

5 总结

各种火箭推进原理的物理能标不同，这决定了它们能达到的速度的上限。化学燃料推进的能标是 eV，比冲的上限 5 km/s；电磁推进的能标是 keV，其比冲可以达到 30—40 km/s 的量级。核动力推进的能标是 MeV，其比冲保守估计可以达到 10000 km/s 的量级。这些方案中的喷射物运动都是非相对论的。

在相同能量转化率的条件下，比冲和能标的平方根成正比。对于正反物质湮灭的推进方案，其喷射物是 γ 光子，比冲就是光速本身。

再考虑上火箭干湿质量比的反对数因子，化学燃料火箭的推进速度可以达到第二宇宙速度，但是要到达第三宇宙速度会很困难。因此，化学燃料推进是行星际航行的驱动方式。将化学燃料驱动和电磁驱动结合，可以超越第三宇宙速度，是

恒星际航行入门阶段的驱动方式。核动力驱动可以达到 1/10 光速的驱动速度，是恒星际航行正常的驱动方式。当然，正反物质湮灭推进可以逼近光速，是驱动原理的天花板，是星系际航行的推进方式。

致谢 感谢西湖大学程子正、刘鸿祎同学检查本文中的计算。本工作得到了新基石科学基金会的资助。

悟理小言

李政道与玻尔的一则故事

1995 年夏天，全球华人物理和天文学会在汕头召开第一次大会。会上世界各地学者云集，包括四位华人诺贝尔奖获得者，杨振宁、李政道、丁肇中、李远哲，和中国科学院院长周光召，盛况空前。会议开始前，李政道先生讲述了一段鲜为人知的关于量子力学的故事，让我茅塞顿开。

当李先生还在普林斯顿高等研究所时的某一日，玻尔到访。李政道和玻尔共进午餐时，李问玻尔，为什么要那么久才发现解释氢原子光谱的玻尔模型？

量子概念是普朗克于 1900 年为了解释黑体辐射光谱而提出的。1905 年，爱因斯坦利用它创造性的提出用光子来解释光电效应。但直到 1913 年，玻尔的原子模型才问世，成功地解释了氢原子的光谱。此时距离量子的提出，已经过了 13 年，为什么需要的时间如此长久？这就是李先生的问题。

玻尔的答案，有点出乎意料，是大部分人都不知道的。我问过几位物理前辈，如 Norman Ramsey, Louis Michel, J. David Jackson 等，他们都没有听说过这件事，所以我认为这是一个鲜为人知、十分值得保留的历史档案。

玻尔说，你不懂，当时没有人会想到氢光谱是从一个原子发出的。

要听到一个沉重的鼓声，一定要一面大鼓，因为鼓面振动的波长不能大于它的直径。其他的经典波也相似，波长不能比波源大。在 1913 年以前，人们已经知道氢的光谱包含可见光，波长是几百纳米。

氢原子的大小也晓得，是二十分之一纳米。波长比原子大了几千、一万倍，氢光谱当然不能从单一的原子发出，只能是由成千上万个氢原子产生的一种集体效应。这就是为什么玻尔说，当时没有人会想到氢光谱是从一个原子发出的。

玻尔的智慧是，他认识到量子效应可以给出另外一种机制。氢光谱不由普通振荡产生，所以光源不一定要比波长大。有了量子效应，就算氢原子那么小的东西，也可能是氢光谱的光源。无论新机制是什么，如果光源的确只是一个原子，那么就必须先解答一个难题：唯一可以用上的参考长度是氢原子的大小，它比波长小了几千到一万倍，这个放大机制是什么？

爱因斯坦用普朗克量子常数 \hbar 把频率变成能量，从而解释了光电效应。玻尔利用 \hbar ，光速 c ，和电子质量 m 造出一个基本长度， $r = \hbar/mc$ 。但这个基本长度 r 很小，只有 3.86×10^{-4} nm，比原子还小得多，但氢谱的波长的确是由这个基本长度经过两次放大而产生。玻尔当时也认识到，从电子的电荷 e 和 \hbar ， c ，可以造出一个缩小因子 $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$ 。把 r 放大 $1/\alpha$ 倍后，得到氢原子的大小 0.053 nm，解释了原子大小的来源。再放大 $1/\alpha$ 倍，变成 7.25 nm，这就是光谱波长的基本来源。虽然它比氢光谱的波长还小几十倍，但玻尔模型内出现的其他因子，如 4π 之类，最后会给出氢谱的准确波长。这就是玻尔想出来的新机制，与整体振荡无关。没有量子，没有 \hbar ，这个机制是绝对行不通的。

(加拿大麦吉尔大学 蓝志成 供稿)