

·学科发展·

# “新奇核”性质的研究

## ——论 HI-13 串行加速器核物理实验室的发展

丁大钊

(中国原子能科学研究院)

**【摘要】** 本文论述90年代以后原子核物理学的前沿研究领域。在核内亚核子自由度、相对论重离子碰撞和“传统”核物理研究三者之中，“传统”核物理仍占有重要地位。它将在核系统的激发能、角动量和同位旋三个自由度深入进行。对有异常中子与质子比值的“新奇”核的多侧面研究，将对核性质提供许多新知识，这是今后低能加速器上核物理的主要研究方向。串行加速器在“传统”核物理研究中是有力的工具。中国原子能科学研究院的 HI-13 串行加速器是一台高效运行的设备。文中提出一个发展与提高该加速器的计划，使该实验室有可能迎接核物理发展的挑战和保持国际竞争能力。

原子核作为物质结构的一个层次，是一个由强相互作用的中子与质子所组成的量子多体体系。在该体系中，强、电磁、弱相互作用都起作用。随着粒子物理研究的深入，人们已知中子、质子等强子是由胶子作用束缚的夸克构成。因此，原子核本身有其丰富的研究内容，有多侧面的运动规律尚待深入研究，同时它又是研究物质结构及其基本组成成份相互作用的一个天然实验室。随着核技术的广泛应用于各个科学与技术领域，原子核又成为认识与改造自然界的强有力工具。因此自本世纪初以来，核物理研究一直是一个蓬勃发展的学科。随着认识的深化，研究工具的发展，不同时期有不同的前沿研究领域。自40年代相继发现  $\mu$  介子与  $\pi$  介子后，核物理研究与粒子物理研究明确分流。但自80年代以来，随着粒子物理的“标准模型”的确立，一些退役的高能加速器转向加速重离子，开展高能核-核碰撞以及由于多年研究积累的关于亚核子层次知识的不断丰富，粒子物理与核物理又在研究夸克、胶子相互作用的层次上交汇了起来。

### 一、原子核研究的前沿领域

#### 1. 核内亚核子自由度的研究

通过高能粒子与核相互作用是研究组成核子的各种组份在核内环境下的各种规律的最直接的途径。当然这种自由度在低能核物理中也有所反映，例如质子俘获热中子的截面测量精度极高，为  $334.2 \pm 0.5 \text{ mb}$ ；但是理论上不考虑由核子间  $\pi$  介子交换形成的  $\Delta$  粒子自由度，则截面值为  $302.5 \text{ mb}$ ；只有计及  $\Delta$  后，才能使差别缩小到5%，还应考虑  $\rho, \omega$  等介子的交换。但是明确与直接的研究只有通过高能电子在核上散射的大动量转移区的测量才能得到<sup>[1,2]</sup>，如图1所示。图1(b)中虚线是三体精确解，在高  $q$  区可差一个数量级以上，只有计及单介子交换的长程作用，才能与实验较好地拟合。

本文于1992年7月10日收到

在这各研究中,多采用高能电子(或介子)作为探针,这过程对核的激发相对较弱。这不仅是由于电磁作用强度为强作用的 $1/\alpha$ 或 $\pi$ 介子对核相对较为透明,还可从过程的“时域跨度”(Space-Time)来理解。定义“时域”为 $\tau_{\text{作用}} = R/\gamma \leq 0.001 - 0.0001R_{\text{核半径}}$ (对于2—4GeV的电子),为一极小量,而核运动基本发生在 $R_{\text{核半径}}$ 的“时域”内,二者耦合很小。因此在这种实验研究中,不论是粒子的散射或是入射粒子对靶核中个别核子、双核子或核子束团的敲出反应,剩余靶核的激发能都低于中子分离能,相应于核温度小于0.5MeV,因此可称之为“冷核”核物理。

现在正在建造两台大型加速器设备,专用于此类研究。一是美国的CEBAF-4GeV的负载因子为100%的电子(极化电子)加速器,将在1994年建成,用以研究核内核子长、短关联, $\pi$ 和 $\rho$ 介子,核子激发态,双重子及奇异夸克等自由度<sup>[3]</sup>。另一台是加拿大的KAON工厂<sup>[4]</sup>,计划在1997年后建成。它将提供 $\kappa$ 介子、反质子、中微子等多种探针,从多个角度来研究核内亚核子自由度。

## 2. 相对论重离子碰撞研究

当相互碰撞的两个离子能量高达100GeV/u时,原子核变成透明的。在碰撞过程中形成两个温度很高、密度极高的重子火球按原运动的快度飞行,它退激时产生核碎裂;同时由于局部蒸发而在中心快度范围内形成一个稀薄的介子云区域。这一强相互作用体系的“时域”演化可分为

$\tau_{\text{作用}} = R/\gamma \sim 0.01R_{\text{核半径}}$ ,能量密度高达30GeV/fm<sup>3</sup>,核内夸克解禁形成夸克-胶子等离子体(QGP),此时域内可以看作组成核子的夸克无相互碰撞概率;

$\tau_{\text{混合}} \sim 0.1R_{\text{核半径}}$ ,此时火球内夸克相互碰撞而使QGP趋向热平衡,此时能量密度为10GeV/fm<sup>3</sup>;

