

光明的源泉

卢昌海

爱因斯坦和他的年轻合作者英费尔德曾经写过一本非常出色的科普著作，叫做《物理学的进化》。在那部著作中，他们作过一个令人印象深刻的比喻，那就是把科学的发展比喻成一个侦探故事。他们这样写道：

自从柯南·道尔写出绝妙的故事以来，在几乎所有侦探小说中都有这样一个时刻，侦探收集到了为解决问题的某个阶段所需的全部事实。那些事实往往看起来很奇怪、不连贯，并且彼此毫不相干。可是大侦探知道这时不必继续调查了，现在只有纯粹的思维能把搜集到的事实联系起来。于是他拉拉小提琴，或躺在安乐椅上抽抽烟。突然间，老天爷，他找到了联系！他不仅对手头所有的线索都有了解释，而且知道某些其他事情也一定发生了。因为现在他已经确切地知道在哪里可以找到它，如果愿意的话，他可以出去收集他理论的进一步证实。

我们的太阳故事进行到这里，也差不多到了那样一个时刻，可以——甚至必须——像大侦探一样解决一些谜团了。不过与大侦探的单枪匹马及“老天爷，他找到了联系！”那样的戏剧性不同，科学家们收集事实的过程更像是现代侦探连续剧中那些跨省市的联合行动。因为除了大侦探自己收集的事实外，来自同事、同行乃至其他部门的协助往往也对案情的侦破起着关键作用。而科学家们解决谜团的过程，与其说是“拉拉小提琴，或躺在安乐椅上抽抽烟”，不如说更像是现代侦探连续剧中的大型案情分析会。在那样的分析会上，很多人（尤其是新手）会提出很多设想。当那些设想被一一排除后，某位幸运儿（多半是男主角）会提出一个真正的好想法。当然，一个精彩的侦探故事往往是曲折的，一个曾经的好想法也许后来又遇到新的问题，然后不得不召开新的案情分析会。我们将会看到，科学的发展常常也是如此。

现在就让我们来观摩一场有关太阳的案情分析会，会议的主题是太阳为什么会发光？或者用更学术一点的话说，是恒星的能量产生机制是什么？

太阳为什么会发光？这是一个很古老的问题。既然是很古老的问题，当然曾经有过很古老的回答，比方说“上帝安排的”。但那样的回答就好比是说凶案是上帝做的，不必查了。那样的人做神父远比做侦探合适，我们就不邀请了。

那么，我们所邀请的第一位侦探是谁呢？是英国天文学家威廉·赫歇尔。此人是太阳系第六大行星——天王星——的发现者，在天文史上是一位赫赫有名的前辈。不过我们这场案情分析会虽然打算开成一个“团结的大会”、“奋进的大会”，却不是一个论资排辈的地方。在这个分析会上，赫歇尔的资格虽老，却必须被列入新手的行列（这也比较符合侦探片中新手总是先发言的惯例），因为他的提议实在是有点不靠谱。那提议是这样的：太阳之所以发光，是因为它有一个因炽热而发光的大气层，那大气层的下面则有可能是一个凉爽、甚至可能有生命居住的固态表面！

今天的读者也许很难理解，像赫歇尔那样著名的天文学家怎么会想出如此不靠谱的提议？在这里，我们要为赫歇尔说几句公道话，因为他的提议在如今看来虽然极度离奇，在当时却并非单纯的臆想。事实上，赫歇尔之所以作出那样的提议，是因为他注意到了太阳上的黑子，他认为那是透过太阳大气层中的空隙所看到的太阳表面，那表面既然呈现黑色，想必是凉的，这就是他那提议的依据。那依据虽是错误的，在当时却不失为是一种可能性。在科学史上，错误的假说可以说是层出不穷，一些反科学的人士往往以此为由来抨击科学。其实，科学之所以有今天的声望，从来就不是因为她不会出错，而是因为她不断地寻求实证，并且在这过程之中不断地纠正错误，去芜存菁。我们在后文中将会看到，黑子的“黑”是一种相对的颜色，它并不等于日常意义上的“凉”。我们在上一篇中介绍过的太阳光谱的类型也间接证实了太阳“表面”非但不凉，而且要比大气层更热，因为否则的话，太阳大气层的光谱将会是发射光谱而非吸收光谱。除上述误判

