理论物理学家提出新型“仲粒子”

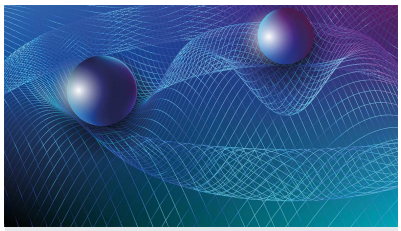
(南方科技大学　鲁大为　编译自 Andrey Feldman. *Physics World*, 2025, (3): 11)

这种被称为“仲粒子”(paraparticle)的新粒子具有迥异于玻色子与费米子的统计特性，理论预测它有可能在超冷原子体系中观测到[1)]。

美国莱斯大学的Kaden Hazzard与其前研究生、现就职于德国马克·普朗克量子光学研究所的Zhiyuan Wang合作提出了一类名为“仲粒子”的新型粒子。他们的计算表明，仲粒子表现出的量子特性与人们熟知的玻色子(如光子)和费米子(如电子)存在本质不同。该理论工作近期发表于*Nature* (2025, 637: 314)。

在量子力学中，粒子及准粒子(quasiparticle，凝聚态体系中呈现出的粒子集体激发)的行为本质上是概率性的，并由波函数描述。波函数决定了在特定状态下找到粒子的可能性，这些状态由诸如位置、速度、自旋等性质定义。粒子的交换统计决定了当两个全同粒子交换彼此位置后其波函数的变化规律。

玻色子交换位置后，其波函数保持不变，故而允许多个玻色子占据相同的量子态。此特性是激光与超流现象的量子基础。反之，费米子交换位置会引发波函数的符号翻转，即从正变成负或从负变成正。这种反对称性不允许费米子占据同一量子态，并由此衍生出泡利不相容原理。该原理不仅构筑了原子的电子壳层结构，更诠释了元素周期律的本质。



Zhiyuan Wang和Kaden Hazzard认为，仲粒子可能在超冷原子系统中涌现

传统理论认为，三维空间中仅允许两种粒子统计，即基于玻色子的玻色—爱因斯坦统计和基于费米子的费米—狄拉克统计[2)]。该结论完全符合局域性[3)]和因果律[4)]等基本原理的要求。Hazzard和Wang突破这一认知框架，证明满足局域性与因果律的新型仲统计在三维系统中同样具有理论可行性。“仲粒子的交换统计既不同于费米子的反对称性，也区别于玻色子的对称性，却完全兼容局域性和因果律等基础物理原理”，Hazzard强调。

仲粒子的特殊性源于其内禀的隐藏参数。除位置、自旋等常规属性外，仲粒子还需要引入额外自由度来完备描述其更加复杂的波函数和非平庸变换特性。这种结构使得仲粒子能够呈现出超越玻色子与费米子的交换统计特性，其统计行为近似介于两者之间。例如，费米子无法占据同一量子态，但最多两个仲粒子却被允许共存于同一空间点位。这展现出一种介于费米子排他性与玻色子聚集性之间的某种“平衡”。

虽然自然界尚未发现具有仲统计特性的基本粒子，研究人员推测仲粒子可能会以准粒子形式涌现于人工量子系统。此机制类似于半导体中受激电子脱离价带后形成的空穴。价带中留下的空穴表现得像一个带正电的粒子，其迁移行为主导了半导体的导电特性。

超冷原子实验平台可能是另一种寻找仲粒子的途径。他们正与实验组合作来探索这种可能性。“我们正试图(在超冷原子体系中)寻找仲粒子，”Wang透露。在超冷原子实验中，激光和磁场被用来捕获和操控接近绝对零度的原子。在这些条件下，原子能够模拟更为奇异的粒子行为。研究团队希望此类实验装置能够诱导出高维系统(如三维空间)中的仲粒子行为。不过，现阶段的实验设计仍需理论模型的进一步指导。

若得以验证，仲粒子或将对物理学及相关技术产生深远影响。费米子和玻色子的统计性质大大加深了人类对中子星稳定性和超导现象等一系列问题的理解。类似地，仲粒子也可能解锁人类对于量子世界的新认知。正如Hazzard所述：“费米统计解释了材料的金属和绝缘体分类，以及元素周期表的结构。(基于玻色子的)玻色—爱因斯坦凝聚揭示了超流现象的本质。仲统计可能孕育尚未知晓的物态，这令人充满期待。”

1) 依据中国物理学会物理学名词审定委员会于2019年修订的《物理学名词(第3版)》，parastatistics规范译名为“仲统计法”，故将符合该统计规律的“paraparticle”译为“仲粒子”。“仲”字取“伯仲叔季”之序，暗喻其统计性质介于玻色子与费米子之间。——译者注

2) 二维空间中还存在任意子分数统计。——译者注

3) 发生于空间中某一点的事件不能瞬时影响远距离之外的其他点。——译者注

4) 在任何参考系中都不能观察到结果先于原因出现。——译者注

DOI：10.7693/wl20250409　CSTR：32040.14.wl20250409