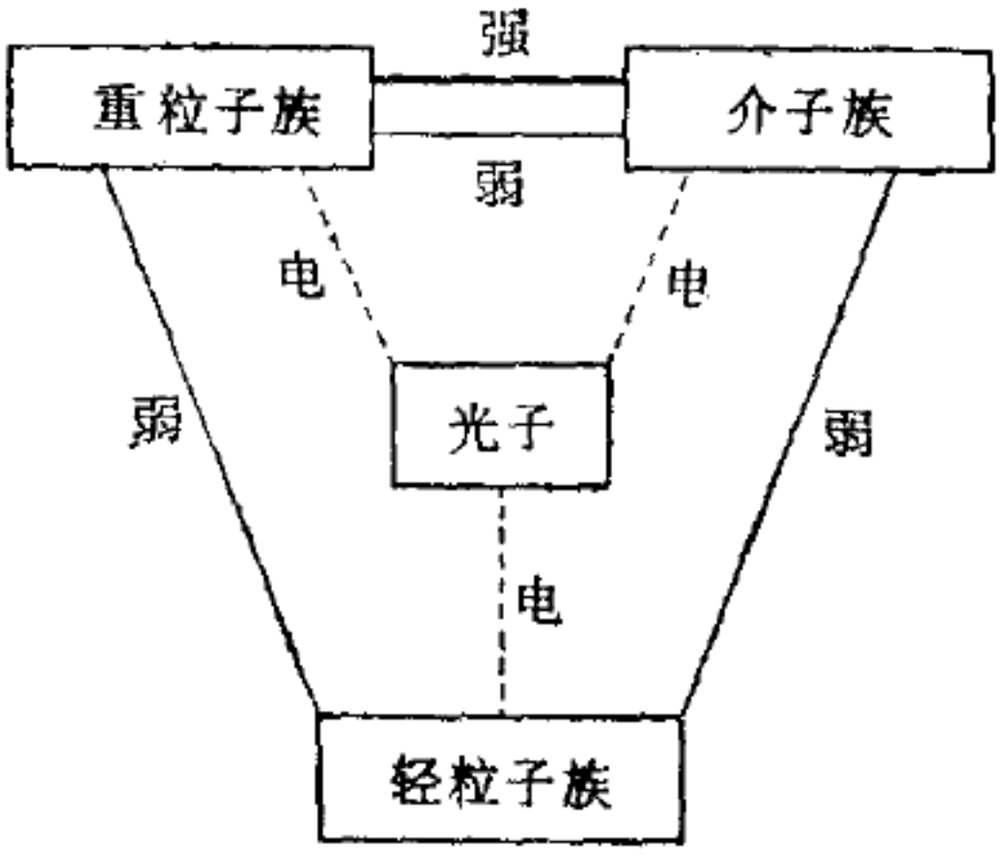


图 19　各种基本粒子族之间的相互作用

2.7　相互作用的性质

相互作用的概念，和基本粒子的种类、现象有不可分离的关系，因此，随着基本粒子种类的增多，相互作用的种类也应增加．实际上，现有的相互作用，不仅都属于前述三种类型，而且不管参加的是什么粒子，如果以强相互作用的强度为 1，电磁相互作用强度则是它的千分之一，弱相互作用强度又是电磁相互作用的千分之一．详细地研究相互作用的性质，这一事实更为明显，反过来说，其他种类的相互作用插入中间的余地好象越来越小了．目前未知的基本粒子还可能存在，已知的基本粒子也有许多没有解决的问题，当然不能断定没有其

他种类的相互作用了. 特别是弱相互作用，是否还存在更弱的相互作用，它的性质如何，目前都还不明了，将来也许成为重要的作用. 引力相互作用可能就是这样的相互作用. 迄今为止，因为基本粒子很轻，没有考虑引力相互作用；但是，这并不是说引力可以完全忽视，也许在基本粒子深处，它会起着重要的作用.

这三种相互作用，撇开强度不谈，在性质上也有明显的不同. 其中一个是它们在带电空间内的行为不同. 前面讲过，基本粒子在带电空间的行为，可以用假想的“陀螺”来表示. 相互作用可以看做是作用于这些陀螺上的外力.

在陀螺的比喻中，强相互作用相当于一种外力，不干扰参加相互作用的基本粒子各自的旋转状态. 也就是说，强相互作用是带电空间内不产生偏向的外力，所谓产生偏向就是在带电空间内选择特定方向，只对适合这种状态的基本粒子施加较强的作用. 在这种意义上，强相互作用是各向同性的，这种性质称为电荷独立性. 在原子核内质子和中子之间的作用力，和质子与质子以及中子与中子之间的作用力大体相等，这就是电荷独立性的表现.

但是，电磁相互作用与此不同，基本粒子的陀螺似的旋转运动，由于受到电磁相互作用，除特定方向外，都要受到干扰. 反过来说，电磁相互作用只能在特定方向起着选择基本粒子的作用，它的标准是电荷. 可以说，电磁相互作用是基本粒子绕特定轴旋转时保持轴对称性的外力.

弱相互作用可以看成是最强烈地干扰陀螺旋转的外力. 粒子的旋转受到这种外力干扰的方式是十分奇妙的，它只能区别出具有特别同位旋状态的基本粒子，这些粒子的死亡好象是采取了特殊方式. 弱相互作用把带电空间的各向同性和轴对称性都破坏了.

三种相互作用在带电空间内有明显不同，但是在实际空间内是否也有什么不同呢？ 在很长时间内，谁也没有注意到在实际空间内也有不同． 然而，基本粒子的死亡告诉了我们这一件值得惊异的事实．

2.8 宇称不守恒

考察基本粒子的死亡发现，一种基本粒子有许多种死亡方式．例如，带电的K介子有六种不同的死亡方式． 在第二代基本粒子出现以前，人们认为一种基本粒子只有一种死亡方式．因此，在发现新粒子的当时，曾按照衰变类型设想了不同的基本粒子．例如，按照K介子的六种死亡方式设想了Θ、T、T'、K、K-μ、K-β六种基本粒子．随着实际例子的增多和分析的精密化，逐渐地发现了这六种基本粒子的质量和寿命是一样的．显然这看来是同一犯人的犯罪行为．把这六种基本粒子看成是一种，而有六种死亡方式似乎更好一些．但是问题并不是这样简单．

基本粒子还有一种必须考虑的性质，叫做宇称，也叫偶奇性．这是表示物体和它在镜子里的映象是否和实物相同的一个量．镜子里的映象和实物完全一致时，称为“偶”宇称，左右相反和原来形状不同时，称为“奇”宇称． 基本粒子随着种类不同而具有偶或奇的宇称．自然现象如果是左右对称的，因镜子里的世界也存在于现实里，即使各个粒子的形状有改变，但作为全体现象仍是不变的． 也就是说，反应对宇称没有干扰，这种看法代表了多数人的意见． 然而，称为T的基本粒子能衰变为三个π介子，称为Θ的基本粒子能衰变为二个π介子．因为π介子的宇称是奇，如果宇称在这些反应中不受干扰，T的宇称应是奇，Θ应当是偶． 因粒子具有确定的偶奇性，就不能把两者都看成同一粒子；那么，T'和Θ为什么又具有相同的

质量和寿命呢？

埋头研究“T-Θ之谜”的是两位美籍中国物理学家李政道和杨振宁．他们认为，如果T和Θ是不同的基本粒子，为什么又具有相同的质量和寿命呢？他们曾经探索过这个问题的解答，但一直没有得到满意的结果．然而，他们终于在第二代基本粒子大体完全出现的1956年注意到了一个重大问题．他们认为T、Θ之谜所以不能解决，可能是因为作为这个问题的大前提，即认为自然界总是宇称守恒的想法是错误的，在衰变这一类较少发生的现象中，宇称可能是不守恒的．他们以弱相互作用的β衰变为例进行了验证．如果这种想法是正确的，在原子核的β衰变中，电子在原子核的自旋方向和在相反方向应以不同方式出现．这种判断的正确性立即由吴健雄证实了．接着又用各种衰变现象进行了验证，结果都符合他们的预想．关于强相互作用和电磁相互作用，正象他们所预想的那样，没有找到任何一个宇称不守恒的证据．在实际空间内，弱相互作用和其他相互作用也有明显的不同．

但是，问题并没有就此结束．如果承认空间的左右对称性不成立，即宇称不守恒，那末时间的前后对称性即可逆性也要不成立，或者是正、负电荷交换的对称性不成立，两者之中必定有一种是不成立的．反过来说，或者只是正、负电荷交换的对称性成立，或者只是时间的可逆性成立，这样一种不严格的规律是可以保证的．如果把镜象操作、时间反演操作和参加的基本粒子的电荷（正确地说粒子和反粒子）的反转操作继续进行下去，将表示完全相同的现象，因此，同时考虑三者的对称性也必然成立．在强相互作用和电磁相互作用中，三种对称性都成立．在弱相互作用中，左右对称性不成立，即宇称不守恒，这时应当还有一种对称性不成立，而另一种对称性成立．于是出现这样的问题：这两种对称性哪一种成立？哪一种

表 7　空间性质在相互作用中的改变

空间 \ 相互作用		强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用
带电空间	各向同性	○	×	×
	轴对称性	○	○	×
实际空间	宇称	○	○	×(××)
	时间可逆性	○	○	○(××)
	电荷对称性	○	○	×(○○)
	几何学对称性	○	○	○

不成立呢？观察正 μ 介子在衰变时放出的正电子和负 μ 介子在衰变时放出的电子的性质，就可以知道两者有明显的不同．这是电荷交换的对称性不成立，而时间的可逆性成立的证据．这个结果也被其他许多现象证实了．关于弱相互作用，可以得出这样的结论：时间的可逆性成立，而空间的左右对称性(即宇称)和电荷交换对称性都不成立．但是，1964 年，通过观察中性 K 介子的死亡，又得出了奇妙的结果，就是时间的可逆性也不成立了，虽然在这种情况下，这是非常少的．于是可以说，对称性的不成立是以各种不同的组合出现的．为什么会发生这样复杂的情况呢？对于这个问题还没有得到满意的回答．基本粒子在面临死亡时还给我们留下很多难于解决的问题．

3. 基本粒子的性格

3.1　基本粒子也有结构

基本粒子的研究并不只是为了发现新的基本粒子和探索新的现象，而是通过这些研究，了解基本粒子是什么，弄清基本粒子的图象，揭示出隐藏在它们背后的自然界的根本规律，

这是研究基本粒子的最终目的.从这种意义来说,由基本粒子间的相互作用产生的自然界的复杂性，需要还原成基本粒子本身的问题,才能理解．正因为这样,基本粒子的研究者始终一贯地把基本粒子的结构作为主要研究的问题.

但是,谈到基本粒子的结构,意义是很复杂的．不能简单地说基本粒子就是由什么,以什么样方式构成的,这样简单的论法不能解决任何问题．在原子结构的问题上也出现过这种情况．根据卢瑟福的原子模型，氢原子是由质子和电子构成的,电子围绕着质子沿圆轨道旋转．但是,如果把这个模型用量子力学重新考虑,情况就完全不同了.不能认为电子的状态有明确的轨道，必须用它存在于质子附近某一点的几率来描述．于是,可以想象质子是被电子云包围着,这种电子云在某一点的密集程度与电子存在于该点的几率成正比．这种想法比卢瑟福的模型正确得多.虽说是电子云,也并不是把电子加以粉碎布撒而成的云,电子是一个基本粒子,它确实存在于质子附近的某一点，只是我们不能确实地说出这一点而已．因此,考虑原子的结构时必须把电子位置的测不准性考虑在内.原子核是由质子和中子构成的，最简单地考虑时，也要设想质子云或中子云．再进一步,在基本粒子的世界里,即使只考虑一个质子或一个中子,也要设想在它们周围有云形成.

质子和中子因为互相交换 π 介子或其他粒子互相吸引而形成原子核．如果是这样,就可以认为在原子核内,除核子外还存在各种基本粒子．但是,这种情况和原子中的电子不同,这些基本粒子潜伏在原子核内，在外表上是看不见的．一个核子单独存在时,也可以这样考虑．例如,质子时常放出正介子,变为中子，放出的介子在中子周围转来转去，如果不遇到其他核子,介子又会回到原来的核子内,结果中子又还原为质子，正介子消失．这样的现象不断地重复，从较长时间来考

虑，就在质子周围形成了正介子云，在质子原来所在的位置，出现质子还是出现中子，是完全不清楚的．也就是说，质子的电荷并不完全集中在质子原来所占的空间范围，而是有一部分分布在质子周围的介子云中，其余部分存在于原来的空间范围．

可以预想，这样的形象至少从定性方面来说是正确的，而且也已得到了实验证明．

3.2 核子的电磁结构

如上所述，质子的电荷能够扩展到根据介子云图象推测出的范围，这一事实已由斯坦福大学的玻福斯塔等人进行的高能电子被质子散射的实验所证明．关于质子的电荷分布，已经在1956年前后有了结论，它是从中心起平均扩展到十万亿分之一厘米的范围（正确地说，是 0.8×10^{-13} 厘米）．这个问题是很容易理解的．质子放出正介子变成中子所需要的能量至少相当于 π 介子的质量，即一亿四千万电子伏特（140兆电子伏）．对于具有这样大能量的状态来说，由于和原来质子的状态混在一起，必须承认能量有这样程度的测不准性．根据量子力学的测不准原理知道，这时的时间测不准性为一万亿分之一的一千亿分之一秒（10^{-23}秒）左右．在这段时间内发生的介子，即使以近于光速的速度运动，也要在离原子核的十万亿分之一厘米（10^{-13}厘米）的地点返回．这就是说，介子云有这样大的扩展范围．

由于实验的进展，不仅知道了质子的电荷分布，而且也知道了它的磁矩分布．如果进一步考察中子的电荷分布和磁矩分布，只用这样简单的形象来理解，就会出现许多不能说明的问题．

首先是磁矩分布的问题，这个问题采用 π 介子云的图象

大体可以理解. 质子的自旋为 1/2, 由于它具有电荷,所以本来就有磁矩,而中子没有这样的磁矩.然而,根据实测结果,质子磁矩是原来的 2.8 倍,而中子的磁矩是负的, 是质子原有磁矩的 1.9 倍左右. 关于这种差异的存在, 介子理论早有了预言, 它是介子云在核子周围运动时产生的多余磁矩. 如果质子放出的正 π 介子具有 1.8 倍的多余磁矩, 中子放出的负 π 介子也应当有大小相等、符号相反的磁矩. 如果磁矩可以用 π 介子云来说明, 磁矩分布的范围应当是 π 介子云扩展的范围. 实测的质子和中子的扩展范围, 都是十万亿分之一厘米 (0.8×10^{-13}厘米),这和预言符合.

但是,中子的电荷分布几乎没有扩展, 也就是说, 到哪里都是中性的, 这是一个出乎意外的结果. 看来好象是当然的结论,但是按照上述想法,却是出乎意外的结果. 如果 π 介子云的图象是正确的,中子周围也应当有负 π 介子云, 因此, 即使全体是中性的,电荷的分布范围也可以和质子相同. 但是, 实验结果完全不符合这种图象.

可以认为,中子的电荷分布所以为零,是因为存在的正电荷分布把负电荷分布抵消了的缘故. 用前面的图象来说明, 在中子周围既然形成了负 π 介子云, 同时也必须形成同样的正 π 介子云. 这种情况和形成了兼备正、负 π 介子作用的另一种介子云一样, 这种介子云至少对中子是重要的. 如果采用这种想法, 质子的电荷分布和磁矩分布以及中子的磁矩分布,就很难于说明了.

解决这个难题的启发, 来自于第三代基本粒子, 特别是 ρ、Ω、Ψ 这些自旋为 1 的介子的共振态. Ω 和 Ψ 在质子和中子的周围形成同样的云, 但 ρ 在质子和中子周围形成效果相反的云. 结果可能在质子周围,这三种云互相协调,而在中子周围则互相牵制.对于核子的电磁结构,起主要作用的是共振

态形成的云，而不是介子云.

然而，问题并没有完全解决. 因为介子有很多种共振态，没有理由只着眼于这三种共振态，而且越接近中心，现象越复杂. 关于核子的电磁结构的实验，虽然已经进行到高能范围，但是关于核子周围的各种介子云，还有一些不明了之处.核子和它周围的介子云，是由于各种基本粒子云的高度集中而形成的核心，还是核子本身就具有这样大小，这些都还没有确定的答案.

3.3 核子间的作用力

由核子的电磁结构知道，即使只着眼于一个基本粒子，看来也需要考虑较为复杂的图象. 核子具有介子云，这种图象本来是为了说明核力而提出的，正确与否当然要由考察核力的结果来判断. 在了解核子的电磁结构以前，对核力的研究曾经设想过同样的图象.作用于两个核子间的介子云宽度，是电磁结构给出的二倍左右(约为 1.4×10^{-13}厘米). 在低能现象中，由于能量较低，基本粒子不能相互十分接近，因此起主要作用的是基本粒子周围的介子云的外面部分. 所以，根据介子云可以简单地理解扩展范围较大的核力.

但是，例如研究简单的原子核（主要是氘核）或低能的核子碰撞时，只要假定核力是满足一定关系的某种形式的作用力，就能够说明核力的大部分现象. 但这种情况既不能说是优点，也不能说是缺点. 因此，为了弄清基本粒子的图象，必须考虑高能现象，即深入到基本粒子内部. 这样不仅要考虑核子周围的π介子云，而且还要考虑在电磁结构中出现的基本粒子的共振态以及K介子等各种基本粒子的云，这样问题就复杂得多了.关于核力问题，用什么方针进行研究才能取得进展，武谷三男、中村诚太郎、佐佐本宗雄于 1951 年提出了一

项确定的方法，从而使和基本粒子图象有直接联系的核力的探讨，逐渐地走上了正轨.

武谷等人研究核力的方针是：首先对照着高能现象实验的发展，分成几个阶段设想基本粒子的图象，再根据核力分析加以验证. 在离开核子中心较远的外侧，大部分是π介子云，在低能现象中，π介子云起主要作用，所以只分析低能现象，就能够确定π介子云的性质. 但是，在接近核子中心部分时，同时出现许多π介子云，或者出现K介子以及基本粒子的共振态等等，因而形成复杂的云. 更接近于中心部分时出现更密集的云以及核子本来的大小. 对于这一部分，也许现有理论已不能应用了，即使能够应用，也不一定能够得到满意的回答. 把这些情况都考虑在内，假定在核子中心部分存在着硬核心，看来比较接近实际. 按照这些图象分析高能现象，再对应着分析结果了解核子的形态，这就是武谷等采取的方针.

日本的核力研究人员按照这一方针，分析了能量高达数亿电子伏的现象，确定了在核子最外侧是π介子云起主要作用，在中间部分是π介子的各种力学效应以及重介子和介子的共振态云起主要作用. 并且得到了在核子中心附近确实有硬核心存在的结论. 核力的研究成果比核子电磁结构的研究先走了一步. 特别是在三亿电子伏(300兆电子伏)以上的高能核子的碰撞现象中，π介子不仅是潜在的云，而且实际上发射出来，因此使情况更复杂化了. 把这些都看作为吸收效应来分析能量更高的现象，一直到十亿电子伏(1千兆电子伏)都发现有硬核心存在.

