



# 关于正常形变核的“等同带”

张敬业

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 近年来,通过对已知正常形变核转动带的分析,发现了“等同带”(即具有惊人相似的转动惯量).本文利用一个严格的判据,比较了  $A=150\sim 190$  质量区奇  $A$  核及其相邻  $A-1$  偶-偶核的转动带,发现“等同带”对应于奇  $A$  核中占据上升轨道的粒子态.这意味着,“等同带”的出现可能是由于对关联减弱和形变减小两者对转动惯量的影响相互抵消的结果.

**关键词** 等同带, 转动惯量, 对关联, 形变, 判据.

## 1 引言

1990年以来,实验上发现某些相邻核之间的超形变转动带惊人的相似<sup>[1,2]</sup>:它们的转动惯量的差别竟然少于千分之几,对应的能级间跃迁能量  $E_\gamma$  的差别可以小于 1keV (例如表 1<sup>[2]</sup>),因此称为“等同带”(Identical Band).与超形变带的发现是在理论预言之后这一事实相反,这种“等同带”现象并无任何理论预言,因而震动了高自旋物理界.很多研究小组发现<sup>[3-6]</sup>在偶-偶核与相邻偶-偶核以及奇  $A$  核与相邻偶-偶核的正常形变转动带之间,也存在着“等同带”,这引起了人们广泛的注意.

尽管已发现许多超形变带,但是它们的带头自旋以及核组态仍存在不确定性,而且对超形变带的对关联目前仍然了解很少.正常形变转动带的数据远多于超形变带的数据,因此选择正常形变带作为探讨“等同带”现象物理根源的第一步是比较可行的.早已知道奇  $A$  核的转动惯量比相邻偶-偶核的转动惯量平均大 15%,但有涨落,如图 1 所示.这主要是由于奇核子的阻塞效应减少了对关联,从而提高了转动惯量.然而,在发现的“等同带”中,奇  $A$  核的转动惯量与相邻偶-偶核转动惯量的差别只有千分之几,这一现象值得进一步研究.

表 1  $^{192}\text{Hg}$  与  $^{194}\text{Hg}$  超形变带的比较

$^{192}\text{Hg}$		$^{194}\text{Hg}$ 带 2	
$I_i$	$E_\gamma$	$I_i$	$E_\gamma$
10	214.6		
12	257.7	13	262.7
14	299.9	15	302.9
16	341.1	17g	343.2
18	381.6	19	382.1
20	420.8	21g	421.1
22	459.1	23g	458.9
24	496.3	25g	495.1
26	532.4	27g	531.6
28	567.9	29	566.9
30	602.3	31	601.6
32	635.8	33	635.6
34	668.6	35	668.7
36	700.6	37	701.7
38	732.1	39	733.3
40	762.8	41	762.1
42	793.4	43	(792.8)

## 2 “等同带”的判据

为了探讨“等同带”现象,人们提出了不同的判据<sup>[5,8]</sup>,从而在同样数目的转动带中找到不同数量的“等同带”,引出不同的物理结论.

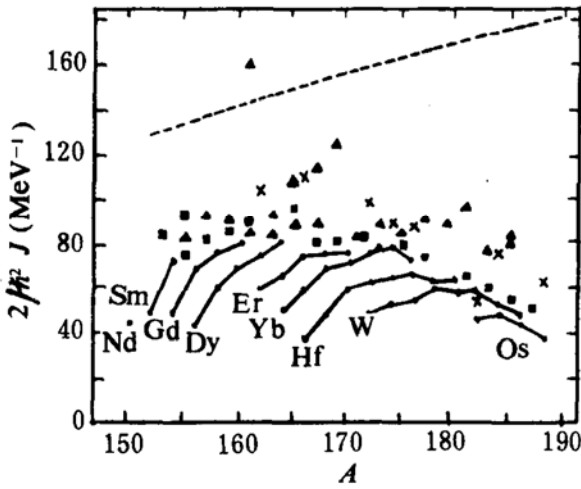


图 1 转动惯量与质量数  $A$  关系图<sup>[11]</sup>. ●为偶-偶核, ■为奇质子核, ▲为奇中子核, ×为奇-奇核, 虚线是对应的刚体转动惯量.

