

关于核形状及对关联随自旋 及组态变化规律的探讨

张敬业

(中国科学院近代物理研究所)

自1977年B. Mottelson在东京国际核物理大会上肯定和介绍了推转壳模型⁽¹⁾以来,到七十年代末,利用这一模型的理论结果来描述大形变核的高自旋态行为获得了巨大的成功^(2,3)。利用与转动频率无关的基态形变 ϵ 和对能隙 Δ (通常用奇偶质量差的80%,原因见下述),算得的第一次带交叉(超带与基带的交叉)频率,两带相互作用强度及排列角动量等物理量能够和大量大形变核的实验结果基本相符。对于通常推转模型的缺点,诸如把实际上是给定自旋下两带间的相互作用换成给定转动频率下的相互作用所带来的交叉区的不连续性问题,以及利用BCS方法来处理核内对关联所带来的近似性等问题,均有了比较深入的研究和具体改善的方案^(2,3,4)。因此这一模型已为大量高自旋态核结构的理论与实验工作者所接受。Bohr所一Land小组所写的Nilsson位的推转壳模型程序以及Land-Warsaw小组所写的Woods-Saxon位的推转壳模型程序亦已在世界各自旋态核结构研究中心广为流传。

但是进一步的实验事实,例如:除转晕带外其它旁带的性质;Signature的劈裂情况;出现在更高转动频率下的第二次,第三次带交叉行为;特别是过渡区形变比较小,比较软的原子核的高自旋态行为等等,上述假定核形变在和能对隙 Δ 为常数的简单推转壳模型就无法比较准确地加以描述。其实这并不奇怪,因为实际上核的形变与对关联是

自旋(或转动频率)和组态(即内禀结构)的函数。

在对高自旋态核结构的认识发展过程中,下面一些问题的探讨是具有一定意义的。

(1) 1971~1972年间, Grosse, Stephaens和Diamond⁽⁵⁾,为了论证大形变稀土核的回弯现象是来自于费米面附近一对占据 $i_{13/2}$ 轨道的中子转动排列而不是对崩溃效应,提出了利用相邻奇A核的回弯行为来判断偶偶核回弯机制的“GSD”判据。这一基于阻塞效应的判据在物理图象上是简单明了的,而且他们自己所选择的一组实验也得到了自洽的结果,因此很快地被高自旋界所接受。但是随着奇A核实验数据日趋丰富,这一判据的局限性也开始显露出来。我们在1979—1980年⁽⁶⁾根据当时所能收集到的24个奇A核的34条带的的数据,指出了这个判据成立的条件是“存在奇核子的偶偶核应该和相邻偶偶核十分相似”。而一般情况下,偶偶核实加上一个奇核子,将改变核内对相互作用,长程相互作用,从而会改变整个核的转动惯量,软硬程度以及超带基带间相互作用等与回弯是否和怎样出现十分敏感的物理量。这一切均会导致奇A核的偶偶核实区别于相邻的偶偶核,而使此判据的可靠性降低。所收集的数据也确实有不少与此判据相矛盾的情况。因此在运用此判据时必须十分小心,尤其是进行定量比较。这里的本质问

题是, 根据当时所能收集到的全部稀土区奇A核的实验结果强调了核的形变与对关联随组态不同而不同的事实以及由此而来的对于回弯行为的影响。

(2) 1977—1978年以来, 另外一个比较流行的探讨回弯机制的手段是分析比较排列角动量, 即将实验上的超带与基带的角动量差⁽¹⁾, 如图1所示, 与推转壳模型理论计算所得的给定核子类别, 给定轨道的排列角动量作比较。从而确定回弯是处于那一条轨道上的那一类核子排列所致。这类判断方法也是比较粗略的。因为实际上, 从实验上所

