

阳光里的奥秘

卢昌海

在前面几节中,我们介绍了太阳的大小和远近,地心说和日心说,日食的规律等。那些介绍所涉及的分析手段大都是几何手段。从本节开始,我们将介绍一类全新的手段:物理手段。我们将会看到,那是一类远比几何手段更有效的手段,在它们的帮助下,科学家们很快就将太阳研究推向了纵深。这种从几何手段向物理手段的过渡,是与天文学自身的发展脉络基本一致的。因为在历史上,人们对天文学的研究首先是从研究天体运动的几何规律入手的,用物理手段研究天文的所谓天体物理这一重要分支则是在晚得多的时候才出现的(而且它的出现与本节所要介绍的内容有着密切关系)。

天文学沿着这样的历史轨迹发展不是偶然的,拿太阳来说,想对它进行深入研究,首先必须克服一个显而易见的困难,那就是太阳离我们实在太远了(1.5亿千米),而且也实在太热了(表面温度就足以使任何已知的物质气化),我们几乎永远也不可能像研究地球一样到太阳上去钻个孔、挖个洞、采集一些样本。这一现实的困境曾使一些人深感悲观。1835年,实证主义哲学的创始人,法国哲学家孔德曾经预言,人类永远也不可能了解太阳和星星的化学组成。

幸运的是,与很多其他哲学家曾经发表过的有关科学的高论一样,孔德的预言很快就破灭了。因为太阳虽然很遥远,而且很热,但它却很慷慨的把一样东西送到了地球上,那就是阳光。这个初看起来很寻常的事实有着极不寻常的推论。有了它,我们这个星球才有生命。但阳光带给我们的不仅仅是生命,还有信息,比如有关太阳化学组成的信息,这是孔德所不知道的。事实上,比孔德的预言早了20年,1814年,德国物理学家夫琅禾费就发明了一种新的仪器,叫做光谱仪,为人们解读阳光里的信息提供了工具。

不过在介绍夫琅禾费之前,我们先要“论资排辈”一下,向大家引见两位前辈。

这两位前辈中的第一位对所有人大概都是“久

闻大名,如雷贯耳”的,他就是牛顿。在17世纪60年代中期,牛顿做过很多光学实验,在其中一组实验中,他让阳光从一个小孔射入屋内,然后经过一个三棱镜,最后投射到一块屏上(图1)。他惊讶地发现,出现在屏上的居然是一个色彩缤纷的长椭圆形影像。虽然在他那个时代,人们对光的本性还一无所知,但牛顿毕竟是牛顿,他敏锐地意识到——并且通过进一步的实验证实了——这一现象所揭示的有关阳光的重要性质:那就是阳光是由不同颜色的单色光组合而成的。出现在屏上的彩色影像,则是由于不同颜色的单色光在三棱镜中的偏折角度不同,从而被投射到屏的不同位置所产生的。如今我们知道,牛顿发现的这一现象就是所谓光的色散,即不同波长(从而颜色各异)的光在色散介质中具有不同的折射率。而他在屏上看到的彩色影像则是最粗糙的太阳光谱(确切地说是太阳光谱中的可见光部分,这部分约占阳光总能量的40%)。牛顿的这个重大发现可以算是一种很原始的光谱分析,它是人类在探索光的本性道路上迈出的重要一步。



图1 光的色散

但是从了解太阳的角度上讲,牛顿所看到的光谱却有一个问题,那就是它不仅可以从阳光中得到,

而且也能从其他白色或接近白色的光源中得到，因此它带给我们的信息似乎并不是太阳所特有的。那么，在阳光里是否还隐藏着更微妙的信息，甚至是太阳所特有的信息呢？由于牛顿不能长生不老，对这些问题的探索就要依靠牛顿之后的科学家了。可惜的是，牛顿实在超前得太多了，在接下来一百多年的时间里，无论科学家们怎么重复和改进他的实验，都只能看见与他看见过的相同的彩色影像。这影像会不会就是大自然给我们的终极答案呢？没有人知道，但科学家们没有气馁，他们持续不断地进行着新的尝试。正是因为科学界有这样的恒心和毅力，像牛顿那样的高人也终于有被超越的一天。

功夫不负有心人，在19世纪到来后的第二年，1802年，一位英国化学家终于窥视到了黎明前的曙光。所不同的是，这缕曙光不是彩色，而是黑色的！发现这缕曙光的英国化学家就是我们要介绍的第二位前辈，他曾经是一位医生，后来转向了科学，他的名字叫做沃拉斯顿。

