

玻尔的错误

卢昌海

一、引言

美国物理学家温伯格 (Steven Weinberg) 曾经写过一篇文章, 标题是: 爱因斯坦的错误。对于喜爱物理学史的读者来说, 那篇文章列举的错误也许都是“熟面孔”, 因为“爱因斯坦的错误”是一个很吸引人的话题, 很多人都谈论过。从某种意义上讲, 判断一位科学家是否伟大的一个另类但很管用的指标, 就是看他(她)是否连所犯的 error 都能吸引人们持久而广泛的兴趣。如果是, 那就几乎可以断定为是伟大的科学家。在 20 世纪的物理学家中, 爱因斯坦无疑是那样的人物, 这是对他“首席物理学家”地位的很好的佐证。

读者也许会问, 温伯格列举的爱因斯坦的错误既然都是“熟面孔”, 那篇文章还有什么价值呢? 价值之一是温伯格在介绍那些错误之余还阐述了一些值得回味的观点, 比如他提到“领袖科学家所犯的 error 往往比他们的成功更能让人洞察他们那个时代的精神与背景”。不过, 假如我们把目光从“爱因斯坦的错误”这一热门话题上挪开, 投向一个更开阔的视野, 那么在我看来最能印证这句话的与其说是爱因斯坦的错误, 不如说是另一位领袖科学家玻尔 (Niels Bohr) 的错误。因为爱因斯坦的错误大都具有个人色彩, 而且当他犯下某些错误时, 他往往已处在比较孤立的位置上, 从而已不再是能让人洞察“那个时代的精神与背景”的最好例子。而玻尔的错误虽然远不如爱因斯坦的错误那样出名, 甚至可以说是冷僻话题, 但他在犯错时却是比爱因斯坦更具“那个时代的精神与背景”的领袖科学家, 他的错误也因此要比爱因斯坦的错误更能让人洞察“那个时代的精神与背景”。

本文就来谈谈“玻尔的错误”这一冷僻话题。对于喜欢玻尔的人来说, 最好能从上文所述的另类指标的角度来解读本文, 即本文与其说是在揭玻尔之短, 不如说是在往玻尔作为伟大科学家的那个另类指标上添加砝码。

玻尔究竟犯过多少错误? 似乎没有人罗列过,

不过可以肯定的是, 他犯错的数量与类型都远不如爱因斯坦那样“丰富多彩”。当然, 这与其说是在避免犯错方面比爱因斯坦更高明, 不如说是因为他的研究领域远不如爱因斯坦的宽广, 从而犯错的土壤远不如爱因斯坦的肥沃。在玻尔所犯的 error 中, 值得介绍的在我看来只有一个, 那就是他对能量动量守恒的放弃。这个错误他几乎坚持了十年, 且在两个独立情形下犯过, 是他所犯 error 中最显著, 并且也最能让人洞察“那个时代的精神与背景”的。

二、玻尔的第一次错误: BKS 理论

说起来有些出人意料, 玻尔作为量子论的著名先驱, 对开启了量子时代的“光量子”概念却长期抱有比较暧昧的态度, 那态度说成是“拒绝”可能有些夸张, 说成是“不热衷”则可能还不够份量, 恰当的说法也许是“消极”吧, 即“能不用就不用”, 甚至不惜为不用而付出一定的代价。他的这种态度几乎一直维持到了旧量子论时期的终结。有人也许会把这种态度本身也视为 error, 但平心而论, 这种态度对于一位量子论先驱来说虽有些出人意料, 在当时的情况下却算不上 error, 因为当时的实验对光量子概念的支持尚未达到判决性的程度。不过玻尔的消极态度虽不是 error, 他为这种态度所付出的代价却比绝大多数同时代人大多, 大到了变成 error 的程度, 因为他放弃了能量动量的守恒。