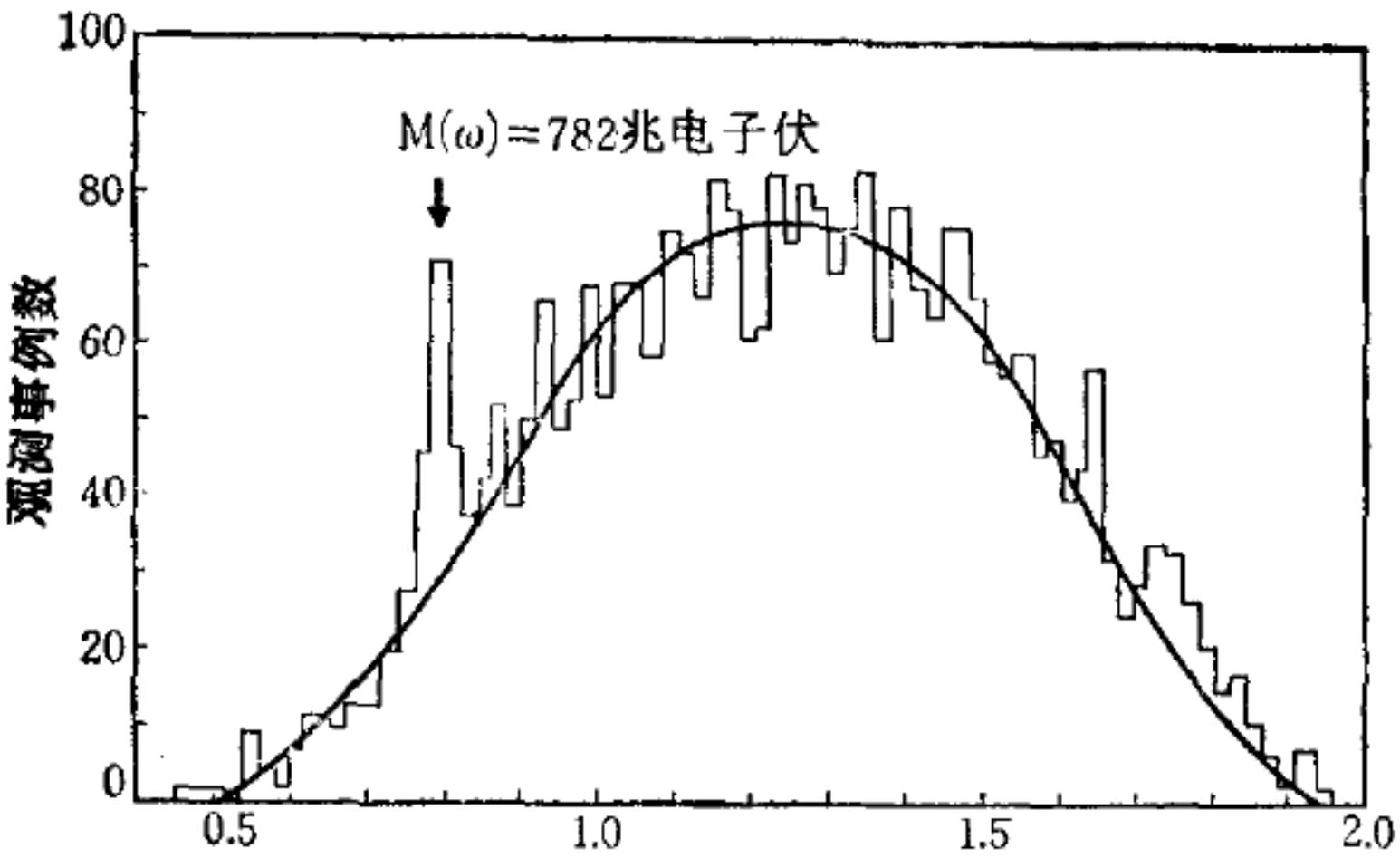
但是，问题还没有就此结束. 由于大型加速器的出现，可以一举看到一百亿电子伏(10千兆电子伏)的碰撞现象. 令人惊异的是，分析实际结果，过去一直认为存在的硬核心现在看不见了，也许硬核心溶化了. 于是引起了一种议论，认为在某

种情况下，硬核心也可能溶化．但是，硬核心是不是真的溶化了，并不能完全确定．这里所说的硬核心，是具有介子云扩展范围的十分之一(10^{-14}厘米)的核心．即使假定硬核心真的溶化了，它也不能不具有核子原来大小．但是不管怎样，这是关于基本粒子图象的重大问题．在基本粒子最深处，也许存在着更为复杂的结构．

3.4 基本粒子的共振态

验证基本粒子图象的第三种方法，是使各种介子直接和核子碰撞，并研究碰撞结果．自从能用大型加速器产生π介子以后，这种研究就开始了．正象前面已谈过的，由此偶然发现了第三代基本粒子，即基本粒子的共振态．

发现共振态有各种方法，最简单的一种是研究多大能量的介子和核子碰撞的几率最大，并且找出极大值的位置．核子共振态的质量由碰撞的总能量决定，自旋由极值决定，而同位旋和奇异数可以根据碰撞后产生的粒子决定．更正确的方法是把碰撞的π介子看成波动，考察因碰撞而产生的相位改变和能量的关系．这种相位改变随碰撞能量而增大，在产生共振态的能量下，相位差达到九十度，由此能够发现用前面方法不能识别的共振态．因为不能进行使介子和介子碰撞的实验，所以发现介子的共振态需要采用特别的方法．把介子和核子或者反核子和核子碰撞产生的介子，取其中两个或三个介子为一特别组，求出它们在质心系内的能量．因为基本粒子的反应遵守几率法则，把相同的事例搜集得多一些，再考察在多大能量下发生的几率最大．当然分布状况和普通统计法则一样，成为一条平滑曲线．如果分布异常地集中于某一部分，就可以推定发生了相当于这特定能量的质量的共振态（图 20）．据报道，用这种方法目前已经发现了二百三十多种共振态，以



由 $P+\bar{P}\to 2\pi^+ + 2\pi^- + \pi^0$ 决定
$\omega\to\pi^+ + \pi^- + \pi^0$ 的事例

图 20　决定ω介子的事例

后可能还会增加(见表 8，详细情况参考本书后面的基本粒子一览表)。

基本粒子的共振态和基本粒子并没有多大差异。共振态看来好象是一种基本粒子和另一种基本粒子组合而成的状态，也许可以认为它们不是基本粒子。例如，核子的共振态，看来好象是核子和π介子组合而成的状态。但是，核子本来就具有π介子云，认为它和π介子重新组合成了别的基本粒子，这是没有意义的。质子被负π介子云包围成为中子，中子被正π介子云包围成为质子；同样，核子被大量的π介子云包围，就成为核子的共振态，因此，可以认为，共振态和基本粒子之间没有本质上的差异。这种想法在提出介子理论之后不久，就由温策尔和朝永提出了。基本粒子共振态的发现具体地说明了这个问题。

如果完全采用前面所说的图象，认为基本粒子甲被基本粒子乙的云包围，就成为基本粒子丙，那么就可以认为所有的基本粒子，包括共振态在内，都是平等的。因此，丘(Chew)提

表 8　主要基本粒子的共振态

年　代	名　称	现　象
1954	$\Delta(1236)$	π 介子和质子碰撞
	N(1518)	同上
	N(1688)	同上
1961	ρ	同上
	ω	质子和反质子碰撞
	K*	K 介子和质子碰撞
	$\Sigma(1385)$	同上
1962	$\Lambda(1405)$	同上
	$\Lambda(1815)$	同上
	$\Xi(1530)$	同上
1963	$\Lambda(1520)$	同上
	$\Sigma(1660)$	同上
	f	π 介子和质子碰撞
	B	同上
1964	Ω^-	衰变
	X^0	K 介子和质子碰撞
	A_2	π 介子和质子碰撞
	A_1	同上

出了基本粒子相互选择对象而各自存在的想法．关于这个问题在第三部分还要谈到，这也是通过共振态所了解到的基本粒子的一个侧面．

3.5　基本粒子反应的分析

发现了基本粒子的共振态之后，就可以相当详细地分析基本粒子的反应．我们知道，基本粒子反应并不是在任何情况下都能进行的，而是在适当能量附近集中地进行．实际上，在 π 介子和核子的碰撞中，质量为一百二十亿电子伏（1,236 兆电子伏）的共振态，即所谓第一共振态的效应，比其他共振态大得多．这表明，可以认为 π 介子和核子大部分变为这种

状态之后，再分开为为各种基本粒子． 为了更严密地说明这一问题，也可以考虑成为其他共振态的可能性．

从 1955 年起，人们想出了巧妙地利用这种现象的方法．这也是光学中一直使用的方法，是由下述两个要求构成的．一是发生现象的总几率永远是 1，二是研究的现象一定遵守因果关系．前者给出了总碰撞几率和在前方方向吸收率的关系，即所谓光学定理的关系； 由后一要求可以推导出把折射率和吸收率结合起来的色散关系．把这种方法应用于基本粒子的碰撞现象，如果知道了总碰撞几率，就可以知道散射现象前方方向附近的波的状况． 如果知道了波的状况，就能决定基本粒子间在散射现象中相互作用的强度．由这些分析查明了 π 介子和核子的强相互作用强度，恰好是产生核子共振态需要的能量．

在低能量下查明的介子云，加上适当能量的介子后，就有了变成激发态的能力，这个结论只适用于几亿电子伏（<1 千兆电子伏）的低能现象．我们已经知道，如果能够进行几十亿以至几百亿电子伏（6—20 千兆电子伏）的高能实验，这时见到的现象将有很大的不同，以前见到的一些共振态，这时几乎都不出现了． 以前碰撞比率大体随着能量增高而减小，但是再提高能量时，碰撞比率既不减小也不增大了（图 21）．

高能碰撞包含着各种过程， 其中有碰撞后的基本粒子和碰撞前的基本粒子相同的，这即是弹性散射；也有碰撞之后粒子之间相互交换电荷的，这即是电荷交换散射；此外还有放出多余 π 介子的反应；所以，能量越高，碰撞现象的内容越丰富，而且越复杂．产生的多余 π 介子数也随着能量增高而增多，因此，即使各个反应的比率随着能量增高而减小，但总的碰撞比率却保持一定．可以认为，这是由于这种新反应继续发生的缘故． 但是，经过详细讨论知道，电荷交换散射和预想的一样，

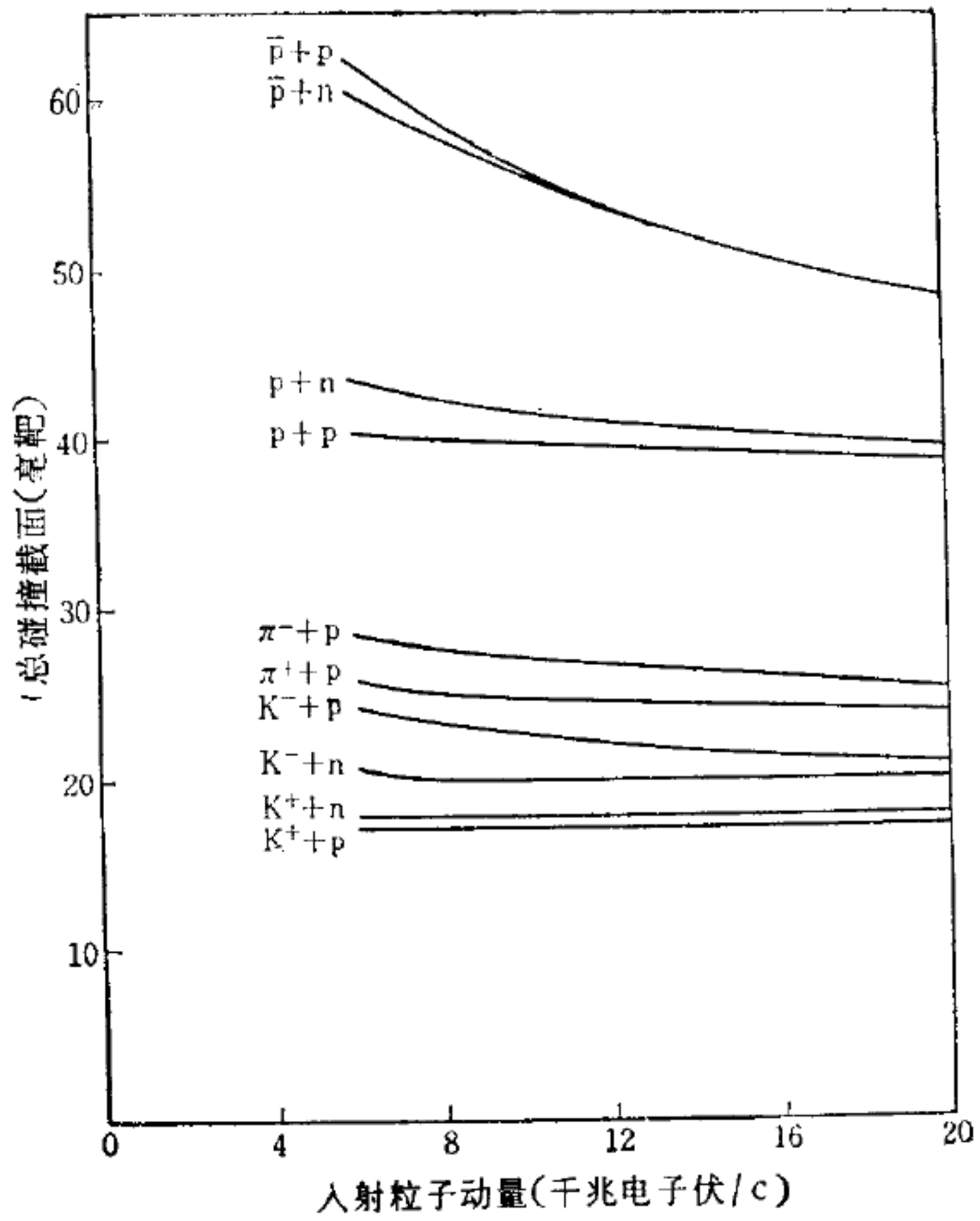


图21　高能基本粒子的碰撞

其碰撞比率随着能量增高而减小;但是,只有弹性散射不是这样,能量增高时散射比率仍然保持一定,这和预想的不一致.

基本粒子的共振态,当它的质量增大时,由于复杂云的作用,自旋值也有增大的倾向. 共振峰的高度大体和自旋的平方成反比,因此,在高能碰撞中,即使有共振态能出现,由于它的峰太低,就全体来说,可能看不到凹凸不平的现象了. 因为共振态的特征消失了,好象有理由认为基本粒子间的相互作用就是弹性散射. 但是,这也不能说明电荷交换散射比率减少的原因. 为了进一步详细分析,把角度缩小而考虑碰撞比率,则向前方向和向后方向散射的比例非常大,而且粒子在其

他方向射出来的情况很复杂，比例减少的方式是参差不齐的．这样微妙的特征，用普通的相互作用的简单见解是怎么也不能理解的．因此，可以想到，在高能下介子云可能还有其他的作用．

3.6 雷吉假说

为了说明基本粒子在高能下相互作用的机制，雷吉于1959年提出了一个假说．一般认为基本粒子发生相互作用时，一个基本粒子加入对方的云内组合起来，成为另一个基本粒子，从而成为共振态，这时自旋当然取整数或半整数值．在实际现象中也完全是这样，没有例外．但是不能以此为根据，立即认为在一个基本粒子周围形成云的其他基本粒子，也都具有整数或半整数值的自旋．基本粒子的自旋，只有当它成为被观测到的能量即质量时，才可以取整数或半整数值，在其他能量情况下，可以不是这样．在这种情况下，自旋既没有必要是整数或半整数值，也没有必要是实数．在高能现象中，因为看不到基本粒子之间发生共振态，于是他认为，只有整数或半整数值以外的自旋效应，也就是说，只有基本粒子在成为云时显示出的性质才是有作用的．雷吉所举的例子都是很简单的，是否能适用于实际现象，还没有明确的根据，但是作为一个假说是很有力的，引起了很多人的注意，而且进行了各种分析．

雷吉假说的数学表示是很复杂的，这里只作直观的解释．在数亿电子伏（<1千兆电子伏）的低能反应中，相互碰撞的基本粒子组合起来形成共振态．但是，在几十亿以至几百亿电子伏（6—20千兆电子伏）或更高能量下，碰撞粒子没有机会组合起来，只是在对方周围互相交换某种粒子云而已．但是，这和能量很低的情况不同，现在是离中心很近的云也能进

行交换．这种云的本质是在中间能量下出现的共振态．在这种情况下，共振态的自旋值并不限于单独观测到的值，它们随着能量也即是随着碰撞粒子之间的动量交换而改变．

碰撞比率和能量的关系，大体由自旋值最大的交换云决定．考虑到自旋值的变化，云内存在的基本粒子的各种共振态中，其中有一种共振态的自旋值的实数部分永远为最大，于是这种共振态就决定着整个碰撞比率．即使能量提高，碰撞比率仍然保持一定，根据这一事实，就能够决定交换云的最大自旋值．但是，当能量恰好为零时，这种云取整数 1 的自旋值．因此，这种云好象是一种基本粒子，称之为坡密子*．根据这种想法，具有整数或半整数自旋值的是实际的基本粒子；坡密子除了自旋以外不具有其他任何性质，从这一点来看，它又不象基本粒子了，总之，它是一种很奇妙的物质．但是，考虑坡密子云的交换，就能够圆满地说明弹性散射和电荷交换散射的差别．电荷交换散射和弹性散射不同，在电荷交换散射中，电荷必须同时交换，因此，坡密子云就不能交换了，为此，必须交换自旋值更小的云，所以可以认为，碰撞比率随着能量变化很快

---

* 1958 年坡密兰秋克、梅德维德夫、希尔科夫、宫泽分别预言，在高能极限下，粒子和反粒子对共同靶的总截面相等．这一预言最初由坡密兰秋克予以证明，称为坡密兰秋克定理．但是，只根据公理性场论导出的散射振幅的基本性质，是不可能证明它的，目前也尚未由实验证实．1961 年，丘和弗劳希为了建立自动满足坡密兰秋克定理及其相关定理的雷吉极点理论，对复角动量平面引入了一种特异物质，称之为坡密子 (Pomeron)．坡密子和通常的雷吉极点不同，具有真空量子数，表示散射振幅的几何特性．这种属性近年来已作为哈拉里、弗雷德假说接受下来，指出了阐明坡密子的力学性质和解析性问题归结为阐明么正条件的饱和性．坡密子问题尽管属性单纯，但从一开始就在雷吉理论中占据了特殊位置．关于坡密子生成机制的典型模型，有液滴模型、QED 模型、多重雷吉模型、自洽模型等等，但它们都是相互补充的，有待于在高能领域内积累多重发生的实验数据和建立能够分析这些实验数据的统一力学模型（译者摘译自日本培风馆出版的《现代物理用语》）．

地减少.

在使用坡密子上还有很多问题. 从提高能量后碰撞比率仍保持一定这一事实来说，能量提高后不碰撞而通过的比率增大了,结果不是碰撞靶变稀了,变成交换真空那样的坡密子云的情况,而是必须认为靶在逐渐变大,以便保持碰撞比率一定. 这样向前散射的比率相对地变大，因而碰撞比率从最大值减小的方式是,能量越高,减小越快. 这个结论对于查明坡密子的存在是很有意义的. 有人曾研究了各种反应，但是遗憾的是,在这些反应中并没有见到这样的共同事实.