例如下面这一判据<sup>[8]</sup>:

$$V(i) = \frac{100}{N} \sum_{n=1}^N (|i_n - i_{av}|/2) \cdot \left[ \frac{(\Delta E)_n}{(E)_n} \right] < 1 \quad (1)$$

其中  $i_n$  是奇  $A$  核转动带第  $n$  个跃迁的自旋与  $A-1$  偶-偶核对应自旋(在同一跃迁能下)的差值,  $i_{av}$  则是作比较的  $N$  个跃迁(在  $I-\omega$  图上第一个回弯或陡上弯出现前的跃迁数)的自旋差值  $i$  的平均值;  $(\Delta E)_n$  是奇  $A$  核转动带第  $n+1$  和第  $n$  个跃迁能之差,  $(E)_n$  则是第  $n$  个跃迁能量. 根据公式(1)判据, 发现<sup>[8]</sup>在  $A=150\sim 190$  区,  $Z=67\sim 77$  的奇  $A$  核的约有 160 条正常形变转动带与  $A-1$  偶-偶核转晕带比较中, 有约 30% 的“等同带”, 这些“等同带”既出现在奇核子占据上升轨道的组态(占多数), 也出现在奇核子占据下降轨道的组态. 因而他们指出<sup>[8]</sup>, “等同带”的出现, 证明已有的对关联理论, 特别是关于阻塞效应的理论有问题, 必须作本质的修改.

为了真正弄清“等同带”的内涵和这一现象对理论可能提出挑战的本质, 首先必需对“等同带”有个明确的定义. 作者认为, “等同带”的判据至少应满足下列要求: (1) 进行比较

的量, 必须是对应于相同的自旋  $I$  (例如比较偶-偶核与相邻偶-偶核的对应量时), 或者对应于相同的转动频率  $\omega$  (例如比较奇  $A$  核与  $A-1$  偶-偶核的对应量时, 两者自旋是完全不相同的), 因为转动量是自旋和转动频率的函数; (2) 提取比较量的过程, 必须完全独立于理论模型; (3) 应该尽量避免进行数据内插, 不允许有外插, 这是根据讨论量的精度所确定的; (4) 应该尽量避免取平均, 因为取平均的过程会改变甚至抵消两者的差别; (5) 应该没有额外的因子包含在判据内.

众所周知, 一条转动带存在两种转动惯量, 一种是运动学转动惯量  $J^{(1)}$ , 它等于  $I/\omega$ , 反映转动带的整体性质, 第二种是动力学转动惯量  $J^{(2)}$ , 它等于  $dI/d\omega$ , 是高一阶微商, 描述转动带的局域性质<sup>[9]</sup>. 既可以比较两条带的  $J^{(1)}$  的相似性(这相当于研究两条带在  $I-\omega$  图上两条曲线的整体重叠程度), 也可以比较两条带的  $J^{(2)}$  的相似性(这相当于研究  $I-\omega$  图上两条曲线的平行程度).

根据上述五点的一般要求, 下面我们来直接推导两条转动带转动惯量的相对差别, 先看运动学转动惯量:

$$J^{(1)} = \frac{I}{\omega} \quad (2)$$

$$R(J^{(1)}) = \frac{J^{(1)}(A_1) - J^{(1)}(A_2)}{J^{(1)}(A_1)} = \frac{I(A_1) - I(A_2)/\omega(A_1)}{I(A_1)} = \frac{I(A_1) - I(A_2)}{I(A_1)} = \frac{i(A_1)}{I(A_1)} \quad (3)$$

其中  $A_1$  和  $A_2$  是作比较的两个核的质量数. 为了保证在相同的转动频率下比较两条带的对应自旋, 必须在  $A_2$  核的  $I-\omega$  曲线上作光滑内插(参看图 2), 以求得对应于  $A_1$  核转动频率  $\omega(A_1)$  下,  $A_2$  核的自旋  $I(A_2)$  值, 去和对应于同一转动频率  $\omega(A_1)$  下的  $I(A_1)$  作比较.