玻尔这一错误的出现时机很有戏剧性。喜欢物理学史的读者大都知道, 对光量子概念的早期支持主要来自两组实验现象: 较早的一组是光电效应, 是它促使爱因斯坦提出了光量子概念; 较晚的一组则是康普顿效应。玻尔因出于对光量子概念的消极态度而放弃能量动量的守恒, 恰恰发生在美国物理学家康普顿 (Arthur Compton) 发现了康普顿效应之后。

当然, 这绝不是因为玻尔藐视实验, 而是有具体的理由及机缘的。

那理由是: 当康普顿发布他的实验结果时 (1923 年), 他所观测到的现象仅仅是 X 射线在被物质散

射后，其波长（从而频率）发生了变化。这一结果虽然与经典电磁理论相矛盾（按照经典电磁理论，电磁波在被物质散射后，其频率是不会改变的），而与光量子概念相一致——荷兰物理学家德拜（Peter Debye）与康普顿本人都用光量子概念诠释了实验结果，却不足以对后者构成判决性的支持，即证实光量子本身的实在性。因为康普顿当时的实验还比较粗糙，无法对基元过程（即单个光量子与电子的相互作用）进行观测，从而只能在平均意义上证实光量子概念的效力。事实上，不仅康普顿效应如此，早期的光电效应也是如此，只能在平均意义上证实光量子概念的效力。正是这一美中不足给玻尔提供了机会。

当康普顿在美国取得那些进展时，身在欧洲但消息灵通的玻尔几乎第一时间就获悉了消息。1923年底，他亲自访问了美国，与康普顿等人进行了直接交流。1924年初，在给英国物理学家卢瑟福（Ernest Rutherford）的信中，玻尔叙述了自己对美国之行的观感。那封信很清楚地显示出他对波动理论的青睐，以及对光量子观念的消极态度。他表示，康普顿的光量子诠释对于像他这样“视波动理论为信条的人”来说“简直是可怕的”。

以上是理由，下面说说机缘。那机缘是：一位年轻的美国物理学家斯莱特（John Slater）恰好于1923年底造访了玻尔所在的哥本哈根。在那次访问中，他带来的一个有关辐射与物质相互作用的有趣想法引起了玻尔及其合作者荷兰物理学家克喇摩斯（Hendrik Kramers）的兴趣。三人很快就合写了一篇题为《辐射的量子理论》的论文。那篇论文所提出的理论后来被冠以三人的姓氏首字母而称为了BKS理论（那论文本身则被称为了BKS论文）。正是那篇论文，记录了玻尔的错误。

BKS理论主要包含三个核心想法，分别来自三位作者。第一个想法是所谓的“虚辐射场”，它被认为是不同原子间的一种联系，并具有诱发量子跃迁的功能，这是斯莱特的贡献；第二个想法是放弃建立在光量子概念之上的不同原子对辐射的吸收与发射间的因果联系，这个表述得有些含糊的想法是克喇摩斯的点子；第三个想法则是放弃基元过程中的能量动量守恒，而将之弱化为一个统计性的定律，这是玻尔的主意。玻尔提出这种主意的动机是什么呢？是想调和原子能级变化的不连续性与波动理论

所要求的辐射能量变化的连续性之间的矛盾，归根到底，还是对光量子观念的消极态度在作祟。

在BKS理论的三大核心想法中，斯莱特的想法是核心中的核心，可以说，没有斯莱特对哥本哈根的造访，就不会有玻尔对这一理论的掺和，这是我们将之称为机缘的原因。但如果因此就把玻尔的错误归咎于斯莱特，则是对后者的明显不公。因为早在与斯莱特建立任何联系之前的1919年，玻尔就在与同事的通信中多次提到了放弃能量动量守恒的想法。事实上，玻尔将对能量动量守恒的放弃塞进BKS理论是斯莱特所反对的，在后者的原始想法中不仅没有放弃能量动量守恒，甚至还为光量子概念留出了位置，只是由于敌不过玻尔的滔滔雄辩才同意了玻尔的观点。后来当BKS理论被实验证伪后，玻尔向斯莱特表示了歉意，而斯莱特当时虽然客气地表示了不介意，时隔近四十年后（那时玻尔已经去世）却在接受访谈时表达了对玻尔的强烈不满，甚至用上了“我对玻尔先生不曾有过任何敬意，因为我在哥本哈根度过了一段可怕的日子”那样罕见的语气。不仅如此，BKS论文的另一位作者克喇摩斯一度也是反对玻尔对光量子的看法及对能量动量守恒的放弃的。可惜他也不是玻尔的对手，被后者日夜不停的辩论累垮，送进了病房，最终也同意了玻尔的观点。