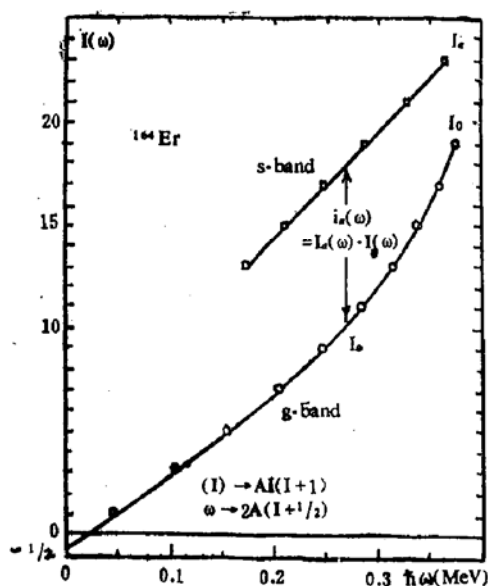


图1 ^{164}Er 核的超带与基带的角动量差 $i_\alpha(\omega) = I_\alpha(\omega) - I_0(\omega)$. 其中下标 α 表超带, 下标 0 表基带

提取的超带与基带的角动量差, 包含着各种效应的贡献⁽⁷⁾。仅当核的形变和对关联在所讨论的频率范围内与所涉及的组态变化中保持常数的前提下, 才是所谓的排列角动量, 对应于流行的简单推转模型程序所算得的数值。但由于一般情况下, 这一条件并不满足, 因此实验上所提取的两角动量差, 应该除包括由于核子的转动排列贡献的排列角动量外, 还有形状变化以及对关联减弱两部分的贡献。随后作者又从微观上分别计算了这三部分贡献⁽⁸⁾, 与实验数据作了比较, 证实了

这三种贡献的存在。指出了大形变核, 如 ^{164}Er , 形状变化对两带角动量差的贡献尽管可以近似忽略, 但对关联减弱的贡献可达约25%, 是不可以忽略的(正因为这一事实, 在大形变核的简单推转模型计算中必须取 $\Delta \approx 0.8 \times \Delta_0$, Δ_0 是基态奇偶质量差, 才能得出和实验大致相符的结果)。而对于过渡核, 三类效应无一可以忽略。

(3) 众所周知, 核的形状和核内对关联是密切相关的。为了探讨它们的效应, 显然第一步应冻结其中一个因素, 而讨论另一个因素的作用。我们首先根据大形变稀土核 (^{168}Er — ^{160}Er) 在所研究的频率与组态变化的范围内, 形变可以近似假定为常数的条件, 冻结了形变自由度, 利用推转壳模型通过自洽计算, 定量讨论了对关联随着频率与组态变化的规律⁽⁴⁾。结果表明, 对这几个核来说, 相对于基态, 在转动频率 $\hbar\omega$ 接近0.25 MeV的范围内, 单准粒子态的对关联要小10~25%, 而双准粒子态小25~35%。

(4) 为了要探讨形状变化的规律, 我们又从微观上计算了在更高自旋下不存在对关联对形状及转动惯量随自旋的变化规律⁽⁹⁾。系统给出了Yb偶同位素位能面随自旋的变化图象及两类转动惯量与刚体值的比较。定量给出了壳结构, 形状及自旋的效应。并预言了Yb偶同位素超形变 ($\epsilon_2 \geq 0.45$) 可能出现的临界自旋值, 这有待于实验的进一步验证。1986年初, 英国的Daresbury实验室在 ^{162}Dy 的高自旋谱中, 确实发现了超形变核转动带⁽¹⁰⁾。

(5) 在目前流行的推转壳模型的计算中, 对于对关联一般只考虑单极对力。但从原则上讲还可能存在着高级项, 例如四极对力, 理论上曾有人作过一些探讨。1982年玻尔所J. D. Garrett等从实验上发现了 $^{161}\text{Er}_{93}$ 的 $\frac{11}{2}$ [505] 带, $^{178}\text{W}_{90}$ 的 $\frac{2}{5}$ [512] 带及 $^{181}\text{Os}_{105}$ 的 $\frac{7}{2}$ [514] 带的带交叉频率并不

