

多奇异性原子核*

曾月新# 彭光雄 宁平治

(南开大学物理系 天津 300071)

摘 要 原子核只能由无奇异性(奇异量子数 $S=0$)的核子组成吗? 近来的理论预言指出,除了已知的 $S=-1$ 和 $S=-2$ 的超核外,还有可能存在 $S \leq -3$ 的多奇异性原子核,它们或者是由 A 个重子(核子和超子)构成的弱束缚多体系统,或者是由禁闭在一个“口袋”里的 $3A$ 个夸克(u、d、s 夸克)构成的束缚较强的多体系统. 实验研究者们正在计划或已经开始寻找这些系统.

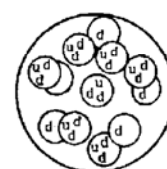
关键词 奇异强子集团 奇异夸克集团

分类号 O571.21

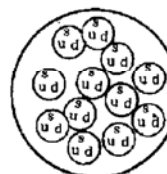
1 引 言

早在 30 年代,人们就认识到原子核是由核子(质子和中子)组成的. 到 60 年代,又认识到质子和中子是由禁闭着的 u 夸克和 d 夸克组成的,其中并不包含 s 夸克(奇异夸克,奇异量子数 $S=-1$). 所以,通常的原子核并不具有奇异性自由度. 奇异性核物理的早期研究主要集中在超核物理. 实验上可以通过 (K^-, π^-) 或 (π^+, K^+) 等核反应使靶核中的一个核子转变成一个超子,例如, Λ 超子或 Σ 超子等,从而形成 Λ 超核或 Σ 超核,它们具有一定的寿命. Λ 超子和 Σ 超子中都包含一个 s 夸克($S=-1$),实验上也发现了少数双 Λ 超核($S=-2$)的事例. 直到目前,对超核物理的实验研究和理论研究仍是个十分活跃的研究领域.

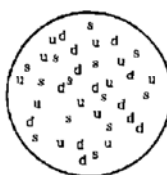
是否有可能存在 $S \leq -3$ 的原子核体系? 如果存在这类多奇异性的原子核,它们的奇异性可以多到什么程度? 它们可能构成怎样的物质形态? 它们的稳定性如何? 它们是否具有类似于通常原子核的那些性质?……. 对于这些新问题,近年已开展了某些研究,认识到有可能存在两类多奇异性原子核,一类是奇异强子集团,亦称多奇异性超核. 在这类



a) 正常的原子核



b) 奇异强子集团



c) 奇异夸克集团

图 1 正常的原子核(a)与多奇异性原子(b,c)的比较

核多体系统内,除多个核子外,还有多个超子,这些超子可以是相同的(如多 Λ 超核,参见图 1b),也可能是不同的. 通常,将理论研

* 国家自然科学基金资助课题

天津师范大学物理系 300074

1996-05-29 收稿.

研究者预言的另一类可能的多奇异性原子核称为奇异夸克集团(Strangelet),其中 u、d、s 夸克并不禁闭在强子内部,而是均匀地禁闭在一个“口袋”内,参见图 1c. 下面对这两类奇异性原子核分别进行讨论.

2 奇异强子集团

目前,对奇异强子集团的研究主要采用相对论平均场方法^[1~4]和推广的半经验质量公式方法^[5]. 首先应该分析众多的超子(Λ 、 Σ 、 Ξ 、 Ω ……)中哪些可能在核多体系中存在. 首选的当然是 Λ 超子,因为它的质量(1115.6MeV)最接近核子的质量,别的性质也有相近之处. 此外,在原子核内如果有其它超子,也很容易与核内核子 N 碰撞而产生 Λ 超子. 例如:

$$\Sigma + N \rightarrow \Lambda + N \quad (Q \approx 78\text{MeV})$$

$$\Xi + N \rightarrow \Lambda + \Lambda \quad (Q \approx 26\text{MeV})$$

$$\Omega + N \rightarrow \Lambda + \Xi \quad (Q \approx 178\text{MeV})$$

上述括号内的数值表示反应过程中释放出的能量.