外，赫歇尔的提议还有一个很大的问题，那就是无论多热的大气层如果得不到能量的补充，都会很快冷却下来，这与太阳长时间稳定地发光是完全矛盾的（不过这一点也不能用来苛求赫歇尔，因为能量守恒定律的确立是赫歇尔去世之后的事情。如今连小学生都会追问的热能从何而来的问题，在赫歇尔时代并不是显而易见的）。

有这么多严重问题，赫歇尔的资格再老，也只能到一旁凉快去了。接下来有两人几乎同时发了言，这两人一位是德国医生兼物理学家迈耶，另一位是苏格兰物理学家沃特斯顿。说来也巧，这两人不仅发言时间相近，学术经历也相似，他们都在热力学领域中做过一些先驱性的工作，前者研究了热功当量和能量守恒，后者研究了气体分子运动论，但两人的工作都在很大程度上被同时代人所忽略。到了19世纪40年代后期，这对“难兄难弟”又几乎同时对太阳为什么会发光产生了兴趣。与赫歇尔时代不同，当这两人开始研究这一问题时，能量守恒的观念已初步形成（如前所述，迈耶本人就是研究这一观念的先驱之一），因此他们不能像赫歇尔那样随意假设一种近乎静态的发光机制，而必须寻求能让太阳持续发光的能量来源。

作为起点，他们两人都分析了一种土得掉渣的假说，即把太阳当成一个燃烧的大煤球。这种“煤球说”的提出是不需要想象力的，凡用过煤炉的人都有可能想到，但推翻它却需要一些专业知识。经过计算，迈耶发现太阳虽然大得惊人，但与它那更惊人的光度相比却还不够大，假如太阳真是个大煤球的话，即便维持燃烧所需的氧气不是问题，也只能燃烧几千年。沃特斯顿的研究则表明，不仅大煤球烧不了多久，其他化学反应也强不到哪里去，至多能撑20000年。如果时光能倒转两百年，他们这些结果将不仅不是问题，反而是天大的优点，因为那跟神学家们“推算”出的世界历史的长度大致相当。但在19世纪中叶，学术界已基本断定地球的年龄远不止那个量级。而依照当时流行的康德-拉普拉斯星云假说，太阳和地球是由同一片星云收缩而成的，彼此年龄相近。既然太阳和地球的年龄相近，而地球的年龄远不止几千年，那么只能燃烧几千年的“大煤球”显然不可能是太阳持续发光的能量来源。因此“煤球说”也被排除掉了。

排除了“煤球说”之后，迈耶和沃特斯顿各自

提出了自己的假说。迈耶提出太阳之所以持续发光，是因为不断有陨星坠落到太阳上。沃特斯顿则认为太阳自身引力收缩产生的热量使它持续发光。两者之中，沃特斯顿的“引力说”由于与康德-拉普拉斯星云假说存在共性——即都与引力收缩有关——而占有一定优势。不过优势归优势，两人的论文投寄出去后的命运却是相同的：那就是都被拒掉了——迈耶的论文被巴黎科学院所拒，沃特斯顿的则被伦敦皇家学会所拒。但即便如此，沃特斯顿还是找到机会于1853年向英国科学进步协会介绍了他们两人的理论，他的努力打动了两位著名人物：德国物理学家亥姆霍兹和英国物理学家汤姆生（即后来的开尔文勋爵）。他们成为了我们这个案情分析会的下两位发言者。

