

内 容 简 介

《伯克利物理学教程》是美国近年来出版的供大学理工科头两年使用的基础物理教程。本书是其中的第四卷，阐述量子力学的基本原理和概念。共包括九章：导论，量子物理学中物理量的量值，能级，光子，实物粒子，测不准原理和测量理论，薛定谔波动方程，定态理论，基本粒子及其相互作用。作者在书中用了许多实验事实来说明量子力学理论的根据，并特别着重于澄清对量子力学的一些误解；书中还概要地叙述了量子力学在原子物理、分子物理、核物理和基本粒子等领域中的应用。

本书可供大专院校理工科师生阅读，也可供有关科技人员参考。

E. H. Wichmann

QUANTUM PHYSICS

Berkeley Physics Course, Vol. 4

McGraw Hill, 1971

量 子 物 理 学

《伯克利物理学教程》第四卷

[美] E. H. 威切曼 著

复旦大学物理系 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

上海商务印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1978年9月第一次印刷 印张：16 1/2

印数：0001—218,300 字数：374,000

统一书号：13031·821

本社书号：1172·13—3

定 价：1.70 元

目 录

中译本前言	v
原书序言	vii
教学说明	ix
第一章 导论	1
一、量子物理学的范围(1—7)	1
二、原子和基本粒子(8—19)	5
三、经典理论的适用范围(20—26)	17
四、普朗克常数的发现(27—40)	22
五、光电效应(41—46)	34
六、原子的大小和稳定性问题(47—55)	40
问题	47
第二章 量子物理学中物理量的量值	50
一、单位制和物理常数(1—10)	50
二、能量(11—18)	57
三、原子物理学和分子物理学中的特征物理量(19—32)	64
四、核物理的几个最基本的事实(33—39)	77
五、万有引力和电磁力(40—43)	86
六、关于数值计算(44—46)	89
七、提高课题:自然界的基本常数(47—57)	91
问题	100
第三章 能级	107
一、谱项图(1—13)	107
二、能级的有限宽度(14—26)	124
三、能级和谱项图的继续讨论(27—42)	134

33769

• i •

四、谱线的多普勒增宽与碰撞增宽效应(43—46)	158
五、提高课题: 关于电磁跃迁的理论(47—56)	162
问题	170
第四章 光子	174
一、光子的粒子性(1—17)	174
二、康普顿效应, 韧致辐射; 粒子对的产生和湮没(18—30)	188
三、光子会“分裂”吗?(31—50)	204
问题	218
第五章 实物粒子	223
一、德布罗意波(1—15)	223
二、周期性结构的衍射理论(16—22)	236
三、只有一个普朗克常数(23—27)	246
四、物质波会分裂吗?(28—35)	250
五、波动方程和迭加原理(36—46)	256
六、提高课题: 物理状态的矢量空间(47—54)	263
问题	268
第六章 测不准原理和测量理论	273
一、海森伯测不准关系(1—19)	273
二、测量和统计系综(20—40)	291
三、振幅和强度(41—49)	314
四、每次测量结果原则上可以预言吗?(50—56)	321
五、偏振光和非偏振光(57—61)	326
问题	329
第七章 薛定谔波动力学	335
一、薛定谔的非相对论性波动方程(1—18)	335
二、几个简单的“势垒问题”(19—36)	348
三、 α 放射性的理论(37—48)	364
四、提高课题: 波函数的归一化(49—51)	381
问题	384

第八章 定态理论	388
一、量子化, 即本征值问题(1—26)	388
二、谐振子. 分子的振动和转动激发(27—41)	411
三、类氢体系(42—48)	427
四、提高课题: 薛定谔理论中位置变量和动量变量(49—58)	433
问题	440
第九章 基本粒子及其相互作用	447
一、碰撞过程和波动图景(1—18)	447
二、粒子的意思是什么?(19—31)	467
三、量子场论的基本概念(32—46)	483
四、 π 介子和核力(47—55)	495
五、结束语(56)	502
问题	503
附录	507
表 A. 一般物理常数	507
表 B. 最稳定的基本粒子	509
表 C. 化学元素	511
表 D. 单位和转换因子	512
表 E. 表示能量的各种单位的转换因子	513
表 F. 重要物理常数的非精确值	514

