

文章编号: 1007- 4627(2000)04-0219-05

放射性束装置给核结构研究带来的新机遇*

李君清, 周 勇

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000)

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用放射性束装置所提供的高强度和高分辨率的短寿命核束流可达到核中质比的极端值, 新的现象, 如中子晕、质子晕、中子皮、质子皮、壳的减弱或消失, 以及在滴线附近对力的重要性和核物质中质子-中子对的新超导相的可能存在等不断涌现. 对这些现象进行研究和理解, 然后回到实验上较易达到的稳定区核去检验人们的理解, 会对进一步研究核结构、核合成、核天文和自然界基本对称性提供新的机遇.

关键词: 放射性束流; 中质比; 新机遇

中图分类号: O571.2 文献标识码: A

1 引言

放射性束装置所提供的放射性束流, 可用于核物理或相关领域的研究. 奇异核束流的应用, 在核结构、核合成、核天体物理和对基本对称性的检验等方面是有效的和激动人心的. 世界上一些国家都已建造或正在建造或改进升级放射性束装置, 中科院近代物理所的放射性束流线装置(RIBLL)已达到世界先进水平. 与奇异核相关的富有挑战性的研究内容有: 核物质性质、元素的生成和对标准模型的检验^[1]. 这里重点讨论核结构研究.

迄今, 人们对核结构的理解基于有限的 β 稳定线附近的核. 当靠近滴线时, 最突出的性质是最外面核子的弱结合, 即只有很小的结合能. 在此弱结合区域, 将会出现完全不同的效应和新型的核子间相互作用, 并成为起支配作用的. 核密度、核尺寸、核的对称性和激发等都会与稳定区核大不相同. 大多数的丰中子核都具有一个外部区域, 那里只存在中子, 组成了物质的新形式, 不是核物质, 也不是中子.

大量的关于稳定核的和接近稳定核的数据已显示出—个事实, 就是人们还不理解壳模型的多数基本性质, 如对 ³²Mg, ⁴⁴S 以及 Zr 和 Sr 等的研究表

明, 即使是基准的幻数也不能解释稳定球形和椭球形状核的本质. 而离开稳定区到滴线区, 幻数是很脆弱的. 对奇异核可被更容易地孤立和放大, 以便反映有效相互作用的与中质比大小有关的分量, 然后回到稳定区去检验这些有效相互作用, 并提高人们对结合能、形状和组态、单粒子壳结构及它们的集体激发的理解.

靠近滴线时, 核子是非常弱束缚的. 合理的理论必须考虑这些低能准束缚粒子的所有可能的轨道, 理论还应该处理非束缚轨道的‘粒子连续态’. 因此核理论的许多行之有效的办法, 如常规壳模型、对力理论须进行修正. 粒子(或粒子对)可能被散射到连续态并散射回来. 人们虽然能够理解单个粒子到连续态的行为, 但对接近滴线核的多粒子情况还有待解决. 对束缚态和连续态之间的耦合可从核结构和核反应两个方面考虑. 由核反应理论所发展的许多方法可运用于研究松散束缚核的结构.

2 丰中子核

丰中子核显示了许多新奇现象, 如(1)它们具有非常大的尺寸, 与非常弱的束缚相对应, 非常弥散; (2)它们的性质由表面效应所支配; (3)它们是非常超流的, 非常接近粒子连续态并提供散射中子

* 收稿日期: 2000-03-28

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19775057, 19847002); 中国科学院重大项目和百人计划

作者简介: 李君清(1941-), 女(汉族), 浙江肖山人, 研究员, 博士生导师, 从事混沌和远离核结构的理论研究.

Cooper 对的巨源(Giant reservoir).