这两人之中，亥姆霍兹的发言很简短，中心思想就是坚决拥护沃特斯顿的“引力说”。汤姆生则比较健谈，他虽也表态支持“引力说”，却详细回顾了自己的心路历程。他坦承，自己曾经喜欢过迈耶的“陨星说”，但在接触过程中逐渐认清了后者存在的问题，那就是假如太阳系中仍有那么多陨星，我们地球也应该会分到一瓢羹，这与地球目前的“冷清”状态显然不符（事实上，考虑到我们这些地球生物的脆弱性，地球若果真分到那“一瓢羹”的话，我们早就灭绝了）。不仅如此，假如太阳的巨大能量真的来自陨星，那陨星的数量必须极为庞大，它们的坠落将使太阳的质量增加，进而影响行星的轨道。由此导致的后果之一，是过去几千年中地球的公转周期应该缩短几个星期。这与天文观测显然也是矛盾的。“吾爱‘陨星说’，但吾更爱真理”，面对如此严重的问题，汤姆生毅然决然地抛弃了“陨星说”，转而投入“引力说”的怀抱。

与“陨星说”相比，“引力说”的确显得高出一筹。亥姆霍兹和汤姆生的研究表明，太阳的半径只要每年收缩几十米，就足以维持目前的光度（感兴趣的读者不妨自己估算一下，看能否证实他们的结果）。相对于139万千米的太阳直径而言，那样小幅的收缩在当时是任何人都无法察觉的，因而不与观测相矛盾。而且，那样的收缩可以持续几千万年，与汤姆生本人所估算的地球年龄具有相同的量级。这一点给了他很大的信心，使他在有生之年里保持了对“引力说”的从一而终。若干年后，当人们利用新发现的放射性现象对地球年龄作了重新估算，

发现它远比几千万年更古老时，汤姆生依然固执己见，凭借自己的巨大威望将“引力说”面推向了20世纪。

但在有关地球年龄越来越铁的证据面前，汤姆生的威望虽高，终究只是“螳臂挡车”。在这一点上，亥姆霍兹醒悟得比较早，他曾表示，如果能发现新能源，我们就可以把太阳的年龄延长。这虽是一句没什么技术含量的大白话，却也道出了一个努力方向，那就是寻找新能源。只不过“煤球说”所用的化学能（本质上是电磁能）和“引力说”所用的引力能都被排除了，新能源在哪里呢？这个问题自然而然成为了下一位发言者的主题。

这位发言者是英国天文学家爱丁顿，他的准备工作比前几位发言者都更充分，因为他从兄弟单位那里拉来了以下几项“友情赞助”（赞助者全都是诺贝尔奖得主）：

- 1905年，爱因斯坦提出了著名的质能关系式。它表明在貌似寻常的物质之中蕴藏着惊人的能量。

- 1919年，新西兰物理学家卢瑟福在卡文迪什实验室里实现了所谓的人工原子核嬗变，即用人工手段将一种原子核变成另一种。

- 1920年，英国化学家阿斯顿发现了氢原子核（即质子）的质量要比重元素单个核子的平均质量略大。

这几项“赞助”落到像爱丁顿那样训练有素的大脑里，很快就变成了一个有关新能源的大胆构想：既然原子核可以彼此转变，而质子的质量要比重元素单个核子的平均质量略大，那么只要能把质子聚合成重原子核——比如氦核。前者所包含的多余质量就应该会按照爱因斯坦质能关系式所确定的“汇率”转变为巨大的能量。简单的估算表明，这种被称为核聚变的能量产生机制足以支撑太阳100亿年以上，与有关地球年龄的所有测定都完全相容。

当然，这只是理论可能性，它能否成为现实，关键得看太阳上的质子是否真能聚合成重原子核。在爱丁顿时代，那还是一个谜，因为核子世界的一个重要成员——中子——尚未被发现，有关核子相互作用的理论也尚未建立起来。不过爱丁顿很乐观，他表示“在卡文迪什实验室里能够做到的事情对于太阳来说应该不会困难”。但他乐观不等于别人也乐观，他的观点一经提出，就遭到了另一位重量级英国物理学家金斯的强力反对。两人互不相让，展开

