

# 小玲和老吕的对话 ⑥

——反映“物质不灭”、“运动不灭”的各种守恒定律；守恒和不守恒；守恒和均匀性、对称性的关系

柯 之

吕：小玲，我们今天来讲守恒和不守恒，均匀和不均匀，对称和不对称，以及这些矛盾之间的关系……。

玲：好像以前讲过，光子和电子碰撞的前后，总能量是守恒的。我还弄不大清楚，叔叔你最好用一些具体的例子来说明。

### 能量的守恒

吕：好，我们就从能量的守恒来说起吧。第一个例子是上次讲的

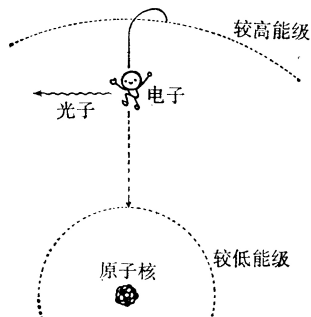
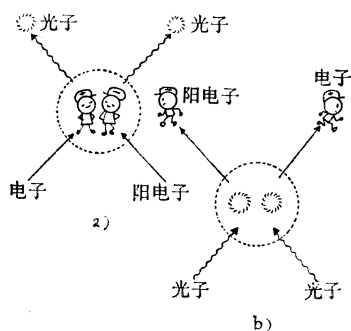


图 1 原子中的电子从较高能级跃迁到较低能级示意

原子中的电子从较高能级跃迁到较低能级并放出光子。科学实验证明，光子的能量正好等于两个能级的能量之差，所以

$$\text{跃迁前电子能量} = \text{跃迁后电子能量} + \text{放出光子的能量}$$



a) 电子、阳电子转化为一对光子  
b) 一对光子转化为电子和阳电子  
a) 和 b) 能量都守恒

你看，跃迁后的总能量既没有增加一些，也没有消灭一些，这就是能量的守恒。第二个例子是电子、阳电子转化为一对光

子，和一对光子转化为一对电子、阳电子。在这个例子里，电子和阳电子表现出来具有两种能量，一种是粒子静止的时候所含有的能量，叫“固有能量”。例如电子(或阳电子)的“固有能量”为 51 万 1 千电子伏。它在一定条件下又可以转变成其他形式的能量，例如光子的能量。

玲：这就奇怪啦，能量总是和运动相联系的，静止的电子哪儿来的能量呢？

吕：问的好。没有没有物质的运动，也没有没有运动的物质。说是静止的电子，其实它仍然在运动着。自旋就是一种运动，以前我们不是讲过，电子象一个小陀螺吗？还有，静止的电子可以在它周围的空间不断地放出光子和吸收光子，这也是一种运动。而且，电子有内部结构，它内部的组成部分也在不断地运动。此外还可能有什么目前还不清楚的运动形式呢。“固有能量”就和这些运动有关。

玲：原来是这样！

吕：再一种能量就是以前讲过的“动能”，也就是粒子在有速度时增加的能量。两种能量合在一起就是粒子的“总能量”。科学实验也证实：电子的“总能量”加上阳电子的“总能量”，必定等于它们转化出来的一对光子的能量。同样地，一对光子的能量也必定等于它们转化出来的一对电子、阳电子的总能量之和。

玲：这又说明能量是守恒的。

吕：对。而且这一对光子的能量一定不会小于 102 万 2 千电子伏(电子和阳电子的固有能量相等)。如果电子、阳电子是完全静止的，那末它们转化出来的一对光子的能量就恰好等于 102 万 2 千电子伏。而不是大于……。

玲：不错，电子、阳电子没有速度，动能等于零，所以只有固有能量。

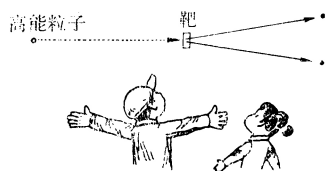


图3 用高能粒子打靶而产生的较重粒子的动能是很大的

吕：从这个例子还可以说明一个问题，因为能量守恒，如果要产生比较重的“基本”粒子，而较重粒子的“固有能量”也较大，所以必须提供足够多的能量才能把它们产生出来。事实上用高能粒子打静止靶的方法产生的较重粒子的动能也必定是很大的。所以轰击靶子的粒子的能量，必须大大超过这种较重粒子的固有能量才行。

玲：怪不得要用很高能量的加速器才能产生那些较重的“基本”粒子。

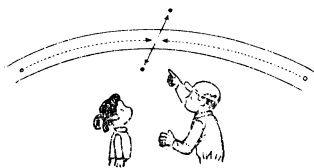


图4 用对撞机产生的较重粒子的动能可以不太大

吕：就是。如果用对撞机的方法，产生的较重粒子的动能就不必很大。所以，在相同能量的情况下，对撞机可以产生更重的、固有能量更大的粒子。

玲：原来对撞机有这个好处。

吕：我要举的第三个例子是宇宙线的电磁簇射，这是宇宙线中的一种很有趣的现象：就是原先只有一个高能电子，或一个高能光子，但在与大气中或与其他物质(例如很多层铅板)中的原子核多次作用后，就可以变成成千上万个电子、阳电子和光子。

