

光学研究新进展

杨发成

(新疆油田公司 实验检测研究院 克拉玛依市 邮编 834000)

摘要: 本文以光子、光波及惠更斯理论探究了光的反射和折射. 认为入射光跟界面质点发生作用时, 各质点的次级辐射, 只能生成仅有一个光子的参考球, 目前, 人们却将其称着球面波. 本文将它称着光子参考球或数学参考球. 当界面质点产生的光子参考球同时到达某一位置形成的包络面(包迹), 就是反射或折射光束的波阵面. 一束在真空中传播的平行光, 垂直传播方向的光强度最大, 光束横截面即波阵面或叫平面波. 当波面相遇物体时, 界面质点作用下, 辐射构成了概率密度与光强的等价关系. 因此, 反射、折射波的形成, 是界面质点(光)辐射的统计综合. 之所以光入射到透明体界面发生偏折, 主要原因是光与分界面质点发生作用时具有了弛豫时间, 从而使光子在时间 dt 里停滞不前, 折射波波面偏离原来的方向(即折射). 除了反射、折射波波面外, 向着其它方向辐射的是不成“气候”的散射光. 光的双折现象, 是物质的分子(CaCO_3)在凝聚过程中分子晶体排列结构有了特殊性, 对入射光来说具有不同的界面, 因而呈现双折射现象.

[杨发成. 光学研究新进展. *Academ Arena* 2024;16(3):12-22]. ISSN 1553-992X (print); ISSN 2158-771X (online). <http://www.sciencepub.net/academia>. 02. doi:10.7537/marsaaj160324.02.

关键词: 光子; 光波; 惠更斯理论; 反射; 折射; 分子晶体排列; 结构; 界面; 双折射

1. 引言

生产实践中, 看似朴素的光现象如反射、折射及传播, 却蕴含着深刻的道理. 现行教科书, 大多只讲物理实验、实验过程及归纳总结, 却少有详细、完整的物理机制. 对光线、光束、光波和波线等, 更没有相关描述和说明, 这些问题, 也为本文提供了理想的写作素材. 所以, 对《光学》领域的再探索也显得有了意义. 光的直线传播、反射和折射, 通常归属几何光学范畴; 其实, 几何光学和波动光学是紧密关联的, 是同一物质在不同条件下表现出的不同特性. 本文以波动光学为基础结合几何知识进行综合研究与分

析, 也许是一次好的尝试.

2. 光的传播

教科书表述: 光在同种均匀介质中沿直线传播. 为了表示光的传播情况, 通常用一条带有箭头的直线表示光传播的径迹和方向, 如图1所示. 这样的直线就叫做光线(light ray). 作者分析认为: “光在真空中沿直线传播”更为准确; 这里的“光”意指一条光矢、一条光线或一束光. 光在同种透明均匀介质中沿直线传播, 实为光束在同种透明均匀介质中沿直线传播.



图 1. 光线

如图 2 所示, 真空中, 沿同一方向传播的无限细的光子束, 即为一条实际光线【见图 2 (a)】. 理论上, 简明描述为一条带有箭头的直线表示光在真空中传播的径迹和方向, 也可称它数学光线【见图 2 (b)】.

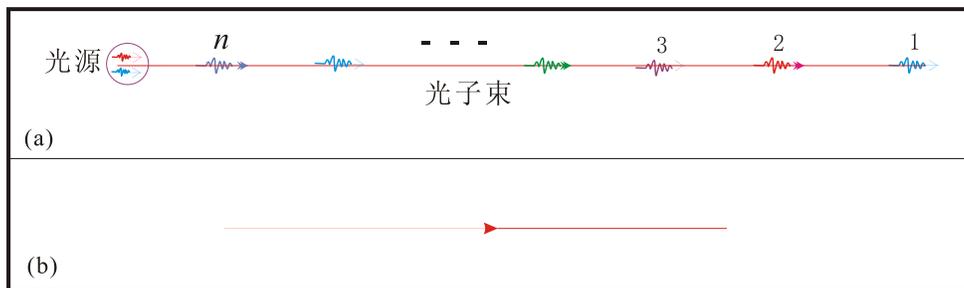


图 2. 光子束和数学光线

一条光线，物理意义是一条光能量的通路。只有当迎着它使它射入我们的瞳孔或探测器时才能感知到它，从一条光线的侧面是看不见光线的。一般地，**光束**是同一光源发出的许多光线（即光子束）的集合。所以，光线不代表具体的一束光，即便是很细的一束光，也是**光束**，不宜称它为“**光线**”。一束光，可分为发散、会聚和平行的三种类型。光束的聚散度被定义成从所考察的波前到点光源的距离（与光线传播方向一致为正，否则为负）的倒数。若距离以米（m）为单位，则聚散度的单位即为屈光度。

3. 光的反射

如图3所示。当一细束平行光或一束激光**ABFG**从“真空”斜射到界面**PQ**上，垂直于传播方向的平面波阵面**[a1-b1]**（波阵面为通过**a1b1**线并与波面垂直的平面，亦称正交轨面或包络面）向分界面传播。当 $t=t_0$ 时，入射波的波阵面**[a1-b1]**传播至**AB**位置，波点**a1**先与界面相遇（为方便讨论将波面**[a1-b1]**看成**AB**波），随后，波面上**A1, A2, A3, ...**各点，相继到达分界面**AC**上**E1, E2, E3, ...**各点，直到 $t=t_2$ 时刻，**B**点到达界面**C**点。

