

N09
11/5

科
学
史
译
丛

一九八一年

第三辑

(总第五辑)

中国科学院
自然科学史研究所
主 办

目 录

国外关于中国科技史的研究

- (1) 殷代技术小记 [日] 吉田光邦
何堂坤译 吕 昶校 易广居复校

专 论

- (9) 爱因斯坦关于光的本性的研究 [美] E·沃耳夫
张仲静译 唐达三校 李天生复校
- (22) 学术讨论在科学发展中的作用 B·Γ·尤金
刘洪祥译 姜 桐校 张瑞亭复校
- (36) 生态学的课题和现状以及今后的发展 [日] 宝月欣二
吴熙敬译 易广居校
- (39) 科学技术进步的前提 [苏] Д·И·勃洛欣采夫
蒋工强译 秦 敬校
- (45) ~~1909-1945年~~ 国际科学合作组织的集中化
[俄] 布里吉特·施曼德-古德姆斯
马 约译 天 生校

关于科技史的分期问题

- (52) 现代科学技术史的分期 [日] 谢世辉
殷美琴译 吴熙敬校 易广居 复校
- (63) 关于科学与技术史的若干理论问题 [苏] C·B·舒哈尔金
姜 涛译 苏 文校
- (68) 关于技术的社会作用的几点看法 [苏] И·К·米洛诺夫
刘 进译 苏 文校

(71) 作为独立知识部门的地球科学史 [苏] B·B·吉霍米罗夫

王 强译 苏 文校

关于国际科学史代表大会

(74) 第十五次国际科学史代表大会 [苏] A·N·沃洛达斯基

殷蓉蓉译 刘 通校

苏联科技史

(84) 苏联科学技术史(二) 力学史 [苏] A·T·格里果利扬

殷美琴译 舒 汉校

科学家传记

(89) 巴斯德

[美] 格罗夫·威尔逊

赵书汉译 沈 冲校



(104) 剑桥大学的科学史和科学学系

李天生译

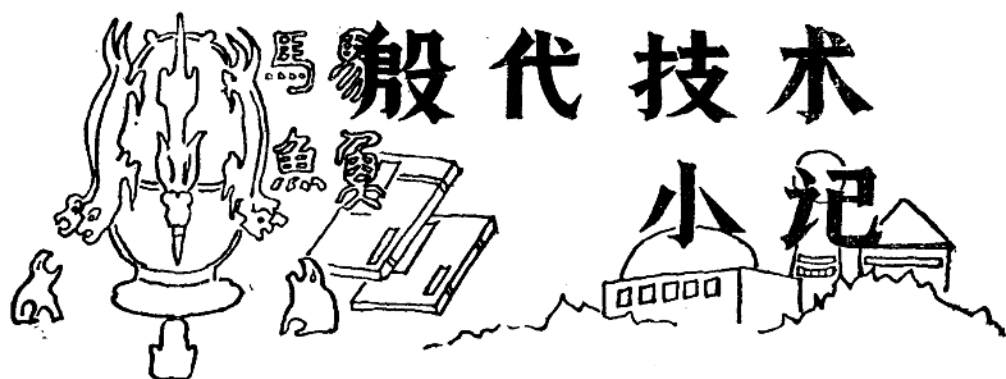
《科学史译丛》

编委会

主编：丘琴

编辑委员：（按姓氏笔
划为序）

马 约、丘 琴、杜石然、
吴熙敬、周世德、张钟
静、席泽宗、曹婉如、
潘吉星、潘承湘、蒋洪举



〔日〕吉田光邦

一、关于砷

殷代的金属技术，尤其是青铜，已经达到了非常发达的程度。这是由现存的大量遗物可以说明的事实；对这些遗物的各种研究很早就进行了，人们从中获得了很多知识。这是自不待言的。但是这些研究多数是定性的，似乎尚未发展到定量的方向。其中对遗物进行的化学分析可看作是唯一的定量方法。

我们知道，对中国古代铜器的分析最早是由近重博士开始的，再就是道野博士和山内、小松两博士，之后有中国的梁冠宇、王璠和英国的卡佩达等人^①。其中最引人注目的当是小松、山内两博士的分析；他们细致地分析了57件古镜，34件利器。前者的试样主要是依据时间的延续性来选择的，后者则周密地注意到了把利器特色、性质、种类比较明显的物件作为试样，这些都由梅原末治博士进行了考古学鉴定。因此，对其结果的解释和考察可以说已经没有什么需要补充的了。但是现在所知道的带有定量性分析的研究报告，这是唯一的一篇，因此便再以之作为线索来考虑一两个问题，最后把两位的分析

结果和硬度值附在本文之后作为参考。

综览34件利器的分析结果，人们立刻就会发现含砷的器物相当多。在注释过的26个例子中，含砷量多或稍多的达11例；而含量在0.5%以上的占总数的8/34，在1%以上的占3/34。这些含砷量0.5%以上的器物，多数的主要成分是Cu(铜)—Pb(铅)型合金，还附带有As(砷)。其中As为0.86%、Pb为1.31%，砷与铅的成分几乎相等，还有含As量4.49%(或4.72%)的古式戈。这样多的含As量决不能仅仅视为夹杂物，显然它是有意地作为合金成分而掺入的。这是很早以前为梅原博士等人推断过的。

我们知道，古镜分析中还有一个特殊的例子，即所谓“仿制几何学文带镜片”；报告说它含铜96.34%、铁0.37%、锡0.1%、砷2.99%。此镜片是水野清一教授从绥远带来的。梅原博士认为：值得注意的是它的颜色与鄂尔多斯铜器一致。

正如上面指出的那样，As的大量存在，并且大部分组合成Cu—Pb—As型合金，据说还存在Cu—As型或者接近于此型的一两件例子，这又说明了什么呢？在此，我们暂且再回过头来看一下殷代冶金技术的发展水平吧^②。

从出土实物看,殷代铜矿大约主要是孔雀石。可以认为,孔雀石之类的次生矿一般接近于地表,由于它色泽鲜艳,很早就引起了人们的注意,同时它的采集也比较简便。推定为锡矿的遗物尚未发现,从现代知识来看,其原料大约还是锡石。锡矿通常有两种,一叫山锡,生成于石英母岩等之间,一叫水锡,是母岩风化崩折、锡石为雨水淘洗集积而生成的;这在中国大约很早就知道了。冶炼或许仍然使用小型竖炉。山锡的冶炼技术是从母岩分离开始的,再经过脱硫、脱砷等过程,这些都极为复杂,而且大量的锡混杂在矿渣中而失去的情况也很多。因此,得到高品位的锡矿是炼锡的首要条件。从这个意义上讲,在采矿的时候,高品位的水锡就会首先被注意到,从技术难度上看,可以认为山锡可能没有被利用过。而且就是使用水锡的时候,也会一方面在某些温度下引起锡的挥发,另一方面矿渣中锡的流失情况也是很多的。所以,大约殷代的锡矿几乎都是水锡,在这个意义上讲,不一定必须推测南方山锡和殷墟之间的联系通路。可以认为,哪怕是少量的、只要品位达到一定程度的集积,恐怕也会开采的。与锡比较起来,炼铅要容易得多,大约它也是处于利用简便炉床进行焙烧冶炼的水平。这里只需把木炭加进铅矿中,在炉床上进行氧化反应就行了。这种技术上的难易之别,岂不正是以铅代锡的一个关键吗?于是,如果像山内博士等人所说的那样,铜、锡、铅都是分别冶炼提取的话,那么残余的As及As中伴有多量的铁,其含意也就自然清楚了。而且分析表中含硫的例子甚少,利器为3/34,古镜中全然没有发现,并且含硫器件都含有较多的As。从As—Fe(铁)—S(硫)的关系出发,可以推论,这里使用了硫砷铁矿;或者从As—S的关系出发,就可以认为使用了硫化砷。