第一章 导 论

一、量子物理学的范围

1 在本教程的这一部分里，我们将研究原子、原子核和基本粒子领域中的物理学。这样，我们就会遇到自然界的一些新方面：所谓新的，意思是指在前几卷里我们尚未系统地讨论过这些问题。自然界的这些方面通常被称为量子现象，所以，我们就称这一卷的主题为量子物理学。现在公认的量子物理学的基本数学理论称为量子力学。

然而，不应该认为“量子物理学”是某种与宏观世界毫无关系的东西。实际上，整个物理学都是量子物理学；我们今天所了解的量子物理学一些定律，都是自然界中最普遍的定律。

2 在《伯克利物理学教程》(Berkeley Physics Course)的前几卷里，我们研究了宏观世界中的物理现象。我们已发现的自然定律都是经典物理学的定律。一般说来，可以认为经典物理学涉及的只是自然界中和物质的根本结构没有直接关系的那些方面。在这一卷里正好相反，我们要特别研究基本粒子，并且要尝试揭示出支配这些粒子行为的定律。我们的注意力自然会集中在这些定律尽可能显著突出的那些物理情况，这就是说，我们要研究的是每次只有少数几个粒子相互作用的情况。因此，这一卷所研究的物理学大部分可以称之为微观物理学：即研究由少数基本粒子构成的“小”体系。

然而,如果知道了支配基本粒子的基本定律,原则上也就可以预言由大量基本粒子构成的宏观物理体系的行为。这意味着经典物理学的定律来自微观物理学的定律,从这个意义上说,量子力学在宏观世界中也与在微观世界中一样适用。



图 2A 一个量子力学体系的例子。这个电动机(以及作为电源使用的手电筒电池)的行为受量子力学定律的支配。虽然作者在大约三十年前得到这个电动机时从未想到这一点。

设计电动机可以而且应该根据经典电磁理论和经典力学,它们是量子力学的极限形式。没有一个神志正常的工程师会企图用组成这个体系的所有基本粒子间的相互作用来描述诸如此类的宏观体系。

3 当我们把经典物理学的规律应用于宏观体系时,我们试图描述的仅仅是体系行为的某些总的特征。例如,我们把“刚体”作为一个整体来考察它的运动,而不去讨论它的所有基本组成部分的运动。这就是物理学的经典理论应用于宏观体系时的特点,即忽略体系行为的细节,并且也不去考虑情况的所有方面。从这个意义上说,经典物理学的定律是自然界的近

似定律。我们应该将它们看成是更基本和更全面的量子物理学定律的极限形式。

换句话说，经典理论是唯象理论。唯象理论试图描述和概括的是物理学中某些有限领域内的实验事实。它不打算描述物理学中的每件事情，但如果它是一个好的唯象理论，它的确可以非常准确地描述有限领域内的一切。善于思考的读者可能会说，每一种物理学理论毕竟都是唯象的，基本理论和唯象理论之间的差别只是程度上的问题。不过作为物理学家，我们认为在这两种理论之间有着明显的差别。自然界的基本定律的显著特点是它们的极大的普遍性；对它们所叙述的内容，我们不知道有什么例外。我们把它们看作是是正确的，严格的和普遍有效的，除非有明确的实验证据与之抵触。与此相反，唯象理论中的定律我们认为不是普遍有效的；我们知道它们只在物理学的某些有限的领域中是有效的（即足够准确的），超出了这个领域，这个唯象理论可能是毫无意义的。

4 当然，我们不应该轻视唯象理论。它们在概括我们在物理学各个领域中的实际知识上，是非常有用的。在物理学中有许多例子，对于这些例子我们确信有一个可用的基本理论，不过现象的复杂性使我们不能根据“第一原理”作出准确的预言。在这种情况下，我们就试用一个简化的唯象理论，它部分地直接依据实验事实，部分地是根据基本理论的某些一般性的特征。换句话说，让“物理体系做我们的某些理论工作”。再者，在物理学里还有许多没有找到基本理论的例子。这时，我们根据某些简单模型所能建立的任何唯象理论，都可以用来作为寻找更全面理论的一种过渡手段。