$\tau_{\text{共相}} \sim R_{\text{核半径}}$ ,由于夸克、胶子的相互作用使QGP达到热平衡,它们相复合成重子;

$\tau_{\text{飞散}} \sim 10R_{\text{核半径}}$ ,此时强子成为独立的粒子,体系温度已降低到120MeV左右。由此可以看到,在这高能核-核碰撞中,随着“时域”的演化,发生了从正常核物质—QGP—强子物质—核碎裂的演化过程。这种理解是根据已有的一些较低能的固定靶核-核碰撞实验及理论的推论<sup>[5]</sup>。上述演化过程可由图2所示核物质演化相图表示。

美国正在建造一台相对论重离子对撞机(RHIC)<sup>[6]</sup>,预计于1997年建成。它将开辟一个核-粒子物理研究的新领域。同时人们预期在这台机器上将看到正常核物质—QGP的相变,也期待借以得到在QGP冷却过程中发生的如图2所示模拟宇宙大爆炸后1ms时间内及超新星爆发、中子星等的一些规律。

## 3. 传统核物理研究

所谓“传统”是指把原子核的组份只局限在中子、质子的层次上所进行的研究。核密度为正常状态,约0.17核子/fm<sup>3</sup>,核的激发温度不超过10—20MeV。这体系相碰撞的“时域”为

$\tau_{\text{作用}} = R/\gamma \sim R_{\text{核半径}}$ ,而且它的能量转移和终态形成都与这一初始阶段的时域相重合。如果我们把核看成一不可压缩的费米子流体处理<sup>[7]</sup>。以<sup>208</sup>Pb为例,在一定体积内,当<sup>208</sup>Pb的激发温度小于8MeV时,它是一稳定的核物质;当激发温度高于8MeV时,中子蒸汽逐渐扩张,而质子“蒸汽”由于库仑排斥不能保持稳定。因此可以把核温度8MeV看作核物质从液相到汽相的相变点,在这温度以上核反应过程主要是碎裂过程。当 $T > 5\text{MeV}$ ,核体系的熵正比于核温度,核

激发能大体与核温度成平方正比关系,这正好与人们已知的核的高激发能态可由费米气体模型来描写的图象一致。

我们把讨论的范围限在正常核密度和核的激发温度不高于8MeV 区域内。从图3可以看到,在  $E^*-J$  相图上,展示了核激发模式的丰富图像。从30年代至60年代末的核谱学研究,基本上集中在 A 区,导致了对核结构的非常丰富的模型知识,并成为发展微观理论的基础。70年代低能重离子碰撞研究开拓的高自旋态谱学(B区)又提供了高速转动核的结构变化规律,即 Yrast 谱学。在这个区内还在不断发现新的现象与规律,例如核的超形变(Superdeformation)<sup>[8]</sup>。长期以来,人们认为激发核的冷却区(C区)是  $\gamma$  的统计发射。新的研究工作揭示了这个区内非统计的行为,并为许多实验所证实<sup>[9]</sup>。对于巨共振区(GR)的研究还在不断深入,近若干年来又扩展到热核( $T \approx 1-2\text{MeV}$ )转动核的巨共振(e区)的研究。已发现了许多有意义的新现象。例如基态球形核变软,基态长椭球变形核演化为扁椭球形<sup>[10]</sup>,尚待进一步研究。

理论上预言,可能存在约8000种寿命大于1ms 的核素。但已被实验研究或验证其存在的不足2000种(包括270种稳定核)。传统核物理一直在追求两个新的侧面——超重核和远离  $\beta$  稳定线核素的发现及其性质的研究。核素越远离  $\beta$  稳定线,它们具有超常的中子与质子数比值,同位旋  $T, T_z$  能在很大范围内变化。传统核物理又增加了对  $T, T_z$  在大范围内变化规律的研究。

## 二、“新奇核”物理

对远离  $\beta$  稳定线核素的研究,在1966年第一次国际会议之后已成为专题会议序列的内容。现在人们把研究焦点推向质子滴线和中子滴线的极限区,具有超常  $T, T_z$  量子数的核(新奇核)的区域。利用稳定核素作靶及入射束的实验系统已无法达到,因此近年发展了新奇束(exotic beam)或称放射性核束(RNB)技术。国外正在研究改建或新建为此目的的实验装置<sup>[11,12]</sup>。

新奇核具有超常的中子与质子之比,所以它在核结构与核反应方面都有独特的规律与现象。以对于远离  $\beta$  稳定线核的研究成果为线索,我们可对新奇核结构研究的新课题列举如下:

**1. 核质量** 通常用具有若干可调参数、表征一定物理内容的经验公式来拟合核质量<sup>[13]</sup>。由液滴模型、形变能和壳效应修正三项组成。这三部份均与核的  $N, Z$  数及变形量有关。

**2. 核半径** 电子散射实验可以确定核的电荷分布,而核反应截面测量可以确定核物质的分布,它们可分别写成:

$$R_{\text{电荷}} = 1.18A^{1/3} - 0.48(\text{fm}), \quad R_{\text{核}} = 1.21A^{1/3}(\text{fm}) \quad (1)$$

