

基本粒子发现简史

楊 振 宁 著



上海科学技术出版社

基本粒子发现简史

楊 振 寧 著

内 容 提 要

本书系根据作者于1959年在美国普林斯登大学担任凡·纽兴讲座时的讲稿修订而成,适合于大学物理系师生以及物理工作者阅读。书中按照历史发展次序叙述了六十年来在基本粒子物理学领域内的重要发现,最后并着重讨论了宇称守恒问题。

ELEMENTARY PARTICLES

(A Short History of Some Discoveries in Atomic Physics)

Princeton University Press, 1962

基本粒子发现简史

杨振宁 著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷十二厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 2.25 插页 4 字数 40,000

1963年9月第1版 1979年6月第2次印刷

印数 3,601—103,600

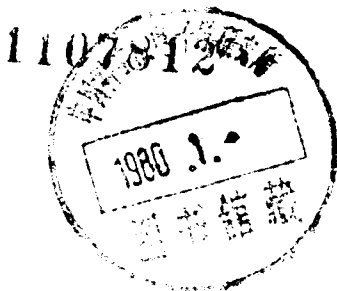
书号 13119·524 定价 0.35 元

53.833
700

本书原来是用英文写的,书名为 Elementary Particles (A Short History of Some Discoveries in Atomic Physics), 是楊振宁于 1959 年 11 月在美国普林斯登大学为凡紐兴讲座 (Vanuxem Lectures) 所作演讲的讲稿略經修节而成,并在 1962 年初由普林斯登大学印刷所出版。該演讲原来是专为大学中对科学有一般兴趣的听众而作的,因此虽然所牵涉到的問題有不少是目前基本粒子物理学中最突出和最深奥的問題,可是并不要求讀者具备高深的物理学知識。本书英文本問世后不久即有逕譯成俄文、德文和意大利文之洽議,而中文本則尙付闕如。为此,我与范世藩不揣謏陋,将其譯出,以嚮讀者,尙祈不吝指正。

楊振玉

1962 年 11 月于上海



本书主要是根据1959年11月我在普林斯登大学(Princeton University)担任凡紐兴讲座(Vanuxem Lectures)时的讲稿略加修訂而成。这些讲座是专为大学中对科学有一般兴趣的听众而設立的。通过采用简单的詞句来叙述发现基本粒子过程中所包含的种种概念,我試图向听众描繪过去六十年来在探索物质結構方面的研究工作的概况。当然,一种概念,特别是科学概念,除非在促使它形成和发展的知識基础上加以确切解釋,便不会具有充分的意义。然而我希望类似本书这样一种叙述性的历史,即使不能对主题作适当的討論,却可以稍稍表达出物理学家在探討这种問題时所具有的精神和所处的气氛。

书中插图的来源可以在书末找到。其中图39的騎士图是爱許尔(M. C. Escher)先生画的,我深深地感謝他允許我采用这张图。

我感謝我的妻子試讀讲詞手稿以便我能了解內容的易懂程度和表达清楚程度。她的許多建議看来是极其宝贵的。我还感謝伊莉沙白·高尔曼(Elizabeth Gorman)夫人在准备出版本书的各个方面所給予的十分得力的帮助。同时,我也很感謝普林斯登大学印刷所威尔逊(J. F. Wilson)先生在制作本书插图时所給予的帮助,特别是图36是按他的意見衍化而来的。

