

探测铅核的中子皮

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Kate Scholberg. *Physics*, April 27, 2021)

在示意图中, 用一个球中随机放置的彩球描绘核中的质子和中子。实际上, 重核中的中子多于质子, 中子被向外排斥。在重核的最外层, 中子形成一层薄的“皮”。最近, 在美国弗吉尼亚的托马斯·杰弗逊国家加速器装置上的铅半径实验(PREX)合作组确定了铅-208中子皮的厚度, 铅-208是中子比质子多44个的稳定同位素。这项工作研究的问题与自然界全部4种基本相互作用以及中子星结构有关, 并将对多信使天文学及粒子物理产生深远影响。

通过几十年来用电磁探针进行的散射实验, 原子核内质子的分布已了解得很清楚。对于中子要得到类似结果则要困难得多, 因为带电探针看不到中性粒子。中子可通过强力发生相互作用, 原则上, 使用带电的强子探针可以揭示核内中子的分布, 但是由量子色动力学所描述的强相互作用理论有很大的不确定性, 因此用这种方法进行的精确测量实际上很难达到目的。

另一种手段是利用弱散射, 这种技术更有效。这有两方面的原因: 对弱散射要比对强相互作用引起的散射了解得更好, 核的弱荷主

要由中子含量决定。但是弱相互作用比电磁相互作用弱得多, 对电子—核散射的微弱影响必须仔细提取。

这些微弱的效应来自弱相互作用的宇称不守恒: 相互作用强度与空间取向有关。当电子从核内中子上散射时, 两者交换携带弱力的Z玻色子, 对于极化电子, 散射过程是非对称的, 左手电子(其自旋与动量方向相反)从核上散射的概率比右手电子略少。非对称的大小与中子在核内的分布有关。这种效应很弱, 在PREX实验中, 只有约两百万分之一。PREX合作组使用杰弗逊实验室的高分辨谱仪测量铅-208时, 成功地测到了这一微弱的宇称破缺非对称性。他们用953 MeV自旋极化的电子在铝箔上散射, 电子的极化方向每秒钟反转数百次, 测量到右手电子散射截面过剩为每十亿分之 550 ± 18 。根据这些数据推断中子在核内分布的半径为 5.800 ± 0.075 fm。结合以前实验确定的质子分布半径值, 给出中子皮的厚度为 0.283 ± 0.071 fm, 比合作组早期估计的精度改进了两倍。

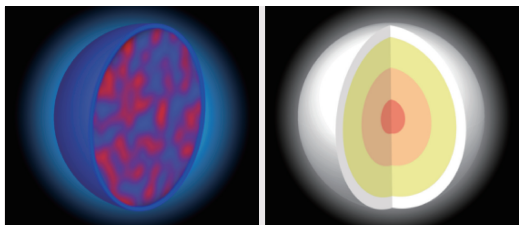
尽管这些尺度很微小, 却具有天文学上的意义: 测量核的中子皮(0.2-fm量级)能够获得中子星结构(km量级)的知识。两者间的联系是通过对称能实现的。对称能是由于泡利原理而产生的, 与所谓的对称压现象有关。如果当核密度增加时对称能迅速增加, 则对称压更高。更高的对称压意

味着中子被进一步向外排斥, 生成更厚的中子皮。类似地, 对一定质量的中子星, 对称压越高, 半径越大。

引力波信号可以揭示在双中子星并合中物质如何变形, 但是详情依赖于对于给定质量的中子星的大小。因此, 从PREX得到的结果有助于我们了解这些灾难性的事件。但新的研究表明, 理论预期的对称压比由PREX推断的值系统的略低。这项研究还发现, PREX与引力波确定的中子星变形度比较接近。

中子皮厚度的精确测量还可导致粒子物理方面新的发现。中微子极少与原子核发生作用, 但是当作用发生时, 可通过交换一个Z玻色子从整个核上相干地散射, 使核受到微小的反冲。核的反冲能与中子在核中的分布有关, 反冲能分布的任何反常可用于检验新的物理。下一代超出标准模型的中微子相互作用的高统计检验, 需要精确了解核内中子的空间分布以减少检验结果的模糊性。

几项基于核散射的中子皮测量正在进行或计划中, 它们将补充PREX的最近结果。最近在杰弗逊实验室用钙-48进行了极化电子的散射测量(CREX), 正在对数据进行分析。用铅-208进行的改进测量计划在德国美因茨的加速器上进行。用稀有核基于强力的测量计划在密歇根州立大学的稀有同位素束装置上进行。未来利用不同的手段, 使用引力波、X射线和中微子进行的观测, 将在核结构与巨大尺度事件的联系方面给出多种激动人心的信息。



铅-208原子核的示意图, 包含混合的质子—中子核心和中子“皮”(左)。测量中子皮的厚度可提供关于中子星结构(右)的线索