文献[14]的工作测量了一些极丰中子的轻核的核作用截面,并由此导出了核物质半径,如图4所示,显示出远大于(1)式表示的平均值。从 $^{11}\text{Li}$  通过碳膜,测量碎裂 $^9\text{Li}$ 的横向动量分布中可以看到 $^{11}\text{Li}$ 核中是有两种成份的中子:一种的分离能为 $6.0 \pm 1.5\text{MeV}$ ,与正常核中的中子一致;另一种的分离能为 $0.25 \pm 0.1\text{MeV}$ ,为结合极“松散”的中子。这表明 $^{11}\text{Li}$ 核的构成可以看作一个 $^9\text{Li}$ 芯外有一巨大的中子晕,其半径可达 $3.2\text{fm}$ !

**3. 核的形变** 在 Fermi 表面处,单粒子在其他粒子的集体运动平均场中的运动确定了核的特定集体运动的轨道。 $\Delta I = 2$ 四极形变轨道已是我们熟知的长椭或扁椭球形变核。近期的研

究表明,在相当广泛的核区内,缺中子核存在长、短轴比值为 2 的超形变<sup>[15]</sup>。理论上预示可能存在长、短轴比值为 3 的巨超形变。 $\Delta I = 3$  八极形变的形式更为复杂,绕转动轴不对称的  $Y_{30}$  (梨形)可能是新的扁形变核,而无对称轴的  $Y_{31}$  (香蕉形)则可能是新的超形变。文献[16]的计算表明,新奇核区的低激发态核谱学研究将为核形变提供丰富的图象。图 5 是关于  $^{88}\text{Mo}$  核从超形变到巨超形变演化的图象。

**4. 核的激发模式** 低激发态  $E(2^+)$ ,  $E(4^+)/E(2^+)$  及  $B(E_2, O^+ \rightarrow 2^+)$  等量是核的集体运动的度量。Kr—Sr—Zr 区已经确证是一个新的形变区,系统测量该核区缺中子核素的  $B(E_2, O^+ \rightarrow 2^+)$ , 可以了解它们单粒子与集体运动的过渡。另一个有意义的核区是  $A = 120 - 140$ , 在这区内是球形到变形的过渡。

对于正常  $N/Z$  比值的核素,其 GDR 能量为

$$E_{\text{GDR}} = 79A^{-1/3} (\text{MeV}) \quad (2)$$

但对于有巨大中子晕的极度丰中子核,质子流体相对于中子流体的振动频率会降低,则可出现“软”GDR 激发,其强度集中在相当低的激发能区。近期的实验结果表明,可能存在这种形式的激发。实验中利用  $2.8 \text{ GeV/u}$  的  $^8\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{14}\text{Be}$  束,它们均有极大的电磁分解反应截面,这种超出正常求和规则

$$\int_{E_R}^{\infty} \sigma_r(E_r) dE_r = 60NZ/A (\text{MeVmb})$$

的截面值可以作为“软”GDR 存在的一种证据<sup>[17]</sup>。

**5. 有序与混沌** 新奇核核反应的  $Q$  值很高,如表 1 所示,可以激发剩余核很高的激发态得到完整的核谱学信息。对能级密度作统计分析的一个重要结论是:核系统在零激发温度到  $0.5 \text{ MeV}$  之间表现出从有序到混沌的转化。图 6 表示对 Sn 在中子或质子分离能处能级间距服从 Wigner 分布,而在  $^{116}\text{Sn}$  激发能小于  $4 \text{ MeV}$  时,能级间距的分布则明显偏离 Wigner 分布。对于  $A = 155 - 185$  核区的  $Y_{\text{rast}}$  核谱学能级的统计分析表明,极好地符合 poisson 分布。这说明在  $E \approx 0$  处是有序的,而在中子(或质子)分离能处核体系是纯统计的(混沌)的。介于二者之间的过渡区有复杂的图象,图 6 中  $^{116}\text{Sn}$  能级间距分布及文献[9]的研究表明了这一点。

**6. 核的衰变** 表 2 列举了一些远离  $\beta$  稳定线核  $\beta$  衰变的半衰期数据及理论计算值<sup>[18]</sup>。如果同位旋是一个好量子数,则在同位旋多重态核间超允许型  $0^+ \rightarrow 0^+$   $\beta$  衰变的  $ft$  值已作了库伦修正后应是一致的,由弱相互作用的矢量耦合常数所确定,一些轻核的实验结果证明了这一点。把这一研究推广到更高  $Z$  值的同位旋多重态核的超允许型  $0^+ \rightarrow 0^+$   $\beta$  衰变中,可进一步验证弱作用理论的普遍性。

近几年来发现了一些新的衰变模式,例如质子衰变,双质子衰变及核集团衰变等。新奇核的研究将更丰富核衰变的图像。

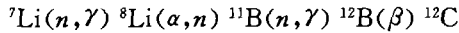
**7.  $n-p$  相互作用** 研究  $N \approx Z$  近于自轭的核的能级结构,可以了解迄今未知的处于同一轨道的价中子与价质子的单极  $n-p$  相互作用强度。这一相互作用可能澄清目前在核的集体运动核谱能带结构中若干多义性的理论解释<sup>[19]</sup>。