在多 Λ 超核的相对论平均场计算^[1,2]中,先确定系统的有效拉氏量,它与通常的无奇异性多粒子系统的有效拉氏量的不同之处仅在于多了以下三项:

$$\begin{aligned} & \bar{\psi}_\Lambda (i\gamma^\nu \partial_\nu - m_\Lambda) \psi_\Lambda, \\ & -g_{\sigma\Lambda} \bar{\psi}_\Lambda \psi_\Lambda \varphi, \\ & -g_{\omega\Lambda} V^\mu \bar{\psi}_\Lambda \gamma_\mu \psi_\Lambda. \end{aligned}$$

它们分别对应于 Λ 重子场, Λ 与标量介子(σ)场 φ 的耦合和 Λ 与矢量介子(ω)场 V_μ 的耦合. 由多 Λ 超核的拉氏量导出耦合场方程并进行数值求解,再求出系统的总束缚能 E_B . 计算中出现的两个新耦合常数 $g_{\sigma\Lambda}$ 和 $g_{\omega\Lambda}$ 可由单 Λ 超核的实验数据定出. 图 2 是对 ^{48}Ca 多 Λ 超核的计算结果,它是先把正常核素 ^{48}Ca 中的一个中子置换为 Λ 超子,再把第二个中子置换为 Λ 超子,依次置换下去,图中的横坐标表示置换的 Λ 超子数目. 计算结果表明,当 ^{48}Ca 内有 8 个中子被置换为 Λ 超

子时,单粒子束缚能 E_B/u 最低,甚至低于正常核的 E_B/u 值,即束缚最紧,此时有可能形成稳定或亚稳结构. 对 ^{208}Pb 作类似的计算发现,当 20 个中子被置换为 Λ 超子时,可能出现稳定结构. 由于 Λ 超子在原子核内的众多核子中是非全同粒子,它们可以不服从泡利原理,可以填充到已填满核子的能量较低的能级上,所以多 Λ 超核可能构成稳定或亚稳结构还是容易理解的. 此外,用相对论平均场的方法也计算了核内包括多个 Λ 超子和多个 Σ 超子的情形,结果有明显的壳层效应,幻数为 $A=8$ 和 32,还有奇异数比值($|S|/A$)大,电荷数比值(q/A)小等特点. 最有趣的是,对于由两个质子、两个中子、两个 Λ 超子和两个 Σ^- 超子构成的重子数 $A=8$ 的体系(记为 ^8M),计算出的总束缚能 E_B 的量值竟达 45MeV,比 ^4He 束缚能的量值 28MeV 高得多. 计算出的 ^8M 的密度为 ^4He 密度的 1.5 倍. 出现这种情况是不足为奇的,因为如果有 ^8M 存在的话,其中的 8 个重子都可以停留在 $1s_{1/2}$ 基态;并且整个“核”的总电荷为零.

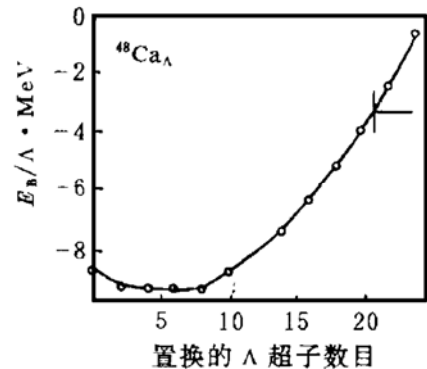
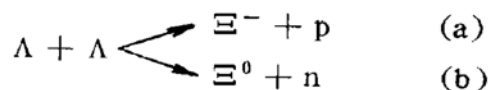


图 2 多 Λ 超核 $^{48}\text{Ca}_\Lambda$ 单粒子束缚能 E_B/u 随 Λ 超子数目的变化

上述理论探索令人鼓舞,然而也有片面性. 对于多 Λ 超核,当核内的 Λ 粒子数多到某个临界值时,就不再增加,这是由于 Λ 粒子能量稍高后就会发生以下反应过程:



