

中国核科学技术进展报告

(第二卷)

——中国核学会2011年学术年会论文集

第6册

- ▲ 核物理分卷
- ▲ 计算物理分卷
- ▲ 粒子加速器分卷

中国原子能出版社

中国核科学技术进展报告

(第二卷)

——中国核学会 2011 年学术年会论文集

第 6 册

核物理分卷

计算物理分卷

粒子加速器分卷

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国核科学技术进展报告. 第2卷 : 中国核学会 2011 年学术年会论文集. 第6分册, 核物理分卷、计算物理分卷、粒子加速器分卷 / 中国核学会主编.
—北京:中国原子能出版社,2012.10
ISBN 978-7-5022-5610-4

I. ①中… II. ①中… III. ①核技术—技术发展—研究报告—中国 IV. ①TL-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 150935 号

内 容 简 介

自首届全国学术年会以来,我国核科学技术取得长足发展。从基础核科学到核技术应用,从核电技术到核电配套产业集群,均呈现蓬勃发展态势。在这种时代背景下,中国核学会第二届全国学术年会于 2011 年 10 月 11 日至 14 日在贵阳召开。大会以“蓬勃发展中的核科学技术”为主题,吸引了来自政府部门、企业界、科研机构、高等院校及学术团体的知名院士、专家、教授及青年核科技工作者,共计 1200 余人(其中院士 31 人)与会。年会共征集论文 1192 篇,内容涵盖基础核科学、核电及其关联产业、核技术应用、核技术经济及核科技信息等学科。会后,经过各个二级学科专家组的评审,近 800 篇论文通过了学术(技术)审查,结集为《中国核科学技术进展报告(第二卷)》,全卷分为 10 册,并按 21 个二级学科设立分卷。

各册包含的分卷如下:第 1 册为“铀矿地质”分卷;第 2 册含“铀矿冶”分卷和“核能动力”分卷(上)两部分;第 3 册为“核能动力”分卷(下);第 4 册收录了“核材料”、“同位素分离”和“核化学与放射化学”3 个分卷;第 5 册内容为“辐射防护”和“核化工”两个分卷;第 6 册共收录了“核物理”、“计算物理”和“粒子加速器”3 个分卷;第 7 册则为“核电子学与核探测技术”、“脉冲功率技术及其应用”和“核聚变与等离子体物理”3 个分卷;第 8 册包含有“辐射研究与应用”、“同位素”和“核农学”3 个分卷;第 9 册收录有“核医学”和“核技术工业应用”两个分卷;第 10 册内容为“核情报(含计算机技术)”分卷和“核技术经济与管理现代化”分卷。

作为公共信息,文集还列出了中国核学会 2011 年学术年会的组织机构,《中国核科学技术进展报告(第二卷)》的总编委会和 21 个(二级学科)分卷编委会的名单。

中国核科学技术进展报告(第二卷)

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 杨树录 侯茸方
技术编辑 丁怀兰
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中画美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 890 mm×1240 mm 1/16
印 张 17 字 数 503 千字
版 次 2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-5610-4 定 价 100.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn> E-mail: atomep123@126.com
发行电话: 010-68452845

中国核学会 2011 年 学术年会大会组织机构

大会主席 翟 彦
执行主席 李冠兴
副 主 席 (按姓氏笔画排序)
丁中智 孙汉虹 邱爱慈 贺 禹 康克军
彭先觉 雷增光 穆占英

顾问委员会

主 任 王乃彦
委 员 (按姓氏笔画排序)
王大中 毛用泽 方守贤 吕 敏 朱永贻
阮可强 李德平 杨福家 吴德昌 陈能宽
胡思得 钱绍钧

组 委 会

主 任 雷增光
副 主 任 潘传红(常务) 刘长欣 王德林
委 员 (按姓氏笔画排序)
王 敏 王国保 石金水 冉木子 朱升云
刘 毅 苏艳如 李思凡 吴春喜 何作祥
辛 锋 张 闯 张一心 张生栋 杨华庭
罗志福 金 蓓 哈益明 赵京伟 顾 军
徐燕生 崔建春 康力新 程建平 简晓飞
蔚喜军
秘 书 秦昭曼 张宝珠 耿庆云 王义伟 马正锋
李 钢 伍险峰 张小庆 王 宇 黄 伟
苏 萍