当我们试图去了解一种不熟悉的物理现象时，显然合理的是首先试用最简单的东西，这就是说，首先试用一个在表观

上类似的情况下已经用得很成功的理论或模型。如果我们的模型证明是成功的，我们就学到了一些东西，但如果证明是不成功的，我们也学到了一些东西。

重要的是要记住，模型仅仅是模型，而且整个物理学并不必要用单一的模型来描述。

5 人们常常谈论由于量子力学的发现在物理学中引起了“革命”。“革命”是一个引人注目的字眼（它似乎具有奇特的魅力），它意味着完全推翻掉某些东西。然而应该指出，对于预定要用经典理论来描述的那些情况，经典物理学的定律并没有被推翻。举例来说，我们今天描述摆的运动的方法与十九世纪所用的方法没有两样。

而且常常可以成功地用经典概念来获得对微观物理现象的某些了解：它们是近似有效的。重要的是要了解经典概念适用性的界限。在本章中我们将试图给读者有关这种界限的一个大致概念。当在以后各章了解了更多的量子现象后，读者将对这个重要问题得到更确切的认识。

通过本世纪内所完成的许多实验，已令人信服地证实了物理学的经典理论并不普遍有效。在这一卷中，我们将介绍某些有关的实验证据，使读者相信这个现实生活中的事实。

6 当我们回顾本世纪中物理学所发生的变化时，我们应该记住从来未曾有过一个全面的有关物质的经典理论。经典物理学定律是好的唯象定律，但它们并没有告诉我们有关宏观物体的一切情况。用这些定律可以描述由弹簧、杠杆、飞轮等组成的机械的行为（运动），只要给出制造这些机械的材料的某些“材料常数”，诸如密度、弹性模量等就可以了。然而，如果我们问为什么它们有这样的密度、为什么它们的弹性常数有这样的数值，为什么当棒中的张力超过某一极限时棒就会断

裂等等，经典物理学就无法回答了。经典物理学没有告诉我们铜为什么在 1083°C 熔化；钠蒸汽为什么会发射黄光；氢为什么具有它所有的化学性质；太阳为什么会发光；铀核为什么会自然蜕变；银为什么会导电；硫为什么是一种绝缘体；它也没有告诉我们为什么可以用钢制成永磁体。我们可以继续问下去，并举出许多每天观察到的事实，对于这些问题经典物理学告诉我们的是很少甚至是零。

7 读者希望知道我们现在是否有一个关于物质的全面理论？回答是没有；对于我们世界中发生的一切事物还没有一个详尽的理论。然而，在最近六十年内，我们关于自然界的知识已经大大地扩展了。我们发现了以前连做梦也没有想到过的自然界的某些方面，并且我们还成功地解决了许多老的问题。例如，可以这样说，现在已经非常好地了解了各种化学事实和大块物质的性质；在物理学的这些领域内，我们可以回答在经典理论范围内无法讨论的问题。

二、原子和基本粒子

8 让我们谈谈基本粒子的概念。据说某些古代的希腊哲学家最先在有关物质的理论中引进了原子的概念。（这并不排除在这以前可能有其他人作过类似的推测。）应该立即指出的是，古人的“原子”与现代的原子肯定不是同样的东西。实际上，要精确地了解希腊哲学家关于这个术语的真正涵义，并不是一件容易的事情。不过，他们所涉及的中心问题是物质是否无限可分。如果物质不是无限可分的，则在足够小的尺度上我们必定会发现物质的基本组元，或者说“原子”。我们取一块物质，将它一再地分成小而又小的碎片。最后这种分割达到终极，我们发现某种不能再进一步分割的东西，而这就是

“原子”(实际上这个词的意思是“不可分”)¹⁾。

希腊原子学派认为所有物质都确实是由“原子”组成的，大概他们还感到物质的各种极其多样的状态可以设法用“原子”的不同组态(和运动?)来解释。我们认为有某些想法大致类似于现代的情况。不过在我国的定量理论和古人的模糊推测之间肯定有很大的差异。

