

相对论核多体问题中的 pp 和 ph 相互作用能否统一

Can One Unify the pp and ph Interaction in the Relativistic
Nuclear Many-Body Problem

过去几十年中,平均场理论因其对许多核物理现象的成功描述引起了人们广泛的关注,其中包括基于 Skyrme 或 Gogny 有效相互作用的非相对论平均场理论以及基于有效介子交换的相对论平均场理论等^[1~4]。

在相对论平均场理论的框架下,核子间的相互作用由介子和光子场交换提供,核子运动的平均场源自标量介子提供的标量势和矢量介子和光子提供的矢量势。利用有限的几个自由参数,如介子质量、介子—核子耦合常数等,相对论平均场理论在定量描述核物质、 β 稳定线附近的原子核以及远离 β 稳定线的丰中子或丰质子奇特核等核多体系统方面已经取得了很大的成功。同时,相对论平均场理论还自然地给出了自旋—轨道耦合势,并基于相对论对称性解释了赝自旋对称性的起源以及提出了反核子谱中可能存在的自旋对称性等。

为了解释偶偶核与奇 A 核之间系统的结合能差以及形变偶偶核的转动惯量系统地小于其邻近的奇 A 核转动惯量等实验结果,自 20 世纪 50 年代以来,原子核中的超流现象,或者说对关联效应,一直是核结构以及核物质研究中的重要课题^[5]。1991 年, Kucharek 和 Ring 首次在相对论框架下研究了无限核物质中的超流动性^[6]。通过量子化介子场,他们导出了相对论的 Hartree-Bogoliubov 方程。但是,如果在粒子—粒子道(pp道)采用单玻色子交换势,则所得到的对称核物质中的对能隙比使用 Gogny 有效相互作用或者更为实际的 Bonn 势得到的结果要大 3 倍左右。因此,在包括对关联的相对论理论计算中,一般都采用非相对论框架下 pp 道的有效相互作用,如有限程的 Gogny 力或者 Skyrme 类型的零程对力等。特别是对于后者,由于其零程性质,可以将耦合的微分积分方程组简化为耦合的微分方程组,使得计算量大为减少。在恰当地考虑对关联和连续谱效应后,相对论的 Hartree-Bogoliubov 方程在对远离 β 稳定线的奇特核性质的描述方面取得了很大的成功^[4]。

在相对论平均场计算中,核子在 Hartree 道由介子和光子场交换传递相互作用,然而相同的相互作用是否能用在 pp 道中是一个值得探讨的问题。事实上,在 pp 道中采用单玻色子交换势给出很大的对能隙的原因,可能来自高动量时的对相互作用矩阵元。相对论平均场模型的有效相互作用仅仅通过 Hartree 道的计算调试得到,

也就是只考虑动量小于费米动量的核态。这样的有效相互作用外推到高动量时不一定适合。因此，相对论平均场计算中为了得到合理的对能隙值需要在动量空间采取人为的动量截断，或者考虑更多的其他效应，如介质极化，介质内介子质量减小，引入介子非线性项等，来减小核物质中的对能隙。

另外，目前大多数的相对论平均场计算只有 Hartree 道，没有 Fock 道。仅仅通过 Hartree 道的计算调试得到有效相互作用为了给出核物质和有限核的性质，可能高估了 pp 道中的单玻色子交换势。在非相对论情况下，通常需要求解的都是 Hartree-Fock-Bogoliubov 方程，即同时包括了粒子-空穴道(ph 道)和 pp 道。与之对应，在相对论情况下，为了在 pp 和 ph 道使用相同的有效相互作用，除了 Hartree 道外，还有必要考虑 Fock 道^[7]。这样，在求解相对论的 Hartree-Fock-Bogoliubov 方程时，有望通过 Hartree 道、Fock 道以及 Bogoliubov 道计算进行调试，从而得到 pp 道和 ph 道的统一、自洽的相互作用。这是一个很有意思的问题，有望在未来几年之内找到答案。

参 考 文 献

- [1] Walecka J D. Ann Phys, 1994, 83: 491.
- [2] Serot B D, Walecka J D. Adv. Nucl Phys, 1986, 16: 1.
- [3] Bender M, Heenen PH, Reinhard P G. Rev Mod Phys, 2003, 75: 121.
- [4] Bohr A, Mottelson B R, Pines D. Phys Rev, 1958, 110: 936.
- [5] Kucharek H, Ring P. Z Phys A, 1991, 339: 23.
- [6] Long W H, Van Giai N, Meng J. Phys Lett B, 2006, 640: 150.

撰稿人：孟杰 孙保元

北京大学物理学院