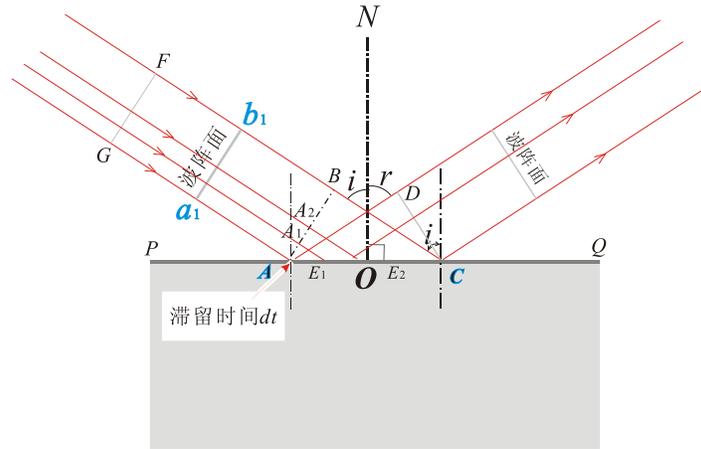


图3. 光的反射

如果以入射波到达分界面上各点作为子波的波源，这里的“子波”，实为一个光子参考球或数学参考球，这个所谓的“子波”波面上，有且只有一份光子。为了本文写作方便，仍旧以“子波”名称在此出现（这里，分界面上的子波源并不在同一波阵面上，但是，如果把各个子波先后发出的时刻考虑进去，以不同半径的球面作为这些子波在同一时刻的波面，这些子波波面的包迹，便是该时刻的波阵面），并设 $A_1 A_1 =$

$A_1 A_2, A_1 A_2 = A_2 A_3, \dots, UC$ 为真空中的光速。

如图4所示，**ABFG**是实际光束，**FBC, Ga1A**是数学光线，界面线段**AC**的中垂线**ON**即为法线【图4中没有画出】，入射角*i*与反射角*r*位于法线两侧。这里，**[a1-b1]**是入射光束**ABFG**的一个波面。光束，看成沿传播方向上若干相同波阵面的有序排列。

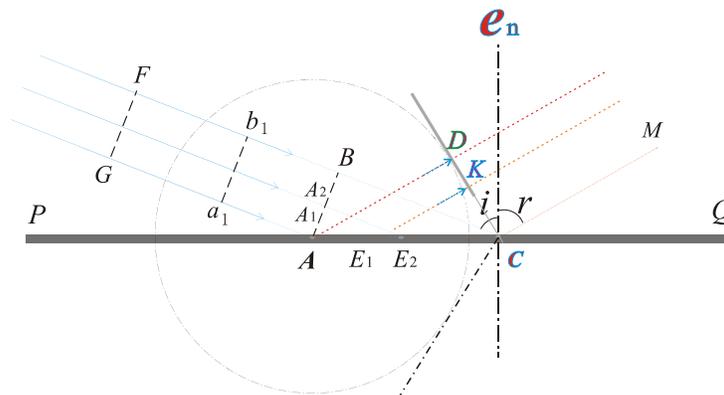


图 4.反射光形成示意图

图4中,过点A作 $AB \perp CF$ 交于点B,则 $\angle CBA = 90^\circ$. 入射波[a1-b1]上,波面经界面AC域内各质点先后扰动,产生的子波(光子参考球)同时叠加形成包络面CD. CD切⊙A于点D, $AD \perp CD$.

经理论分析和几何知识, $AD = UC \square t$, $CB = UC \square t$, $\square AD = CB$,

在 $\text{Rt}\triangle ADC$ 和 $\text{Rt}\triangle CBA$ 中,

$\square AD = CB$, $AC = CA$,

$\square \text{Rt}\triangle ADC \cong \text{Rt}\triangle CBA$ (HL), \square 有 $\square CAD = \square ACB$,

过点C作 $CM \square AD$, $\square \square MCQ = \square CAD$, $C \rightarrow M$ 为反射光方向,

过点C作 $e_n C \square PQ$, $\square \square e_n CB = \square e_n CM$.

经过理论分析,界面AC区域其它各质点(E_1, E_2, E_3, \dots)生成的子波(光子参考球)也是同时到达CD处位置,所以CD是反射光束波阵面.图4中 $e_n C$ 是(人为)设置的垂直于AC的辅助线,只是为了方便研究.

由于 $\text{Rt}\triangle ADC \cong \text{Rt}\triangle CBA$, $AB = CD$, 所以,入射、反射光束宽度(横截面积)理论上是相同的.实践中,AC的中垂线ON称为法线(图4中ON没给画出)【见图3】,也是为了方便研究而设置的. $ON \square AC$, $e_n C \square AC$, 则 $ON \square e_n C$, 入射角*i*等于反射角*r*.

为深入理解包络面DC的实际意义,一般采用统计理论与光强关系进行分析.从数学上,设有两个随机变量*x*和*y*,已知*x*与*y*的函数关系 $y = f(x)$,并知随机变量*x*的概率密度 $P_x(x)$,求*y*的概率密度 $P_y(y)$.

一般来说,可由关系式 $y = f(x)$,求出其反函数 $x = f^{-1}(y)$.

对于一个给定的*y*,若*x*的值处于(*x*, *x*+*dx*)这个区间,则对应的*y*值处于(*y*, *y*+*dy*)这个区间之内.两者的概率分布分别为 $P_y(y) dy$ 和 $P_x(x) dx$,设它们相等.即

$$P_y(y) |dy| = P_x(x) |dx|$$

这样,就构成了概率密度与光强的等价关系.也就是说,在反射波的波阵面上光线量最多,垂直传播方向上的光密度最大.

4. 光的折射

光的折射是斯涅耳(W.Snell, Snellius, 约1580-1626)于1621年从实验上发现,笛卡儿(R.Descartes, 1596-1650)发表在折射光学(Dioptrique)一书中.

实践中,通常以透明平面玻璃砖作为实验器材.透明物体,理解成若干透明的二维平面材料(叠加)构成,常见的有固体水晶、玻璃、红宝石

及液态水等.这里,以细激光光束照射平面玻璃砖(透明均匀物质)为实验器材对光的折射进行研究.

4.1 光的折射与滞留时间

如图6所示,一束细激光ABFG从“真空”斜入射到玻璃界面PQ上(以二维透明平面PQ为研究对象),垂直于传播方向的平面波向界面AC传播,为方便讨论,将细光束扩展放大.与光的反射一样,仍然以垂直光束传播方向的横截面(即波面[a1-b1])分析.圆柱光束照射界面呈椭圆形光斑,AC为椭圆(光斑)长轴,光斑内各点都成为次级扰动源.