3.7 基本粒子的关联性

由雷吉假说导出的自旋值随能量的变化，当自旋值取整数或半整数时,应对应于实际基本粒子的质量,这一点是可以验证的. 某种特定云的自旋值的变化方式，可以根据多数基本粒子来了解，这些基本粒子除自旋、能量即质量以外，还需要具备其他条件.如果假定自旋值随着能量改变而连续变化，而且当自旋取整数或半整数值时成为实在的基本粒子，就可以把这些自旋值画成连续曲线. 自旋值的这种连续曲线叫雷吉轨迹. 可以认为,在这轨迹上出现的基本粒子,都是由同一根源产生的,这就是雷吉假说的见解.

如果用横轴表示质量的平方，纵轴表示自旋值(实数部分)，根据测得的数据画出轨迹，就得到令人惊异的一些简单的直线(图 22)，而且这些直线几乎都具有相同的斜率. 这就是说,自旋值与能量的平方成正比.这一事实一定有很深的理由,将在第三部分中论述. 可以认为,在碰撞现象中起主要作用的,不是各个基本粒子所形成的云,而是支配它们的某种共同的基本因素，这里姑且把这种因素用简单的轨迹语言来表示. 如果决定了轨迹,就能预测轨迹上将要出现的基本粒子.

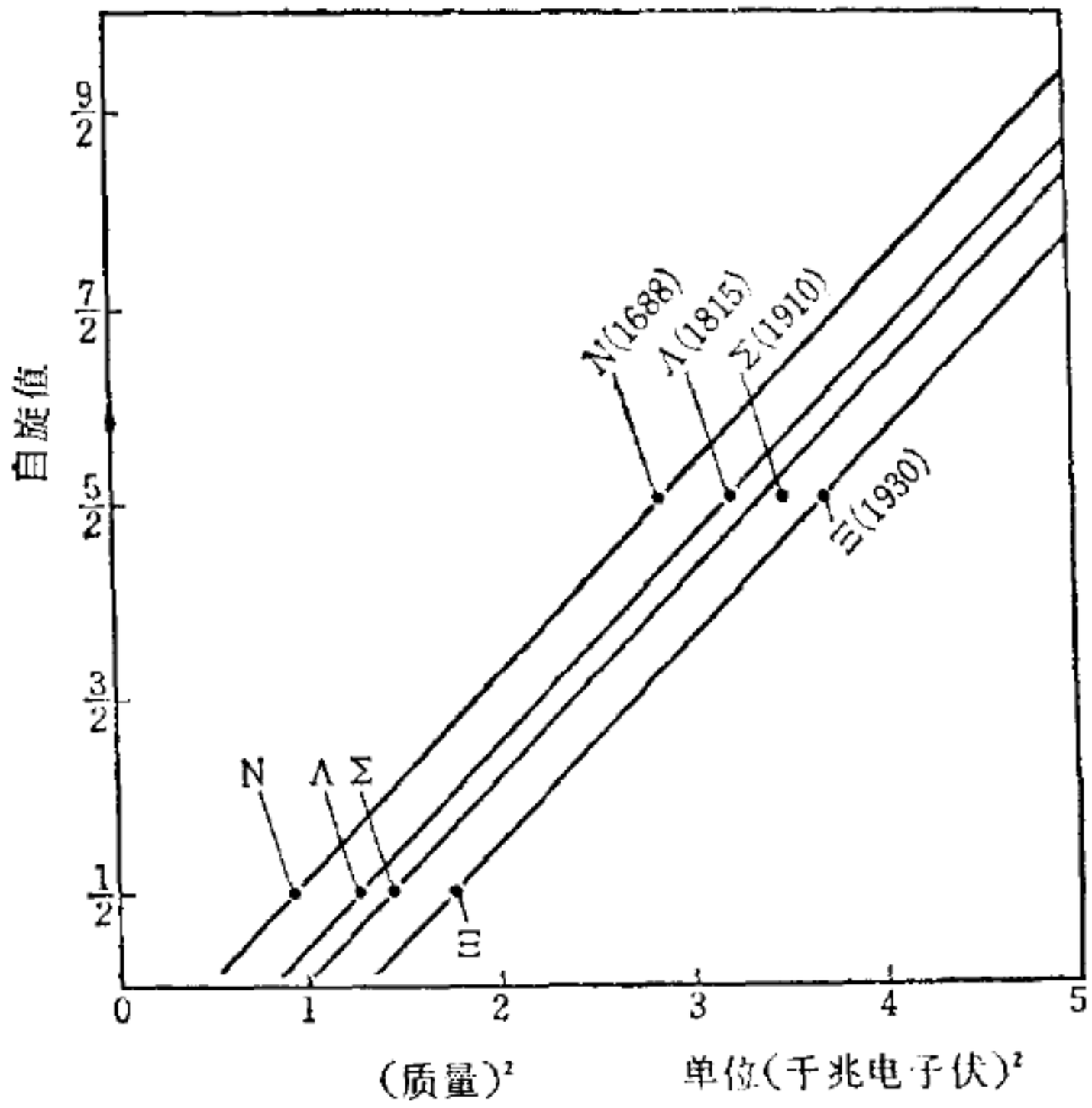


图22　基本粒子的雷吉轨迹

关于介子族，由于观测到的事例很少，所以不能从观测到的基本粒子来决定轨迹．然而，根据分析许多碰撞现象的结果，可以推测出一部分轨迹．弹性碰撞的碰撞比率与能量无关，是一定的，其原因曾经认为是由于坡密子云的交换，但这种想法也有一定困难．由于发现了自旋值为 2 的 f 介子，在某种程度上迴避了这种困难．因为 f 介子和坡密子云可以在同一轨迹上，所以不用假定坡密子云，而可以用 f 介子作轨迹的代表．但是，如果考虑实现 f 介子的轨迹，在碰撞现象中能成为交换云的所有介子的轨迹，例如，f'、A_2、ρ 介子的轨迹，就应当同样地包括在内．这些基本粒子在一种碰撞现象和另一种碰撞现象中所起的作用不一定都相同．利用这样的事实，可以由实际反应反过来决定轨迹（图 23）．目前已经决定的轨迹只有 图 23 中的几条．从某种意义来说，决定轨迹和决定

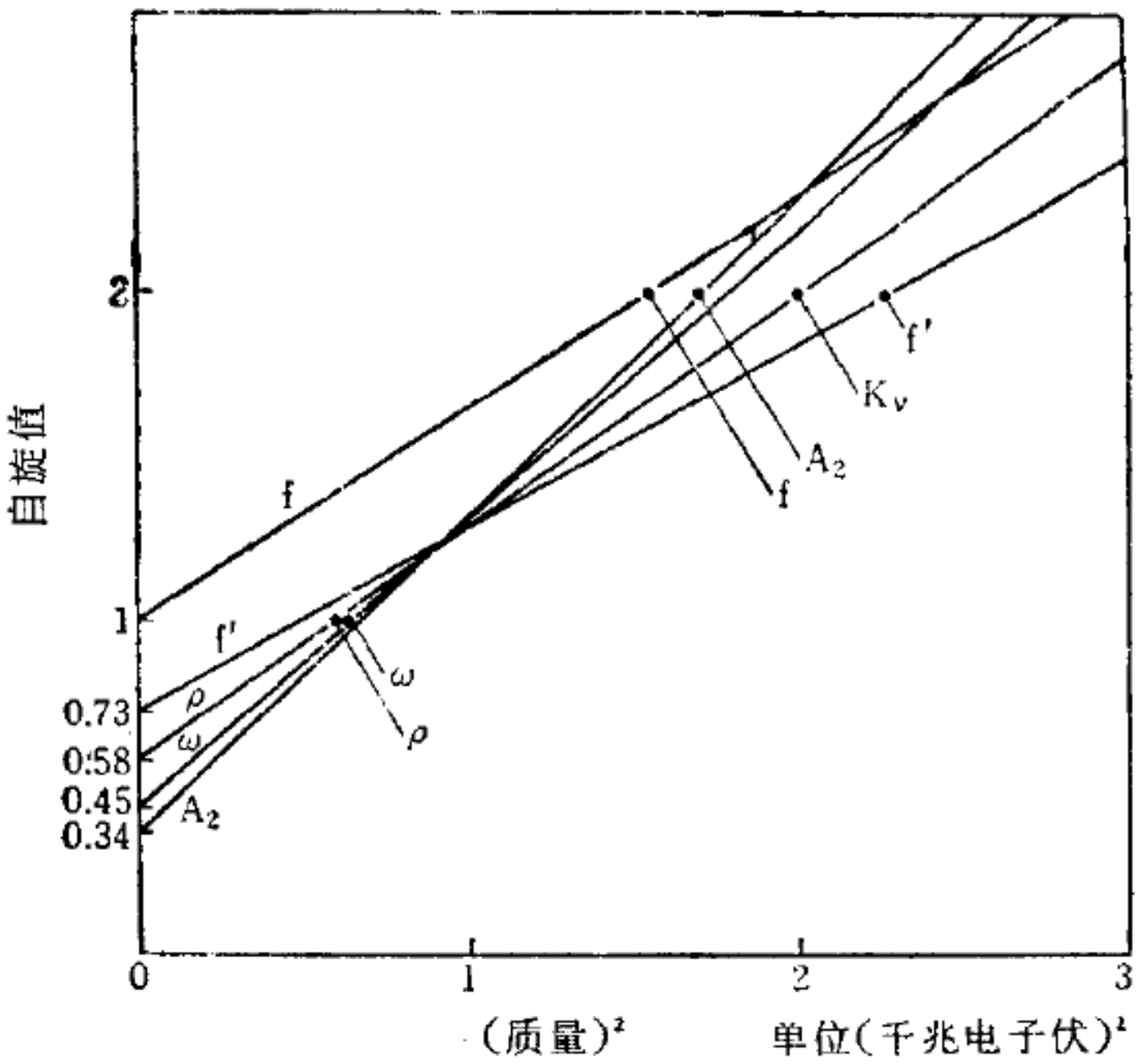


图 23　根据碰撞现象设想的雷吉轨迹

基本粒子有同样的意义,因此,这种探索方法将来可能会继续下去.

我们已经知道，基本粒子云比形成它的各种不同的基本粒子具有更一般的统一性格,所以,几十亿以至几百亿电子伏的高能碰撞现象，所包含的内容远比我们所看到的要丰富得多．因此,可以从这样的一般立场重新认识能量较低的现象．在这方面目前已经获得了一些成果.

但是，用现有加速器达到的能量来认识基本粒子的全部图象还是不够的．在这样的能量范围内已查明的，只是基本粒子中心附近的云的状况． 根据雷吉假说，认为基本粒子既没有核心,也没有本来大小．如果不考虑这样的因素,就不能理解这一假说． 对于能量更高的范围内的情况，目前还有很多不明了的问题.

3.8 由衰变现象探索基本粒子的图象

到此为止,我们从三个方向探索了基本粒子的图象,一个方向是研究基本粒子的电磁性质,其他两个方向是研究强相互作用产生的现象.第四个线索是研究基本粒子的衰变现象.

衰变现象是由弱相互作用引起的,它的优点是比较慢,容易得到比较精确的结果. 但是,反过来说,也成为麻烦的问题,如果不进行定量的研究,几乎就得不到明确的结论. 因此,经过长期的努力,才得到几件在了解基本粒子图象方面有力的线索.

如果详细分析 β 衰变现象,就可以知道,弱相互作用和电磁相互作用的强度虽有显著不同,但是两者的性质却非常相似. 所谓电磁相互作用,就是带电物体运动时产生的电流变化所引起的辐射或吸收电磁波的现象. 在弱相互作用中,例如在 β 衰变中,中子变为质子,放出由电子和反中微子组成的轻粒子对. 看来两者好象相差很多,但是在 β 衰变现象中,如果把中子变为质子的部分看作电流,把轻粒子对看作电磁波,就可以和电磁相互作用一样进行讨论. 如果把质子本身看作电流,就可以把电流看作是质子变为质子的过程,所以这种类比性是妥当的.

质子和中子可以看成是核子在带电空间内的不同状态,因此,如果把质子变为质子形成电流的想法加以推广,就可以得到核子变为核子也形成另一种流的结论. 作为其中的一部分,质子变为质子形成电流和中子变为质子形成另一种流,应当具有同样的地位. 这种想法看来好象有些奇怪. 在电流中电荷是守恒的,而在中子变为质子形成的电流中不是这样. 但是,就基本粒子来说,因为中子不断地变为质子,质子也不断地变为中子,所以质子和中子实际上没有什么明确的差别.

事实上，在强相互作用现象中，是完全没有差别的． 在质子流中，电荷是守恒的，在中子变为质子形成的流中，相当于电荷的另一种量应当是守恒的．

这样的预想利用核子周围的介子云图象很容易验证．中子变为质子时，中子周围的介子云也必须同时变为质子周围的介子云． 在中子周围有负 π 介子云和中性 π 介子云，在质子周围有中性 π 介子云和正 π 介子云，因此，中子放出负 π 介子成为质子． 为了使这个质子变为中子而形成流，负 π 介子云必须变为中性介子云，否则就不合算了．同样，中子周围的中性 π 介子云也变为正 π 介子云．中子变为质子时所发生的 β 衰变，也可以看做是这些粒子周围的负 π 介子云变为中性介子云放出了轻粒子的现象． 如果存在某种守恒定律，中子变为质子的比率和它们的负 π 介子由负变为中性的比率必须是相等的．因此，从没有成为云的 π 介子来说，在由负变为中性的过程中放出轻粒子的现象，其比率和 β 衰变的比率相同．实际情况也完全是这样．总之，可以说，和电磁相互作用的电流相似的某种守恒量的流，在弱相互作用中也是起重要作用的．

如上所述，考虑流这个量，当核子变为核子时，在核子周围的介子云如何变化，便可以从某种守恒定律决定，这是很便利之处． 另一方面，一种介子和核子反应变为另一种介子的方式，可以由碰撞现象知道，因此，把云中的介子所能取的各种能量的情况综合起来，就能够沿着相反途径决定核子变为核子时形成的流的总量．

在 β 衰变中，有宇称守恒的相互作用，也有宇称不守恒的相互作用；两者的比率曾经预想是 1 比 1． 和其他衰变现象比较，这是共同的结论．但是实测结果相差百分之二十左右．这是什么原因，很长时间没有找到满意解释．然而，利用流的

概念，可以把这个差异由 π 介子和核子碰撞的比率推导出来，所得结果也恰符合百分之二十.

由以上论述，可以知道，基本粒子的图象是很复杂的，还需进一步探索其真象. 然而，这里所讲的流是把具有复杂图象的基本粒子总括起来考虑的，对于考察基本粒子现象也是很重要的.

4. 基本粒子的谱系

4.1 基本粒子数能减少吗?

在发现周期律的当时，人们认为有多少种元素就有多少种原子. 到了二十世纪，才知道原子种类不同的原因在于位于原子中心的原子核的不同;并且还知道，一种元素包括两种以上的同位素，这些同位元素的差别只是质量不同. 这样一来，原子核的种类就越来越多了. 但是，1932 年发现了中子之后，情况为之一变，所有原子核都归结为质子和中子两种基本粒子的集合.

然而，在探索原子核性质的过程中，潜伏在原子核内的基本粒子一个接一个地出现了. 目前已达到三百种. 我们好象又回到刚开始研究元素的时代.

也许可以说是历史重演吧，但从这种现状前进一步，可以采取两种不同的观点.一种观点认为在已知的基本粒子中，只有极少数是真正的基本粒子，其他都是这些基本粒子的复合体. 只是在表观上象是基本粒子. 另一种观点认为在所有基本粒子的背后，存在一种共同的要素，它可以表现为实际的基本粒子. 这两种观点看来好象相差很多，但是，归根到底，它们是非常相似的. 现在就来说明这个问题.

如果基本粒子种类增加，首先想到的就是用什么方法来

使粒子种类减少一些. 基本粒子的概念本来是为了从根本上统一地说明自然现象而引入的,因此这种想法也是当然的.这种企图从很早以前就开始了. 早在 1930 年,德布罗意就企图用中微子的复合体来说明光.他曾指出,把中微子和反中微子在同一方向运动时伴随的波适当地迭加起来, 就可以得到电磁波;但是这里存在着根本的困难,因为中微子与反中微子和其他基本粒子只能进行弱相互作用, 所以无论用什么方法合成, 也不能得到能够和带电粒子进行强达三个数量级的相互作用的电磁场.德布罗意的构想虽然有这样的缺陷,但他的出发点是在试图减少基本粒子的数目,因而具有重大的意义.

π 介子的出现,再一次刺激了这种思想. 在建立介子理论的过程中, 温策尔虽曾企图用另外两种基本粒子代替 π 介子,但企图用核子说明 π 介子的尝试,是 1949 年发表的费米和杨振宁的理论. 他们曾经考虑把 π 介子看做核子和反核子的复合体. 核子和 π 介子既参加强相互作用,也参加弱相互作用,所以在这一点上并没有什么困难. 但是,核子和 π 介子的质量不同,相差一个数量级. 较重的核子和反核子如何能生成较轻的 π 介子,这是一个困难问题. 在原子核的情况下,核子和核子以核力结合起来之后重量比原来变轻了, 这一事实是利用核聚变放出大量能量的关键. 但是, 这时所减轻的只是全体的千分之一. 从核子和反核子生成 π 介子, 必须减轻到原来的十分之一左右,因此, 和核力相比, 必须有非常强大的力量才能生成. 果然有这样强大的力吗? 即使假定有, 这种力又能产生什么现象呢? 用现在的知识是完全不能预想的. 所以这个理论也还存在着问题.

4.2 坂田模型

把重粒子族和介子族分类时除自旋外, 还必须考虑同位

表 9　坂田模型的基础粒子和复合粒子

	粒子名	重粒子数	电荷	奇异数	组成
基础粒子	质子	1	+1	0	p
	中子	1	0	0	n
	Λ 粒子	1	0	−1	Λ
复合粒子	Σ 粒子	1	+1	−1	$(p\bar{n}\Lambda)$
			0		$(p\bar{p}\Lambda)$,$(n\bar{n}\Lambda)$
			−1		$(n\bar{p}\Lambda)$
	Ξ 粒子	1	0	−2	$(\bar{n}\Lambda\Lambda)$
			−1		$(\bar{p}\Lambda\Lambda)$
	π 介子	0	+1	0	$(p\bar{n})$
			0		$(p\bar{p})$,$(n\bar{n})$
			−1		$(n\bar{p})$
	K 介子	0	+1	+1	$(n\bar{\Lambda})$
			0		$(n\bar{\Lambda})$
	η 介子				$(p\bar{p})$,$(n\bar{n})$
					$\Lambda\bar{\Lambda}$
	K^0 介子	0	0	0	$(p\bar{p})$,$(n\bar{n})$
					$(\Lambda\Lambda)$

旋、奇异数、重粒子数这三个数.同位旋和自旋一样,其值为零或 1/2 的整数倍,奇异数和重粒子数取零值或正、负整数. 因此,如果想要找出真正的基本粒子,把其他粒子都作为这些真正基本粒子的复合体而推导出来, 则这些真正的基本粒子中必须包括下面几种粒子:

1. 自旋为 1/2 的基本粒子;
2. 同位旋为 1/2 的基本粒子;
3. 具有奇异数的基本粒子;
4. 具有重粒子数的基本粒子.

当然应该用尽可能少的几种基本粒子来满足这些条件.

