

第四章 光的本性是什么？

这 50 年的沉思，并没有使我更接近于什么是光子(光子)这个问题的解决。

——爱因斯坦 1955 年临终前不久的话

人类对光学的研究早在两三千多年前就初见端倪。

《墨经》中的光学：

在《墨经》中还记载了丰富的几何光学知识。墨子在当时就已知道光是沿直线传播的。墨子和他的学生做了世界上最早的“小孔成像”实验，并对实验结果做出了精辟的见解。

具体实验:在一间黑暗的小屋朝阳的墙上开一个小孔，人对着小孔站在屋外，屋里相对的墙上就会出现一个倒立的人影。为什么会这样呢？

《墨经》中写道：

“景:光之人，煦若射，下者之人也高，高者之也人下。”

“景”，即影，这句话的意思是：因为光线像射箭一样，是直线行进的。人体下部挡住直射过来的光线，射过小孔，成影在上边；人体上部挡住直射过来的光线，穿过小孔，成影在下边，就成倒立的影。这是对光沿直线传播的第一次科学解释。

《墨经》中还利用光的直线传播原理解释了物体和投影的关系。

我国春秋时期在光学现象的观察和研究就有相当成就。在我国较为系统的论著可见北宋时期沈括(1031-1095)的名著《梦溪笔谈》。

古希腊的哲学家在公元前 300 年开始，也对光的直线传播，光的反射和折射的特性有研究。

光学学科的形成是从 17 世纪开始的。

本章主要围绕对光的本性的认识的三个阶段(化了 230 年)展开：

从微粒说→波动说→光的波粒二象性。

1. 牛顿的微粒说，包括牛顿的研究方法。
2. 惠更斯的波动说:光的反射、折射、全反射和光的干涉、衍射、偏振。
3. 光的波粒二象性。
4. 介绍常见的，有关波传播的重要物理效应: 多普勒效应及其应用。
5. 光学的一个突破性进展 — 激光的发明及其应用。

§ 4.1 光的微粒说

一、牛顿对光的色散的研究

早在剑桥大学高年级时，通过三棱镜实验研究太阳光的色散现象，认识到不同颜色（波长）的光有不同的折射率。牛顿的色散实验为光谱学的研究和发展开辟了道路，被美国《物理学世界》评为历史上“最美丽的十大物理实验”之一。

牛顿在《光学》一书中强调了自己从实验观察出发，进行归纳综合的研究方法，他说：“在自然科学里，应该像数学里一样，在研究困难的事物时总是应当先用分析的方法，然后用综合的方法。这样的分析方法包括做实验和观察，用归纳法得出普遍结论，并且不使这些结论遭到非议，除非这些异议来自实验或者其他可靠的真理。”

二、牛顿的微粒说

1. 什么是微粒说？

牛顿认为：光是发光体所射出的一群微小粒子，它们一个接着一个地迅速发射出来，以直线进行，人们感觉不到相继两个之间的时间间隔。

2. 牛顿的微粒说是在什么指导思想下提出来的？

(1) 首先要着重指出的是：他是基于光的直线传播和他的自然哲学思想。牛顿在研究力学时，他的基本对象是“质点”，研究化学时，他相信“原子说”；加上微粒说简单、直观、方便应用（在几何光学中）。所以站在自然哲学高度，牛顿认为光也是一种粒子，使物质世界有统一性，也是很自然的。

(2) 用微粒说可方便解释光的反射，但在解释光的折射时，遇到困难，他用上了力学(机械)自然观思想。他假定速度为光速的微粒进入介质时，在垂直界面方向受到一个吸引力，获得一个垂直界面的附加速度，此附加速度与原来的速度相加的结果，合速度的方向往界面的法线靠拢，发生了折射。但是造成了合速度的大小将大于空气中的光速 c ，实际这是错误的。

可见测量光在介质中的速度大小将是微粒说正确与否的“试金石”。可惜当时没有实验能对此进行判断。

三、为什么光的微粒说能统治一百多年？

(1) 微粒说简单、直观，用“光线”可解释大量实验结果；相反波动说还存在不少缺陷(下节将看到：缺乏数学基础,不能解释偏振,以太的存在也遭疑等)。

(2) 当时没有实验能测量介质中的光速，判断微粒说是否正确。

(3) 牛顿在力学领域的卓越成就和牛顿哲学思想在社会上的影响。

(4) 值得指出, 在这个时期内牛顿也承认对某些光的光现象(如干涉)纯粹用微粒说无法解释。尤其在他认识到了光的周期性后, 促使他将微粒说与以太振动的思想结合起来, 对干涉条纹做出自己的解释(牛顿环)。