当 $t = t_1$ 时,波面[a1-b1]传播至AB位置,波面上的a1点先与分界面相遇(为方便讨论将波面[a1-b1]看成AB波),随后,波阵面上 A_1, A_2, A_3, \dots 各点,相继到达分界面AC上 E_1, E_2, E_3, \dots 各点,直到 $t = t_2$ 时刻,B点波到达C点.

图6中,波面[a1-b1]上波点a1被质点A从吸收到再辐射结束,经历时间为*dt*(fs量级),在*dt*时间里,波点a1便停滞不前【见:附件2】.这时,质点A向外辐射(光子)的方向是随机的,其速度大小仍是光在“真空”中速度*UC*.质点吸收、辐射过程,经典《光学》称之为一次扰动.

这时,波面[a1-b1]的a1点最先到达玻璃面A点并与其发生作用.从质点A吸收光子a1时刻开始至辐射结束,需要经历一个滞留时间*dt*,滞留时间长短,跟弛豫时间*T*密切相关【见:附件2】.

当波点b1自B点到达C点时刻,设想:有一经过A点空域穿过且不受A点扰动的光子传播至I点(直线GAJ理解为数学光线),则 $AI = BC$ 【见图6】.但是,波点a1经历了滞留时间*dt*,所以,A点子波(光子参考球)半径*AW*($R = AH = AW = \dots$)小于*AI*(*AI*为光在“真空”中传播的距离*BC*).这时, E_1, E_2, E_3, \dots 各点所产生的包络面(包迹)CW,即是折射光束的波阵面.图6中, A_1, A_2, \dots 是球面脉冲的一小部分一一面元*ds*与光线垂直.折射波面(包迹)强度最大,遵循概率与统计综合.其它方向上、没能形成“气候”的称为散射光.

为了更好地理解,不妨假设波点b1从B点到达界面C点的时间为 $\square t$ (即波点b1到达界面C点比波点a1到达A点的时间延迟了 $\square t$),这时,A点扰动到达范围为图6中圆形虚线所表示的空域 Ω ,光从A点向外传播时间是($\square t - dt$)——A点扰动的球面(光子参考球)在玻璃内到达H、W、...等位置,向外扩散时间为($\square t - dt$)的球面子波(光子参考球)半径 $R = UC(\square t - dt) < AI = BC$.

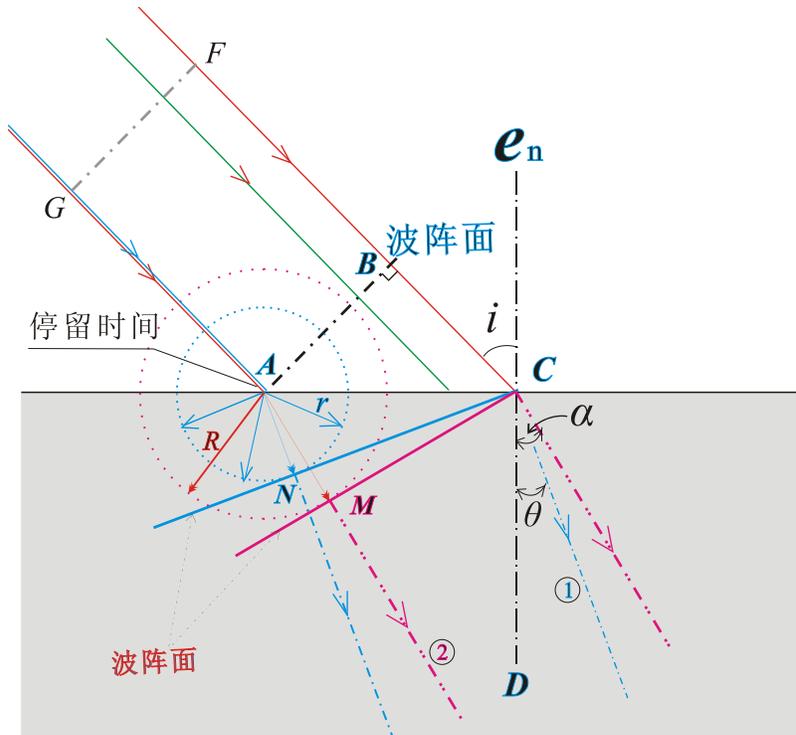


图 7. 不同颜色光的折射示意图

4.3 综述

假设, 将 PQ 设想为二维透明平面, 如图 8 所示. 当 $t=t_0$ 时, 入射波的波阵面刚好到达 AB 位置——为方便讨论将 AB 看成 $t=t_0$ 时刻的波. 波面波点与界面质点相遇, 随后, 波阵面上 A_1, A_2, A_3, \dots 各点, 相继到达分界面的 E_1, E_2, E_3, \dots 各点, 直到 $t=t_1$ 时刻, B 点到达 C 点. 进一步设想: 二维透明平面上, 直线 AC 上各点的子波 (光子参考球), $t=t_1$ 时刻, 形成了以 C 为顶点、 $C-u$ 和 $C-u'$ 为母线的锥形波阵面 $C-uu'$. 当波点 B 在 C 点滞留 dt 时间后向外辐射、扩展时, A 点生成的球面子波

(光参考球) 已扩散至 D 和 D' 处的空间位置. 这时, 反射、折射波面关于直线 AC 对称呈现. 虽然 $C-u$ 和 $C-u'$ 也是波面, 但强度很小, 直到 $t=t_1$ 时刻, 包络面 (包迹) 在 CD, CD' 位置的强度最大, 如图 9 所示. 真空或空气环境里, 子波 (光参考球) 扩散至反射面 CD 、折射波 CD' 位置 (与传播方向垂直), 每一个子波, 只有一份光子. 这时, 界面上 E_1, E_2, E_3, \dots 各点子波 (光子参考球) 同时扩散至 CD, CD' 位置, 即: AB 波经 AC 界面后, 分裂为 CD 和 CD' 波.