坂田昌一于 1956 年提出了以质子、中子和 Λ 粒子为基础粒子的模型. 这些基本粒子满足上述四项条件,因此可以推

知，其他基本粒子都可以作为这三种基本粒子的复合体(表 9)．实际上，满足这些条件的还有其他模型，例如，核子和K介子的模型（哥尔德哈巴模型），Λ粒子和K介子的模型等等．但是坂田模型具有其他模型所不具备的几个优点．

第一个优点是，成为基础的各个粒子同属于重粒子族；特别是核子是最稳定的基本粒子．第二个优点是这些粒子的自旋、质量等相同或者非常相似．第三个优点是，大部分的介子都是由基础粒子及其反粒子组成的二体复合系．第四个优点是，大部分的重粒子都是三体复合系．

复合模型的共同特征是，根据复合系所能取的状态，可以由已知粒子（当时还很少）的性质类推出还应当存在哪些粒子．特别是采用坂田模型，能够简单地推导出来．因为三种基础粒子的性质很相似，如果忽视它们之间的差异，就能用松本贤一推导出的简单公式计算出重粒子族和介子族的质量．当然坂田模型和费米-杨振宁理论存在着同样的困难，但是这个模型的特点是开辟了更广阔的值得讨论的领域．从这一点来说，它的作用和费米-杨振宁理论是不同的．

4.3 基本粒子的对称性

坂田模型的优点是三种基础粒子具有相似的性质．1959年小川修三、克莱因和山口嘉夫想出了巧妙地利用这种优点的方法．

由于质子和中子的质量几乎没有差别，如果把质子和中子看做是同一基本粒子在假想的带电空间内的不同状态，则如前所述，我们可以考虑一个同位旋的量．因为强相互作用不扰乱基本粒子的同位旋方向，所以，在主要现象中，质子和中

子的行为完全相同.对于由基础粒子组成的复合粒子来说,情况也是一样. 把组成复合粒子的质子和中子相互置换时,产生的粒子质量几乎不变,其他的性质也没有什么变化,这是基本粒子间的一种对称性质. 如果知道了包含质子的复合粒子的性质,利用这种对称性,就能够预测出不包含质子而包含中子的另一种复合粒子的性质.

Λ粒子和质子或中子好象有些不同,如果忽略这种差异,结果又怎样呢? 和置换复合粒子内的质子和中子一样,把复合粒子中的Λ粒子和质子置换,或者把Λ粒子和中子置换,这样产生的粒子之间也可能有着相似的性质, 这就是小川等人的理论根据. 把这些综合起来,无论怎样置换三种基础粒子,我们都可以得到对称性. 这恰好是带电空间思想的推广,称为么正对称性.

如果么正对称性成立,和π介子性质相似的介子,总共应当有九种. 除已知的三种π介子和四种K介子外,其他两种介子可能是中性介子, 以后发现了η介子和K^0介子. 实际的质量和计算结果虽有些不同,但是和其他介子相比,这个差别是很小的,这说明这种对称性近似地成立. 但是,对于重粒子族,如果用和π介子一样的近似来考虑,其中应当有八种性质相同的粒子,这些粒子是核子、Λ粒子、Σ粒子和Ξ粒子,其中有三种是基础粒子, 五种是复合粒子, 这是这一模型的结论.和这五种复合粒子性质相似的粒子,可能是π介子和核子碰撞时出现的共振态Δ粒子. 但是Δ粒子的自旋是3/2, Ξ粒子的自旋是1/2,看来这个模型也有缺点.

修正这一模型的是盖尔曼和内曼. 他们又从头考虑了这个问题, 提出了以这八种重粒子为基础粒子的八重态模型. 在提出坂田模型当时, 用这样想法不能把基本粒子作统一解释, 所以没有什么意义. 但是八重态模型是在1961年提出

的，这时已发现了许多基本粒子的共振态，因此用这八种基础粒子能够在某种程度上把基本粒子作统一解释. 但是，如果彻底贯彻以最小限度的基础粒子对基本粒子作统一解释的立场，这种模型在本质上又可以回到三种基础粒子，这个问题留在后面再讲.

在八重态模型中，和 π 介子性质相似的介子共有两组，一组有八种粒子，另一组只有一种粒子，这一点也和坂田模型相似. 八重态模型的特点是它适用于重粒子的共振态. 八重态模型的基础是对称性，除八种粒子外，它还允许在一组中有十种性质相似的粒子存在. 然而把自旋为 3/2 的共振态归纳一下，于是有 Δ 粒子的四种共振态，Σ 粒子的三种共振态，Ξ 粒子的两种共振态，剩下的一种构成为一组. 可以预想，另一种粒子应当是带负电的奇异数为负三的粒子. 果然所预期的粒子即 Ω 粒子在两年后被发现了. Ω 粒子的寿命和第二代基本粒子大体相等，它不是共振态，因此发现较晚.

4.4 基本粒子的排列

八重态模型是以八种基础粒子为基础的，然而在推导基本粒子的对称性上，和坂田模型并没有什么差别. 也可以说，只是把坂田模型中的质子和中子、中子和 Λ 粒子、Λ 粒子和质子三者的置换多少变得抽象化了一些而已.

一般地说，质子和中子的置换是奇异数保持不变、使电荷增减的操作. 这样，除质子和中子的置换外，还需要同时考虑正的、中性的、负的 Σ 粒子以及中性的、负的 Ξ 粒子之间的置换. 这时 Λ 粒子不和其他粒子置换. 用同样的考虑可以知道，中子和 Λ 粒子的置换，只是使奇异数增减的操作，Λ 粒子和质子的置换，是使奇异数和电荷同时增减的操作.

这些置换可以用图形表示，我们使正三角形三个边的方

向对应于三种操作，就可以表示出基本粒子的置换．在图 24 中，水平方向表示电荷增减，向右下降方向表示奇异数增减，向右上升方向表示电荷和奇异数同时增减．如果假定从一顶点到另一顶点之间某种量有一个单位的增减，就可以在构成这个三角形的三个方向，把实际基本粒子排列在对称图形的各点上．这样的图形，除基本的三角形外，还有能排列八种、十种、二十七种基本粒子的图形． 但是，能实际排列在这种图形中的基本粒子，只有八种粒子的组和十种粒子的组．八种粒子组的席位，一次被重粒子占领，二次被介子占领后就没有空位了，十种粒子组的席位，一次就被重粒子占满了(图 25)． 如果把还有空席的组也计算在内，就可以把大部分基本粒子都排列起来．

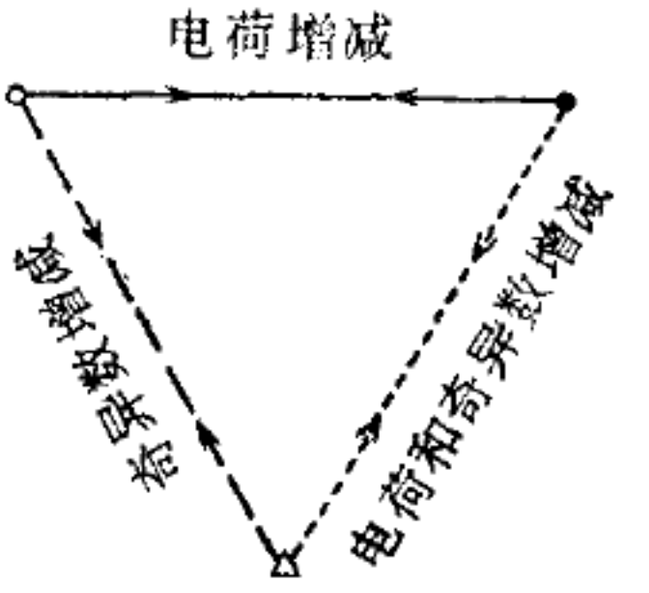
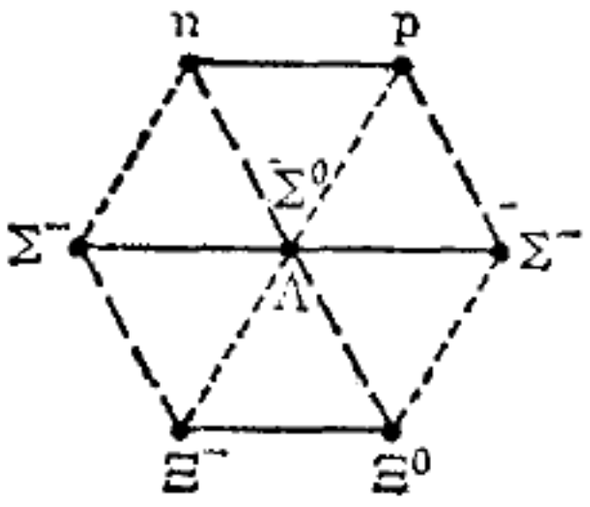
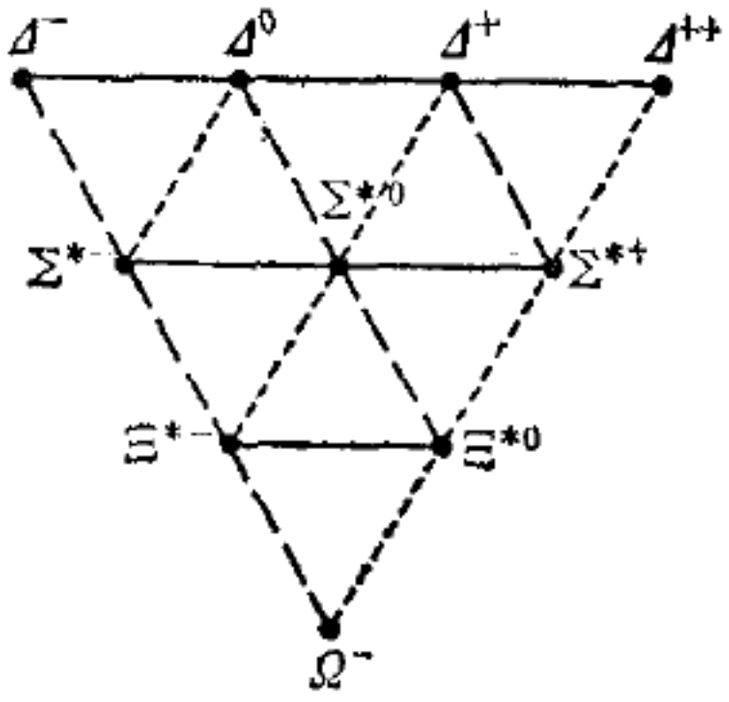


图 24　基本对称性



八种重粒子
(同样图也适用于介子)



十种重粒子

图 25　具有对称性的基本粒子组

正象八重态模型所预期的那样，同一组的基本粒子，实际上具有非常相似的性质． 如像坂田模型中忽略核子和 Λ 粒子的质量差那样，这些基本粒子的质量差也可以忽略． 但是，也可以正确地处理质量差问题，因为同一组内各个基本粒

子的质量都和平均质量有偏差，粒子之间的质量差也可以认为是由同一原因产生. 表示这个偏差的公式已由大久保进和盖尔曼导出. 根据这个公式，核子和Ξ粒子的平均质量应等于Λ粒子和Ξ粒子的三比一权重的平均值，这个计算值和实测值只差百分之几. Ω粒子的质量也完全符合大久保-盖尔曼公式的预言.

八重态模型虽然能够巧妙地把八种基本粒子和十种基本粒子加以整理，但是，它不能给出各组之间的关系. 于是出现了这样的见解，考虑对称性时如果把关于自旋分量增减的对称性也考虑在内，就有可能说明不同各组之间的关系（超多重态模型）. 从这种观点来说，由自旋为 1/2 的八种重粒子构成的一组共振态和由自旋为 3/2 的十种重粒子构成的一组共振态，具有相同的对称性；由自旋为零的八种介子构成的一组和由自旋为 1 的八种介子构成的一组，也具有相同的对称性. 如果这种见解是正确的，就能够把更多的基本粒子群统一起来.

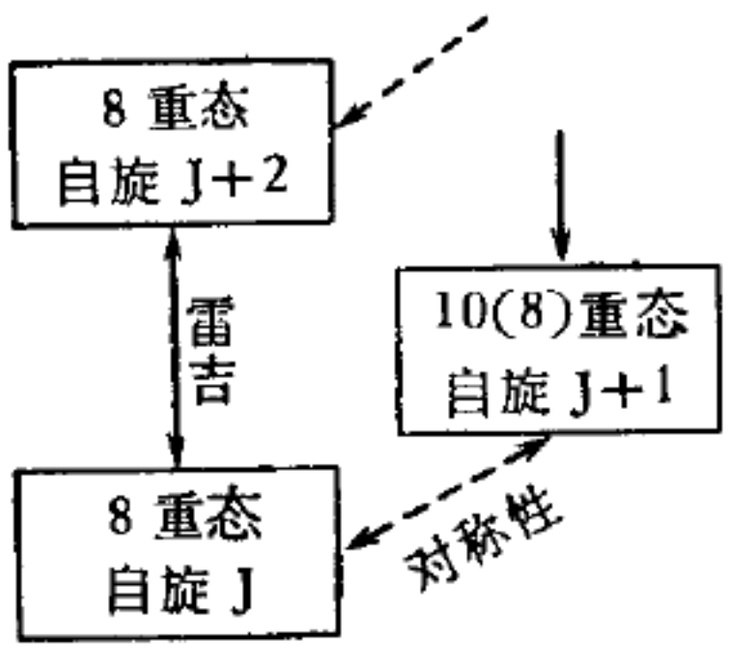


图 26　基本粒子的关联性

另一方面，如前面所述，基本粒子还有雷吉轨迹方面的关联性. 如果能把这两种见解结合起来，基本粒子的种类就可能不象表面上所看到的那样多了（图 26）.

4.5　奇异的夸克粒子

如果把坂田模型和八重态模型加以比较，就可以知道，坂田模型是以三种粒子为基础的，而八重态模型的八种基础粒子就不一定是真正的基础粒子了. 八重态模型所用的论法和坂田模型几乎没有什么差别，由此可以推知，其中的八种基础

粒子不是真正意义的基础粒子，用前述的统一基本粒子的条件，还可以把八重态模型加以整理.

如果把八重态模型加以整理，就需要引入三个奇异的基本粒子，这些基本粒子都还没有发现. 所谓奇异，就是它们的电荷是电子电荷的 2/3 或 1/3，这和一般基本粒子的概念完全不同（表 10）. 盖尔曼把这些奇妙的基本粒子命名为夸克粒子，兹瓦格把它们命名为爱斯（ace）. 它们果真是粒子吗?

表 10　夸克粒子的量子数

名称	重粒子数	电　　荷	奇　异　性
u	+1/3	+2/3	0
d	+1/3	−1/3	0
s	+1/3	−1/3	−1

暂且不管夸克粒子如何奇妙，如果用它们来解释基本粒子，就可以认为基本粒子是由夸克粒子和反夸克粒子构成的复合体. 由此可知,所谓八重态模型的对称性,实际就是三个夸克粒子互相置换的对称性. 如果不论夸克粒子的电荷和重粒子数如何，它们和坂田模型的三个基础粒子是一样的. 从这种意义来说,可以把这类粒子称为原重子或坂田粒子.

可以认为，重粒子是三个夸克粒子的复合体（表 11），介子是一个夸克粒子和一个反夸克粒子的复合体. 这样，1/3 的分数就消失了，于是出现具有整数电荷和重粒子数的基本粒子. 但是果然这样就能圆满地说明问题吗? 一个夸克粒子或两个夸克粒子的复合体都不具有整数电荷，为什么没有发现这些粒子呢?

关于夸克粒子，物理学家有两种不同的看法. 一种看法是,认为夸克粒子是实际存在的粒子，只是因为质量太大，用

现在达到的能量不容易发现它们;或者因为其他原因,没有发现出来. 如果是这样,也许能够在宇宙线的高能现象中发现它们. 但是,遗憾的是,谁也没有发现过这种粒子. 尽管如

表 11　用夸克粒子说明基本粒子的结构

名　　称		结　　构
质　子		uud
中　子		udd
Λ 粒子		uds
Σ 粒子（包括共振态）	正	uus
	中性	uds
	负	dds
Ξ 粒子（包括共振态）	中性	uss
	负	dss
Δ 粒子	正正	uuu
	正	uud
	中性	udd
	负	ddd
Ω 粒子		sss

此,夸克粒子的质量还是不能太大,这是因为由夸克粒子组成可观测到的基本粒子时，这些粒子的质量必须是能观察到的大小. 此外在这里还有费米、杨振宁理论所遇到的困难. 如果不弄清这一点,就无法对夸克粒子进行研究.

另一种看法是,认为夸克粒子不是基本粒子,这里还有种种解释，最简单的一种认为夸克粒子只是整理基本粒子的方法. 采用这种看法时，就会出现这样的疑问：为什么这种整理方法能够成立. 这时需要考虑的问题是如何解释夸克粒子. 关于这个问题留在第三部分讲述.

如前所述，可以用两种方法统一说明基本粒子. 由以上各节知道,这两种方法并没有很大差别.

4.6 探索轻粒子

统一说明基本粒子的一个重要问题是，以什么方式把轻粒子族和光子列入一般的图式内. 关于轻粒子族的粒子，目前知道的只有四种，即两种中微子、电子和μ介子. 关于中微子，目前只是知道它们具有和运动方向相反的自旋. 光子则是完全独立的一族基本粒子.

为了用其他基本粒子说明光子，需要同时导出电磁相互作用的强度，这方面虽进行过各种研究，但是还没得到什么明确的结论.

除电磁相互作用外，轻粒子可能参加弱相互作用，强度比光子小三个数量级，而μ介子的质量是电子质量的二百倍，所以这是一件难于理解的事实. 可以认为，这是因为电子的全部质量或大部分质量，变成它所产生的电磁场的能量了. 但是μ介子和电子具有相同的电荷，而质量是电子的二百倍，只用电磁场能量说明，还是难于理解的. 由此可知，利用弱相互作用还不足以说明这一问题.