§ 4.2 光的波动说

一、惠更斯的波动说

1. 惠更斯波动说的基本思想

惠更斯在笛卡儿、胡克等人的基础上提出了光是振动传播的假说。

他认为“光是发光体中微小粒子的振动在弥漫于宇宙空间的完全弹性的介质(以太)中的传播过程。”他称这种波为以太波。并且类似于空气中的声波, 惠更斯提出以太波也是“纵波”。

注意: 这里惠更斯作了错误的类比, 实际上光波是横波。正由于被认为是纵波, 所以对“偏振”现象就无法解释了, 加上“以太”是否存在还是一个疑问, 而且初期的波动说还缺乏数学基础, 所以难以与微粒说抗衡。

2. 波动观念相比微粒观念的最重要的特点, 即最本质的不同:

波动是振动在介质中的传播, 不是振动体(或粒子)本身的传播。尤其是波满足线性叠加原理, 可以几个波同时叠加, 而粒子不行。许多物理现象(如后面将看到的干涉衍射)都是基于这种可叠加性。

3. 惠更斯原理(直观描述波的传播)

每一时刻的波前上各点都可看成是新的子波源, 从它们发出的各个球形子波在下一时刻的共同包络面就是下一时刻的新波前。

- ▶ 波面: 波在传播过程中振动相位相同的点组成的面称为波面。
- ▶ 波前: 最前面的一个波面称为波前。

利用惠更斯原理不仅能解释波的传播, 而且可方便说明光的反射和折射, 尤其可给出折射的正确解释, 给出折射率的物理意义。

二、光的反射

用惠更斯原理可以解释光的反射

三、光的折射

1. 折射的物理意义

用惠更斯原理不仅可以解释光的折射，而且给出了折射率的明确的物理意义。从图可得到折射率

$$\frac{\sin\theta}{\sin\phi} = \frac{AC}{A'C'} = \frac{c}{v} = n > 1$$

其中 θ 是在真空中的入射角， ϕ 是介质中的折射角， v 是介质中的光速。真空的折射率 $n=1$ 。由于介质中光速 v 都比 c 小，所以介质折射率 $n>1$ 。

2. 光疏介质与光密介质

通常对两种介质相比而言，其中光密介质：指折射率相对大的介质。光疏介质：指折射率相对小的介质。因此，对两种介质相比而言，在光密介质中的光速必然要比光疏介质中的光速小。

光从介质 a 以入射角 θ_a 进入介质 b，折射角为 θ_b ，则相对折射率定义为：

四、光的全反射及应用

全反射：一束光从光密介质进入光疏介质，当入射角大于某临界角时，光将全部反射回来。

应用举例：光纤,可用于光通信，图像传送，医用“内窥镜”技术和激光刀技术。

§ 4.3 光的干涉、衍射和偏振

一、双缝干涉、薄膜和劈尖干涉

1. 托马斯·杨成功实现双缝干涉实验(1802年)，波动说取得重大胜利

(1) 什么是光的干涉？

满足如下相干条件的两束光波叠加时,彼此相消或相长的现象。

干涉条件：相同的频率，有稳定的相位差，相同的振动方向。

(2). 用波的叠加原理，也可以对干涉条纹作出定量说明。

2. 薄膜和劈尖干涉及其应用

(1) 薄膜干涉：肥皂泡或路面上的油膜所产生的彩色图样，是由于光在薄膜上、下表面反射回来的两束光发生干涉而形成的。

(2) 空气劈尖干涉：

劈尖干涉：光从极小角度的空气劈的上、下两个面反射回来，发生干涉。

应用：运用劈形空气膜的干涉原理，可以检测物体表面的平整度。

取一块光学平面的玻璃片，称为平晶，放在待检测工件（玻璃片或者金属磨光面）的表

面上方，在平晶与工件表面间形成劈形空气膜，然后用单色光垂直照射，观察干涉条纹。如果工件表面是非常平整的，那么条纹应该是一组平行线；如果工件表面不平整（肉眼不一定能看出），则随着工件表面凹凸的分布而出现形状各异的曲线。