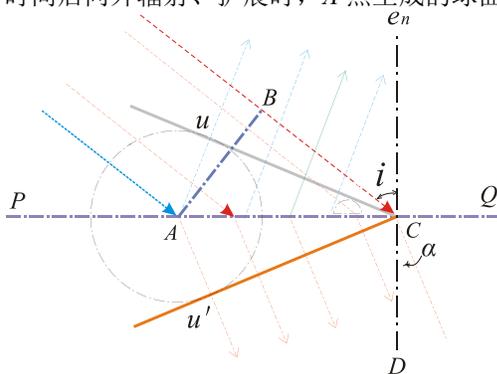


图 8. 光锥波面

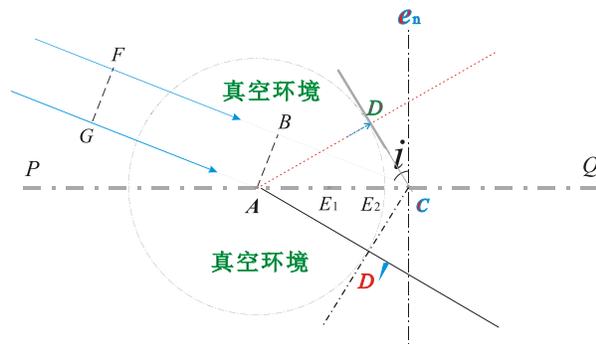


图 9. 理论波面 CD 和 CD'

二维透明平面只是一假想平面, 实践中的透明体是若干透明二维平面材料 (叠加) 构成, 当光束照射平面玻璃砖 (透明均匀物质) 时, 次表层、次

表层...等, 都对光折强度增强有贡献, 如图 10 所示.

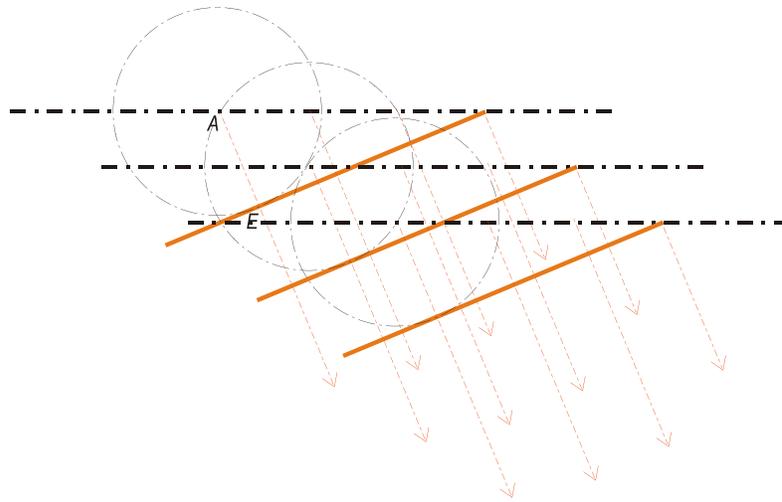


图 10. 透明体多层叠加与折光强度示意图

事实上, A 波在玻璃内扩散过程中, 质点对其吸收率较大 (吸收系数为 10^{-2}cm^{-1}), 且扩散强度跟扩散距离平方成反比, 并且每个“光参考球”只有一份光子, 综合这些因素, A 点的“光参考球”强度在玻璃中呈指数下降. 同时, “光参考球”扩散过程中, 易被 A 点邻近的其它质点作用, 该点又成了新的点光源. 所以, 这时玻璃中只存在由 A 点产生的、数学上的“光子参考球”理论上的不断扩大, 实际的光参考球已不复存在. 所以, 也就无法形成跟反射波波面对称的、实际的波阵面. 即便有幸没有

被吸收掉的光子, 也是散射光. 就是说只存在数学上的 A 波, 实际的物理波, 早已结束, 如图 11 所示.

经过以上分析, 图 11 中折射波面在 Cu' 处的强度较大. 波面 $u'-C$ 位置, 除跟滞留时间 dt 有关, 还跟质点分子结构、分布密度等因素息息相关, 质点分布越密, 形成的波面越靠近界面 PQ (即 u_a-C 位置), $\square ACu'$ 就越小; 反之, $\square ACu'$ 就大 (即: 折射波面在 u_b-C 位置).

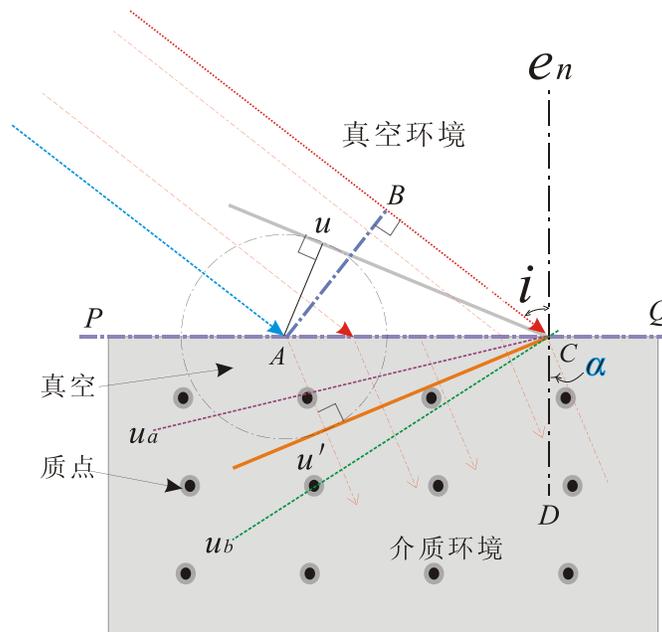


图 11. 透明体质点吸收率与折射波面

假若人为地将 (吸波) 质点从透明体中“删除”, 则是图 8 中所描述的情形. 所以, 折射率大小

由以上几个因素综合确定. 对于波阵面的形成, 是个复杂的系综问题, 对它的影响因素有停滞时间

dt 、透明体密度以及质点对光的吸收率等关联，是大数下的统计综合。

5. 结束语

反射光是入射光与界面质点作用形成的，沿反射线方向波面强度最大，遵守统计规律.其它方向也有光出现，强度较弱，一般当作散射光.当光束照射透明物质界面时，质点对光的作用会发生滞留，正是有了滞留时间的存在，新的波束才发生了偏折；大量质点共同作用、随机变量的概率密度统计综合下形成折射波束，折射方向传播的波强度最大，其它方向视为散射光.不同颜色光的能量不同，跟透明体界面质点作用的滞留时间长短不同，波束偏折程度也就不同.