2.1 晕核

弱束缚晕核如 ${}^{11}\text{Li}$ 和 ${}^{19}\text{C}$ 具有非同寻常的组态,它们出现在中子滴线附近. ${}^{11}\text{Li}$ 有3个质子和8个中子,被理解为2个中子和一个紧密结合的核芯组成的三体系统.这三部分形成了一个束缚态,但势能不能束缚它们之中的任意两部分,因此叫作Borromean核.最重的丰中子C同位素有6个质子和13个中子,比自然出现的 ${}^{13}\text{C}$ 要多6个中子.由于非常弱的结合力, ${}^{11}\text{Li}$ 和 ${}^{19}\text{C}$ 的最后的中子在一定体积中散布,其尺寸可与 ${}^{208}\text{Pb}$ 一样大.微弱束缚的中子散布得离核芯那么远,在经典规律支配下是不允许的,只有在量子物理的效应下出现.运用放射性束装置可能将中子滴线从C扩展到丰中子S,粗略估计为 ${}^{52}\text{S}$,有16个质子和36个中子.最近发展的一种新方法可研究与晕核特别有关的多核子俘获率,用这种方法研究核在重核的强电场中破裂的逆过程.测量这一过程的反应率,对研究弱束缚系统的性质特别有用,对研究恒星燃烧中出现的核反应也特别有用,例如太阳中这样的反应引发了太阳中微子发射.

2.2 对关联

在多体问题的许多领域,把两个核子配成粒子对的对关联,是至关重要的.人们最熟悉的例子是在超导体中,电子的Cooper对在凝聚物质系统起着很实际的重要作用.目前,人们知道得较少,但有同等意义的是对关联在原子核中的作用.这种关联在滴线核中起了非常特殊的作用.与稳定线附近的情况相反,不能再把滴线核力处理为小的剩余相互作用,对力对外围核子结合能的影响在幅度上可与壳模型势的影响相比较.接近滴线时已观察到了对关联的增加,在丰质子边,通常有较大的增长.例如,Rondan^[2]描述了接近质子滴线时,Pb同位素的关联增加.

对关联对弱束缚核的重要性是由结合能的实验研究验证的.例如,对He同位素系列, ${}^4\text{He}$ 具有最强的每核子结合能,但它的较重的邻核 ${}^5\text{He}$ 是中子不稳定的,再加一个中子达到Borromean系统 ${}^6\text{He}$,这首先归于中子对能的增加.下一个同位素 ${}^7\text{He}$ 是中子不稳定的,而 ${}^8\text{He}$ 是束缚的,也是最重的束缚He同位素.双幻核 ${}^{10}\text{He}$ 由发射中子衰变.所以,虽

然对力不是全部的力,但显然起主要作用.

至今,所使用的对相互作用是用来符合稳定核的数据,而对从有效核子-核子力微观推导的对相互作用很少用到.成对效应的图象化模型用于稳定谷附近时符合得相当好,但对弱束缚的丰中子核不再成立.对力的微观起因是什么?在起作用的区域,对力是怎样地依赖于核中质子和中子的密度(特别是在核表面)?怎样检验对力的性质?这些问题不但对核物理重要,对核天文学和宇宙起源也很重要.例如,对核内对相互作用的密度依赖性的较好理解,有助于发展中子星的超流理论.由于强的表面效应,弱束缚核是个完美的实验室.研究中子对的基本性质,可探测一对中子在弹核和靶核之间的转移反应几率.

2.3 远离稳定线的壳结构

在接近中子滴线时,核子所感受到的力场的形状和强度预期会有显著的改变.由于核子密度在空间分布的系统变化以及对力增长变得重要,平均核子势应该比较弥散,这将产生一个新的核结构:不同的能级序列,不同的幻数,或根本没有幻数.幻数在核的丰中子极端可能是多变的.