硫砷铁矿相当于所谓“毒砂”,也叫做

“砷石”。《说文解字》中已经看到有“砷,毒石也”的说法,《山海经》中多处记载了它的产地。可以说从很早的时候起人们就知道它的存在了。硫化砷乃是鸡冠石、雄黄、雌黄一类,因其色泽鲜明,亦早为人所知。《山海经》、《元和郡县志》,以及方术、本草诸书都有类似的记述。从这些事例来看,可以认为人们对砷的认识已经很久了。

果若如此的话,砷掺入器物中的意义又是什么呢?这就必须作为一个问题来研究了。在此,使我们再次想起前面引述过的镜片成分。说起来它也可以叫做Cu—As型。另外,只有在含Pb极少,几乎全为Cu的利器中发现过含As相当多的一个例子。这些都显示了作用于铜——作为主要成分——的砷是有意识存在的。正如Cu—As化合物状态图所显示的那样,一般说来,即使少量砷的存在,也会引起熔点急剧下降,同时使铜变硬后具有接近于青铜的性能。前面谈到梅原博士曾解释过Cu—Pb—As型的存在,认为由于As的作用而使铸造性能提高,这也就是对熔点下降的利用;并认为利用砷的作用而使铜硬化的铸造技术与一般青铜(即Cu—Sn型)铸造技术是平行存在的^③。这是同时考虑了器形变化的含义而得出的结论,可以认为是妥当的。然而,即使仅仅由于Cu—As型的作用,其熔点也会下降相当多,并且在As使铜发生硬化的同时,由于其强烈的还原性,具有在铸造的时候防止产生气孔的性质。从这个意义上讲,Cu—As型的存在不正是可以想像的吗?也就是说,关于Cu—As型的认识不正是可以推测为与Cu—Sn型或者Cu—Pb型全然不同的另一个类型而存在的吗?而且它的痕迹不是可以从镜片或者其他一两件利器中含As量特别多,或含Pb量较少而得到辨认吗?因其为少数例子,所以有说它或属偶然的耽心。但是由于这个偶然的盖然率在任何情况下都在1%以下,所以如上推测还是允许的。

那么诸如 Cu—Pb—As 型 或者 Cu—As 型, 其中混有 As 的知识, 是中国独自发现的呢? 还是从其他地方传来的呢? 归根到底这是青铜技术传来的路线问题, 也是有待今后探讨的问题。然而当考虑到其他相同的古代文明世界的状况时, 这里就存在一个很有趣的事实, 那就是印度河流域的文明世界, 即在摩亨约达罗发现的铜器分析结果^④。现在便依据马萨尔的报告来看一下分析的结果吧。这里的 13 例中含 As 量超过 1 % 者达 5 例; 5 例

中, Cu—As 型 3 例, Cu—Pb—As 型 及 Cu—Sn—As 型各 1 例; 显然 Cu—As 型被视为独立的一种合金类型而使用的。马萨尔也注意到了这一点。他认为 Cu 型—As 合金在青铜技术传入印度河流域以前就存在了, 因为其中的一例具有接近埃及十二王朝铜器的含 As 量, 所以由 As 使铜硬化的技术是从埃及传入印度河流域的, 并推测这是青铜的先驱。现列举数例和分析结果以资对照(见下表)。

摩亨约达罗	Cu	Sn	Sb	As	Be	Ni	Pb	S
试 样 编 号								
4	92.49	0.37	痕迹	1.30	1.51	1.06	痕迹	2.26
6	94.76	0.09	—	4.42	0.15	0.14	0.26	—
7	92.41	0.00	0.10	3.42	0.59	0.15	3.28	0.05
8	91.90	4.51	1.15	1.96	0.15	—	0.17	0.16
11	82.71	13.21	0.33	1.17	0.42	0.56	0.11	0.00
殷代利器 (古式戈)	83.00	—	—	4.72	1.67	0.07	10.10	0.44

人们又注意到在摩亨约达罗遗址发现了一种砷铁矿, 把它与现在印度河流域出现的这种矿石相对照, 大约可以推测前者是原矿。关于可与之并称的另一个古代文明世界, 即两河流域的文明, 就以乌尔* 为主的许多遗址而言, 已有 L·伍里等人的详细发掘报告。在报告中指出看到的各种青铜器是以含 Ni 为特征的。完全没有发现 Cu—As 型。而其中的 Ni 可以认为是由原矿成分偶然混入, 并不是有意加入的。即在两河流域铜器中未曾出现过 Cu—As 型, 而仅仅是盛行所谓 Cu—Sn 型青铜这与前述印度河文明的青铜比较起来是很有趣的。

知识已经独立地存在了。从这点上讲, 对成分分析的研究就具有重要意义了。尤其是如砷化物那样有毒的东西, 人们很早就知道了, 而且, 有意地将它掺入。应当说, 这是一件具有典型意义的事。可以认为, 关于砷化合物毒性的知识与对于 Cu—As 型合金的认识, 可能是平行存在的, 这种类型的合金不存在于两河流域, 而存在于埃及与印度河流域。认为中国古代对铜器也有同样的知识, 这就是可以作为文化传播的一个标志。而值得一提。今后应当更深入地探讨 Cu—As 型合金存在的问题。

顺带谈一下铸型问题。铸型称为熔范,

一般说来合金的发现被认为是偶然的, 由于经验的原因, 接着发现了各种合金; 从而, 合金的确定就意味着人们对于各种成分

* 乌尔 (Ur) 位于幼发拉底河下游, 为古代巴比伦的城市。 —译者

已有不少出土。研究现存遗物的时候，可以看到有相当一部分东西不用蜡型是不可能铸造的。虽然此事早就被认识了，但必须同时考虑到原料蜡的供给问题。依据现代的知识，蜡就意味着蜂蜡，从而铸造技术必须具备蜡的知识，换句话说，即不管是天然的还是人工饲养的，都要有关于养蜂知识或使用动物性脂肪的知识。这又是关于青铜技术传来的一个标志而应予以注意。

注：

①近重真澄博士的《东洋古铜器化学研究》（《史林》三卷）中《东洋炼金术》是他最早的研究著作。道野鹤松博士的评论《从化学上看到的支那古代金属和金属文化》（《东方学报》东京第四册）引起了纯铜时代的争论，在这篇评论中可以看到中国古代铜器分析的全部情况。梅原末治博士的观点收集在《支那考古学论考》里。山内淑人、小松茂两博士对中国古代铜器的分析，分别在《古镜的化学研究》（《东方学报》京都第八册）、《古代利器的化学研究》（《东方学报》京都第十一册）中揭示了详细的分析结果。至于梁冠宇、王璉、卡佩达的见解是预报性的，收录在《安阳发掘报告》（第四期）里。