为了获得对公式(3)所示的相对差别  $R(J^{(1)})$  的整体估计必须对涉及的全部跃迁作平均:

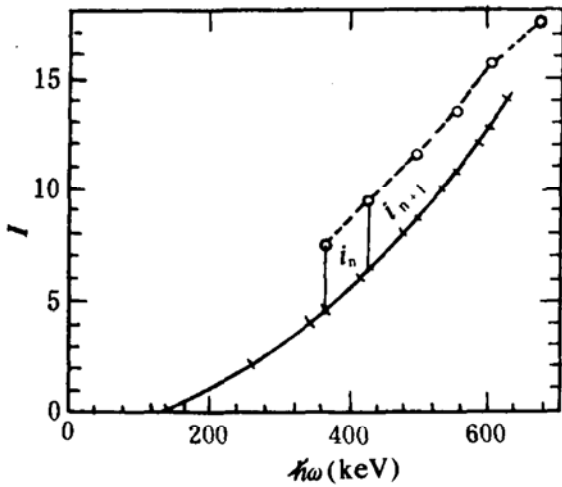


图 2 转动带的自旋(I)与转动频率( $\omega$ )关系图. 虚线及实线分别表示  $A_1$  核(奇  $A$  核)及  $A_2$  核( $A-1$  偶-偶核)的  $I-\omega$  曲线

$$R(J_{avg}^{(1)}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|i_n(A_1)|}{I_n(A_1)} \quad (4)$$

$$R(J_m) = \frac{|A_1^{5/3} - A_2^{5/3}|}{A_1^{5/3}} \quad (5)$$

转动惯量除了取决于核内对关联,核形变等因素外,还比例于  $A^{5/3}$ . 因此,当两条带的对关联及形变等内禀性质完全相同时,两者转动惯量的相对差别应是如式(5)所示的  $R(J_m)$ . 对于本文所讨论的质量区,  $R(J_m)$  在 1% 左右,可用这一  $R(J_m)$  值估计两条带的转动惯量的相对差别,并定义:

$$R^{(1)} = \frac{R(J_{avg}^{(1)})}{R(J_m)} < 1.0 \quad (6)$$

为“等同带”的一个判据,这相当于要求“等同带”转动惯量间的相对差别小于仅由质量的不同所导致的相对差别.

### 3 结果与讨论

利用上述判据,我们将  $A=150\sim 190$ ,  $Z=67\sim 77$  奇质子核的 160 条转动带与对应的  $A-1$  偶-偶核的转晕带进行比较(包括所有  $I-\omega$  图上回弯或陡然上弯之前的全部跃迁,要求至少不少于三个跃迁). 表 2 给出了所找到

的全部“等同带”,第一行是对应的奇  $A$  核的组态,正负号表示“Signature”值(绕转动轴转动  $180^\circ$  变换的本征值),第二行是对应的奇  $A$  核,略去对应的  $A-1$  偶-偶核符号(在下面的表 3,表 4 中,亦作同样的省略). 第三行是比较时所包含的奇  $A$  核转动带的跃迁数  $N_{oddr}$ . 从表 2 可见所有“等同带”均出现在奇粒子占据 Nilsson 上升轨道的组态,而且  ${}^{171}\text{Lu}$  的同位素中出现“等同带”的几率最大.