学术委员会

主 任 李冠兴
副 主 任 彭先觉 邱爱慈
委 员 (按姓氏笔画排序)

王志东	王贻芳	邓建军	刘国治	李金英
李德连	沈文庆	吴中俭	吴国忠	何多慧
张飞凤	张焕乔	张锦荣	陈念念	陈盛祖
畅 欣	周永茂	赵志祥	赵宪庚	侯惠群
柴之芳	崔建春	樊明武	潘传红	潘自强

主办单位	中国核学会	
承办单位	贵阳市人民政府	
协办单位	中国核工业集团公司	中国核工业建设集团公司
	中国电力投资集团公司	国家核电技术有限公司
	中国广东核电集团有限公司	中国工程物理研究院
	清华大学	贵州大学

技术支持单位

铀矿地质分会、铀矿冶分会、核能动力分会、核材料分会、同位素分离分会、核化学与放射化学分会、核化工分会、辐射防护分会、核农学分会、计算物理分会、核物理分会、粒子加速器分会、核电子学与核探测技术分会、脉冲功率技术及其应用分会、核聚变与等离子体物理分会、同位素分会、核医学分会、辐射研究与应用分会、核技术工业应用分会、核情报分会、核技术经济与管理现代化分会

北京市核学会、湖南省核学会、江西省核学会、广东省核学会、四川省核学会、浙江省核学会、湖北省核学会、福建省核学会、陕西省核学会、辽宁省核学会、甘肃省核学会、山西省核学会、吉林省核学会、新疆自治区核学会、安徽省核学会、河南省核学会、江苏省核学会、上海市核学会、天津市核学会、贵州省核学会、黑龙江省核学会

中国核科学技术进展报告

(第二卷)

总编委会

主任 李冠兴

副主任 彭先觉 邱爱慈

委员 (按姓氏笔画排序)

王志东	王贻芳	邓建军	刘国治	李金英
李德连	沈文庆	吴中俭	吴国忠	何多慧
张飞凤	张焕乔	张锦荣	陈念念	陈盛祖
畅欣	周永茂	赵志祥	赵宪庚	侯惠群
柴之芳	崔建春	樊明武	潘传红	潘自强

编委会办公室(中国原子能出版社)

主任 侯惠群

副主任 杨树录

成员 (按姓氏笔画排序)

丁怀兰	卫广刚	王丹	付真	任重远
刘朔	孙凤春	张关铭	赵志军	侯茸方
谭俊				

核物理分卷

编委会

主任 张焕乔

副主任 朱升云

委员 (按姓氏笔画排序)
马余刚 叶邦角 叶沿林 朱 胜 肖国庆
邹冰松 陈熙萌 柳卫平

计算物理分卷

编委会

主任 贺贤土

副主任 朱少平

委员 (按姓氏笔画排序)
江 松 许爱国 李新亮 沈隆钧 蔚喜军

粒子加速器分卷

编委会

主任 何多慧

委员 (按姓氏笔画排序)
邱爱慈 张天爵 张 闯 吴宜灿 苏 萍
何 源 徐珣珊 赵红卫 赵振堂 郭之虞
唐传祥 唐靖宇 潘卫民 戴志敏

前 言

“创新是一个民族进步的灵魂,是国家兴旺发达的不竭动力”(江泽民《在全国科学技术大会上的讲话》),我国核科技事业的发展史实际上就是一部蓬勃发展的科技创新史。从基础核科学领域的原始创新,到核技术广泛应用于工业、农业、医学等各个领域,从成功研制核武器,到核电技术快速发展,核科学技术的每一项技术进步都闪耀着核科技工作者的创新精神。以“蓬勃发展中的核科学技术”为主题,中国核学会两年一度的全国学术年会于2011年于10月11日至14日在贵阳市隆重举行。本届学术年会由贵阳市人民政府承办。年会共征集论文1192篇,内容涵盖基础核科学、核电及其关联产业、核技术应用、核技术经济及核科技信息等学科。会议期间,来自政府部门、企业界、科研机构、高等院校及学术团体的知名院士、专家、教授及青年核科技工作者,共计1200余人(其中院士31人)参加会议。共同围绕我国核工业发展、核电及其相关产业技术进步、核技术应用研究、基础核科学创新和发展、以及核科技人才培养等问题,交流观点,畅谈体会,切磋学术,探讨对策,以期促进中国核科技事业健康发展。