1802年，沃拉斯顿对牛顿的实验进行了重复和改进。他采用了质量很好的三棱镜，并用一条很细的狭缝取代了牛顿的小孔，结果他发现了一个其他人不曾发现过的细节：在那熟悉的彩色光谱中，存在几条很细的暗线。那些暗线是什么呢？沃拉斯顿作了一个猜测，他认为其中大多数是不同颜色之间的分界线。他的这个猜测在当时是有一定道理的，因为他所发现的暗线只有寥寥数条，而人们描述光谱所用的颜色也只有区区七种（红、橙、黄、绿、蓝、青、紫），两者间的确有粗略的匹配性。但他没有想到的是，那些看似不起眼的暗线，已经让他站在了一座巨大冰山的尖顶上。11年后，当那座冰山的更多部分显露在人们面前的时候，他的猜测就不攻自破了。

那位让人们窥知冰山更多部分的人，就是夫琅禾费（图2）。



图2 纪念夫琅禾费诞辰两百周年的邮票

夫琅禾费出生在一个光学仪器世家，他的父亲和爷爷都是玻璃工匠，他母亲那一方与玻璃工艺的渊源更是可以回溯到17世纪早期。但很不幸的是，在夫琅禾费10岁和11岁时，他的母亲和父亲先后去世，慕尼黑的贫民窟里从此多了一位年幼的孤儿。在随后的几年里，夫琅禾费靠替一位镜片制造商做学徒维持着艰难的生计。1801年，不幸再次降临到他的身上，他所住的贫民窟里的“脆脆楼”垮塌了。好在14岁的他被人从瓦砾堆下救了出来，总算是不幸中的万幸。夫琅禾费的悲惨遭遇引起了恰巧途经垮塌现场，后来成为巴伐利亚国王的马克西米利安一世的同情，在他的资助下，夫琅禾费进了学校，并在十年后成为了光学研究的高手。1814年，夫琅禾费发明了光谱仪。这种仪器的核心部分仍是三棱镜，但在三棱镜的前后分别用透镜或透镜组对光线进行了适当的汇聚，从而大大提高了分辨率。

有了光谱仪的帮助，隐藏在阳光里的真正奥秘终于比较清晰地显露在了人们面前。与沃拉斯顿一样，夫琅禾费也看到了暗线。但他的光谱仪远比沃拉斯顿的三棱镜精密，因此他看到的暗线不是寥寥数条，而是有几百条之多，他对它们进行了仔细的编号。为了纪念夫琅禾费的贡献，人们把那些暗线称为夫琅禾费线。后来随着光谱仪技术的进一步改良（比如使用更好的三棱镜，更精密的透镜，使用光栅等），以及照相技术的加盟，人们在太阳光谱中观测到的暗线数目也越来越多。

但那些暗线到底是什么呢？这个曾经困扰沃拉斯顿的问题也困扰着夫琅禾费。他首先怀疑的是自己的仪器：那些暗线会不会是自己仪器的缺陷造成的？他对这种可能性进行了排查，方法很简单，那就是观察其他光源。如果暗线是仪器缺陷造成的，那就应该与光源无关，从而应该也出现在其他光源的光谱中。观测的结果很快否定了那种可能性——其他光源的光谱中并没有同样的暗线分布。这样，夫琅禾费就得到了一个结论：太阳光谱中的暗线是阳光本身的特征。由于那些暗线看上去虽然繁杂，却每一条都有固定的位置（这也是夫琅禾费能对它们进行编号的基础），它们显然隐藏着某种奥秘，而且这奥秘必定与太阳有关。