表 2  $A=150\sim 190$  区“等同带”

组 态	核	$N_{oddr}$	$R^{(1)}$
$\pi[404]7/2+$	${}^{169}\text{Tm}$	3	0.900
$\pi[404]7/2-$	${}^{169}\text{Tm}$	3	0.868
$\pi[404]7/2+$	${}^{171}\text{Lu}$	3	0.817
$\pi[404]7/2-$	${}^{171}\text{Lu}$	3	0.948
$\pi[404]7/2+$	${}^{175}\text{Lu}$	5	0.743
$\pi[404]7/2-$	${}^{175}\text{Lu}$	4	0.825
$\pi[402]5/2+$	${}^{177}\text{Ta}$	3	0.390
$\pi[402]5/2-$	${}^{177}\text{Ta}$	3	0.424
$\pi[402]5/2+$	${}^{183}\text{Re}$	5	0.763
$\pi[402]5/2-$	${}^{183}\text{Re}$	4	0.995

为了从本质上理解这一结果,我们进行了通常的位能面计算(利用 Nilsson 单粒子位,壳修正加 BCS 方法). 作为例子,计算了  ${}^{171}\text{Lu}$  核三种典型组态以及  ${}^{170}\text{Yb}$  核的基态平衡形变;再就此形变在转动频率为 0.00 及 0.15 (MeV) 下作对应的对关联自洽计算(包括粒子数投影<sup>[10]</sup>). 由计算可见,对于占据上升轨道的组态,四极形变均小于  $A-1$  偶-偶核的对应值,但占据下降轨道的组态,四极形变增大. 与此同时,由于奇质子存在于  ${}^{171}\text{Lu}$  的各个组态中,阻塞了质子费米面附近的轨道,质子对关联均小于  ${}^{170}\text{Yb}$  核的对应值,由于无中子的阻塞效应,所以  ${}^{171}\text{Lu}_{100}$  各组态和  ${}^{170}\text{Yb}_{100}$  对应的中子对关联十分相似(形变的差别会导致一点差别). 这就是说,对于上升组态,奇核子的阻塞效应降低了对关联,导致转动惯量的增加,但是与

此同时,占据上升轨道的奇核子的极化效应,减小了四极形变,会使转动惯量减小,两者作用互相抵消.最后使得奇 A 核这类组态的转动带的转动惯量和 A-1 偶-偶核转晕带的转动惯量有可能非常接近,成为“等同带”.反之,占据下降轨道的组态,则不仅阻塞效应增加了转动惯量,极化效应增大了形变,且进一步增大了转动惯量.

为了进一步考察这一抵消图象,表 3 给出了准“等同带”,定义为  $R^{(1)}$  大于 1 但小于 3. 由表显然可见,这些准“等同带”也是占据上升轨道的粒子组态(唯一例外的是  $^{167}\text{Tm}$  的  $[523]7/2$  组态,这是一条略微下降的轨道,  $R^{(1)}$  略小于 3 是可能的).

表 3 A=150~190 区的准“等同带”

组态	核	$N_{\text{oddr}}$	$R^{(1)}$
$\pi[404]7/2-$	$^{157}\text{Ho}$	5	2.002
$\pi[404]7/2-$	$^{161}\text{Tm}$	4	1.292
$\pi[404]7/2+$	$^{161}\text{Tm}$	3	1.278
$\pi[523]7/2-$	$^{167}\text{Tm}$	5	2.667
$\pi[404]7/2-$	$^{165}\text{Lu}$	4	2.684
$\pi[404]7/2+$	$^{165}\text{Lu}$	3	2.803
$\pi[402]5/2+$	$^{165}\text{Lu}$	4	2.772
$\pi[402]5/2+$	$^{167}\text{Lu}$	3	1.424
$\pi[402]5/2-$	$^{171}\text{Lu}$	4	2.424
$\pi[404]7/2-$	$^{173}\text{Lu}$	4	1.341
$\pi[402]5/2+$	$^{173}\text{Ta}$	5	2.432
$\pi[514]9/2+$	$^{177}\text{Ta}$	4	2.996
$\pi[514]9/2-$	$^{177}\text{Ta}$	3	2.897
$\pi[402]5/2+$	$^{185}\text{Re}$	3	1.134

