

文章编号: 1007-4627(2004)04-0289-05

超核物理学进展*

李 磊, 谭玉红, 王秋玲, 罗延安, 钟显辉, 宁平治

(南开大学物理系, 天津 300071)

摘 要: 简要评述超核物理学近几年的发展, 包括常规超核和非常规超核两个方面. 对于包含通常超子的常规超核, 重点介绍近来在日本 KEK 完成的一批超核实验及其理论分析. 对其中关于超子杂质效应和超子平均自由路程等实验测量结果进行了理论分析, 得到一些有意义的结果. 并对奇异数为 $S=-2$ 的 Ξ 超核的结构和性质进行了若干研究. 对于包含 C 夸克或 B 夸克的其他味超核, 以及可能的包含 pentaquark 的 θ^+ 超核也做了适当的介绍.

关键词: 超核; 杂质效应; 平均自由路程; 味超核; θ^+ 超核

中图分类号: O571 **文献标识码:** A

1 引言

超核物理学近年来不论在实验上还是理论上都有了不少新发展, 高精度、高技术实验揭示了有关超核的新现象和新规律. 理论研究不仅解释这些有关已知超核(常规超核)的新现象和新规律, 并且预言可能存在的新型超核(非常规超核)及其性质. 下面将分为常规超核和非常规超核两个方面进行简要评述和讨论. 对于包含通常超子的常规超核, 重点介绍近来在日本 KEK 完成的一批超核实验及其理论分析. 我们对其中关于超子杂质效应和超子平均自由路程等实验测量结果进行了理论分析, 得到一些有意义的结果. 同时, 对奇异数为 $S=-2$ 的 Ξ 超核的结构和性质进行了若干研究. 在非常规超核方面, 对于包含 C 夸克或 B 夸克的其他味超核, 以及可能的包含 pentaquark 的 θ^+ 超核的预言性研究也作适当的介绍. 为方便不太熟悉超核物理学的读者, 对文中某些论点做了必要的解释性说明. 超核实验研究属于核物理的中高能区. 兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)将是我国唯一一台工作中高能区的核物理实验装置. 已有的理论与实验研究表明, 在 CSR 能区附近的核-核碰撞或质子-核碰撞可以产生大量带有奇异性自由度的 K 介子和超核, 这将有力推进我国的超核物理研究.

2 常规超核

如果设法在普通核中嵌入超子就成为超核(常规超核). 如果超子中包含奇异(s)夸克就是带奇量子数的超子. 一个 s 夸克携带奇量子数 $S=-1$, 相应带奇异性的超子有 Λ 超子($S=-1$)、 Σ 超子($S=-1$)、 Ξ 超子($S=-2$)等. 下面将分别对各种常规超核研究进展予以扼要介绍和评论.

2.1 关于 Λ 超核

对于单 Λ 超核, 理论和实验方面都已做了大量工作. 在实验上已发现的超核约有 50 个. 对于由轻核到 ^{208}Pb 的数十个 Λ 超核的单粒子束缚能已由不同理论方法进行了成功的系统学研究. 对超核态的微观描述主要有 3 种模型: (1) 相对论平均场(RMF)方法; (2) Brueckner-Hartree-Fock 计算; (3) 费米超网链(Hypernetted Chain)计算. 根据实验测量的高精度数据, 结合密度相关的 RMF 方法, 可以得到关于核介质中 NN 和 YN 相互作用的重要信息^[1, 2]. 对于双奇异性($S=-2$)超核和更高奇异性的超核, 实验数据还很少. 早期的乳胶实验中, 只有 3 个可能的 $\Lambda\Lambda$ 超核事例^[3]. 最近 AGS 的 E906 实验观察到了轻 $\Lambda\Lambda$ 超核的产生^[4], 最轻的可能为 $^{\Lambda\Lambda}_2\text{H}$, 由 ^9Be 核的 (K^-, K^+) 反应生成. 双奇异性超核的重要性在于它是目前实验研究 $S=-2$ 的

收稿日期: 2004 - 09 - 27

* 基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20010055012); 国家自然科学基金资助项目(10275037)

作者简介: 李 磊(1968--), 男(汉族), 河北衡水人, 博士, 副教授, 从事原子核理论物理研究.