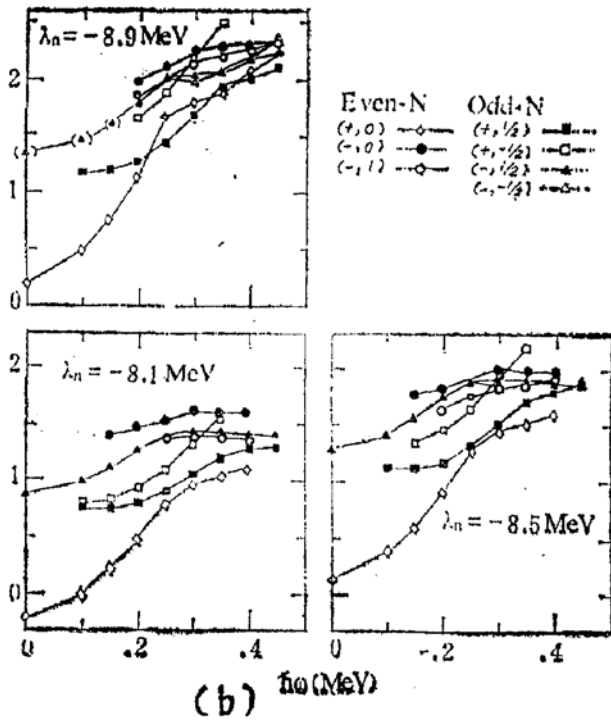
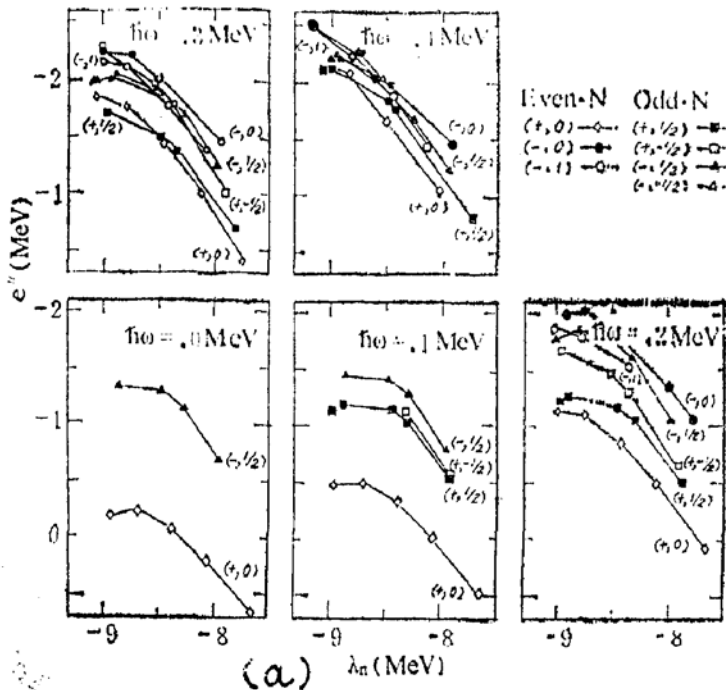


图2 (a)双罗斯量作为费米能 λ_n 的函数及(b)作为转动频率 $\hbar\omega$ 的函数

象通常奇A核负宇称带那样明显地低于相邻偶偶核的对应值⁽¹¹⁾。一个很自然的解释就是认为四极对力起了作用，因为上述三条轨道的四极矩是负的，从而产生了与通常长椭圆轨道所贡献的四极对力相反的效应，使得这些组态的转动带的关联值与相邻偶偶核相比无甚下降，所以交叉频率亦不减小⁽¹¹⁾。

另一个可能解释是这几个组态下的核的形状与相邻偶偶核不同，从而导致带交叉频率的异常变化。为此我们从理论上⁽¹²⁾计算了这些组态下有关核的形状不同于相邻偶偶核的效应，发现据此无法解释实验，从而支持了上述异常现象是来自于四极对力的重要观点。

(6) 1983年以来，理论和实验上越来越多地注意到对关联消灭过程中存在动力学效应。即使静力学对关联消失了，动力学对关联仍可在相当广的转动频率范围内存在^(13,14)。于是我们致力于发展一套从高自旋实验数据中，经过理论计算，定量提取剩余有效关联的方法。一种综合普通空间与规范空间信息的分析方法⁽¹⁴⁾。图2是利用Yb同位素的高自旋数据所作的在普通空间和规范空间中的双罗斯量(Roution，即在转动座标系中的系统总能量)图⁽¹⁴⁾。理论上指出⁽¹³⁾，宇称为+、Signature为0的组态，总是存在有最大的有效关联；而负宇称的组态(尤其是Signature为0的)，具有最小的有效关联。由图2a)可见，对于给定的转动频率，不同的组态间的罗斯量差，正好给出给定费米