在文献[5,7]就偶-偶核之间所作的比较中,发现“等同带”出现在具有相近的  $e_2/\Delta$  比值的一对带中(见图 3,纵轴是相对  $E_\gamma$  差值,即  $|\Delta E_\gamma|/E_\gamma = \frac{|E_\gamma(A_1) - E_\gamma(A_2)|}{E_\gamma(A_1)}$ ,这其实也是相同的抵消图象在起作用:四极形变的减小(增大)与大致成比例的对关联的减小(增大)相互抵消,使得转动惯量大致不变.特别值得指出的是,图 3 的连续性是对抵消图象的进一步支持:一对连续变量作用的相互抵消通常总是有抵消“不足”(例如形变减小太少,不足

于全部抵消由于对关联减小所导致的转动惯量增加),“恰当”抵消和抵消“过分”(例如形变减小过多,超过了对关联减小的效应)各种情况,反应在图 3 上,就成为连续分布.由此亦可见,奇粒子占据上升轨道只是出现“等同带”的必要条件,而不是充分条件.因为“等同带”的出现要求两个效应的恰当抵消.在某些特殊情况下,扮演相互抵消作用的可以是其它影响转动惯量的变量,如三轴形变  $\gamma$ .但从本文所涉及的事例看来,在抵消过程中起作用的主要是对关联与四极形变这一对变量.

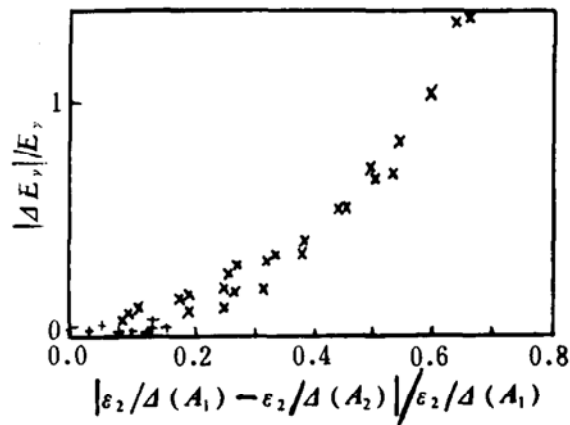


图 3 Z=66~76 偶-偶核“等同带”(标以+)及不同  $E_\gamma$  同位素转动带之间的相对  $E_\gamma$  差值与相对  $e_2/\Delta$  差值(标以x)的关系图

如上所述,可以定义另一类“等同带”,即要求两者  $J^{(2)}$  十分相近:与公式(2~6)对应,很容易得到要求两转动带的动力学转动惯量十分相似的判据:

$$J^{(2)} = \frac{dI}{d\omega} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} R(J^{(2)}) &= \frac{J^{(2)}(A_1) - J^{(2)}(A_2)}{J^{(2)}(A_1)} \\ &= \frac{dI(A_1) - dI(A_2)}{d\omega(A_1)} \bigg/ \frac{dI(A_1)}{d\omega(A_1)} \\ &= \frac{d[I(A_1) - I(A_2)]}{dI(A_1)} = \frac{di(A_1)}{2} \quad (8) \end{aligned}$$

$$R(J_{\text{avg}}^{(2)}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|i_{n+1}(A_1) - i_n(A_1)|}{2} \quad (9)$$

$$R^{(2)} = \frac{R(J_{avg}^{(2)})}{R(J_m)} < 1.0 \quad (10)$$

这儿, 也同  $J^{(1)}$  判据一样, 为了保证所比较的量对应于同样的转动频率, 也必须在  $A_2$  核的  $I-\omega$  曲线上做光滑内插. 表 4 给出了据此  $J^{(2)}$  判据(公式(10))在同样的 160 条奇  $A$  核转动带与  $A-1$  偶-偶核转晕带的比较中所发现的“等同带”. 我们再次看到所有这类“等同带”仍是对应奇核子占据上升轨道的组态, 主要集中在  ${}_{71}\text{Lu}$  同位素中.