6. 附件

1、光子参考球与球面波

物质由原子、分子构成，当物体在外来光能照射时原子受激，电子振动加强，这时原子成为新的点光源，随机向外辐射成为“次级发射源”.所以，物体表面每一点都可看成一个新的辐射中心.为此设想：氢原子一次发射一份（单色）光子，在 $t=0$ 时刻，从三维空间 $O-xyz$ 原点 O 发射光子，它具体向哪个方向运动不能确定，可以确定其为以 O 为圆心 UCt 为半径的球面上，叫它光矢参考球或光参考球，如图 12 所示.将光矢参考球，称著子波是不对的.只有当若干的氢原子从原点 O 同时自发辐射，形成的这个球面称著球面波.

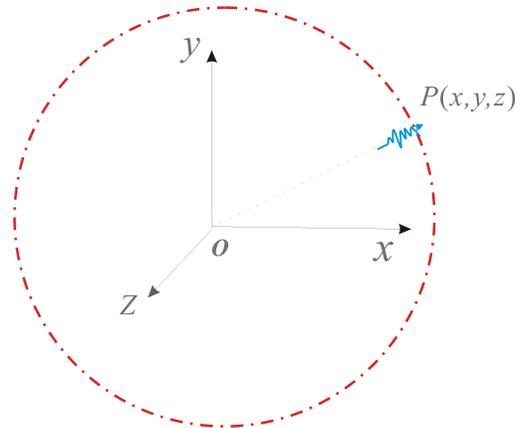


图 12. 光参考球

实践中，电子、中子、质子及光子等微粒体很小，可当作“点”来处理，如图 13 所示.当单个、单个高速微粒与界面质点发生作用，大概率地渗入界面原子、分子内部或分子之间的空隙，微粒跟界面

发生作用后的去向成为随机性和任意方向性（即方向的不确定性）.由于原子、分子等质点线度小可看成点，把光的反射当作力学处理显得不太合适，慢反射即为光散射.

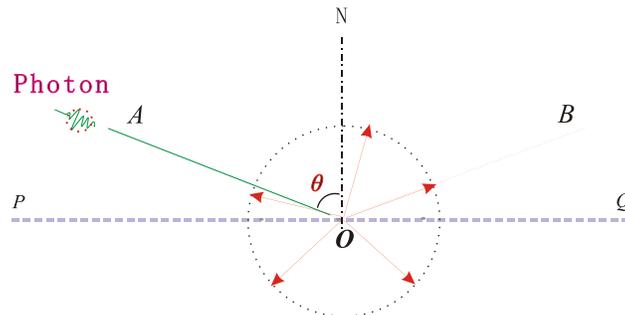


图 13. 微粒跟界面质点作用示意图

2、弛豫时间与滞留 dt 时间

光被质点原子吸收，经历极短时间（小于 10^{-9} s 或飞秒量级）便向外辐射——可理解为内光电效应.在吸收与辐射过程中，经历着三个阶段.初始原子处于低能状态，为平衡态 I；在获得光能过程中同时被

激发至高能状态 II；由“状态 I”变化到“状态 II”所经历的时间 T_1 称为弛豫时间.接着，经历短暂稳定期，时间为 T_2 ；原子再回到原来初始低能态，由“状态 II”回到“状态 I”，弛豫时间为 T_3 ，经历 T_3 时间过程辐射结束.质点称为次光源.所以，波点与质点作用所经历的整

个过程，停留时间总和 $dt = T_1 + T_2 + T_3$ 。假设光子在质点处 dt 时间内停滞不前——其实它发生了位移——为方便研究假定它为停滞状态。光电效应实践中，光子作用下的光电子发生时间 dt 很短，近似地认为弛豫时间 $T_1 \approx T_2 \approx T_3 = dt/3$ 。即便是声波、水波等，波面到达界面，波点也会减速为零后再被弹回，遵守动量守恒。

3、冰洲石折射设想

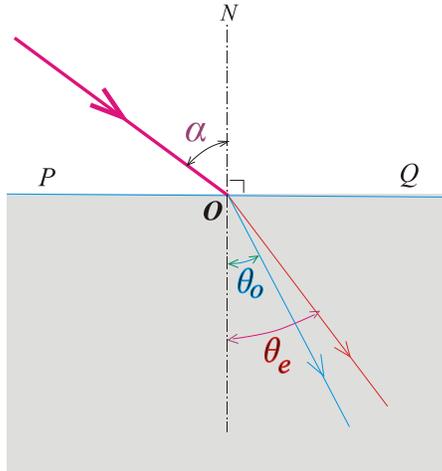


图 14. 光的双折射示意图

从缔合分子之间的网格结构层面设想：方解石晶体凝聚结构较为特殊，分子排序方式特殊而构成两种晶面（对入射光来说是不同的两个“界面” AD 和 BD ），如图 15 所示。当折射光束是 AD 界面上质点（分子）所产生，垂直界面 AD 的直线为法线-1，遵守折射规律，称它 O 光。当折射光束是由质点 B 和 D 所产生时，折光界面就不再是 AD 而是 BD ，分子构成的“ BD 面”为隐形界面，法线-2 垂直 BD 面，折

一般地，光束正交轨面（横截面） $[a1-b1]$ 线度在 $0.2\text{cm} \sim 0.8\text{cm}$ 尺度， 1.0cm 以上尺度则称为光柱。在波面 $[a1-b1]$ 上，波点 $a1$ 最先到达界面并与之发生相互作用【见图 3】。当一束光射入冰洲石（方解石的一种，化学成分是 CaCO_3 ），折射光束分为两条——称著双折射现象。其中一条折射光遵守折射定律，简称 O 光（字母“ O ” 出自 Ordinary）；另一条折射光不遵守折射定律，简称“ e ”光（字母“ e ” 出自 extraordinary），如图 14 所示。