玲：这倒有点象孙悟空拔下一把毫

毛变成很多小孙悟空呢！

吕：孙悟空是吹一口仙气，那是一种神话。电磁簇射可不是靠吹一口仙气，它是通过两种基本物理过程而实现的。一种是高能电子经过原子核近旁时放出光子；另一种是高能光子经过原子核近旁时转化为一对电子和阳电子。而且这两种基本过程都是能量守恒的。

玲：怎么样通过这两个基本过程实现电磁簇射呢？

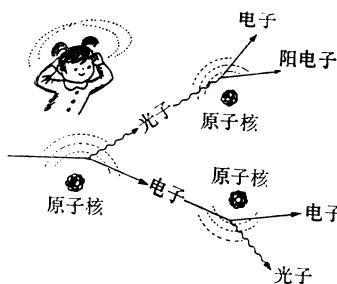


图6 电磁簇射是两种基本过程反复进行的结果

吕：比方说，宇宙线中有一个高能电子，它经过某个原子核近旁时放出一个高能光子(或者一开始就是一个高能光子)；这高能光子经过另一个原子核近旁时，又转变成一对电子和阳电

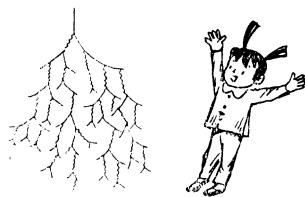


图7 电子、阳电子和光子像滚雪球似地增加起来

子，电子和阳电子又各自放出光子；这些光子又各自转化为电子和阳电子。于是就象滚雪球一样，电子、阳电子和光子的数目越来越多，而每个电子、阳电子和光子的能量则越来越少。一直到最后，所有的光子的能量都低于102万2千电子伏，不足以产生一对电子和阳电子了，这个滚雪球的过程才算结束。把最后产生的全部电子、阳电子和光子的能量总加起来，必定等于最初的高能电子(或光子)的能量。这又是能量守恒。

玲：我们物理老师和化学老师也讲过能量守恒，能量有各种形式：机械能、电能、化学能、原子能……，它们可以按一定的规律互相转化，而且不管怎样转化，能量的数量多少是不会改变

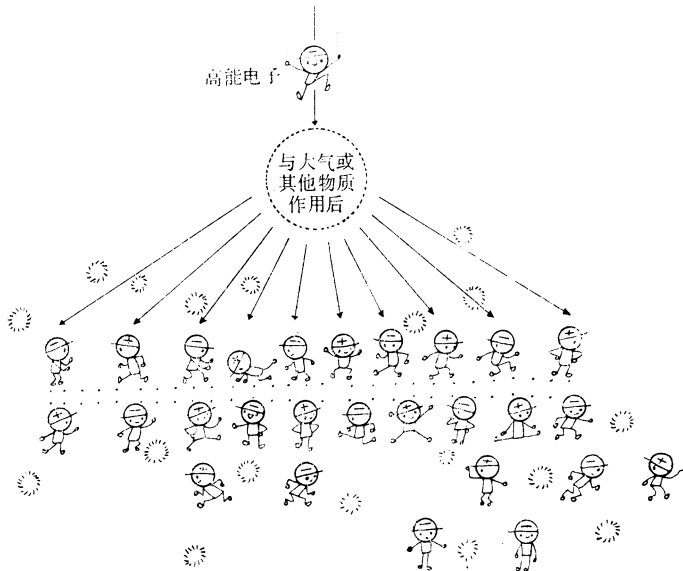


图5 一个高能电子在与大气或其他物质作用后，可变成成千上万个电子、阳电子、光子

的，是不能凭空把它创造出来的。

吕：说得很对。各种形式的能量能够相互转化和能量守恒的发现，是一件有划时代意义的事。恩格斯曾在《自然辩证法》中把这个发现同细胞的发现、生物进化的发现并列为三大发现，并把能量的转化与守恒的发现列为第一。现在离恩格斯写《自然辩证法》的时候已经差不多一百年，科学已经有了很大的进展，能量的形式更加丰富了，除了那时候已知的热、光、电、磁以及机械的、化学的能量之外，又知道了原子能，知道了能量的量子化，知道了“固有能量”（原子能就是原子核释放出来的一部分“固有能量”）。但是能量转化和守恒的科学规律仍然是正确的，只是内容更丰富了。

### 质量的守恒

玲：我们的化学老师还讲过质量守恒：任何一个化学反应，反应前后的重量必定相等。电磁簇射起初只有一个电子，最后却产生出来成千上万个电子和阳电子，质量还能守恒吗？

化学反应

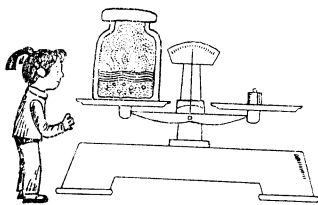


图8 在密闭的容器里进行化学反应，发现不论是什么反应，反应物的总重量和生成物的总重量总是相等的

吕：按照旧的质量概念来说，质量的确是不守恒了，一个电子的质量不能等于成千上万个电子、阳电子的质量。但是旧的质量概念在高速的粒子来说已经不适用了。事实上一个粒子（譬如电子）的速度越大，它的