重子-重子相互作用的唯一手段^[5]. 此外, Λ 超核能谱精细结构研究也是近年超核物理的一个重要发展. 由于 Λ 超子与核子的自旋相关力很弱, 引起的能级分裂很小(仅约数十至数百 keV), 实验测量一直很困难. 近年来由于 KEK 超导 K 谱仪(SKS)和超球探测系统(Hyperball)的问世, 上述困难已经解决并开始了 Λ 超核能谱精细结构的系统研究, 其中包括中国原子能科学研究院周书华小组的贡献, 已完成 ${}^7_\Lambda\text{Li}$ 超核基态自旋翻转 M1 跃迁能量测量和自旋-自旋相互作用强度的提取, 以及 ${}^7_\Lambda\text{Li}$ 超核中 Λ 超子引起收缩效应的验证(详见下).

2.2 关于 Σ 超核

对于 Σ 超核, 1990 年前后曾报道(K, π^\pm)实验得到了一个窄峰—— Σ 束缚态($A \geq 6$ 的 Σ 超核), 随后在理论和实验方面均热了约 10 年, 但这一结果最近已被否定. 目前的看法是: 唯一观测到的束缚态是 ${}^7_\Sigma\text{He}$ ^[6, 7], 没有观测到其他的 Σ 超核束缚态^[8]. 文献[9]分析了 Σ 原子数据, 认为 Σ 核势在核内是排斥的, 在核表面是吸引的, 这个结果可以允许 Σ 原子的存在. 文献[10]用测量到的 Σ 宽度来抽取 $\pi\Lambda\Sigma$ 耦合常数的值. 假设 Σ 吸收发生在质子上, 测量 Σ 的吸收反应 $\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$ (交换 π)可定出

$$\frac{f_{\pi\Lambda\Sigma}^2}{4\pi} \approx 0.048 \pm 0.005 \pm 0.004, \quad (1)$$

这个值比单玻色子交换模型得到的值大 25 %^[11].

2.3 关于 Ξ 超核

关于 Ξ 超子与核的相互作用势一直研究得不甚清楚. 从早期不太精确的 Ξ 超核实验数据提取的 Ξ -核势是 $V_0^\Xi = -24$ MeV. 日本 KEK 的实验 E224 推测应为 -15 — -20 MeV^[12], 而最近 BNL 的实验 E885 推测应为 -14 MeV, 甚至更小^[13]. V_0^Ξ 的确切值是很重要的^[14], 因为在奇异强子物质(SHM)中发现, 若奇异比 $f_s \approx 0.1$, 则仅当 V_0^Ξ 的绝对值大于或等于 15 MeV 时, SHM 物质中才可能存在 Ξ 粒子. 因此, 由实验提取的 V_0^Ξ 值将决定奇异强子物质是否存在. 至今仍没有否定存在 Ξ 超核束缚态的可能性. 关于 Ξ 超核也有一些理论工作^[15, 16]. 有些理论研究认为, 由于强衰变反应 $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ 可以被核物质中充满的 Λ 束缚态禁止(泡利阻塞)^[17], 最轻、奇异性最少的稳定 Ξ 超子束缚态可能是 $S =$

-3 的 ${}^6_{\Lambda\Sigma}\text{He}$ 超核^[18].