②关于这个问题，有刘明燾《殷代冶铜术之研究》（《安阳发掘报告》第四期）一文。把孔雀石当作铜原矿，似是古代世界的通例。

③梅原博士前揭书。

④以下关于摩亨约达罗的事项均依据 J. Marshall, Mohenjodaro and the Indus Civilization, 1931 London; 关于两河流域地方的例子均取自 C. L. Woolley, Ur Excavation of the Royal Cemetery, New York 1934（伍里《乌尔王室墓地出土文物》，纽约，1934）。

二、从镞到弓

我们从前述小松、山内两博士的铜器成分分析表谈起。这个表同时还列出了布氏硬度测定值。布氏硬度属于压入硬度，它虽然不像抗张强度或抗压强度那样直接地与物体

的韧性的相关联，但作为我们了解样品强度的一个线索还是可以的。在这里，其硬度值零散地分布于从31到111的范围之内，假若把它如下图那样分列，虽然是少数的例子，其分布也颇有意思，即戈在60—90之间最密，而在30—40附近可看到一个小的集中；矛有两群分布，即由90到110和由30到50，而且戈的分布大致是密集在矛的中央值附近，这又意味着什么呢？即是说，假若依据这个分布的话，便可以把矛分为两种，即十分强韧者和与之相反的极其脆弱者。前者相当于现代软钢，后者仅仅达到纯银或者白铜的强度。从而可以推测：一群是实用利器，另一群是非实用的利器，也可以说是明器一类吧。这个推测与梅原博士记述的依外形观察所作的推论大致是相符合的。关于戈也可以作同样的考虑。而视为实用器物的东西则呈现出相当于现今洋银*的强度。从而可以认为戈是由强度较矛稍低的合金制作的。在石璋如试行复原的殷代兵器组合中没有矛①，但有戈；可见戈是使用最广的武器，是使用硬度为60—90左右的金属大量制作的。

在分析表中只列了一例镞。被认为是最盛行的武器弓矢，却缺乏关于它们的资料，实在可惜。碰巧手边有两个认为是殷代的箭镞，经重量测定，结果得到下列数值：5.15克，5.13克②。为比较起见，同时还测定了两个汉代的箭镞，其值如次：12.48克，11.60克。

测定镞重量的目的是：如前所述，石璋如把在小屯发现的六个墓中出土的各种武器试行详细复原，其程序大致是正确的，也较好地注意了文献。但是我们认为需要把其中关于矢的方法研究一下。他首先依据国立中央博物院筹备处谭旦阿在成都古弓制作处

*洋银即是锌白铜，通常含镍为5—35%，锌为13—45%。因色银白而名。

——译者。

进行实地调查的结果等^③，来求证弓长和矢长之比。得到的结果是矢长约相当于弓长的 $1/2$ 。这在金文中求得的弓长矢长之比中也得到了证实。其次他又依据成都调查所取得的实际矢长与 $1/2$ 弓长（80公分）之差，来求出算术平均值（7.8公分），把它与前项弓长的 $1/2$ 相加就得到87公分。一般而言，弓是以附部为轴的对称物，在这个情况下，把矢搭上时，弦张 120° 时是理想的发射角。从而，若半径为 r ，则圆弧为 120° 左右时弧长约为 $2r$ ，所以可以说矢长为弓长的 $1/2$ 是正确的。但对此所加的算术平均值却需要稍微研究一下。看一下谭旦阿的调查结果似乎成都弓分为三种，即185公分左右，176公分左右，122公分左右；强度与长度相应，表现出弓越长就越强，越短就越弱的现象。而且矢的长度也与此相应，弓长矢就长，弓短矢就短。如此配搭，可说是恰当的。所以，假若使用石璋如复原的殷代弓长160公分的话，那么， $1/2$ 弓长就是80公分，在弧长为176公分左右的情况下，加上矢长差额2—3公分就行了，矢的长度就应当是82—83公分。

接着，石璋如又从遗物位置另外试行测定。葫芦是以重心支撑的。从假定其重心与矢重心一致这点出发，把镞的位置作为矢端，测得矢端和重心的距离为29公分，若采用《考工记》中关于矢重心的记载，即“一在前，二在后”的比例，那么29公分的3倍就是87公分了，得到的结果就是互相吻合的。但这里考虑重心位置时，没有考虑到镞的重量。现在依据石氏的报告，镞的重量平均不到10克，假若此矢的直径为1公分，比重为0.5，重心由矢端 $1/3$ 处计算的话，则得其长度为84公分弱。再考虑到矢羽的重量时，其长度大约为82公分左右。此又与前面求得的石璋如的修正值相吻合了。

依据以上程序，石璋如求得的数字应当修正为82公分左右，这件矢的木质部和羽部

达34克左右。

从照片来看，此复原用镞无论从哪方面讲都接近于上述殷镞的型式。依据重量之不同，这里就有了两种相同型式的镞。有一种镞的重量比接近于 $1/2$ 左右。这就像矢似地类乎飞行工具，而具有了重要的意义。由于镞的重量达到一与二之比，相应地矢的重心也要作较大的移动。因为这极大地关系到矢在飞行时的稳定性。这个问题似乎仍为人们所注意。《考工记》中有“一在前二在后……二在前三在后……三在前四在后”的文字，一般认为它是解释决定种种矢的重心的方法，~~解而说之，矢端一定，就可以估计有三种镞。于是再求得矢长为82公分的镞重量，即11克弱，1.1克弱，1.1克弱，正好处于前述5—10克测定值的范围。~~

1. 镞是在《周礼·考工记》中所看到的各种工程及其规格的解，能否原封不动地作为标定殷代文物的依据呢？这还有疑问。因殷周革命而引起的文物交替，可认为在物质文化上是质的连续，但在武器方面，从古代武器的重要性上看，那就稍有问题了。革命之成功能否完全归于武力之差距呢？这还难以定论。姑且假定有武力之差距，从《周礼》中看到武器的优越性，还不知说是继承周代以来传统的产物。殷周之别恐怕不能认为仅仅是武器而已。现在研究一下作为当时主要兵器之一的弓吧。石璋如在前述的复原中，把过去解释为“旗铃”的一种铜器作为相当于弓的把手的“弣”，这是富有创见之说。但是假若弓体如石氏之说，象《考工记》中看到的那样，认为是复合型（Composite），那么弣就明显地成了装饰品，对于作为实用器具的兵器就未免有过份强调装饰之嫌了。假若说弣的推断是从发掘时的位置和其他方面确定的，那么，弓体是否果真为复合物就成问题了。兵器也和其他物质文化一样，如果假定殷周间是连续的，那么，所谓“复合

物”的说法就可以成立；但从武力优劣的见地出发，则关于兵器非连续性的假说却又是可能的。

在这种情况下，使我们马上想起了发掘出来的水牛角遗物，它多得使人吃惊。但是，水牛角虽多，供牺牲用的例子却很少。假若它的皮革用作官兵的盔甲，那么，它的角用于何处就是疑问了。