（3）牛顿环：

牛顿环：把一个大曲率凸透镜放在光学平面玻璃片上。当用单色光正入射到透镜平面上时，由于凸透镜与下面平面玻璃片间形成的空气劈的作用，则沿着空气劈厚度增加的方向可观测到同心圆环形的明暗干涉条。

牛顿环可用来快速检测透镜的曲率半径及其表面是否合格。

由于托马斯·杨的实验明显支持了惠更斯的波动说,但当时的波动说还缺少严密的理论工作,还不足使波动说取得决定性胜利。加上他的实验对牛顿的微粒说很不利，遭到了学术界中一些不愿看到伟大的牛顿有错的一些科学家的质疑，所以十多年不受重视。

托马斯·杨的一段精采之话：“尽管我仰慕牛顿的大名,但我并不因此非得认为他是百无一失的。我……遗憾地看到他也会出错,而他的权威也许有时甚至阻碍了科学的进步。”

直到 1818 年,法国科学家菲涅耳用严密的理论成功解释了光的衍射，才使波动说取得决定性胜利。

二、单缝衍射和单孔衍射 仪器分辨率

1. 单缝衍射

不同于双缝干涉，单缝衍射中央亮条纹特别宽，集中了约 90%的光强，近似为原来单缝的像。

2. 圆孔衍射

衍射图样中第一暗环对小孔中心的张角为 θ ，

$$\sin\theta \approx \theta = 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

波长 λ 一定时， d 越小， θ 越大，即光转弯越厉害。

法国科学家菲涅耳从波动观点出发，将叠加原理与惠更斯原理结合起来，严格计算了狭缝圆孔、圆板后面的衍射图样。尤其是在圆板后面屏幕中央有亮斑，当时轰动了法国科学院，一些权威不相信。但最终实验证实了菲涅耳的计算结果。从而使波动说取得了决定性的胜利。

3. 仪器分辨率

$$\phi_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

三、光的偏振

1. 什么是偏振光？

电磁波是横波，电场和磁场的振动方向与波的传播方向垂直。

- ▶ 非偏振光：垂直传播方向的振动方向可以在 Oxy 平面内 是任意的。
- ▶ 自然光：在垂直于传播方向的各方向上，电场强度振动的强度随时间的平均值是均匀的。
- ▶ 线偏振光：光振动只沿某一固定方向。
- ▶ 部分偏振光：某一方向的光振动比与之垂直方向上的光振动占优势。
- ▶ 椭圆偏振光：光矢量按一定频率旋转，其矢端轨迹为椭圆的。
- ▶ 圆偏振光：光矢量按一定频率旋转，其矢端轨迹为圆的。

2. 如何产生偏振光？

- (1) 用起偏器，使非偏振光变成线偏振光。
- (2) 普通反射光也是部分偏振的。

当光在折射率为 n 的介质内，以 $\theta = \theta_B$ （布儒斯特角）入射到折射率为 n' 的介质表面时，反射光可达到完全线偏振（光矢量垂直于入射平面）。

3. 光的偏振的应用

- (1) 在摄影镜头前加上偏振镜消除反光

在拍摄表面光滑的物体，如玻璃器皿、水面、陈列橱窗、油漆表面、塑料表面等，常常会出现耀斑或反光，这是由于光线的偏振而引起的。在拍摄时加用偏振镜，并适当地旋转偏振镜面，能够阻挡这些偏振光，借以消除或减弱这些光滑物体表面的反光或亮斑。要通过取景器一边观察一边转动镜面，以便观察消除偏振光的效果。当观察到被摄物体的反光消失时，既可以停止转动镜面。

- (2) 司机镜

当司机驾车在公路上迎着太阳行驶时，会因路面的反射光而感到晃眼。阳光照射在路面上而反射，入射面垂直于路面，而反射光的光振动以垂直于入射面为主（即以平行于路面为主）。这就是司机镜的原理，它是一种特殊的偏振镜。只要司机戴上它，镜片的偏振化方向取垂直于路面方向，就不会感晃眼睛。