9 在本书中我们打算讨论物质原子理论的早期历史，但 requests 读者仔细考虑在十九世纪中根据物质是由原子组成的假设得到的有关自然现象的一些卓越的理解。根据这个假设，我们可以理解化学的基本事实，即某一给定的化学化合物总是固定由某些基本的化学元素根据化合物的特征以一定的比例组成的。特别要考虑这样一个突出的事实，即我们可以用诸如 H_2O , H_2SO_4 , Na_2SO_4 和 $NaOH$ 等简单公式来代表化学化合物。这些公式之所以引人注目在于其中出现了一些小的整数，它们告诉我们两个单元的氢和一个单元的氧化合成一个单元的水，等等。如果我们假定物质是由原子组成的，就可以立即理解这些经验事实：化学化合物由分子组成，同时分子又是少数原子的复合体系。两个氢原子和一个氧原子化合成一个水分子。简单而明了。

作为支持原子假设的进一步论据，我们举出特别由 J. C. 麦克斯韦和 L. 玻耳兹曼发展的气体分子运动论的成就。根

1) 某些早期的自然哲学家很可能想到过晶体的明显地有规则和漂亮的外形反映出由小粒子(或者原子)构成晶体的方式。今天这似乎是一个非常自然的想法。然而这个思想似乎出现得并不早。就著者所知，在历史记载中没有表明希腊的原子学家以这种方式推测过晶体。

结晶学作为一门科学是在十八世纪末开始发展起来的。在早期的研究者中可以举出 Romé de Lisle 和 Haüy，他们精确地测量了解理面之间的角度。在他们之前罗伯特·胡克和惠更斯曾臆测过晶体何以可由微小的(不可见的)部分组成。

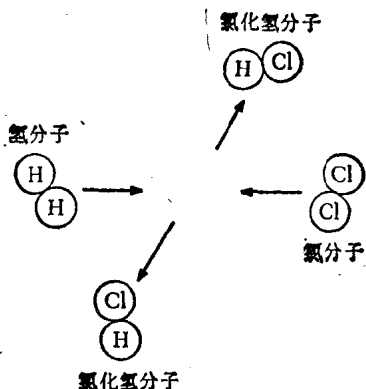


图 9A 化学反应 $H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl$ 的一个很概念化的图，图中一个氢分子和一个氯分子化合成两个氯化氢分子。这个图用符号表示了化学反应就是“基本”组元的重新分配的思想。

当氢气在氯气中燃烧时实际发生的过程的细节是非常复杂的。在这过程中，释放出能量，其形式为光和反应产物的动能。气体变热导致氢和氯分子中的一部分分解成原子。而这些原子可以化合成氯化氢分子。通过碰撞或由光引起的分子与原子内部激发的其他一些过程也起重要的作用。

据容器中的气体是一群在容器内无序运动着的分子，它们相互间以及与器壁间不停地碰撞着的假设，这个理论可以解释气体的许多性质。可以进一步用运动论来估计阿佛伽德罗常数； $N_0 = 6.02 \times 10^{23}$ ，这是在一摩尔¹⁾的任何气体中的分子数。（一摩尔的任何化学化合物可以理解为一定数量的物质，它的质量以克为单位计时，其数值就等于该化合物的分子量。）洛喜密脱在 1865 年第一次粗略地估计了 N_0 的数值。

鉴于这些存在原子的论据，很难理解直到本世纪初还有某些学派，他们坚持以不存在物质是由原子组成的直接(!)证据为理由而拒绝原子假设。

10 希腊哲学家的“原子”并不相当于我们现代原子，因为

1) 摩尔，也有译为“克分子”。原文为 Mole。——译注

我们的原子不是不可分的：它们是由质子、中子和电子组成的。说得更确切一些，正是质子、中子、电子以及一大群其他的“基本粒子”起了希腊人的“原子”的作用。我们关于“基本粒子”的涵义是什么呢？这个名称的确切定义至今还有些争论，不过，照我们的想法，可以给这个问题一个简单而实用的回答：如果不能把一个粒子描述为其他更基本实体的一个复合体系，就可以认为这个粒子是基本的。一个基本粒子没有各个“部分”，它不是由任何更简单的东西构成的。我们想象中的继续分割的企图终结了。根据这个定义，质子、中子和电子全是基本的，但氢原子或铀核不是基本的。