滴线核壳效应的减弱表现在从核中移走最后两个核子所需要的能量,即分离能.当 $N=82$,在稳定谷及在质子滴线都能看到大的单粒子能级中的间隙,在靠近中子滴线时渐渐消失^[3].双中子分离能非常依赖于所使用的有效相互作用,不同的模型,如有效相互作用为SKP,SKM*和SLY4的Self-consistent Hartree-Fock-Bogoliubov方法、微观宏观的有限程液滴模型(FRDM)、由Comay-Kelson-Zidon(CKZ)所给出的唯象质量公式,以及Jaonecke-Masson(JM),Masson-Jaonecke(MJ)和Tackibana(T+)等给出的唯象质量公式,在有实验数据的地方所有的理论结果都符合得很好,但在远离稳定线时这些结果发散.但微观模型给出了比较一致的预言.

人们将怎样计算这些丰中子核的结构,关键的实验量是什么呢?在这类核上另外加一个或两个中子时,分离能的不连续性可给出形状变化的单粒子能量和核子间的有效相互作用.这可以用两种方法从实验提取.首先将实验数据与壳模型计算的结果进行比较,特别是在所有的态都知道的区域.对较

重的核要确定这样的谱是比较困难的, 但对相互作用可由闭壳附近的核谱确定, 单粒子能量最好通过向幻核加一个或移走一个核子来确定. 唯象核子-核子相互作用最好采用闭壳外两个中子的系统来研究. 这都可以用一个或两个核子的转移反应来研究. 单核子转移反应, 如(d, p), (p, d)和(t, α)是测量满壳外一个粒子能量的有力工具. 在这些反应中实验对6-10 MeV/u 的束流将是很敏感的. 有效核子-核子相互作用可由双幻核芯外两个粒子能量的能级间隔来确定. 大多数这样的数据来自²⁰⁸Pb附近, 还有一些不很理想的数据来自其它闭壳核如⁴⁰Ca, ⁴⁸Ca, ⁵⁸Sr和⁹⁰Zr. ¹³²Sn 是极好的闭壳核, 可将提供新的实验信息, 特别是它将能确定由靠近稳定线核所得到的剩余相互作用是否能被外推到丰中子核的作用机制. 测量有效相互作用的实验可与测量单粒子态的实验同样多. 除了束流与¹³²Sn 相差一个核子的¹³³Sn, ¹³¹Sn, ¹³³Sb 或¹³¹In 外, 转移反应将在与附加核子相耦合的这些单粒子态的基础上布居能级.

图1(a)给出了稳定线附近核的壳结构特征, 图(b)给出了滴线核中非常浅的单粒子势的壳结构特征, 它相应于更趋于均匀的分布, 能级次序也不相同. 在没有自旋轨道相互作用的情况下(实际上有些计算已预言在丰中子核中自旋轨道耦合明显降低), 单粒子谱预期会接近球形谐振子势极限(图(c)). 另一个采用放射性束和逆动力学的直接反应

区域是特别重要的亚位垒拾取和削裂反应. 这类反应提供了单粒子态(波函数)结构的直接度量, 可看到径向分布. 之所以如此, 是因为粒子并不是沿模糊的核势而是沿熟知的库仑轨道运动的. 由于中子晕核的发现, 研究丰中子核中核子分布特有意义, 上述反应可用于中子尾巴的定量度量. 对轻核, 一个可能的实验, 是用低能的晕核轰击重核, 测量其转移. 可用(¹³C, ¹²C)削裂反应, 对¹³C 波函数加以适当地假定, 便可得到与²⁰⁹Pb (d, p)反应相同的结果. 束流强度的区间可以从 nA 到大约10⁵ particles/s.

3 质子放射性和接近质子滴线的核结构

极端丰质子核的一个特殊现象是质子放射性. 质子以寿命为1-10⁻⁹ s 的尺度发射. 裂变是越过库仑位垒的量子隧道过程, 质子放射性因此开创了研究原子核的新的性质. 它实际上超过了核存在的正式极限. 严格地讲, 这些质子占据了非束缚能级, 位于粒子连续态. 这些过程的衰变率对量子数, 父态与子态的结构很敏感. 所搜集的连续态结构信息对这个既不束缚也不自由的系统的有效相互作用及对对力与核形状的研究提供了非常有价值的信息. 重核的某些区域只能通过放射性束引起的反应去接近. 父核是非球形的, 质子放射性需要质子通过一个变形的三维位垒的隧道. 质子所处的位阱还是很深的, 在质子达到自由时, 处在大约为10⁻¹² cm 的地方. 质子发射寿命与质子角动量有关, 角动量越高, 由于离心力的作用, 总位垒越高.

