

# 核结构的新机遇\*

陈永寿

(中国原子能科学研究院 北京 102413)  
(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

**摘要** 讨论核结构的新机遇及其发展特点,着重从大型实验设备和技术的革命性进步的角度,阐明核结构的新机遇和发展的坚实基础和保证.

**关键词** 核结构 壳效应 放射性核束  $\gamma$ 探测器

## 1 引言

原子核是物质存在的一个特殊层次,它作为现代物理学的一个研究对象,其魅力在于:原子核是一个强相互作用的微观量子多体体系,是研究核力和多体两大基本物理问题的天然实验室;它同时又是研究其他基本相互作用的重要物理体系,如弱相互作用、电磁相互作用,甚至重力相互作用(中子星).核结构研究的基本目标是揭示核多体体系和核力的本质,从而深化对物质及其运动规律的认识.当前,核结构研究正面临着发展的新机遇.

核结构的新机遇可以从当前核结构的前沿发展方向和许多热门研究课题的事实看出来,在这方面,本届核结构研讨会的许多篇学术论文中有较全面的体现.本文将从另一个角度来审视这个问题,即重大实验设备、技术和方法的发展,必定会产生相应的开拓新研究领域的巨大能力,从而将核结构研究推进到一个崭新的发展阶段.

## 2 新一代放射性核束加速器群

20世纪70年代重离子加速器的兴建,开创了极端条件下核结构-高自旋态的新研究领域.原子核集体运动的研究得到前所未有的发展,发现了许多新物理现象,如高速转动动态、转动带的回弯现象、裂变双峰位垒结构、变形核的壳效应、奇异核形变、超形变、高速转动热核集体模、大振幅集体运动等.重离子反应机制的研究也取得了不少突破性的进展和发现.今天核物理的发展面临类似于30年前的形势,这就是当前出现的新一代放射性核束加速器兴建热.这个形势不是简单的重复,而是有质的区别.过去几十年的努力,加速了大约300种

\*国家自然科学基金(19935030, 10075078)和国家重点基础研究发展规划(G20000774)资助

重离子稳定核束达到克服重离子库仑位垒的能量. 而今天, 核科学家将在不久的将来, 利用放射性核束加速器和次级束, 原则上可以获得大约 2500 种重离子不稳定核束达到引起核反应的能量, 可以研究远离稳定线直至滴线原子核的结构和核反应. 另一个特点是, 到 2005 年, 全世界将有十几台放射性核束加速器装置建成和投入运行. 在短短的几年时间里, 同时有这么多台加速器先后投入实验, 这在核物理发展史上是极为少见的情况. 70 年代开始的重离子加速器兴建热, 原本的重要动机之一是合成超重元素. 后来虽然远未能如预期那么快地获得超重元素, 但却带来了 30 年的重离子物理研究的繁荣. 我们有理由相信, 当前的放射性核束加速器兴建热, 将带来今后十几年的放射性核束物理和核天体物理研究的繁荣, 以及重离子物理研究的继续繁荣.

一大批放射性核束加速器的兴建, 加上其它类型的加速器, 将使实验核物理研究手段的总体水平达到前所未有的规模和完备程度. 核物理的束流有了从轻子束、介子束、重离子束直到几千种的放射性核束的品种和由低到高的入射能量, 它们的联合应用, 将使核物理实验研究达到前所未有的广度和深度. 就放射性核束的应用而言, 将可以研究原子核在同位旋自由度方向上的新物理现象和天体核过程. 当前一些有兴趣的热门课题列在表 1 中, 并给出了研究该问题的典型的反应截面和所需的放射性核束束流强度的估计值. 表中列出的截面和流强值不可能是完全准确的, 但可以看出一些特点或规律. 例如, 由表 1 可见, 不同流强有不同的用处, 即使流强较低放射性核束装置也可用来做一些有意义的研究课题, 如测量不稳定核的质量等.

表 1 实验课题及其典型截面和束流强度

实验课题	$\sigma/\text{mb}$	束流强度(N/s)
质量、矩、衰变	$10^{-4} - 10^3$	$1 - 10^3$
中子滴线、晕、皮核	$10 - 100$	$10^3 - 10^8$
s 过程核、慢中子俘获	$10 - 100$	$10^8 - 10^{12}$
r 过程核、快中子俘获	$10 - 100$	$10^2 - 10^8$
壳结构及其弱化、消失	$1 - 10$	$10^5 - 10^9$
N-N 有效相互作用	$10^{-1} - 1$	$10^6 - 10^{12}$
质子滴线核谱学、质子发射	$10^{-2} - 10^{-1}$	$10^6 - 10^{12}$
辐射俘获	$10^{-4} - 10^{-3}$	$10^9 - 10^{12}$
超重核	$\sim 10^{-9}$	$> 10^{12}$

由于放射性核束加速器的前所未有的发展和兴建, 原子核结构的发展方向, 从现在起到今后的若干年间, 肯定是强调与天体物理相关的核结构研究, 主要是不稳定核的结构、性质、衰变和核反应动力学的研究. 核物理学家将在原子核同位旋自由度方向上进行新探索. 但是, 也必须同时注意到, 核结构的新机遇还体现在核物理本身的发展层面上, 其道理在第 3 节中讨论.