那么，这奥秘究竟是什么呢？夫琅禾费不知道，其他人也不知道。这局面多少有点尴尬，就好比你已经发现了通往阳光奥秘的大门，却找不到开门的

钥匙。这种尴尬局面持续了四十多年，在此期间，“功臣”夫琅禾费 and 沃拉斯顿，“反面陪衬”孔德等都先后离开了人世。

解密的日子终于还是到来了。1859年，两位德国人在光谱研究上取得了突破性的成果。这两位德国人一位是化学家，名叫本生，以他名字命名的“本生灯”直到今天仍被许多化学实验室所使用；另一位是物理学家，名叫基尔霍夫（图3），以他名字命名的电路定律直到今天仍是求解电路问题的重要工具。这两人当时都在海德堡大学，本生当时正在研究化学元素被加热后所发射的光谱，那些光谱中有一些亮线，而且不同元素的亮线位置是不同的。本生打算利用这一特点作为证认化学元素的新手段。这在当时是一个很高明的想法。不过想法虽然高明，他用来观测光谱的设备却是滤色片一类老掉牙的东西，精度很低。这时候，他的朋友基尔霍夫给他支了一招，建议他使用光谱仪。本生采纳了这一建议。在接下来的一段时间里，本生和基尔霍夫进行了合作，他们不仅证实了每种化学元素都有自己独特的光谱，就像每个人有自己独特的指纹一样，而且还通过光谱研究发现了两种新的元素：铯和铷，显示了这种手段的巨大威力。

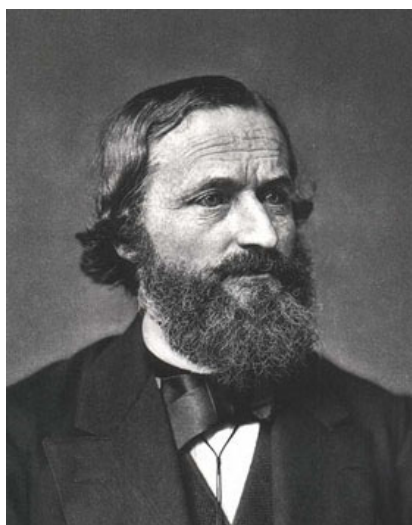


图3 德国物理学家基尔霍夫（1824~1887）

在研究中，基尔霍夫自己也作出了一生中又一项重要发现。他注意到，如果某种元素在加热后所发射的光谱中有某些亮线，那么当光穿越由该元素制成的稀薄冷蒸汽时，在光谱中原来的亮线位置上就会出现暗线。由于亮线源于光的发射（相应的光谱被称为发射光谱），暗线源于光的吸收（相应的光谱

被称为吸收光谱），因此基尔霍夫所发现的现象也可以表述为：一种元素能发射什么样的光，它也就吸收什么样的光，两者相互对应。这个重要规律后来被称为基尔霍夫热辐射定律。现在我们知道，光谱线是电子在不同能级之间跃迁产生的：电子从高能级跃向低能级时会发射能量，由此产生的是发射光谱，从低能级跃向高能级时会吸收能量，由此产生的就是吸收光谱。由于这两者是由同一组电子能级决定的，它们之间相互对应也就不足为奇了。当然，这一切直到20世纪初才随着量子理论的发展而被人们所了解。在基尔霍夫时代，人们对光谱线的了解还停留在“知其然，却不知其所以然”的水平上，基尔霍夫热辐射定律也只是一个经验规律。

但把这一经验规律与他和本生所做的事情联系起来，基尔霍夫立刻意识到了这一整套方法的重要价值。很明显，太阳光谱中的夫琅禾费线——那成百上千条的暗线——正是太阳上的吸收光谱，既然吸收光谱与发射光谱是相互对应的，那么我们只要将夫琅禾费线与已知元素的发射光谱相比较，就可以证认出太阳上的元素。这样，基尔霍夫就找到了开启大门，破解阳光奥秘的钥匙。对于基尔霍夫的这一重要发现，本生曾经作过这样的记述：

基尔霍夫和我现在正忙于一种让我们夜不能寐的研究之中。基尔霍夫做出了一个有关太阳光谱中暗线起因的奇妙的、完全出人意料的发现。他能在太阳或火焰的连续光谱中，在与夫琅禾费线严格对应的位置上，以人工加强的方式产生出那些暗线。这就找到了一种方法，能让我们像确定化学试剂中的氯化铈那样精确地确定太阳和星星的组成。

利用基尔霍夫的发现，科学家们很快就在太阳光谱中证认出了大量和地球上相同的元素（孔德的悲观预言正式入住历史博物馆）。有些读者或许还记得，我们在“太阳的故事——地心说 vs 日心说”中曾经提到过一种叫做“天贵地贱”的古代观念，按照那种观念，完美的天体和卑微的地球是由完全不同的质料组成的。那种观念后来因伽利略发现太阳黑子而遭到了驳斥。不过，伽利略所驳斥的只是天体的完美性，对那种观念真正毁灭性的打击，却是来自人们对天体化学成分（即所谓质料）的了解。