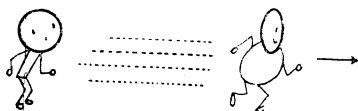


图9 电子的速度越接近光速，它的质量也越大

惰性也越大，换句话说，它的质量也越大。

玲：真的？

吕：这是一个客观事实。一个粒子静止（没有速度）的时候的质量叫“静止质量”（或叫“固有质量”），它飞行时候增加的质量叫“运动质量”。“运动质量”的存在不仅在科学实验和与高能有关的生产实践中反复得到证实，而且在高能加速器设计中必须考虑它，否则高能加速器就加速不了粒子。

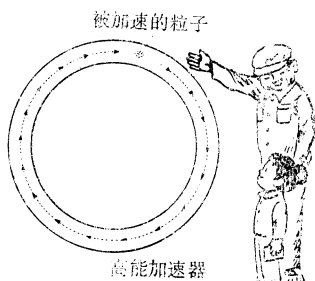


图10 在加速过程中，被加速的粒子的质量越来越大，磁场也必须相应地逐渐加大，否则就不能把粒子维持在圆形轨道上继续加速

玲：电磁簇射中的第一个电子一定有很大的“运动质量”了吧？

吕：是的，它的速度几乎等于光速。

玲：如果引起电磁簇射的第一个粒子不是高能电子，而是高能光子，质量也守恒吗？光子是没有质量的，而成千上万个电子和阳电子是有质量的。

吕：说光子没有质量，那是指没有“静止质量”（固有质量），因为光子永远不会静止，永远是以光速前进的。但是每一个光子都有“运动质量”，这个“运动质量”也和光子的频率成正比。光

子的频率越高，能量越大，运动质量也越大。

玲：叔叔，是不是说：如果只考虑“静止质量”，电磁簇射就是质量不守恒的。如果把“静止质量”和“运动质量”加在一起（就好像刚才把“固有能量”和“动能”加在一起一样），电磁簇射就是质量守恒的。对吗？

吕：你说对了。在低能低速条件下，例如在化学反应中，“运动质量”太小，完全可以忽略不计，所以质量守恒实际上表现为“静止质量”的守恒（用天平称的是“静止质量”）；但是到了高能高速的条件下（这里低速、高速都是相对于光速来说的），“静止质量”就不守恒了。只有在质量含有新的内容（既包括“静止质量”，又包括“运动质量”）之后，才能守恒。刚才讲的电磁簇射的两个基本过程都是质量守恒的，所以整个电磁簇射过程也是质量守恒的——最初的粒子（电子或光子）的质量等于最后产生的全部粒子（电子、阳电子和光子）的质量。

### 质量守恒、能量守恒和

“物质不灭”、“运动不灭”

玲：质量守恒和能量守恒之间大概有什么联系吧？

吕：质量和能量之间有正比关系：一个粒子的静止质量越大，它的“固有能量”也越大，是成正比的。一个物理系统的总质量（静止质量+运动质量）越大，它的总能量（“固有能量”+动能）也越大，也是成正比的。“固有能量”和“运动质量”的存在，以及质量与能量之间的这种正比关系是狭义相对论所指出的，这是二十世纪物理学的重大发现之一。

玲：既然能量和质量成正比，可不可以说质量就是能量呢？

吕：不能说质量就是能量，因为质量代表物质性，例如，恩格斯在

《自然辩证法》中曾指出：“通常都把重量看作物质性的最一般的规定。”另一方面，能量代表的是运动。例如在《自然辩证法》中恩格斯也曾不止一次地指明“运动”与“能”一般地是等同的。因此，质量守恒和能量守恒实际上分别反映了“物质不灭”和“运动不灭”。而质量与能量之间的正比关系则表明没有没有能量的质量，也没有没有质量的能量。它反映了刚才所说的，没有没有运动的物质，也没有没有物质的运动。

玲：哦，原来是这样。

吕：关于“物质不灭”、“运动不灭”和它们之间的联系，恩格斯在《自然辩证法》中曾指出：“既然我们面前的物质是某种既有的东西，是某种既不能创造也不能消灭的东西，那末运动也就是既不能创造也不能消灭的”。还说：“物质及其存在方式，运动，是不能创造的，因而是它们自己的终极的原因”。“物质不灭”和“运动不灭”，这都是辩证唯物主义的根本原理，唯心主义者极力反对这些原理，无非是妄图把最后原因归之于上帝，无非是要把“精神”说成是第一性的。