图 7 从总体上概括了新奇核在核结构研究方面的各个侧面。

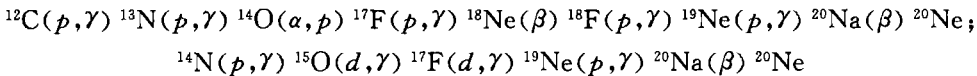
新奇核的  $N/Z$  超常特点在核反应方面也有许多新的机遇。例如垒下融合截面随价中子数的变化规律;巨大中子晕可以引起在很大的作用距离上发生核子(多核子)转移反应而较少受

库仑干扰;一些核的电荷交换反应,例如 $^{18}\text{N}-^{18}\text{O}$ , $^{14}\text{C}-^{14}\text{O}$ 等可以在核反应中了解 $\pi$ 介子交换自由度。这将为传统的核反应研究注入新的课题。

当新奇核的单核能低于 $1.5\text{MeV/u}$ 时,某些特定的核反应截面测量将有助于了解天体核素丰度分布的成因,成为天体物理的基础之一。天体核素丰度分布中有两个重要的问题:一是 $A=8$ 的空缺;二是全面了解主序星中氢燃烧过程中除氢链外的C—N—O循环的作用。这二者均有待于新奇核核反应的研究。例如在H链反应中,最终产物都是迅速衰变为两个 $^4\text{He}$ 的 $^8\text{Be}$ 核,因此



成为跨越 $A=8$ 空缺的关键反应。在C—N—O循环中燃烧H是生成较重核的一个重要途径,其中



是两个重要的核反应链。此处 $^8\text{Li}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{14}\text{O}$ , $^{17}\text{F}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{18}\text{Ne}$ , $^{19}\text{Ne}$ , $^{20}\text{Na}$ 等均为放射性核素,离 $\beta$ 稳定线不太远,比较容易得到可观强度的束流,用以进行核反应研究。新奇核的应用目前还未开展,但由于新奇核的寿命比较短,因此其“比放射度”高;它们都在核反应中产生,通过适当的物理分析可得到无载体的纯束;它可被受控地调变能量使它沉淀在材料的特定的深度上;它可以生成其衰变链中一系列的子体,各具不同的电磁性质。可以预期,这些特点将会比传统的核探针在固体物理、材料科学、热原子化学、标记生物学等方面带来更多的可能性。

### 三、新奇束的产生及新奇束加速装置

以往远离 $\beta$ 稳定线核素是通过核裂变、中能质子引起的核散裂、低能重离子熔合蒸发、中能重离子碎裂及重离子多核子转移产生的<sup>[20]</sup>。对于这些反应的规律及其生成远离 $\beta$ 稳定线核素的几率, $N/Z$ 分布等均有相当的了解。但使用稳定核靶及稳定核体系的实验不能使 $N/Z$ 达到“超常”的新奇核区( $N/Z$ 局限或几率太小)。因此近年来人们提出通过不稳定核素(新奇束或称放射性核束)的熔合或多核子转移反应来扩展新奇核研究的范围。

新奇束的产生有两种途径:

用中能重离子( $>50\text{MeV/u}$ )的碎裂。它是由在不同碰撞参数下,边缘部分“旁观者”以很小的角散度及大体接近初始动量发射的产物,占有很大的 $A/Z$ , $N/Z$ 比值范围。通过必要的(但是复杂的)电磁分析系统可以得到某一特定的新奇束。但其纯度不够高,能量可调范围窄,流强较弱(一般为 $0.1\text{pA}$ ),其优点是可以得到极短寿命( $0.1\mu\text{s}$ )的新奇束。

用高流强低能(中能)轻粒子束( $p$ , $d$ , $^3\text{He}$ , $\alpha$ )轰击厚靶,通过核子转移反应(或散裂,裂变)生成放射性核素,使之从厚靶中扩散出并进入离子源,经在线同位素分离器分析后得到“纯”的束后再行加速到所需的能区。这种方法的缺点是只能得到寿命较长( $>1\text{ms}$ )的新奇束;优点是纯度高、能量可调范围广,流强较高(可达 $0.1\text{pA}-0.1\mu\text{A}$ )。

表3列举了当前正在运行、研究及讨论中的若干新奇束装置。当前运行的装置主要是属于第一类的次级束流型。属第二类的放射性束强度较低,主要用于核天体物理反应截面测量<sup>[21]</sup>。具有广泛核物理研究可能性的装置正在研讨中<sup>[11,12]</sup>。

中国原子能科学研究院已建成一台端电压为 $13\text{MeV}$ 的串列加速器及相应的实验装置,串

列加速器的优点在于能量平滑可调、能散度小，经二次剥离后可以选择不同电荷态，得到合理流强的多种能量的重离子束

$$E/A = V/A(1 + 1/4q_1 + 3/4q_2)(\text{MeV/u}) \tag{3}$$

$q_1, q_2$  分别为经一次、二次剥离后的电荷态,  $V$  为加速器端电压。此外, 串列加速器是直流运行, 因此适于与任何类型的增能器配接和接受广泛的离子束(回旋形加速器由于具有特定的磁场与高频共振条件, 对离子束的  $A/q$  有明显的限制)。

