

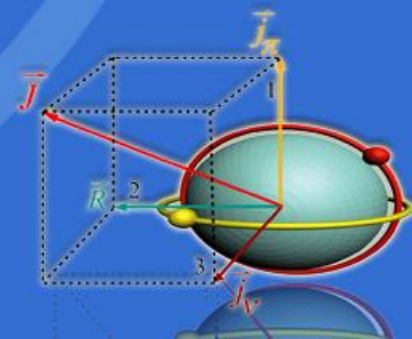


山东大学(威海)
SHANDONG UNIVERSITY, WEIHAI



奇A核 ^{119}Sb 中奇异运动模式的实验和理论研究

报告人: 贾慧
合作导师: 王守宇
山东大学(威海) 空间科学与物理学院



目录

- ❑ 研究背景
- ❑ 实验介绍
- ❑ 结果与讨论
- ❑ 总结

目录

- ☐ 研究背景
- ☐ 实验介绍
- ☐ 结果与讨论
- ☐ 总结

研究背景

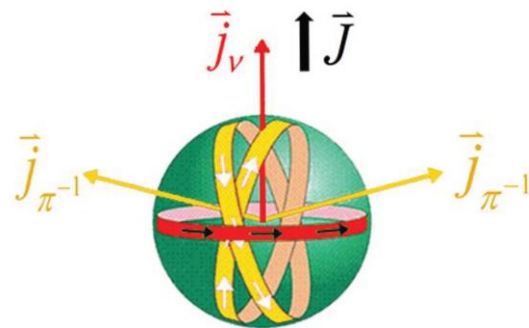
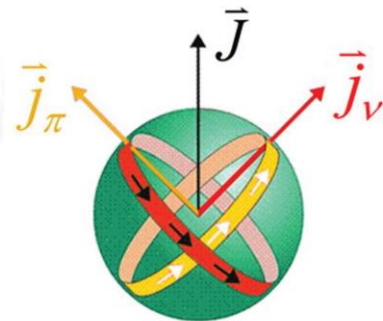
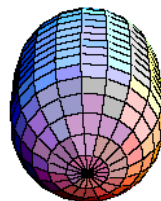
➤ 早期人们认为原子核的规则转动带是由形变引起的，其角动量来源于核芯的集体转动。

➤ 近些年，在近球形原子核中也观测到了规则的转动带，人们把这样的转动带称为磁转动带^[1]和反磁转动带^[2]。

[1] Frauendorf, Meng, and Reif, in Proceedings of the Conference on Physics from Large-γ-Ray Detector Arrays, edited by M. A. Deleplanque (University of California Press, Press, Berkeley, 1994).