现在印度还利用野牛角制作角弓^④。其制法是把一对角的下端互相铆住，角被切开使用。这种纯粹的组复合型（Compound）角弓的威力是相当弱的^⑤。

人们推定殷代的弓是把水牛角切开而制作的组复合型弓，弣是为了完全固定中央角接合部的实用器具。为了直接利用水牛角，弓身必然是短的，假若如《考工记》所记的组复合型，它就是长弓了。若使用的矢大小相近，与短弓比较起来，长弓的射程要远些，发射速度也大些，从而穿透力也强些。在战争史上，长弓压倒短弓的事例经常得到证实。若认为在武力上周压倒殷的一个主要因素是这种弓的差异，那也是可能的。

假若过去理解为“旗铃”的一种金属零件是一的话，那么，它作为实用兵器的一部分就必须具有某种意义。至少它对于弓的最初形式必须是不可缺少的一部分。假若现在把殷代的弓作为组复合型（Composite），那么，弣虽有加强筋的作用，主要还是装饰品。如果这样，从当时青铜的价值来看，在它产生的时候，所应当要求的、不可缺少的因素就极少。假若把弓体解释成组复合型（Compound），弣就是纯粹为了加强而在中央接合部安装上的金属另件，就是十分合理的，装饰就成为附带的因素了。从大量的遗物实例中所知道的水牛角，殷代以后就几乎看不到踪影了。可以认为，水牛角的使用价值在殷代以后已完全丧失。当作为实用动物的水牛角失去其使用价值的时候，当然它也就会从记录中消失。也就

是说，在水牛角利用方面处于劣势的殷代组复合型弓就为周代的强力复合型弓压倒。周代以后，《考工记》中也记有继承这个传统的复合弓被使用起来了。关于矢的问题，它并无了不起的差别。可以认为《考工记》中流传下来的资料也是殷代的矢所残留的痕迹。

注：

①石璋如《小屯殷代的成套兵器》（《历史语言研究所集刊》二十二本）。

②本文中的轂是守屋正委托京大人文学研究所保管的。

③谭旦闻《成都弓箭制作调查报告》（《历史语言研究所集刊》二十三本）。

④H. Balfour, *The Archer's Bow in the Homeric Poems*, J.R.I. 1921

⑤汉代有推定为角弓的大黄弩（《史记·李广将军传》等），据认为比一般的弓强劲而有力。但这是与组复合型弓身平行存在的时代，其构造当然与殷代的不同。

三、黄金问题

在以丰富的青铜器为中心的殷代金属文化中，为一般古代文明视为有共同性的贵金属，尤其是黄金的使用，目前所了解到的可以说是很少的。依作者之管见，只有小屯^① E16的金块两枚，E181方井中出现的金页、金叶各一枚，后冈^②墓坑出土的金叶13枚，小屯^③ M20、M164出土而推定为马策饰部的金页残片。

再来看一下周代的贵金属类。周代盛行锤打成形的金饰。传为西周楚^④，湖南长沙出土的311.85克纯金盞甲板，和重达38克的春秋末期错金凤凰饰，以及与玉组成的各种带钩、带扣、小箱等等，其遗例在各种报告中都可以找到。这与殷代少见的金器相比，显得异常丰富。这个事实难道不应当作为殷代金属文化的一个特征而予以重视吗？

这些黄金制品的技法也可以看出显著的不同。关于殷墟的金页或者金花，由于缺乏详

细报告,难免有不明瞭之处。但从金页厚度为1毫米左右或1毫米半左右的例子推论,可以认为是打延的东西。它的手法大约只是锻打。但是到了周代不仅仅用纯金,而且使用了镀金、嵌金、鑲金三种技法。殷代有如此丰富的青铜技术,却在制造手法上有这些差异,甚至使人深怀不协调之感。其次,当时黄金的出产情况也有问题。众所周知,金的生成状态有山金和砂金两种,前者散布于石英石等之间,多数伴随有银和硫化矿;后者在河床的凹陷处等堆积而成。中国很早就知道此二者的区别了。《山海经》记录了许多产金的山名。《管子》中写道:“上有丹砂,下有黄金”。至于砂金,《管子》中又写道:“金起于汝汉”。《韩非子》中写道:“荆南之地,丽水之中生金”等等。把它与现代出产状况略加对照就可看到,河南洛水,伊水只不过出产少量砂金,其原矿却发生在伏牛山花岗岩层中。从这点看来,它大约属于古矿床。这种情况下,自然金经常成块状出现,所以殷代金矿的原产地估计就在它的附近。更引人注目是山东半岛一带自古以来便是著名的产金地,它也属于古矿床,可望那里蕴藏着相当多的自然金。但是,山东一带是否曾经处于殷人支配之下呢?迄今尚属疑问。可以说殷人版图中是缺乏金矿的。这应是说明殷代黄金制品太少的一个原因。

但是与青铜技术丰富的情况比较起来,不能不认为殷代的黄金加工技术实在是太贫乏了。再看其他古代文明世界。我们知道,金从很早的时候起就为古代民族所注意了;它作为装饰用品而受到重视的例子是很多的。埃及古王朝壁画上的金工匠师的工作场所,它是早负盛名的。两河流域的金属技术随意地使用黄金,制造了多种多样的装饰品。现在就依据伍里的报告来看一下它的技术内容吧。

在两河流域,黄金原矿可能是砂金,它

与银生成各种混合矿。古代苏美尔人大约原封不动地使用过这种矿料,即是说,他们还不知道把金与银或铜相互分离的方法。报告书所列的黄金分析表中的21例,都呈现出奇妙的状态。其含金量分布于91%到30%之间,而银则在7.7%到60%之间,即合金成分之比从最高的22开金起到7开金止,呈现极不规则的散乱分布。恐怕苏美尔金工匠曾经使用于采得的未经处理的金矿。

两河流域的技法是:首先打延成形,制成的黄金薄片为了装饰和加强而贴在木质器具上。打延是在扁平而坚硬的石盘上打延的。模型是以铁板制成的、长19毫米左右的模样作打延用锤及研磨器。模型以木材或者石膏制成。黄金片大约是放在上面打延、研磨成形的,简直还在金片上进行了直接镂刻。

黄金片接合法估计是焊接,或者焊接。焊接时须事先把接合部适当加热。估计加热是用火焰,用吹管把火吹向接合部。吹管用粘土包着的苇草制成。为了进一步加强接合部并掩盖接口,可加上小片金属。这发现有用同种金属小片或者熔点更低的银合金作为接合剂的形迹。

由于金线断面呈方形,所以它不是拉拔而且是用压延了的薄金片切割成的;再通过旋拧、回曲、焊接的方法把金线用于制造各种各样的装饰品。也使用透空镂雕金工艺,金粒工艺,有的把金线作成直径为2毫米的圆环。这都是利用焊接进行种种加工的。人们甚至懂得“七宝烧”技术。

我们再看一下摩亨约达罗的情况。这个地方黄金加工技术与两河流域大体上没有多少差别。而且这里金制品的密度为14.3左右,含银量推定为10~30%,与乌尔鲁同样盛行使用所谓琥珀金,即金银合金。

参照其他古代文明地区金加工技术状况的时候,从那些制品状况可以推测,殷代金

工技术大约与之处于同一水平。视为马策装饰的黄金薄片以及金花，大约是一种透雕金属工艺。估计这些制品就是按照在乌尔或摩亨约达罗看到的水平进行的。但是现在尚未接触到出土遗物的定量资料，所以完全不了解它们的质量问题。