中国原子能研究院的新奇束加速装置由  $-50\text{MeV}(p)$  并可加速  $d, \alpha$  的中等流强 ( $100\mu\text{A}$ ) 的回旋加速器作为产生放射性束的离子源, 经在束同位素分离器分析后由 HI-13 加速, 到达由 (3) 式决定的能量后(可取  $q_1 = q_2$ , 即在 HI-13 不用二次剥离膜), 经二次剥离后注入增能器。增能器由 40 节(每节增能  $0.5\text{MeV}/q$  超导腔组成。最终加速的离子能量为

$$E/A = 1/A[(1 + q_1)V + 20q_2](\text{MeV/u}) \tag{4}$$

图 8 给出对  $A \leq 130$  核区最可几电荷态的单核子能曲线, 在其上也列出了表 3 中一些装置的相应值。其中有相当数量的束流强达到  $0.1\text{pnA}$  水平, 适于进行广泛的核物理研究。图 9 表示几种典型的核反应所产生的新奇束的产率, 其束流强度尚需计及离子源的转换率及加速装置的传输效率。

与我们的方案 HI-13EB 相近似的装置是 OREB, 该设备估计在 1995 年后开始运行。因此, 中国原子能科学研究院的方案在 90 年代将是在国际上有独特性的先进设备, 其建设必将从根本上加强与改善我国在传统核物理前沿领域研究中的地位。表 3 中的一些大型装置, 例如 JHP, ISL 等正在进行概念性研究, 其建成及运行将是若干年以后的事。因此 OREB 及 HI-13EB 先导性的研究将更具有突出价值。

本文是在集体讨论的基础上完成的, 姜承烈、许谨诚、陈永寿、关遐龄、白希祥等同志作出了重要的贡献, 王平平同志为本文做了编辑工作, 作者深表感谢。

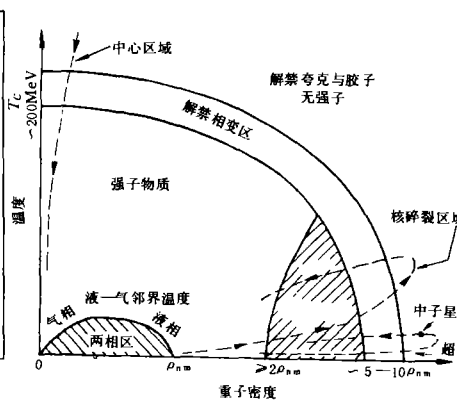
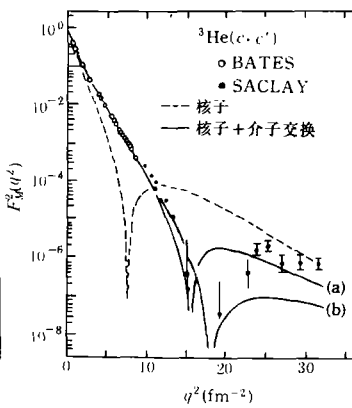
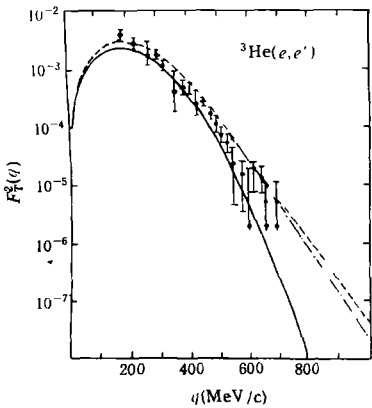