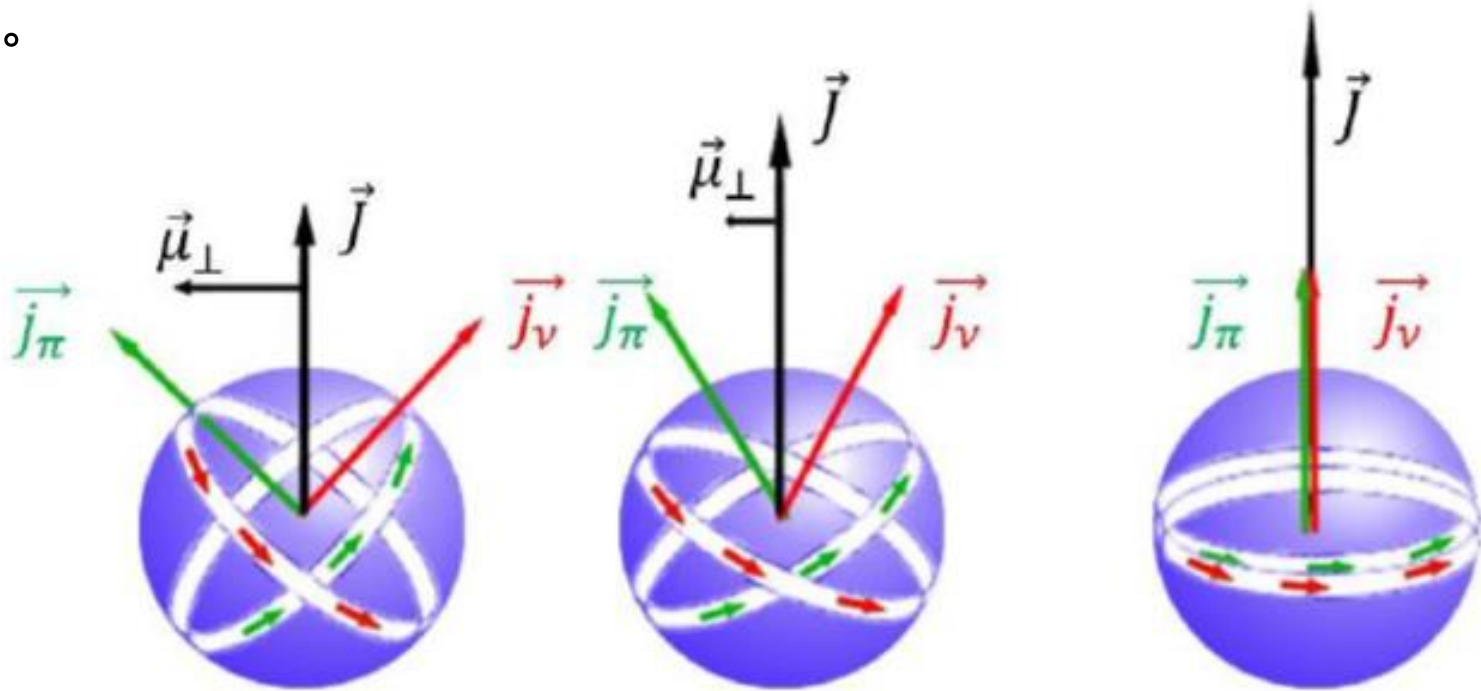
[2] Frauendorf, in: Proceedings of the Workshop on Gammasphere Physics, Berkeley, edited by M. A. Deleplanque, I. Y. Lee, and A. O. Macchiavelli, Singapore: World Scientific, p272, (1996).

➤ 磁转动和反磁转动是一种全新的原子核运动模式，其角动量主要来源于价中子与价质子角动量的耦合。



磁转动带

- **磁转动**：在近球形核中，由质子-粒子(空穴)与中子-空穴(粒子)的角动量耦合构成了总角动量^[1]；此种转动是由磁偶极矩转动而形成的^[2]；也被解释为**剪刀机制**。



磁转动的角动量耦合示意图^[1,2]

