

## 理论问题与实验探究合集（原子（核）物理）

一共 7 个理论问题或推导

### 1. 汤姆逊提出原子结构的梅子布丁模型的理由是什么？【高一】

物质的电中性

在关于阴极射线的工作中，物理学家约瑟夫·汤姆孙发现了电子以及它的亚原子特性，粉碎了一直以来认为原子不可再分的设想。汤姆逊认为电子是平均的分布在整个原子上的，就如同散布在一个均匀的正电荷的海洋之中，它们的负电荷与那些正电荷相互抵消。这也叫做梅子布丁模型。

### 2. 卢瑟福为什么提出有核原子结构模型？【高一】

在 1909 年，在物理学家卢瑟福（汤姆逊的学生）的指导下，研究者们用氦离子轰击金箔。他们意外的发现有很小一部分离子的偏转角度远远大于使用汤姆逊假设所预测的值。卢瑟福根据这个金箔实验的结果提出原子中大部分质量和正电荷都集中在位于原子中心的原子核当中，电子则像行星围绕太阳一样围绕着原子核。带正电的氦离子在穿越原子核附近时，就会被大角度的反射。

### 3. 简述放射性发现的最初经过以及放射性与 X 射线产生机制【高一】

放射性是由法国科学家安东尼·亨利·贝克勒尔（Antoine Henri Becquerel）在 1896 年研究磷光材料时发现。他是研究荧光和磷光的专家。贝克勒尔于 1852 年 12 月 15 日生于法国巴黎，出身于一个有名望的学者和科学家的家庭。他的父亲亚历山大·爱德蒙·贝克勒尔是位应用物理学教授，对于太阳辐射和磷光有过研究。1896 年初，伦琴发现 X 射线的消息传到巴黎，一个偶然的机会使他遭遇上放射性问题。当时法国有一位著名数学物理学家叫彭加勒，收到伦琴的通信后，在法国科学院 1896 年 1 月 20 日的例会上向与会者报告了这件事，展示了伦琴的通信和 X 光照片。贝克勒尔正好在场，他问彭加勒，这种射线是怎样产生的？彭加勒回答说，似乎是从真空管阴极对面发荧光的地方产生的，可能跟荧光属于同一机理。彭加勒还建议贝克勒尔试试荧光会不会伴随有 X 射线。于是第二天贝克勒尔就在自己的实验室里开始试验荧光物质会不会辐射出一种看不见却能穿透厚纸使底片感光的射线。他试来试去，终于找到了一种物质具有预期效果。这种物质就是铀盐。贝克勒尔拿两张厚黑纸，把感光底片包起来，包得那样严实，即使放在太阳底下晒一天，也不会使底片感光。然后，他把铀盐放在黑纸包好的底片上，又让太阳晒几小时，就大不一样，底片显示了黑影。为了证实是射线在起作用，他特意在黑纸包和铀盐间夹一层玻璃，再放到太阳下晒。如果是由于某种化学作用或热效应，隔一层玻璃就应该排除，可是仍然出现了黑影。于是贝克勒尔肯定了彭加勒的假定，在法国科学院的例会上报告了实验结果。又过了几天，贝克勒尔正准备进一步探讨这种新现象，巴黎却连日天阴，无法晒太阳，他只好把所有器材包括包好的底片和铀盐都搁在同一抽屉里。也许是出于职业上的某种灵感，贝克勒尔突然产生了一个念头，想看看即使不经太阳照晒，底片会不会也有变黑的现象（荧光需要其他光照才能发生，所以用太阳光照射）。于是他把底片洗了出来。哪里想到，底片上的黑影真的十分明显。他仔细检查了现场，肯定这些黑影是铀盐作用的结果。贝克勒尔面对这一突如其来现象，很快就领悟到，必须放弃原来的假设，这种射线跟荧光没有直接关系，它和荧光不一样，不需要外来光激发。他继续试验，终于确证这是铀元素自身发出的一种射线。他把这种射线称为铀辐射。铀辐射不同于 X 射线，两者虽然都有很强的穿透力，但产生的机理不同。同年 5 月 18 日，他在法国科学院报告说：铀辐射乃是原子自身的一种作用，只要有铀这种元素存在，就不断有这种辐射产生。这就是发现放射性的最初经过。