所以一个多奇异性超核一般还应包含 Ξ^- 和

Ξ^0 超子作为其组元^[3]. 用推广的半经验质量公式方法^[5]可以简便地对上述情况进行某些初步研究. 熟知的原子核半经验公式中的主要部分可表示为

$$E_B(\{p, n\}) = -a_v^{(0)} + a_s^{(0)}A^{2/3} + a_c^{(0)}\frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_x^{(0)}\frac{(N-Z)^2}{A^2} \quad (1)$$

原子核的总束缚能 $B = E_B$, (1) 式中的四项分别表示体积能、表面能、库仑能和对称能的贡献, 各项的系数近似为(以 MeV 为单位)

$$\begin{aligned} a_v^{(0)} &= 16 & a_s^{(0)} &= 18 \\ a_c^{(0)} &= 0.72 & a_x^{(0)} &= 23 \end{aligned} \quad (2)$$

当把(1)式推广到成分为 $\{n, p, \Lambda, \Xi^0, \Xi^-\}$ 多奇异性强子集团时, 作了以下简化假定: (1) 五种重子的密度大致相等; (2) 奇异强子气体的费米动量近似等于无奇异性的正常核物质的费米动量. 在推广后的公式中^[5], 体积项系数和对称项系数分别作了如下改变

$$a_v^{(0)} \rightarrow a_v \rightarrow -b_v^{(w)} - b_v^{(y)}y \quad (3)$$

$$\begin{aligned} a_x^{(0)}x^2 &\rightarrow a_x x^2 + a_u u^2 + a_w W^2 \\ &+ a_y y^2 + a_w W_y \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$x = \frac{N-Z}{A} \quad (5)$$

$$u = \frac{\Xi^0 - \Xi^-}{A} \quad (6)$$

$$W = \frac{(N+Z) - (\Xi^0 + \Xi^-)}{2A} \quad (7)$$

$$y = \frac{\frac{N+Z + \Xi^0 + \Xi^-}{4} - A}{A} \quad (8)$$

表面项和库仑项仍保持原来的单项形式. 但是所有的系数都需要重新根据迄今积累的超核实验数据以及重子-重子相互作用的理论研究结果(例如 Nijmegen 模型)来重新确定, 这是很繁琐的工作^[5]. 这里只给出根据推广后的质量公式计算结果的一个例子, 如图 3

所示, 这是在 ^{208}Pb 核内注入若干超子的情形, 纵坐标表示单粒子束缚能, 横坐标表示注入超子的数目. 上部的曲线表示只注入 Λ 超子的情形, 这曲线的实线部分对应于 Λ 粒子数 $n_\Lambda < 41$, 虚线部分对应 $n_\Lambda > 41$ (不能发生). 当 $n_\Lambda > 41$, 反应过程(a)开始发生, 当 $n_\Lambda > 77$, 反应过程(b)开始发生. 这样就得到可能更接近实际的图中下部曲线, 对应于组分为 $\{n, p, \Lambda, \Xi^0, \Xi^-\}$ 的束缚更紧的奇异强子集团. 对这种情形利用相对论平均场的计算结果^[3]与图 3 相似. 这说明前面介绍的对于奇异强子集团的两种理论预言恐怕是有些道理的.

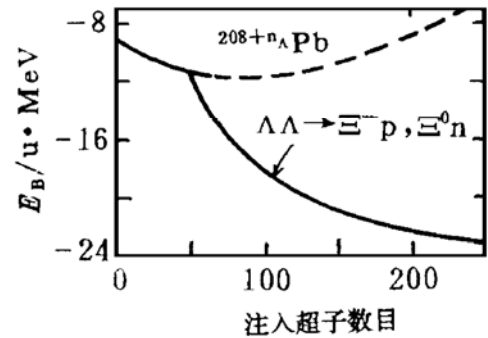


图 3 对 ^{208}Pb 核注入超子时, 单粒子结合能 E_B/u 随超子数目的变化(由推广的质量公式计算结果)