接近质子滴线处也碰到非常有意义的情况, 即双幻核⁴⁸Ni(Z=28, N=20), ⁵⁶Ni(N=Z=28)和¹⁰⁰Sn(Z=N=50). 目前, 研究得比较透彻的双幻核的确很稀少, 在⁴⁸Ca 以上, 仅有¹⁰⁰Sn 和²⁰⁸Pb, 这给出了另一机会去探索壳结构的基准. 这时估价质子数和中子数差不多相等的丰质子一边壳结构的坚固性或脆性是很重要的. 与比较脆弱的丰中子边相比, 造成其脆弱性的部分原因是来自高度不平衡的质子数和中子数.

4 N=Z 核的对称性

具有50个质子的 Sn 元素形成了一个近似的界限, 在此界限以下可以生成和研究 N/Z 为1或较小

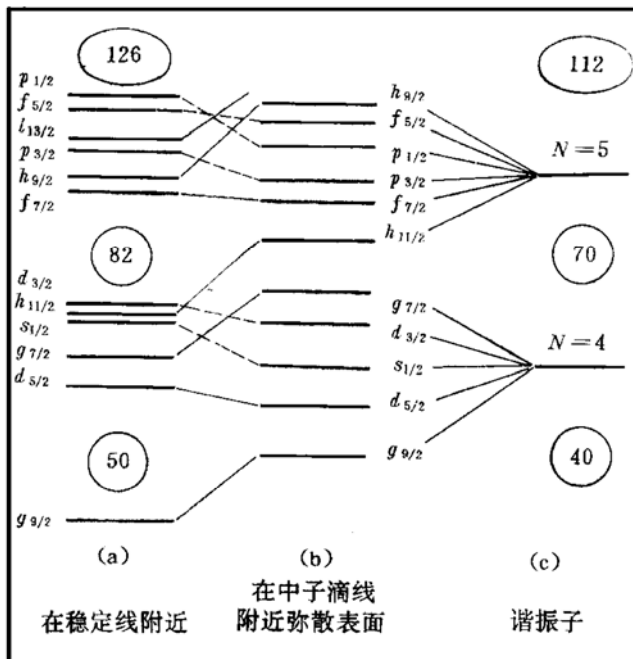


图1 核的壳结构

的核. 在 $N = Z$ 的核中, 质子和中子可占据同一轨道, 这时核具有特殊的对称性. 质子和中子的 Cooper 对深深地影响着正常核中低位态的性质. 固体中的超导性是熟知的且已被理解的现象, 这种超导态可表达为强关联 Cooper 对自由运动的凝聚. 在核领域, 对相互作用也使两核子在轨道上向相反方向运动, 所以它们的轨道角动量为零. 图2(a)给

出了4种这样的核子 Cooper 对, 其中(1)由两个中子和(2)两个质子组成耦合总角动量为零的对, 如果质子和中子占据相同的轨道, 它们可形成(3)和(4)中的质子-中子对. 此类对是一种‘相’, 对接近 $N = Z$ 时的核特别重要. 目前, 仅发现了与(1)、(2)类型的 Cooper 对相应的核超导相, 由于对的总自旋为零, 它们在形状上是各向同性的. 它们的另