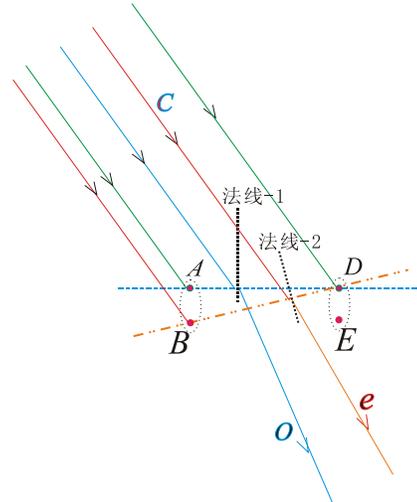


图 15. 方解石晶体分布猜想图

光依然遵守折射规律。

图16是方解石晶体表面相邻分子凝聚排序结构设想。当光束照射晶体时，晶体里产生了两条光束。其中，蓝色表示 O 光传播方向，法线垂直几何面 AD ；红色表示“ e ”光的传播方向，法线垂直隐形面 BD ，两条折光都遵守折射规律。所谓异常折光，是方解石晶体里存在隐形面 BD 所致。

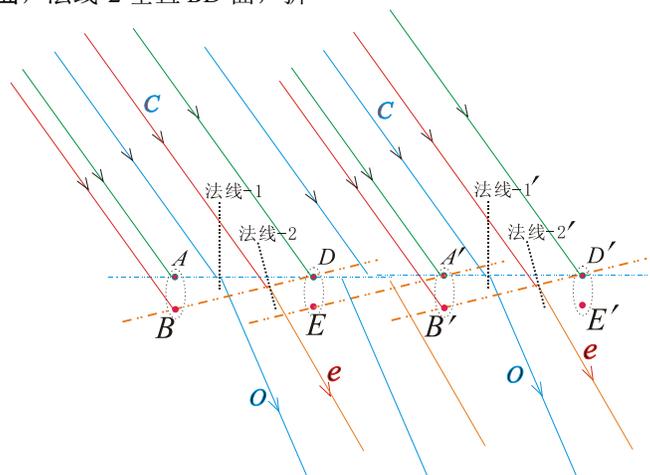


图 16. O 光和 e 光的传播方向

4、光在透明材料中的传播

实践中，光线进入透明物质（水、玻璃及红宝石等），极易穿过材料“缔合分子”间形成的网格——网格内是真空。“缔合分子”为质点，“网格”即真空。

光在网格中的速度即真空速度 UC ，在玻璃分子的缝隙中穿行。一旦光子与构成网格的质点相遇，便会被质点（玻璃分子、原子）散射，如图 17 所示。

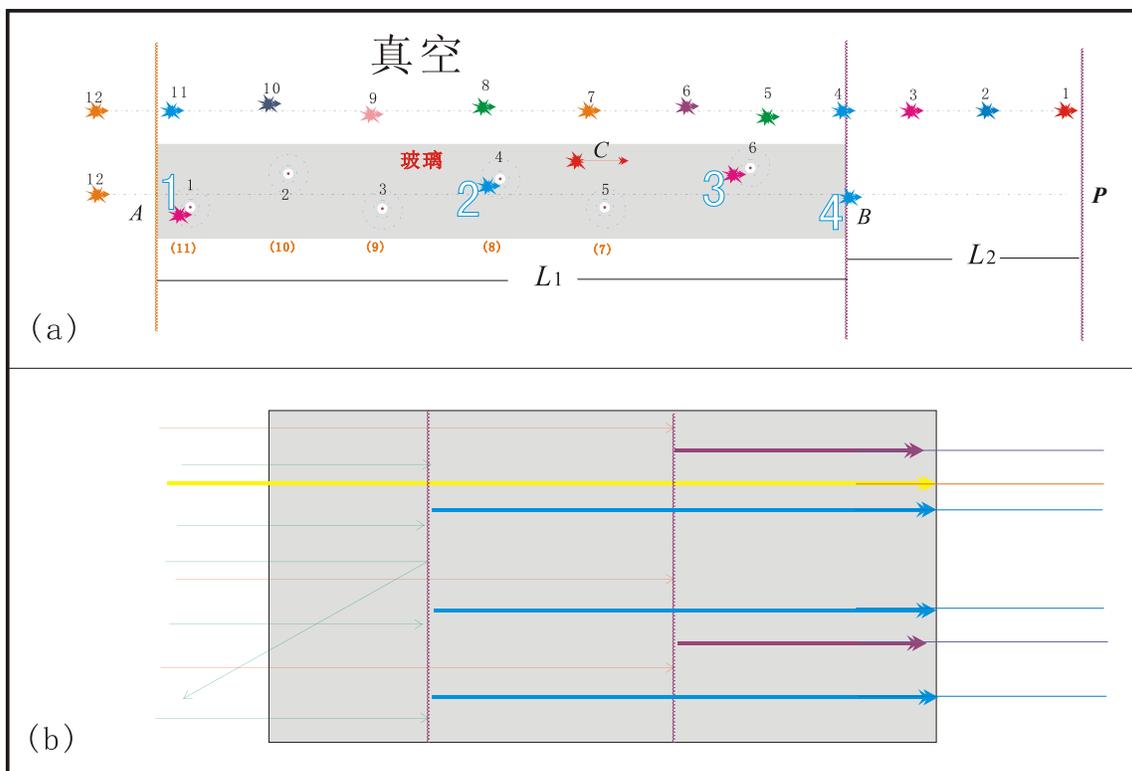


图 17.光在透明体中传播示意图

思想实验：当一平行光束的一部分射入玻璃砖，一部分平行玻璃砖表面传播【图 17 (a)】。图中用灰颜色表示透明体材料，平行于玻璃砖表面（真空）传播的光子编号 1、2、3、...等。用圆圈代表质点，“蓝-白颜色”数字为光子编号。进入玻璃砖的光子编号分别是光子-① 光子-② 光子-□等。假设光子-①跟玻璃面“质点-1”发生作用，光子-②跟“质点-4”发生作用，光子-□跟“质点-6”发生作用、...等。所以，这些光子在“迁徙”途中遇上质点而被散射，光子-① 光子-②和光子-□的经历相似。这时，光子-④离开（玻璃）界面 B；当真空中光子-1 到达 P 点时，光子-④才到达 B 点。所以，穿越玻璃的光到达 B 点的距离比真空中减少了 L_2 距离。通常认为 $UC = AP/t$ ， $U = AB/t$ ，所以 $U < UC$ 。另外，因光子被透明体质点吸收、再发射的过程中经历了一个短暂停留（时间 dt ）过程，这也是光速变小的重要因素。一束平行光在玻璃砖里传播，光在“迁徙”途中遇上质点而遭遇散射（玻璃对光的吸收系数为 10^{-2}cm^{-1} ），从而使光强度在玻璃体内迅速减小。