本届学术年会会期三天,第一天为主会场邀请报告。13名相关领域的专家学者,分别介绍了近年来我国在核安全监管、核电及其关联产业技术进步、以及基础核科学、核技术应用、核武器等相关领域取得的进展、未来的发展趋势与展望。第二天和第三天为“分会场口头报告”和“张贴报告”时段,两天时间里,计有486名科技工作者分别在10个分会场进行“口头报告”交流,有600多篇报告在张贴报告区进行书面交流。大会全景式展示了我国核科技界近两年来最新研究成果,包括AP1000的工程建设实践、AP1400科研进展、CPR1000自主化实践、我国铀矿冶新技术、高放废物深地质处置技术、同步辐射光源进展与展望、中微子实验、同位素及辐照加工技术进步、核技术在医学领域的应用等。此外,核物理、核化学、粒子与加速器物理、核聚变与等离子体物理等基础学科领域的进展,以及核医学、核农学、同位素与辐照加工技术、核技术工业应用等应用学科领域的技术进步,也引起人们的极大兴趣。

由于日本福岛核事故的影响,与核电有关的议题成为本届学术年会关注的焦点,会议回顾和总结了福岛核事故的经验教训及其对世界核能发展的影响,提出了大力发展最先进的核电技术,加强核安全法规(制度)体系及核安全文化建设,加强铀资源保障工作和核燃料后端产业发展、实现核燃料闭式循环,大力推进核电及其关联产业全面协调可持续发展等项对策和建议。使参会代表不仅近距离了解我国核基础科学技术的最近研究成就,还感受到我国“发展核电的决心不能动摇”(张德江副总理语)和核电关联产业蓬

勃发展的态势。

本届学术年会期间,在各个二级学科推荐基础上,通过学术委员会严格评审,共有 66 篇论文分别获得“优秀学术论文”一、二、三等奖和“青年优秀科技论文奖”。会后,经过各个二级学科专家组的评审,近 800 篇论文通过了学术(技术)审查,结集为《中国核科学技术进展报告(第二卷)》。和上届学术年会的论文集一样,《中国核科学技术进展报告(第二卷)》分为 10 册,并按 21 个二级学科设立分卷。

中国核学会作为全国性学术团体,自创立以来,努力贯彻执行党的方针政策,紧密团结广大核科技工作者,搭建高水平学术交流平台,推动各学科间的交流与融合,提升我国核科技创新能力,为经济社会发展服务、为提高全民科学素质服务、为科学技术工作者服务。通过广大核科技工作者的共同努力,经过两次成功办会所积累的经验,中国核学会的全国学术年会已经初步显示出旺盛的生命力,成为我国核科技界规模最大、最具影响力的学术交流平台。《中国核科学技术进展报告(第二卷)》如期结集出版,便是这场盛会之具体成果,可喜可贺!我们期待着中国核学会全国学术年会这朵奇葩,在广大核科技工作者的精心呵护和关怀下,绽放更绚丽的光彩,结出更丰硕的成果!

中国核学会第二届全国学术年会的顺利召开,离不开贵阳市人民政府的大力支持,离不开全国大核科技工作者的理解与支持,离不开中国核学会全体分支机构和 21 个省级(地方)核学会的密切配合,因此,要首先感谢那些为学术年会顺利召开做出贡献的单位和个人;其次,在论文学术(技术)评审和论文集出版发行过程中,学科评审专家组、分卷编委会及总编委会的全体同仁,付出了辛勤的劳动,在此对他们严谨学风和治学态度表达崇高敬意;此外,中国核学会秘书处和出版社的工作人员,在文字的编辑和校核过程中,也做出了具体贡献。在此一并致谢。