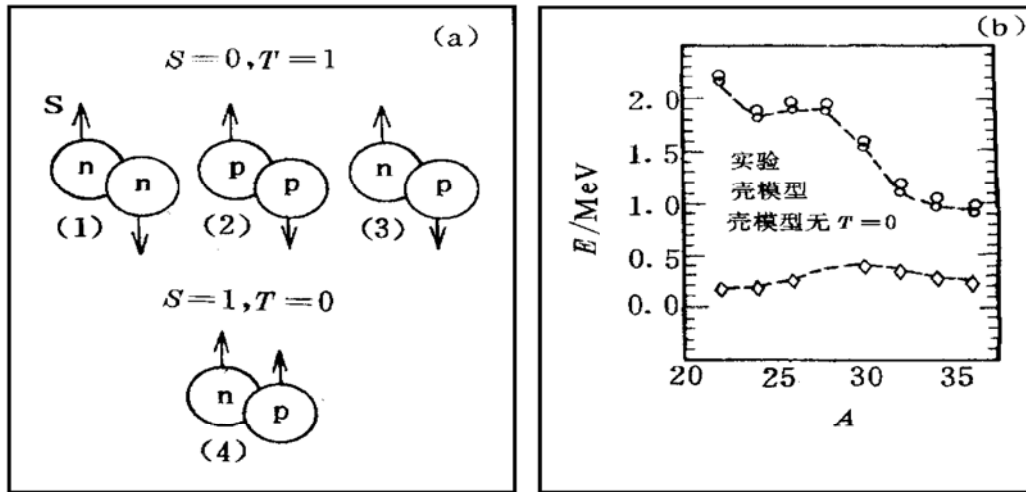


图2 原子核中的 Cooper 对(a) 和 Wigner 能(b)

一个量子数反映了它们的质子、中子的对称性, 即同位旋 $T = 1$. $N = Z$ 核的中子和质子占有相同的壳模型轨道, 由于中子和质子的波函数之间很大的空间重叠, 预期会出现(3)和(4)中的中子-质子对超导相. 对(3), 自旋为零, 同位旋 $T = 1$, 是各向同性的, 其空间结构与 $T = 1$ 的 $p-p$ 对和 $n-n$ 对相同. 对(4)对, 自旋 $S = 1$, $T = 0$, 预期有很强的各向异性, 具有环形形状.

目前还不清楚这些质子-中子对的具体实验特征是什么, 这些质子-中子对的关联是否足够强, 以形成静态的对凝聚. 迄今, 对质子-中子关联的最强证据来自新测到的结合能——一个附加的结合能, 即 Wigner 能. Satula 等^[5]的壳模型计算仔细考虑了围绕 $N = Z$ 的结合能. 图2比较了对 $N = Z$ 核理论计算值与实验结合能(Wigner 能), 结果符合很好. 对 $N \neq Z$ 的核, 这项能是非常小的. 如果从理论上排除了 $T = 0$ 的质子-中子对相互作用, Wigner 能就大大降低, 如较低的理论曲线所显示. Wigner 能产生于质子和中子一起运动时, 或轨道在空间相接近时的相互作用, 反映中子-质子对相互作用的特性、强度和效应.

问题是, Wigner 能怎样影响重 $N = Z$ 核的结构.

如果这样的耦合可以在核中的许多核子对中出现, 它将提供一个实验上还没有观察到, 但可能存在于一些实验特征中的新的超导相. 除结合能中的 Wigner 效应外, 还有: (1) 奇-奇核中的能隙, 与低能偶-偶核中所观察到的能隙相似; (2) 在核的转移反应中, 对 $N = Z$ 偶-偶核加一个或去掉一个类氦对形成一个奇-奇核的几率比之 $N \neq Z$ 的核有加强; (3) 在与正常的 $n-n$ 或 $p-p$ Cooper 对的破坏相应的高角动量态中不规则性的消失.