2.4 关于 Λ 超核的收缩效应

如前所述, 关于 Λ 超核的收缩效应, 日本 KEK 的实验 E(419)^[19]证实了 ${}^7_\Lambda\text{Li}$ 超核的体积比 ${}^6\text{Li}$ 核要小约 19 %. 在凝聚态物理中, 当有杂质时物质的性质会发生变化. 在核物理中也一样, 有杂质(如超子)时物质的性质(如大小、形状和集体运动等)也会发生变化. 因为 Λ 超子是不同于质子和中子的粒子, 不受泡利原理的限制, 它会进入核的最内部. ΛN 之间的吸引势使得超核发生收缩效应, 即加入超子后的超核反而比加入超子前的核体积要小. 这个收缩效应在轻核中更为明显. E2 约化跃迁几率对核大小的变化比较敏感. ${}^7_\Lambda\text{Li}$ 超核中的 ${}^6\text{Li}$ 核芯体积变化因子可表示为 s , 当没有收缩时, $s = 1$. 而 Hiyama 等^[20]预言了 $s = 0.74$, 有收缩. KEK 的实验 E(419)^[19]的结果为 $s = 0.81 \pm 0.04$, 证实了 Hiyama 等人的预言. 我们用 RMF 模型计算处在 $1s_{1/2}$ 态的 Λ 超核, 发现确实有收缩效应, 且在轻核中比较明显^[21].

2.5 关于 Ξ 超核的转换效应与 Ξ 超子的平均自由程

对于 Ξ 超核, 一般认为存在较强的 $\Lambda\Lambda$ 与 ΞN 转换过程, 在结构计算中应考虑这种过程的影响. 我们提出了处理 $\Lambda\Lambda$ 超核与 Ξ 超核混合态的新方法, 并从理论上阐明这种转换过程的存在可使超核能级宽度改变并影响超核低能态性质^[22]. 此外, 我们还研究了 Ξ 超子动能为 100, 200, 500 和 800 MeV 时在核内的平均自由路程^[23]. 对 ${}^9\text{Be}$ 核的理论结果接近 KEK 的 E906 号等实验给出的 3 个数据. 为比较, 也计算了其他超子的平均自由路程. 它们都显示出较强的能量相关性. 但 Λ 和 Σ 超子在核物质内的平均自由路程比 Ξ 超子的平均自由路程要长, 这可能是由于 Ξ -核光学势要求一个较大的虚部的结果.

3 非常规超核

非常规超核主要指包含粲(C)夸克或底(B)夸克的各种重味超核, 以及可能的包含 pentaquark 的 Θ^+ 超核等. 下面分别予以介绍和评论.

3.1 重味超核

虽然重味重子中的粲(C)夸克和底(B)夸克等的质量比奇异(S)夸克大得多, 但原则上对于不同种类(不同味)的夸克都可对应相应的重味超核. 这一点很早就被不少核理论家指出和进行过粗略的唯象研究^[24-33], 并且对这些重味超核进行实验研究的可能性也作了初步探讨^[34-36]. 然而只是到了近年对这些重味超核进行实验研究才成为可能. 在这方面已经有一些实验设想^[37]和理论计算工作^[38]. 日本强子装置(JHF, 束流能量可达 50 GeV)^[39]和德国 GSI 计划建造的巨型加速器^[40]已经被论证可以用来产生和探测粲超子和底超子, 从而研究相应的超核.

对重味超核多体系统研究的最吸引人之处在于, 它首次提供了在 u、d 价夸克海中探测重味强子行为特征的机会. 我们由 RMF 模型估算了含粲夸克超核和含底夸克超核的单粒子能量等静态性质, 以及它们的势阱深度和相关的耦合常数^[41, 42]. 由此我们建议实验计划寻找的粲味 Λ 超核的原子量应大于等于 100. 在文献^[42]中, 我们对含粲夸克的 Λ 和 Ξ 超核以及含底夸克的 Λ 超核进行了较系统的研究, 对它们的势阱深度、自旋-轨道劈裂和耦合常数等有关性质给出一致性的估算, 这些理论结果对未来的实验工作提供了有价值的参考.

值得指出的是, 前述对于 Λ 超子杂质的类胶作用引起轻超核尺寸的明显收缩, 我们在 RMF 的一致性计算中从理论上可以完全重现这一收缩趋势. 但我们对其他超核与味超核进行一致性系统计算的结果却表明^[42], 它们的杂质效应似乎与 Λ 超核是不同的, 呈现出复杂而有规律的特征. 例如 Λ 超核和 Ξ 超核的不同的收缩效应, 以及它们与含粲夸克超核和含底夸克超核的不同杂质效应. Λ_c 和 Λ_b 超子的杂质效应与 Λ 超子相同; Ξ^- 和 Ξ^0 仅对质子分布有收缩效应, 对中子分布则呈现排斥作用. 相反, Ξ^0 和 Ξ^+ 仅对中子分布有收缩效应, 对质子分布则呈现排斥作用. 这些特征有待进一步的理论分析和未来实验的检验.