随着研究的深入，科学家们不再满足于像牛顿那样利用普通的日光来做研究，他们开始寻找新的机会，其中最重要的机会就是日全食。在1868年8

月 18 日的日全食（属于沙罗序列 133）期间，法国天文学家詹森远赴印度观测了太阳光谱，结果在太阳大气层中的色球层的发射光谱中发现了一条波长为 5875\AA 的黄色亮线。不同寻常的是，这条亮线在地球上任何已知元素的发射光谱中都找不到对应。这是怎么回事？是詹森搞错了吗？不是。因为两个月后，英国天文学家洛克耶也在对同一次日全食的光谱记录中发现了同样的亮线。两组独立的观测同时搞错，而且错得一模一样的可能性无疑是很小的。

看来那条亮线并不是错误，既然不是错误，那它是什么呢？联想到本生和基尔霍夫通过光谱学手段发现新元素的故事，这一问题的答案显然已呼之欲出。是的，答案就是新元素——一种在地球上尚未被发现过的新元素。由于这一元素是在太阳上发现的，洛克耶将之命名为了“氦”，这个名称来自表示太阳的希腊语。不过，氦虽然是在太阳光谱中被发现的，它作为“太阳元素”的身份却并未维持很久，1895 年，人们在地球上也发现了这种元素。光谱学方法不仅让我们了解了太阳的化学组成，而且还帮助我们发现了新元素，它是如此地卓有成效，以至于英国天文学家德拉鲁表示，即便我们能跑到太阳上去，把一些太阳上的物质拿到实验室来研究，也不会比用光谱仪得到的结果更精确。为了纪念夫琅禾费对这一切的重大贡献，人们在他的墓碑上刻下了这样一句墓志铭：他使星星变得更近。事实上，他不仅使星星变得更近，还为一个新领域的开创奠定了基础，因为整个天体物理学都是随着光谱学方法的应用而产生的。

氦元素的发现引起了人们对日全食太阳光谱的更大兴趣。第二年，1869 年 8 月 7 日的日全食（属于沙罗序列 143）期间，天文学家们又对太阳光谱进行了仔细观测，结果居然又有了新的斩获：他们在比色球层更外部的所谓日冕的发射光谱中发现了一条波长为 5303\AA 的绿色亮线。这条亮线在所有已知元素的发射光谱中也找不到对应。在随后的若干年里，这样的新发现一而再，再而三地出现，人们在日冕光谱中发现的新谱线居然增加到了 24 条之多。看来除了氦以外，太阳上还有其他新元素。至于那 24 条新谱线是来自一种还是多种新元素，暂时还没法知道，人们姑且先取了一个名字，叫做“氩”（我们对这个译名加了引号，因为该汉字通常是用来表示一种惰性气体元素），它来自日冕的英文名。但

与后来在地球上找到了的氦不同的是，那神秘的“氩”元素从未在地球上露过面。难道“天贵地贱”的古老观念毕竟还是有那么一丁点儿的正确，太阳上毕竟还是有一些地球上不存在的元素？这个疑问直到 20 世纪 30 年代之后才真相大白，原来并不存在什么“氩”元素，那些日冕光谱中的新谱线乃是来自一些被剥去了外层电子后的金属离子（比如铁离子、钙离子和镍离子）。以那条 5303\AA 的绿色亮线为例，它是来自被剥去了 13 个电子（占总数的一半）的“无上装”铁离子的发射光谱。

现在我们知道了太阳上有哪些元素。但科学家们的胃口比这更大，他们不仅关心太阳上有哪些元素，而且还想知道它们各自所占的比例，或者用天文学家们的术语来说，是元素的丰度。这对于进一步探索发生在太阳上的物理过程具有极大的重要性。幸运的是，物理学的威力完全能满足科学家们这一得寸进尺的要求。

推算元素的丰度从技术上讲并不容易，但基本原理却并不复杂。我们已经知道，谱线的位置可以用来确定元素的存在，但谱线带给我们的信息并不只是位置。当我们观测到一条谱线时，还会得到另一条信息，那就是谱线的强度。这条额外信息所携带的正是有关元素丰度的知识。为什么呢？因为无论吸收光谱还是发射光谱，它的强度都与产生谱线的元素的丰度有关，丰度越大，谱线就越强，反之，丰度越小，谱线则越弱。知道了这一关系，我们就可以用谱线的强度来反推元素的丰度。当然，这是典型的“站着说话不腰疼”，实际计算起来有许多技术性的困难需要克服，因此这种计算直到 1925 年才有人去做。

