

精密光谱学重申了理论与实验之间的分歧

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Aaron T. Bondy. *Physics*, June 2, 2025)

在寻找超出粒子物理标准模型的新物理过程中，有证据表明理论与实验之间关于氦-4 (^4He)亚稳三重态的电离能存在 9σ 的分歧。瑞士联邦理工学院的 Gloria Clausen 和 Frédéric Merkt 发布了他们在一系列高精度实验中得到的最新研究成果，如图 1 所示，表明分歧仍然存在，而且还有可能存在新的物理现象。

为了以足够的精度测定电离能来与理论比较，研究人员测量了一系列里德伯态的激发能。这些态的主量子数 n 约为 20 或更高。原子的电离能是指移除一个电子(即达到 n 等于无穷大的里德伯态)所需的能量，其值可以通过从低里德伯态的激发能外推来确定。在之前的实验中，Clausen、Merkt 及其合作者测定了 ^4He 的亚稳态 $1s2s\ ^3S_1$ (三重态) 和 $1s2s\ ^1S_0$ (单态) 的绝对电离能，其

不确定性分别为 $\pm 60\text{ kHz}$ (5.2 ppt) 和 $\pm 32\text{ kHz}$ (33 ppt，译者注：ppt 表示万亿分之一)。

Clausen 和 Merkt 的最新实验将相同方法应用于氦-3 (^3He) 的亚稳三重态。利用可调谐的紫外激光将该态激发到 n 在 27—55 的里德伯态，通过测量使 ^3He 原子电离所需的最小电压来确定激发能。与 ^4He 不同， ^3He 具有非零的核自旋，这会带来额外的复杂性。然而，研究结果表明 ^3He 核与 ^4He 核的电荷半径差异，与所有先前测量原子结构性质的实验结果一致，但关键的电离能数据是个例外。电荷半径可以从测量的同位素位移中提取出来，前提是可以准确计算并扣除原子结构的贡献。然而，这条路被理论和实验之间的 9σ 差异所禁阻。

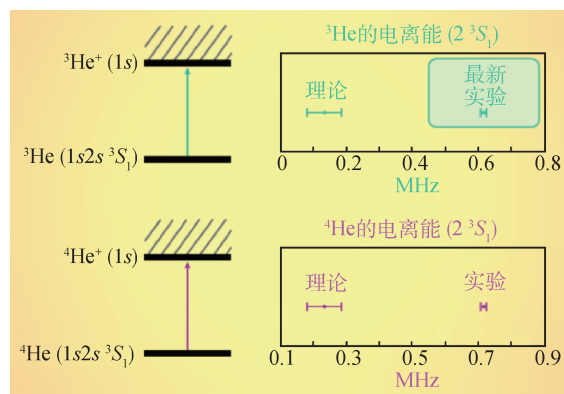
为了与实验值相符，对于 $n=2$ 的亚稳三重态和高里德伯态，都需要相应的准确理论

值。研究人员采用高精度变分方法来构建显式关联双电子波函数，以求解点状核的量子力学三体问题。在非相对论极限下，得到的波函数对于实际应用需求来说基本上是精确的，也容易获得精确到 20 位或更多有效数字的能量值。这些波函数为构建相对论和量子电动力学修正提供了坚实基础，其中的修正表

现为精细结构常数 α 的幂级数，同时包含核尺寸效应。波兰华沙大学的 Krzysztof Pachucki 及其同事评估了所有这些项直至 $\alpha^4\text{Ry}$ 级的贡献，并对更高阶项进行了估算。他们对 ^3He 亚稳三重态电离能的计算结果与 Clausen 和 Merkt 的实验值之间存在 $482 \pm 53\text{ kHz}$ (9σ) 的显著偏差。

针对低激发态开发的高精度计算通常随着 n 的增加而精度下降，研究人员近期通过为内层电子和外层电子引入三种不同的距离标度，成功解决了这一问题。与较低的三重态的情况一样，所得到的波函数为构建相对论和量子电动力学修正提供了一个坚实的基础。但存在一个关键差异：所有相对论和量子电动力学修正量大致按 $1/n^3$ 的比例减小，例如 $n=24$ 的里德伯态与 $n=2$ 态相比，修正被压低大约 6 万倍。因此，对于主量子数 $n=24$ 及更高能级的高里德伯态进行理论与实验对比时，应当不受任何量子电动力学修正误差的影响。事实上，理论与实验在 ^4He 原子 $n=24$ 里德伯态的电离能方面表现出极佳的一致性。对 ^3He 的相应计算在理论和实验之间显示出类似的一致性，因此研究结果重申了 $n=2$ 三重态的 9σ 差异。

这种分歧仅存在于光谱的三重态。假设所有参数都已通过精准计算而确定，且实验误差得到正确评估，那么一个可能的推论是：存在某种仅影响光谱三重态的附加自旋相关的相互作用。这种相互作用是基于光谱学寻找新物理的热门课题。



最新测定的 ^3He 原子在 $1s2s\ ^3S_1$ 三重态的电离能，与理论计算值的偏差程度，同先前测定的相同状态下 ^4He 原子电离能的偏差相当。其中，右侧图中的横轴表示以频率单位(MHz)计量的能量值，该数值对应于与电离能最接近的整数位

DOI: 10.7693/wl20250708 CSTR: 32040.14.wl20250708