3 奇异夸克集团

如前所述, 可以将普通强子集团中的部分普通强子换成超子而得到多奇异性超核. 与此类似, 也可以将普通夸克集团(仅由 u, d 夸克组成)中的部分 u, d 夸克换成 s 夸克而得到奇异夸克集团. 不同的是, 在奇异强子集团中除可以存在 Λ 超子外, 还可能出现其它超子, 如 Ξ^-, Ξ^0 等; 但在奇异夸克集团中, 除 s 夸克外, 不能存在其它重夸克(c, b, t 夸克, 它们的质量大于奇异夸克集团的费米能). 理论家认为, 由于微观自由度增加, 奇异夸克集团可能是亚稳的, 甚至可能是绝对稳定的.

通常将奇异夸克集团分为两种情况考虑. 在第一种情况下, 系统的重子数(夸克总数的三分之一)极大, 各种有限体积效应(表

面张力,曲率能,库仑能)均可忽略.其中可以包含电子,以保持系统的电中性.第二种情况是夸克数目较少的集团,即一般所称的 Strangelet,此时应考虑有限体积效应.当 Strangelet 的线度可与电子的康谱顿波长比拟时,其内部不能容纳电子.为保持电中性,电子只能在其外围形成电子云.这一点与普通原子的情形十分相似.

虽然现在实验上还没有找到稳定(或亚稳)的奇异夸克集团,但截至目前,几乎所有的理论研究都对其存在性给出肯定的结果.对于奇异夸克集团稳定性及其它性质的研究,一般采用的是费米气体理论加上各种唯象的夸克禁闭模型.

在采用费米气体理论方面,做法是一致的.奇异夸克集团原则上是多费米子系统,其内存在保持化学(或热力学)平衡的弱作用过程,如 $d, s \leftrightarrow u + e + \bar{\nu}_e$ 和 $u + d \leftrightarrow s + u$, 系统的各组分粒子数目是涨落的,所以应当采用巨正则系综.各组分粒子的平均数目依赖于化学势 μ_i (对第一种情况 $i = u, d, s, e$; 对 Strangelet $i = u, d, s$). 对于给定的系统总重子数密度 n , 系统将自动调整化学势的值使总能量达到相应的极小值. 如果求出系统的总能量并进而得到平均重子能量 E/u , 则可以比较它与普通核、超核或者奇异强子集团的稳定性.

但奇异夸克集团不是普通的费米子系统,它的组元(即夸克)具有渐近自由和红外奴役双重性质,所以还必须引入考虑夸克禁闭的模型后才能确定系统总能量表达式.目前,已将多种以前成功地用于强子性质研究的唯象模型移植到奇异夸克集团的稳定性研究.大致可归纳为下列几种.

3.1 MIT 袋模型

在该模型下,奇异夸克集团的能量除含有通常统计热力学公式中的各项外,还附加一项“袋”能 BV , 其中 V 为“袋”体积, B 为 MIT 袋模型的特征参量,物理意义为“袋”内的真空能量密度.这是目前用得较多的模型.

1984年, Witten^[6]提出由大约相等数目的 u 、 d 、 s 夸克组成的奇异夸克集团可能是绝对稳定的,从而可能是在物质的真正基态这一著名猜测后, Farhi 和 Jaffe^[7]立刻应用袋模型进行了研究.研究发现:在普通核物质密度附近,对于很宽的参数范围,奇异夸克集团可能是绝对稳定的.1987年, Berger 和 Jaffe^[8]还得到了与普通原子核的半经验质量公式[参见(1)式]类似的 Strangelet 质量公式

$$E(A, Y, Z) = \epsilon_0 A + 4\pi\sigma\rho_0^2 A^{2/3} + \frac{1}{2} \frac{\delta_Y}{A} (Y - Y_{\min}) + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta_E}{A} + \frac{6}{5} \frac{a}{\rho A^{1/3}} \right) (Z - Z_{\min})^2 \quad (9)$$

式中, A 、 Y 、 Z 分别为系统的重子数、超核数和电荷数,其余参量都是可计算的.