玲：这样说，质量守恒和能量守恒不就“等同”于“物质不灭”和“运动不灭”吗？为什么说是反映了“物质不灭”和“运动不灭”呢？

吕：说“反映”是确切的，说“等同”不恰当。“物质不灭”和“运动不灭”是带有普遍意义的哲学命题，而质量守恒和能量守恒则是有局限性意义的物理规律。它们在一定程度上反映了“物质不灭”和“运动不灭”，但在每一个科学发展阶段，它们又都受物理学知识的限制。比如说，人们最早知道的质量守恒只是“静止质量”的守恒。后来进入了高能高速的科学研

究领域，“静止质量”的守恒就不对了，变成不守恒，另外发现了“运动质量”。于是，旧的质量守恒就被新的质量守恒所代替。随着科学的发展，目前形式的“静止质量”和“运动质量”加在一起的守恒，将来又有可能变成不守恒，而由具有更新内容的守恒定律来代替。能量守恒也是一样，以前就不知道有固有能量。

玲：这就是毛主席在《实践论》中所说的：“实践、认识、再实践、再认识，这种形式，循环往复以至无穷，而实践和认识之每一循环的内容，都比较地进到了高一级的程度。”是不是？

吕：对了，毛主席指出的是人类对客观世界的认识过程的规律性，科学的发展也不例外。

#### 能量、动量、角动量的守恒和时间、空间、方向的均匀性

玲：叔叔，除了质量、能量的守恒之外，还有什么守恒呢？

吕：还有动量守恒，它在物理学里可以说和能量守恒同等重要。动量代表一个有速度的东西的冲撞的本领……

玲：我们物理课上讲过动量就是质量乘速度。

吕：小玲，你知道为什么是质量乘速度吗？

玲：不知道。

吕：你设想有两个一样重的球，它们的速度一快一慢，哪一个球的冲劲大呢？

玲：当然是速度快的那个球。

吕：对了，再设想有两个球，它们一轻一重，但是速度一样，哪一个球的冲劲大呢？

玲：是重的那个球。

吕：好，所以速度越大，冲劲越大；质量越大，冲劲也越大。把这两个因素合在一起，冲劲应该正比于质量乘速度。所以我们就把质量乘速度叫做动量。

玲：噢，原来是这么回事。那在电

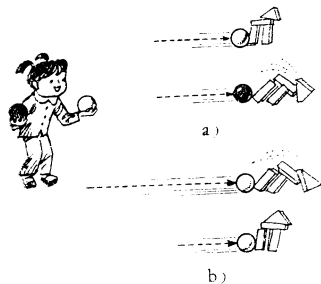


图 11

a) 速度相同时，重球比轻球冲劲大  
b) 质量相同时，速度大的球冲劲较大

子、阳电子转化成一对光子的过程里，以及一对光子转化成电子、阳电子的过程里，动量也守恒吗？光子也有动量吗？

吕：在这两个转化过程里，动量也是守恒的，因为光子也有动量。光子的动量就等于它的“运动质量”乘上它的速度（光速）。这也是通过科学实验知道的。小玲，你知道彗星吗？

玲：知道，就是人们常说的扫帚星，它有一个长尾巴。

吕：彗星的长尾巴其实是极其稀薄的气体，只有在接近太阳的一段时间才长出来。经过分析，知道了彗星的质量和太阳系中其他成员相比是很小的，在远离太阳时，它的体积也不大，含有冰和冻成“冰”的各种气体，如甲烷、氨、二氧化碳等。这

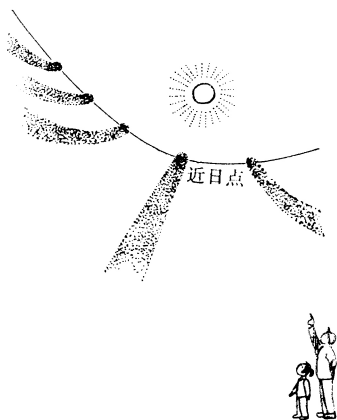


图 12 彗星接近太阳时，其中的气体受太阳光的的压力，拖成长尾。长尾的方向总是在背着太阳的方向，而且越接近太阳，尾巴越长

些物质在接近太阳时蒸发为气体，并在太阳光的冲撞下被推出来，形成很长的稀薄的尾巴。正因为这个尾巴是太阳光推斥出来的，所以它总是在背着太阳的方向。小玲，你看，这个很普通的自然现象也说明了光子有冲撞的本领，光子也有动量。