了公开而激烈的争论，他们的争论一度成为皇家学会的一道风景，吸引了很多听不懂他们争论的科学家来看热闹（科学家也是人，他们的好奇心也并不总是集中在大自然上的）。

那么，金斯反对爱丁顿的理由何在呢？他最核心的一条反对理由是这样的：质子之间存在很强的静电斥力，为了让它们彼此接近到能够发生核聚变的程度，它们的热运动能量必须大到能克服静电斥力的程度，这要求极高的温度，而太阳内部是不可能那样高的温度的。对此，爱丁顿的回答是：像氦核那样的重原子核的存在是一个既有事实，如果连恒星内部的温度都不够高，那么宇宙中的重原子核从何而来呢？“我们不跟宣称恒星不够热的人争论，我们请他去找一个更热的地方”——他用这样一句掷地有声的名言把球扔回给了金斯。

这球金斯没能接住，因为当时没有人知道更热的地方（不过富有戏剧性的是，后来人们发现，还真的存在一个比恒星内部更热的地方，而且包括氦核在内的某几种重原子核确有相当一部分是在那里被产生出来的。那个地方就是大爆炸初期的宇宙）。爱丁顿虽然把球扔回给了金斯，但要想让别人信服，光靠扔皮球是不行的，他必须正面论述自己理论的可行性。为此，爱丁顿对恒星结构模型进行了研究。在那些具有开创意义的研究中，他估算出太阳核心的温度约为4000万摄氏度，核心物质的密度则为80克/厘米³（相当于黄金密度的四倍）。由于缺乏核相互作用理论的引导，他无法对核聚变的细节做出可靠描述，但他的估算结果在数量级上是大致成立的。

几千万度的高温，比黄金还高得多的密度，那样的数据看上去有些离奇。但福尔摩斯说得好：当你排除了所有的不可能，剩下的无论看起来多么不可能，一定就是真相。爱丁顿的理论就有些那样的意味。如果我们对已被排除掉的“煤球说”、“陨星说”和“引力说”分一下类的话，那么从尺度上讲，它们中既有宏观的，也有原子尺度的；从相互作用上讲，则既有电磁的，也有引力的。既然那些都被排除掉了，剩下的尺度就该轮到原子核尺度，而剩下的相互作用则该是弱相互作用和强相互作用了，这正是爱丁顿假说的基本特点。但福尔摩斯的话虽然精彩，毕竟不是金科玉律。爱丁顿的假说真的代表真相吗？这个悬念我们要请下一位发言者来揭晓。那位发言者也做了充分准备，而且拉“赞助”

的功夫也不含糊，总计拉到四项之多（赞助者除伽莫夫外，也全都是诺贝尔奖得主）：

- 1928年，俄国物理学家伽莫夫发现了量子力学的隧道效应，即微观粒子有一定概率穿越经典意义上不可穿越的“障碍”。这一发现在很大程度上破解了金斯的诘难，因为即便太阳核心不够热，依然有一部分质子可以通过隧道效应来克服静电斥力造成的“障碍”。

- 1932年，英国物理学家查德维克发现了中子，为理解原子核结构铺平了道路。

- 1934年，意大利物理学家费米提出弱相互作用的四费米子理论，为近似描述核子反应中的弱相互作用部分提供了理论基础。

- 1935年，日本物理学家汤川秀树提出了强相互作用的介子理论，为近似描述核子反应中的强相互作用部分提供了理论基础。

有了上述“赞助”，我们的发言者很快就拟定了一份出色的发言稿，为爱丁顿的假说提供了决定性的支持。这位发言者是20世纪30年代从纳粹德国逃往美国的许许多多物理学家中的一员，他的名字叫做贝特。在贝特开始研究恒星能量产生机制时，对这一问题感兴趣的物理学家已经不少，其中包括后来的美国原子弹之父奥本海默、美国氢弹之父泰勒，以及著名的前苏联物理学家朗道。不过贝特并不是一个人在战斗，他有合作者，此人名叫克里奇