这样的殷代金工技术与所谓战国式诸金属器中看到的显著多样的技法之间出现了很大的差异。金银错文、镀金，以及与玉组合做成的嵌金等的技术可说是殷代以后的手法。但与此同时金的使用量却显著地增加了这又意味着什么呢？殷代咒术，装饰方面的精神寄托物是玉、贝、龟，而未发现有贵金属。然而《史记·平準书》^⑤记载的是金属居第一，龟贝处于最下等之地位，显然这是关于物质价值观的大变化，其前兆已经在《禹贡》记载的“扬州厥贡惟金三品”中出现了。这是对金属诸性质新认识的起点，这也以作为文化发展的一个指标吧！

笔者认为：首先，殷墟黄金制品的出土，比其他古文化区都少得多；另一方面，青铜技术却获得了显著发展，而一到战国时代，金的使用量却急剧增加。遗物的数量和种类都较多，制造手法也有各种不同的发展；在文献方面，如前所述，金提到了第一位，殷墟中盛行的龟贝被列入最下等，而本草^⑥中也说“古方不用金粉”。从这些地方看来，殷代与其后的各时代之间有一个关于黄金的大断层。对这个问题作出的解答是根据某种特殊理由而对黄金的使用加以控制。事实上，诸如金、银这样的贵金属，就其性质和数量稀少来看，对它的使用往往加以控制，似乎自古以来就有了，普里尼乌斯记载了希腊的禁忌使用黄金^⑦，弗莱塞列举了关于印度氏族公社以金、银为第一位的贵金属图腾制度^⑧。从而推定殷代也存在这样的意识，这从古代国家的情况来说也未尝不可。但在遗物方面，假若依据石璋如的见解，如关于马策的装饰，

以及金花的上述假定，就是对他的一种否定。于是，与其说所强调的是咒物因素，不如说是装饰因素。如果马策是战车上的用具，咒物因素可能有一部分，但仍然是装饰因素更强一些。所以，殷代对于这种贵金属的社会意识，我只想作为今后有待探讨的一个问题提出来。假若把殷代金器较少的理由局限于产量低，技术不成熟的话，那就等于说山东金矿不在殷人支配之下，金工技术是殷代之后时周代之产物了。

注：

①《安阳发掘报告》第四期第588~726页。

②《历史语言研究所集刊》第十三本，石璋如《河南安阳后冈的殷墓》。

③《历史语言研究所集刊》第二十二本，石璋如《小屯殷代的成套兵器》附《殷代的策》。

④《金匱论古初集》陈仁寿七十七页，以下见梅原博士《洛阳金村古墓聚英》、《战国式铜器的研究》等文中的事例。

⑤《史记·平準书》“虞夏之币，金分三品，或黄、或白、或赤、或钱、或布、或刀、或龟贝”。

⑥《本草纲目·金》，“发明”条：“苏颂器、金屑古方不见”。

⑦L.Thorndike, *History of Magic and Experimental Science*, vol. p.78, New York, 1923.

⑧Frazer, *Totemism and Exogamy*, vol. ④, p.24, London, 1910.

这里附带说一下，以上三个问题的论述，只是根据几个事实所引出的两三个有可能性的假说而构成的，一切只不过是待今后验证的假定和推测而已。但这些事实是作为一般的客观事物出来的，当然希望今后这些事实会有所增加。本文是在十分短暂的时间内，一边思索一边草成的小稿子，所以，关于各种文献亦无暇充分精查细究，而是以

• “七宝烧”一辞为日语，我国无相应的工艺。它类于景泰蓝但又非“景泰蓝”。——译者

(下转第35页)

爱因斯坦关于光的本性的研究

〔美〕E·沃耳夫

本文评述了A·爱因斯坦对我们今天关于光的本性的理解所做的基本贡献，为了把这一工作摆在适当的位置上，我首先概述了胡克、惠更斯、牛顿、菲涅耳和麦克斯韦的理论，并对基尔霍夫、维恩、瑞利、金斯和普朗克关于平衡辐射定律的研究做了简要介绍，然后讨论了爱因斯坦导出辐射的量子理论公式的一些主要论文，其中包括他关于辐射的粒子性、波粒二象性、气体分子与辐射场之间能量交换的基本过程以及关于光子统计方面的研究。

“只要我还活着，我还要思索光究竟是什么？”

——A·爱因斯坦约于1917年

引言

在当前这个专业化程度日益加强的时代，有一种使我们自己所关心的科学问题相应变狭窄的倾向，对当代科学知识的广博基础以及它的历史发展，我们是太容易忽略了。这样一种趋势是令人遗憾的，这不仅是因为我们的眼界会变得很受局限，对事物的看法容易歪曲，而且还因为对某一门科学学科，当我们回顾它的基本概念和基本定律开始系统形成的那些日子的时候，我们会学习到许多有价值的东西。

对于科学家也好，非科学家也好，爱因斯坦的名字是同那个深刻变革了人们的时空概

念的理论联系在一起。他的相对论使我们对宇宙的观念发生了根本的改变，其深刻的程度就象牛顿的万有引力定律或刻普勒行星系理论所起的作用一样。仅这一项成就，爱因斯坦就肯定将永远被人们作为人类历史上最伟大的天才之一来纪念。还有一项与相对论毫不相干的工作，即爱因斯坦对今天关于在普遍意义上的光和辐射的本性的理解，也作出了奠基性的贡献；不过并没有得到人们——甚至包括许多科学家——足够高度的评价。本文将论述爱因斯坦在这方面的成就。为了把这个工作摆到恰当的位置上，看来首先回顾光学和辐射理论历史上的几个里程碑是合适的。

关于辐射性质的早期理论

在十七世纪，关于光的本性提出了两种理论：一种是波动说，它的主要提出者是R·胡克和C·惠更斯；另一种是微粒说（也称发射说），是由牛顿提出的。

根据波动说，光是一种在弹性以太中传播的急速振动，其运动方式多少有点象在水面上传播的扰动。另一方面，根据微粒说，光是以从发光体发出微小粒子的方式传播的。

作为当时所建立的那种波动说，看来不能解释惠更斯本人在研究晶体对光线的折射时所发现的偏振现象，但牛顿却能根据他的

微粒说解释偏振现象。主要是由于这个原因，人们接受微粒说，而波动说遭到否定达一个多世纪。

1801年杨氏发现了光的干涉原理。十七年之后，菲涅耳在一篇著名的论文中证明，如果将杨氏干涉原理与惠更斯理论的基本假设结合起来，就可以得到光的一种波动说，它能够解释光的辐射，而根据牛顿的微粒说，这个现象是无法理解的。在菲涅耳的论文发表并在实验上证实了他的理论的某些出人意料的预言以后，在几年之内，菲涅耳的波动说得到普遍公认，而牛顿的微粒说却逐渐被人们忘却了。

光的波动说由于麦克斯韦的工作而达到了顶点。1855年^①，他成功地把当时所有已知的电学和磁学定律归纳为一组著名的微分方程，即现在所说的麦克斯韦方程。由这组方程得到的推断之一就是预言了随时间而变化的电效应和磁效应会以波（即现在所谓的电磁波）的形式从空间的一个区域传到另一个区域。这种波在自由空间中的传播的速度可以从纯电学测量的结果中计算出来，原来它与光速的大小同数量级，正如后来我们从其它实验中所得知的那样。这就促使麦克斯韦猜测，光波就是电磁波。1888年赫兹从实验上证实了电磁波的存在。