玲：那末在电子、阳电子转化成一光子（或者一对光子转化为电子和阳电子）的过程里，动量守恒的意思就是说电子的动量加上阳电子的动量应该等于两个光子的动量相加，对吗？

吕：对，不过要补充一点，就是动量是有方向的（因为动量等于质量乘速度，速度是有方向的），所以动量守恒是说每个方向（例如上下方向，前后方向，左右方向）的动量都守恒。

玲：叔叔，除了能量守恒、质量守恒、动量守恒之外还有别的什么守恒吗？

吕：还有角动量守恒。就是在任何过程里，总角动量不变。

玲：哦，前次讲中微子的发现时，也讲过角动量守恒。如果没有中微子，中子的 $\beta$ 衰变过程不但能量不守恒，角动量也不守恒

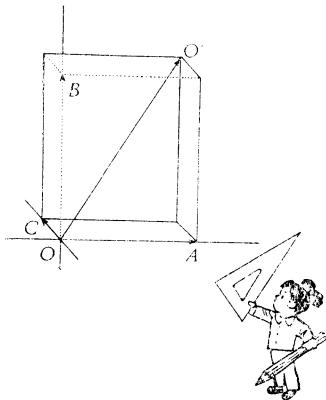


图 13 用  $OO'$  表示的任何一个粒子的速度，都可以分解为三个方向的分速度：左右方向的分速度用  $OA$  代表，上下方向的分速度用  $OB$  代表，前后方向的分速度用  $OC$  代表。粒子的质量与这三个分速度相乘，就得到粒子的三个方向的动量

了，是吧？

吕：不错。好，现在再来问这么一个问题：按照辩证唯物主义的观点，运动是不能脱离空间时间的，运动也好，空间时间也好，都是物质的存在形式。刚才讲能量的守恒反映了运动的不能创造和不能消灭，那末，能量的守恒又反映了空间时间的什么性质呢？

玲：这我说不出来。

吕：小玲，你知道什么是均匀性吧？

玲：我知道。一条带子处处宽度一样，我们就说这条带子的宽度是均匀的；一根电线处处粗细一样，我们就说这根电线的粗细是均匀的；水流的速度处处一样，我们就说水流的速度是均匀的。

吕：对了。那末空间时间的均匀性是什么意思呢？

玲：这我不知道。

吕：空间的均匀性就是说在空间的某一点所看到的物理规律（表现为运动方程），和其他任何一点所看到的物理规律是完全一样的。

玲：叔叔，你举个例子。

吕：好，假定我们随便找一些地点来做氢原子的光谱实验，比方说在北京、在海南岛、在珠穆朗玛峰上、在人造卫星上……如果我们把地球磁场屏蔽掉，可以发现任何一个地点的氢原子都服从相同的运动方程，都有相同的原子能级（电子的驻波花样）。其他的物理规律也是一样。这就是空间的均匀性。（在这个例子里万有引力影响可以忽略）

玲：时间的均匀性呢？

吕：就是某一个时间所看到的物理规律和其他任何时间所看到的物理规律完全一样。例如十年、百年、千年……以前的氢原子光谱和今天的氢原子光谱一样，今天的氢原子光谱又和十年、百年、千年……以后的氢原

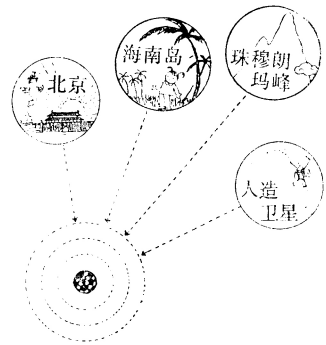


图 14 空间的均匀性：在任何一个地点，原子都服从相同的运动方程，都有相同的原子能级

子光谱一样，这就是时间的均匀性。

玲：哦，我知道了。是不是能量的守恒反映了空间、时间的均匀性？

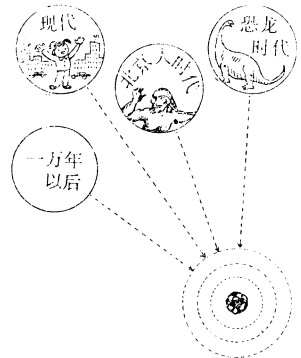


图 15 时间的均匀性：在任何一个时间，原子都服从相同的运动方程，都有相同的原子能级

吕：从理论的角度来看，时间的均匀性可以导致能量的守恒，空间的均匀性可以导致动量守恒。这就是说，能量、动量的守恒又反映了时间、空间的均匀性。空间的均匀性包括了上下、前后、左右方向的均匀性，它们分别导致上下方向的动量守恒、前后方向的动量守恒、左右方向的动量守恒。

玲：动量、能量的守恒和空间时间还有这样的关系！

吕：是啊，此外还有各向同性……

玲：什么叫各向同性？

吕：就是空间任何方向的物理规律都一样。例如，在没有外来电磁场的情况下，无论把氢原子转到哪个方向，它的能级都是一样的。这是方向的均匀性。

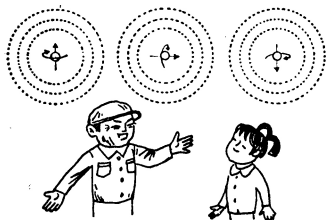


图 16 方向的均匀性：无论在什么方向，原子都服从相同的运动方程，都有相同的原子能级

玲：它也导致一个什么守恒吧。

吕：对了，它导致角动量守恒。小玲，你可以看到，空间时间的每一种均匀性都导致一种守恒：时间均匀性——能量守恒；空间均匀性——动量守恒；方向均匀性——角动量守恒。

玲：这确是很有意思，它们说明运动和空间时间的联系不只是表面上的，而是很深刻的。

吕：而且，动量也好，角动量也好，能量也好，都体现了运动，所以它们都从各个不同的侧面反映了客观世界的“运动不灭”。

### 电 荷 守 恒

玲：叔叔，从刚才说的来看，均匀性总是代表着某种不变的性质。每一种守恒都是和一种不变性相联系，是吗？叔叔，除了上面说的这些，还有什么重要的守恒定律吗？

吕：另外一个重要的守恒定律是电荷守恒定律。小玲，你听说过电荷守恒吗？

玲：物理课上讲过：电荷可以在金属导体上流动，但是电荷既不能创造，也不能消灭。可是叔叔，在“基本”粒子世界，不是光子可以转化为电子和阳电子吗？那么电荷是不是可以创造呢？