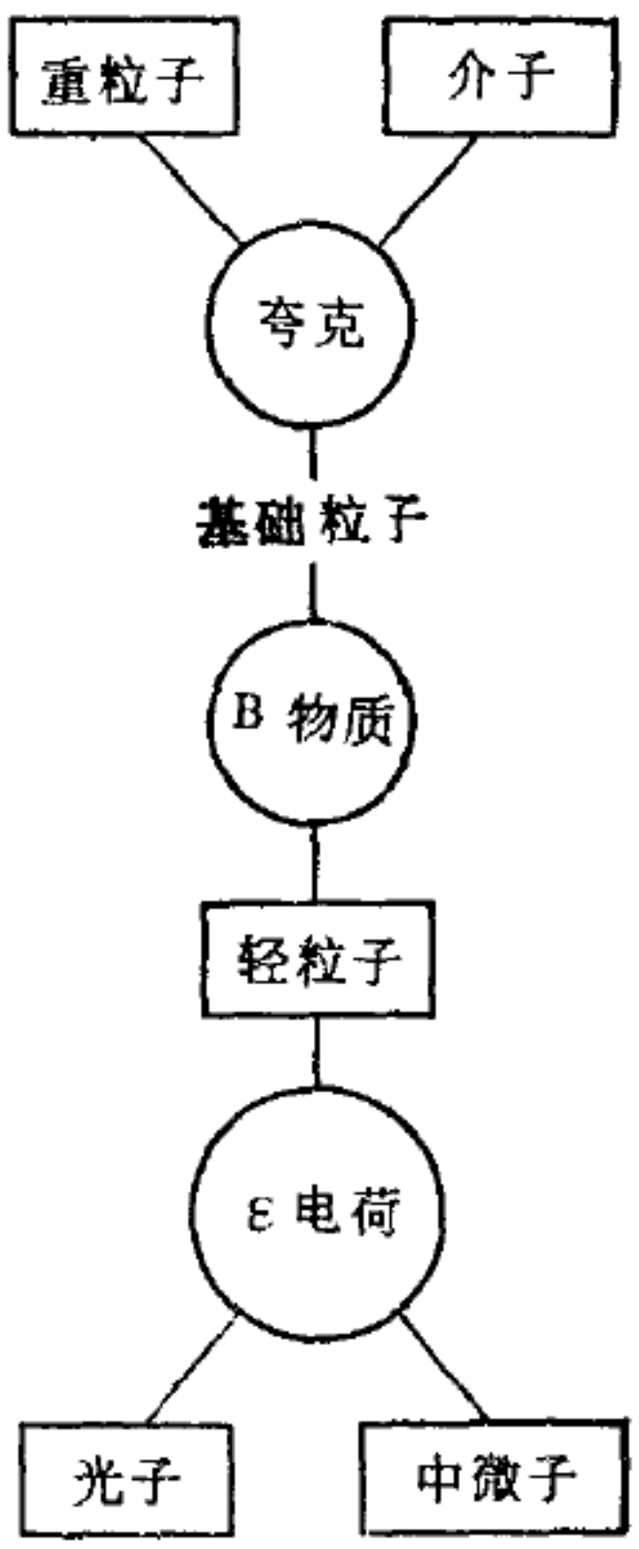


图 27　基本粒子谱系

但是利用现有的基本粒子图象，这个问题并不是想象的那样困难，这是因为电子周围的电子云以及电子本身的电荷扩展都和μ介子不同. 因为电荷大小相同，在离中心较远的地点，能够产生同样的电场. 然而，在中心附近，电荷的分布有微小差异时，电场就会发生显著变化，结果μ介子就得到了更多的能量，因而它的质量也

变大了. 从这一观点来说,中微子也可能带上电荷(称为 ε 电荷),它带上电荷的方法可能有两种,结果一种成为电子,另一种成为 μ 介子. 武谷和片山于 1959 年曾经用这种模型说明轻粒子族.

另一方面,马尔夏克、大久保以及甘巴发现了结合轻粒子族和重粒子族的线索. 观察一下与重粒子和轻粒子直接或间接有关的衰变现象,就可以知道,一定存在着质子、中子、Λ 粒子分别和中微子、电子、μ 介子相互置换的反应. 这也是一种对称性. 1960 年名古屋小组提出了把这种对称性和坂田模型结合的模型. 以中微子、电子、μ 介子为出发点,在这些粒子附加上带正电的 B 物质,就分别成为质子、中子、Λ 粒子. 所以,强相互作用的原因在于 B 物质.

把这两种模型组合起来,就可以知道,基本粒子的统一过程,是从重粒子和介子到轻粒子,然后又从轻粒子到中微子,结果又回到德布罗意的出发点(图 27). 在这个过程中,每个阶段都存在着奇异对象. 这些对象,即夸克粒子、B 物质、ε 电荷都代表什么呢?弄清楚这些问题,是今后统一说明基本粒子的重要课题.

三、基本粒子的规律性

1. 基本粒子的统一描述

1.1 理论的贫困

如第二部分所详述的，目前我们已经知道了有哪些基本粒子存在，并以此为根据，把迅速增加的经验知识加以整理后，对理解所发现的规律性获得了某种程度的成功．尽管有些新基本粒子存在的理由还不十分清楚，但物理学家根据理论上的需要，增加新的基本粒子，使基本粒子的研究不断发展起来．到二十世纪四十年代为止，关于基本粒子的存在，大多数先由理论预言，然后再由实验证明．正电子、π介子就是很好的例子．中微子、反核子也是这样，只是时间隔得更长一些而已，一直到五十年代才得到实验证实．虽然有这些不同，但是，应当存在的基本粒子确实存在，所预言的基本粒子也已发现，这一点却是相同的．

然而，到了四十年代末期，情况有了急剧的变化．新的基本粒子一个接一个地被发现，它们具有理论物理学家完全没有预料到的新性质，就象另一个世界里的人一样．如何对待这些陌生者，物理学家曾一度迷失了方向；但是不久就找到了把这些基本粒子分类、整理的方法．如在第二部分中所述，同位旋、奇异数等概念起了很大的作用，而且还逐步地理解了新粒子之间相互作用的方式以及新粒子和旧粒子之间相互作用的方式．物理学家从新的经验中学得了许多新知识．自然本

来应当是左右对称的，然而，新的经验告诉我们，这样的信仰也必须放弃了.

物理学是经验科学，当然必须依靠经验知识而前进. 但是，从二十世纪初期开始到三十年代为止，物理学家曾经以独创的思考力作出了不少光辉的预见；和今天对比起来，这是多么大的差别啊！ 近代物理学的创始者伽利略，对理性和经验两者给予同样高的评价. 实际上，物理学家往往能以直观的洞察力和合理的思考力走在事实的前面，以一个已知的事实为线索，能够预测出一百个未知的事实. 到了三十年代，这样的光辉急速地衰退了. 因此，我们再一次被自然界的无限丰富性和难测性压倒了. 基本粒子的研究日新月异地进展，大型加速器陆续地建成，使人们逐渐地掌握了有关高能现象的新知识. 面临着这样丰富的经验知识，我们不得不经常感叹理论的贫困.

1.2 历史会重演吗？

回顾一下历史，立即可以知道，这样的时代过去也不是没有过. 二十世纪最初三、四十年也许是异常的时代吧. “历史重演”这句话，颇适合于一百年前的化学和现在的基本粒子物理学的情况. 1869 年门德列夫发现了元素周期律，由此可以把九十多种元素加以分类、整理，而且能够预言未发现的元素及其性质，如在第二部分中所述，今天我们已经知道了一些方法，能够把多种多样的基本粒子或至少是一部分进行分类、整理. 可以说，关于基本粒子的户口已经查清到某种程度了. 这样，就可以以此为根据预言未发现的新粒子. 从这一点来说，目前的基本粒子物理学和发现周期律时的化学有些相似.

然而，现在的基本粒子物理学在另一方面又先走了一步. 一百年前的科学家认为原子是物质的最小单位，有多少种元

素就有多少种不同的原子，但是他们没有深入到原子的内部. 把原子本身的内部结构作为问题来研究，是从十九世纪末发现电荷的最小单位即电荷的基本量开始的. 如在第一部分所述，1897 年 J. J. 汤姆逊发现了电子，以此为开端，对原子结构进行了热烈的研究. 然而基本粒子的研究工作者在几年前就已把基本粒子的结构作为研究对象了. 从这一点来说，基本粒子物理学的确处于先进的阶段. 但是需要注意的是，关于"基本粒子的结构"一词，虽然使用了相同的语言，但它的含意却随研究者的观点有很大的差异. 关于这一点，将在以下几节中作比较详细地论述.

现在正统的基本粒子理论，是建立在基本粒子本身没有固有大小这一观点上的. 在牛顿力学中，认为质点只有质量没有大小，研究质点运动是研究各种物体运动的出发点. 基本粒子理论也是这样，基本粒子没有大小这一图象，就决定了目前正统基本粒子理论的性格. 然而，采取这样的正统观点，我们也可以考虑基本粒子的广延性和结构等问题，这在第二部中已经讲过了.

1.3 海森堡的一元论

谈到基本粒子的结构，就会想到它们是由更基本的单位构成的复合体. 如在第二部分中所述，从坂田模型以至于夸克模型，它们的一个共同特征都是以自旋为 1/2 的粒子，亦即能用旋量场描述的粒子作为出发点. 旋量场是量子力学特有的新的场，经典物理学没有这样的场，和伴随整数自旋粒子的电磁场以及介子场等相比，可以认为，它是更单纯更基本的场. 也就是说，用旋量场能够合成整数自旋粒子的场，但是反过来是不可能的. 因此从很早以来，就有人尝试从旋量场出发，推导出其他一切的场. 其中最原始最典型的是德布罗

意于1930年提出的光的中微子说. 他指出，如果把中微子和反中微子在同一方向运动时产生的波动场用适当方法迭加起来，就能得到在这个方向传播的电磁波. 然而这种想法存在着根本的困难，因为中微子与反中微子和其他粒子只能进行很弱的相互作用，因此无论用什么方法把它们产生的场迭加起来，也得不到能够和带电粒子发生很强相互作用的电磁场. 尽管存在着这样明显的缺点，但在建立基本粒子统一理论的各种尝试中，德布罗意的构想作为一种重要理论的出发点有着重要的意义. 前面介绍的费米-杨振宁关于π介子的复合模型以及坂田模型等，都属于这个范畴.

在这个范畴内，一元论性格表现得最为突出的是海森堡在十几年前提出的非线性旋量场理论. 他的观点在下述各点上和复合模型不同. 他首先考虑的是真正的基本粒子和复合粒子是不是有本质上的区别. 他认为迄今为止，没有区别这两种粒子的明确标准. 于是他认为，基本粒子的统一理论应当满足以下假设:

一、基本方程描述的场，不是和质子、π介子等个别粒子有直接关系的场，而应该是和一般物质有关的量.

二、无论是基本粒子还是复合粒子，所有粒子都应该是基本方程的解.

三、基本方程中必须包含能导出粒子间相互作用的因素，因此这个方程必须是非线性的. 而且各种粒子的质量差也可以同样由非线性项给出. 因此忽视相互作用的“裸粒子”概念，就失去了意义.

四、在各种可能发生的现象中，包括粒子的产生和湮灭在内，哪种现象能够实际发生，要由一定的规则即选择规则来决定，这项规则应能从基本方程的对称性推导出来. 因此，经验的选择规则，对于反过来推导基本方程的形式是有效的.

五、除了这些对称性外，确定基本方程的指导原理，就是尽可能使其形式简单.

海森堡认为，表示一般物质（他称之为原始物质）的场是旋量场. 从这一点说，可以认为，他的理论是德布罗意以来旋量场一元论的高度发展形式. 这个场方程就成为他的理论的基本法则. 关于方程形式，他选择了非线性的而且最简单的形式. 当然只靠简单性不能完全确定方程的形式；因此，他早就企图把重粒子族和介子族之间的强相互作用显示出的对称性，重新解释为原始物质场方程的对称性，并且利用这样的解释来确定方程的形式. 但是，无论从西岛-盖尔曼的唯象论研究，还是从复合模型观点重新考虑，都要引入同位旋、奇异数等类概念，这些都是旋量粒子图象中原来所没有的新概念. 因此，无论非线性方程的解包含着什么内容，只用一种旋量场就把重粒子族和介子族中的一切粒子都表示出来，这是不可想象的，何况还要把轻粒子族的粒子以及光子都表示出来，那就更勉强了.

但是海森堡认为，把场的量子化方法加以改变，就可以解决这个问题. 如在第一部分末尾所述，在场论中从来就存在着发散困难. 例如，把电子看做是带电质点，在它附近就要产生很强的电场，而这个电场的能量无穷大. 电子本身产生的电场能量，即电子自能是无穷大，这是发散困难的起源. 根据爱因斯坦相对论，与这能量相当的质量要附加于电子原来的质量上，结果电子总质量也成为无穷大. 如果对电子的电荷分布给予适当的空间分布，这种困难就可以解决. 例如，若假定电荷$-e$分布在半径为十万亿分之一厘米（10^{-13}厘米）的球内，电场的总能量就是有限的，把这项能量换算成质量，就和电子的质量大体相等.

但是，发散问题并不是这样就解决了. 由于量子论的发

展,问题的性质也发生了变化. 根据量子论,电子和电磁场都具有波动和粒子的二象性. 在电子周围产生电磁场的现象,改用粒子图象来说,就是在电子周围潜在着光子. 也可以说,潜在的光子就是产生电子自能的原因. 在量子论中,这项自能也是无穷大. 但是在这里,为了使自能变成有限的,引入电子的广延性就非常困难了. 关于这一点将在后面详细讨论,这里要强调的,只是以同时满足相对论和量子论的形式引入电子的广延性,这不是一个容易的问题.

那么,在把电子仍看成点粒子的范围内,能把发散困难解决到什么程度呢?首先要考虑的新情况是,存在着经典物理学中不能想象的反粒子. 例如,对电子来说,正电子就是它的反粒子. 我们知道,电子和正电子碰在一起时,两者同时消灭,产生光子. 反之,光子也能变成正-负电子对. 这样,潜在于电子周围的光子,也具有使正-负电子对潜在的可能性. 由于有这种新的可能性,自能也改变了. 然而,这种可能性也存在于真空本身. 也就是说,光子和正-负电子对能同时在真空中产生或消灭. 由这种潜在粒子产生的真空自能也是无穷大. 这种效应通常称为"真空极化". 如果不考虑光子而考虑外加电场,这时潜在于真空中的正-负电子将相互向相反方向运动,和电介质中的情况一样,发生极化现象. 于是考虑电子的自能问题,需要把它和真空本身的能量加以比较,并取两者之差. 这个差本身仍是无穷大,但是程度比较小.

1.4 负几率

由于考虑了存在反粒子这一新的情况,发散困难有了一些缓和,但是并没有完全消除. 为了从根本上消除发散困难,必须采取某种有力手段. 在目前考虑的各种手段中,要提出的是承认"负几率"这一作法.

目前的正统基本粒子理论，是以狭义相对论和量子力学为柱石建立起来的. 量子力学中采用波函数，它的绝对值平方(这个量一定是零或正数)表示粒子出现的几率. 如果代替绝对值平方,选取可以为正也可以为负的量,就不能直接用几率来解释了. 如果可能,仍想保留几率的解释,而且对量子力学这个坚强柱石也不想加以改变. 但是,如果这样,对另一个柱石即狭义相对论,若不改变,就不能消除发散困难. 许多科学家认为,与其改变狭义相对论,不如盲目地引入负几率这个奇异的概念更好一些. 但是,如果完全采用狭义相对论,就要把量子力学稍加改变而承认负几率，否则连电磁场问题也不能妥善处理了.

于是海森堡在他的旋量场一元论中引入了负几率. 他的目的是想要把非线性方程的解的多样性和引入负几率产生的新的可能性很好地结合起来,借此一方面导出各种基本粒子,另一方面消除发散困难. 但是，他的理论是否能够符合他的意图,还存在许多疑问.

首先，求解非线性方程在一般情况下是非常困难的. 量子力学以前的经典场论方程也有非线性的，它的解到现在还不明了. 况且又把场量子化后,承认了负几率,数学上的困难当然更增大了. 因此，人们希望不专依靠抽象的推理而由某种具体情况来类推.

关于这一点，南部阳一郎进行了很有意义的考察. 他曾尝试采用超导理论的类比. 某种金属在非常低的温度下电阻完全消失. 这种现象是怎样发生的，很长时期内一直是一个谜. 但是最近十年以来,这个谜大体解决了. 金属中充满了自由电子,虽然电子可以处于各种状态,但是因为有泡利不相容原理的限制，在同一状态内只能存在一个电子. 如果把电子比作电影院的观众，状态就相当于坐位. 能量是区别各种

状态的一个标志，它相当于坐位的好坏。低温下的情况可以比作观众的急迫心情，他们都争先恐后地抢好坐位。太靠近前面的由于看起来不舒服，所以有空位。这样，挤得满满的中间部分和前面部分是不是有明显界线呢？一般没有明显界线。在离开中间稍远的部分，也有几个人坐着。在一般情况下，总是成为不规则的分布。就电子来说，首先填满低能状态，某个能量以上的状态也不是完全空着，在边界附近形成复杂分布。就电子集团全体来说，某种特定的复杂分布是能量最低的状态和其他可能的能量状态形成间隙。这就是引起超导现象的原因。

南部曾经把这种想法应用于海森堡的理论。代替电子，他首先考虑了没有质量的旋量粒子集团。如果这些粒子是完全自由的，真空就是充满了负能粒子、没有正能粒子的状态。然而，如果这些粒子间有相互作用，真空就应当是这个集团全体的最低能量状态；因此，如果可以利用超导来类推，真空能量和其它状态的能量就可以形成间隙。越过这个间隙，比真空能量高的状态就相当于具有质量的粒子。举一个例子，这种粒子可以理解为核子。南部曾经用这种论法解释了 π 介子存在的理由。

但是有一点和超导根本不同。这就是起初取的旋量粒子，它能占据的负能席位是无限多的（金属中自由电子的席位是有限的），于是就要产生发散困难。如上所述，对于现在的基本粒子理论，这种困难就象一个附体妖怪，如果不采取某种解决办法，这种类推能否成立，也是无法判断的。

海森堡企图用引入负几率的办法来消除发散困难。但是，引入负几率就等于承认以负几率存在的粒子。这样就得按照正、负几率的代数和等于 1 来建立理论。一般地说，这就是承认正几率的粒子和负几率的粒子可以同时产生或湮灭。

以负几率存在的粒子，是这个世界里没有的一种妖怪. 这个世界里的粒子只能以正几率存在. 为了使引入的妖怪对于这个世界的物理学家进行的观测不发生任何坏影响，必须对这个妖怪的性格加上适当限制. 实际上，在量子电动力学中，巧妙地限制了这个妖怪的作用，使它不发生坏影响. 但是，海森堡理论中出现了一种特殊妖怪，即所谓“偶极子妖怪”，而且没有确实方法可以保证它不发生坏影响. 因此，这一理论能否按照他的意图建立起来是很有疑问的. 不管怎样，负几率问题和下面一章内介绍的基本粒子的广延性有密切关系，所以后面还要提到这个问题.

1.5 *S* 矩阵理论

上述的原始物质是构成各种基本粒子的基础，它本身却是非常抽象的. 而且还得承认将出现以负几率存在的奇怪粒子. 有人认为与其这样勉强地拼凑，倒不如放弃场的一元论的主张. 如果这样，就会出现各种新的可能性，其中最有代表性的就是 *S* 矩阵理论. *S* 矩阵也称为散射矩阵，它的矩阵元表示，两个粒子碰撞时每个粒子各以多大能量散射到什么方向的几率（更正确地说是几率振幅）. 一般地说，*S* 矩阵也可以包括这样的碰撞过程，即碰撞后粒子的种类发生改变，或者成为三个以上的粒子. 如果只就碰撞前后都是两个粒子的情况来讨论，碰撞过程的特征就可以用下述两个量来表示：一个量是在两个粒子的重心为静止的系统中测得的能量之和（其值在碰撞前后相等），另一个量是一个粒子的动量改变（和另一个粒子的动量改变大小相等，方向相反）. 这两个量当然都是实数，而且只能取一定范围内的值，*S* 矩阵是这两个实变数的复函数，它的形式需要根据某种理论来决定.

在从来的正统理论中，是先把各个基本粒子分别表示为

定域场，并且假定在它们之间有某种局部相互作用，然后计算 S 矩阵. 把这些用直观语言表达，就是表示两个粒子存在于空间的几率的两个波包互相接近而重合，由于发生相互作用，于是波形发生变化，成为散射波而逐渐扩大. 用这样计算得到的 S 矩阵，是把碰撞前两个粒子在相距很远时的状态和碰撞完了后两个粒子相互远离时的状态以几率形式结合起来的量. 由此可知，从 S 矩阵本身不能直接知道碰撞现场的状况. 用从来的场论或代替它的新的场论作背景，才能了解碰撞过程的详细状况.