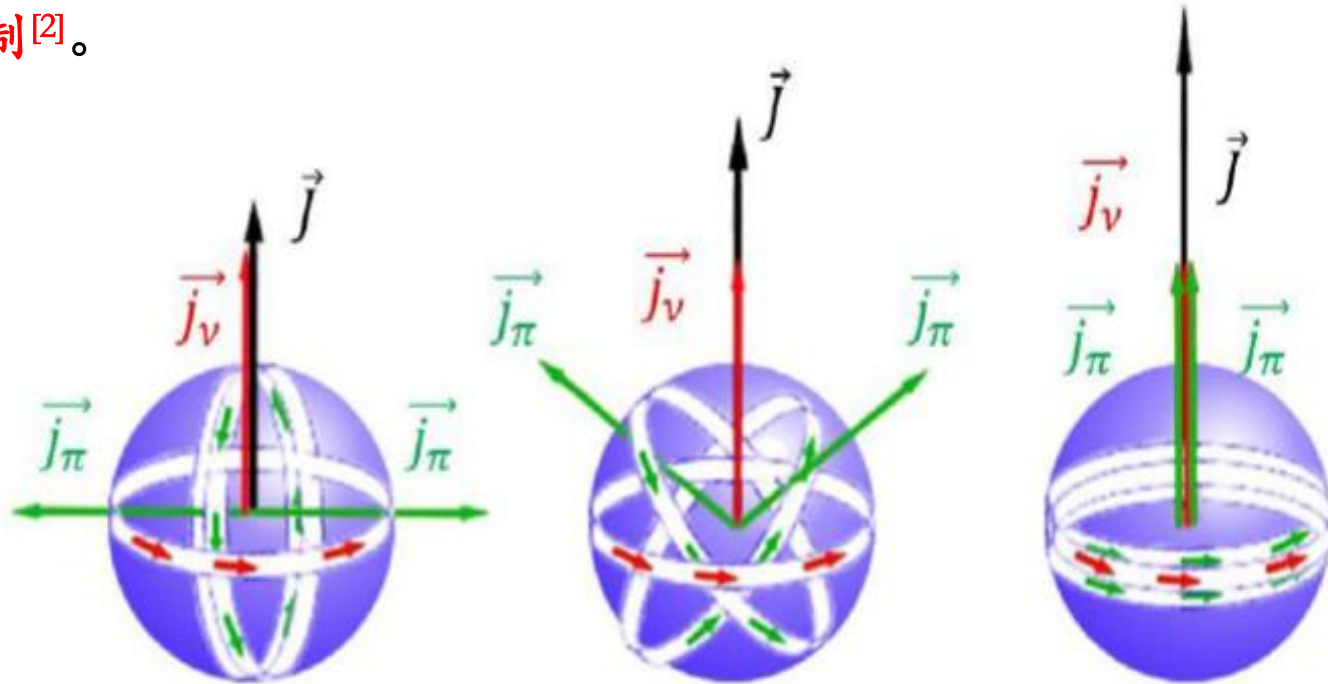
- **磁转动带能谱特征**：由磁偶极(M1)跃迁连接的 $\Delta I=1$ 的转动能谱， $B(M1)$ 值随着自旋增加而减小。

[1] S. Frauendorf, Nucl. Phys. A 557, 259c (1993).

[2] S. Frauendorf, J. Meng, and J. Reif, in Proceedings of the Conference on Physics from Large-Ray Detector Arrays, edited by M. A. Deleplanque (University of California Press, Berkeley, 1994), vol. II of Report LBL35687, p. 52.

反磁转动带

- **反磁转动**：在近球形核中，两个价质子的角动量相互靠拢，总角动量和中子角动量方向几乎不变；总磁矩的方向沿着总角动量的方向^[1]；也被解释为**双剪刀机制**^[2]。



反磁转动的角动量耦合示意图^[3,4]

- **反磁转动带能谱特征**：由电四极(E2)跃迁连接的 $\Delta I=2$ 的转动能谱， $B(E2)$ 值随着自旋增加而减小。

[1] Frauendorf, Rev. Mod. Phys. 73, 463 (2001). [2] Choudhury, Jain, Patial, PRC 82, 061308(R) (2010)

[3] S. Frauendorf, Nucl. Phys. A 557, 259c (1993).