吕：在“基本”粒子世界，粒子可以产生，可以消灭。所以，电荷也可以产生，可以消灭。但是，总的电荷是不变的。比方说吧，不带电的光子虽然可以转化为带电的电子和阳电子，但是总的电荷是守恒的：

$$\text{光子} \rightarrow \text{电子} + \text{阳电子}$$

$$\text{电荷 } 0 = -e + e$$

因为电子和阳电子的电荷正好互相抵消。

玲：电磁簇射产生了那么多的电子和阳电子，电荷也守恒吗？

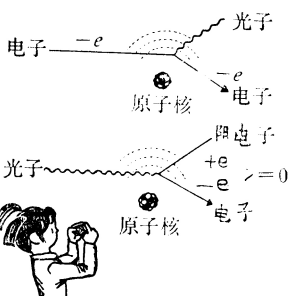


图 17 电磁簇射的两个基本过程都满足电荷守恒

吕：也守恒，不要看产生这么多粒子。刚才我们说过，电磁簇射无非是两种基本过程反复进行的结果：一种基本过程就是光子转化为电子和阳电子，上面已经说过这种过程是电荷守恒的。另一种基本过程是电子（或阳电子）放出一个光子，这种过程显然也是电荷守恒的：

$$\text{电子} \rightarrow \text{电子} + \text{光子}$$

$$\text{电荷 } -e = -e + 0$$

$$\text{阳电子} \rightarrow \text{阳电子} + \text{光子}$$

$$\text{电荷 } e = e + 0$$

既然两种基本过程都是电荷守恒的，那末反复进行这两种基本过程的结果必定也是电荷守恒的。

玲：那末叔叔，你说说电荷守恒和什么均匀性（不变性）有关呢？

吕：电荷守恒和规范不变性有密切联系。

玲：规范不变性又是什么意思呢？

吕：规范不变性和粒子的波动性

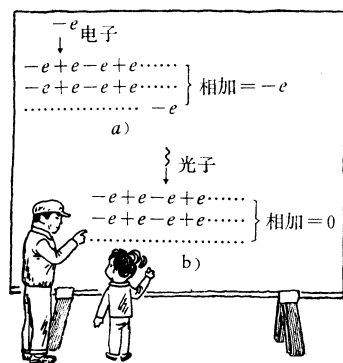


图 18

- a) 起初是一个电子，电磁簇射后总的电荷仍是一e  
b) 起初是一个光子，电磁簇射后总的电荷仍是0

——量子化的场的波动性——

有关。具体地说，和波动的“相角”变换有关。

### “相角”变换是怎么回事

玲：什么叫“相角”变换？

吕：小玲，你们学过三相发电机吗？

玲：学过，三相发电机是一种交流发电机，它有三组线圈，结构都一样，发出的电动势的大小、频率、周期也都一样。但是有一点不同，这三组线圈所发出的电动势是不同步的。也就是说，这三个线圈的电动势并不是同时

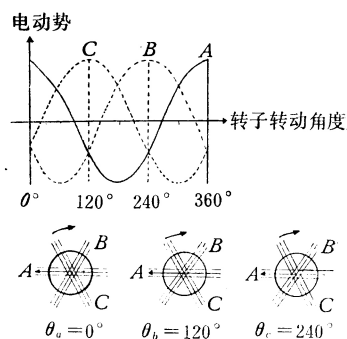


图 19 三相发电机的电动势和相角



上升,同时下降的,而是象梳辫子那样,三绺头发,这绺过来,那绺过去,轮流地上,轮流地下。

吕: 那末三相是什么意思呢?

玲: “相”是指“相角”。如果图上线圈A和箭头的夹角是 $0^\circ$ , 那末线圈B和箭头的夹角就是 $120^\circ$ , 线圈C和箭头的夹角就是 $240^\circ$ , 所以三个线圈和箭头的夹角,也就是相角,是各不相同的,产生的电动势也各不相同。曲线B和曲线A的相角差 $120^\circ$ , (曲线B向右移 $120^\circ$ ,就和曲线A重合),曲线C和曲线A的相角差 $240^\circ$  (曲线C向右移 $240^\circ$ ,就和曲线A重合),所以叫三相发电机。

