

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19820101152813

UDC_____

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

超重核区对关联的相关问题的研究

Studies of pairing correlation of superheavy nuclei problems

邱 晨

指导教师姓名: 周先荣教授

专业名称: 理论物理

论文提交日期: 2013年7月

论文答辩时间: 2013年7月

学位授予日期: 2013年7月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

当前对原子核结构的认识, 已经从早期发现的简单稳定的原子核结构, 逐步发展为对远离 β 稳定线的核结构以及超重核结构的探索. 实验上在远离 β 稳定线的原子核中发现了非常丰富的物理现象, 如中子晕和质子晕等. 随着实验上不断发现的新的超重核素, 对超重核结构的研究, 也已经成为当前核结构领域的研究热点之一. 本文主要利用Skyrme-Hartree-Fock(SHF)+BCS方法对原子核的晕结构以及超重核结构两个方面进行了研究.

中子晕现象是上个世纪重要的核物理发现之一. 本文对 ^{31}Ne 的晕结构进行了研究, 并着重讨论了张量力对晕核结构的影响. 我们采用SHF+BCS方法对Ne同位素链的基态性质进行了计算, 为了讨论张量力的影响, 我们采用了几种不同的Skyrme相互作用: 不包含张量力的SLy5和SGII以及包含张量力的SLy5+T和SGII+T. 结果表明, 包含张量力的SLy5+T和SGII+T计算很好地再现了实验上观测到的 ^{31}Ne 的晕结构, 同时计算得到的 ^{31}Ne 单中子分离能与实验值相符合.

对超重核的研究, 特别是对超重核稳定岛的探索, 一直激励着人们寻找比现有核素质量更大, 电荷更多的超重核素. 本文还利用SHF+BCS方法研究了 $Z=102$ 至 $Z=110$ 的超重核的基态性质, 并着重讨论了对力对超重核结构的影响. 由于普遍采用的对力强度是通过拟合现有的实验上观测到的轻核和重核的奇偶差而获得的, 为了得到更符合超重核区的核素奇偶差的对力强度, 我们拟合了实验上现有的超重核同位素链No、Rf、Sg、Hs以及Ds的奇偶差, 对原有的对力强度进行了修正, 结果表明, 修正后的对力强度能更好地再现实验上观测到的超重核同位素链No、Rf、Sg、Hs以及Ds的奇偶差, 同时, 只有采用修正后的对力强度才能很好地给出 $N=162$ 的变形壳结构.

关键词: 晕核, 超重核, 对关联, Skyrme-Hartree-Fock方程

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

The understanding of nuclear structure is changing from early stable structure to halo structure of far-away β -stability line and structure of superheavy nuclei. A lot of physical discoveries have been found in experiment for the nuclei of far from β -stability line. With the discovery of new superheavy nuclei in experiment, the research on superheavy nuclei has become one of the frontier in nuclear structure. In the thesis, we study the structure of halo nuclei and superheavy nuclei by using Skyrme-Hartree-Fock(SHF)+BCS approach.

Neutron halo is one of the important physical discovery during last century. In the thesis, the halo structure of ^{31}Ne has been studied, and especially, we focus on the effect of tensor force on the structure of halo nuclei. We calculate the ground states of Neon isotopes by SHF+BCS method. To discuss the effect of tensor force, we used different Skyrme interaction: SLy5 without tensor force, SGII, SLy5 with tensor force and SGII with tensor force. The results indicate that ^{31}Ne is halo nucleus and the calculation with tensor force reproduces the experimental single neutron separation energy.

On the other hand, the predictions of stable island of superheavy nuclei always inspire people to search for superheavy nuclei which has heavier mass and larger charge than now. We study the properties of superheavy nuclei with $Z=102\sim 110$ using SHF+BCS method. Especially we focus on the effect of pairing interaction on the structure of superheavy nuclei. Currently the strength of pairing interaction used is adjusted by fitting the odd-even difference of light and heavy nuclei observed in experiment. To obtain the appropriate strength of pairing interaction for superheavy nuclei, we fit the odd-even difference of superheavy isotopes No, Rf, Sg, Hs and Ds which have been synthesized already in experiment. The calculation with the adjusted pairing interaction strength can well reproduce experimental odd-even difference of superheavy isotopes No, Rf, Sg, Hs and Ds. At the same time, only the calculation with the new pairing strength can reproduce the deformed shell structure at $N=162$.