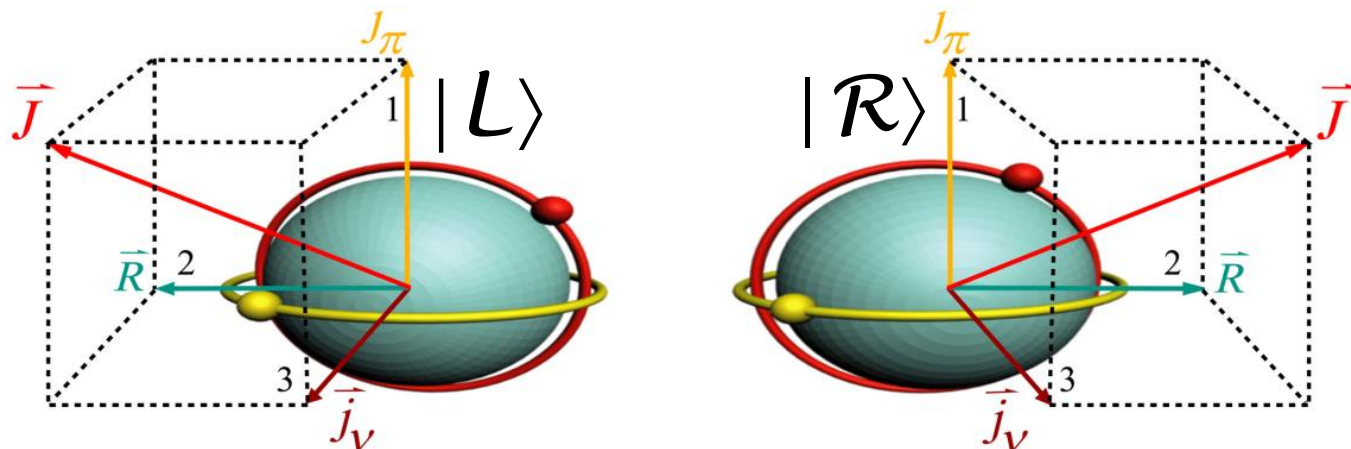
[4] S. Frauendorf, J. Meng, and J. Reif, in Proceedings of the Conference on Physics from Large- γ -Ray Detector Arrays, edited by M. A. Deleplanque (University of California Press, Berkeley, 1994), vol. II of Report LBL35687, p. 52.

手征双重带

- 1997年, Frauendorf和Meng首次在理论上预言, 具有三轴形变的原子核在转动时可能实现手征性——手征双重带。

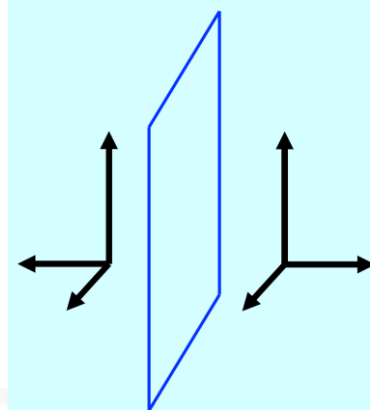
Frauendorf and Meng NPA617, 131(1997)