吕: 小玲,你学的很好。其实,只要知道了“相”和“相角”是什么,就很容易说明“相角”变换是什么了。对于量子化的场来说,“相角”变换无非是这个场的所有频率的波都要改变一个相角,使“相角”变换之后的波和原来的波之间有一个“相角差”。而且这个“相角差”对于电荷相同的粒子的场来说是相同的。电荷加一倍,“相角差”也加一倍。电荷为零,“相角差”也是零。

玲: 哦,原来“相角”变换是这个意思。

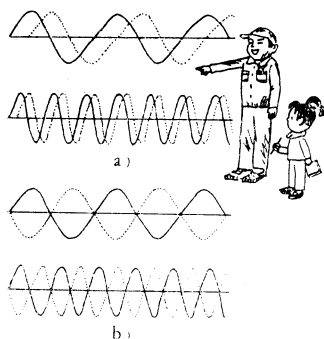


图20 “相角”变换

a) 相角差 $90^\circ$ , b) 相角差 $180^\circ$   
在相角变换中,如果电荷为 $e$ 的场的相角变动 $90^\circ$ ,则电荷为 $2e$ 的场的相角变动 $180^\circ$ 。电荷为一 $e$ 的场的相角变动 $-90^\circ$

吕: 小玲,你看,“相角”是波所特有的一种性质,“相角”变换是带有波动性的场所特有的一种变换!从相角变换的不变性可以导致刚才说的“电荷守恒”。

### 规范不变性和电荷守恒

玲: “相角”变换的不变性又是什么意思呢?

吕: 就是经过“相角”变换后,量子场的运动规律(运动方程)不改变的意思。

玲: 叔叔,刚才你说电荷守恒和“规范变换”不变性有关,怎么现在又说和“相角”变换不变性有关了呢?

吕: “相角”变换其实就是“规范变换”中最简单的一种。如果相角变换在任何地点时间都相同,就又叫做第一种规范变换。

玲: 那还有第二种规范变换吗?

吕: 有,在第二种规范变换里,相角差就不仅依赖于电荷的大小,而且还随地点时间的改变而改变。所以又有一个名称,叫“定域规范变换”。

玲: 这比第一种规范变换要复杂得多啦!

吕: 就是。而且如果第二种规范变换也具有不变性(运动方程在第二种规范变换下不变),那就不仅带电粒子的波有一个相角变换,而且带电粒子还必须和一种“静止质量”为零的、不带电的、角动量为 $\hbar$ 的粒子发生相互作用。这种角动量为 $\hbar$ 的粒子的场就叫规范场。规范场在第二种规范变换下也必须要有相应的变换方式(但不是“相角”变换),这种变换方式具有微分形式,我们不细说了,不过反正它也是随地点时间而不同的。

玲: 这就有点纳闷了,这是什么粒子啊?

吕: 小玲,你猜猜,必须和带电粒子才发生相互作用的不带电粒子是什么?

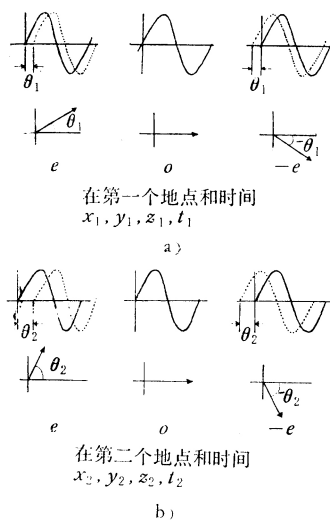


图21 带电粒子的第二种规范变换示意

a) 在 $x_1, y_1, z_1, t_1$ 的相角变换:

带电荷 $e$ 的粒子场相角变 $\theta_1$ ,不带电荷粒子场不变相角,带电荷 $-e$ 的粒子场相角变 $-\theta_1$

b) 在 $x_2, y_2, z_2, t_2$ 的相角变换:

带电荷 $e$ 的粒子场相角变 $\theta_2$ ,不带电荷粒子场不变相角,带电荷 $-e$ 的粒子场相角变 $-\theta_2$

玲: 哦,是光子呀!那光子的场——电磁场——就是一种规范场吗?

吕: 就是。你看,说来说去还是我们的老相识。不过,我们对这位老相识有了更深一层的了解,原来电荷守恒是和规范不变相联系的,而静止质量为零的光子的存在,则恰好保证了第二种规范不变(定域规范不变)。