这样，我们可以把这个简短的历史引言作这样的概括：到十九世纪末，光是电磁波现象这一点，看来是牢固地确定下来了。

与上面所提到的发展没有什么关系的另一类研究是关于热辐射的研究，最终证明，这项研究对于阐明光的本性也是极为重要的。

在1814年至1817年这段时间内，夫琅和费发现了太阳光谱中的暗线，从那以后，这些谱线就以他的名字命名。在本生和基尔霍夫实验的基础上，1860年前后，这些暗线被解释为太阳大气中某些气体的吸收线。在研究太阳光谱的过程中，基尔霍夫从

发推导出关于具有确定温度 T 的物体互热平衡下的辐射的若干重要结果。即使在平衡条件下，当这个系统与周围环境处于热绝缘的情况下，系统中的物体也会发射和吸收辐射，用我们现在的的话来说，是物质和辐射场之间将会有相互作用。物体发射和吸收某一确定频率 ν 的辐射的能力可以用称为发射系数 ϵ_ν 和吸收系数 α_ν 的这些量来表征。

表 1 在解释光的本性方面
早期的几个主要贡献

胡 克	1665	波动说
惠更斯	1678	
牛 顿	1671	微粒说
杨 氏	1801	光的相干性
菲涅耳	1818	现代的标量波动理论
麦克斯韦	1865	电磁波理论
赫 兹	1888	探测电磁波

基尔霍夫1859年所推导出来的定律之一断言，在平衡条件下，发射系数与吸收系数之比同辐射场相互作用的物体的性质无关，就是说，它们的比值是某个仅与频率和温度有关的函数 $K_\nu(T)$ ：

$$\epsilon_\nu / \alpha_\nu = K_\nu(T) \quad (1)$$

这显然是一个很重要的定律，因为它给出了在平衡条件下普适函数与辐射有关的根据。

在特殊情况下，即如果一个物体吸收投射到它上面的全部辐射，那么吸收系数 α_ν 的值将等于 1。这样的物体称为黑体，由它发出的辐射称为黑体辐射。

对于黑体来说，从基尔霍夫定律立即可以得到

$$(\epsilon_\nu)_{\text{blackbody}} = K_\nu(T) \quad (2)$$

即作为频率和温度函数的黑体发射系数准确地等于普适函数 $K_\nu(T)$ 。可以证明 $K_\nu(T)$

^①应为1864年。以下关于同一年代，不再作注。

与黑体辐射的能量密度 $U_\nu(T)$ 的关系为

$$U_\nu(T) = \frac{8\pi}{c} K_\nu(T) \quad (3)$$

式中 C 为真空中的光速。

由于函数 $K_\nu(T)$ 的普适性, 也就是说, 由于这个函数与同辐射场处于平衡态的物体的性质无关, 所以, 人们花费了巨大的努力来确定它的形式。在我们刚讨论过的基尔霍夫发现这个定律后的四十年间, 人们多次做出努力, 想推导出函数 $K_\nu(T)$ 的正确形式, 或者, 根据 (3) 式, 也可以说是想推导出作为频率与温度函数的黑体辐射谱, 但都没有成功。表 2 列出了在这一时期内, 关于 $K_\nu(T)$ 这个函数的三个最重要的表达式。

表 2 维恩和瑞利-金斯关于黑体辐射的强度公式 $K_\nu(T) = (c/8\pi)U_\nu(T)$

维恩位移定律 (1893) $\nu^3 F(\nu/T)$

维恩辐射定律 (1896) $\alpha \nu^3 e^{-\beta(\nu/T)}$

瑞利-金斯定律 (1900, 1905) $(\nu/c)^2 kT$

1893 年维恩根据热力学提出的第一个公式称为 维恩位移定律。根据这个定律, 函数 $K_\nu(T)$ 等于频率的三次方同频率 ν 和温度 T 的比值的某一函数 $F(\nu/T)$ 的乘积。但热力学并没有具体给出这个函数的形式。

通过多少有点启发性的讨论, 维恩在三年以后提出了函数 $F(\nu/T)$ 的具体形式, 得到了所谓的 维恩定律。它列在表 2 的第二行。

在这个辐射定律中出现的两个常数 α 和 β 并不能从维恩的讨论中得到, 必须凭经验来确定。

随后, 1900 年, 瑞利证明, 把统计力学的均分定理应用于空腔中的电磁振荡, 会得到一个完全不同的公式。后来, 由金斯纠正了一个小错误以后, 它就具有了如表 2 第三行所示的形式 (式中 k 是玻耳兹曼常数, c 是真空中的光速), 称为 瑞利-金斯定律。

我们注意到, 维恩辐射定律和瑞利-金

斯定律两者都满足维恩位移定律所需要的形式。但是, 在十九世纪末, 二十世纪初, 主要由鲁麦和普林赛姆、鲁宾和克尔鲍姆所进行的精心测量揭示出, 这两个定律中没有一个是与实验上所确定的黑体辐射频谱的能量分布完全符合。原来, 维恩的辐射定律是在足够高频率和足够低温度下的一个很好的近似式, 而瑞利-金斯定律则是在低频和高温的另一个极端情况下的一个很好的近似式。另一个定律, 维恩位移定律当然是不完善的, 因为它包含了一个未知的函数 $F(\nu/T)$ 。

这就是上世纪末最后几年的情况。热力学和电学、磁学的理论都不能预言黑体辐射频谱的能量分布。

1900 年, 就在瑞利的论文发表后只有几个月, 一个与实验完全符合的正确的黑体辐射定律由普朗克发现了, 他在推导过程中所引入的一个假设, 标志着科学史上一次最伟大的革命——量子力学的诞生。

普朗克辐射定律可以写成如下形式:

$$U_\nu(T) = \frac{8\pi}{c} K_\nu(T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (4)$$

式中 h 和 k 是常数, h 称为 普朗克常数, k 称为 玻耳兹曼常数。普朗克辐射定律原始推导中的一个基本要素, 就是对于与辐射相互作用的线性振子的熵所做的一个幸运的猜测。事实上, 这个猜测相当于在与维恩辐射定律与瑞利-金斯定律分别相对应的热力学表达式之间进行内插。由于很快就认识到这个新的定律与实验符合得极好, 普朗克立即着手为它寻求更令人满意的理论基础。几个星期之内, 他就获得了成功。1900 年 12 月 14 日在柏林召开的德国物理学会的一次会议上, 他概述了这个新推导的根本特点。

根据基尔霍夫定律和公式 (3), 平衡能量密度 $U_\nu(T)$ 同与辐射场相互作用的物体

的具体性质无关。普朗克为这些物体选择了一种最简单的可能的模型,即谐振子。然后,他证明,如果做这样一个假设:一个以频率 ν 振动的振子只可能取 $E_0, 2E_0, 3E_0, \dots$ 这样一些能量值(式中 $E_0 = h\nu$),那么,他在几星期之前所发现的辐射定律就可以从电磁学理论和热力学理论系统地推导出来。因此,在推导正确的黑体辐射定律时,普朗克发现,需要引入 $E_0 = h\nu$ 的能量量子概念,它是振子所能发射和吸收能量的最小值。引入这种能量量子的需要与麦克斯韦理论是直接抵触的。麦克斯韦理论对振子能够发射和吸收的能量值并没加以限制。