楊振宁

1961年6月于普林斯登大学

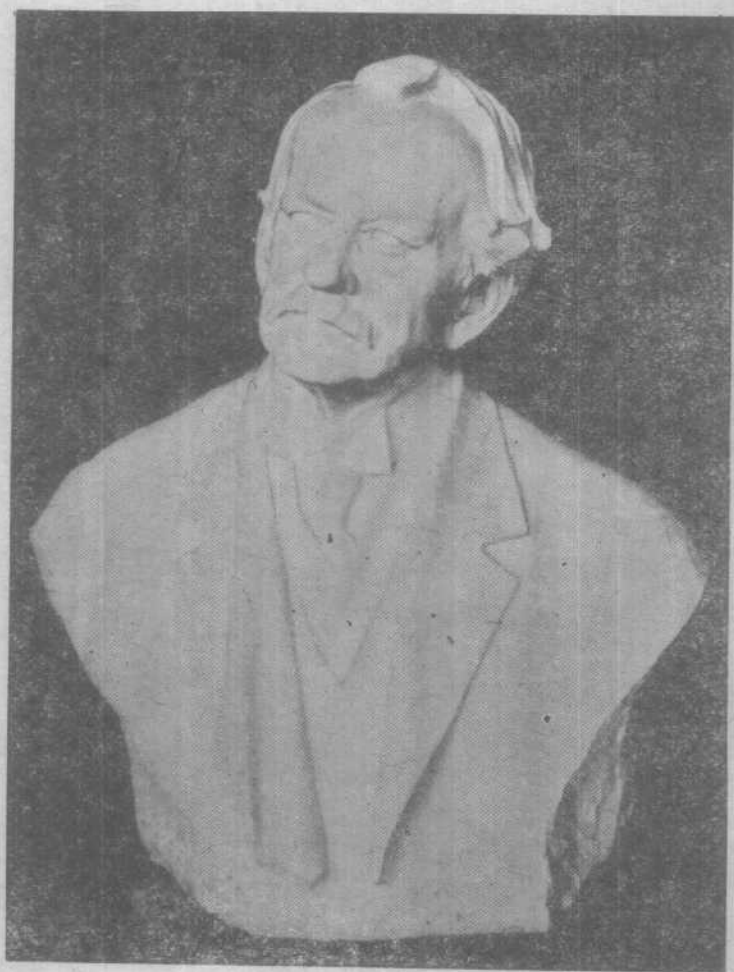
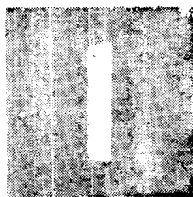


圖 1

在上世紀末本世紀初，物理學明顯地正在進入一個新時代的黎明時期。不僅經典力學和法拉第-麥克斯韋 (Faraday-Maxwell) 電磁理論的輝煌成就已經使經典的宏觀物理學時代勝利結束，而且各方面都出現了新的現象、新的疑難、新的激動和新的預見。陰極射線、光電效應、放射性、塞曼 (Zeeman) 效應、X-射線以及里德伯 (Rydberg) 的光譜譜綫定律都是當時的新的發現。當然，在那個時候還很難預測這個新時代究竟將包含些什麼內容。在其他一些問題中，人們對於電可能具有的原子結構曾經進行過很多的討論。但是要知道，雖然在很久以前就已經有人設想關於物質原子結構的概念，但是這種設想不能被載入到科學著作中去，因為除非有定量的實驗證據，沒有任何一種哲學性的討論能夠作為科學的真理來加以接受。例如晚至 1897 年，十九世紀後葉物理學界中的一位大師開耳芬勳爵 (Lord Kelvin) 仍舊寫道¹：“電是一種連續的、均勻的液體”（而不認為它具有原子結構）的意見還值得加以謹慎的考慮。

當同一年，湯姆孫 (J. J. Thomson) 完成了他的有名的實驗，測定了陰極射線的電荷和質量的比值 e/m 以後，上述的考慮就不再是必要的了。這裡我不能不給你們看一下圖 1——一位最先打开通向基本粒子物理學大門的偉人的莊嚴的半身像照片（這是根據他的著作《回憶與感想 (Recollection and Reflections)》中的圖复制的)。

