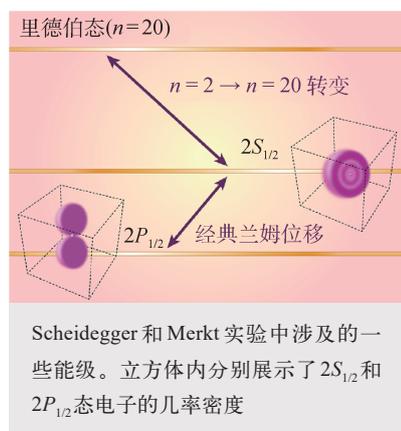


精确测量氢原子能级以确定质子大小

(北京大学 徐仁新 编译自 Ulrich D. Jentschura. *Physics*, March 11, 2024)

之前物理学家以为很好地确定了质子大小，因为氢原子光谱和电子散射等实验得出了一致的结论：质子半径约为 0.88 fm。然而，2010 年光谱测量得出的质子半径约为 0.84 fm，这动摇了人们的信心。此后几年，这个“质子半径之谜”就令人挠头：有些实验支持原来的结论，但也有一些实验发现了更大的差异。最近瑞士联邦理工学院 Scheidegger 和 Merkt 重新精确测量了氢原子的一个亚稳低能级与几个高激发态之间的跃迁(图 1)，让人们 对氢原子属性(如电离能)的理解更加深入。这也有助于澄清一些基本问题。

2010 年，被《自然》杂志编辑戏称的“质子收缩”研究涉及 $2S-2P_{1/2}$ 之间的兰姆位移。理论上氢原子 $2S$ 和 $2P_{1/2}$ 两个能级应该简并，而兰姆位移是一种量子电动力学(QED)效应，电子与虚光子的相互作用导致该简并解除。然而，即使考虑所有的 QED 效应，实测能级跟理论预言还是存在微小的差异。这



归因于质子的有限体积，反过来亦可用于直接确定质子半径。

自那以后，人们尝试直接测量(依据上述有限体积效应)或间接测量(测量里德伯常数 R_H)来确定质子半径。后者的原理是：常数 R_H 将原子能级与基本物理常数联系起来，是计算质子半径时的关键输入量。需要花大力气测量氢原子若干能级之间的跃迁才能确定 R_H 。

Scheidegger 和 Merkt 也从氢原子亚稳态 $2S$ 出发，其 0.122 s 的较长寿命为激发至大主量子数 n 的能级提供了便利。该研究组比此前走得更远，将氢原子从 $2S$ 态激发至 $n=20-24$ 的“里德伯态”。这些里德伯原子角动量未定，但在外加电场作用下具有确定的斯塔克态抛物量子数。在考虑了里德伯态量子数后，Scheidegger 等人的测量结果可统一地理论拟合。事实上，他们能用实测的能级分裂来校准电场，这很不容易，需要对斯塔克算子复杂的超精细矩阵元进行对角化。

为理解实验原理，需要注意 S 态电子在原子核处的几率密度较大，具有球对称性的 S 态对质子半径比较敏感。其实，正是 $2S$ 态对质子半径的敏感性和 $2P$ 态的不敏感性使得仅靠 $2S-2P_{1/2}$ 的兰姆位移即可确定质子半径。

需要注意的是，Scheidegger 等人的目标是通过测量能级跃迁来精确测定常数 R_H 。如果 S 态能级(如中间态 $2S$)跟核半径有关，又如何得

到一个与质子半径无关的 R_H 呢？

事实上，他们通过额外引入 2019 年加拿大小组的兰姆位移测量结果来解决这一问题。考虑加上 $2S$ 至高激发里德伯态的能量，Scheidegger 等人有效测量了 $2P_{1/2}$ 态到高激发态的跃迁。这样，上下能级很大程度上就跟质子半径无关。

Scheidegger 等人测得的常数 R_H 也存在被质疑的风险。关于经典兰姆位移 $2S-2P_{1/2}$ 的实验，有两个组测量得到的质子半径都偏大。尽管它们都是在 20 世纪 80 年代和 90 年代进行的，但其精度并不比加拿大组 2019 年的实验差多少。Scheidegger 等人结果的可靠性取决于谁的兰姆位移测量更准确。这里要注意：经典兰姆位移测量需要克服 $2P$ 态极短寿命这一障碍。该能级寿命几乎是中性原子激发态中最短的，导致很难精确测量它的跃迁。可见，要得到真实可信的 R_H 值，还要做很多工作。

不过，这一风险并不影响 Scheidegger 等人对氢原子电离能的测量。电离能测量比较可信，因为只需额外输入的数据是氢原子 $1S-2S$ 及 $1S$ 超精细跃迁的能量。这些能级寿命较长，故测量相应跃迁的精度也较高。事实上，在已知束缚态的电离能数据中，Scheidegger 等人测得的氢原子电离能最精确。

作为最简单的原子，氢原子依然在帮助我们理解自然，包括由基本强相互作用决定的质子半径。