菲尔德，是一位研究生，在与贝特合作前曾跟随伽莫夫学习。

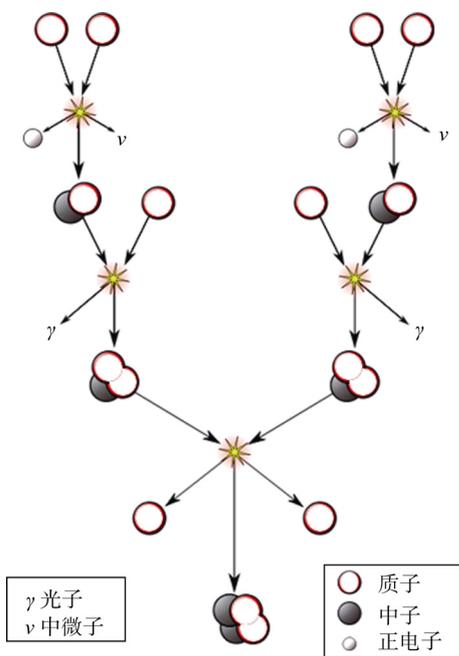
1938年，在伽莫夫的建议下，克里奇菲尔德研究了质子-质子之间的核反应。在得知贝特也在从事类似的研究后，伽莫夫让克里奇菲尔德把论文寄给贝特，由此促成了两人的合作。贝特和克里奇菲尔德的合作揭示了发生在太阳内部最重要的核聚变反应，质子-质子链的实现方式。这种实现方式中最主要的一类被称为第一类质子-质子链，它是这样进行的：

- 两个质子聚合成氘的同位素核 ^2H 。
- 一个氘核与一个质子聚合成氦的同位素 ^3He 。
- 两个 ^3He 通过扔掉两个多余质子而聚合成一个标准氦核 ^4He 。

这整个过程释放出的能量约为 26.7MeV（MeV 为百万电子伏特，是描述核反应能量的常用单位，约合 1.6×10^{-13} 焦耳），其效率是普通化学反应的几百万倍以上。在太阳核心所产生的能量中，这类质子-质子链的贡献占了约 85%，是当之无愧的产能大户。

除质子-质子链外，贝特还研究提出了另一种恒星核反应机制，称为碳氮氧循环，也称为碳氮循环（因为参与该反应的氧核是 ^{15}O ，而不是最常见的 ^{16}O ）。这种反应所需的温度比质子-质子链更高，在像太阳这样的小质量恒星的能量产出中只占了 1% 左右。但它在质量比太阳大 30% 以上的恒星中却占据着主导作用，因而在恒星核物理中的总体重要性不亚于质子-质子链。与贝特几乎同时，德国物理学家魏茨泽克也独立地完成了同样的工作。魏茨泽克也是当时这一领域的主要研究者之一，并且正是受到他的影响，贝特才将自己的研究方向由单纯的核物理转到恒星核物理上。1939年，贝特写了一篇综述性的论文，对恒星能量产生机制作了比较完整的阐述。也许是由于对质子-质子链和碳氮循环这两类反应同时作出重要贡献的缘故，贝特成为了1967年度诺贝尔物理学奖的唯一得奖人，得奖理由中很重要的一条就是发现恒星能量产生机制。

在研究恒星能量产生机制的同时，人们对爱丁顿的太阳模型也进行了修正。其中最重要的修正是关于核心温度的，那温度虽仍是一个很难用日常指标来衡量的恐怖数字，但因为有了隧道效应的帮助，比爱丁顿所估计的 4000 万度要低得多，约为 1570 万度。这个温度的重估是十分必要的，因为核聚变反应的剧烈程度与温度有着极为敏感的依赖性，温



第一类质子-质子链

度越高，核聚变反应越剧烈。如果太阳的核心温度果真有 4000 万度，整个太阳将会像一个超级氢弹一样，在惊天大爆炸中化为灰烬（我们的命运自然也可想而知）。与核心温度的调低相反，重新估计后的太阳核心密度则比爱丁顿的估计更高，约为 160 克/厘米³，而太阳的核心压强也极为惊人，达到 2500 亿个大气压。这些数字的可怕之处一般人可能难以体会，我们可以举两个例子：维持在太阳核心温度上的物质，哪怕只有玻璃弹珠那样一小块，也足以熔化几百千米以外的钢铁；而太阳的核心压强，则相当于在手指甲那样的面积上压上几亿吨的重物。可以毫不夸张地说，太阳核心这个太阳系的光明源泉，是一个不折不扣的恐怖核心。