圖 2 是湯姆孫所使用的儀器的照片。圖



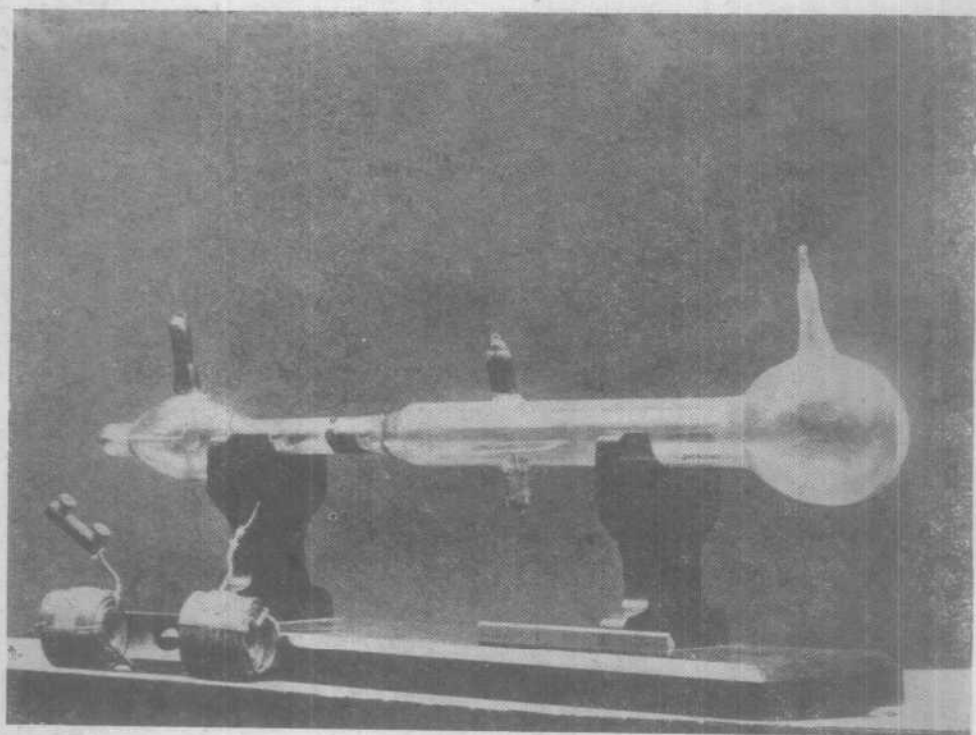
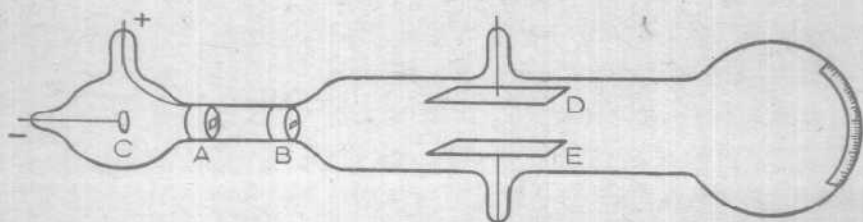


图 2

3 是仪器的简图。从阴极 C 发出的阴极射线，穿过用来将阴极射线限制成为细束的狭缝 A 和 B，然后再穿过 D 和 E 之间的空间，最后在管子右端带有标尺的屏上加以观察。将板极 D 和 E 充电，会引起细束向上或向下偏转。偏转的方向说明细束所带的电荷是负

图 3



的。然后在D和E之間，再用图2所示的綫圈加上一個方向和书的平面垂直的磁場。可以觀察到，磁場也使細束产生向上或向下的偏轉，而且正和它帶有負电荷时相符。通过平衡抵消由电場和磁場产生的偏轉，就能够計算細束的速度。然后，从电場或磁場单独产生的偏轉幅度，可以計算出細束組成部分的电荷和质量的比值 e/m 。

也許有人會問，为什么看来是这样簡單的一个實驗，在以前竟然會沒有人进行过？湯姆孙本人在以后所写的文章中回答了这个问题²：

“我使一束阴极射綫偏轉的第一次嘗試是使它通过固定在放电管内的两片平行的金属板之間的空間，并且在金属板之間加上一個电場。結果沒有产生任何持續的偏轉。”

然后他解釋了他所猜想的困难的根源，繼續写道：

“根据这种看法，偏轉之所以沒有出現是由于有气体存在——压力太高——因此要解決的問題就是要获得更高度的真空。这一点說起来比做起来容易得多。当时高真空技术还处于发軔阶段。”

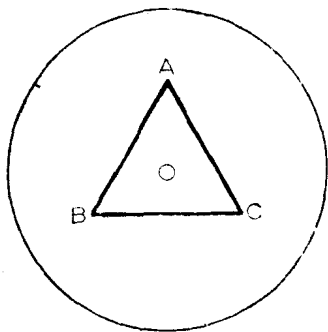
事实上，正是象赫茲 (H. Hertz) 这样一位物理学家——电磁波的发现者——以前曾經进行过同样的實驗³，而且錯誤地导致了这样的一种結論：阴极射綫是不帶电的。这段插曲最清楚地表明了一个基本事实，技术的改进和实验科学的进展是相輔相成的。我們以后还会遇到这个基本真理的更多的

例証。

湯姆孫求得的阴极射線的 e/m 的比值，比在电解过程中测定的离子的相应数值要大得多，它們之間相差达几千倍。湯姆孫断定阴极射線是由质量比离子小得多的粒子所組成，而且帶有負电荷。他称这些粒子为“微粒”，并稱它們所帶的电荷——代表电荷的基本单位——为“电子”。不过，在后来人們所习用的名詞中，粒子本身就被称为电子。这样便誕生了被人类所認識的第一个基本粒子。