$$\chi |L\rangle = |R\rangle; \chi |R\rangle = |L\rangle$$



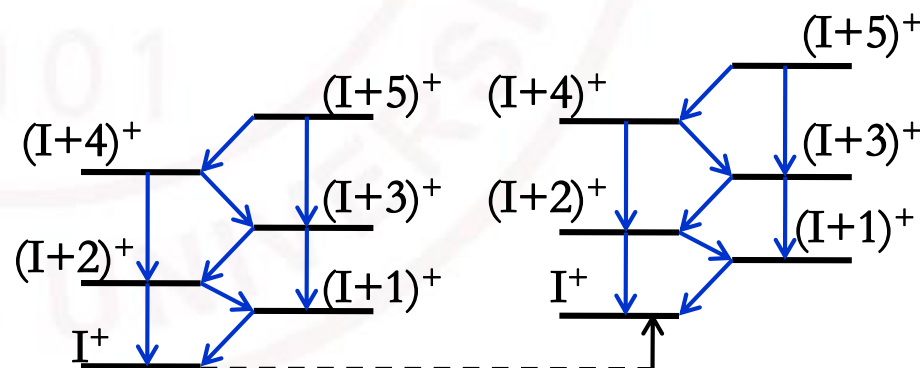
原子核手征性示意图

$$\chi = P R_y(\pi)$$



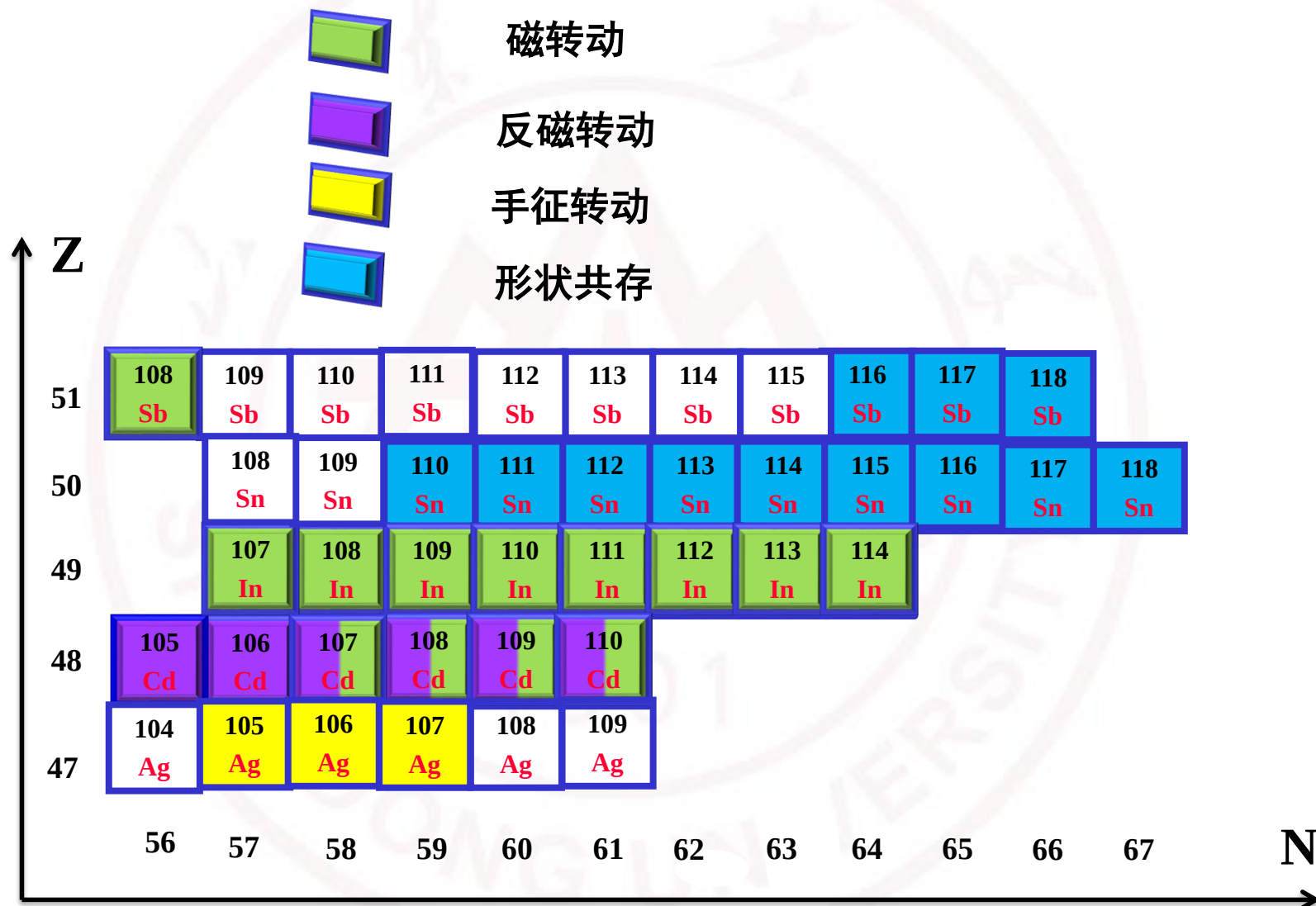
Aplanar rotation

- 实验信号: 两条宇称相同能级近简并的 $\Delta I = 1$ 的转动带, 即手征双重带。



手征双重带

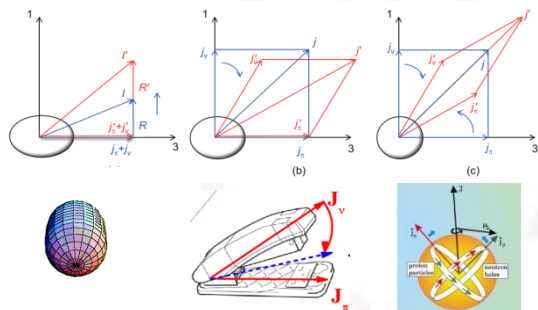