图 17 (b) 中，只描述了光在透明物质中传播的“小段距离”情形分析，一般地，透明物质（水、玻璃砖）是图 17“小段距离”的有序迭加。当然，不同的透明体，分子结构下密度不同，光在其内“定向迁徙”速度也就有所不同。

5、红宝石激光器工作原理新观点

含有 $0.05\% \text{Cr}^{3+}$ 的红宝石 (Al_2O_3) 是一种透明体，红宝石激光器的红宝石棒长 10cm，直径 1.0cm，这一几何结构，使其在强光照射下，使得沿棒两端的光强度呈数量级放大。在高度平行的红宝石棒两端，一端为全反光面，另一端为透射率 10% 的半透膜面；聚光器起到加强照射效果。给一次脉冲光能，这时腔室起到重要作用；腔室工作物质的每个质点均是一个点光源，向各个方向的概率相同。由于红宝石棒长远大于其直径，所以沿棒长方向的概率密度大，沿棒两端传播能量最多，光在腔室工作物质的缔合分子网格内来回穿梭、聚集，同时从透射率 10% 的端口输出——10% 的部分即为透光“窗口或细孔”，如图 18 所示。

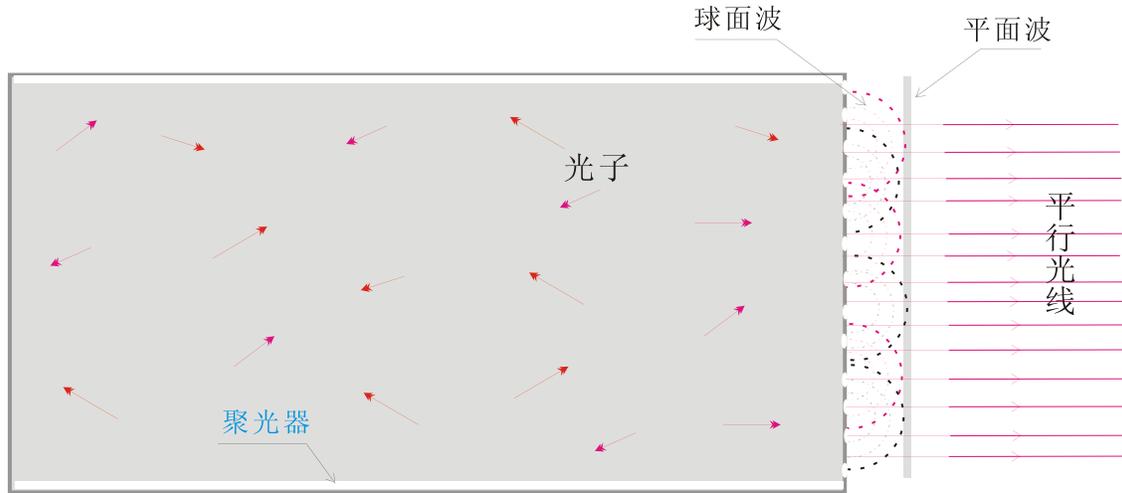


图 18. 平行光束形成示意图

向外部透光的每个细孔(窗口),即是一个“点光源”,细孔边缘对腔室逃逸光的衍射贡献较大.当相邻细孔间衍射的球面波同时出现在激光器外部空间相互叠加时,这种(概率)叠加形成平面波,衍射光形成的包络面即为涨落有序的相干光.涨落有序的相干光,是因为原子、分子对光的吸收与辐射皆具周期性——经典光学中称其为涨落有序.所以半透膜输出端扮演着衍射光栅角色,将杂乱无章的大量光子经栅口“加工”并有序输出,对平面波形成的贡献巨大.从衍射光栅端输出的相干波叠加成的包络面为平面波,垂直平面波向外传播的便是平行光.平行光束的每一横截面就是一波阵面;或者按一个个波长“切片”,这些有序排成直线的波切片向着远方“输运”,自然成一平行光束.

由于“点光源”形成的包络面具有其特殊性,不可能做到激光器外的包络面上所有光子都沿同一方向运动,光矢都呈发散状态(发散概率很大).因而,

光子不可能做到完全地同向平行运动.平行光,只是在有限距离的近似平行,光子轨迹近似的平行而已,没有绝对的平行光线.包络面(因包络而形成的几何平面),不能当作运输(光物质)的工具,光子并没落座于包络面(包迹)上,而是大量“点光源”的球面波光子在某时刻于该处的聚集而已,光子,仍是以最初拟定的方向各自前行.

6、基于光的粒子性解释马吕斯定律

光线可理解成《电学》里的电场线.图19的左边,是自然光垂直透过偏振片的光线,这里用明“条纹”表示透光部分,不透光的地方用黑“条纹”表示.透过晶片的光,其排列方向为平行晶轴,称为偏振光.图19中,当自然光透过偏振片时,偏振光沿一定方向排列.由于光的干涉、衍射影响较弱,暂不予考虑对实验的影响.