几乎与此同时，湯姆孫和他的学生們在其他实验中也近似地测定了离子所帶电荷 $+e$ 的数值。湯姆孫于是对原子結構这样一个基本問題进行了探討，并且提出了如下的假設：一个原子包含着数量为 Z 的电子，每个电子帶有电荷 $-e$ ，以平衡位置埋置在連續分布的、总量为 $+Ze$ 的正电荷中，形成一个不帶电的原子。原子的质量存在于分散的正电荷中。由于电子很輕，因此很容易受到扰乱。当受到扰乱时，它就圍繞着平衡位置振蕩，并由此产生輻射。图4是湯姆孫于1903年在耶魯大学 (Yale University) 担任西列曼講座 (Silliman lecture) 时所画的一張包括三个电子的原子图。在假定正电荷作均匀球形分布后，湯姆孫計算了电子的振蕩頻率，而且断定它們就是在光譜中所觀察到的頻率。利用这个方法，他得到了非常准确的結論——原子的半徑約为 10^{-8} 厘米！

图 4



下一个主要的进展来自 1911 年卢瑟福

勳爵 (Lord Rutherford) 对于 α 粒子穿过物质薄箔的研究。 α 粒子是在天然放射性中发现的, 在 1911 年左右, 就已经知道它是带有电荷为 $+2e$ 、质量为氢原子四倍的粒子。汤姆孙曾经在这以前指出, 由于下列理由, α 粒子穿过他所假想的原子时的路径多半将是一条直线: (i) 和电子相比, α 粒子的质量很大, 因而将不因电子而产生偏转。(ii) 在原子中, 正电荷具有分散分布的性质, 因而它们对 α 粒子的影响也很微弱。因此一个汤姆孙原子不能使 α 粒子产生大角度偏转。所以卢瑟福推定, 由于薄箔很自然地包含有许多原子, 因而 α 粒子穿过薄箔后所产生的任何大角度偏转, 将是许多同方向小角度偏转的统计巧合。和这一类统计波动的通常情况一样, (a) 大角度偏转的偏转角度的分布应遵循高斯 (Gauss) 误差曲线, (b) 偏转的均方根角应与 α 粒子和原子相遇次数的平方根, 或与薄箔厚度的平方根成正比。卢瑟福指出, 这两个结论都和当时已有的实验数据不符。因而他又提出另外一种假设——原子中的正电荷集中在一个很小的区域中。事实上, 从实验数据可以推断, 这个区域的直径必须小于 10^{-12} 厘米。这就是著名的卢瑟福的原子图象, 它由一个带有电荷 $+Ze$ 的小核和 Z 个围绕核的电子所组成。一年之后, 他的学生盖革 (Geiger) 和马斯顿 (Marsten) 提出了这种原子图象的出色的实验证据。

卢瑟福的发现, 对于当时的物理学家和化学家来讲是一个巨大的震动。当时, 汤姆

孙正在剑桥的卡文迪许实验室 (Cavendish Laboratory in Cambridge), 而卢瑟福则在曼彻斯特 (Manchester)。以后, 尼耳斯·玻尔 (Niels Bohr) 在 1930 年, 在他的法拉第讲座 (Faraday Lecture) 中讲道⁴:

“对于每一个象我这样有幸在二十多年前访问过剑桥和曼彻斯特物理实验室, 并且在一些伟大的物理学家的启示下工作过的人, 几乎每天都亲眼看到前人所不知道的自然界事物的被揭露。这是一种永远难忘的经验。我记得, 1912 年春天在卢瑟福的学生中展开的, 对于原子核的发现所展示的整个物理和化学科学前景的讨论的热情, 犹如发生在昨天那样。首先我们意识到, 原子的正电荷局限在实际上是无限小的区域内, 将使物质性质的分类大大地被简化。事实上, 这样就可能认识到在那些完全取决于原子核总电荷和质量的原子性质和那些直接依赖于其内部结构的原子性质之间的深远的区别。根据所有经验, 放射性是后一类性质的典范, 它与物理和化学条件无关。另一方面, 物质通常的物理和化学性质, 首先取决于原子的电荷和质量, 也取决于围绕原子核的电子的位形。原子对外界影响的反应就是由这种电子的位形所决定的。此外, 在一个孤立而不受外界影响的原子中, 必须认为, 这种电子的位形几乎全部由原子核的电荷所决定, 而和原子核的质量关系不大。与电子的质量比较, 原子核的质量是如此巨大, 因此和电子的运动相比时, 作为第一级近似, 原子核的运动可以忽