表 4  $A=150\sim 190$  区“等同带”( $J^{(2)}$ 判据)

组 态	核	$N_{\text{oddr}}$	$R^{(2)}$
$\pi[402]5/2-$	${}^{165}\text{Lu}$	4	0.703
$\pi[404]7/2-$	${}^{171}\text{Lu}$	3	0.392
$\pi[404]7/2+$	${}^{171}\text{Lu}$	3	0.601
$\pi[404]7/2-$	${}^{173}\text{Lu}$	4	0.957
$\pi[404]7/2+$	${}^{173}\text{Lu}$	3	0.407
$\pi[514]9/2+$	${}^{173}\text{Lu}$	3	0.253
$\pi[514]9/2-$	${}^{173}\text{Lu}$	3	0.714
$\pi[404]7/2+$	${}^{175}\text{Lu}$	4	0.719
$\pi[402]5/2+$	${}^{177}\text{Ta}$	3	0.470
$\pi[402]5/2-$	${}^{177}\text{Ta}$	3	0.980
$\pi[402]5/2+$	${}^{185}\text{Re}$	3	0.078

#### 4 结 论

从上述分析可见, 在这个质量区,  $Z=67\sim 77$  的奇质子核转动带中, 大约有(6~7)% 与  $A-1$  偶-偶核转晕带对应的“等同带”. 这些带均对应于奇核子占据上升轨道的组态. 因此, 应该认为来自于极化效应的四极形变的减小与来自于阻塞效应的对关联的减小对转动惯量的影响相互抵消是导致“等同带”出现的一种可能原因. 公式(1)的判据之所以对应于较多的“等同带”(大部分仍是对应于上升组态)是由于这一表达式中, 除了对于  $J^{(2)}$  的相对差别的估量( $\sum_{n=1}^N |i_n - i_{nv}|/2$ , 和公式(9)中的  $\sum_{n=1}^N |i_{n+1} - i_n|/2$  数值上十分相近)外, 还多了一个  $(\Delta E_\gamma)_n / (E_\gamma)_n$  因子, 这大致比例于  $1/I$ ,

即永远小于 1. 从公式(9)的推导过程可见, 这一因子是外加的, 不是直接来自于  $J^{(2)}$  的相对差值. 因此, 导致了较多的“等同带”, 特别是导致了不同的结论: 是需对当前的对关联理论做本质的修改呢, 还是现有理论的基本框架仍是正确的, 但仍然面临如下的挑战: (1) 如果抵消图象是对的, 那么是什么机制使得奇核子的阻塞效应和极化效应如此“稳定”, 在所比较的整个跃迁系列中, 始终保持和相邻  $A-1$  偶-偶核转晕带的对应跃迁具有十分相近的转动惯量? (2) 现有的高自旋理论, 不论是以 Bohr-Mottelson 为代表的综合模型(如推转模型和粒子加转子模型, 或是相互作用玻色子等对称性模型), 都包含着基本的近似, 使得所有理论结果只能精确到百分之几到百分之十几的水平. 而“等同带”现象, 如前所述, 要求的精度是千分之几, 因此必需有新的理论才能对“等同带”现象做严格的定量描述. 这也就是为什么迄今(包括本文)对此问题的讨论, 在理论上均属于定性的或半定量的原因之一. (3) 从实验方面, 不仅需要在更大范围内比较偶-偶核与偶-偶核, 奇  $A$  核与相邻偶-偶核, 还得进行奇-奇核与奇- $A$  核的系统比较, 寻找“等同带”现象, 跟踪抵消的全过程. 例如对于一些新丰质子区与丰中子区核转动带的研究, 也是当前筹建中的放射性束流装置应该考虑的实验工作之一.

作者感谢 C. Baktash, R. F. Casten, J. D. Garrett, I. Y. Lee 和 L. L. Riedinger 等博士所作的有益讨论.