Key Words: halo nuclear, superheavy nuclei, pairing correlation, Skyrme-Hartree-Fock

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

摘要	I
Abstract	III
第一章 引言	1
1.1 研究背景与动机	2
1.2 本文结构	6
第二章 Skyrme-Hartree-Fock理论	7
2.1 占有数表象	9
2.2 Hartree-Fock方法	10
2.3 对力的处理方法	21
第三章 ^{31}Ne 的晕结构	25
3.1 引言	25
3.2 计算结果及讨论	25
3.3 结论	30
第四章 对相互作用对超重核的影响	31
4.1 引言	31
4.2 计算结果及讨论	32
4.3 结论	39

第五章 总结与展望	41
参考文献	43
附录 A BCS方程推导	48
致谢	51
硕士期间发表的文章	52

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 引言

原子核由质子和中子构成，在质子数与中子数是某个特定数值或两者均为这一数值时，原子核的稳定性就比其它的要大，这些数值被称为幻数。从表1.1中可以看出，在氧元素中，当质子数和中子数处于幻数8的时候，它的相对丰度比另外两个的要大。原子核幻数的研究推动了原子核模型的发展。迄今为止，已经知道的幻数有2、8、20、28、50、82、126[1]，例如在自然界中广泛存在的氦、氧、钙、镍、锡、铅，其质子数或中子数就分别与2到82的数值相对应。当原子核中质子和中子数都为幻数时，这样的原子核称为双幻数，具有双幻数的原子核会特别稳定。例如自然界存在质子数 $Z=82$ 、中子数 $N=126$ 的铅同位素 ^{208}Pb ，就具有双幻数的壳结构，显得异常稳定。随着理论研究的发展，幻数被认为是原子核具有壳层结构的反映，表示相同的粒子以集团的形式构成结合状态，就会出现某种秩序和稳定的结构，并且决定原子核的基态性质。幻数的存在是原子核有“壳层结构”的反映，表示相同的粒子以集团的形式构成结合状态，就会出现某种秩序，并且决定原子核的性质。1949年，德国核物理学家Mayer和Jansen等人用壳层模型和自旋相互作用来解释这种现象[2]，并建立了“壳层模型”，他们由此而获得1963年的诺贝尔奖。此后的核物理学界一直认为，构成原子核稳定结构的幻数是固定不变的。但是，日本理化研究所曾宣布，该所科学家谷畑勇夫等人通过大量科学实验表明，在丰中子原子核中，中子数为16的原子核处于稳定状态，从而发现了新的幻数。不稳定同位素的发现使得对放射性同位素结构的研究成为可能，并发现了一些意想不到的原子核的结构和现象。谷畑勇夫利用这种技术，发现原子核的半径不是随质量的增长而增长，而是随中子数和质子数变化而变化的。在中子数远比质子数多的丰中子核同位素中，原子核表面附近存在着只有中子形成的层，称为中子晕的结构。中子晕的发现，打破了原子核中幻数是固定不变的观点。

另一方面，原子核的电荷和质量上限也是核结构研究中的一个重要方向。目前，随着实验技术的发展以及理论计算的深入，人们已经探索到了接近核素表右上角的超重核区。但是，接近半个世纪的探索，核素表右上角的边界依然是未知的。20世纪60年代，人们利用液滴模型加壳修正的方法计算了原子核的质量，并得到了一些相对于不稳定中子数和质子数而被隔开的区域，即所谓的超重核稳定岛，对它们的探索是一系列重离子加速器以及在这些加速器上完成实验的主要动力。

本文从平均场和对关联两个方面对原子核进行了研究。在平均场方面，我们

表 1.1 自然界中轻核的丰度

元素	平均质量	同位素	相对质量	丰度%
H	1.00794	^1H	1.007825	99.985
		^2H	2.0141020	0.015
C	12.0108	^{12}C	12.000000	98.90
		^{13}C	13.003355	1.10
N	14.00674	^{14}N	14.003074	99.634
		^{15}N	15.000109	0.366
O	15.9994	^{16}O	15.994915	99.762
		^{17}O	16.999131	0.038
		^{18}O	17.999159	0.200