能(在此是中子的费米能)下的有效关联差，由此可以得出各种组态(相对于最小关联的组态)的有效关联。显然由图可见，这样的有效关联是随转动频率的增大而减小的。当 $\hbar\omega=0$ 时，(+, 0)组态的有效关联约为 $\Delta e'' \approx 1.1 \text{ MeV}$ (对应于 $\lambda_n \approx 8.5 \text{ MeV}$)，大致是基态的奇偶质量差，亦即基态的对关联的量值。但到 $\hbar\omega \approx 0.4 \text{ MeV}$ ，理论估计，中子静态对关联已消失⁽¹⁵⁾。然而 $\Delta e''$

$\approx 0.35 \sim 0.4 \text{ MeV}$, 这应该主要来自动力学对关联了。这个数量与理论估计⁽¹⁸⁾差不多。知道了给定频率下的有效关联, 我们原则上就有可能从实验的准粒子能谱中加以扣除, 从而得到无关联的经验单粒子谱。图3就是这样构成的中子经验单粒子谱。显然这对于检验各类模型单粒子位具有原则的意义。由于实验数据的限制, 目前我们还只能给出很小的频率范围和 neutron 数范围内的经验单粒子谱。

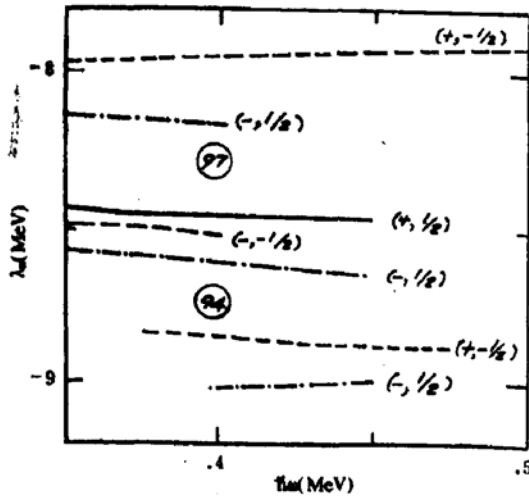


图3 经验的中子单粒子谱

这套分析高速旋转核内有效关联的方法, 引起了高自旋界的兴趣。今年年初以来, 一个包括丹麦、英国等八个国家的三十余位高自旋实验与理论工作者的大协作组, 已开始在当今拥有最好的 λ 谱探测设备的英国Daresbury实验室进行实验, 以期进一步运用和发展这一套分析方法⁽¹⁹⁾。

(7) 关于核的形变已有过不少系统的理论计算^(17, 18)。他们在计算基态的形变时, 考虑了对关联的效应, 而对于高自旋态 ($I \geq 30\hbar$), 则认为对关联可以忽略⁽¹⁷⁾, 所得结果在趋势上是和大量原子核的实验数相符的。但他们所考虑的形变自由度只有 (ϵ_2, γ) ⁽¹⁷⁾, 或者只有 (ϵ_2, ϵ_4) ⁽¹⁸⁾。这几年来对于过敏核如Pt—Au—Hg区的研究发现, 只考虑两个形变自由度是不够的。必须同时考虑三类自由度 $(\epsilon_2, \epsilon_4, \gamma)$ 。1983

年以来, 一个包括中国、丹麦、瑞典、波兰和美国的理论工作者的合作班子, 利用 Woods-Saxon 位进行着一项大规模的三维形变空间的总罗斯量面自洽计算⁽¹⁹⁾, 所得基态形变和大面积的实验结果相符, 见图4。理论基态形变归为球形, 扁椭球, 长椭球和三轴不对称形 (包括 γ 软核) 四类。对这个区