略不計。从帶核的原子模型得出的这些簡單推論，确实提供了对于下列事实的直接說明：两个原子量不同而且具有相当不同的放射性質的元素，可能在其他性質方面是如此地相似，以致不能通过化学方法將它們分离开来。”

在同一講的較后部分，他又講道：

“总结这一情况，我們可以說，涉及物質的一切普通性質的相互联系方面，卢瑟福的原子模型放在我們面前的任务使人們追忆起哲学家古老的梦想：将对自然規律的解釋还原为对純粹的數的考慮。”

也就是在这样一种充滿着新的发现所引起的激动和期待更基本的，更有普遍意义的发现来临的气氛中，玻尔提出了他的著名的氢原子理論。

卢瑟福和玻尔的工作給我們提供了如图5所示的基本粒子图。图中，横坐标代表电荷量，縱坐标形象地代表粒子的质量(尺寸不按比例)。质子 p 是氢的原子核，以 γ 标记的无质量的光子代表电磁輻射的量子，它有自己的光輝的历史。馬克斯·普朗克(Max Planck)在研究黑体輻射理論的工作中，曾經得到一个和实验結果相符合的经验公式。然而这个公式和电磁輻射的经典概念相矛盾。为了解释这个经验公式，他在1901年大胆地假定了电磁輻射只能以某种单位或量子来釋放或吸收。每个量子具有能量 $h\nu$ ，其中 ν 是輻射的頻率， h 是普朗克所引进的一个普适常数，以后就称为普朗克常数。这个关于能

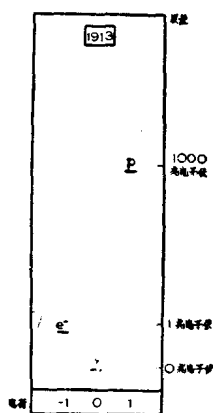


图5 見后頁

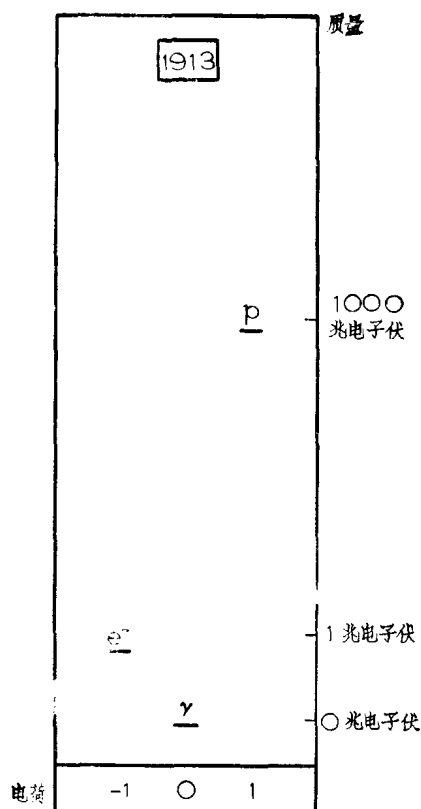


图 5

(质量只是形象地标明,尺寸不按比例)

量在物质和辐射场之间转换的量子化概念是如此地富有革命性,因此只能来自于普朗克所特有的那种彻底和坚持的研究工作中。这个概念在 1905 年为亚尔培特·爱因斯坦 (Albert Einstein) 所接受,并加以讨论和具体发展,而对玻尔建立起他的原子理论起了重大的作用。

在 1913 年以后的年代中,物理学家曾经尽了巨大的努力,特别是通过玻尔的对应原

理,来求得对量子概念更为全面的了解,并且将原子的化学性质和量子结构联系起来。对于我们这些在事情已经弄清楚、量子力学已经最终建立后才受教育的人来讲,在量子力学问世之前的那些奥秘的问题和大胆探索的精神,同时充满着希望与失望的情况,看来几乎象是奇迹一样。我们只能以惊讶的心情来揣想,当时的物理学必须依靠着明显和不能自相一致的推理来达到正确的结论,那是怎样的一种状态。