可以说物质不是无限可分思想的精髓即我们不可能无止境以构成物体的各个部分来分析物体。这个过程最终要失去它的意义；我们会遇到不能再简约的实体，这就是我们的基本粒子。

11 我们怎能断言电子是真正基本的呢？是否可能今天认为是基本的粒子明天却发现是复合的呢？毕竟，今天的原子是十九世纪的基本粒子，难道历史本身不会重演吗？

许多实验事实有力地暗示历史将不会重演，将永远不会在发现氢原子是复合的那种意义上发现诸如电子、质子或中子等粒子是复合的。让我们尝试描述一下这种论据的性质。

如果两个弹子以足够大的相对速度碰撞，它们将破裂成小的碎片。同样两个氢分子以很大的相对速度碰撞时，也将破裂成碎片。除非速度非常大，否则我们将在碎片中发现诸如氢原子或质子、或电子等东西；换句话说即组成氢分子的组元。在这两种情况里可以这样来描述所发生的事件：碰撞的猛烈性克服了使小球或氢分子的各部分保持在一起的内聚力，所以物体就分裂开来。对许多核反应可以给出类似的解释。核是由质子和中子组成的，如果一个具有一定高能量的

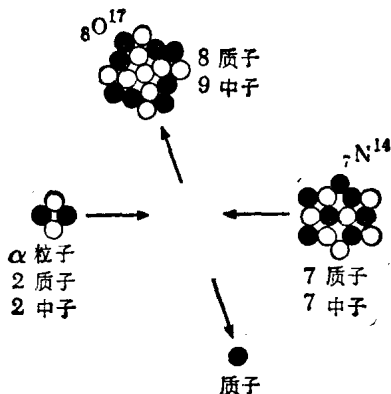


图 11A 核反应示意图，图中一个 α 粒子（氦核）同个氮核碰撞产生一个氧核和一个质子。这个由卢瑟福在 1919 年发现的特殊反应是对稳态核嬗变的首次观察。（E. Rutherford, *Philosophical Magazine* 37, 581(1919).）在卢瑟福的实验中来自放射源的 α 粒子轰击氮，并通过观察发射出的质子证实有反应出现。

这个图与图 9A 十分类似，它用符号表示出核由质子和中子组成以及核中的这些粒子的重新组合构成（低能）核反应的思想。当然，不应该从字面上来理解：就核这个字的意义来说决不会“看上去”是这个样子。

质子与核碰撞，就可能从核内打出几个质子和中子。

12 然而，如果研究两个基本粒子诸如两个质子的猛烈碰撞，我们发现在本质上不同于上面所考虑的一些现象。例如，如果一个高能质子和另一个质子碰撞，可能在碰撞后两个质子仍然存在，而在反应的产物中却另外发现了一个或几个新的基本粒子，诸如 π 介子。我们说在反应中产生了 π 介子。这不是在质子-质子碰撞时唯一可能发生的事情：质子可能消失，而出现许多完全新的粒子，叫做 K 介子和超子。

同样，当两个电子猛烈碰撞时，可能发生最终的反应产物包含三个电子和一个正电子。（正电子是一个类似电子的基本粒子，但带相反的电荷。）反之，如果一个电子和一个正电

子相互碰撞,可能两个粒子都消失掉。(我们说它们湮没了。)而留下的仅仅是形式为 γ 射线的电磁辐射。

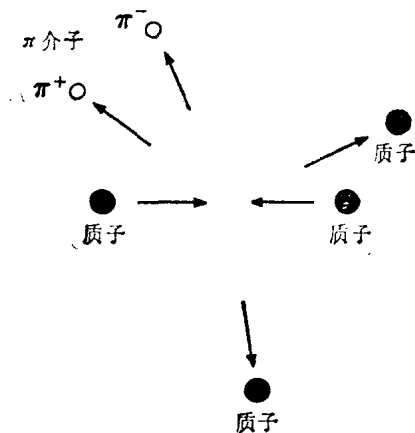


图 12A 在两个质子的高能碰撞中产生两个 π 介子的示意图。一个 π 子带 $+e$ 电荷,另一个带 $-e$ 电荷,这里 e 是电子电荷的数值。因此在这个事件中总电荷是守恒的。