- (3) 摄影时控制天空亮度，使蓝天变暗

由于蓝天中存在大量的偏振光，所以用偏振镜能够调节天空的亮度，加用偏振镜以后，蓝天变的很暗，突出了蓝天中的白云。偏振镜是灰色的，所以在黑白和彩色摄影中均可以使

用。

(4) 使用偏振镜看立体电影

立体电影是用两个镜头如人眼那样从两个不同方向同时拍摄下景物的像，制成电影胶片。在放映时，通过两个放映机，把用两个摄影机拍下的两组胶片同步放映，且在每架电影机前装一块偏振片，它们的偏振方向互相垂直。这时如果用眼睛直接观看，由于这两束偏振光投射到银幕上再反射到观众处，偏振光方向不改变，看到的画面是略有差别的两幅图像重叠在银幕上，模糊不清的。

要看到立体电影，观众要戴上一副特制的眼镜，这副眼镜也是一对偏振方向互相垂直的偏振片，使观众的每只眼睛只看到相应的偏振光图像，即左眼只能看到左机映出的画面，右眼只能看到右机映出的画面，这样就会像直接观看实物那样，产生立体感觉，这就是立体电影的基本原理。当然，实际放映立体电影是用一个镜头，两套图像交替地印在同一电影胶片上，还需要一套复杂的装置。这里就不涉及了。

§ 4.4 光的波粒二重性

一、光电效应和爱因斯坦的“光子”假设

1. 光电效应实验的实验结果用经典理论无法解释：

- (1). 存在截止频率。
- (2). 光照到金属表面光电流立即产生。
- (3). 光的最大动能只与光的频率有关，与光强无关。

2. 爱因斯坦“光量子”假设和光电方程。

他指出：“按通常的想法，光的能量是连续地分布于光传播所经过的空间，当人们试图解释光电现象时，这种想法遇到了极大的困难”。

—《光的产生和转化的一个启发性观点》（1905）

为此，他进一步假定：光的能量也是量子化的，是由“能量子所组成”，且“每个能量子将它的能量转移给电子，与所有其它的量子无关，那么电子的速度分布，将与入射光的强度无关。”而被光量子打出的光电子数目将正比于入射光的强度。这里的能量子后来被称为光子或光子。每个光子的能量是与频率成正比。

$$E = h\nu$$

光电方程：

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - W$$

爱因斯坦提出“光量子”假定是受到了普朗克的“量子化”概念以及牛顿“微粒说”的启发，继承和发展了普朗克和牛顿的科学思想。在《物理学的进化》一书中，爱因斯坦明确提出了他的科学思想。他指出：“光量子的观念是在本世纪初普朗克为了解释某一比光电效应复杂得多的现象而首先提出的。但是光电效应极其简单而清楚地指出了改变我们旧概念的必要性。”

接着他又指出：“为了得到牛顿理论的基本观念，我们必须假设：单色光是由单一粒子组成的，并用光量子来代替旧的光微粒。光量子以光速在空中穿过，它是能量的最小单元。我们把这些光量子叫做光子。牛顿理论在这个新的形式下复活，就得出光的量子论。不但物质与电荷有微粒结构，辐射能也有微粒结构，就是说，它是由光量子组成的。”

3. “光量子”假设遭到冷遇和怀疑

(1) 光子的概念与人们原来对光的认识相差太大。

(2) 由光电方程可得

$$eV_0 = h\nu - W$$

即 V_0 与频率 ν 成正比。但当时的实验还不够精确，此式未得到很好的验证。所以“光量子”假设不被科学界所接受。普朗克甚至认为“他可能在他的思索中失去目标”。

当时的科学家还是试图用经典波动理论来解释光电效应实验。

4. 密立根实验

直到 1914 年，才由美国物理学家密立根全面验证了光电方程的正确性，即 V_0 与 ν 成正比，并第一次直接从实验中测定了普朗克常数 h 。

1921 年和 1923 年，爱因斯坦和密立根先后获得诺贝尔物理学奖。

很有意思的是，在 1923 年的领奖演说中，密立根公开承认自己曾长期对爱因斯坦的“光量子”观点和光电方程抱怀疑态度。他在演说中说道：

“与我自己预料的相反，这项工作终于在 1914 年成了爱因斯坦方程在很小实验误差范围内精确有效的第一次直接实验证据，并且第一次直接从光电效应测定普朗克常数 h 。”