好了，现在我们终于有了一个理论，像大侦探的理论一样，能对手头的线索（比如太阳的光度）作出解释。从某种意义上讲，爱丁顿和贝特是幸运的，因为当爱丁顿开始思考恒星能量产生机制时，人们对物理世界的了解已经深入到了理解这一问题所必需的原子核尺度上，爱因斯坦也已经提出了质能关系式；而当贝特开始研究恒星能量产生机制的细节时，人们已经有了关于核子相互作用的初步理论。那些理论若是不存在，爱丁顿和贝特就是再高明十倍，恐怕也“巧妇难为无米之炊”。我有时会想，如果某个遥远星球上存在着其他智慧生物，他们会如何理解这个世界，我们称之为科学的东西在他们

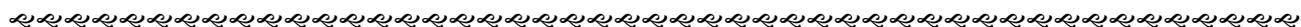
那里会以一种什么样的顺序发展？那是我心中有有关他们的最大好奇。至于他们长什么样？能活多少岁？对我来说倒是细枝末节的。

最后让我们再回到本节开头所引的爱因斯坦和英费尔德的文字中来。有读者可能会问：爱丁顿和贝特等人的理论虽然给出了太阳的能量产生机制，但那恐怖核心却是一个我们永远也不可能到达的地方，我们有什么办法检验他们的理论呢？答案是：通过检验理论的推论。事实上，我们很快将会看到，由爱丁顿和贝特等人提出的这个恒星能量产生机制的确很像爱因斯坦和英费尔德所说的大侦探的理论，它不仅解释了我们手头的线索，而且也预言了某些其他事情一定已经发生。我们下一步要做的，就是去验证那些事情，收集有关我们理论的进一步证据。

但出乎意料的是，我们踌躇满志的收集行动却遇到意想不到的困难。大自然似乎嫌我们这个侦探故事还不够离奇曲折，而决心要为我们增添一些新的情节。在下一篇中，我们将一同去面对那些意外，同时欣赏一下大自然为我们增添的新情节。

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>



科苑快讯

皮肤造血新技术

以往要将皮肤细胞转化为血细胞，需要将其先诱导为多能干细胞，然后再转化为血细胞。最近加拿大麦克马斯特大学（McMaster University）的巴提亚（Mickie Bhatia）和同事开发了将皮肤细胞直接转化为血细胞的新技术，不仅过程简单、血液质量也更高，还避免了相关的法律与伦理问题。

经过处理的皮肤细胞变成了更加专门的造血细胞——如同那些存在于骨髓中的细胞，经过进一步诱导，这些祖细胞可变成防御细胞（如中性粒细胞、嗜碱性粒细胞和巨噬细胞），能够消灭细菌以及其他入侵者。研究人员在两年时间里，用成人皮肤和新生儿包皮反复进行上述实验，证实任何年龄者的皮

肤都可以转化为血液，而且血液功能正常。

随着该技术的进一步完善，或许可用源自白血病患者皮肤的健康细胞替代他们有缺陷的血细胞。这种治疗方法还可用于接受大剂量化疗的癌症患者——化疗不仅杀死癌细胞，同时还破坏患者血液系统，因此化疗经常需要暂停，以便让患者免疫功能恢复，这也给了肿瘤恢复和再生的可乘之机，再生的癌细胞通常对化疗有抗体，如果患者在化疗的同时输入自身皮肤制造的替代血液，不仅可继续进行大剂量化疗，而且会增加永久杀死肿瘤的机会。巴提亚说以后还能够培养和储存不同类型的血液，就像现在储存捐献血液一样。

（高凌云编译自 2011 年第 1 期《欧洲核子研究中心快报》）