海森堡在 1943 年曾主张，可以放弃从来的场论，只建立 S 矩阵理论就可以了. 也就是说，不去追究碰撞现场情况，只研究碰撞前和碰撞后的几率关系. 实际上，我们用汽泡室拍摄碰撞现象的径迹时，所能看到的只是粒子在碰撞前的径迹和碰撞完了后的径迹. 因此，从纯粹的实证主义观点来说，追究碰撞现场情况是过分的要求. 如果把“历史重演”这句话应用于这种情况，就可以使场论和统计力学相对应，S 矩阵和热力学相对应. 但是时间的顺序是相反的，热力学的发展领先于统计力学，而 S 矩阵则相反，是在正统场论陷入了僵局的情况下诞生的. 虽然有这样的不同，但是也有明显的类似. 这就是说，在统计力学中，假定有许多看不见的分子按照经典力学的法则运动，并且反复地互相碰撞，以此说明热现象. 而在热力学中，只研究体积、压力、温度、能量或熵等可以测定量之间的关系，在十九世纪的后半期，有人认为分子的存在还没有证实，以它为对象进行研究完全是歪道，这种想法对当时的物理学家产生了很大影响. 在二十世纪四十年代以后，基本粒子理论中也有同样的倾向. S 矩阵理论就是一个最典型的例子.

在热力学中，把能量守恒定律和熵的增加定律作为两条

基本定律. 然而在 S 矩阵理论中,和它对应的又是什么呢?第一,因为 S 矩阵具有几率振幅的意义,当然应该满足么正矩阵的条件. 第二就是 S 矩阵的解析性. 前面说过,可以认为 S 矩阵是几个实变数的复函数.如果把实变数开拓到复数领域,就可以得到复变数的复函数. 这个函数也有解析性的要求,就是说,除了某种奇点或奇点的集合之外,这个函数在任意点上都是解析函数. 由于有这样的要求,不仅复函数的实部和虚部之间有一定的关系,而且还能用解析开拓手续把表示基本粒子反应的各个 S 矩阵联系起来,这样就可以由一个决定另一个.

后来海森堡本人也撤销了只建立 S 矩阵理论的主张,而坚持前述的旋量场一元论. 但是,在第二次世界大战以后,由于从高能现象中积累了许多和各种基本粒子反应有关的实验数据,S 矩阵作为处理这些实验数据的理论,再次受到了人们的注意,特别是丘坚决主张不要场论,认为只采用 S 矩阵理论就行了.

1.6 基本粒子图象的抽象化

如果放弃场论或放弃代替它的理论,基本粒子究竟是什么呢? 在 S 矩阵理论中,如果把能量(正确地说能量自乘)开拓到复数领域,在这个复数平面内,S 矩阵在几乎所有的点上都是解析函数,但是也允许在这儿或那儿出现奇点. 如果奇点出现在正实轴上,就可以认为它和具有一定质量的稳定粒子相对应. 如果奇点稍稍离开了实轴,在某种情况下,也能表示不稳定粒子.

实际的基本粒子都具有整数或半整数值的自旋,为了反映这种情况,需要把 S 矩阵分解为几个部分,它们分别与角动量的各个值相对应,这些部分将分别成为能量的某种解析函

数. 这里再进一步抽象化，假定角动量即自旋值也不限于整数或半整数，而可以取一般的复数. 也就是说，实际的 S 矩阵虽然只是由和自旋的某些不连续值相对应的部分构成的，但是要设想在它们的背后存在着在自旋复数平面内定义的解析函数. 这正是第二部分第三章中介绍的雷吉理论的思想. 这里新出现的 S 矩阵，是能量和自旋两个复变数的解析函数. 如果能量的实数值和自旋的整数值或半整数值的某一组成为这个函数的奇点，就可以使它和具有一定质量与自旋的实际基本粒子相对应. 也就是说，决定某种反应的 S 矩阵时需要有奇点存在，这意味着通过这些奇点出现的基本粒子起着重要作用. 例如，着眼于一个奇点或一组奇点的集合，并在它们附近决定了 S 矩阵的特性；当保持这种特性不变的领域逐渐扩大时，将出现另外的奇点，于是可以用一个基本粒子的存在说明另一个基本粒子的存在. 或者反过来，从后一个基本粒子出发，用同样方法也能说明前一个基本粒子的存在.

这种想法能形成这样一种图象：各种各样的基本粒子通过 S 矩阵的解析性，互相联系，互相制约. 这里所有的基本粒子都是同等的，看不到某一基本粒子比其他基本粒子更为基本的秩序. 丘把这种情况称为基本粒子的民主性，或核的民主性. 可以说，这是把海森堡一元论的旋量场进一步抽象化的情况.

到此为止，基本粒子理论是在广泛的能量范围内寻找所有多变数的复解析函数，把实际的基本粒子反应归结为高度的数学问题. 这种方法和不用量子力学只用热力学考察来解决物性论以及化学反应等问题的企图是相似的，只用这样的考察当然得不到结论. 和量子力学不同，从来的场论根本不能成为基本粒子论的真正基础，而需要建立能够代替它的理论.

前面进行了一系列的抽象化讨论，下面回到朴素的立场，即探讨存在于这个世界即时空里的基本粒子是什么，下面第二章和第三章就讨论这些问题.

2. 基本粒子的广延性

2.1 定域场理论不包含矛盾吗?

前面说过:“基本粒子也有结构”,那里考虑的问题是,即使基本粒子本身没有固有大小，但是由于和其他基本粒子发生相互作用，结果具有一定的广延性. 例如核子，即使它原是一个点,但是在它周围形成了介子云. 裸核时没有大小,但是穿上衣服之后,就具有一定大小了.

然而,以这样的想法为基础建立起来的基本粒子理论,总是被发散困难纠缠着. 再进一步考虑，认为基本粒子本来就是具有广延性的某种东西，结果又会怎样呢? 我们眼睛所能看到的、手所能摸到的一切物体都具有大小. 因此,作为基本粒子的图象来说,想象它是球形的或四方形的,比想象它是没有大小的点,更容易理解一些. 实际上,在古代曾经想象原子是球状的,或者是多面体的. 到了近代,特别是建立了牛顿力学以后,认为质点是最基本的，具有形状和大小，这不仅使问题复杂,而且作为基本粒子的图象也觉得很不自然.

在量子力学中也沿用了点粒子图象. 在不考虑相对论的情况下，处理具有大小的对象，例如刚体,并没有什么本质上的困难. 但是,需要满足狭义相对论的要求时,处理具有大小的对象就非常复杂了. 例如,某一物体在静止时是球形,运动时沿运动方向缩短成为椭圆体. 或者更普遍地说，当“同时”考虑具有大小的物体的各部分时，就会出现“同时性”定义随着观测者运动状态而不同的复杂情况. 从来的基本粒子理论

就是在同时满足狭义相对论和量子力学要求的条件下建立起来的，因此要想脱离基本粒子本身没有大小的图像，这是很困难的。换句话说，量子化的场是把时间和空间的点函数看做算符而得到的，要把这种场用其他概念代替，是很困难的。

那么，如果把以点粒子为背景的场称为“定域场”，就可以把时空各点所设想的各个算符的全体看作是这个场。但是把基本粒子看作为点粒子，从量子力学上说，这意味着，“虽然不知道粒子存在于哪一点上，但它一定存在于某一点，因此，通过观测可以知道它存在于哪一点”。这种想法不能直接证明，这是因为观测基本粒子的位置时，观测本身一定具有相当大的误差，相当大的测不准性。然而，如果这种误差，这种测不准性具有能够尽量减小的性格，对基本粒子是点粒子的观点，至少是一种消极的支持，但是进一步讨论是很困难的。因此，我们从反面进行讨论，就是看一看从点粒子图象出发的定域场理论本身，是不是以不包含矛盾的形式构成的。

这方面的研究分为两个主要方面，一个方面是抽象的普遍性的研究，另一个方面是具体的实例性的研究。前者称之为公理性研究，这是因为要求首先承认同时满足狭义相对论和量子力学要求并以最普遍形式表达的几项公理，然后对于满足这些公理的定域场的一般性质进行全面讨论。这里把这些公理以简明形式表示如下：

一、定域场理论对于洛伦兹变换必须是不变的。这意味着成为基本粒子背景的四维世界是均匀的各向同性的三维空间和均匀的一维时间所构成的明可夫斯基时空。

二、基本粒子系统可以用几个定域场来表示，由定域场某个函数的空间积分给出的基本粒子系统的总能量算符的本征值决不能为负值。因此，在基本粒子系统中存在着最低能量状态，这就是真空态。这种真空状态只能有一个。

三、微观因果律成立. 这是说，在空间互相离开的两点发生的事件（狭义相对论的同时性事件）是互相独立的，一个事件不影响另一个事件. 而且无论空间两点相距如何近，这种独立性都成立，这一要求就是“微观”因果律. 这一要求表明，在空间方向两点的定域场，可以用相互对易(或反对易)的算符表示. 这说明，微观因果律和点粒子图象有不可分离的关系.

四、基本粒子系统遵守量子力学的一般法则，也就是说，量子力学的几率解释对于有关基本粒子系统的各种现象都成立. 这里所说的有关基本粒子的现象，指的是能观测到的现象，例如，用雾室或汽泡室观测到的两个基本粒子的碰撞现象，一个基本粒子的衰变现象等. 反过来说，两个或两个以上基本粒子非常接近时发生的现象是不能直接观测的，因此这里暂不讨论，对于这些粒子只考虑分别观测时能观测到的情况. 从这种意义上说，要求量子力学的几率解释对于碰撞或衰变前后的基本粒子行为也成立.

那么，有没有满足这些公理的理论呢？关于这个问题曾经进行了很多研究，其中包括着高度复杂的数学问题，很难下最后的判断，但是，从总的趋势来说，确实是倾向于否定的方向. 赖曼已经在 1954 年证明，满足上述公理的定域场理论一定存在着发散困难. 到目前为止，还没有人能推翻他的结论. 因此，可以认为，永远遵守上述几项公理并不是上策.

如果是这样，放弃这四项公理中的哪一项比较好呢？ 哪一项容易放弃呢？放弃哪一项能开辟新的道路呢？看来哪一项也不容易放弃，实际上，这四项公理相互有密切关系，放弃任何一项都会影响到全局，整个定域场理论就要发生动摇. 因此，无论从哪里着手也不容易前进. 到目前为止，许多人所考虑的是放弃公理二或公理三的办法.

2.2 非定域相互作用

我们首先着眼于公理三. 以点粒子图象为背景的定域场理论的特征,最明显地表现在这个公理上.因为基本粒子没有固有大小,无论其他基本粒子如何接近,它总是采取"与我无关"的态度. 当两个粒子会合于一点时才发生碰撞现象,这就是公理三的基本思想. 这时虽然简单地称之为基本粒子,但是不仅要考虑显在的基本粒子, 还必须把潜在的基本粒子也包括在内. 例如,两个带电粒子即使相距比较远,也存在着电磁作用力,这是因为在两者之间有潜在的光子的缘故. 当带电粒子和光子无限接近时才发生相互作用.

回顾一下物理学的历史,如在第一部分中所述的,随着电磁学的发展,媒递作用理论代替了超距作用理论. 从历史上说,场论是作为媒递作用理论的具体化而发展起来的. 然而在基本粒子理论诞生以前的阶段,物质和场有明确的区别.例如,当时存在二元论的说法,这是说,物质是带电粒子的集合,它是电磁场的来源;反过来说,电磁场又是使带电粒子产生加速度的原因,也就是力场. 在基本粒子理论中,物质和力都归结为场和场之间的相互作用.也可以说,物质粒子的质点图象和媒递作用的观点以新的形式成为一体了. 在正统的基本粒子理论中,这种情况以定域场的定域相互作用形式表示出来. 所谓定域相互作用, 就是说, 只有同一时空点的场量的乘积出现于基本法则内.

从公理三着手改变现在的定域场理论, 可以分两个阶段进行. 第一阶段是改变媒递作用的想法, 或者说缓和媒递作用的条件, 就是认为一个基本粒子和另一个基本粒子接近到某一距离时就能发生相互作用,而不一定要求无限地接近.这种情况的数学表示是,出现于基本法则内的相互作用项,不仅

包括同一时空点的场量的乘积，而且还包括在空间相距很近两点的场量的乘积．这样的相互作用一般称为非定域相互作用．

承认了非定域相互作用，基本粒子本身虽然是点粒子，但是当它和其他基本粒子相互作用时，表现出好象具有一定的大小．结果在一般情况下，微观因果律就不成立了． 这就是说，即使在某一时刻（按照公理三意义）微观因果律成立，由于是非定域相互作用，时间过后微观因果律又不成立了．

然而，由于微观因果律不能用直接的实验来证明，即使它不成立，也可以认为宏观因果律成立．所谓宏观因果律，是比微观因果更弱的要求． 这种要求是，如果空间两点的距离比较大，大到能够实际观测的程度，也就是成为宏观距离时，在两点发生的事件必须是完全独立的．这是最基本的要求．于是可以认为，即使在基本粒子的相互作用中含有微观的非定域性质，也很容易满足宏观因果律的要求．但是，严密地说并不是这样简单．这就是说，即使放弃了微观因果律，但是还保留着第一公理的要求，亦即理论的洛伦兹变换不变性． 因而对于某一观测者来说，在同一时刻是空间非常接近的两点，对于相对于该观测者以非常大速度运动的另一观测者来说，无论在时间和空间上都成为相距很远的两点了．如果在这样两点发生的事件不是互相独立的，宏观因果律就不成立． 这就是说，要想使微观因果律的要求缓和一些，必然要牵涉到宏观因果律．

当然，上面的推论是就一般情况而言的，如果详细讨论各种具体情况，在特殊情况下，事态也许能好转一些．实际上，关于这一点进行了许多研究，但是还没有找到能够使人满意的具体事例．因此不作深入的讨论．

不管怎样，在非定域相互作用理论发展的过程中，如何满

足宏观因果律的要求，是一个困难问题. 如果抱乐观态度，认为这个问题总是可以解决的，那么，非定域相互作用的观点本来就是很不彻底的. 说基本粒子本身没有广延性，只是相互作用时才有广延性，这种说法是不适宜的. 如果基本粒子是点粒子，就应当满足微观因果律. 如果说非定域相互作用破坏了微观因果律，就等于说基本粒子本身有广延性. 那么，从一开始就承认基本粒子具有广延性又怎样呢？

2.3 非定域场理论

如果这样想，自然而然地就进入了第二阶段. 一个典型问题就是非定域场理论. 象反复提到过的，在现在的基本粒子理论中，点粒子的图象已经被抽象化为定域场这样的数学表示了.如果假定基本粒子本身具有广延性，就必须把作为时空单个点的函数的场即定域场的概念加以推广. 首先考虑的是作为时空两点的函数的场，这是狭义的非定域场.非定域场的概念最初是以抽象形式引入的，但是它可以具有各种不同的具体图象. 例如，也许有人把复合粒子想象成这种图象，认为氘核是由质子和中子构成的复合粒子. 因此，氘核的波函数就是质子所占据的点和中子所占据的点两者的函数. 从这种意义上说，非定域场和复合粒子是相似的. 但是，在根本的想法上存在着明显不同. 复合粒子能够还原成更基本的两个粒子，而非定域场则是某种基本概念的表示. 由一个点的函数变为两个点的函数，自由度增加了，内容也丰富了，这是因为基本对象本身就包含着这些内容的缘故. 建立非定域场的方程，就是把这种基本对象本身的性格表达出来.

作为两个时空点的函数的非定域场，也可以看作是它们的质心坐标和相对坐标的函数. 这样，从远处看一个基本粒子时，它就等于一个点粒子，这种情况也可以这样来理解：

只在相对坐标值非常小的位置上场才比较大，相对坐标变大时场急速地变小。因此，一个基本粒子只要不是非常接近于其他基本粒子，它的行为在某种程度上就可以根据场是质心坐标的函数来决定.从这种意义上说;质心坐标也可以称为外部坐标。基本粒子用单纯的点粒子图象不能表达的新属性，可以由场是相对坐标的函数来决定。这些是基本粒子的内部性质，因而相对坐标也称为内部坐标。当两个基本粒子互相接近发生碰撞现象时，碰撞的详细机构可以由场是内部坐标的函数来决定,因而可以由非定域场之间的相互作用来决定.

但是，非定域场的概念是很抽象的，不借助于数学公式，要作深入的说明是非常困难的。这里我们采用最直观的图象加以说明。现在考虑把两个质量相同的质点用很轻而且很直的弹簧连结起来的力学系。这样，这个力学系的运动可以分解为系统的整体运动,即重心运动,围绕重心的旋转运动和弹簧的伸缩运动三部分。其中在远处能看到的只是重心运动，而旋转运动和伸缩运动的能量也是整个力学系能量(按照相对论是总质量)的一部分,因而可以间接地影响重心运动。这就是说,从外面看到的质量的一部分是由内部运动决定的.此外,内部的旋转运动产生了这个力学系的固有角动量,也就是产生了从外面观察时看到的基本粒子的自旋，至少是其一部分.

这样,从定域场过渡到非定域场时,不但各种基本粒子的质量、自旋，而且象同位旋、奇异数一类的新属性，也都可以作为与内部运动有关的量来统一理解。实际上，用内部坐标和内部动量组成对洛伦兹变换不变的三个算符时,可以证明,这些算符具有和同位旋相似的性质。如果把它和外部动量的耦合也考虑在内，就可以作出代数性质和同位旋完全相同的算符。另一方面,如果对内部运动进行平均,就可以使理论向

定域场的非定域相互作用形式移转，在这种情况下，出现于非定域相互作用下的形状因子的形式，可以从有关的基本粒子的内部结构来决定. 然而，如果使非定域场理论返回到定域场的非定域相互作用理论的阶段，后者所存在的困难，即不满足宏观因果律的困难，也仍然不能消除.

2.4 具有无限分量的场

非定域场理论本身具有非定域相互作用理论所没有的新特征. 在这一理论中，把质量、自旋、同位旋不同的各种基本粒子作为一个整体来考虑，这和把基本粒子看作是分开的而考虑它们之间的相互作用的定域相互作用理论的观点有明显的不同. 如果把这些特征并入定域场理论中，结果会怎样呢？例如，核子或其他基本粒子，从定域场观点来说，可以分别用具有有限分量的场的函数来描述. 但是，如果把这些基本粒子作为一个整体来考虑，就必须把出现的函数作为具有无限分量的场的量来考虑.

这是隐藏于非定域场的固有性质的一部分，如果只限于考虑这种性质，就可以完全从形式上处理. 在狄拉克发表电子的相对论方程的当时，马约拉那为了消除这个方程存在负能解的困难，另外导出了一个不同形式的方程，这个方程是具有无限分量的场所满足的. 然而，狄拉克方程的负能解并不是什么困难，而是描述正电子的解，结果马约拉那的方程没有特别受到人们注意. 但是，现在又发现了许多新基本粒子，由于需要把这些基本粒子作统一考虑，于是南部等又注意到具有无分量的场的方程.

如果用定域场来讨论具有无限分量的方程，就可以知道，满足这个方程的场的相互作用在时空上是扩展的，也就是出现了非定域相互作用. 非定域场理论和从定域场的无限分量

的方程出发的理论具有非常相似的结论，但不能说两者完全相同.