采用了SHF方法. 首先, 我们利用SHF方法计算轻核Ne的同位素链, 因为实验上发现 ^{31}Ne 是一个具有晕结构的原子核[3], 而具有晕结构的原子核一直是原子核滴线附近结构研究的热点问题. 在验证了SHF方法的有效性和合理性之后, 我们再利用程序计算超重核稳定岛边缘元素($102 < N < 110$)的基态性质. 在处理对关联的问题上, 我们采用准粒子近似的方法计算核子-核子的剩余相互作用, 主要是采用BCS方法处理对相互作用. 最后, 我们还对 $Z=112$ 和 $Z=114$ 这两个新合成的元素的基态性质进行了相应的计算. 在下一节中, 我们将介绍以上两方面研究的背景和动机, 以及本文的框架结构.

1.1 研究背景与动机

伴随着实验的发展, 放射性核束物理成为了核物理研究的前沿领域. 这是因为近年来在放射性核束装置上的实验中发现了许多新的物理现象, 最主要是: 轻核中存在的中子晕, 如 ^{11}Li , ^{11}Be , ^{19}C 等[4]; 以及超重元素 $Z=110, 112, 114$ [5]的发现. 原子核的晕结构是弱束缚原子核系统所具有的特殊性质. 在通常的情况下, 原子核的中心具有正常的密度, 核外分布着密度较低的中子云. 由于核的最外分布的核子接近费米面, 导致这个最外分布的核子的分离能很小, 在原子核的表面有一个比较大的弥散, 具有非常大的空间分布, 就可能形成中子晕的结构. 弱束缚的原子核由于束缚态和连续态的耦合以及弹性散射, 使得晕的现象很难用传统的理论加以解释. 因为传统的理论模型都是建立在符合 β 稳定线附近核素的基态性质上得到的, 当模型推广到滴线附近的晕核时, 原有的模型就需要修正或者发展新的参数, 所以晕核的研究可以说是近几年来理论研究和实验探索的热门话题.

在发现原子核的早期，人们一直认为原子核是一种十分紧密的强束缚结构，核的半径与质量数成正比，遵循 $R = A^{1/3}$ 的增长规律. 中子的密度分布和质子有着类似的形状. 但是，中子晕是以前从未发现的弱束缚体系. 其中的质子和中子在数量上分布极为不对称，而且中子的密度分布距离费米面和占据的轨道也和之前的研究相差甚远. 围绕在原子核核心周围的中子晕可以看成是一些低密度的中子物质松散的结合在原子核核心上. 理论研究上很难严格划分中子皮和中子晕的结构，通常在数量上用中子和质子的均方根半径来表示中子在空间上的密度分布来区分：

$$\Delta R_{np} = \langle r_n^2 \rangle^{1/2} - \langle r_p^2 \rangle^{1/2}. \quad (1.1)$$

在一般的原子核中， ΔR_{np} 通常为0.1fm或者0.2fm，当原子核是中子皮或者中子晕结构的时候，这个数值会变得很大. 在理论研究中，为了对中子晕和中子皮进行区分，一般从中子的密度分布上来区分这两种中子形成的结构. 当中子密度分布的尾巴拖的较长时，既中子密度分布具有长尾型分布时，可以认为这个原子核是一个中子晕的结构. 另外，从数量上来说，中子皮可以包含很多个中子，但是中子晕最多只能有两个中子. 例如 ^{11}Li 有一对中子晕，而 ^{11}Be 只有一个中子晕的结构. 在实验上，它们的反应截面的分布进一步证实了中子晕的存在. 在2009年，日本理化研究所利用重离子加速器发现了 ^{31}Ne 的中子晕核结构[6]，从表1.2中可以看出，

表 1.2 ^{31}Ne 和 ^{19}C 入射到铅靶和碳靶时的单中子反应截面

Reaction	E/A (MeV)	σ_{-1n} (mb)	$\frac{\sigma_{-1n}(Pb)}{\sigma_{-1n}(C)}$	$\sigma_{-1n}(E1)$ (mb)
$^{31}\text{Ne}+\text{Pb}$	234	712(65)	9.0(1.1)	540(70)
$^{31}\text{Ne}+\text{C}$	230	79(7)		
$^{19}\text{C}+\text{Pb}$	243	969(34)	7.4(4)	690(70)
$^{19}\text{C}+\text{C}$	238	132(4)		