目前, 关于 $N = Z$ 的数据在 $A = 60$ 以上是非常有限的, 所预期的束缚核的终点是 ^{100}Sn . 因此, 研究这种新的核物质超导相的一个有利区域是在 ^{56}Ni ($N = Z = 28$) 和 ^{100}Sn ($N = Z = 50$) 之间, 它们有足够的活跃核子形成许多 Cooper 对, 需要用放射性束研究 $N = Z$ 核. 另外, 也可用这些核的形成和衰变测试标准模型.

5 结论和展望

本文概括了一些激动人心的应用放射性束所能给出的研究, 如核结构、核合成、核天体和基本对称性等研究中的重要性. 对这些重要的新领域里的

研究, 将会推动人们对核多体系统、元素起源的理解, 以及认识它们如潮水般的涌现在宇宙事件、基本理论和标准模型等中所起的作用。

这个新研究领域的前景在 20 世纪就孕育着。有关的研究一方面着手于在同位素分离器上鉴别出非常低能的短寿命核, 另一方面运用加速器产生的已有稳定束的高能实验。终于, 几个精密的第一代放射性束设备的建成, 开始了奇异束物理的研究, 稳定束所达不到的核研究开始提供诱人前景。新的现象, 如晕、皮和远离稳定线时壳模型变得脆弱的证据, 以及核物质如质子-中子对新超导相的可能存在等, 仅是其中的一些例子。

越来越多的证据说明, 人们对核结构随 N 和 Z 的变化的已有理解仅能用于有限的核系列, 同时不知道, 也不能确切预言滴线的位置, 甚至不知道核稳定性本身的界限, 因此人们必须开拓眼界。放射性束提供了达到核中质比极端值的机会, 达到最重的核以鉴别新现象。然后回到稳定区, 去提高对核、元素的起源、物理定律和基本对称性等的理解。

现在, 世界上已有在线同位素分离器, 第一代 ISOL (Isotope Separation On-Line) 和弹碎裂设备, 可提供放射性束流和投入运用。中科院近代物理所的放射性束流线的建成, 为我们处在这个崭新的激动人心的新研究领域的前沿提供了机遇。

参 考 文 献:

- [1] Scientific Opportunities with an Advanced ISOL Facility [R]. USA, November, 1997, 1- 86.
- [2] Rondan T. Multitum Mass Measurement Group Meeting, Rauschholzhausen [R]. Germany, June, 1997.
- [3] Dobaczewski J, Nazarewicz W, Werner T R *et al.* Mean Field Description of Ground-state Properties of Drip-line Nuclei: Pairing and continuum effects [J]. Phys Rev, 1996, C53: 2 809- 2 840.
- [4] Pfeiffer, Kratz K L, Thielemann F K. Analysis of the Solar-system r -process Abundance Pattern with the New ETFSI-G Mass Formula [J]. Z Phys, 1997, A357: 235- 238.
- [5] Satula W, Dean D J, Gary J *et al.* On the Origin of the Wigner Energy [J]. Phys Lett, 1977, B407: 103- 109.

New Research Opportunities on Nuclear Physics by Facility of Radioactive Beams^{*}

LI Jun-qing, ZHOU Yong

(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion
Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

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

Abstract: By making use of the facility for radioactive beams which would be able to supply intense high resolution beams of short lived (radioactive) nuclei, the neutron-proton ratio can be extended to extreme values, where some new phenomena such as neutron halo, proton halo, neutron skin, proton skin, growing evidence of the fragility or disappearance of shell structure far from stability, the importance of pairing correlation near drip line, and the possible existence of new superconducting phases of nucleonic matter such as proton neutron pairing etc. will appear. To investigate and understand the phenomena, and then return to experimentally more accesible regions near stability to test our understanding of nuclei will afford a new opportunity to study the nuclear structure, nucleosynthesis and nuclear astrophysics, and fundamental symmetries in the nature.

Key words: radioactive beam; neutron-proton ratio; new opportunity.

^{*} **Foundation item:** NSFC (19775057, 19847002); Major Subject and 'One Hundred Persons Project' of the Chinese Academy of Sciences