《中国核科学技术进展报告(第二卷)》编委会
2012 年 5 月 24 日

目 录

核物理 Nuclear Physics

第一章 原子核的组成和性质 (1)

第一节 原子核的组成和性质 (1) 第二节 原子核的稳定性 (2)

第三节 原子核的衰变 (3) 第四节 原子核的裂变 (4)

第五节 原子核的聚变 (5)

第六节 原子核的辐射 (6) 第七节 原子核的探测 (7)

目 录

重原子核的大集团预形成因子 屈卫卫,张高龙,乐小云(1)

奇奇核¹²²⁻¹³²Cs 同位素的候选手征双重带研究 王烈林,卢景彬,段 涛,等(7)

Rossi- α 方法测量金属核装置的瞬发中子衰减常数 ... 蒋 勇,范晓强,刘晓波,等(12)

八重态奇异重子电磁形状因子偶极公式的研究 詹金峰,刘永录,黄明球(17)

闪烁体型中子探测器的初步模拟研究 吴 冲,张 强,孙志嘉,等(23)

α -Al₂O₃ 中的中子场空间分布特性研究 黑大千,贾文宝,单 卿,等(28)

镤(²³³Pa)对钍基反应堆启停堆反应性的影响研究 侯周森,周 涛,孙灿辉(32)

α 电沉积样品制备实验研究 高 静,来永芳,沈春霞(37)

重离子束在含肿瘤 Snyder 修正头部模型中输运的蒙特卡罗模拟
..... 奉光华,龚学余,左国平,等(43)

氦原子直接电离的等电荷态效应研究 王兴安,陈熙萌,邵剑雄(50)

穆斯堡尔谱学、正电子湮没技术与非晶纳米晶材料研究
..... 晁月盛,朱建宇,高翔宇,等(55)

基于介子理论的核子作用能量耦合常数 李国仁,曾 兵(60)

重原子核的大集团预形成因子

屈卫卫, 张高龙, 乐小云

(北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

摘要:在预形成集团模型框架下分析了偶偶重核的大集团(^{14}C , $^{24,26}\text{Ne}$, $^{28,30}\text{Mg}$, ^{32}Si 等)预形成因子, 用基于密度依赖的核子-核子相互作用的双折叠模型来计算核势。计算表明, 穿透概率随着反应能急剧的变化, 穿透概率主要决定大集团放射性的半衰期, 壳效应在大集团的预形成中起到重要作用。剩余子核越接近幻数或者双幻数, 母核中大集团放射性的预形成越快。在大集团放射性中可以明显地展示壳效应, 大集团放射性也表明了类铅核中的质子-中子对称性的特点, 预形成因子能够提供核结构信息。

关键词:大集团放射性; 集团模型; 预形成因子; 壳层效应

1896 年, 贝克勒耳首次发现了天然放射性; 1908 年卢瑟福首次从原子核的 α 衰变中发现了 α 放射性^[1-2]。盖末等人^[4-5]则成功地用量子隧道效应解释了 α 放射性。从那时候起人们开始探索不稳定核的衰变现象。1980 年有人从理论上提出了一种比 α 粒子更重的放射性集团^[6]。1984 年, 实验上发现了 ^{223}Ra 的 ^{14}C 放射性^[7-8]。目前有 ^{20}O , ^{23}F , $^{24,26}\text{Ne}$, $^{28,30}\text{Mg}$, $^{32,34}\text{Si}$ 等集团, 被陆续从 Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U, Pu, Cm 等超铅区的原子核中发现。