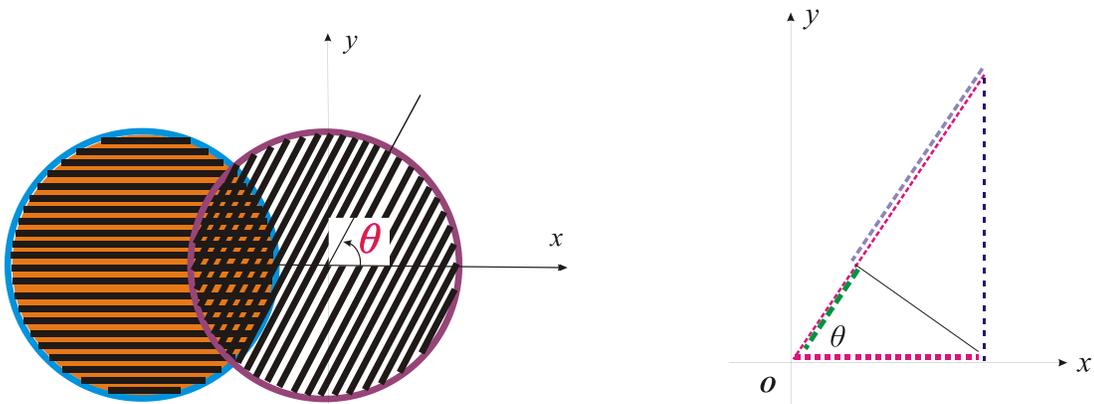


图 19. 偏振片与偏振光强度分析图示

用一对偏振片重叠放置【见图 19】，以偏振片中心 O 为原点建立直角坐标系。偏振方向相同时，绝大部分光都透射过去，这时，设检、起偏振片的晶轴平行，透光强度为 I_0 。为了方便，以一条透光“细缝”为研究对象，在重叠部分的透光细缝上取一长度 Δb ，缝的宽度为 a ，沿平行晶轴 x 方向的透光（条纹）面积为 $a \cdot \Delta b$ ，光通量为 $Q_1 = a \Delta b I_0$ 。当起、检偏振片成一角度 θ ，原来 $a \Delta b$ 面积中，光通量被正交分解为 x 、 y 两个方向。显然，经正交分解后，面积 $a \Delta b$ 在 x 方向分量为 $a \Delta b \cos \theta I_0$ ， y 方向分量为 $a \Delta b \sin \theta I_0$ ；沿 x 、 y 方向的分量不是光的实际通量，光沿着 x 方向真实的有效通量为 $Q_1 = a \Delta b \cos^2 \theta I_0$ ；同理，面积 $a \Delta b$ 在 y 方向上对光强度没有贡献的是 $Q_2 = a \Delta b \sin^2 \theta I_0$ 。依据光线量守恒关系： $Q_1 + Q_2 = a \Delta b \cos^2 \theta I_0 + a \Delta b \sin^2 \theta I_0$ ，很明显，透过检偏振片的光才对光强度有贡献。几何观念下，光强度定义为单位面积上光线量的平均值。所以，强度表达式为 $I_t = I_0 \cos^2 \theta$ 。

7、球面波与物体实像

如图 20 所示，物体表面分别有红、兰两个斑点 S_1 和 S_2 ， S_1 发出红色光波（红色弧线表示）； S_2

发出蓝色光波（蓝色弧线表示）。 S_1 、 S_2 分别发出球面波各自独立地向四周扩散。不同位置之观测者 P 和 Q 都能看到从这个物体发来的光。所以，到达观察者的信号，是物体各点独立发出的光波。从物体（ S_1 、 S_2 ）到达信号接收点（眼睛） P 或 Q 的光线，是从光点 S_1 、 S_2 发出的光波扩散而来的。所以，光子沿直线传播，光波呈球面扩散，几何光学成为光波波面的简明描写。所以，当理解“光物质”时，可认为它由大量光子组成，在外界不同因素影响下，可表现为光波、光线、光束和光柱等，这些都是“光物质”的相变而已。如同我们熟悉的“水”，光子相当于这里的水分子，一杯水是大量水分子（ H_2O ）聚集而成，在适当外界因素（如温度等）影响下，可以相变为汽态、冷却成雪花、冻结为冰块等。

生产实践中，（点）光源发出的光波波列周期 T 很小，相邻波列间的周期 T 也没有严格要求是一定的、均匀的；比如电影胶片的移动频率，只要相邻胶片移动的时间间隔（人为因素）不低于 25/s 次，都可认为从胶片发出的画面是“连续不断的”。

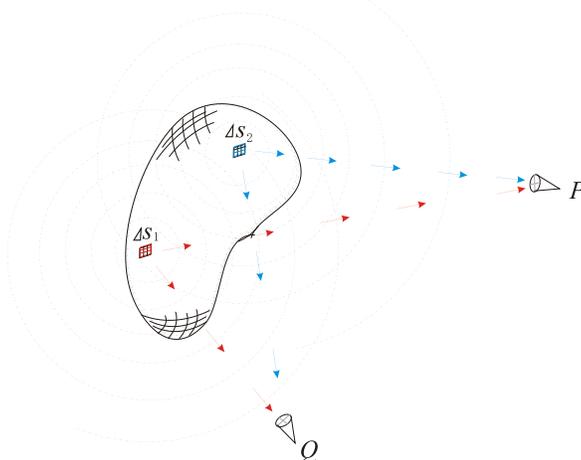


图 20. 球面波与光线传播示意图

参考文献

- [1]. 彭前程 主编 《物理-八年级上册》[M].北京：人民教育出版社，2012. 68~83
- [2]. M.波恩 E.沃耳夫 著 光学原理[M]. 北京：科学出版社，1978. 172~177
- [3]. 张三慧 编，大学物理学-光学、量子物理[M]. 北京，清华大学出版社，2008. 124~125
- [4]. 谭维翰 著，量子光学导论[M].北京，科学出版社，2009. 21~41
- [5]. 宜桂鑫 编著，光学教程[M]. 北京，高等教育出版社，2008. 7~11, 32~35, 62~117, 242~248
- [6]. 程守洵 江之永 主编，普通物理学（下册）[M]. 北京，高等教育出版社，2006. 83~89, 133~135

- [7]. 赵凯华 编著 光学[M]. 北京：北京大学出版社，1984. 165~173

作者简介：杨发成：（1964- ），性别：男，学历：研究生，职称：高工，工作单位：新疆油田公司 实验检测研究院，研究方向：计算机软件、理论物理及物理教学方面的研究。

通信地址：新疆 克拉玛依市 准噶尔路 29 号 实验检测研究院 6 号楼 302 室/邮编 834000

3/21/2024