三、BKS理论的放弃

BKS理论的出炉引起了很多物理学家的关注。在玻尔的声望及雄辩能力影响下，很多人投诚了。比如不久之后将创立矩阵力学的海森伯（Werner Heisenberg）一开始虽持有怀疑立场，表示从这一理论中“看不到实质的进展”，但在访问了哥本哈根之后，却被玻尔“洗了脑”，自己投诚不算，还将玻尔的观点“布道”给了玻恩（Max Born）。玻恩在稍后给玻尔的信中介绍了“布道”的结果：“我愿意告诉您，我对您在辐射理论问题上的新做法感到多么高兴”，“虽然我只听了海森伯的口头简报，但我很相信您的新理论是正确的，并且从某种意义上讲是对这些问题的最终答案”。

不久之后将创立波动力学的薛定谔（Erwin Schrödinger）也表示了大体上的认同。他在给玻尔的信中不仅对其新近的观点“极其同情”，还表示自己长期以来对此类想法也一直很有兴趣。不过有意思的是，他随后顺着玻尔观点所作的分析却得到了

诸如能量的不确定性，单一体系的不稳定性等推论，很像是在用归谬法反驳玻尔，以至于《尼耳斯·玻尔集》第五卷的主编斯陶耳岑堡(Klaus Stolzenburg)在介绍这段历史时干脆将薛定谔的观点称为是“热力学上的反驳”。考虑到薛定谔后来几乎是仅次于爱因斯坦的反哥本哈根的人物，他对玻尔观点的“极其同情”是真正的“爱心”，还是圆滑的“外交”，倒是有点难说了。

就连泡利(Wolfgang Pauli)这位素以思维犀利、批评尖刻著称，并享有“物理学的良心”及“上帝的鞭子”美誉的年轻高手也没能抵挡住玻尔的雄辩，在访问哥本哈根时步海森伯的后尘向玻尔投诚了。但泡利毕竟是泡利，不像海森伯和玻恩那么好糊弄，在离开哥本哈根后不久就幡然醒悟，在给玻尔的信中宣布：“您当时成功地堵住了我那强烈反对这一诠释的科学良心。但这只能持续一小段时间，……我今天又成为完全反对这一诠释的物理学家了……”。泡利的这一反对立场此后再无丝毫动摇，一直持续到BKS理论破产为止，以至于玻尔后来表示泡利“长期以来就是对我们的‘哥本哈根叛乱’不表同情的”。

连泡利都没能挡住玻尔的影响（虽然只是暂时的），可见玻尔的领袖科学家地位不是吹的。但玻尔的影响虽大，有一个人却自始至终都旗帜鲜明地反对BKS理论，这个人是谁呢？大家应该能猜到，是的，他就是玻尔的老对手爱因斯坦。他在获悉了BKS理论之后，在给玻恩的信中毫不含糊地表示了反对，并写下了一段后来很出名的话，那就是假如BKS那样的理论是正确的话，“我宁愿去当一个修鞋匠，甚至赌场的雇员，也不愿做物理学家”。爱因斯坦并且提出了很多具体的反对意见，泡利在离开了哥本哈根后之所以这么快就改变态度，除了他自己的思维犀利外，爱因斯坦的观点也起了一定的鼓舞作用（泡利在改变态度前曾与爱因斯坦讨论过BKS理论）。