Z~50的110核区丰富的核结构现象



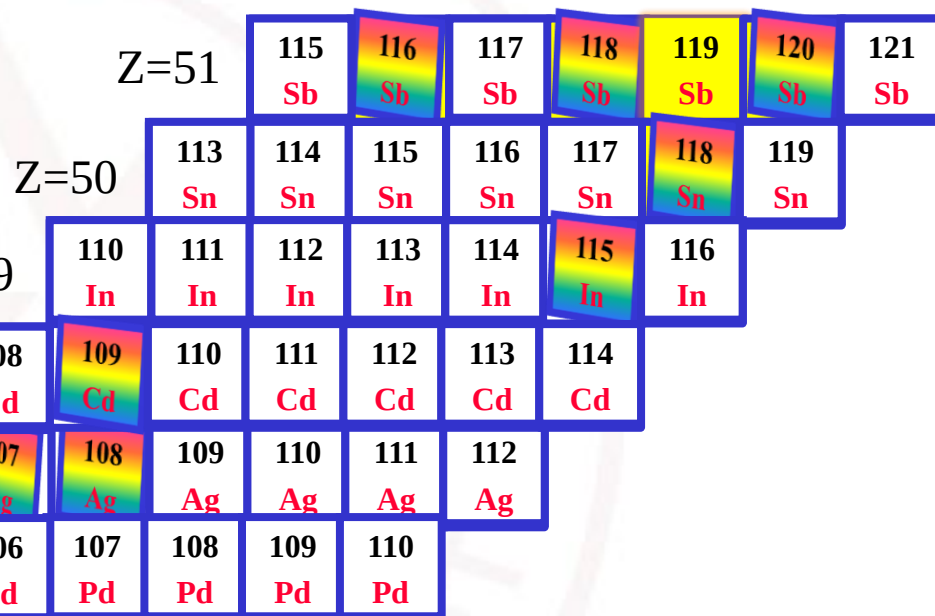
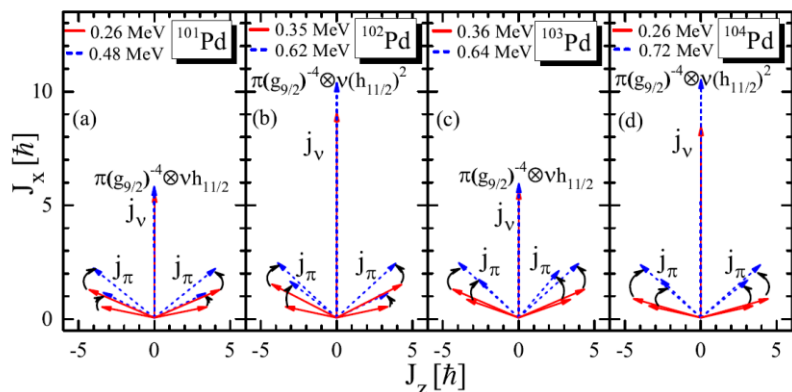
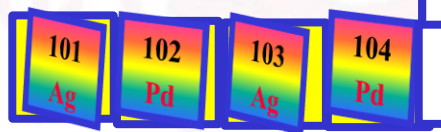
Z=50核区核素图

Z~50的110核区研究进展

- ^{116}Sb 、 ^{118}Sb 、 ^{118}Sn 和 ^{120}Sb 中的形状共存
- 发现并命名了一种新的运动模式-订书机模式
- 建议 ^{109}Cd 中的反磁转动机制
- 建议 ^{107}Ag 中的手征双重带
- 建议Pd同位素中存在类雨伞反磁转动模式