在恒星演化和某些爆发性天体事件中,  $r_p$  过程起着重要作用, 它发生在接近质子滴线的丰质子轻核到中重核核区.  $r_p$  过程的研究需要这些核细致的核结构知识. 这些核的低能级密度相当低, 核反应率大小往往是由原子核的一两条能量落在 Gamow 峰中的共振能

级来决定,甚至于由一条共振能级的拖入 Gamow 峰中的“尾巴”所决定.简而言之,天体物理等离子体中的带电粒子核反应率正比于参加反应的原子核的共振能级和 Gamow 峰的重叠面积.而精确地测量和计算丰质子轻核和中重核的低能共振能级的位置和半宽度的问题,无疑是对核物理实验和理论研究的巨大挑战.近期,相当大的一部分放射性核束加速器将用于研究 rp 过程,因此, rp 核结构和反应是个重点.

中子滴线附近的丰中子核结构导致一些全新的概念.实验上已发现了中子晕结构的存在.我们正在探明在丰中子核区的新壳结构,在那里,过去几十年来牢固建立的壳结构(幻数)有可能完全消失.图 1 是原子核的单粒子能谱,图左边是  $\beta$  稳定线附近原子核的单粒子能谱,很大的单粒子能穴给出了清楚的壳层结构和幻数,并由许多基本实验事实所证明;图右边是谐振势的单粒子能谱,能级高度简并,对轻核有一定程度的实用性;图中部是可能的中子滴线附近原子核的单粒子能级,是一种具有高度弥散表面的核势的单粒子能谱,这里没有明显的能穴,能级趋于相对均匀的分布,有嵌套的角动量  $j$  值.因此,从更广义的单粒子能谱结构的概念来讲,我们熟知的幻数只不过是一种特殊的情况.原子核结构的某些基本概念有可能在这里面临巨大困难.首先,核幻数会改变或者就没有了幻数.其次,在核理论中关于“核实”和“价空间”这些非常有用的概念可能失去意义,那么一些相应的模型理论就失去了基础.在高自旋态物理中起重要作用的“唯一”宇称单粒子轨道的结构不再存在.  $SU(3)$  对称性也会受到挑战.总之,我们必须思考核结构的新概念和发展新理论.

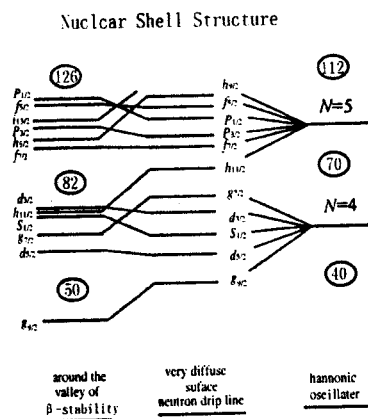


图 1 单粒子能谱

### 3 $\gamma$ 探测器的第四次革命

$\gamma$  探测器在核结构研究中有特别重要的作用.每次  $\gamma$  探测器的革命性发展都会带来核结构研究的新里程碑的成就.碘化钠(NaI)探测器可以观测到低自旋转动态跃迁  $\gamma$  射线,但分辨率不好.若从碘化钠探测器之后的  $\gamma$  探测器的发展算起, $\gamma$  探测器大概已经过了三次革命,而当前正经历着第四次革命.第一次革命是反康锗探测器(Compton Supressed Ge - Detector)出现,分辨本领比 NaI 提高了一个量级,使观测最高角动量从几  $\hbar$  提高到  $\sim 20\hbar$ ,跃过了带回弯.第二次革命是反康锗阵列探测器(C. S. Ge - Detector Array)出现,以欧洲 TESSA 系列为代表,分辨本领再提高 1—2 个量级,发现了超形变带,使观测最高角动量达到  $\sim 60\hbar$ .第三次革命是超级晶体球谱仪(Super - Crystal Ball)出现,它由上百个反康 Ge 探测器在  $4\pi$  空间上列阵组成,以美国 GAMMASPHERE 为代表,分辨本领再提高  $\sim 2$  个量级(比 NaI 提高了 4—5 个量级),使观测最高角动量达到  $70\hbar$ — $80\hbar$ (接近了原子核可承受的角动量极限),发现了许多激发态超形变带,开创了超形变核谱学,并使研究超形变态到正常

形变态的奇特跃迁成为可能.