最终对BKS理论构成重击的则是实验判决。这一判决来得很快，距离BKS论文的发表仅仅过了一个月左右，德国物理学家玻特(Walther Bothe)和盖革(Hans Geiger)就完成了一篇重要论文，对康普顿效应进行了细致研究，其初步结果对BKS理论很不利。次年(1925年)4月，他们又发布了改进的结果。与此同时，康普顿本人及其合作者也发布了更精密的研究结果。这些结果表明康普顿散射中

反冲电子与散射光的出现存在明显的同时性及角度相关性，这是最初的康普顿实验因未能揭示而给玻尔等人以可乘之机的细节。这一细节与BKS理论是完全矛盾的，因为后者所预言的散射光的发射在时间及方向上都具有随机性，与反冲电子之间不存在显著的同时性及角度相关性。那些更精密的研究还直接证实了基元过程中的能量动量守恒，从而给玻尔的观点判下了死刑。

在无可辩驳的观测事实面前，玻尔终于投降了。1925年4月21日，他在给英国物理学家福勒(Ralph Fowler)的信中承认“除了为我们的革命性努力举行一个尽可能光荣的葬礼外，已经没别的事情可做了”。在给德国物理学家弗朗克(James Franck)的信中，他则不无伤感地表示“此刻我觉得很不幸，而且不知如何是好。我只想向你引述瑞利勋爵的话‘某些最了解我的人认为我应该比现在更自信，也许他们是对的’”。该信的落款是“您的不幸的玻尔”。

四、玻尔的第二次错误：科学革命综合症

玻尔的第一次错误就这样结束了。对于这次错误，美国物理学家派斯(Abraham Pais)有一个评价，那就是“它比任何别的贡献更好地显示了最好的物理学家所体验到的那种紧张和混乱”。从这个评价上看，它确实很能让人洞察“那个时代的精神与背景”。不过它的这一功能与玻尔的第二次错误相比还是要逊色一筹。

玻尔第二次错误的类型很多人也许都不会想到，因为那居然是重犯——第一次错误的重犯。这种重犯的情形发生在像玻尔这样的大物理学家身上是有值得探究的原因的。

20世纪前半叶物理学史的最突出特点无疑是发生了科学革命——相对论革命及量子力学革命。如果除此之外还要归纳什么东西的话，我觉得很值得关注的是这样一种现象，那就是在经历了像量子力学革命那样激动人心的科学革命后，那一代的某些物理学家似乎产生了强烈的“科学革命情结”。一般认为，科学革命是年轻人的专长，科学史的发展也基本佐证了这一点，但经历过量子力学革命的某些物理学家却似乎是例外，在面对新挑战时，已不再年轻的他们往往比年轻人更青睐于用科学革命的思路去解决问题，以至于有一风吹草动就怀疑理论基础需做重大变革。若要给这种现象取个名称的话，我想不妨称为“科学革命综合症”。

在“科学革命综合症”的“病人”中，除玻尔外，狄拉克（Paul Dirac）是很典型的一位，当量子场论被发散问题所困扰时，他一再表示应该对理论基础进行变革，而且那变革将会像从玻尔的旧量子论过渡到量子力学那样剧烈。与他那激情燃烧的“革命情怀”完全相反，像费曼（Richard Feynman）那样的年轻物理学家们却反而很实用主义地采取了非革命性的手段（重整化）来解决问题。海森伯是另一个例子，当量子场论遇到困难时，他也认为局势类似于当年的旧量子论时期，主张建立“新物理”，沿着那样的思路，他陷入了自己的死胡同——非线性旋量理论。不止一位那一代物理学家共同患有的这种“科学革命综合症”，是我认为玻尔的错误比爱因斯坦的错误更能让人洞察“那个时代的精神与背景”的主要原因。

回到玻尔的第二次错误上来。BKS 理论虽然寿终正寝了，但玻尔的“科学革命综合症”促使他在 1929 年左右又重新向能量动量的守恒发起了冲击，试图解决一个当时尚无答案的问题： β 衰变中的能量问题。