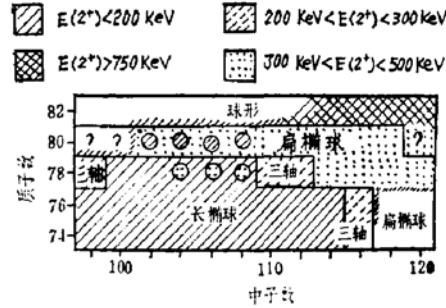


图4 总罗斯量面自洽计算所得的基态形变与实验 2^+ 能级的比较。粗实线划开的区域是理论结果, 而斜线、叉线及点号表实验值, 圆圈表形状共存。

域的核, 所得的长椭球形变范围为 $0.20 \leq \beta_2 \leq 0.25$, 按推转壳模型估计, 这样的形变对应于 $E(2^+) \leq 200 \text{ KeV}$ 。而扁椭球的形变范围是 $-0.16 \leq \beta_2 \leq -1.0$, 其对应的 2^+ 态能量处于 200 KeV 到 500 KeV 。可见对于这个区域的核来说, 长椭球和扁椭球的形变绝对值有明显的差别, 因此易于从 $E(2^+)$ 上加以区别。而三轴不对称核, 在这个区域, $E(2^+)$ 为 $200 \sim 300 \text{ KeV}$ 之间。从图4可见, 从W到Pb的同位素的实验 2^+ 能级, 和理论值符合得很好。尤其是Hg同位素182—188, 理论计算指出基态是扁椭球, 但同时存在长椭球的次极小, 而Pt同位素182, 184, 186, 基态是长椭球且有扁椭的次极小。实验上均发现了对应的形状共存现象。理论上还指出¹⁷⁸Hg, ¹⁸⁰Hg也是形状共存核, 但尚无实验数据可资比较。²⁰⁰Hg核, 理论结果是球形核, 而其实验 2^+ 能级却小于 500 KeV , 似应属于扁椭球。关于这个核的形态还有十分不同的意见, 即认为可能是呈中空的气泡形⁽²⁰⁾, 这些均有待于进一步实验事实的检验。

很显然应该同时探讨形状和对关联随转动频率和组态同时变化的规律。这一自洽计算也正在进行中,并已初步获得有意义的结果⁽¹⁹⁾,仅包括两个形变自由度的自洽计算,已有人做过,例如参看文献(21)。

(8) 尽管Woods-Saxon位一般说来更接近于真实核位,但由于计算量远比Nilsson位大,而后者经过对参数 K , μ 的改进有可能获得和前者十分相近的结果,因此对于Nilsson位进行改进仍是有实际意义的。1985年以来, Pt—Au—Hg区大量的高自旋数据表明,流行的Nilsson位的质子 K , μ 参数所得的单粒子能级在此区并不适用。一组改善的质子 K , μ 参数⁽²²⁾,可以给出与这个区域实验数据基本相符的核形状,不同转动带(对应于不同组态)的带头能量,并能解释¹⁸⁴Pt核转晕带的自旋与转动频率关系图上出现的大的上弯现象和相邻奇A核的阻塞现象^(22, 23)。

关于对关联和核形状随着自旋(转动频率)和组态的变化规律,近年来是国际高自旋态核结构研究主要的前沿课题之一,引起高自旋界广泛的重视,并且取得了重要的进展。从原则上讲,为了解决这个问题,必须有尽量接近真实核位的模型核位,正确的对相互作用机制和处理方法(如四极对力,动力学效应,BCS方法的近似性与改进,粒子数守恒的处理⁽²⁴⁾,粒子数投影等等);包括必要的足够多的形变自由度的考虑以及对推转壳模型的局限性的进一步探讨与改进等等。以此为出发点,通过正确的自洽计算,才有可能获得与大范围的实验数据相符的结果,从而揭示出内含的物理规律。本文所讨论的八个问题是近年来研究核形状与对关联随自旋与组态变化规律这一前沿课题中一部分有兴趣的问题。显然要弄清整个变化规律,还有大量的理论和实验工作要做。