在理论上, 用过很多模型来解释集团放射性, 比如壳模型、集团模型和类裂变模型^[9]等。通常, 有两种模型来解释和预测新的衰变模式。第一个是裂变模型, 它的思想是: 核穿过势垒在不断地变形后达到断裂的结构; 第二个是集团预形成模型, 它的思想是: 假设在母核的基态上许多核子是冷却的且均被重新排布, 在集团穿越势垒之前集团在母核中预先形成, 所以产生了不同的集团放射性。集团预形成的概率称为预形成因子。任中洲等人用基于密度依赖的集团模型分析了不同集团衰变的半衰期, 同时把预形成因子引入到这个模型中^[10]。理论的结果和实验的结果有些差别。在参考文献^[11]中, 预形成因子等于 1, 计算结果和实验数据有数量级的差别, 这表明预形成因子导致了实验值和理论值之间的差别; 同时预形成概率也通过近似方法分析过, 得出通用的曲线^[13-16]。因此在母核中不同的集团放射性有不同的预形成因子, 而不是一个定值。在这两种模型中, 衰变常量定义为穿透概率、振动频率和预形成因子的乘积。母核的集团放射性是经过: 首先预形成集团, 然后集团穿透势垒。在母核的集团衰变过程中, 母核被分成两部分, 其中一部分叫做集团, 另一部分叫做剩余子核。集团比 α 粒子要重, 但是比最轻的剩余子核要轻。穿透概率可以利用考虑了量子隧道效应的 WKB 近似简单地计算出来, 振动频率也可容易得到。剩下主要的问题是在这三项中怎样去估算预形成因子的大小。

在集团衰变中, 势垒在集团和剩余子核之间形成。总的势包括: 核势、库仑势和离心势。库仑势和离心势可以通过传统的方法得到。剩余的问题是怎样得到核势。在这篇文章中, 集团和剩余子核之间的核势是通过基于密度依赖核子-核子相互作用的双折叠模型计算得到的。有人用这个模型很好地得到光学势的实部^[12], 而且这个模型还可以计算熔合反应的激发函数和垒分布^[17-18]。目前, 许多集团放射性已经在超铅区发现。许多模型可用来计算集团放射性的半衰期, 因此半衰期可以准确地给出。通过半衰期可以得到衰变常量。在计算穿透概率和振动频率的时候, 释放的能量可以通过实验值得到^[19]。所以, 集团预形成因子可以通过半衰期和释放能量得到。通过分析和比较预形成因子,

作者简介:屈卫卫(1988—), 男, 山东邹城人, 硕士生, 现主要从事核结构等科研工作

基金项目:国家自然科学基金(11175011)、北京航空航天大学 2011 年软件开发环境国家重点实验室自主研究课题资助项目(SKLSDE-2011ZX-20)

可以得到核结构信息。

1 计算方法

发射集团的穿透概率可以通过 WKB 近似得到,公式如下,

$$P = \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_{R_1}^{R_2} \sqrt{2\mu(V(R) - Q)} dR\right] \quad (1)$$

其中 μ 是集团和子核的折合质量。 Q 是集团发射释放能量。 R_1 和 R_2 是 WKB 近似积分的两个节点,由下面式子定出,

$$V(R_1) = Q = V(R_2) \quad (2)$$

在集团和子核之间的总相互作用势 $V(R)$ 由下式给出,

$$V(R) = V_N(R) + V_C(R) + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2\mu R^2} \quad (3)$$

上式中最后一项是离心势。 μ 是集团和子核的折合质量。 l 是集团带走的角动量,根据自旋宇称守恒,对偶偶核的集团衰变 l 等于 0。

在双折叠模型中,核势 V_N 由下式给出

$$V_N(R) = \iint \rho_1(\vec{r}_1) v(s = |\vec{R} + \vec{r}_2 - \vec{r}_1|) \rho_2(\vec{r}_2) d\vec{r}_1 d\vec{r}_2 \quad (4)$$

其中, ρ_1, ρ_2 分别是集团和子核物质密度分布函数。 ^{14}C 密度分布函数可以由下式表示^[20],

$$\rho_1(r) = 0.15817(1 + 1.38r^2/1.73^2)\exp(-r^2/1.73^2) \quad (5)$$

其他集团和子核的密度分布函数 $\rho_1(r)$ 和 $\rho_2(r)$ 可以根据球对称的费米函数给出,

$$\rho(r) = \rho_0 / [1 + \exp((r - c)/a)] \quad (6)$$

其中 c 是半密度半径,它由下式给出^[21-22]

$$c = r_\rho(1 - \pi^2 a^2 / 3r_\rho^2) \quad (7)$$

其中有 $r_\rho = 1.13A_i^{1/3}$, 密度弥散系数 $a \approx 0.54 \text{ fm}$, A_i 是集团或者子核的质量数。 ρ_0 的值由归一化得到,则有