不限于无限分量的场,对任何场来说,也都是先从相对于基本粒子为静止的坐标系建立描述基本粒子的方程，然后加以推广，就成为目前的基本粒子方程；如果找不到静止坐标系,就用近似坐标系来类推. 因为基本粒子无论以多快速度运动,也超不过光速,所以把上述坐标系进行适当的洛伦兹变换，就可以知道基本粒子的状况，因此方程是可以这样建立的. 基本粒子方程本来就是按照基本粒子不能以光速以上速度运动,也就是没有光速以上的解而建立的. 然而,无限分量的场的方程就不一定是这样了. 除了表示以光速以下速度运动的基本粒子的解以外，还有表示以光速以上速度运动的基本粒子的解. 这种情况和狭义相对论并不矛盾,只是基本粒子的质量为虚数,不能实际观测到. 按照迄今为止的想法,出现这样的解只能说是方程的缺点.

但是基本粒子发生相互作用时，情况就要复杂一些. 例如,核子之间交换介子形成核力的情况,被交换的介子和实际观测到的情况不一定完全一致. 而且根据第二部分介绍的高能现象可以判断，它和观测到的相差很多，作为对象可能是很复杂的东西. 例如，可以认为，被交换的介子不是特定介子,而是可以用自旋取连续值、总称之为雷吉轨迹的东西来代替. 在相互作用过程中，与其说基本粒子以光速以下速度运动,不如说它以光速以上速度运动更为普遍一些. 可以认为,产生核力的介子几乎都是以光速以上速度出入于核子之间. 因此,如果把相互作用的机构也考虑在内,说基本粒子只能以光速以下速度运动，这是不正确的. 如果把这种情况也考虑在内,可以知道,根据以光速以下速度运动的基本粒子状况建立起来的方程，不一定能说明所有问题. 因此需要把这种情

况考虑在内，重新建立基本粒子的方程，但是在定域场理论中几乎找不到这样的线索．无限分量的场的方程具有光速以上的解，这虽然不一定是它的缺点，但是只有这样的方程也不能解决问题．

2.5 内部自由度的力学效果

如果不以各个基本粒子为对象，而以自旋值连续变化的雷吉轨迹为对象进行研究，定域场理论是不能简单说明问题的．这是因为在定域场理论中，自旋是和内部有关的自由度，而和基本粒子的外部运动状态没直接关系．然而，在非定域场理论中，自旋可以由基本粒子的时空结构推导出来，而且由于它和基本粒子的整体运动状结合在一起，因此，可以根据运动状态的变化决定自旋的变化．田中正等人指出，如果以非定域场为基础，就能够圆满地说明以光速以上速度运动的基本粒子取非整数的连续自旋值的理由．也就是说，雷吉轨迹本身和非定域场有很好的对应关系．由此可知，要把描述一个基本粒子的方程加以推广，推导出描述全体基本粒子的方程，可以以非定域场理论为基础，从雷吉轨迹遵守的方程出发来进行．这种作法和过去的作法完全相反，是以光速以上速度运动的基本粒子为基础建立方程，至于实际看到的，以光速以下速度运动的基本粒子，则包括在具有各种自旋的基本粒子之内一同描述．

建立基本粒子的方程，我们大体有两种可供选择的方法．一种方法是和过去一样，根据实际看到的以光速以下速度运动的基本粒子的行动建立方程；另一种方法是和过去完全不同，根据由高能现象得来的知识，着眼于以光速以上速度运动的基本粒子来建立方程．如果不象非定域场理论那样特别强调基本粒子的广延性问题，就容易把这两种方法看成是完全

独立的，至少不能用简单方法找出两者的关系.

对非定域场理论来说，自旋无非是基本粒子的一种力学的内部自由度而已，它标志着内部结构随着运动状态而改变的大致情况. 除此之外，还有各种力学的内部自由度. 例如同位旋也有同样作用. 那么，同位旋随着基本粒子的运动状态而改变的现象意味着什么呢？对于这个问题迄今为止还没有明确的回答，然而当前可以认为，它表示的仍然是隐藏于雷吉轨迹背后的基本粒子的关联性.

由于非定域场具有力学的内部自由度，关于基本粒子相互作用的机构，现在已经可以进行深入的研究，这是过去作不到的. 例如，为了得到和雷吉轨迹相对应的非定域场，可以设想，自旋为整数和半整数的各个基本粒子，就全体来说，必然发生某种相互作用，结果非定域场之间必然发生与作为对象的基本粒子的内部结构有密切关系的相互作用. 考察同位旋也能得到同样结果. 在强相互作用的基本粒子系统中，可以把每个基本粒子都看做是在带电空间各自以适当方式旋转的假想陀螺，它们之间的相互作用决定着它们的旋转方向. 由此可以认为，电荷独立性这种对称性是成立的. 这种情况在定域场理论中只能说现象本身就是如此，而不能作进一步的说明. 然而，在非定域场理论中，因为同位旋也能由基本粒子的时空内部结构以及运动状态推导出来，所以这种对称性也能由时空的立场来阐明. 也就是说，它给出了另一种情报，由此可以知道各个基本粒子之间怎样进行着与内部结构有关的相互作用. 以这种情报为基础，可以进一步以同样根据来研究与破坏对称性有关的电磁相互作用以及弱相互作用. 可以认为，考察基本粒子的广延性，是阐明隐藏于基本粒子背后的各种问题的关键.

3. 基本粒子和基本领域

3.1 狭义相对论的时空

前面反复地说明了基本粒子的结构问题，那里所说的结构大体是从下述四种意义来考虑的.

第一,认为各个基本粒子都是点粒子,只当两个粒子在同一时空点时才发生相互作用,并认为在一个基本粒子的周围,潜在着和它发生相互作用的其他基本粒子，结果这个基本粒子就象具有广延性一样. 由于考虑了这样的结构或者广延性,关于基本粒子的结构有了某种程度的理解.

第二,认为在目前所说的基本粒子中,有许多不是真正的基本粒子，而是两个以上的真正基本粒子的复合体. 采取这种观点时，如在第二部分中所述，当然可以预想到,除了已知的基本粒子外,还应当存在很多不稳定的粒子.

这两种观点有一个共同的缺点，就是不能解决发散的困难. 而第三种意义的结构是，需要承认有越出正统基本粒子理论即定域场的定域相互作用理论框架的某种物质存在. 例如,如果从复合模型的观点出发,就需要承认有 B 物质一类的真相不明的物质存在;或者不区别基本粒子和复合粒子,只考虑从一种旋量场出发的理论. 因为这里需要引入负几率的概念,所以这种用旋量场来描述的原始物质,实际上也就是跳出了通常基本粒子理论框架的某种物质.

第四种意义的结构是，从一开始就认为基本粒子具有广延性. 如要使允许这种意义的内部结构的非定域场理论符合狭义相对论的要求,就要出现宏观因果律发生动摇的新困难.

上述的一些尝试看来好象是从完全不同的方向进行的，但是所遇到的困难却非常相似. 为了迴避这些困难而经常地

引入了负几率．这意味着必须变革支持基本粒子理论的两个柱石中的一个柱石即量子力学．这种变革可以说是出于需要所迫而进行的；然而，由此产生的新困难又如何解决呢？目前还没有明确的线索．

那么，对两个柱石中的另一柱石即狭义相对论为什么不加以变革呢？这里有种种原因，主要原因是狭义相对论的必要性似乎已被大部分有关基本粒子的现象证实了．特别是对于碰撞前后的基本粒子的能量和动量以及符合狭义相对论要求的形式的守恒定律，就已知的所有情况来说，都能以很高的精确度成立．从历史上来说，为了使守恒定律成立，必须承认新粒子的存在．但是，一旦承认了某种粒子的存在，守恒定律永远适用的只是碰撞前后的能量和动量．也就是说，守恒定律对于几个相距较远的基本粒子是适用的．关于正在进行碰撞，亦即基本粒子非常接近时的情况，从实验上得不到任何知识．对于这种情况，狭义相对论也许不成立．

如果假定狭义相对论只在两个以上基本粒子非常接近以至于能够发生碰撞的极小空间部分不成立，又会得到什么结果呢？这样的问题看来好象很简单，实际上很复杂．观测者是在较远的位置观测碰撞现象，在离碰撞现场较远的空间，狭义相对论是成立的．这样的空间是明可夫斯基四维空间，要使其中很小一个领域不是明可夫斯基空间是很困难的．非定域场理论考虑了明可夫斯基空间内基本粒子的广延性，并认为微观因果律不成立也没有关系．但是，结果宏观因果律也不成立了，这是一个很大的困难．可以认为，这是明可夫斯基空间本身发生了局部变化．如果对时空某一小部分的结构进行不适宜的改变，就会影响整个时空，即使基本粒子远离了，它的影响也仍然存在，于是狭义相对论中的守恒定律就不成立了．那么改变时空结构，也就是跳出狭义相对论的框架是绝

对不可能了吗？当然不是绝对不可能.

3.2 广义相对论的时空

我们已跳出了狭义相对论的框架，这就是众所周知的由狭义相对论创始者爱因斯坦建立的广义相对论. 广义相对论所适用的范围是引力场起重要作用的世界，也就是具有巨大质量的天体运行的大尺度世界. 在尺度很小的基本粒子世界里，各个基本粒子的质量都非常小，引力完全可以忽略. 因此，广义相对论本身对于我们理解基本粒子的世界可能没有什么直接帮助. 然而采取广义相对论的观点时，对于物质和时空的看法，与其他物理学理论有很大不同，因此，要使基本粒子理论越过既成的框架前进，它也有很大的参考价值.

在狭义相对论中，认为物理现象是在明可夫斯基空间中，或者说这样的“容器”中发生的. 在这世界里到处都是均匀的. 空间的哪一点也没有特殊性，哪一个方向也没有特殊性，空间是均匀和各向同性的，时间也是均匀的. 它和牛顿的绝对空间、绝对时间的不同，只在于空间和时间不是独立的，而是一个四维世界. 把四维世界分为三个空间轴和一个时间轴的方法，随着观测者而不同.

但是爱因斯坦并没有满足于狭义相对论. 其理由之一是，时空中或者说“容器”中虽然存在着物质和进行着物理现象，而时空本身的确定却和这些“内容”完全无关. 从这种意义来说，明可夫斯基时空是绝对的. 在二十世纪二十年代，量子力学以牛顿力学为背景发展时，不仅没有遇到原理上的困难，而且能够圆满地说明原子世界的许多现象. 到了二十年代末期，量子力学和狭义相对论紧密结合，从此以后，成功和困难成为不可分离的并存状态，并且一直被这种状态所烦恼. 在这个时期，与其说量子力学怀疑狭义相对论，不如说量子力

学在怀疑它自身.

爱因斯坦在很久以前就怀疑狭义相对论，而且越过了它的框框. 也许因为这是他自己建立的理论,很容易产生怀疑,而且容易越过它的框框吧. 狭义相对论继承了伽利略的惯性法则，直线等速运动具有特殊的物理意义. 明可夫斯基空间是把这种特殊性作为自明的几何学性质而引入的. 物体只要不受其他影响就沿直线作等速运动的说法，即使对某一观测者来说是正确的，对另一观测者来说就不一定正确了. 对于两个彼此作旋转运动的坐标系，惯性法则不能同时成立. 如果说惯性法则对一个观测者成立,对另一个观测者就不成立,那么,这种说法是不是有根据呢？在爱因斯坦以前,马赫曾经考虑过这种说法的根据. 他设想过宇宙间所有物体中的各个物体的运动，认为相对于全体的重心作等速直线运动的观测者来说,惯性法则是成立的.

爱因斯坦认为，即使不知道宇宙间所有的物质的分布和运动状况,只要知道了某一时空领域内的力场,也就能够决定粒子在这个时空领域中的运动. 特别是在各种力场中，引力场将使粒子产生同样的加速度，而不论其质量如何. 于是他断定，引力场可以归结为时空本身的几何学结构，也就是说，如果除了引力外没有别的力作用，粒子就沿着四维时空内的测地线运动,这个四维时空的几何性质由引力场决定.特别是在完全没有引力场的领域内，时空应当是一个平坦的明可夫斯基世界,很明显,在这个世界里测地线和等速直线运动是对应的. 与此相反，在太阳的周围，时空是弯曲的，测地线应当和行星的运动相对应.

根据牛顿力学知道,行星的轨道是椭圆形的. 然而,以前述想法为背景的爱因斯坦广义相对论认为，行星的轨道不完全是椭圆，稍稍偏离一些. 他利用这种偏离圆满地说明了水

星近日点的移动.

广义相对论表明物理现象和时空结构有密切关系，这一点和现有的其他理论有本质上的不同. 然而，广义相对论虽然在引力场的几何化方面获得了巨大成功，但在其他方面并没有获得确实的成果. 例如，爱因斯坦本人以及其他许多物理学家，都曾经尝试过电磁场的几何学解释，但除了数学趣味外，还有许多值得怀疑的问题.

在大尺度世界里，重要的只是引力场和电磁场. 如果把尺度缩小，就要想到与核力有关的介子场、与力没有直接关系的电子场以及其他各种场. 在目前的基本粒子理论中，种类繁多的基本粒子都是分别用不同的场表示的. 反过来，从基本粒子理论的观点看来，引力场也应当伴随着特殊的粒子——引力子. 然而，即使这种粒子存在，也不能直接出现于基本粒子世界. 这是为什么呢？这是因为基本粒子的质量非常小，因而和引力子的相互作用极端微弱，在基本粒子互相碰撞时，引力子出现的几率极其微小的缘故.

3.3 几何学对象和量子力学对象

由以上讨论可以知道，广义相对论以及引力场本身和基本粒子理论的关系是很淡薄的；然而，广义相对论的思想方法，对于基本粒子理论今后的发展，也许有很大的参考价值. 到目前为止，我们总是认为时空是超越物理现象的固定框架. 基本粒子背后存在的微观时空和明可夫斯基世界是不是完全一致呢？这个问题谁也不能回答. 如果假定它和明可夫斯基世界不一致，那么，在哪一点上不一致呢？前面讲过，广义相对论的时空是弯曲的，明可夫斯基世界是平坦的，也许这就是上述微观时空和明可夫斯基世界的不同点吧. 基本粒子的产生和湮灭不是连续变化的，在微观时空的结构中，也许需要适合

这种不连续变化的某种不连续性. 例如，假定在时空某一点有 A 这种基本粒子和 B 这种基本粒子存在；为了把这两种情况用几何学方法加以区别，可以认为和 A 的存在相对应的时空与和 B 的存在相对应的时空相重叠而成的时空，就是物理世界. 这种意义下的时空不连续性，实际上对应于在经典力学中基本粒子是点粒子的情况. 在量子力学中，基本粒子不仅有确实存在和确实不存在这样两种不连续状态，而且还可能有存在的几率在零和 1 之间连续变化的各种不同状态中的任何一种状态.

在量子力学中，每一个状态都可以用复函数，即波函数来表示，这些函数依赖于表示基本粒子位置的三个空间坐标和一个时间坐标. 这意味着首先把时空世界的几何学点重新看做经典力学的对象，然后再看做量子力学的对象. 如果不从几何学的点出发，从一开始就设想具有广延性的图形或立体又怎样呢？从这种观点来看，第二章所讲的非定域场也可能得到新的线索，或者把刚体、弹性体等经典力学的对象从这种观点重新考虑也是有意义的. 关于这些问题下面将作较为深入的考察.

3.4 刚体、弹性体模型和非定域场

如上所述，最简单的非定域场，相当于把相互位置不断改变的两点看成是明可夫斯基空间内的量子力学对象的情况. 汤川和片山于 1964 年指出，从两点间距离可变这个自由度，能够把同位旋作为基本粒子的内部量子数推导出来. 但是关于其他量子数（例如奇异数、核子数）没有留出推导的余地. 于是高林武彦以及片山、山田英二和汤川又考虑了依赖于三点或四点的场，作为更有普遍性的非定域场. 特别是四点场，它相当于把四面体这样的几何学对象看作量子力学对象的情

况，可称之为四面体模型． 如果认为四点的相互位置是可以自由改变的，四面体形状也将不受限制地改变． 作为量子力学对象来说，这个四面体在各种形状中取哪一种形状，只能从几率的意义来决定，这个几率振幅就是波函数． 这四面体可以变为各种形状，和它相对应的自由度也有许多种，在第二部分中所讲的基本粒子的对称性，也可以由此说明． 但是也可以不改变四面体形状，只改变空间方向． 从这样的旋转自由度，可以得到基本粒子的内部角动量，即自旋． 然而，如果四面体形状和大小都没有限制， 就和普通量子力学中多体系统的轨道角动量相同，只能出现整数自旋． 如果想要得到半整数自旋，就需要把可能的变形加以下述限制． 连结四面体相对两边中点的线段共有三组，这些线段相交于一点． 如果假定这些线段之间的角度一定，只是改变长度的变形是可能的，就能出现半整数自旋的状态．

讨论到这里，我们知道，非定域场理论和最初考虑的连续体问题没有很大差异． 例如，经典力学中最简单的连续体是刚体，和三个以上质点的系统中质点间距离保持一定的情况相同，如果把它看成量子力学对象，它的自旋就可以取整数值，也可以取半整数值． 1955 年中野董夫曾试图通过相对论刚体的量子化，推导出基本粒子的自旋以及同位旋等内部量子数． 德布罗意、维叶、玻姆、高林等人，又把这种基本粒子的刚体模型加以发展，结果在这种模型中，自旋为整数时同位旋也是整数；自旋为半整数时同位旋也是半整数． 然而在实际存在的基本粒子中，既包含着象K介子那样的自旋为零、同位旋为 1/2 的情况，也包含象 Λ 粒子那样的自旋为 1/2、同位旋为零的相反情况．

这样一来，就需要更一般地考虑变形的连续体． 在经典力学中，我们熟悉的是弹性体． 原治、后藤铁夫曾经用相对

论、量子力学的方法研究了弹性体问题，得到了几项有趣味的结果. 把这方面的研究再向前推进一步，为了把二体问题或一般地多体问题作为推广了的基本粒子系来研究，就需要把理论体系按照量子场论的形式建立起来. 为了达到这样的目的，还是离开经典力学图象，回到几何学图象重新出发，也许更好一些. 关于这种想法将在下节详细论述.

3.5 基本领域的概念

前面说过，爱因斯坦把作用于物质之间的万有引力和时间、空间世界的某种几何学性质等同起来. 物质和能量的存在形式决定于时间、空间，反之物质和能量又决定时间、空间的存在形式，这是广义相对论主要思想的重要组成部分. 爱因斯坦的这种观点后来发展成为宇宙膨胀论. 但是关于微观世界的时间、空间和基本粒子的相互制约，他一点也没有提到. 以后几乎所有物理学家也都不关心这个问题.

对弄清微观世界里物质的存在形式起主要作用的是原子论的观点. 根据普朗克在二十世纪初期提出的量子论，查明了光的能量也存在着和它的频率成正比的最小单位，即能量子. 承认在物质、能量中存在着不能再分的最小单位的观点，是广义原子论观点. 把这种观点再进一步推广，设想在时间、空间方面也存在着不能再分的最小领域，又会怎样呢？这样作时，也许微观世界的物质、能量和时间、空间，就能相互适合起来.

