

四个中子跳探戈?

(北京大学 徐仁新 编译自 Nigel Orr. *Physics*, February 3, 2016)

日本理化所放射性离子束实验发现了“四中子”共振态的存在证据。

原子核稳定存在的基本要素是核力。质子和中子间的吸引维持氦核就是一例；氦核基态的结合能是2.2 MeV。但是不存在双质子(${}^2\text{He}$)或双中子(${}^2\text{n}$)的束缚态。有趣的是，近年来的理论研究揭示了三体或多体力在束缚轻核方面的重要性。因此，值得探索4个中子构成的系统(即“四中子”，tetra-neutron)是否存在。日本理化所(RIKEN)进行的放射性离子束实验(RIBF)发现了四中子共振态的证据。这一发现势将改变我们对核力的理解，并为少体系系统物理提供新的视角，还将影响到我们关于中子星的认识。

半个多世纪之前，核物理学家就开始搜索四中子(${}^4\text{n}$)。随后他们使用各种技术间接探测 ${}^4\text{n}$ ，包括裂变、双荷交换以及多核子转移复合反应等。近年来，高能放射性核束的进展开辟了搜索 ${}^4\text{n}$ 的新途径。经过一段时间的停滞，法国主导的协作组于2002年报道发现了几例 ${}^{14}\text{Be}$ (最丰中子的铍同位素)分裂事件，暗示可能存在 ${}^4\text{n}$ 束缚态或共振态。虽然后续搜寻并未成功，但理论家开始采用新工具来研究 ${}^4\text{n}$ ；包括最近发展起来的“从头”办法，认为原子核由组分核子而构成。这些努力并未找到可靠的方式产生 ${}^4\text{n}$ 束缚态。原本较少关注 ${}^4\text{n}$ 的共振态：这是个非束缚态，但寿命足够长(10^{-21}s 量级)以至于可较好地定义其自旋、宇称和能量等。但是最详尽的计算表明，四个中子在阈能附近的窄共振态也不太可能存在。

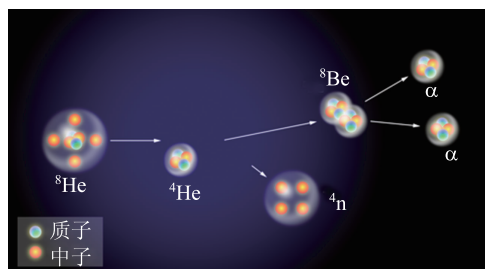
最新研究表明， ${}^4\text{n}$ 其实可作为共振

态存在，能量只有约1 MeV。研究人员很可能鉴别出4个这样的事件。由 Keiichi Kisamori 和 Susumu Shimoura 领导的合作实验真是一个杰作。他们也采用靶核 ${}^4\text{He}$ 实现双荷交换反应，改进之处是使用高能放射性核束 ${}^8\text{He}$ (最丰中子氦同位素，半衰期119.1 ms)轰

击。具体实验反应如图所示，为 ${}^4\text{He}({}^8\text{He}, {}^8\text{Be}){}^4\text{n}$ 。将 ${}^8\text{He}$ 束导引至液态 ${}^4\text{He}$ 靶，并采用RIKEN高分辨率谱仪SHARAQ来识别 ${}^8\text{Be}$ 。

实验人员并未直接探测四中子，实际上不可能测到 ${}^4\text{He}({}^8\text{He}, {}^8\text{Be}){}^4\text{n}$ 反应产生的低能中子。相反，他们采用的是“丢失质量”方法：通过测量 ${}^8\text{Be}$ 衰变产物(两个 α 粒子)和 ${}^8\text{He}$ 的动量来推断 ${}^4\text{n}$ 动量和能量。注意 ${}^4\text{He}({}^8\text{He}, {}^8\text{Be}){}^4\text{n}$ 反应的两个特点。首先，也是这项研究中最重要， ${}^8\text{He}$ 几乎没有向四中子转移反冲动量，从而避免破坏 ${}^4\text{n}$ 态。其次， ${}^8\text{Be}$ 产生的两个 α 粒子具有几乎相同的能量和方向。这样的两个 α 粒子特征明显，便于将 ${}^8\text{Be}$ 从实验背景中区分出来。

RIKEN的这一实验要克服一些困难。束流是一大问题：即便最强时达到每秒两百万个高能 ${}^8\text{He}$ 核，仍比稳定核束低一万倍。再者， ${}^4\text{He}({}^8\text{He}, {}^8\text{Be}){}^4\text{n}$ 的反应截面极低(只有4纳靶)，比典型的放射性束实验低5个数量级。因此，尽管数据积累近一周(算是较长的运行时间了)，也只能在感兴趣的能区发现4例事件。乍一看来置信度似乎不高：4



Kisamori 等人搜索“四中子”的核反应示意图

个事件的统计不确定性就有两个。然而，研究人员进行了仔细的统计加权，类似方法也曾应用于发现希格斯玻色子。他们的分析表明，4个事件的统计置信度接近 5σ ，达到宣称发现的一般标准。不过，由于引入一定的假设，研究人员小心地将它们称为 ${}^4\text{n}$ 共振态“候选体”。

当然，该结果再度引起人们对四中子的兴趣。理论工作已经开展，试图回答：能否理解四中子的存在？如何解释？多体力的重要性显然会受到关注。但是初步计算表明，需要一个非物理的三核子强力才能形成阈能几 MeV 的 ${}^4\text{n}$ 共振态。实验方面，仅仅获得更多的数据是不够的。受已有结果的启发，RIBF刚刚批准了 Shimoura 及其同事提议的一项研究以改进实验。目的是使得测量的统计质量提高一个数量级，也让 ${}^4\text{n}$ 共振态的能量不确定性降低近十倍。当然，不少核物理学家仍怀疑 ${}^4\text{n}$ 的存在，即使作为共振态。然而，真正的意义在于挑战这些实验能力的极限，包括追求对核力一些基本特征的理解。

更多内容详见：K. Kisamori et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116: 052501.