图 1 核内亚核子自由度的显示

图 2 相对论重离子碰撞后状态演化相图

- (a) 纵向形状因子, 实线精确三体解, 虚线计及介子交换;
- (b) 磁形状因子, 虚线精确三体解, 实线计及介子交换。

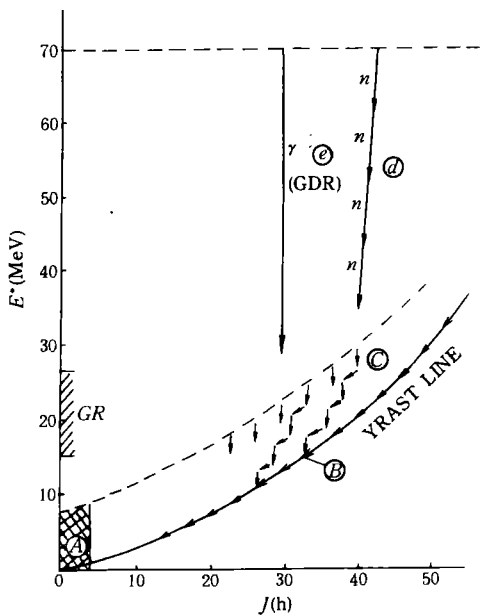


图3 核相图

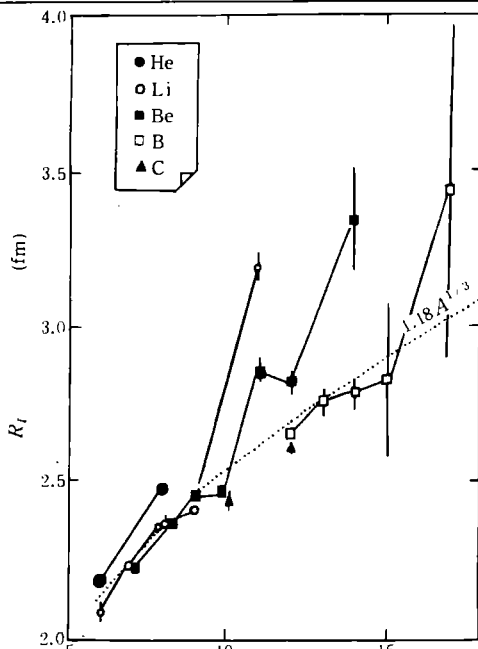


图4 新奇核半径系统学

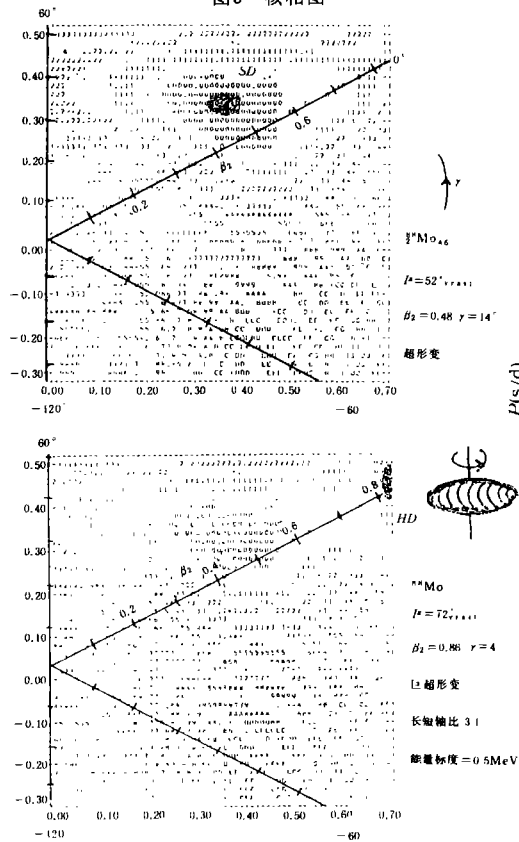


图5  $^{88}\text{Mo}$  形状演变

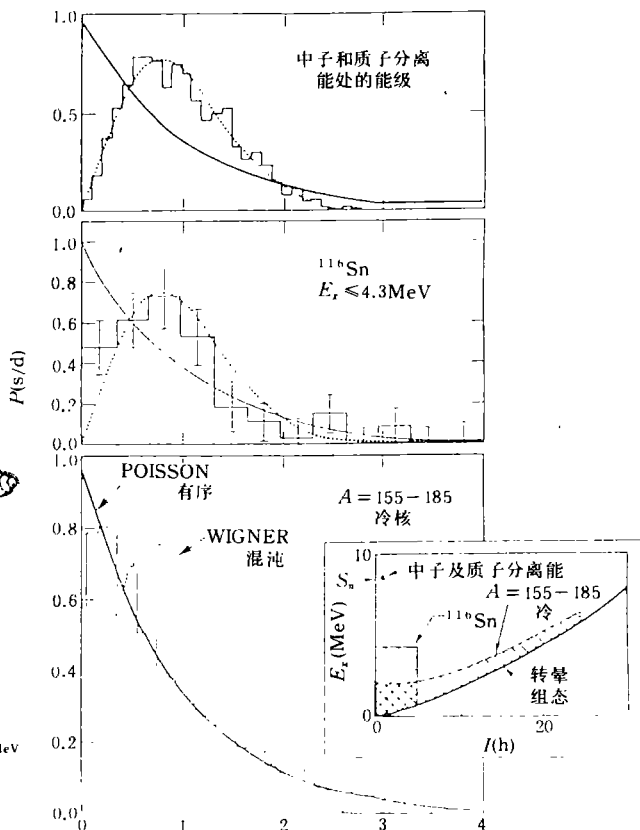


图6 能级间距统计分析

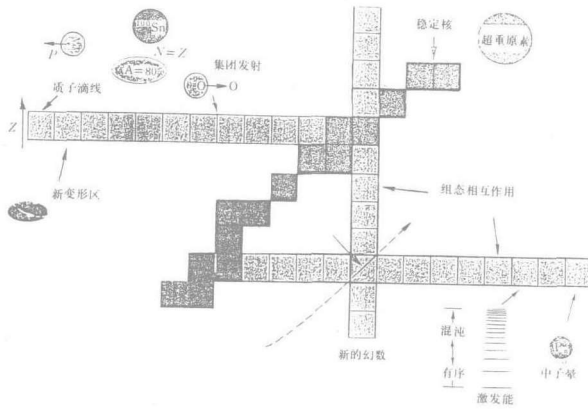


图7 新奇核在核结构研究中的各个侧面

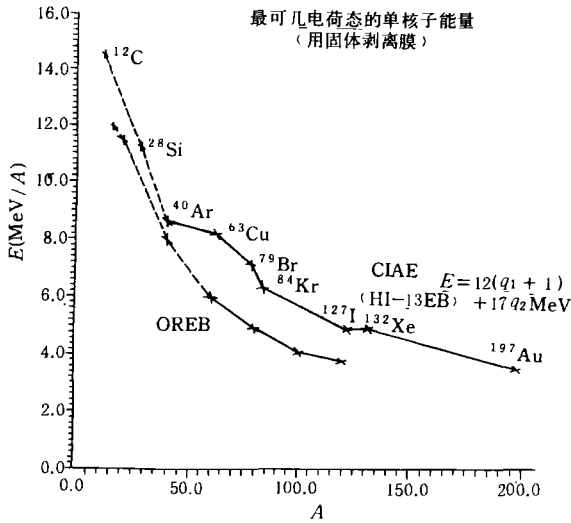


图8 加速离子能量

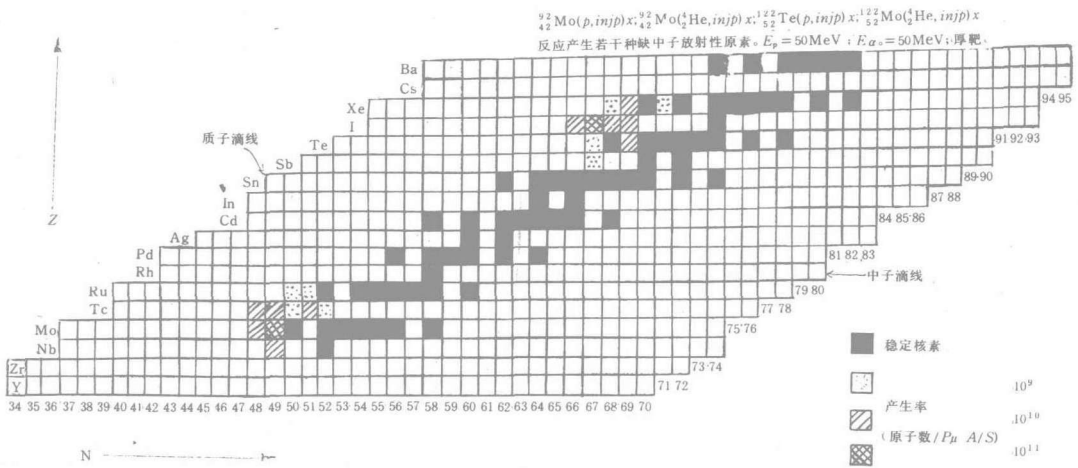


图9 中国原子能科学研究院新奇束加速器(HI-13EB)加速的几个典型放射性核产率



表1 新奇束熔合反应 Q 值

复合核	反应	Q 值(MeV)	复合核	反应	Q 值(MeV)
$^9\text{Li}$	$^6\text{He}+t$	6.4	$^{14}\text{Be}^a$	$^{11}\text{Li}+t$	14.5
$^{11}\text{Li}$	$^8\text{He}+t$	3.3	$^{12}\text{B}$	$^6\text{He}+^6\text{Li}$	18.3
$^{10}\text{Be}$	$^9\text{Li}+p$	19.6		$^8\text{Li}+^4\text{He}$	10.0
	$^6\text{He}+^4\text{He}$	7.4		$^9\text{Li}+^3\text{He}$	26.5
