

对称能：从两味到三味？

徐仁新 (Renxin Xu)

北京大学物理学院天文学系

中国 北京 100871

Email: r.x.xu@pku.edu.cn

1 引言：核物理中的对称能

经验告诉我们，稳定原子核中的质子数 Z 和中子数 N 倾向于相等，尽管人们至今并未深刻地理解其中的道理。一般通过引进对称能这一概念来刻画这一观测事实，这样核子数 $A (= Z + N)$ 原子核的质量表示为

$$E(Z, N) = a_v A + a_s A^{2/3} + a_{\text{sym}} \frac{(N - Z)^2}{A} + a_c \frac{Z(Z - 1)}{A^{1/3}} + a_p \Delta(Z, N),$$

其中第一项是体积能，第二项是表面能，第三项是对称能，第四项是Coulomb能，第五项是对能。单从第三项对称能表达式可见，质子数 Z 相对于中子数 N 的偏离程度越高，则原子核越不稳定（表现为质量 E 越大）。

怎么理解存在对称能这一事实呢？传统上，人们可以通过核子Fermi气图像得到类似的关系；但值得注意的是：Fermi气模型只有在相互作用比较弱时才是合理的。而问题是，原子核内核子之间的核力却比较强。另外一种理解对称能的思路或是通过考察夸克的味对称性。正如NaCl晶体中Na、Cl两类离子数目数目相同时相互作用导致的能量最低，也许原子核内的相互作用也会导致 Z 、 N 数目相等时较稳定。我们知道，核子由夸克构成，“ $Z = N$ ”等效于u、d夸克数目的相等。

容易理解对称能项将反映在物态的软硬程度上。 Z 相对于 N 越偏离，核物质内能越高，能够抵抗星体引力收缩的能力越强；这就表现为物态越硬。如果认为脉冲星是“纯中子”组成的（ $N \gg Z$ ），则因对称能贡献物态显著趋“硬”。目前，随着大质量（ $\sim 2M_\odot$ ）脉冲星的发现，对称能研究也理所当然地受到学界的关注。

2 压缩重子物质对称能：轻味夸克对称？

在粒子物理标准模型中，基本Fermi子包括夸克和轻子，分三代六味；其中六味夸克依质量一分为二：质量较轻的轻味夸克{u,d,s}和质量较重的重味夸克{c,t,b}。在核物质密度情形下，无论是据Heisenberg关系估计的零点能还是简单夸克Fermi气图像所给出的Fermi能都是 $\sim 400\text{MeV}$ ，显著大于轻夸克之间的质量差($m_u \sim m_d \sim 10\text{MeV}$ ，而 $m_s \sim 100\text{MeV}$)。这就产生一个发人深省的问题：既然包括奇异夸克在内

的所有轻味夸克都容易激发产生，那么原子核为何非奇异？换言之，为何原子核系统具有的是{u,d}两味对称性（即同位旋对称性）而不是{u,d,s}三味对称性呢？

消除以上迷惑需要认清色作用远强于电磁作用这一根本事实。由夸克构成的、质量最轻的色单态是核子，质量不足940MeV；而uds三味组成的 Λ 超子质量却 $> 1110\text{MeV}$ 。这其中的质量差约100MeV。似乎两味对称（由核子组成）的原子核要比三味（ Λ 组成）要经济些，但为了保持电中性，伴随着核子的“小尾巴”——电子却是甩不掉的。不过，作为质量最轻的荷电轻子，电子（ $m_e = 0.511\text{MeV}$ ）在利用较弱的电磁作用与原子核这个强作用客体耦合在一起时，其分布范围远远超过核：局域电子相对论性运动的特征尺度Compton波长 $\sim 0.024\text{\AA} \gg$ 局域夸克（原子核）尺度 $\sim \text{fm}$ 。所以，由核子构成的原子核确实比较“经济”。这个花香鸟语的精彩世界之本质即如此。让我们庆幸色、电相互作用强度之间如此巨大的差别吧！

但是，对于超新星爆发残留的压缩重子物质——致密星而言，电子则处于其内。如果这类物质还是两味对称的，电子动能 $E_e \sim \hbar cn^{1/3}$ 也将达到 $\sim 10^2\text{MeV}$ （ n 为电子的数密度）。而若大原子核具有三味对称性，则可显著降低电子对系统总能量的贡献，同时也使得味自由度尽可能大。因此，虽然原子核的对称能本质上反映了u、d两味对称，但不排除致密星相应的对称性却是三味（轻味）的。

3 总结

如果原子核与致密星的差别主要就体现在二味、三味上，则致密星内部的基本单元不太可能是三价夸克组成的强子（原因是 Λ 两体作用为吸引），很可能是H（双重子）或类似的夸克集团。这样，夸克集团星也就成为脉冲星结构的候选模型之一。

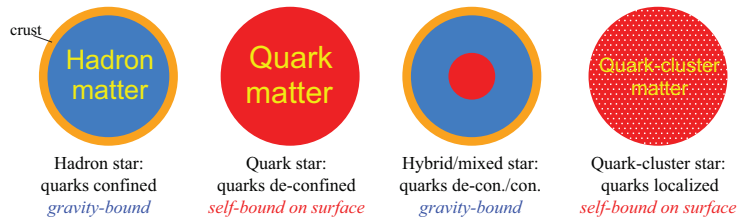


Figure 1: 不同类型的脉冲星结构模型。强子星(hadron star)内部无游离夸克组成的夸克物质，而中心密度足够高时会形成具有夸克物质核心的混合/混杂星(hybrid/mixed star)。几乎完全由夸克物质构成的致密星称为夸克星(quark star)。以夸克集团为主要自由度的夸克集团星(quark-cluster star)有别于通常的中子星和夸克星。强子星和混合/混杂星是引力束缚的，这两类致密星都拥有由原子核和电子气等组成的壳层(crust)；而夸克星和夸克集团星的表面是色作用自束缚的，原则上可以不具有壳层。表面直接裸露的夸克(集团)星称为裸夸克(集团)星。

再次重申：作者致力于发展夸克集团星模型及其观测检验；更多的研究进展请浏览个人主页：<http://www.phy.pku.edu.cn/~xurenxin/index.html>。欢迎加盟！