1993年, Gilson 和 Jaffe^[9]进一步利用能级填充方法(能够显示壳效应,但计算特别繁琐)证明:即使对使很大的奇异夸克集团不稳定的参数,也有可能使很小的 Strangelet 亚稳.同年 Madsen^[10]考虑了质量公式的曲率修正,这对于很小的 Strangelet 特别重要.遗憾的是,与曲率能对应的态密度的解析表达式目前还不知道,只有 Madsen 给出的一个经验式子^[11].

3.2 势模型

这是熟知的非相对论模型之一. Satpathy 等人^[12]采用无限深球方势阱(这种情况的态密度解析表达式已十分清楚).为保持压力平衡,作者仿照袋机制,也引入了袋能项.但不同之处在于:(1)夸克质量含义不同,在 MIT 袋模型中的夸克质量是指流夸克质量,对 u 和 d 夸克等于零,对 s 夸克小于 300MeV,而在势模型中则指的是组分夸克质量;(2)在袋内(或势阱内)的运动方程和确定能量本征值的边界条件不同,前者为狄拉克方程和“袋”边界条件,后者为薛定谔方程和 Dirichlet 型边界条件(波函数在边界上为零).该模型得到了“亚稳”的结果.

3.3 质量密度相关模型

根据该模型,夸克质量是夸克数密度 n

的单调减函数,可使其参数化为

$$m_u = m_d = \frac{B}{n}, \quad m_s = m_{s_0} = \frac{B}{n} \quad (10)$$

Chakrabarty 等人^[13]认为:根据格点计算结果,在夸克-强子相变后夸克物质并不立刻达到理想自由气体状态,其内仍然存在某些强子自由度,此时袋模型不适用,应代之质量密度相有关模型.他们给出的系统总能量表达式与正常热力学表达式一致,但其中的夸克质量是与密度有关,即应以(10)式代入.他们得到的稳定点高于普通核物质密度.

Benvenuto 和 Lugones^[14]也用质量密度相关模型进行了研究.他们认为 Chakrabarty 等人的热力学处理有误:由于质量跟密度有关,在对热力学势求密度导数时会多出一项,例如

$$\begin{aligned} P &= -\left. \frac{\partial(\Omega V)}{\partial V} \right|_{T, \mu_i} = -\left. \frac{\partial(\Omega/n)}{\partial(1/n)} \right|_{T, \mu_i} \\ &= -\Omega + n \left. \frac{\partial \Omega}{\partial n} \right|_{T, \mu_i} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, Ω 为热力学势密度.这样,他们得到了与 MIT 袋模型类似的结果.

尽管各种模型出发点不同,但结果都认为,奇异夸克集团可能是绝对稳定(或亚稳)的.特别是,它们都得到了 Strangelet 的一个重要特性,即荷质比远小于普通核物质,这不仅是目前实验上寻找 Strangelet 的一个主要依据,而且具有更为深刻的涵意.普通原子核的对称能极小值出现在 $Z=A/2$ 处.由于强大的库仑斥力,当质量数增加时,越来越不稳定,元素周期表最大只能扩展到 $A=250$ 左右就结束了.而 Strangelet 的对称能最小值出现在 $Z \simeq 0$ 处,基本上与库仑能最小点 $Z=0$ 一致,因此它的稳定性并不随质量数增大而减小.它的质量数理论上可以十分巨大(比如说 10^7).

此外, Parija^[15]的研究指出, Strangelet 的另外一个显著特点,即它的集团运动能量比相同质量数的普通核高 1.5~4 倍.这是可以理解的:一个 Strangelet 所含粒子总数是

3A. 这一点与奇异强子集团是不同的.

4 结束语

以上简要介绍和评述了多奇异性原子核的研究现状.与普通原子核相比,不论是奇异强子集团还是奇异夸克集团的最大特点是电荷数可以很小而质量数可以很大.根据理论家预言的这些特点,欧洲核子研究中心(CERN)和美国布鲁克海文国家实验室(BNL)正在进行系列实验寻找它们.如果发现它们的存在迹象,必将成为相对论重离子碰撞中形成夸克-胶子等离子体(QGP)的最重要的信号,因为它们是高温高密的 QGP 冷却后的可能产物.另外,多奇异性原子核的研究成果也将为天文学和宇宙学提供重要的依据和线索.