3.2 Θ^+ 超核

Θ^+ 粒子的预言是 1997 年俄国科学家从手征孤子模型(chiral soliton model)中首先得到的^[43]. 在手征孤子模型中, 介子对应手征场, 重子是手征场

中的孤子, 各种重子对应手征场中孤子在自旋和同位旋空间中的转动激发态. 它可以有除了通常的八重态和十重态以外更高阶的 SU(3)多重态. 他们通过把实验上已确认的(1 710)粒子认为是反十重态 $J^{\pi}=1/2^+$ 的 N(1 710), 利用手征孤子模型的质量关系, 预言了 Θ^+ 重子的可能存在. 并从理论上给出了该粒子的低质量($m=1\ 530$ MeV)和窄宽度($\Gamma=15$ MeV), 以及奇异量子数($S=+1$)和自旋宇称($J^{\pi}=1/2^+$).

到 2003 年初, 日本 Spring8 最先在实验上确认了 Θ^+ 粒子的存在^[44], 由此掀起了实验和理论研究的热潮, 成为近两年强子物理研究中最重大的课题. 此后至少又有 10 个实验室宣布也观测到了 Θ^+ 粒子(实验和理论研究也有否定的结果)^[45].

最初预言 Θ^+ 粒子的手征孤子模型理论并不涉及夸克层次. 当深入对 Θ^+ 粒子进行夸克层次研究时, 很快确认 Θ^+ 粒子是由两个 u 夸克、两个 d 夸克和一个反 s 夸克构成的 5 夸克态(pentaquark). 在强相互作用世界里, 人们迄今只“看到”过包含 3 个夸克的重子和由一对夸克-反夸克构成的介子. 从量子色动力学(QCD)原理来看, 允许 pentaquark 及其他多夸克色单态粒子(或共振态)存在. 这样的多夸克色单态粒子是不同于已知 3 夸克重子和正反 2 夸克介子的一类全新的物质粒子, 它们的存在可以提供更多的夸克-夸克相互作用以及夸克-胶子相互作用的短程行为的信息, 因而也可以提供对各种 QCD 模型理论以及基本的 QCD 理论本身的重要检验.

尽管关于 Θ^+ 粒子的发现与否尚无最后定论, 鉴于它的可能的低质量、窄宽度和 1/2 自旋等特点, 已经有人开始研究 Θ^+ 粒子在核物质中的自能, 研究 Θ^+ 粒子与核子、 Θ^+ 粒子与原子核的相互作用, 进而研究 Θ^+ 粒子束缚在原子核内(Θ^+ 超核)的理论上的可能性^[46-48]和实验探测的可能性^[49]. 他们的初步研究认为, 在一定的假设下 Θ^+ 粒子与核子、 Θ^+ 粒子与原子核的相互作用可以是吸引的(阱深 60-120 MeV), 我们在 RMF 的理论框架下讨论了 Θ^+ 粒子的耦合常数, 并对可能的 Θ^+ 粒子构成的超核进行了较系统的计算. 结果表明, 存在着 Θ^+ 超核束缚态能谱的可能性, 得到的典型 Θ^+ 超核能谱低能级间距明显大于自由共振宽度实验值, 因而存在实验探测的可能性^[50].