可以很容易地证明,当 $\nu/T \gg 1$ (即在高频和低温这个极限下),普朗克辐射定律(4)化为

$$U_\nu(T) \equiv \frac{8\pi}{c} K_\nu(T) \\ = \frac{8\pi}{c} \alpha \nu^3 e^{-\beta(\nu/T)} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{h}{c^2} \quad \beta = \frac{h}{k} \quad (6)$$

(5)式刚好就是维恩辐射定律,不过,现在我们同时得到常数 α 和 β 的显式表达式。在 $\nu/T \ll 1$ (即低频和高温的极限情况下)时,(4)式可化为

$$u_\nu(T) \equiv \frac{8\pi}{c} K_\nu(T) \\ = \frac{8\pi}{c} \left(\frac{\nu}{c}\right)^2 kT \quad (7)$$

这正是瑞利-金斯定律。

辐射的粒子性方面

尽管普朗克关于能量量子概念的引入最终导致了历史上一场最伟大的科学革命,但他的理论在开始并没有引起多少注意。在第一批清楚地认识到普朗克的发现开辟了物理学新纪元的科学家当中,有一个年青人,A·爱因斯坦。当时1902年—他23岁,在

瑞士专利局任职,职称是“技术专家,三级”。

1905年春,当时在科学界还是默默无闻的爱因斯坦写信给他从前的一位同学和朋友哈必特,向他索取他当时已完成的一篇论文的副本,爱因斯坦的信中有这样一段话:

“但是为什么你不把你的论文寄给我呢?你不知道在怀着感兴趣和愉快的心情来阅读你的论文的几个人当中,也该有我一个吗?你这个坏蛋!我可以答应你,用四篇论文作为报答,其中第一篇……就是非常有革命性的……”。

爱因斯坦信中提到的这四篇论文中有三篇发表在1905年《德国物理年鉴》杂志的同一卷——第17卷(第四辑)——上,这三篇文章都是在仅仅三个半月的时间里交出的。正如玻恩所指出的,在全部科学文献中,这一卷是最杰出的,因为在这一卷上爱因斯坦的三篇论文,每一篇都是杰作,每一篇都是物理学一个新分支的起点。用我们今天的术语来说,这三篇论文的内容(按它们发表的先后)是:(1)辐射的粒子性;(2)布朗运动理论;(3)狭义相对论。

我们这里只评述第一篇论文,因为另外两篇所讨论的内容不属于本文涉及的范围。但提到下面一点看来是适当的,即与其它几篇论文相比,第二篇论文更使物理学家确信原子、分子的实在性以及概率论在系统表述和阐明物理学基本定律中所起的十分重要的作用;在第三篇论文中采取了一些具有巨大意义的步骤,通过这些步骤,关于绝对空间和绝对时间的直觉的概念被废除了,而代之以四维时空连续统的概念,这对我们今天对宇宙最基本的物理定律的理解具有极深刻的影响。

这三篇论文中,第一篇的题目是“关于光的产生和转化的一个具有启发性的观点”。

在写给他的朋友哈必特的信中爱因斯坦自己所说的“非常有革命性的”，指的就是这篇文章。在现代的教科书中通常把它称为“爱因斯坦关于光电效应的论文”。其实这篇论文所包含的内容还要丰富得多。事实上，爱因斯坦关于光电效应的论述所占的篇幅还不足四页；但正如他的大部分其它著作一样，爱因斯坦能够用寥寥数行，以简洁的语言触及问题的本质，而极巧妙地回避复杂的数学问题。

从根本上来说，爱因斯坦在这篇论文中所做的就是提出大量的例证说明，不仅辐射的发射和吸收过程的确是以分立能量的形式发生的（这点看来已经由普朗克确立了），而在一定条件下，辐射本身的性质也好像它是由粒子所组成的。用现代的语言来说，这种粒子就是所谓光子。这样，在这篇论文里，爱因斯坦就再次提出了十七世纪牛顿所首创的光的微粒说。正如我们已经指出的，微粒说是在爱因斯坦论文发表之前大约90年由于菲涅耳建立的波动说而名誉扫地的。而光的波动说本身看来则在爱因斯坦论文发表前大约四十年已由麦克斯韦奠定了牢固的基础。

爱因斯坦在这篇论文的引言中，详述了波动说（它处理的是空间的连续函数）的成就。接着，他继续说道：但是，如果把这个理论用于光的产生和转化现象，那么很可能会导致与实验的矛盾。然后他写道：

“事实上，关于黑体辐射、光发射、由紫外线引起的阴极射线的产生以及其它涉及到光的产生和转化等现象的观测，如果根据光的能量在空间中不连续分布的假设，似乎就能够更好地理解。根据这里所做的假设，当光线从一点出发开始传播时，能量并不是在一个越来越增大的体积上连续分布，而是由数量有限的、空间局域化的能量量子组成，这些能量量子在运动时不会分裂，同时它也只

能作为一个整体被吸收或发射。”

为支持这些观点，爱因斯坦举出一些例证，下面我们介绍其中几个例证的实质。

假定我们把一些粒子投入体积为 V 的盒子里。让我们在盒中选定几个体积为 ΔV 的子区域（不一定很小）。如果我们把一个粒子投入盒内，它处在所选定的子区域中的几率显然是

$$p(1) = \frac{\Delta V}{V} \quad (8)$$

如果我们把这个过程重复 n 次，就是说，如果我们把 n 个粒子投入这个盒子，一次投一个，那么根据概率论的基本定理，所有 n 个粒子最后都处在这个子区域的几率是

$$p(n) = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^n \quad (9)$$

现在不考虑粒子体系，让我们假设这个盒子里包含平衡条件下处于温度 T 的辐射。辐射场的能量密度由普朗克定律给出，但是我们知道，对于足够高的频率和足够低的温度，它可以由维恩辐射定律近似得出。所以，在这些条件下，盒子里辐射的总能量由公式

$$E = \frac{8\pi}{c} \alpha V \nu^3 e^{-\beta(h\nu)} \quad (10)$$

给出，式中 α 和 β 是由（6）式给出的常数。

我们已经指出，即使在平衡条件下，辐射场中也会有涨落，因此，随着时间的推移，辐射的能量在整个盒内会重新分布。结果，在所选择的子区域内，能量有时会大于，有时也会小于平均值。事实上，在某给定的瞬时，全部能量 E 都集中到这个子区域的情况也会有一定的几率。利用维恩辐射定律〔（10）式〕和少数几个热力学普遍原理，爱因斯坦就得出这个几率是

$$P(\text{全部能量 } E \in \Delta V) = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{E/h\nu} \quad (11)$$

将这个结果与（9）式相比可以看出，这个

结果同把辐射场看成是由 n 个粒子组成所得的结果相同, 式中

$$n = \frac{E}{h\nu} \quad (12)$$

就是说, n 个粒子中, 每一个所携带的能量都是 $h\nu$ 。用爱因斯坦的话来说: “从热力学的意义上来看, 低密度的单色辐射(在维恩辐射定律的有效范围内)的性状, 就好像是由量值为 $h\nu$ 的彼此无关的能量量子所组成。”