Z=46



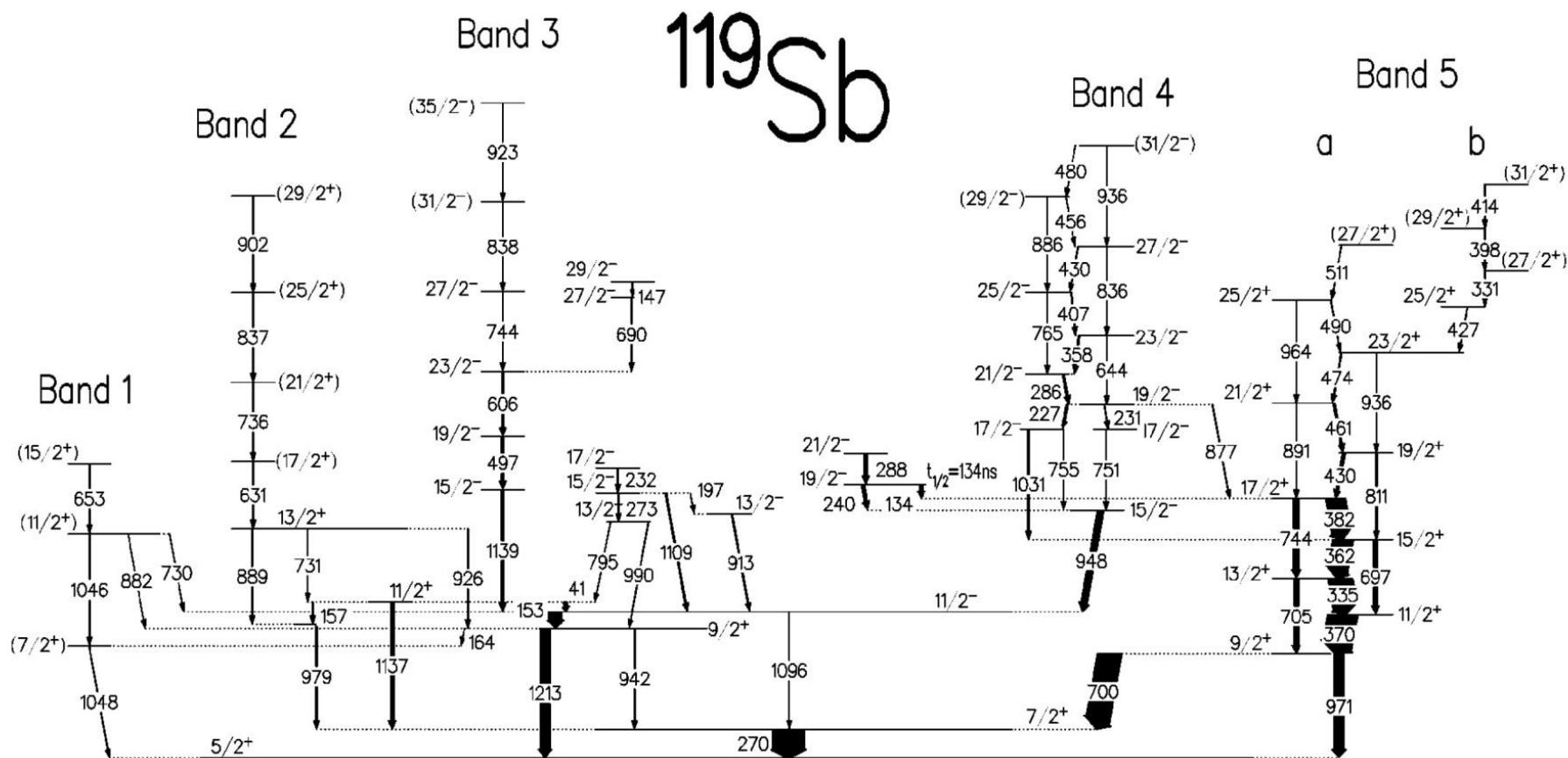
- ^{118}Sb : S. Y. Wang *et al.*, Phys. Rev. C 82, 057303 (2010).
 ^{118}Sn : S. Y. Wang *et al.*, Phys. Rev. C 81, 017301 (2010).
 ^{116}Sb : S. Y. Wang *et al.*, Phys. Rev. C 86, 064302 (2012).
 ^{108}Ag : C. Liu *et al.*, Phys. Rev. C 88, 037301 (2013).
 ^{107}Ag : B. Qi *et al.*, Phys. Rev. C 88, 027302 (2013).
 ^{109}Cd : P. Zhang *et al.*, Phys. Rev. C 89, 047302 (2014).
 ^{120}Sb : L. Liu *et al.*, Phys. Rev. C 90, 014313 (2014).
 ^{115}In : Z. Q. Chen *et al.*, Phys. Rev. C 91, 044303 (2015).
 $^{101-104}\text{Pd}$: H. Jia *et al.*, Phys. Rev. C 97, 024335 (2018).