$\gamma$  探测器的第四次革命是美国贝克莱实验室当前正在研制的 GRETA (Gamma Ray Energy Tracking Array),  $\gamma$  射线能量跟踪阵列探测器<sup>[1]</sup>. 它的原理是建立在  $\gamma$  辐射探测的新概念, 即跟踪  $\gamma$  辐射的整个散射过程的基础上, 它不“反康”. 它由高度分块的 Ge 探测器在球壳上列阵组成. 它通过测量能量和空间三维位置来跟踪和分辨多级  $\gamma$  射线. 由图 2 可见, GRETA 与 GAMMASPHERE 比较, 分辨本领提高 3 个量级以上, 效率从  $\sim 10\%$  提高到  $\sim 70\%$ .  $\gamma$  探测器的第四次革命是深刻的, 可以预期原子核结构研究必然有重大突破, 至少可发现某些新的奇异核形变. 奇异形变是核物理研究的一个重要内容, 它反映了强相互作用微观量子多体体系的基本对称性及其破缺. 在美国长期核科学计划提出的几种奇异核形状中, 超形

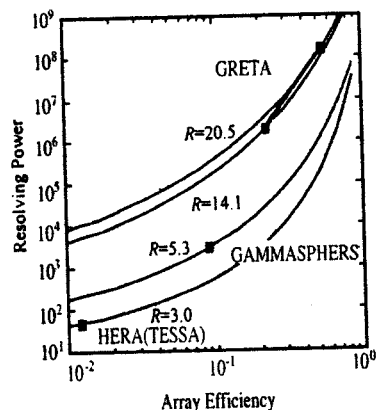


图 2 GRETA 的分辨本领和效率曲线

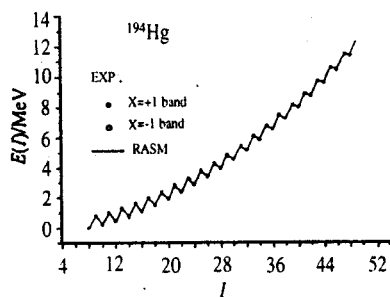


图 3  $^{194}\text{Hg}$  八极带, RASM 理论与实验比较

变已发现, 而扁椭超形变、巨超形变等尚未发现, 梨形超形变有迹象. 最近在美国阿贡实验室发现了  $^{194}\text{Hg}$  的一条负宇称超形变带, 被解释为八极振动带<sup>[2]</sup>, 不同意见又认为是单粒子性质的负宇称带. 最近, 我们建立的反射不对称壳模型的计算结果与实验很好符合(见图 3), 从而可解释为八极转动带, 即认为这可能是高速转动梨形超形变核的发现. 像 GRETA 这样的新一代  $\gamma$  探测器运行后, 可以通过更深入的实验来澄清这些分歧, 确定该带是否是八极转动带, 即梨形超形变核的发现. 此外, 由于放射性束流强很低, 像 GRETA 这种高效探测器是特别重要的, 因此, 这也预示了不稳定核核结构研究的新突

破, 甚至有可能开创奇异同位旋核高自旋态的新领域.

#### 4 核结构新机遇的多层面特点

核结构, 实际上整个核物理, 面临着发展的新机遇, 而且在多层面上同时展开. 在超高能、亚核子层面上展开, 主要探索强相互作用的本源和物质新形态. 在核物理本身层面上展开, 主要深入探索强相互作用量子多体体系和核力的本质. 在核交叉科学的层面上展开, 主要是核天体物理发展的新机遇, 探索天体演化、元素起源、乃至生命的本质. 在今后若干年中, 核结构研究显然会强调与天体物理相关的核结构研究, 这是核结构在交叉科学层面上的新机遇, 它是由一大批新一代放射性核束加速器的兴建和运行的形势所决定的. 同时, 我们

也必须注意到,核结构的新机遇还必然会体现在核物理本身发展层面上,而新一代超级晶体球 $\gamma$ 探测器的发展,则是这方面新机遇具有代表性的重要实验技术保证.在原子核质量极限的探索中,超重核核结构的新机遇正在打开其大门,这又是核物理本身发展层面上的一个重要新领域.

一大批,包括中国的,新一代放射性核束加速器、新一代超级 $\gamma$ 探测器谱仪的发展和兴建,以及超级并行计算机的应用,是核结构新机遇,新发展和新突破的坚实基础和保证.

### 参考文献(References)

- 1 Deleplanque M A, Lee I Y et al. NIM, 1999, A430 : 292
- 2 Hackman G et al. Phys. Rev. Lett. , 1997, 79 : 4100

## New Opportunities of Nuclear Structure \*

CHEN Yong-Shou

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(Institute of Theoretical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** This paper discusses the new opportunities of nuclear structure and its characteristic of developments towards multi-directions. The revolutionary progresses of major nuclear experimental facilities and techniques are emphasized to be a solid foundation and guaranty for the new opportunities and developments of nuclear structure.

**Key words** nuclear structure, shell effects, radioactive nuclear beam,  $\gamma$ -detector

---

\* Supported by NSFC (19935030, 10075078) and Major State Basic Research Development Program of China (G20000774)