^{31}Ne 的反应截面9.0比通常的原子核要大的多，同时实验还测出了 ^{31}Ne 的单中子分离能 $S_n = 0.29 \pm 1.64\text{MeV}$. ^{31}Ne 属于丰中子原子核，其中第21个中子由于配对效应和弱束缚，游离在原子核势阱附近，形成一个较大的中子半径分布，即通常所说的晕结构. 既然实验结果表明了 ^{31}Ne 是一个具有晕结构的原子核，那么在理论计算中，也应该能得到相应的晕结构的特征. 现有的成熟的理论是以 β 稳定线附近的原子核为依据发展起来的，而 ^{31}Ne 是远离 β 稳定线的原子核. 这时候原有的理论有可能无法正确解释 ^{31}Ne 的晕结构，需要加入剩余相互作用，如张量力对理论进行推广和发展. 通过对Ne同位素链的计算再现 ^{31}Ne 的晕结构，从而验证了SHF方法在描述核结构方面

的正确性和有效性，以及在加入张量力之后理论计算对晕结构的解释的合理性。

另一方面，自从上世纪60年代理论上预言超重核的存在，合成超重核就成为了理论研究的实验发展的方向。实验上，超重核的合成推动着重离子物理的发展，最近几年在德国GSI和俄罗斯Dubna成功合成了 $Z=112$ 至 $Z=118$ 新的超重核元素，让超重核的研究成为了核物理的热点问题。理论上，大部分理论模型都成功地预言了超重核的性质，这些模型可以分为相对论模型，非相对论模型和宏观-微观模型。不同的模型之间有着各自的优点和缺点，而不同模型之间对超重核性质的预言也存在着差异。在超重核的理论研究中，原子核的基态性质是最基本的，能够正确预言超重核的结合能，形变值，能级结构和 α 衰变能，可以帮助实验寻找新的超重核。在本文中，我们用SHF方法对超重核的基态性质进行计算，并将讨论一些相关的问题。

超重核元素理论研究的主要困难是从 β 稳定线的核素外推到超重核区，Skyrme势参数、对相互作用参数、张量力参数是否合适等等。 β 稳定线的定义如图1.1所示，以核素中子数 N 为横轴、质子数 Z 为纵轴的平面图上稳定核素排列而成的曲线。随着 Z 的增大，质子的库伦排斥能与 $Z(Z-1)$ 成正比而增加得很快，需要额外的中子抵消库伦排斥作用。到 $A \geq 200$ 时， $N/Z \approx 1.5$ ，这种核素会发生 α 衰变或自发裂变，稳定的核素不复存在， β 稳定线中止。在 β 稳定线两侧不远的核素称为不稳定的放射性核素，把 β 稳定线上的质子数定义为 Z_0 ，一边是 $Z < Z_0$ ，质子数量短缺，中子数量相对过剩，称为丰中子核素，它们通过 β^- 衰变向 β 稳定线靠拢。另一边 $Z > Z_0$ ，中子数量短缺，称为缺中子核素，它们通过 β^+ 衰变或电子俘获向 β 稳定线靠拢。而在1966年，理论预测在稳定线前端，即 $Z=114$ ， $N=184$ 附近可能存在着半衰期为108年的稳定核素，这个稳定的核素是否存在，一直推动的理论计算和超重元素合成的发展。

近几年来，微观的理论描述也进行了大量的工作。但是微观理论描述所面临的问题是：不管是相对论平均场的描述还是非相对论平均场的描述，它们所预言的超重核，都依赖于各自所采用的相互作用。这也使得必须对整个元素周期表进行计算检验，才能得到确切的结论。而在实验方面，Oganessian提出了用双幻铅核作为靶的冷熔合反应来合成超铀系核[7]。另一类反应就是热熔合反应，它采用铀系核为靶，复合核激发能量高达几十个MeV，通过发射几个中子生成目标核。经过多年的实验累积，德国GSI已经成功合成了110、111和112号元素。日本也利用 ^{209}Bi 合成了113号元素。俄罗斯的Dubna利用热熔合反应，成功合成了115和118号元素。虽然目前合成的这些元素都已经非常的重，但是它们与当初设想的超重核稳定岛中的元素仍有一

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库