密立根精神：

尊重事实，而不是尊重权威，不被传统观念束缚有勇气否定自己。

5. 光的波粒二象性

1909 年，爱因斯坦明确地提出了光的波粒二象性，并说这“可以被理解为波动理论和

微粒说的一种统一”。

他提出两个著名的关系式：

$$E = h\nu$$
$$p = \frac{h}{\lambda}$$

将标志波动性的 ν 和 λ 通过 h 与标志粒子性的 E 和 p 联系起来。

光在传播时显示了波动性，在与物质相互作用而转移能量时显示出了粒子性，两者不会同时显示出来。

二、康普顿效应

1. 任何重要的物理规律都必须得到至少两种独立的实验方法的验证。1923 年美国物理学家康普顿证明了 X 射线的粒子性，是继光电效应后证明光的粒子性的又一个独立的关键性实验。

2. X 射线源发射一束波长为 λ 的 X 射线，经一块石墨发生散射，散射光穿过光阑，其波长和强度可以由晶体和探测器所组成的光谱仪来测定。

3. 康普顿接受爱因斯坦的观点，认为 X 射线的光子好比一个个小钢球，每一个不但有能量 $E=h\nu$ ，而且具有动量 $p=h/\lambda(\lambda\nu=c)$ 。利用牛顿力学动量和能量守恒可得到入射光的波长变化：

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

当 $\theta = \pi$ 时，波长最大变化为 $0.004852nm$ ，可见只有对 x 射线才能观测到这么小的变化。理论与实验完全符合，因此康普顿实验比光电效应进一步证实了电磁辐射的“粒子性”。因为在解释光电效应实验时，只涉及到了光子的能量，而在解释康普顿效应时，不仅考虑了光子的能量，还考虑了光子的动量。

所以康普顿散射实验为爱因斯坦的光量子假设提供了更完全的依据，在这以后，怀疑“量子”说的人就非常少了。

康普顿因此获得 1927 年的诺贝尔物理学奖。

§ 4.5 多普勒效应

一、声波的多普勒效应

多普勒效应：声源与观察者有相对运动时，观察者所接收到的表观频率发生变化。

两种情况：

1. 声源静止，观察者动，速度为 v_{ob}

当观察者向着声源运动时，取 $v_{ob} > 0$

当观察者背离声源运动时，取 $v_{ob} < 0$

表观频率 ν' 为

$$\nu' = \left(\frac{u + v_{ob}}{\lambda} \right) = \left(\frac{u + v_{ob}}{V} \right) \nu$$

2. 观察者静止，声源运动，速度为 v_s

当声源向着观察者运动时，取 $v_s > 0$

当声源背离观察者运动时，取 $v_s < 0$

表观频率 ν' 为

$$\nu' = \frac{u}{\lambda'} = \left(\frac{u}{u - v_s} \right) \nu$$

3. 如两者一起运动，表观频率

$$\nu' = \left(\frac{u + v_{ob}}{u - v_s} \right) \nu$$

二、光波的多普勒效应

光不靠空气等介质传播，光的多普勒效应与声音不同。频率变化公式只有一个，只与它们的相对速度 v 有关，不管观察者动，还是光源动。当 $v \ll c$ 时，表现频率为：

$$\nu' = \left(\frac{c + v}{c} \right) \nu = \left(1 + \frac{v}{c} \right) \nu$$

改写为频率的改变量：
$$\Delta \nu = \nu' - \nu = \frac{v}{c} \nu$$

式中 v 可正可负，两者靠近时取正，两者背离时取负。

请注意：以上只是观察者与光源的相对运动在它们的连线上的情况，称为纵向多普勒效应。第八章将介绍横向多普勒效应。

三、应用举例： 雷达测速仪（测云层、飞机、汽车等的速度）

例 1. 设地面固定雷达站发出频率为 ν 的雷达波，当波遇见飞行物（以速度 v 迎面而来）被反射回来后，又被雷达站所接受时，其频率改变为 ν' ，求此频率。

例 2 气象上已广泛使用气象雷达，它常用的工作频率是 $\nu = 2.7\text{GHz}$ ，今若有一朵雨云以速度 $v = 28\text{m/s}$ 向气象站飞来，问雷达测到的频率为多少？

§ 4.6 玻尔公式 光的共振吸收 激光原理

一、两能级原子与光的相互作用

1. 自发辐射和受激（共振）吸收

为了解释原子与光谱是线光谱的事实，玻尔假定一个原子只能处于若干不连续的分立的能量状态，称为定态。图中给出了自发辐射和受激吸收二种过程。

2. 原子退激所放光子能量或共振吸收的光子能量为

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

这就是玻尔公式。

二、爱因斯坦关于受激辐射的预言和激光的发明

1. 获得激光的物理原理——“受激辐射”