### 4. 卢瑟福是如何认识到放射性衰变时还产生了新的物质？【高一】

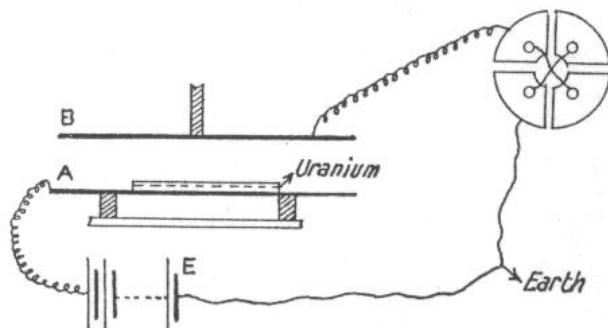
卢瑟福遇到了一种新的难题. 电子工程师 R. B. 欧文斯 (R. B. Owens) 努力地去测量钍的放射性, 但是每次测量, 都会得到不同的结果, 他知道空气流是造成这个的原因, 但是他不知道为什么会这样, 于是请求卢瑟福提供建议. 卢瑟福认识到钍会放射出一种气体, 任何接触到这种气体的东西都会变得具有放射性. 今天我们称这种气体为氡.

卢瑟福想知道, 他是否能够从钍中析取与铀 X 相似的物质, 因此他需要一名化学家, 他请求 23 岁的索迪 (soddy) 和他一起研究.

卢瑟福和索迪从钍中析取一种放射性的物质, 他们称之为钍 X, 析取出来 4 天后, 他们发现钍 X 失去了一半的放射性, 而与钍 X 放置距离很远的最初的钍 (溶液中的钍) 又获得了钍 X 失去的放射性相同的放射性. 对这两种物质失去和重获放射性的定量研究显示, 放射性的衰退和重获率一致, 大约 1 个多月, 卢瑟福和索迪重复了 uranium X 的观察, 发现相同的效应也出现了, 间隔更长时间, 大约 6 个月. 这些观察和居里发现的反常的感应放射性一起被考虑, 卢瑟福自己做了研究, 于 1900 年推断说, 感应放射性归咎于一种放射性气体, 他称之为“散发” emanation, 与钍 X 的相关工作也出现了一种 emanation, 今天我们知道那是氡气. 卢瑟福和索迪认为, 放射性元素的原子处于自发的瓦解之中, 通过发出  $\alpha$  或  $\beta$  离子, 它们形成新的元素, 这个过程是一个系列, 每个阶段都有不同的瓦解率.

放射性被显示出是伴随着新物质的持续产生的化学过程的. 这些过程的反作用产物首先是放射性, 随着新物质的现成, 放射性逐渐减小, 这个结论显示化学变化一定是次原子 (sub-atomic) 结构的特征 (次原子粒子又称亚原子粒子, 指结构比原子更小的粒子. 所有原子都是由更小的“次原子”粒子所组成, 包括电子、质子与中子).

## 5. 卢瑟福用什么方法确定铀辐射有两种射线? 【高一】



这是卢瑟福在 1899 年的论文中的复制图, 一层均匀的铀被涂在 A 上面, 射线使 A, B 间的气体电离导电, 当 A, B 间的电压足够大 (使得从射线电离的离子重新集合前) 被推到 B 板, 来测量电流. (这一步可以验证射线可以电离气体.) .

之前贝克勒尔使用他的粗糙的相片技术证实铀辐射由至少两种射线组成, 因为这些射线并没有相同地被吸收. 由于这个粗糙的相片技术, 贝克勒尔没有在此试验中走的更远. 之后卢瑟福在 AB 之间放上厚度不同的薄片, 比如铝片或铅片, 来测定铀辐射是否真的由两种以上射线组成, 卢瑟福使用了一个方程

$$r = e^{-\lambda d}$$

$r$  是射线通过厚度为  $d$  的薄片之后的射线强度与移开薄片的射线强度之比. 如果射线只有一种, 那么当薄片厚度增加而  $r$  减小时, 比例系数  $\lambda$  将是恒定值. 但这并没有发生, 卢瑟福发现, 当铝薄片的厚度是百分之几毫米 (或几厘米空气) 时,  $\lambda$  保持不变, 然后又突然变成另外的值, 而当增加铝片的厚度时, 值又保持不变, 所以卢瑟福归纳认为, 铀的射线至少有两部分组成. 之后一定是进行了磁场或电磁实验 (通过磁场分离之后进行薄片的穿透实验?), 发现两种射线带有不同的电荷, 带正电的他命名为  $\alpha$  射线, 带负电的命名为  $\beta$  射线.