$$\int \rho(r) dr = A_i \quad (8)$$

在式(4)中两核之间的 NN 相互作用 v 经常用 M3Y 相互作用表示, M3Y 相互作用被设计成复制谐振子基下的 G 矩阵元素^[23]。密度依赖的 NN 相互作用由下式给出,

$$v(s, \rho, E) = F(\rho, E) V^{(M3Y)}(s, E) \quad (9)$$

$$V^{(M3Y)}(s, E) = 7999 \frac{e^{-4s}}{4s} - 2134 \frac{e^{-2.5s}}{2.5s} + \hat{J}_{00}(E) \delta(s) \quad (10)$$

其中,零力程项表示为

$$\hat{J}_{00}(E) \approx -276[1 - 0.005(E/A)] \text{ MeVfm}^3 \quad (11)$$

密度依赖系数为

$$F(\rho, E) = C[1 - \beta(E)\rho_1^{2/3}][1 - \beta(E)\rho_2^{2/3}] \quad (12)$$

(12) 式的形式可以成功地解释散射和 α 放射性。在 $C=2.06, \beta=1.6257 \text{ fm}^2$ 和 $n=2/3$ 下原子核不可压缩系数的理论结果和实验数据非常吻合^[24]。其中 $\rho_1(r)$ 和 $\rho_2(r)$ 分别是集团和子核的密度分布函数。

集团和子核间的库仑势计算。如下

$$V_C(R) = Z_1 Z_2 e^2 \begin{cases} \frac{1}{R} & (R \geq R_C) \\ \frac{1}{2R_C} \left[3 - \left(\frac{R}{R_C} \right)^2 \right] & (R < R_C) \end{cases} \quad (13)$$

其中假设子核为球形的电荷分布,发射的集团假设为点粒子, $e^2 = 1.44 \text{ MeVfm}$, $R_C = c_{\text{cluster}} + c_d, c_{\text{cluster}},$

c_d 可以用式(7)得到。 Z_1, Z_2 分别表示集团和子核的原子序数。

衰变常量 λ 可以由集团衰变的半衰期 $T_{1/2}$ 得到

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \tag{14}$$

振动频率可以通过传统的方法得到^[25]

$$\nu = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{2E_K}{M_a}} \tag{15}$$

其中 $E_K = Q(1 - \frac{M_a}{M})$, M_a 和 M 分别是集团和母核的质量。 R 是母核的半径,由下式给出

$$R = (1.28A^{\frac{1}{3}} + 0.8A^{-\frac{1}{3}} - 0.76)\text{fm} \tag{16}$$

其中 A 是母核的质量数。预形成因子可以从下式得到

$$P_0 = \frac{\lambda}{\nu P} \tag{17}$$

其中, λ, ν, P 分别从式(14), (15), (1)中得到。

2 结果与讨论

表 1 中列出了超铅区的偶偶核的振动频率的值、穿透概率 P 和预形成因子 P_0 。可以看出振动频率保持在 10^{21}s^{-1} 数量级上,变化很小。然而穿透概率的变化范围非常大,从 10^{-27} 到 10^{-38} ,相比振动频率的变化要大得多。对同一个集团,释放能量和预形成因子只有微小的变化,但是穿透概率变化仍很大。振动频率和穿透概率都和释放能量有关。这表明振动频率随着释放能量只有微小的变化,然而穿透概率却变化剧烈。所以,释放能量对集团的穿透有很大的关系。穿透概率主要决定了从母核中发生的集团放射性的半衰期。