1917年，爱因斯坦为了导出普朗克黑体辐射公式，首先预言了“受激辐射”过程的存在。受激辐射中的诱发光子的能量 $h\nu = E_2 - E_1$

2. 受激辐射光的特征

所放出的两个光子有同样的频率，同样的偏振方向和同样的相位。显然是实现了光的放大，有很好的应用前景

3. 获得激光的必要条件

粒子数反转：使上能级 E_2 的原子数大大超过下能级 E_1 原子数。

激光的英文名字是 Laser（镭射），也就是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写。

激光的意思是光受激辐射放大。

这个简练又准确的名字是钱学森提出的。

4. 氦氖激光器的物理过程

5. 激光器的三个组成部分是：产生激光的工作介质；为实现粒子数反转所提供的激励源；和实现光放大的谐振腔。

三、激光实际应用简介(可参见《改变世界的物理学》)

由于激光具有方向性好、亮度高、单色性好和相干性好的特性，所以应用广泛：

- (1) 激光测距、激光准直。
- (2) 激光加工：切割、焊接金属。
- (3) 激光用于医学：激光眼科、激光手术刀。
- (4) 激光用于能源：分离同位素。

- (5) 激光舞台与激光唱片。
- (6) 激光通信。
- (7) 激光武器。

四、激光冷却、玻色-爱因斯坦凝聚

由整数自旋粒子组成的玻色子系统就不受泡利不相容原理的限制，在同一单粒子态上所占据的粒子数不受限制，在高温时服从麦克斯韦玻尔兹曼分布，最低能态上没有粒子，在极低温度下粒子会向动量和能量为零的最低能态即基态聚集，这就是在 1925 年爱因斯坦预言的被称为“玻色-爱因斯坦凝聚”。

如何获得极低温的粒子？

获得低温是长期以来科学家所刻意追求的一种技术。它不但给人类带来实惠，例如超导的发现与研究，而且为研究物质的结构与性质创造了独特的条件。例如在低温下，分子、原子热运动的影响可以大大减弱，原子更容易暴露出它们的“本性”。激光冷却是近代发展的一种获得极低温粒子的有效的方法。所谓激光冷却，就是在激光作用下使原子的速度迅速降低。

原子的运动是三维的。1985 年贝尔实验室的朱棣文小组就用三对方向相反的激光束分别沿 x , y , z 三个方向照射钠原子，在 6 束激光交汇处的大量钠原子由于多普勒效应，原子很快被减速，于是钠原子团就被冷却下来，温度达到了 $240 \mu\text{k}$ 。

朱棣文把这种实体叫做“光学粘团”，但这实验只是冷却原子并没被真正捕获。

捕获原子的有效方法是再利用“原子阱”，一种原子阱叫“磁阱”，它利用两个平行的电流方向相反的线圈构成。这种阱中心的磁场为零，向四周磁场不断增强。陷在阱中的原子具有磁矩，在中心时势能最低，偏离中心时就会受到不均匀磁场的作用力而返回。对捕获的原子团再采用激光冷却等技术，这就是 1987 年朱棣文做成的一种更有效的陷阱，称之“磁光陷阱”。用此法可将原子温度进步降至 $1 \mu\text{k} = 10^{-6} \text{k}$ ，原子速度降低到 10^{-2}m/s 。

1997 年朱棣文获诺贝尔物理奖。

激光冷却和原子捕陷的研究在科学上有很重要的意义。例如，由于原子的热运动几乎已消除，所以得到宽度近乎极限的光谱线，从而大大提高了光谱分析的精度，也可以大大提高原子钟的精度。最使物理学家感兴趣的是它使人们观察到了“真正的”玻色-爱因斯坦凝聚。

§ 4.7 激波和切连科夫辐射

一、激波：

当飞行物的速度比声速快时，飞行物所发出的声音呈圆锥面向外传播，速度仍为声速，称为激波。这时由于每一瞬时发出的一系列球形子波，其包络面便形成圆锥面。

二、声波改为光波会怎么样？

光波也有激波：

在介质中光速将变慢，所以完全有可能在介质中一个带电粒子的飞行速度超过 c/n ，这时也会产生“电磁激波”，称为切连科夫辐射。

例如浸有核燃料的水池中的水会呈现美丽的蓝色。这是因为射线在水中与电子碰撞（康普顿效应），使电子获得超过 c/n 的高速，而发出蓝色切连科夫辐射。