由于 X 射线，铀射线等的发现，放射线在当时成为新的科学前沿，维拉德 (Villard) 也参与了这方面的研究。

## 6. 卢瑟福为什么做 $\alpha$ 离子轰击金箔实验？为什么卢瑟福认为原子是核式结构？【高一】

$\alpha$  离子是由铀，镭这样的物质自发地辐射出来的带正电且非常微小的粒子，卢瑟福已经在 1899 年发现了它们，1908 年，他打算精确地测出  $\alpha$  粒子的荷质比，为了实现这个目的，首先要知道他的铀样品放射出多少  $\alpha$  粒子，之后测量总电量，再除以粒子数。 $\alpha$  粒子非常小，用显微镜看不到，但是卢瑟福知道它们能电离空气分子，因此如果将空气隔绝在电场中，离子就会产生电流。根据这个原理，卢瑟福和盖革设计了一个装在玻璃管中，由两个电极组成的简单的计数装置。每一个通过玻璃管的  $\alpha$  粒子都会产生一个可以数的电脉冲，这就是盖革计数器的早期版本。

盖革和卢瑟福设计的计数器被证明并不可靠，因为  $\alpha$  粒子与空气分子在探测腔内碰撞时会被强烈地偏转。变化多端的轨迹意味着每一个  $\alpha$  粒子并不都产生同样数量的电离离子，因此读出的数据不正确。这个问题令卢瑟福十分困惑，因为他曾经以为  $\alpha$  粒子非常重以至于不可能被撞出那么大的偏转，于是卢瑟福让盖革实验一下，看看有多少物质会散射  $\alpha$  射线。

$\alpha$  粒子散射的实验完成于 1909 年。在那个时代，原子被认为类比于梅子布丁（物理学家约瑟夫·汤姆孙提出的），负电荷（梅子）分散于正电荷的圆球（布丁）。假若这梅子布丁模型是正确的，由于正电荷完全散开，而不是集中于一个原子核，库仑位势的变化不会很大，通过这位势的  $\alpha$  粒子，其移动方向应该只会有小角度偏差。

他们设计的实验包括用  $\alpha$  粒子轰击金属薄片，来观察薄片的厚度和材料与散射  $\alpha$  粒子的关系，他们用荧光屏测量粒子的轨迹，每一个  $\alpha$  粒子对荧光屏的冲击都会产生一个非常微小的闪光。盖革在一个暗室工作了好几个小时，用显微镜计数这些火花。卢瑟福缺乏这种忍耐力，这就是为什么要他的年轻同事来做的原因。他们使用了很多金属薄片，但是比较喜欢金箔，因为金箔的延展性使得可以制作得非常薄，而且使用放射性比铀强几百万倍的镭。

在卢瑟福的指导下，盖革和马士登发射  $\alpha$  粒子束来轰击非常薄、只有几个原子厚度的金箔纸。然而，他们得到的实验结果非常诡异，大约每 8000 个  $\alpha$  粒子，就有一个粒子的移动方向会有很大角度的偏差（甚至超过  $90^\circ$ ）；而其它粒子都直直地通过金箔纸，偏差几乎在  $2^\circ$  到  $3^\circ$  以内，甚至几乎没有偏差。从这结果，卢瑟福断定，大多数的质量和正电荷，都集中于一个很小的区域（这个区域后来被称作“原子核”）；电子则包围在区域的外面。当一个（正价） $\alpha$  粒子移动到非常接近原子核，它会被很强烈的排斥，以大角度反弹。原子核的小尺寸解释了为什么只有极少数的阿尔法粒子被这样排斥。

Thomson 于 1919 年被任命为剑桥三一学院院长，这个职位需要他全身投入，因此他辞去了卡文迪许实验室教授和主任，包括舒斯特在内的一个选举委员会选举卢瑟福继任 Thomson，卢瑟福非常巧妙地协商，确保 Thomson 不会干涉实验室事务，但是允许他给他的助手和学生以及他本人保留一些 rooms，Thomson 确认卢瑟福选为三一学院学会特别会员，拥有“我高兴的时候你可以过来吃饭”的权利，这就确保了卡文迪许实验室的两位巨人之间的和平。

人们经常说卢瑟福到卡文迪许实验室后很少有时间来进行自己的研究，这确实是真的，因为他比以前有更多的管理职务在身了。然而，卢瑟福还在继续研究原子核，卢瑟福的 McGill 时期放射性衰变的自然产生，在 Manchester，是原子的理论，作为卡文迪许教授，他分离原子核。