由于两个质子在碰撞后继续存在,而且出现了两个新的粒子,很明显图 9A 和图 11A 中所示的这种简单的模型在这里不能适用了:不能认为这事件是“两个质子的基本组元(?)的重新组合”。

13 产生过程的一个有趣的例子是当 γ 射线通过原子中的电场时产生一个电子-正电子对。因此,物质粒子可以由电磁辐射产生。图 13A 是一张所谓“级联簇射”的云室照片,它“显示”了这种现象的许多实例。对于这张照片可以作如下解释(亦可看图 13B 和 C。)如果一个高能带电粒子,譬如说一个电子或者一个正电子,通过照片中所看到的某一块水平铅板,它在铅板中某一个原子的场内可能作非常微弱的偏转。这样一个偏转构成了加速运动,因此将以高能 γ 射线的形式发射电磁辐射。(当然,粒子可能被一块铅板中的几个原子所偏转,在这种情况下将发射几个 γ 光子。)而以这种方式产生的

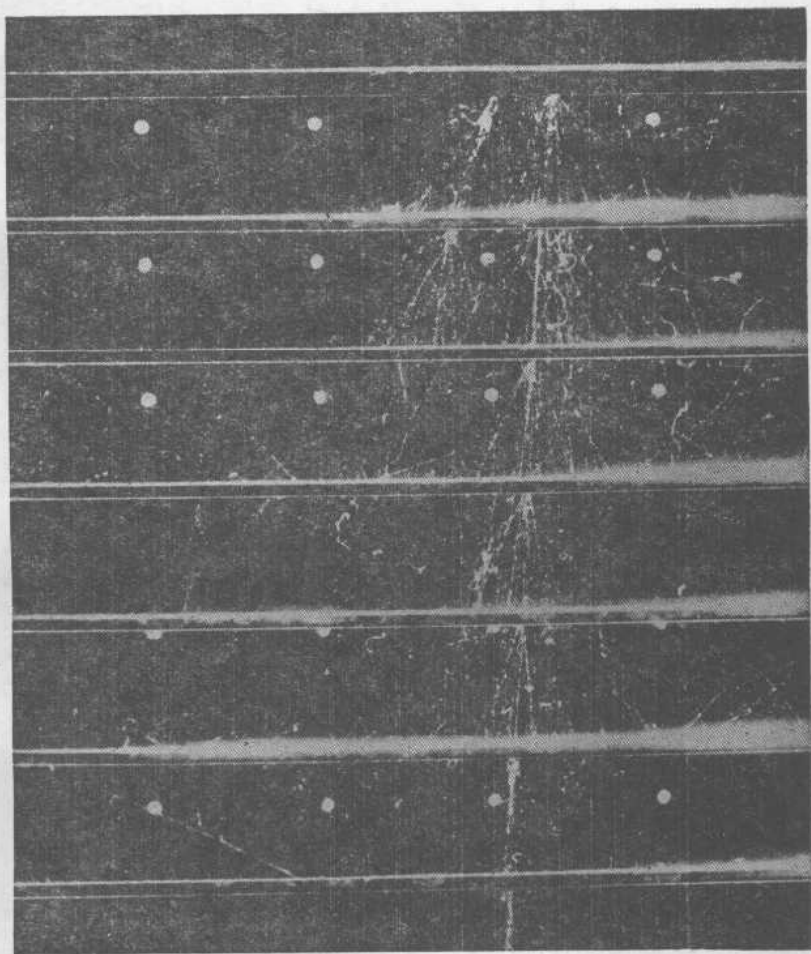


图 13.4 显示级联簇射的云室照片。大多数看得见的轨迹是由电子和正电子引起的，它们通常朝着图的底部运动。在右上方进入并穿过了三块铅板而停止于第四块铅板中的粒子可能是一个 π 介子。进一步的译注可看正文。