表 1 重核中不同集团的预形成因子

Nuclei	cluster	Q/MeV	$T_{1/2}$	$\nu(\text{s}^{-1}) \times 10^{22}$	P	P_0
²²² Ra	¹⁴ C	31.84	1.0×10^{11}	0.1449	9.286×10^{-29}	5.152×10^{-5}
²²⁴ Ra	¹⁴ C	30.53	5.9×10^{15}	0.1415	2.920×10^{-31}	2.844×10^{-7}
²²⁶ Ra	¹⁴ C	28.21	1.8×10^{21}	0.1356	2.982×10^{-36}	9.523×10^{-8}
²²⁶ Th	¹⁴ C	30.55	$>2.0 \times 10^{15}$	0.1411	3.823×10^{-33}	$<6.441 \times 10^{-5}$
²²⁶ Th	¹⁸ O	45.73	$>2.0 \times 10^{15}$	0.1548	6.618×10^{-31}	$<3.383 \times 10^{-7}$
²²⁸ Th	²⁰ O	44.73	5.0×10^{20}	0.1445	1.904×10^{-32}	5.038×10^{-11}
²³⁰ U	²² Ne	61.40	$>1.6 \times 10^{18}$	0.1557	3.759×10^{-30}	$<7.402 \times 10^{-11}$
²³⁰ Th	²⁴ Ne	57.76	4.1×10^{24}	0.1439	3.771×10^{-33}	3.115×10^{-14}
²³⁰ U	²⁴ Ne	61.36	$>1.6 \times 10^{18}$	0.1483	1.901×10^{-30}	$<1.537 \times 10^{-10}$
²³² U	²⁴ Ne	62.31	2.5×10^{20}	0.1491	6.669×10^{-29}	2.775×10^{-14}
²³⁴ Pu	²⁴ Ne	58.84	$3.5 \times 10^{26} *$	0.1445	5.420×10^{-34}	2.529×10^{-15}
²³⁶ Pu	²⁴ Ne	55.96	$1.5 \times 10^{32} *$	0.1406	1.307×10^{-38}	2.514×10^{-16}
²³⁴ Pu	²⁶ Ne	59.47	$8.1 \times 10^{25} *$	0.1389	2.147×10^{-33}	2.869×10^{-15}
²³⁶ Pu	²⁶ Ne	56.75	$3.0 \times 10^{31} *$	0.1354	8.146×10^{-38}	2.095×10^{-16}
²³² U	²⁸ Mg	74.33	$5.5 \times 10^{25} *$	0.1493	2.911×10^{-31}	2.90×10^{-17}
²³⁴ Pu	²⁸ Mg	74.13	5.6×10^{25}	0.1487	2.471×10^{-31}	3.369×10^{-17}

Nuclei	cluster	Q/MeV	$T_{1/2}$	$\nu(\text{s}^{-1}) \times 10^{22}$	P	P_0
^{236}Pu	^{28}Mg	79.67	$1.0 \times 10^{20} *$	0.1538	6.694×10^{-27}	6.733×10^{-16}
^{238}Pu	^{28}Mg	75.93	$2.2 \times 10^{26} *$	0.1498	1.165×10^{-31}	1.805×10^{-17}
^{236}Pu	^{30}Mg	72.48	$1.9 \times 10^{29} *$	0.1411	9.981×10^{-34}	2.617×10^{-18}
^{238}Pu	^{30}Mg	77.0	$6.7 \times 10^{24} *$	0.1450	2.143×10^{-30}	3.329×10^{-17}
^{238}Pu	^{32}Si	91.21	2.0×10^{25}	0.1521	2.697×10^{-29}	8.471×10^{-19}

第一、二两列分别表示的是母核和集团。第三和第四分别表示反应能和半衰期。振动频率在第五列列出。第六列和最后一列分别表示了穿透概率和预形成因子。

* 代表引自[26],其余引自[11]