卢瑟福将人工分离原子核的新研究领域从 Manchester 带到剑桥，他带来了实验设备和放射源材料，更为重要的是，他邀请他之前的学生，查德威克加入他更深入的实验中。

在 1910—1911 的冬天，卢瑟福思考出了一个原子具有带电的中心的原子模型的基本看法，就像盖革和马斯登在他们 1909 年的文章中指出的那样：

如果考虑到  $\alpha$  粒子的质量和较大的速度, 那么在实验中显示出来的某些  $\alpha$  粒子被  $6 \times 10^{-5} \text{ cm}$  厚的金箔偏转  $90^\circ$  甚至更大角度就显得非常令人吃惊. 用磁场达到相同的效果的话, 需要 109 绝对单位 (absolute units) 的巨大磁场.

在 1911 年 5 月的论文中, 卢瑟福总结到, 让一个大质量带电粒子的轨迹产生如此大的偏转, 只有一种可能, 那就是金原子的大部分质量和电荷量都集中在非常小的中心位置. 注意: 此时卢瑟福并未称其为原子核 (nucleus) .

实际上, 卢瑟福在得出这个中心带电的结论时非常谨慎: 一个很简单的计算显示, 原子必须位于一个非常强的电场中, 使得在对碰时可以产生如此大的偏转. 他非常迅速和粗糙地想出, 如果这个中心带电的原子模型正确的话, 几个定量关系必须是真的: 1. 某个角度散射的  $\alpha$  粒子数量与金箔的厚度成正比. 2. 数量与中心电量的平方成正比. 3. 数量与  $\alpha$  粒子的速度的四次方成反比. 这 3 个关系导致了 1 年后盖革与马斯登的实验.

卢瑟福考虑到带电中心带负电的可能性. 今天听起来奇怪, 那么是什么使得这个看法合理呢? 首先, 这个与汤姆孙的模型不是非常不同. 其次, 因为卢瑟福知道  $\alpha$  粒子带 2 个单位的正电荷, 他认为这可能像太阳吸引靠近它的彗星. 就像弹弓的皮带将  $\alpha$  粒子甩出去后又拉回原来的方向. 他也考虑到了日本物理学家 Hantaro Nagaoka (1865 - 1950) 提出的一个几乎被忘记的模型——土星模型. Nagaoka 和卢瑟福在 1910 到 1911 年之间有联系, 卢瑟福提到了“一个具有吸引力的中心质量被旋转的电子包围”的 Nagaoka 模型. 在这篇重要的论文中, 卢瑟福最终申明, 无论原子是圆盘的还是球型的, 无论中心带正电还是负电, 都不影响计算结果. 卢瑟福一直非常小心地不去声称那些他的计算不支持的结果.

卢瑟福确实看到了中心带电原子模型的特征的可能的测试. 一个带正电荷和负电荷的中心对  $\beta$  粒子的吸收应该是不同的, 他说. 一个带正电荷的中心可以解释  $\alpha$  粒子从放射性物质中以很高的速度放射出来. 但是这只是暗示.

盖革和马斯登的确系统性地做过卢瑟福提出的中心模型的假设的各种可以测试的应用. 第一次世界大战完全扰乱了卢瑟福在曼切斯特的工作, 卢瑟福的团队成员中, 波尔返回丹麦, 马斯登接受了新西兰的教授职位, 莫斯利死于加里波底的战役, 战争开始时和盖革在德国技术大学工作的查德威克, 因战争俘虏被关押在 Ruhleben 集中营. 其他学生也参战去了, 卢瑟福也去研究反潜技术.

由于这些的干扰, 卢瑟福和他的实验室管家威廉凯 1917 年才开始用  $\alpha$  粒子穿过氢气, 氮气和其他气体, 第一次世界大战结束时, 马斯登短暂地帮助观察令人乏味的闪烁, 这种闪烁提供了通向原子核的线索. 卢瑟福在 1919 年报告了这些试探性的实验. 卢瑟福将放射源镭 214 放在一个可封闭的铜容器内, 从而可以根据需要改变位置, 抽空或引入不同气体,  $\alpha$  粒子穿过容器内部并通过一个用银板或者他物质盖着的狭缝, 轰击一个硫化锌屏幕, 在暗室里可以看到屏幕上闪光. 当放入氢气后, 非常小心地使  $\alpha$  粒子在轰击屏幕前使其完全吸收, 但是依然可以看到屏幕上的闪光, 卢瑟福认为, 当  $\alpha$  粒子通过氢气时, 偶然地与氢原子和发生了碰撞. 这使得氢原子飞速地向  $\alpha$  粒子原来运动的方向运动.