当时所谓的 β 衰变，是指核子通过发射电子而进行的衰变。而所谓 β 衰变中的能量问题，是指原本被认为是由衰变前后的核子状态所确定的电子能量，实际上却被发现是连续分布的，从而与能量守恒定律相矛盾。这一问题使玻尔重新提出了能量动量在基元过程中有可能不守恒的观点。不过，他再次提出这一主张，实验虽是直接契机，“科学革命综合症”的作用却也不容小觑。在经历了量子力学革命后，一个很容易被提出的问题就是：从宏观尺度进入原子尺度时我们经历了量子力学革命，从原子尺度进入到更细微的原子核尺度时，是否要经历另一次科学革命？在玻尔看来这一问题的答案是肯定的。他并且将之与自己不久前提出的互补原理联系在了一起，认为“我们在这里遇到了对描述自然现象的习惯模式进行更激烈变更的必要性，这种变更意味着对互补性观点的进一步推广”。

1929 年，玻尔将自己的观点写成一篇题为“ β 射线谱和能量守恒”的短文寄给了泡利。在那篇短文中，他不仅提出了 β 衰变中能量动量不守恒的可能性，而且还设想这种不守恒性或许有助于解释当时尚未盖棺论定的太阳的发光之谜。不过有了上一次的前车之鉴，在给泡利的信中，玻尔谦虚地表示

“我将很乐意听取您有关所有这些的看法，无论您觉得适宜用多么温和或多么严厉的语气来表达”。泡利没有辜负玻尔的信任，看完之后给出了很“温和”的评价：“我必须说它几乎没给我带来任何满足”。在作了若干技术性批评后，他的最终建议是：“让这篇短文先休息一长段时间，并让星星安静地照耀它吧。”

也许是泡利反对的缘故，玻尔最终没有发表那篇短文。但他并未就此死心，在接下来的几年间，他在信件、会议讨论及公开演讲中不止一次地提到核物理中能量动量不守恒的可能性。而泡利本人则于 1930 年提出了能量问题的正解，那就是 β 衰变在发射电子的同时还发射了一种看不见的中性粒子，是它带走了一部分能量，使其余部分看起来不守恒了。泡利提议的中性粒子就是我们如今所说的中微子（确切地说是反电子中微子），可惜对它的实验证实是二十多年后的事，因而未能及时终止玻尔的第二错误。

玻尔直到 1936 年才放弃能量动量不守恒的提议。那时虽然中微子仍未被观测到，但意大利物理学家费米（Enrico Fermi）在中微子假设基础上建立起来的四费米子相互作用理论得到了很好的实验支持，使玻尔觉得问题已基本得到了解决。当玻尔最终从错误中走出来时，他不仅自己走出来了，而且对来自其他人的类似想法产生了抵御能力。如前所述，当量子场论被发散问题所困扰时，狄拉克显示出了“科学革命综合症”的“症状”，他的一个早期提议很接近玻尔曾经犯过的错误，即认为能量动量有可能不守恒，他表示“物理学目前已面临了不得不对基础进行激烈变更的前景，这种变更包括了放弃我们依赖最深的某些原理（比如能量动量的守恒），而代之以 BKS 或与之类似的理论”。

但此时的玻尔已不再为这类提议所动了，他对狄拉克认真看待 BKS 论文的做法表示了“深受感动”，但对狄拉克的观点本身却表示“一点都不满意”，他并且明确宣布那篇旧作（即 BKS 论文）“已经完成了自己的使命”。

五、结语

玻尔的错误就聊到这里了，毋庸置疑的是，我们对所谓“错误”的判断是建立在对物理原理的当前理解之上的。我们将玻尔对能量动量守恒的放弃归为错误，并不意味着认定能量动量守恒绝不可能

在未来某一天被发现遭到破坏。不过即便有一天它被发现遭到破坏，那破坏也绝不可能如玻尔设想的那样显著，更不可能如玻尔设想的那样去解决昔日那些问题。从这个意义上讲，即便有那样一天，玻尔的错误也依然是错误。