这里我们把这个最小领域称之为“基本领域”. 它首先以几何学的概念出现. 为了容易理解，先不考虑时间的，而考虑三维空间内的基本领域. 为了和基本领域相适应，基本粒子必须具有广延性. 首先从最朴素的观点来考虑，假定基本粒子象德谟克利特的原子那样，具有一定形状和大小，这样，它在

某一时刻所占据的空间领域，就直接等于基本领域． 反过来说，如果以某种方法使能量进入某一基本领域，结果它就成为某种基本粒子． 当然，基本粒子不是单纯的几何学对象．因此，下一步再把每一个基本粒子都看成一个经典力学的刚体． 为了尽可能地使问题简单起见，设想一些半径相同的微小球形刚体，并且装在一个箱子里．在某一时刻，这些刚体分别在不同的位置占据一个半径相同的球形基本领域．随着时间的推移，这些刚体一面互相碰撞，一面作不规则的运动，所占据的基本领域也不断地改变．为了把这种变化过程作近似表示，想象箱里的空间被不能重合的尽可能多的基本领域所充满（多少剩下一些空隙）．这样，如果知道在各个时刻有哪些基本领域被占据着，有哪些基本领域则空着，就能知道由许多刚体构成的经典力学系统的运动状况（近似的）．这样的图象也许被看做是十九世纪后半期发展起来的气体分子运动论的粗糙代用品．这种图象看来好象很粗糙，然而，只有考虑到基本粒子不是经典力学的对象，而是量子力对象时，才能体会到它的意义．

为了说明这一点，需要回顾一下非相对论量子场论的发展过程．电子也好，核子也好，介子也好，总之考虑只有同一种基本粒子存在的情况． 为了简单起见，假定这些基本粒子没有自旋等自由度，而且是没有大小的质点． 并假定它们的运动速度比光速小得多，可以不考虑相对论效应．这样，这些基本粒子在某一时刻分别占据三维空间的某一点．这些点的位置随着时间而改变．这样的运动的全体状况可以用量子力学来描述，为此而引入了量子化场的算符． 这是二次量子化手续，更进一步加工整理，使它满足狭义相对论的要求，就成为正统的量子场论．

如果认为基本粒子本身不是点粒子，而是具有广延性的

粒子，又将怎样呢？关于这种情况的最自然想法是，不是引入把场作为空间点的函数并进行量子化而得到的算符，而是考虑把场作为基本领域的函数进行量子化．这样一来，用量子力学来描述具有广延性的基本粒子，就是向基本领域的量子场论发展．

这种三维基本领域的场，怎样随着时间而变化呢？描写这种变化的是场方程．在普通的量子力学中，这个方程是关于粒子系统的波函数的薛定格方程．这是一个微分方程，如果给出了某一时刻的波函数，就可以把下一时刻，即无限小时间之后的波函数作为方程的解求出．自牛顿提出运动方程以来，人们都相信，物理学的基本法则必定是关于时间的微分方程．量子力学以及从来的量子场论也不例外．那么，基本领域的场的理论将怎样呢？如果不考虑相对论而从三维基本领域出发，结果和薛定格方程一样，基本领域的波函数的方程是关于时间的微分方程；然而也可能不是这样．前面说过，最朴素的基本领域理论，可以看做是气体分子运动论的粗糙代用品．反正是粗糙的，那么就索性再粗糙一些，不去连续地追踪它随着时间的变化，只满足于知道它在很短几段时间内的变化状况．例如，承认在时间上有最小单位 τ，只考虑在它的整数倍的时刻基本领域被占据的状况．这样，基本领域方程就不是关于时间的微分方程，而是差分方程了．也就是说，需要的是这样的方程：如果给出了在时刻 t 的波函数，就能由它决定在时刻 $t+\tau$ 的波函数．

物理学家都只习惯于微分方程，提到差分方程可能一时领会不了．然而，具有差分性格的现象不断地出现在人们的文明生活中．电光快报就是其中一例．用许多电灯泡排列成矩阵，其中一部分在短时间内发光组成文字，然后这些灯泡的电光消灭，经过同样长短的时间之后左侧的灯泡发光．看来

就象表示新闻的文字向左移动一样. 很明显,在这种情况下,不仅时间上的变化具有差分的性格, 而且空间的变化也具有差分的性格.如果从基本领域的概念出发,表示基本法则的方程在时间和空间方面自然都要成为差分方程的形式. 在以来乌起保斯、德谟克利特为代表的希腊原子论中,好象没有出现时间-空间、特别是时间的最小单位的概念. 而在古代印度却有"刹那"一词,它表示时间的最小单位,这是很有趣味的.

但是在非相对论的考察中,基本领域的空间广延性,它的不可分性和被占据的基本领域的分布随着时间的变化, 暂时可以看做是独立的. 因此, 说法则对于时间是微分的或差分的都可以. 如果考虑相对论,情况就不是这样了,这个问题将在下一节中讨论.

3.6 四维基本领域的理论

在相对论中,三维空间和一维时间不是彼此独立的,而可以用四维世界这个图象来统一掌握.因此,空间的不可分性和时间的不可分性有密切的关联. 关于基本领域, 设想一个由四维空间里的三维闭合曲面围成的领域,然后从这里出发,较为适宜. 在一般情况下,决定一个闭曲面的位置、大小以及形状需要无限多个参数. 就基本领域来说, 可以只考虑其中能满足各种条件的领域. 事先一义地决定这些限制条件是很困难的. 首先对基本领域给予一些自由度, 根据这些自由度即使不能推导出基本粒子的所有内部量子数, 也能够推导出其中几个重要的量子数. 片山和汤川从 1967 年以来曾经以四维椭圆体领域为主进行了考察. 这个椭圆体领域是由明可夫斯基空间内的三维二次闭曲面围成的. 每一个这样的领域都可以由十四个参数来表征. 这十四个参数是: 决定椭圆体中心位置的四个参数, 决定椭圆体四个主轴方向所需要的六个

参数，四个主轴的长度．但是，基本领域必须是很小的，因此可以假定这个四维体积是很小的一定值，于是剩下了十三个参数．

如果把这样的基本领域看成量子力学的对象，它的状态就可以用以十三个参数为变数的波函数来表示．中心的空间坐标和时间坐标都是正则共轭算符，分别表示基本领域全体的动量和能量．正确地说，如果基本领域的波函数能成为和这些算符的某一组本征值相对应的本征函数，就能够得到以这些本征值为动量和能量的基本领域的状态．在这种情况下，如果能量的绝对值不小于动量的绝对值，就能够使这种状态和具有实数质量的粒子相对应．如果把能量的绝对值小于动量的绝对值的情况也考虑在内，就需要使这种状态和质量为虚数的粒子，亦即超光速运动的粒子相对应．不能认为有这样奇怪的粒子吗？还是本来就存在着这样的粒子过去没有注意呢？关于这样的问题还有种种考虑的余地，这里不作深入的讨论．

如果把表示四个主轴的方向和长度的变数适当地组合起来构成八个新变数，并且对这些变数引入正则共轭算符，就能作出关于基本领域的自旋算符以及其他以内部量子数为本征值的算符．利用这些算符可以由基本领域的基态（即能量、动量、自旋以及其他量子数都等于零的状态），也就是由空虚的基本领域作出许多和具有各种能量、动量、自旋等量子数的基本粒子相对应的状态．如果把这种情况用固体物理中准粒子的想法来类推，就可以认为，具有自旋等量子数的准粒子进入了空虚的基本领域中，把基本领域化装成各种基本粒子．

基本领域的质量一方面随着进入其中的准粒子而改变，一方面又和能量、动量有关．如果质量是不等于零的正数，它

就等于静止基本粒子的能量. 能量、动量为一定的状态的波函数，表示频率和波长为一定的平面波. 也可以认为是关于时间、空间变数（现在情况下是基本领域中心的时间、空间坐标）的某种微分方程即波动方程的解. 这样的微分方程能够决定某基本领域和使它的中心在时间方向和空间方向产生无穷小位移所得到的几个基本领域之间的关系.

如前节所述，如果立足于空间领域（此处为时间、空间的四维领域）的不可再分性的假说，认为基本领域理论的基本法则（不只是空间的，也是时间的）是差分方程，也许更好一些. 它的性质和普通的波动方程相类似，如果再假定这种差分方程（正确地说差分的方程）具有相对论的不变性，它的解就要比微分方程多得很多，一般地说，也就把对应于无限多的具有不同质量的基本粒子的波函数都包括在内了.

这种新情况包含着各种问题. 看来好象包含着负几率这种不受欢迎的性格，然而，如果采取适当的解释方法，一方面可以迴避负几率的困难，同时还可以对于因果律问题给予新的展望. 也就是说，好象能够一方面改变微观因果律，一方面又使宏观因果律成立. 但是关于这一点，还没有进行充分的研究，所以不能下结论.

3.7 时空和量子化

前节主要讨论了把基本领域看做量子力学对象时的波函数的问题. 这相当于处理具有广延性的基本粒子的一体问题. 为了处理多体问题，还需要把用波函数表示的基本领域的场进行量子化. 关于量子化的手续，把从来的定域场的量子化方法加以适当修改，也许就可以了. 然而，关于具有广延性的基本粒子的场的量子化，用和过去不同的方法，即所谓“四维量子化”方法来进行，可能更适宜一些. 这里把四维量

子化的基本想法简单地说明如下.

宏观的时空是四维连续体. 时空的各点可以用四个实数来指定. 经典力学中的质点在这个时空连续体中画出一条世界线. 在量子力学中，把基本粒子看做点粒子，这个点粒子不能存在于一个确定的世界线上. 虽说“能够知道存在于世界线中哪一条线上的几率是多少”，但用这种说法来描写新的情况也是不充分的. 代替世界线而出现的是时空坐标的复函数，它可以用“几率振幅”这一奇妙术语来表示. 不仅如此，基本粒子是可以产生和消灭的，而且还具有这样的性质：什么时候在哪里产生或消灭，在一般情况下是不能指定的. 反过来说，如果知道在某一点上产生了基本粒子(由时间和能量或位置和动量之间的测不准关系很容易推定出来)，这个基本粒子的质量就完全是测不准的. 从另一方面来说，具有一定质量的基本粒子在相当长时间内持续存在，这意味着在时空各点上基本粒子的产生不是彼此独立的，而必须具有特殊的关联性. 从这种观点对基本粒子场进行新的量子化，就是四维量子化. 这里首先假设了在时空连续体各点上基本粒子产生或消灭的算符，并认为在不同时空点的算符都是彼此独立的. 这意味着设想在能够实际存在的基本粒子背后存在着一种混沌的世界，其中潜藏着认为是发生了但又立即消失了甚至连质量也不确定、也不能说是粒子的物质.

然而，在现实的自然界里，只存在着具有一定(一般说近似地一定)质量和自旋等内部量子数的基本粒子. 这说明自然界存在着从混沌世界选择出这种基本粒子群的规律，这就是物理学法则. 然而，就点粒子的场来说，四维量子化和普通量子化是等同的.

问题不在于点粒子，而在于具有广延性的粒子；或者说，问题在于基本领域的量子化用哪种方法进行更好一些. 如果

采用四维量子化的方法，就可以不从时空一点产生或消灭粒子的算符出发，而从某一时空领域内一举产生或消灭具有广延性粒子的算符出发；因此，对于具有广延性粒子的图象来说，四维量子化方法好象更适宜一些．然而，四维量子化的基本想法和从来量子化的想法有很大不同，因此，随着它出现的各种量的物理意义也要有很大的差异．关于这些问题还有待于今后的研究．

前面已经反复地说明了，在基本领域理论的背后总是设想了时空的四维连续体．这种想法和认为时空本身是不连续的这样观点是非常相似的．从这种意义上说，时空本身的量子化将来也许需要从新考虑，现在来讨论这样的问题还为时尚早．

基 本 粒 子 表

分 类	名 称	同位旋(奇异数)*	自 旋	宇 称	质 量(兆电子伏)	幅 度(兆电子伏)
核 子	$N\begin{cases}p\\n\end{cases}$	1/2(0)	1/2	+	938.3 939.6	— —
	N'(1470)		1/2	+	1470	210
	N(1518)		3/2	−	1525	115
	N(1550)		1/2	−	1550	130
	N(1680)		5/2	−	1680	170
	N(1688)		5/2	+	1690	130
	N'(1710)		1/2	−	1710	300
	N(2190)		7/2	−	2200	250
	N(2650)		11/2	−	2650	360
	N(3030)		?	?	3030	400
Δ粒子	Δ(1236)	3/2(0)	3/2	+	1236	120
	Δ(1640)		1/2	−	1640	180
	Δ(1920)		7/2	+	1950	220
	Δ(2420)		11/2	+	2420	310
	Δ(2850)		15/2	+	2850	400
	Δ(3230)		?	?	3230	440
Z粒子	Z(1865)	0(+1)	?	?	1865	180
Λ粒子	Λ	0(−1)	1/2	+	1115.5	—
	Λ(1405)		1/2	−	1405	50
	Λ(1520)		3/2	−	1519	16
	Λ'(1670)		1/2	−	1670	18
	Λ'(1690)		3/2	−	1690	45
	Λ(1750)		1/2	+	1750	
	Λ(1815)		5/2	+	1816	74
	Λ(1830)		5/2	−	1827	76
	Λ(1870)		7/2	+	1870	
	Λ(2100)		7/2	−	2100	140
	Λ(2350)		?	?	2350	210
Σ粒子	$\Sigma\begin{cases}\Sigma^+\\\Sigma^0\\\Sigma^-\end{cases}$	1(−1)	1/2	+	1189.5 1192.5 1197.4	— — —
	Σ(1385)		3/2	+	1382	37
	Σ(1610)		1/2	+	1610	
	Σ(1660)		1/2	−	1660	50
	Σ(1690)		3/2	+	1690	120
	Σ(1770)		5/2	−	1767	95
	Σ(1910)		5/2	+	1910	60
	Σ(2030)		7/2	+	2030	120
	Σ(2250)		?	?	2250	200
	Σ(2455)		?	?	2455	140
	Σ(2595)		?	?	2595	140
Ξ粒子	$\Xi\begin{cases}\Xi^0\\\Xi^-\end{cases}$	1/2(−2)	1/2	+	1314.9 1321.3	— —
	Ξ(1530)		3/2	+	1530	7

（续表）

分　类	名　称	同位旋（奇异数）*	自　旋	宇　称	质　量（兆电子伏）	幅　度（兆电子伏）
	$\Xi(1815)$		3/2	−	1815±3	16
	$\Xi(1930)$		?	?	1930	140
Ω粒子	Ω^-	0(−3)	3/2	+	1672	—
π介子	$\pi\begin{cases}\pi^{\pm}\\ \pi^0\end{cases}$	1(0)	0	−	139.6 135.0	— —
	$\rho\begin{cases}\rho^{\pm}\\ \rho^0\end{cases}$		1	−	755～775 760～780	110～140 90～150
	δ		?	?	962	<5
	π_V		0	+	1016	25
	A_1		1	+	1070	80
	B		1	+	1220	129
	A_2		2	+	1270～1370	30
	F_1		?	?	1650	～70
	π_A		?	?	1654	109
	ρ_V		?(3)	?(−)	1660	169
	$R_1R_2R_3R_4$		?	?	1650～1850	
	S		?	?	1929±14	≤35
	T		?	?	2195±15	≤13
	U		?	?	2382±24	≤30
η介子	η	0(0)	0	−	549	$2.3\cdot10^{-3}$
	ω		1	−	783	12
	$x^0(\eta')$		0	−	958	<4
	H		1	+	990	80
	Φ		1	−	1019	3
	η_V		0	+	1069	80
	f		2	+	1263	141
	D		1	+	1285	32
	E		0	−	1424	71
	f'		2	+	1514	73
K介子	$K\begin{cases}K^+(K^{-1})\\ K^0(\bar{K}^0)\end{cases}$	1/2(+1)	0	−	493.8 497.8	— —
	K^*		1	−	893	49
	K_V				1100	～400
	$C(K_A)$		1	+	1230	60
	K_A		1	+	1320	60
	K_V'		2	+	1419	89
	$L(K_A)$		?	?	1781	72
轻粒子	$\nu\begin{cases}\nu_e\\ \nu_\mu\end{cases}$	—	1/2	+	～0	—
				+	<2.1	—
	e		1/2	+	0.5	—
	μ		1/2	+	105.7	—
光　子	γ	0,1(0)	1	—	0	—

* 反粒子的奇异数符号相反

简　略　年　表

年代	人　名	事　迹
前 500～400	来乌起保斯、德谟克利特	提倡原子论
1687	牛顿	建立牛顿力学，引入超距作用的概念
1808	道尔顿	提倡化学原子论
1811	阿佛加特罗	引入分子论的概念
1820	奥斯忒	发现电流的磁作用
1831	法拉第	发现电磁感应定律，引入场的概念
1861	麦克斯韦	推导出电磁场方程，提倡光的电磁波说
1869	门德列夫	发现周期律
1888	赫兹	证实电磁波的存在
1892	洛伦兹	提出电子论、物质和电磁场的相互作用理论
1895	伦琴	发现X射线
1896	贝克勒尔	发现放射性
1897	汤姆逊	发现电子
1900	普朗克	提出量子假说
1905	爱因斯坦	提出光量子说、狭义相对论
1908	盖革	发明计数器
1911	卢瑟福	建立原子模型
1912	威尔孙	发明雾室
1912	赫斯	确认宇宙线
1913	玻尔	提出原子光谱理论
1915	爱因斯坦	提出广义相对论
1919	卢瑟福	进行原子核破坏实验
1924	德布罗意	提出物质波的概念
1925	海森堡	建立量子力学(矩阵力学)
1926	薛定谔	建立量子力学(波动力学)
1928	狄拉克	建立相对论的电子论
1929	海森堡、泡利	建立量子电动力学
1930	劳伦斯	发明迴旋加速器
1931	泡利	提倡中微子说

（续表）

年代	人　　名	事　　迹
1932	安德逊	发现正电子
1932	查德威克	发现中子
1934	费米	提出β衰变理论
1935	汤川秀树	提出介子理论
1937	安德逊、尼德迈尔	发现宇宙线介子(μ介子)
1939	哈恩、史特拉斯曼	发现原子核分裂
1942	坂田昌一、谷川安孝、井上健	提出两种介子理论
1943	朝永振一郎	提出超多时间理论(建立共变量子电动力学)
1945	麦克米伦、维克斯勒	发明同步加速器
1947	泊叶尔、拉迪斯	确认两种介子
1947	罗切斯特、巴特拉	发现新粒子
1947	兰姆、来瑟福	测定氢能级的精细结构
1948	革德那、拉迪斯	用人工方法创生π介子
1949	汤川秀树	提出非定域场理论
1950	费米、安德逊	发现最初的共振态
1951	武谷三男、中村诚太郎、佐佐木宗雄	提出核力的方法论
1953	盖莱塞	发明气泡室
1953	海森堡	提出非线性场理论
1953	来因兹、柯望	确认中微子
1954	中野董夫、西岛和彦、盖尔曼	提出基本粒的分类选择规则
1955	塞古来、钱巴林	发现反质子
1956	坂田昌一	提出基本粒子的复合模型
1956	李政道、杨振宁	提倡宇称不守恒
1956	玻福斯塔	发现核子的电磁结构
1957	吴健雄	验证宇称不守恒
1957	福井崇时、宫本重德	发明放电室
1959	雷吉	提出雷吉假说
1959	小川修三、克莱因、山口嘉夫	基本粒子的对称性
1961	盖尔曼、内曼	提出八重态说
1962	布鲁海文小组	发现μ中微子
1966	汤川秀树	引入基本领域的概念
1968	汤川秀树、片山泰久	发展基本领域理论