在这些实验中, 卢瑟福有几个疑问, 主要是关于原子核的特征. 他叫他的同事 Darwin 根据原子核间的弹性碰撞的简单原理, 利用平方反比的排斥力, 分析  $\alpha$  粒子与电子 (或与电子电量相同、电性相反的粒子) 以及和氢原子核的碰撞. Darwin 发现所有与氢原子接近到  $2.4 \times 10^{-13} \text{ cm}$  以内时都能让氢原子加速沿着  $\alpha$  粒子运动的方向前进而在屏幕上产生闪光, 然而, 这个简单的原理还预测, 只有非常少的, 比观测到的还少的氢原子会被加速碰撞到屏幕上.

## 7. 推导电磁波携带角动量【高一】

所有其它我们已经学过的波 (声波, 纵向弹簧波, 横向绳波) 都不携带动量, 与这些熟悉的波类比, 很难明显地看出电磁波带有动量, 电磁波很可能只带有能量而不带有动量.

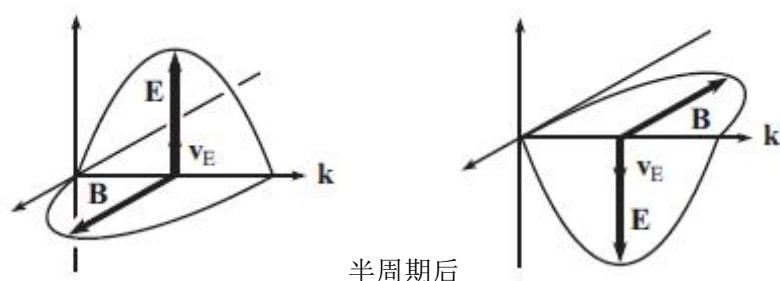
我们根据狭义相对论来快速地讨论一下为什么电磁波带有动量. 根据狭义相对论,  $E = mc^2 = pc$ , 可知光子的动量是  $p = E/c$ , 我们已知电磁波带有能量  $E$ , 因此这个关系式告诉我们电磁波也带有动量. 这样的讨论是完全正确的, 但不是很令人满意. 首先这个讨论包含狭义相对论的内容. 其次还包含了将电磁波(光)看作是由称为光子的微观粒子组成的事.

为什么光的粒子性是导出电磁波带有动量的必要条件呢? 我们希望能够只用波的概念和目前已经学过的波的特性来导出  $p = E/c$  的结果.

现在考虑一个带有电量  $q$  的粒子在某种物质中运动, 使其受到一束电磁波的影响, 这个微粒将受到组成电磁波的电场  $\mathbf{E}$  和磁场  $\mathbf{B}$  的作用力, 也还会受到周围物质的力的阻尼作用, 且这个粒子还会因为加速度而产生辐射, 因而损失能量, 但是辐射和阻尼作用在我们的讨论中不重要.

假设这个电磁波沿着  $z$  轴的正向传播,  $\mathbf{E}$  沿着  $x$  轴正向, 因为  $\mathbf{E} \times \mathbf{B} \propto \mathbf{k}$ , 于是  $\mathbf{B}$  指向  $y$  轴正向, 带电粒子的运动通常来说是很复杂的, 但是就现在讨论的目的而言, 只需考虑粒子的  $x$  轴方向的速度分量就足够了, 也就是说, 这个分量平行于电场  $\mathbf{E}$ . 由于电场的振荡, 带电粒子也会沿着  $\mathbf{E}$  的方向向前向后振荡(主要沿着这个方向振荡), 不过我们并不知道振荡的相位, 通常来说, 带电粒子的速度将部分与  $\mathbf{E}$  同相位, 部分与  $\mathbf{E}$  有  $\pm 90^\circ$  的差异, 后面这部分与我们的讨论无关, 所以只需要集中考虑与  $\mathbf{E}$  同相位的速度即可, 我们称之为  $\mathbf{v}_E$ ,

