

延续百年的质子半径之谜，终于被破解了！

延续百年的质子半径之谜，终于被破解了！

中科院物理所11月17日

以下文章来源于环球科学，作者环球科学



环球科学

《环球科学》杂志官方帐号 www.huanqiukexue.com

在现代物理学中，物理学家往往把电子看作半径为 0 的点粒子，而把质子看成由三个夸克以及一些胶子组成的圆球。这个圆球的半径不等于 0，但质子半径到底是多少？这个问题不仅没有明确的答案，还引发了一个争议：通过两种方法测得的质子半径，存在不可调和的分歧。

现在，在一项发表于《自然》的最新研究中，这个谜题似乎有了眉目：研究团队通过质子-电子散射测得的最新质子半径为 0.831 飞米（1 飞米= 10^{-15} 米），比先前的测量值小了约 5%。这时，两种实验手段得到的质子半径，终于达成了一致。

撰文 | 张华

编辑 | 吴非

康普顿波长

1918 年，时任英国剑桥大学卡文迪许实验室主任的物理学家卢瑟福首次发现了质子。他领导的研究小组用 α 粒子轰击氮原子核时，闪光探测器记录下氢原子核，也就是质子的迹象。不过，当时的实验手段检测不出质子的半径。

量子力学的出现，使得科学家有了描述质子的新途径。从量子力学的角度来说，质子也是一种微观粒子，也就是具有波粒二象性。从理论上说，微观粒子的大小可以通过**康普顿波长**来描述：

在这里， h 是普朗克常数，而 m 是质子的质量， c 是光速。将质子的质量代入上述公式，可以算出质子的康普顿波长为 1.32 飞米。这个数据具有一定的参考价值，可以将其理解为**质子可能的最小直径**。在这个估算中，质子内部的组分是以光速运动的，但其实际运动速度低于光速，所以估算值比实际值要小一些。

因此，**用康普顿波长来估算质子的大小，并不是非常严格**。对于质子来说，它本身是夸克与胶子强相互作用构成的束缚态。要算出质子的精确半径，必须找到这个强相互作用的解析解或者数值解。但由于这种相互作用很复杂，“在所需的精度要求内，目前人们尚未从第一性原理出发，直接准确地计算出质子的半径。”北京师范大学物理学系青年研究员刘晓辉表示。

质子半径之谜

虽然质子半径的计算存在困难，但人们已经通过实验测定接近了质子的真实半径。目前，质子半径的测量方法主要有两种。

一种是利用兰姆位移的**光谱学实验方法**。所谓兰姆位移，是指真空电磁场影响下氢原子光谱的精细结构。由于质子不是点粒子，而是有一定大小的，当电子穿越质子时，兰姆位移（也就是原子的能谱）会受到质子大小的影响。通过这个影响，再结合精确的量子场论微扰计算，就可以从兰姆位移中获取质子的半径数据。

另一种方法，是通过其他**带电粒子与质子的散射**来定义质子的半径。这样的测量方式，与一个名为“形状因子”的关键物理概念有关。简单地说，形状因子是电荷在动量空间的分布。在散射过程中，当传递电子与质子相互作用的虚光子质量趋近于 0 时，形状因子这条曲线的斜率正比于质子的半径。所以，**只要通过实验测出形状因子，就可以得到质子的半径了。**

通过这两种实验手段，科学界一度得到了一致的结论。在 10 年前，两种方式测得的质子半径都在 0.8768 飞米左右。但是，**到了 2010 年，分歧出现了。**

在一项光谱学的质子半径测量实验中，研究人员用 μ 子替代了电子。 μ 子性质与电子相近，但质量是电子的 200 倍。它们在质子中停留的时

间更久，因而能级受质子大小的影响更显著。因此，相比于电子，通过 μ 子算得的质子半径应当更加精准。这时，实验给出的质子半径是 0.84184 飞米——**质子半径变小了**。

此后，更多的光谱学实验进一步印证了偏小的质子半径。在今年早些时候发表于《科学》的一项研究中，加拿大约克大学的研究团队就指出，不仅是 μ 子——在改进了实验设备后，用普通电子的兰姆位移测得的质子半径，也只有 **0.833 飞米**。而通过散射实验得到的质子半径，却始终停留在 0.8768 飞米左右。

这 5% 的差距，究竟是如何产生的？对于“质子半径之谜”，物理学家始终没有找到合理的解释。

而现在，在一项发表于《自然》的最新研究中，这两种测量方法的结论似乎终于达成了一致。

实验过程

这项研究是由来自美国、乌克兰、俄罗斯和亚美尼亚的合作小组完成的。他们使用美国弗吉尼亚州托马斯·杰斐逊国家实验室中的加速器装置，重新进行了质子-电子散射实验。

实验装置图。最右侧的混合式量热计 (HYCAL)，是提升实验精度的关键之一。

这是一次精度更高的电子与质子弹性散射实验。刘晓辉介绍道，在实验过程中，科学家需要精确控制散射时产生的虚光子的“质量”——只有在虚光子的“质量”非常接近于零时，碰撞才是弹性的，这时形状因子才可以与质子的半径对应起来。

那么，怎样才可以在实验中实现这一点呢？

在实验中，研究小组用一束高能电子撞击低温冷却的氢气，然后用一系列探测器测量电子在散射后的出射角度以及它们的能量，未散射电子则通过一个小孔自行飞走。在这个过程中，**测量散射电子的出射角度非常关键**：如果出射角度接近 0，那么其对应的虚光子质量趋于 0，这时就能准确测得质子半径。

研究小组使用**量热计**而不是传统上使用的磁谱仪来检测散射电子的角度，**这大大减少了实验不确定性，提高了实验精度**。另外，研究小组改进了氢气气流的进气方式，这也有助于更加准确地测量电子被质子弹性散射后的角度。

在这项最新研究中，**研究小组测得的质子半径是 0.831 飞米**，这个结果无限接近此前通过光谱学兰姆位移得到的 0.833 飞米。因此，通过这两种途径测得的质子半径终于可以相互验证了。

原始论文：

A small proton charge radius from an electron – proton scattering experiment , Nature Vol 575 7 November 2019

参考资料：

Bezginov et al., Science 365, 1007–1012 (2019)

<https://www.scientificamerican.com/article/how-big-is-the-proton-particle-size-puzzle-leaps-closer-to-resolution/>