4 小结

本文简要介绍和评述了超核物理学近几年在实验和理论上的发展,重点介绍了近来在日本 KEK 完成的一批超核实验及其理论分析.超核物理学可以分为常规超核和非常规超核两个方面.对于包含通常的 Λ , Σ 和 Ξ 超子的常规超核,我们重点对其关于超子杂质效应和超子平均自由路程等实验测量结果进行了理论分析,得到一些有意义的结果.指出了 Λ 超核能谱精细结构研究的新动向和关于 Ξ

超子与核的相互作用研究的戏剧性变化;介绍了对奇异数为 $S=-2$ 的 Ξ 超核的结构和性质的若干新研究.对于包含 C 夸克或 B 夸克的其他味超核,我们在 RMF 框架下与普通超核做了比较性研究的一致性计算,结果表明它们的杂质效应似乎与 Λ 超核是不同的,呈现出复杂而有规律的特征.最后对可能的包含 pentaquark 的 θ^+ 超核也做了适当的介绍,评述了当前有关 θ^+ 超核的研究现状并给出了我们的初步研究结果.总之,超核物理学的蓬勃发展正在丰富和深化整个原子核物理学领域的研究.

参 考 文 献:

- [1] Ma Zhongyu, Speth J, Krewald S, *et al.* Nucl Phys, 1996, **A608**: 305.
- [2] Keil C M, Hofmann F, Lenske H. Phys Rev, 2000, **C61**: 064309.
- [3] Aoki S, Bahk S Y, Chung K S, *et al.* Prog Theor Phys, 1991, **85**: 1 287.
- [4] Ahn J K, Ajimura S, Akikawa H, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **87**: 132504.
- [5] Albertus C, Amaro J E, Nieves J. arXiv: nucl-th/0110046.
- [6] Nagae T, Miyachi T, Fukuda T, *et al.* Phys Rev Lett, 1998, **80**: 1 605.
- [7] Harada T. Nucl Phys, 2000, **A672**: 181.
- [8] Bart S, Chrien R E, Franklin W A, *et al.* Phys Rev Lett, 1999, **83**: 5 238.
- [9] Friedman E. Nucl Phys, 1998, **A639**: 511c.
- [10] Loiseau B, Wycech A. Phys Rev, 2001, **C63**: 034003.
- [11] Stoks V G J, Rijken Th A. Phys Rev, 1999, **C59**: 3 009.
- [12] Fukuda T, Higashi A, Matsuyama Y, *et al.* Phys Rev, 1998, **C58**: 1 306.
- [13] Khaustov P, Alburger D E, Barnes P D, *et al.* Phys Rev, 2000, **C61**: 054603.
- [14] Schaffner-Bielich J, Gal A. Phys Rev, 2000, **C62**: 034311.
- [15] Tan Yuhong, Luo Yanan, Ning Pingzhi, *et al.* Chin Phys Lett, 2000, **17** (6): 401.
- [16] Wang Qiuling, *et al.* to be published.
- [17] Schaffner J, Greiner C, Stocker H. Phys Rev, 1992, **C46**: 322.
- [18] Filikhin I N, Gal A. nucl-th/0110008.
- [19] Tanida K, Tamura H, Abe I, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **86**: 1 982.
- [20] Hiyama E, Kamimura M, Miyazaki K, *et al.* Phys Rev, 1999, **C59**: 2 351.
- [21] Tan Yuhong, Luo Yanan, Ning Pingzhi, *et al.* Chin Phys Lett, 2001, **18** (8): 1 030.
- [22] Tan Yuhong, Luo Yanan, Ning Pingzhi. Commun Theor Phys, 2003, **40**: 91.
- [23] Wang Quling, Ning Pingzhi, to be published.
- [24] Tyapkin A A. Sov J. Nucl Phys, 1976, **22**: 89.
- [25] Iwao S L. Nuovo Cim, 1977, **19**: 647.
- [26] Gatto R, Paccanioni F. Nuovo Cim, 1978, **46A**: 313.
- [27] Kolesnikov N N, *et al.* Sov Journ of Nucl Phys, 1981, **34**: 957.
- [28] Dover C B, *et al.* Phys Rev, 1983, **C27**: 2 085.
- [29] Dover C B, Kahana S H. Phys Rev Lett, 1977, **39**: 1 506.
- [30] Bando S Nagata. Prog Theor Phys, 1983, **69**: 557.
- [31] Bando H, Bando M. Phys Lett, 1982, **B109**: 164.
- [32] Starkov N I, Tsarev V A. Nucl Phys, 1986, **A450**: 507c.
- [33] Bunyatov S A, Lyukov V V, Starkov N I, *et al.* Sov J Part Nucl, 1992, **23**: 253.
- [34] Batusov Yu A, *et al.* Preprint of the JINR EI-10069(1976).
- [35] Batusov Yu A, *et al.* Sov Journ JETP Lett, 1981, **33**: 56.
- [36] Bressani T, Iazzi F. Nuovo Cim, 1989, **102A**: 597.
- [37] Buyatov S A, Lyukov V V, Strakov N I, *et al.* Nuovo Cim, 1991, **A104**: 1 361.
- [38] Tsushima K, Khanna F C. nucl-th/0207036.
- [39] <http://jkj.tokai.jaerigo.jp/>
- [40] www.gsi.de/GSI-future.
- [41] Tan Yuhong, Cai Chonghai, Li Lei, *et al.* Commun Theor Phys, 2003, **40**: 473.
- [42] Tan Yuhong, Ning Pingzhi. Europhys Lett, 2004, **67**: 355.
- [43] Diakonov D, *et al.* Z Phys, 1997, **A359**: 305.
- [44] Nakano T, *et al.* [LEPS Collaboration], Phys Rev Lett, 2003, **91**: 012002 [hep-ex/0301020].
- [45] Hyodo T. <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/hyodo/research/Thetapub.html>.
- [46] Kim H C, Lee C H, Lee H J. hep-ph/0402141.