爱因斯坦在这篇论文中所给出的另一个支持辐射的粒子性观点的例证, 正如上面已经提到的, 是光电效应。光电效应是这样一种现象: 当波长足够短的电磁辐射投射到金属表面时, 从金属中会有电子发射出来。这个效应是1887年赫兹在进行前面所提到的, 对进一步证实关于光的麦克斯韦电磁理论的正确性中起决定性作用的一些实验时所发现的。现在回顾起来, 事情的结果有点与愿望相反, 因为此后在定量地研究光电效应时, 人们发现, 要使它和麦克斯韦电磁理论一致是不可能的。

关于光电效应的几个令人不解的事实主要是由列纳德在1899—1902年这段时间里有系统地进行的实验揭示出来的。列纳德发现, 所发射出来的电子的能量分布与照射金属表面的光的强度无关, 但却与光的频率有关; 同时还发现当光的强度增加时, 发射电子的数目增加, 但电子的能量并不增加, 当我们想到, 根据波动说, 由光波所携带的能量是由光强来量度的, 则试图用光的波动说来解释这些观测结果所遇到的困难, 就是很显然的了。因为根据波动论, 当强度增加时, 就会有更多的能量可以传递给电子, 因此电子的能量也将增加, 而这与列纳德的观测结果相反。

爱因斯坦认为, 列纳德的观测结果是光的微粒本性的一个明显例证: 如果光是由

能量量子组成的, 每个能量量子的能量值是 $h\nu$, 量子穿透金属的表面层, 它们的能量至少有部分转为电子的动能。最简单的情况是, 光子把它的全部能量都传递给一个单个的电子, 同时这个能量足以使电子获得自由。电子在脱离金属时, 会丧失它的部分能量, 因为为了逸出金属, 需要做一定的功(即 W)。这样, 爱因斯坦就导出了发射电子所具有的最大动能的下述公式:

$$(E_{kin})_{max} = h\nu - W \quad (13)$$

这个现在被称为爱因斯坦光电方程的公式立即解释了列纳德的观测结果。

我们注意到, 爱因斯坦光电方程预言: 出射的光电子的最大能量是频率的线性函数, 其斜率正好等于普朗克常数。因此, 对电子能量的极大值对频率的依赖关系的测定就能够用来确定普朗克常数。1905年, 当爱因斯坦提出光电方程时, 光电效应的定量研究还处于襁褓期。在爱因斯坦方程被充分验证之前, 经历了大约十年艰难的实验工作过程。爱因斯坦方程的验证工作主要是由起初完全不相信爱因斯坦理论的密立根完成的。密立根在1914年为纪念爱因斯坦七十诞辰而发表的一篇文章中, 说道: “在我的一生中, 花费了十年时间来检验1905年的爱因斯坦方程。同我原来的全部期望相反, 1915年我迫于事实, 宣布了对这个方程的毫不含糊的实验验证, 尽管它不合常理, 因为它似乎违背了我们所知道的有关光的干涉的全部事实”。

波粒二象性

我们刚刚谈到的爱因斯坦1905年的论文很清楚地揭示了在解释与辐射有关的观测现象时, 经典物理学暴露出, 它失效了。这篇论文证明, 甚至需要一种比普朗克提出的发射和吸收的振子的量子化能量的假设更为剧

烈的变革。爱因斯坦的分析表明，不仅能量的发射和吸收确实是以分立的能量量子的形式发生，而且辐射场本身的性状，在某些情况下，也好像是由这样的能量量子组成的。这种情况是令人不解的，因为一方面存在着光的干涉和衍射现象，这些现象看来很清楚地显示了辐射本性；但是还存在着另一类象光电效应这样的现象，正如爱因斯坦指出的，这个效应又揭示出辐射具有粒子性。

尽管爱因斯坦的论证既清楚又简洁，但他关于辐射的粒子结构的观点在当时和以后很长一段时期里遭到了包括普朗克在内的许多杰出的物理学家的反对。面对这种反对，爱因斯坦并没有气馁，他继续研究他的微粒说，并且更深入地探索辐射的本性。

1909年在“光电论文”发表后四年，爱因斯坦发表了一篇题为“论辐射问题的现状”的论文。这篇论文成为物理学发展史上又一个里程碑。在这篇文章中，爱因斯坦——还是象他的大量论文一样，用他所特有的典型的简洁的论证——指出，普朗克辐射定律本身隐含着这样的内容，即辐射场不仅显示出波动性，而且显示出粒子性。这个结论是所谓的波粒二象性的第一次明确表述，许多年之后，它成为现代量子物理学的为大家所公认的特征。

爱因斯坦论证的实质可以这样表述：他再次考察体积为V的热绝缘空腔中温度为T的黑体辐射问题。让我们集中注意空腔体积为 ΔV 的子区域。正如我们前面所指出的，在这个区域中将会有能量涨落，它是由辐射进入和逸出这个区域引起的。爱因斯坦研究了这种涨落的大小。

例如，在某一固定的瞬时，在频率间隔 $(\nu, \nu + d\nu)$ 内这个子区域内的能量值为E，则能量起伏的最简便的度量是方差：

$$(\overline{\Delta E})^2 = \overline{(E - \bar{E})^2} \quad (14)$$

式中的横杠代表统计平均。

根据热力学，爱因斯坦首先证明，这个方差可以写成如下形式：

$$\overline{(\Delta E)^2} = kT^2 \frac{\partial \bar{E}}{\partial T} \quad (15)$$

同前面一样，式中k是玻耳兹曼常数。那么，根据普朗克辐射定律〔(4)式〕，在体积为 ΔV 的子区域中的平均能量由下式给出：

$$\bar{E} = Z \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (16)$$

$$Z = \frac{8\pi\Delta V}{c^3} \nu^2 d\nu \quad (17)$$

将(16)式代入(15)式，爱因斯坦得到方差的如下表达式：

$$(\overline{\Delta E})^2 = h\nu \bar{E} + \frac{1}{Z} \bar{E}^2 \quad (18)$$

(18)式现在被称为爱因斯坦黑体辐射的涨落公式。

爱因斯坦从这个公式得出了一些意义深远的结论。他的论证是这样的：如果腔内的辐射场是由纯电磁波组成（就象当时大多数科学家所相信的那样），我们就可以这样来解释能量的涨落，即这个辐射场能够表示为强度、位相、偏振态均不相同并且沿各种可能的方向传播的诸种平面波（简正模）的混合。在子区域 ΔV 中能量的涨落可以被认为是不同平面波之间短时干涉效应的结果。借助简单的量纲讨论，爱因斯坦只用几行文字就指明，以这种方式产生的能量涨落恰好由他的涨落公式右端的第二项给出，其结果可表示为下述形式：

$$(\overline{\Delta E})^2 \text{波动} = \frac{1}{Z} \bar{E}^2 \quad (19)$$

几年以后，H·A·洛伦兹根据他冗长的具体计算（用了六个多印刷页的篇幅）验证了这个结果。

下面是爱因斯坦的论证。由于他从普朗