参 考 文 献

- 1 Rufa M, Schaffner J, Maruhn J et al. Multi-lambda Hypernuclei and the Equation of State of Hypermatter. *Phys Rev*, 1990, C42(6): 2469~2478
- 2 Schaffner J, Greiner C, Stocker H. Metastable Exotic Multihyper Nuclear Objects. *Phys Rev*, 1992, C46(1): 322~329
- 3 Schaffner J, Dover C B, Gal A et al. Strange Hadronic Matter. *Phys Rev Lett*, 1993, 71(9): 1328~1331
- 4 Schaffner J, Dover C B, Gal A et al. Multiply Strange Nuclear Systems. *Ann of Phys*, 1994, 235(1): 35~75
- 5 Dover C B, Gal A. A Generalized Bethe-weizsacker Mass Formula for Strange Hadronic Matter. *Nucl Phys*, 1993, A560(1): 559~585
- 6 Witten E. Cosmic Separation of Phases. *Phys Rev*, 1984, D30(2): 272~285
- 7 Farhi E, Jaffe R L. Strange Matter. *Phys Rev*, 1984, D 30(11): 2379~2390
- 8 Berger MS, Jaffe RL. Radioactivity in Strange Quark Matter. *Phys Rev*, 1987, C35(1): 213~225
- 9 Gilson E P, Jaffe R L. Stability of Very Small Strangelets. *Phys Rev Lett*, 1993, 71(3): 332~335
- 10 Madsen J. Mass Formula for Strange and Nonstrange Quark Matter. *Phys Rev*, 1993, D47(11): 5156~5159

(下转第 242 页)

Schottky Mass Spectroscope

DAI Guangxi

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract A Schottky precise mass spectroscope in light-medium and in heavier nuclei with the mass resolution of $\Delta m/m = 5 \times 10^{-6}$ or 5×10^{-7} , respectively, has been successfully built up and operated well at ESR (Experimental Storage Ring cooled by electron beam) in G SI, the leading nuclear research institute. The spectroscope is anon-stop of the beam type with quite sensitive, even one nucleus can be measured, set-up that is a beam diagnosis reliable instrument for the cooling beam in ESR, now it becomes a precise mass spectroscope for nuclear reaction and nuclear spectroscopy study.

Key Words schottky precise mass spectroscope storage ring cooled by electron

(上接第 226 页)

- | | |
|--|--|
| <p>11 Madsen J. Shell Model Versus Liquid Drop Model for Strange</p> <p>12 Satpathy L, Sahu P K, Maheswari V S Um a. Masses of Multiquark Droplets. Phys Rev, 1994, D49(9):4642 ~4648</p> <p>13 Chakrabarty S. Stability of Strange Quark Matter at T</p> | <p>$\neq 0$. Phys Rev, 1993, D48(3):1409~1417</p> <p>14 Benvenuto O G, Lugones G. Strange Matter Equation of State in the Quark Mass-density-dependent Model. Phys Rev, 1995, D51(4):1989~1993</p> <p>15 Parija B C. Collective Modes in a Strangelet. Phys Rev, 1995, C51(3):1473~1479</p> |
|--|--|

Multi—strange Nucleus

ZENG Yuexin PENG Guangxiong NING Pingzhus

(*Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Abstract Can nucleus consists only of nonstrange nucleons (strangeness quantum number $S=0$)? Recent theoretical investigations suggest that in addition to known hypernuclei with $S=-1, -2$, there is existing possibility to produce multi-strange nuclear systems with $S \leq -3$, which may be conventional bound systems made up of A baryons (nucleons and hyperons) or more deeply bound many-body systems consisting of $3A$ quarks (u, d, s quarks) which are confined in a “bag”. These systems are underway or planned experimentally.

Key Words strange hadron cluster strange quark cluster