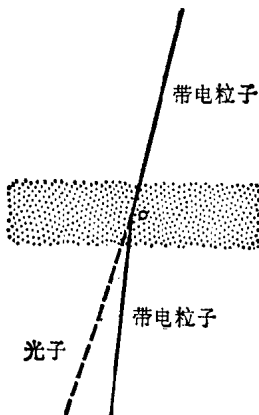


图 13B 一个高能带电粒子(譬如说一个正电子或电子)被原子内的电场所偏转,这种加速运动的结果是发射出 γ 射线(即一个高能光子)。这种物理现象叫韧致辐射。图中的阴影部分代表大块物质,譬如说云室中铅板的一部分。(为了清楚起见图中原子的大小稍微有些夸大。)

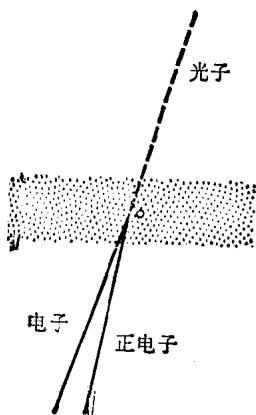


图 13C 一个高能 γ 射线与原子内的电场碰撞产生一个电子-正电子对: 这种物理现象是电子对的产生。上面两个图所示的两种基本过程是发生图 13A 中所示的级联簇射的原因。

γ 射线, 当通过铅板时, 在它们所迁到的原子的场内产生电子-正电子对。这些带电粒子当它们在铅板中偏转时又依次产生更多的 γ 射线, 而新的 γ 射线又产生新的电子-正电子对, 等等。因此, 单个高能带电粒子或者单个 γ 射线可以产生一簇 γ 射线、电子与正电子。带电粒子在云室中留下了可以看得见的轨迹; 这些就是我们在图 13A 中看到的轨迹。 γ 射线在图中是看不见的。

照片右边部分的级联簇射似看来由上面入射的 γ 射线引起的。这个 γ 射线的能量大概是 20 千兆电子伏。左边的簇射看来是由一个能量稍为低一些的带电粒子引起的。两组簇射或许都起源于在照片视区之外的云室壁中发生的某些事

件。在簇射中看到的大多数粒子都沿着朝下的方向运动。这些过程的特征是大多数高能粒子都倾向于沿着入射粒子的方向发射，能量较小的粒子可以沿其他方向发射。如果细致地看照片，我们看到由不是沿着主要簇射方向发射的粒子所引起的次级簇射很快就“消失”了。当初始能量分布到如此多的带电粒子和光子上以致它们中没有一个有足够的能量去产生另外的粒子对时，级联簇射自然地停止。然后，低能粒子被铅板所吸收。

引起簇射的粒子能量可以由它所产生的带电的次级粒子的数目来估计。

14 我们提到过的产生和湮没过程是自然界的重要方面。显然，这些现象一点也不象弹子的破碎或化学反应。我们可以把化学反应描述为由其他分子的基本组元形成新的分子，为了作这样的描述，原子是分子的基本组元。与此相反，考虑一个碰撞事件，在这个事件中原来就有的两个粒子在碰撞后与碰撞中产生的许多新粒子一起存在。显然我们不能用初始粒子的基本组元重新排列成新的复合体系的方法来描述这个事件。这种描述也不能应用于有某些初始粒子消失掉的事件。后一种现象的一个突出的例子是电子-正电子对的湮没，在这个事件中最初出现的物质粒子完全消失了，留下的只是 γ 射线。

15 为了用实验决定一个粒子是基本的还是复合的，我们尝试让它与另一个粒子碰撞以粉碎它，并观察反应的产物。用这种方法可以将分子破碎成原子，并将原子破碎成电子和核，因而有理由说分子是由原子组成的，原子又是由电子和核组成的。当十九世纪的物理学家认为原子是不可破坏和不可分割时，他们实在是错了：实际上可以容易地使原子破碎。同样可以使核破碎，从而有理由说核是由质子和中子组成的。