$^{11}\text{Be}$	$^9\text{Li}+d$	17.9	$^{13}\text{B}$	$^6\text{He}+^7\text{Li}$	27.1
	$^8\text{He}+^3\text{He}$	26.4		$^9\text{Li}+^4\text{He}$	10.8
$^{12}\text{Be}$	$^9\text{Li}+t$	15.0	$^{14}\text{B}$	$^8\text{He}+^6\text{Li}$	21.5
	$^8\text{He}+^4\text{He}$	9.1		$^9\text{Li}+^4\text{He}$	34.0
	$^{11}\text{Li}+p$	25.6	$^{15}\text{B}$	$^8\text{He}+^7\text{Li}$	17.1
$^{13}\text{Be}$	$^{11}\text{Li}+d$	20.7		$^{11}\text{Li}+^4\text{He}$	16.3

注:质量假定为 $^{13}\text{Be}+n$ 表2 新奇核 $\beta$ 衰变半寿命

同位素	新测量值	以往测量值	理论预期值
$^9\text{Li}$	$173\pm 14$	$175\pm 1$	76
$^{11}\text{Li}$	$7.7\pm 0.6$	$8.5\pm 0.2$	2.3
$^{12}\text{Be}$	$21.3\pm 2.2$	$24.4\pm 3.0$	8.6
$^{14}\text{Be}$	$4.2\pm 0.7$	—	2.8
$^{12}\text{B}$	$20.0\pm 1.5$	$20.41\pm 0.06$	13.6
$^{14}\text{B}$	$12.8\pm 0.8$	$16.1\pm 1.2$	11.1
$^{15}\text{B}$	$8.8\pm 0.6$	$11.0\pm 1.0$	7.4
$^{17}\text{C}$	$202\pm 17$	—	(422, 297, 242)