正象我们大家都知道的那样,量子力学的发展在1924~1927年达到了顶点。在那几年中带有强烈戏剧性的历史,仍有待于人们去叙述。让我在这里援引奥本海默(J. R. Oppenheimer)1953年在他的莱斯讲座(Reith Lecture)中所讲的,以后又以《科学和常识(Science and the Common Understanding)》为标题出版的小册子中那一段美丽而动人的描述³:

“我们对原子物理的理解,即对所谓原子系统量子理论的理解,起源于本世纪初,而对它所作的辉煌的綜合与分析则完成于二十年代。那是一个值得歌颂的时代。它不是任何个人的功績;而是包含了不同国家許多科学家的共同努力。然而从开始到結束,玻尔那种充满着高度創造性、銳敏和帶有批判性的精神,始終指引着、管束着事业的前进,使之深入,直到最后完成。那是一个在實驗室耐心工作的时期,是一个进行有决定意义的实验和采取大胆行动的时期,同时也是一个带

有許多錯誤的開端和許多站不住腳的臆測的時期。那是一個包含着真摯的通信和匆忙的會議的時代，是一個辯論、批判和帶有輝煌的數學成就的時代。

“對於那些參加者，那是一個創造的時代，在他們對事物的新的認識中既感到滿足，也存在着恐懼。這也許不會作為歷史而全面地被記錄下來。作為歷史，它的再現將要求象記錄奧地潑斯 (Oedipus)* 或克倫威爾 (Cromwell)** 動人的故事那樣崇高的藝術，然而這個工作的領域却和我們日常經驗的距離是如此地遙遠，因此很難想象它能夠為任何詩人或任何歷史學家所知曉。”

在這裡不可能描述量子力學的原理，即使是非常概括的。然而，為了便於了解我們以後的討論，必須對量子力學的某一個特殊的內容方面加以介紹。我們記得普朗克、愛因斯坦和玻爾曾經首先提出了輻射場量子概念的观点，而輻射場在經典物理學中一向被看作是波。波的這種粒子性首先為密立根 (R. A. Millikan) 在 1916 年關於光電效應的實驗中所証實，以後在 1923 年又為康普頓 (A. H. Compton) 的發現所証實。康普頓發現，當 X-

* 奧地潑斯：古希臘神話中梯比斯 (Thebes) 王萊由斯 (Laius) 和皇后約卡斯塔 (Jocasta) 的兒子。他在出生後即被萊由斯所丟棄而由柯林斯 (Corinth) 王收養，長大後殺死了萊由斯并和約卡斯塔結婚。數年以後，奧地潑斯的家世被揭露，約卡斯塔有縊而死，奧地潑斯則挖出了自己的双目。——譯者注

** 克倫威爾：(1599~1658年)十七世紀英國資產階級革命的領袖。從 1653 年起任被稱為“護國主”的軍事獨裁者，掌握英國政權。——譯者注

射綫(它是电磁波)和电子碰撞时,前者在动量和能量的轉換上的表現和粒子一样。这些代表X-射綫的粒子称为光子(在图5中用 γ 标志)。实验証实,光子的波长 λ 和动量 p 能够滿足它們的乘积等于普朗克常数 h 的条件。以后德布罗意(L. de Broglie)在1924年发表的文章中提出了这样的一个问题:如果波显示出有粒子性,那么粒子是否也会显示出有波动性呢?他假定应该有,而且假定正和光子的情况一样,与粒子相联系的波的波长是 h 被动量去除。这种极为大胆的假设,使他提出了如图6所示的电子在軌道中的图象。他认为,如果軌道不是波长的整数倍,如左图所示,則波就不能发生諧振。然而情况如果是如右图所示,則波就发生諧振,因此这种軌道代表被允許的軌道。按照这个途径,德布罗意利用富有启发性的方法,实际上获得了玻尔在1913年提出的量子条件。1926年,薛定諤(E. Schrödinger)对这个方法加以探討,导致了作为量子力学基础之一的有名的薛定諤方程式。

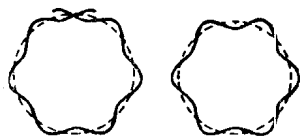


图 6

在量子力学中,粒子表现出波动性,它的波长和动量成反比。现在大家都知道,为了将波局限在空間內一个小的区域中,必須使用波长比这个区域的尺寸为小的波。因此为了探索愈来愈小的空間区域,我們必須用动量愈来愈高的粒子来使与粒子相联系的波长能够小到和所探索的空間区域相适应。下表解釋了为什么我們要建造体积愈来愈大和能量愈来愈高的核粒子加速器。关于这一点,