参 考 文 献

1. A. Bohr and B. Mottelson, J. phys. Soc. Japan 44 (1978) Suppl. p. 157-172.
2. I. Hamamoto, Nucl. Phys. A 271 (1976) 15;
Niels Bohr Centennial Conf. "Nuclear Structure" (1985) p. 129
3. R. Bengtsson and J. D. Garrett, Lund-MP-H-84 Preprint
J. D. Garrett, G. B. Hagemann, and B. Herskind, NBI, TAL-86-1, to be published in "Annual Review of Nuclear and Particle Science", V. 35.
4. R. Bengtsson and Jing-Ye Zhang (张敬业), Proc. Nucl. Phys. Workshop, Trieste, Italy, Oct. 5-30 1981. P. 165;
Phys. Lett., 135B (1984) 358
5. E. Grosse, F. S. Stephens and R. M. Diamond, Phys. Rev. Lett. 31 (1973) 840
6. 张敬业, 《原子核物理》3 (1981) 193
7. 张敬业, 《高能物理与核物理》, 4 (1980) 382;
Slides Report of workshop on "Nucl. Struct. at High spins." Risø Denmark, May, 1981, P. 94
8. 张敬业, 《高能物理与核物理》, 8 (1984) 346
9. Jing-Ye Zhang (张敬业), S. Åberg, Nucl. Phys. A 390 (1982) 314
C. Anderson, G. Hellstrom, G. Leander, I. Ragnarsson, S. Åberg, J. Kramlinde, S. G. Nilsson and Z. Szymanski, Nucl. Phys. A 309 (1978) 141
10. P. Twin, Invited talk "Phys. at Tandem." Beijing 26-30, May, 1986.
11. J. Garrett, G. Hagemann, B. Herskind, J. Bacelar, R. Chapman,
J. Lisle, J. N. Mo, A. Simcock, J. Willmott, H. Price, Phys. Lett., 118B (1982) 297.
12. Jing-Ye Zhang (张敬业), L. L. Riedinger, J. D. Garrett, Phys. Rev., C28 (1983) 446.
13. R. Broglia, M. Diebel, M. Gallardo and S. Frauendorf, Phys. Lett., 166B (1986) 252
R. Broglia and M. Gallardo, Nucl. Phys. A 447 (1986) 467C
14. Jing-ye Zhang (张敬业), J. D. Garrett, J.

- C. Bacelar, and S. Frauendoff. Nucl. Phys., A453(1986)104
15. I. Hamamoto, Phys. Scripta, T5(1983) 10
16. J.D.Garrett, Private Communication. Nov.1986.
J.Ananospados等38人, "Correlations in Rapidly Rotating Rare-earth Nuclei". proposal to Daresbury Lab. Nov. 1986.
17. S.Åberg, Phys, Scripta 25 (1982) 23
18. R.Bengtsson, P.Möller, J.R.Nix, Jing-Ye Zhang (张敬业) Phys. Scripta 29 (1984) 402
19. Jing-ye Zhang (张敬业), Invited Talk at "Physics at Tandem" conf. 26-30 May. 1986.
R.Bengtsson, T. Bengtsson, J.Dudek, G. Leander, W. Nazarewicz, Jing-ye zhang (张敬业), Phys. Lett., (1987)
20. C.y.Wong, Phys.Rev.Lett 55(1985)1973
21. R.Bengtsson, Yang-shau chen, Jing-ye-Zhang (张敬业), S.Åberg, Nucl.Phys., A 405 (1983) 221
22. Jing-ye Zhang (张敬业), L.L.Riedinger, A.J.Larabee, J.Phys.G, Nucl.Phys. (1987) to be Published.
23. 张敬业, 钟纪泉, «高能物理与核物理», (1987) 即将发表
24. J.Y.Zheng, T.S.Cheng, Nucl.Phys.A 405 (1983) 1.
C.G.Anderson, J.Krumlinde. Nucl, Phys. A 334 (1980) 486
25. R.Bengtsson, Jing-ye Zhang (张敬业), to be published
J.L. Edigo, P. Ring, Nucl. Phys. A388 (1982) 19

斟 误

本刊1987年第一期11页图,排反,特此更正如下:

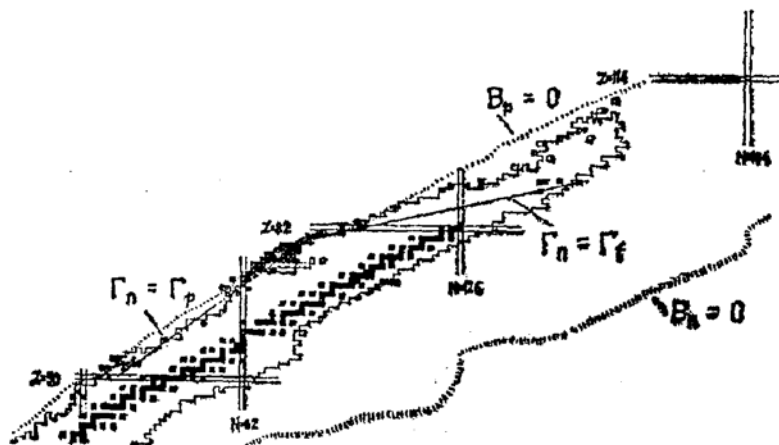


图1.GSI合成的新核素“O”