#### 参 考 文 献

- 1 Byrski T, et al. Phys. Rev. Lett., 1990, 64 : 1650
- 2 Stephens F S, et al. Phys. Rev. Lett., 1990, 65 : 301; Stephens F S, et al. Nucl. Phys., 1990, A520 : 91c
- 3 Baktash C, et al. Bull. Am. Phys. Soc., 1991, 36 : 2156
- 4 Ahmand I, et al. Phys. Rev., 1991, C44 : 1204
- 5 Casten R F, et al. Phys. Rev., 1992, C45 : R1413
- 6 张敬业, Hughes R. Phys. Rev., 1992, C46 : R39
- 7 张敬业, et al. Phys. Rev. Lett., 1992, 69 : 1160
- 8 Baktash C, et al. Phys. Rev. Lett., 1992, 69 : 1500

9 张敬业, Aberg S. Nucl. Phys., 1982, A390: 314

10 Bengtsson R, 张敬业. Phys. Lett., 1984, B315: 358

## On Identical Bands at Normal Deformation Nuclei

Zhang Jingye

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

**Abstract** “Identical bands” (i. e. those with surprisingly similar moments of inertia) have been found through several analyses of known bands in normally deformed nuclei. In this paper, we analyze bands in odd-proton nuclei ( $A=150\sim 190$ ) and  $A-1$  even-even adjacent nuclei with stringent criteria. The “identical bands” are found to be associated with upsloping particle states. Therefore the cause of occurring “identical bands” may be a cancellation of effects on the moment of inertia between pairing and deformation reduction. The related challenges to the traditional nuclear theory are described as well.

**Key Words** identical band, moment of inertia, pairing, deformation, criteria.

### 名人介绍

## GSI 新任所长

从 1992 年 10 月开始, Hans Joachim Specht 教授担任德国 GSI 研究所所长, 任期五年, 兼任董事会主席。前任所长 Paul Kienle 教授在 GSI 服务八年之后将返回慕尼黑工业大学。

Hans Joachim Specht 于 1936 年生于德国西部的威斯特法伦城。1956~1962 年间, 他在路德威希·马克希密利安大学和慕尼黑工业大学攻读物理专业, 并在苏黎世联邦工业大学短期学习。1962 年毕业于海因茨·迈尔莱布尼茨学院, 两年之后获得博士学位, 论文题目是核裂变碎片与原子碰撞时的内壳层电离。此间, 对核裂变的研究产生了浓厚的兴趣。1965~1968 年, H. J. Specht 曾在加拿大巧克河实验室的串列静电加速器上工作。研制了一种新型的火花探测器, 完成了裂变过程中间结构的第一批实验。以后回到慕尼黑, 在新建成的串列静电加速器上继续从事裂变研究。1972 年, 他找到了核形状同质异能性的第一个实验证据。

1973 年, H. J. Specht 成为海德堡大学物理学院的教授。在马克恩·普郎克研究所的串列静电加速器上继续研究裂变和重离子原子反应。1975 年, GSI 的全离子加速器 UNILAC 刚建成, 他是第一批实验者之一, 研究内容是重离子反应后的多体衰变, 并完成了  $U+U$  反应的第一次系统测量。

为寻找新的挑战, H. J. Specht 的后期研究方向转向了高能强子物理领域。1983 年, 在 CERN 的交叉储存环 (ISR) 上开始研究  $p-p$  反应时 Jet、光子和电子对的产生。他是在超质子同步加速器 (SPS) 上进入极端相对论核-核反应研究新领域的第一批学者之一。

在 H. J. Specht 的科学生涯中, 他在原子物理、重离子物理、高能强子物理和探测器装置的改进等诸方面都有重大贡献。此外, 他还在德国、欧洲和美国的多种科技管理机构担任职务。1974~1979 年和 1986~1988 年, 他是德国核物理专业联合研究专家委员会的成员, 并在 1983~1985 年担任主席。1988 年, 作为联邦研究和发展部的一个专门委员会的主席, 提出了受到高度评价的“中能核物理基础研究今后的发展”的报告。在 GSI 研究所, 他曾是临时用户委员会 (VBA) 主席 (1974~1977), 用户委员会 (BA) 主席 (1980~1982), SIS/ESR 计划咨询委员会 (PAC) 的成员 (1987~1988), 实验委员会 (EA) 的成员 (1989~1991)。在 1984~1987 年, 他还是学术委员会 (WR) 的成员。

(中国科学院近代物理研究所 郑华智供稿)