同样毋庸置疑的是，无论玻尔的错误还是爱因斯坦的错误，都无损于他们作为伟大科学家的地位，也无损于我们对他们的敬意。科学史上几乎没有哪位伟大的科学家是从不犯错的，真正不犯错的往往反而是小角色。比如本文作者也发表过论文，那些论文也许不存在技术性错误，但与玻尔或爱因斯坦的论文相比，它们充其量只是小习题，出错的可能



科苑快讯

蚊子害死鲸

以前从未报道过，野生鲸会死于蚊子传播的疾病，但是人工饲养的逆戟鲸则不同。1990年，一只名为 Kanduke 的 25 岁雄性逆戟鲸突然死于美国奥兰多海洋世界，死因正是蚊子携带的脑炎病毒。2007 年，一只名叫 Taku 的 14 岁逆戟鲸死于美国圣安东尼奥海洋世界，而它的饲养员对此却毫无察觉。后来经过尸检发现脑组织病变，才确定是西尼罗河病毒所致（西尼罗河病毒是一种热带和温带地区病毒，因 1937 年在西尼罗河地区的乌干达发现而命名，主要通过蚊子从禽类到人类传播，目前尚无特效药及疫苗）。

科学家在 4 月的《海洋动物及生态杂志》（*Journal of Marine Animals and Their Ecology*）上报告，人工饲养的逆戟鲸特别容易感染这些蚊子传播的疾病，因为它们总是生活在浅水池中。两位研究者在美国佛罗里达海洋世界从早上 10 时到下午 6 时持续观察 7 只人工饲养的逆戟鲸，总时间长达数



（上接 56 页）会，探讨原子能可能的军事用途，康普顿担任主席。之后，康普顿全力投入原子弹的研究工作，领导芝加哥大学的冶金实验室，负责钚 239 的生产，以用来制造原子弹。当费米（E. Fermi，1938 年诺贝尔物理学奖获得者）于 1942 年 12 月在芝加哥成功地完成第一个核分裂的连锁反应时，康普顿立即以密语向知情人士宣布：“意大利那位航海家（指费米）已经抵达新大陆了。”的确，原籍意大利的费米正如 400 多年前的哥伦布一样，获得了惊天动地的成就，对人类善恶的影

性虽小，有价值的可能性却更小。用一个也许不太恰当的比喻来说：在宁静小湖畔行走的人或许能不湿脚，在汹涌海浪前搏击的人却必然会沾水，伟大的科学家是后者而不是前者。

作者简介

卢昌海，本科毕业于上海复旦大学物理系，后赴纽约哥伦比亚大学从事理论物理学习及研究，并获物理学博士学位。现旅居纽约。个人主页：<http://www.chang-hai.org/>



千小时。大多数时间，这些鲸都浮在水面休息。傍晚时分，科学家观察到蚊子会停留在其暴露于水面之上的背鳍大快朵颐。由于晒伤、皮肤损伤以及氧化



所致的牙齿损害（如图）都削弱了其免疫系统的功能，所以这些人工饲养的鲸更易受这些疾病的感染。

美国更多人工饲养的逆戟鲸同样受到疾病侵袭，然而在美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration）的动物死亡记录中却很少提及这类疾病的存在。至少在 Taku 的案例中，官方公布的死因是“肺炎”而非蚊虫叮咬。

（高凌云编译自 2013 年 5 月 29 日 www.sciencemag.org）



响很深远。

第二次世界大战后，康普顿离开芝大，回到华盛顿大学担任校长，直到 1956 年才卸任。在任校长期间，康普顿延揽了许多国际知名学者，大幅提升了学校的名气。1961 年，康普顿退休，来年因脑溢血病逝加州伯克利。

（本文转载自 2013 年 10 月《物理双月刊》，网址：<http://psroc.phys.ntu.edu.tw/bimonth/index.php>；萧如珀，自由业；杨信男，台湾大学物理系，Email: snyang@phys.ntu.edu.tw）