玲: 没想到“基本”粒子世界还有那么多古里古怪的不变性。

吕: 一回生,二回熟,如果你和它们熟悉起来,就不会感觉那么古怪了。

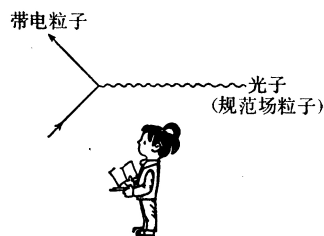


图22 带电粒子与光子(规范场粒子)的相互作用,保证了第二种规范变换的不变性

### 奇异数、重子数、轻子数

玲：还有什么别的守恒和不变性？  
 吕：小玲，记得吧，以前我们讲过奇异数守恒。  
 玲：记得，强作用、电磁作用奇异数守恒，弱作用奇异数不守恒。奇异数守恒也和某种不变性相联系吧？  
 吕：是的，奇异数守恒也可以从一种规范不变性导出。  
 玲：也是粒子场的波的相角改变吗？  
 吕：也是，如果奇异数为 +1 的粒子（如  $K^+$  介子）场的波改变相角为  $\alpha$ ，那末奇异数为 -1 的粒子（如  $K^-$  介子、 $\Delta$  超子）场的波改变相角就是  $-\alpha$ ，无奇异数粒子（如  $\pi$ 、核子）场的波不改变相角。（图 23）  
 玲：这  $\alpha$  角也随地点时间而变吗？  
 吕：不，因为这是第一种规范变换。  
 玲：为什么不是第二种规范变换呢？  
 吕：如果是第二种规范变换，就一定要有一种规范场，它只与带奇异数的粒子发生相互作用，但客观事实说明，世界上不存在这样的规范场！  
 玲：这也说明了理论不能脱离实际吧？  
 吕：说的很对。  
 玲：叔叔，再继续讲，还有什么守恒？  
 吕：还有重子数守恒。前面我们说过，核子（包括质子、中子）、超子（包括  $\Lambda$ 、 $\Sigma$ 、 $\Xi$ 、 $\Omega$ ）都是重子，每一个重子有一个重子数 +1，每一个反重子有一个重子

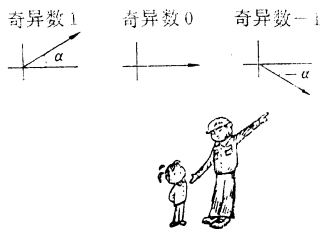
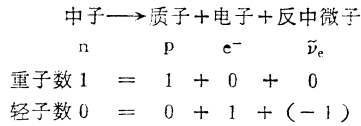


图 23 可以导出奇异数守恒的规范变换

数 -1，其他介子、轻子、光子等都没有重子数（重子数 = 0）。

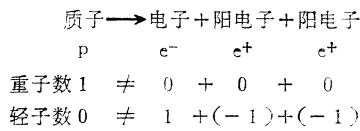
玲：重子数怎么守恒呢？  
 吕：让我们看一看中子的衰变：



你看，重子数是守恒的。

玲：哦，原来重子数是这样守恒的。叔叔，再举个例子吧。

吕：行，以下的过程，电荷虽然是守恒的，



但重子数不守恒，违反了重子数守恒律，所以质子不存在这样的衰变。

玲：质子是一种稳定的粒子，如果存在这样的衰变，质子就不可能稳定了，由质子和中子组成的原子核全都要散了。叔叔，重子数守恒是不是也和什么规范不变性有联系？

吕：重子数守恒也可以从一种规范不变性导出，这也是第一种规范不变性。如果重子数为 +1 的粒子场的波的相角改变为  $\varphi$ ，那末，重子数为 -1 的粒子场的波的相角改变就是  $-\varphi$ ，不带重子数的粒子场的波不改变相角。小玲，你知道为什么也是第一种规范不变性吗？因为世界上也不存在一种只与重子发生相互作用的规范场。

玲：叔叔，你在刚才的衰变式子里，还写了轻子数。什么是轻子数，轻子数也守恒吗？

吕：轻子数也要守恒。电子、 $\mu^-$  和中微子都是轻子，它们的轻子数都是 +1；阳电子、 $\mu^+$  和反中微子都是反轻子，它们的轻子数都是 -1。其他既非轻子又非反轻子的粒子都没有轻子数。在刚才写的式子里，中子

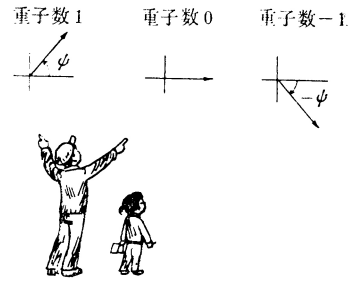


图 24 可以导出重子数守恒的规范变换

的衰变是轻子数守恒的，质子的衰变是轻子数不守恒的。由此也可以判断质子不会有这样的衰变。轻子数又分成  $\mu$  轻子数和  $e$  轻子数。

玲：似乎奇异数、重子数、轻子数都只和一定性质的粒子相联系，就如电荷只与带电的粒子相联系一样。

吕：是啊，它们反映了物质存在的多样性，有带电的物质，有带重子数的物质，有带轻子数的物质，有带奇异数的物质，以后还要讲到有带粲数的物质，……，等等。不同性质的物质还可以相互转化，例如带奇异数的粒子可以衰变成不带奇异数的粒子。好，今天我们围绕着“物质不灭”和“运动不灭”讲了好多重要的守恒定律，也讲了一些不守恒，还讲了一些守恒同对称之间的关系，讲了具有波动性质的量子场所特有的“相角变换”或“规范变换”的不变性和与它相联系的守恒。下次我们还继续讲守恒与不守恒、对称与不对称，好吧？

玲：好，都是我从来没听到过的新鲜事，我一定来听你讲。叔叔，再见！

吕：再见！

### 尉迟横插图