在表 1 中,重核中发射重的集团,像 ^{14}C , $^{18,20}\text{O}$, $^{22,24,26}\text{Ne}$, $^{28,30}\text{Mg}$, ^{32}Si ,它们明显比 α 粒子要重。通常 α 衰变也是从这些重核中发现的。 α 衰变和核的集团发射分别被研究过^[15-17]。当 $N=126$ 时观测到强的壳效应。如果考虑到壳效应,实验数据可以很好地和计算值吻合。在参考文献^[28]中,研究了不同核中 α 粒子的预形成因子。改变不同的核它的值保持在 10^{-1} 的量级。这个值比表 1 中的其他的集团要大得多,而且集团越重,预形成因子越小。所以 α 衰变比集团衰变更容易被观察到,在核的衰变中很难找到集团放射性。相比于 α 结构,以上的集团像 ^{14}C , $^{18,20}\text{O}$, $^{22,24,26}\text{Ne}$, $^{28,30}\text{Mg}$, ^{32}Si ,它们的结构分别为 $3\alpha+2n$, $4\alpha+2n$, $4\alpha+4n$, $5\alpha+2n$, $5\alpha+4n$, $5\alpha+6n$, $6\alpha+4n$, $6\alpha+6n$ 和 $7\alpha+4n$,它们不像 α 结构。在集团放射性中,子核主要是在双闭壳核 ^{208}Pb 附近的 Hg 和 Pb 的同位素。对 ^{226}Th 核, ^{14}C 的预形成因子要大于 ^{18}O 的,说明 ^{14}C 的在 ^{226}Th 中预形成最快,快于其他的核。在 ^{234}Pu 中,相比 $^{24,26}\text{Ne}$, ^{28}Mg 的预形成因子, ^{26}Ne 的最大。通过比较它们的结构和衰变可以观察到,一方面,对 $^{24,26}\text{Ne}$ 和 ^{28}Mg 分别是 $5\alpha+4n$, $5\alpha+6n$, $6\alpha+4n$ 结构;另一方面,当 ^{234}Pu 母核通过这三种方式衰变时,当发射 ^{26}Ne 时,其剩余子核正好是双闭壳核的 ^{208}Pb 。 ^{230}U 核中, ^{24}Ne ($5\alpha+4n$) 的预形成因子比 ^{22}Ne ($5\alpha+2n$) 的大。 ^{238}U 中, ^{30}Mg 的预形成因子相比于 ^{28}Mg 和 ^{32}Si 最大, ^{30}Mg , ^{28}Mg 和 ^{32}Si 的结构分别为 $6\alpha+4n$, $6\alpha+6n$ 和 $7\alpha+4n$;而且,当发射 ^{30}Mg 时,剩余子核为 ^{208}Pb 。这表明,非 α 结构的集团更容易从超铅区的核中衰变,发射的集团表明这个区域中中子-质子对称性特征;而且,还可以观察到强的壳效应。当剩余子核为双闭壳核 ^{208}Pb 时,预形成因子出现极大值。这表明,壳效应在超铅区集团发射的过程中发挥重要作用,剩余子核越接近幻数核,母核中集团的预形成越快。

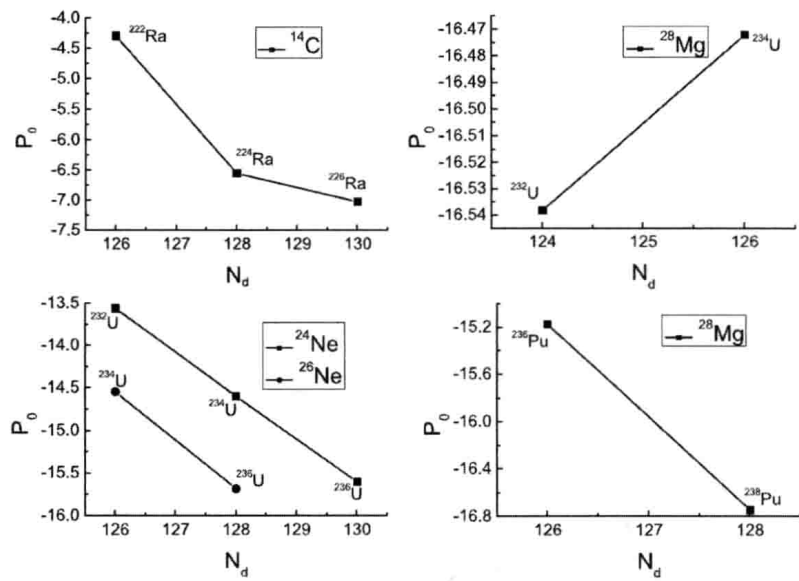


图 1 在 Ra,U,Pu 的同位素中 ^{14}C , ^{28}Mg , $^{24,26}\text{Ne}$ 的预形成因子。 N_d 表示剩余子核的中子数。