如下图所示



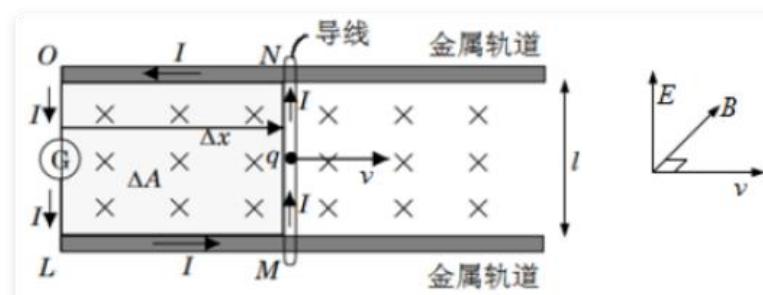
根据右手定则, 磁力  $q\mathbf{v}_E \times \mathbf{B}$  在整个周期都指向  $\mathbf{k}$  的方向,  $\mathbf{v}_E$  和  $\mathbf{B}$  会周期性地改变符号, 但是两个负号会相互抵消, 因此始终有一个指向  $\mathbf{k}$  方向的力, 于是带电粒子就在这个力的作用下加速而获得动量, 而这个动量肯定是来源于这个电磁波的, 在  $dt$  时间内, 这个电磁波给带电粒子的动量大小为

$$|d\mathbf{p}| = \mathbf{F}_B dt = |q\mathbf{v}_E \times \mathbf{B}| dt = q\mathbf{v}_E B dt = \frac{q\mathbf{v}_E E dt}{c}$$

这个波带给带电粒子的能量是多少? 或者说, 这个电磁波对带电粒子所做的功是多少? (平衡状态下, 这个功被带电粒子受到的阻尼作用和辐射的能量抵消了), 假设带电粒子的速度远远小于光速, 此时磁场对粒子的力  $q\mathbf{v}\mathbf{E}/c$  [ $q\mathbf{v}\mathbf{B}$  ( $\mathbf{B} = \mathbf{E}/c$ )] 比电场力  $q\mathbf{E}$  小得多, 因此电磁波施加在带电粒子上的力主要是电场力.

为什么  $\mathbf{B} = \mathbf{E}/c$ ?

如下图所示,



由于导线向右以速度  $v$  运动，导线内的任何电荷  $q$  都将受到一个力的作用，可以通过左手定则力确定，

$$F = qv \times B$$

$$\frac{F}{q} = v \times B$$

$$\frac{F}{q} = E = v \times B$$

这个力显然是电场里，是因为导体向右以速度  $v$  运动形成的，这种电场与静电场是不同的，这种电场只有当电荷以速度  $v$  移动时才存在。如果以电荷为参考点，那么电荷以速度  $v$  向右运动就是磁场以速度  $v$  向左运动，于是电场  $\frac{F}{q} = v \times B$  就是运动电荷周围产生的电场。又

乘指出电场方向，电场强度的大小为  $E = vB \sin \theta$ ，此处  $\theta = 90^\circ$ ， $E = vB$ 。

如果将导体在磁场中以速度  $v$  向右运动，看作是导体不动从而导体中的电荷  $q$  不动，而是磁场  $B$  以速度  $c$  向左运动，那么电荷  $q$  就会受到  $E = cB$  的电场力的作用，实际上，我们只是假设空间中有导体从而有电荷  $q$ ，如果没有电荷  $q$ ，以速度  $c$  向左运动的磁场意味着在电荷  $q$  这点的空旷的空间点，存在一个变化的磁场，这个磁场依然可以导致一个电场  $E = cB$  的出现，这就是电场和磁场相互产生的过程，这就是电磁波在空间中的传播，这就是电磁波中电场与磁场的关系  $B = E/c$ 。

只考虑电场力所做的功，电场力是  $qE$ ，在  $dt$  时间间隔内所做的功为

$$dW = \mathbf{F}_E \cdot d\mathbf{x} = qE(v_E dt) = qv_E Edt$$

与上式相比，

$$|d\mathbf{p}| = \frac{dW}{c}$$

这个公式可以扩张到  $\Delta t$  的时间间隔，因为任何时间间隔都是由无穷小量的  $dt$  组成的。因为上式对任何电磁波与带电微粒相遇都成立，我们可以推断，电磁波确实带有这个大小的动量，即便我们在上面的论述中没有设置一个带电微粒，我们可以想象放一个在那里，则这个想象的带电微粒同样会获得上式给出的动量，因此这个动量一定时电磁波固有的特性。