[47] Miller G A. nucl-th/0402099.

[49] Nagahiro H, Hirenzaki S, Oset E, *et al.* nucl-th/0408002.[48] Cabrera D, Li Q B, Magas W, *et al.* nucl-th/0407007.[50] Zhong X H, Li L, Tan Y H, *et al.* to be published.

Progress in Hypernuclear Physics*

LI Lei, TAN Yu-hong, WANG Qiu-ling, LUO Yan-an, ZHONG Xian-hui, NING Ping-zhi

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

Abstract: Progress and recent status of experimental and theoretical investigations on hypernuclear physics are briefly reviewed, including conventional hypernuclear physics and unconventional hypernuclear physics. We introduce the recent progress of hypernuclear experiments in KEK, Japan and the studies of fine structure in γ -ray spectroscopy of Λ hypernuclei. The spin-flip transition between the ground-state spin doublet of light hypernuclei has been observed and the transition energy provides important information on the strength of the spin-spin interaction between Λ hyperon and nucleons. The effects of Λ hyperon impurity on static properties of nuclei and the mean free path of hyperons in nuclei are discussed.

We demonstrate the different effect of different hyperon-impurities on the static properties of nuclei within the framework of the relativistic mean-field model. Systematic calculations show that Λ_c^+ and Λ_b , has the glue-like role the same as Λ hyperon for lighter hypernuclei. We find the different effect of different hyperons impurities on the nuclear core. The properties of heavy flavored baryon hypernuclei (i. e. , Λ_c^+ , Λ_b , Ξ_c^+ and Ξ_c^0 hypernuclei) are also investigated within the framework of the relativistic mean-field model, suggesting that it is not necessary to consider heavy systems in the experimental searches for Λ_c^+ and Ξ_c^+ hypernuclei.

The discovery of the Θ^+ (pentaquark) at Spring-8/Osaka, followed by its confirmation in different other experiments, has made a substantial impact in hadronic physics. The possibility that there would be Θ^+ bound states in nuclei has been also reviewed. The Θ^+ selfenergy in nucleus and an attractive Θ^+ -nucleus potential are pointed out, ranging from 60 to 120 MeV at normal nuclear matter density.

Key words: hypernuclei; impurity effect; mean free path; flavored hypernuclei; Θ^+ hypernuclei

* **Foundation item:** Specialized Research Fund for Doctoral Program of Higher Education (20010055012); National Natural Science Foundation of China (10275037)