最早进行这种计算的是一位年仅 25 岁的“灭绝师太”（女博士）。这位名叫佩恩的“师太”出生于英国（图 4）。1919 年，当爱丁顿验证广义相对论的故事风靡世界的时候，她有幸聆听了爱丁顿的讲座，从此喜爱上了天文。不过在英国这样一个社会习俗比较保守的国家里，女性从事天文研究是很困难的（其实别说从事天文研究，她所就读的剑桥大学当时甚至不给女性颁发学位），于是她远渡重洋到美国去读博士。在读博士期间，佩恩对太阳上的元素丰度进行了研究。1925 年，她的研究得出了一个惊人的结果：这个太阳系里最重的天体竟然主要是由元素周期表上最轻的元素——氢和氦——组成的！

虽然人们当时对太阳上的元素丰度还一无所知，但自从“天贵地贱”的观念破灭之后，很多人已经想当然地走到了另一个极端，认为太阳和地球有着相似的组成。在这种情形下，佩恩也知道自己的结果有点骇人听闻，为保险起见，她在发表前特意征求了一下当时恒星光谱研究的权威，著名美国天文学家罗素的意见。



图4 英国天文学家佩恩（1900~1979）

没想到这一征求征出了苦恼，因为罗素给了她一个很负面的回答，他表示佩恩的结果是“显然不可能的”。受罗素的威名所慑，佩恩修改了论文的措辞，表示自己所发现的氢和氦的丰度“被认为是有问题的”，“几乎可以肯定是不符合实际的”。这样的措辞很快就被证实为是谦虚得过火了。因为在接下来的几年间，其他天文学家们也陆续独立地得到了与佩恩一样的结果。四年之后，就连罗素本人也得到了同样的结果。在铁的事实面前，罗素终于意识到自己错了，在他的论文中，他宣布自己的结果与四年前佩恩的结果有着“很令人满意的一致”。权威毕竟是权威，四年前，因为他的影响，佩恩修改了措辞，弱化了结论，而四年后，同样也是因为他的影响，佩恩的结果加速成为了主流，她的博士论文更是被誉为了天文学领域中最重要的重要的博士论文。在那之后，佩恩继续从事着天文学研究。1934年，她与一位俄国天文学家结了婚（从此告别“师太”生涯）。1956年，她成为了哈佛大学有史以来第一位

女性正教授及系主任。

如今我们知道，太阳是一个巨大的“氢气球”，在它的总质量中，氢占了71%（在原子数目中则占了91.2%），氦占了27.1%（在原子数目中则占了8.7%），其余所有元素加起来也只占不到2%（在原子数目中则只占不到0.2%）。事实上，不仅太阳如此，绝大多数“青壮年”时期的恒星都是如此，甚至在整个宇宙的可见物质中，氢和氦也占了绝对的主导。

在本节的最后，我们要对元素丰度的计算再作一些补充。细心的读者也许注意到了一个问题，那就是太阳光谱——无论吸收光谱还是发射光谱——主要来自太阳大气层，因此通过光谱学研究得到的元素丰度也是针对太阳大气层而非整个太阳的。事实的确如此，不过太阳是一个高温气态的星球，托这种恶劣环境的福，在太阳内部很大的体积范围内都存在强烈的对流，使得太阳大气层的元素丰度与内部基本一致。不仅如此，对太阳模型及太阳起源的研究都显示，即便在不存在显著对流的区域，元素丰度仍与外部接近（唯一的例外是核心）。因此，我们通过光谱学手段得到的元素丰度很接近整个太阳的元素丰度（确切地说是重元素丰度略微偏低）。另一点需要补充的是，有关太阳元素丰度的计算需要用到统计物理、量子力学等领域的知识，且计算量相当巨大，很容易出错。这其中有一个著名的例子，是人们在铁元素丰度计算的量子力学部分中曾经犯过一个错误，导致铁元素的丰度被低估了十倍，那个错误直到1968年才被纠正。除计算量巨大外，元素丰度计算所面临的另一类困难，是有些元素——比如氦——的谱线产生于色球和日冕中的一些远离平衡态的区域，从而很难建立理论模型。不过，我们今天所知的太阳元素的丰度已经不单纯是光谱分析的结果，而是得到了一些其他手段，比如日震学手段的印证，因此具有比单一手段更大的可靠性。

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.changhai.org>