表3 一些典型的新奇核研究加速器

设备	新奇束发生器	反应机制	新奇束加速装置	A	$E_{\max}$ (MeV/u)	$I$ (p/sec)	状态
U. of Notre Dame (美)	FN-串列	核子转移	—	8	2.5	$\sim 10^6$	运行中
RIKEN (日)	$K=540$ 环形回旋加速器	碎裂	—	$<136$	$<110$	$\sim 10^8$	运行中
GANIL (法)	两台 $K=320$ 串接回旋加速器	碎裂	—	$<136$	$<80$	$\sim 10^9$	运行中
Louvain-la-Neuve (比)	$K=30$ 质子回旋加速器	核子转移	$K=120$ 回旋加速器	13	0.65	$\sim 10^9$	运行中
OREB (美)	$K=100$ 回旋加速器	核子转移	25MV 串列加速器	$<80$	5—13	$10^8-10^9$	已批准方案
PRIMA (CERN)	1.0GeV PS 增强器	散裂	直线	$<27$	1.4	$10^9-10^{12}$	方案
JHP (KEK)(日)	1.0GeV 直线	散裂	直线	$<120$	6.5	$10^9-10^{11}$	方案
Rutherford Lab(英)	800MeV (ISIS) 质子同步稳相加速器	散裂	直线 (重注入 SIS)	$<80$	6.5 (45—120)	$10^9-10^{12}$	研究中
ISL (美)	?	散裂	?	$<220$	10	$10^9-10^{12}$	研究中
IAE (中)	回旋加速器 $p, \alpha$	核子转移	13MV 串列 + 超导直线	$<130$	$>5$	$<10^9$	建议

## 参 考 文 献

- [1] J. Dubach et al., *Nucl. Phys. A* 271 (1976) 279.
- [2] J. M. Cavedon et al., *Phys. Rev. Lett.*, 49(1982) 49.
- [3] Research Program at CEBAF, CEBAF Report (1985).
- [4] KAON Factory Engineering Design and Impact Study (1990).
- [5] E. V. Shuryak, BNL 44992 (1990) 及其中所引文献.
- [6] Conceptual Design of the RHIC, BNL 52195 (1989).
- [7] S. Levit, Proc. Int. Conf. on Nucl. Phys., Vol. 2, p227(1986).
- [8] P. J. Twin, Proc. Int. Symp. on Phys. at Tandem, p443(1986).
- [9] Y. S. Ch1989en and G. Leander, Proc. Conf. on High Angular Momentum Properties of Nuclei(1982).  
M. Guttormsen et al., *Phys. Rev. Lett.*, 52(1984), 102.
- [10] J. J. Gaardhoje et al., *Phys. Rev. Lett.*, 53(1984), 148.  
C. A Gossete et al., *Phys. Rev. Lett.*, 54(1985), 1486.
- [11] A proposal for Physics with Exotic Beam at Holifield Heavy Ion Research Facility e. J. D. Garret and B. V. Olsen (1991).
- [12] The Isospin Laboratory (Draft)——Research Opportunity with RNB (1991).
- [13] L. Spetneer et al., *Atomic Data and Nuclear Data Table*, 39(1988), 353.
- [14] I. Tanihata RIKEN-AE-NP-80(1989).
- [15] E. M. Beck et al., *Phys. Lett.*, B195(1987), 531.  
E. F. Moore et al., *Phys. Rev. Lett.*, 63(1989), 360.
- [16] 陈永寿, 最近计算结果, 私人交流.
- [17] I. Tanihata, RIKEN-Ap-Np-76(1989).
- [18] I. Tanihata, *Treatise on Heavy Ion Science* ed. D. A. Bromley, Vol. 8, p 443(1989).
- [19] J. D. Garret et al., *Contemporary Topics in Nuclear Structure Physics* ed. Casten, p 699(1988). B. Semmes et al.,  
Proc. Int. Conf. on High Spin Physics Sept., (1990).
- [20] V. V. Volkov, *Treatise on Heavy Ion Science* ed. D. A. Bromley, Vol. 8, p101 (1989).
- [21] D. Darquennes et al., *Phys. Rev.*, C42, R804 (1990).

## STUDY OF THE PROPERTY OF EXOTIC NUCLEI — ABOUT THE DEVELOPMENT OF HI-13 TANDEM ACCELERATOR NUCLEAR PHYSICS LABORATORY

Ding Dazhao

(Chinese Institute of Atomic Energy)

### Abstract

The frontiers of nuclear physics in 90's have been discussed. Among the study of sub-nucleon degree of freedom in nuclei, Collision of relativistic heavy ions and the “traditional” nuclear physics, the later will keep its important position. It will be fully exploited according the degree of freedom of excitation energy, angular momentum and isospin of the nuclear system. The multi-facet study of the nuclei with abnormal ratio of neutron to proton—“exotic nuclei” will provide a great deal of new knowledge to the nuclear system. This will be the main tendency of the development of the nuclear physics research at low energy accelerator.

Tandem accelerator is a powerful facility for the “traditional” nuclear physics research. The HI-13 tandem accelerator of Chinese Institute of Atomic Energy is a well equipped and high efficiency facility. A project for its upgrad and development has been proposed, it will strengthen its capability in meeting the challenge of the development of nuclear physics research and keeping its position in the international competition.