目录

- ☐ 研究背景
- ☐ 实验介绍
- ☐ 结果与讨论
- ☐ 总结

^{119}Sb 研究情况

- 1997年, 纽约州立大学石溪分校的D. R. LaFosse等人利用 ^{116}Cd (^7Li , 4n) 反应研究了 ^{119}Sb 的高自旋态, 束流能量为35 MeV^[9]。

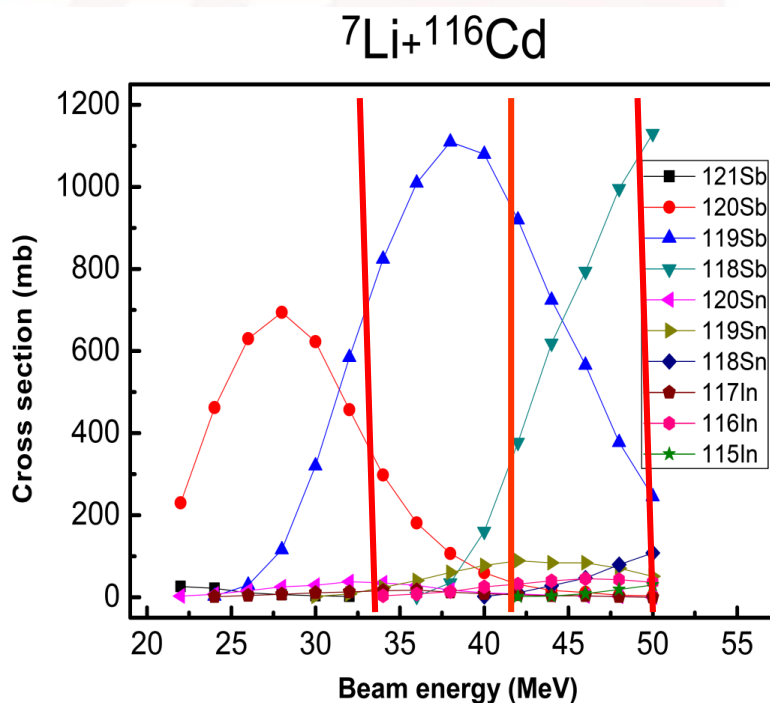


[9]. D. R. LaFosse, et al., Phys. Rev. C56 (1997).

激发函数曲线及实验条件

➤ 我们采用重离子熔合蒸发反应布局 ^{119}Sb 的高自旋态，在中国原子能科学研究院的串列加速器国家实验室进行三次实验。

时间 (年份)	能量 (MeV)	探测阵列	靶材 (自支撑靶)	束流 时间(h)	符合事件 $\gamma\text{-}\gamma$
2011	34	9HPGe+1Clover+2LEPS	2.5 mg/cm ²	80	1.1×10^8
2013	42	9HPGe+2LEPS	2.49mg/cm ²	70	1.2×10^8
2008	50	12HPGe+2LEPS	2.5 mg/cm ²	100	2×10^8



pace2程序计算得到的激发函数曲线

目录

- ☐ 研究背景
- ☐ 实验介绍
- ☐ 结果与讨论
- ☐ 总结

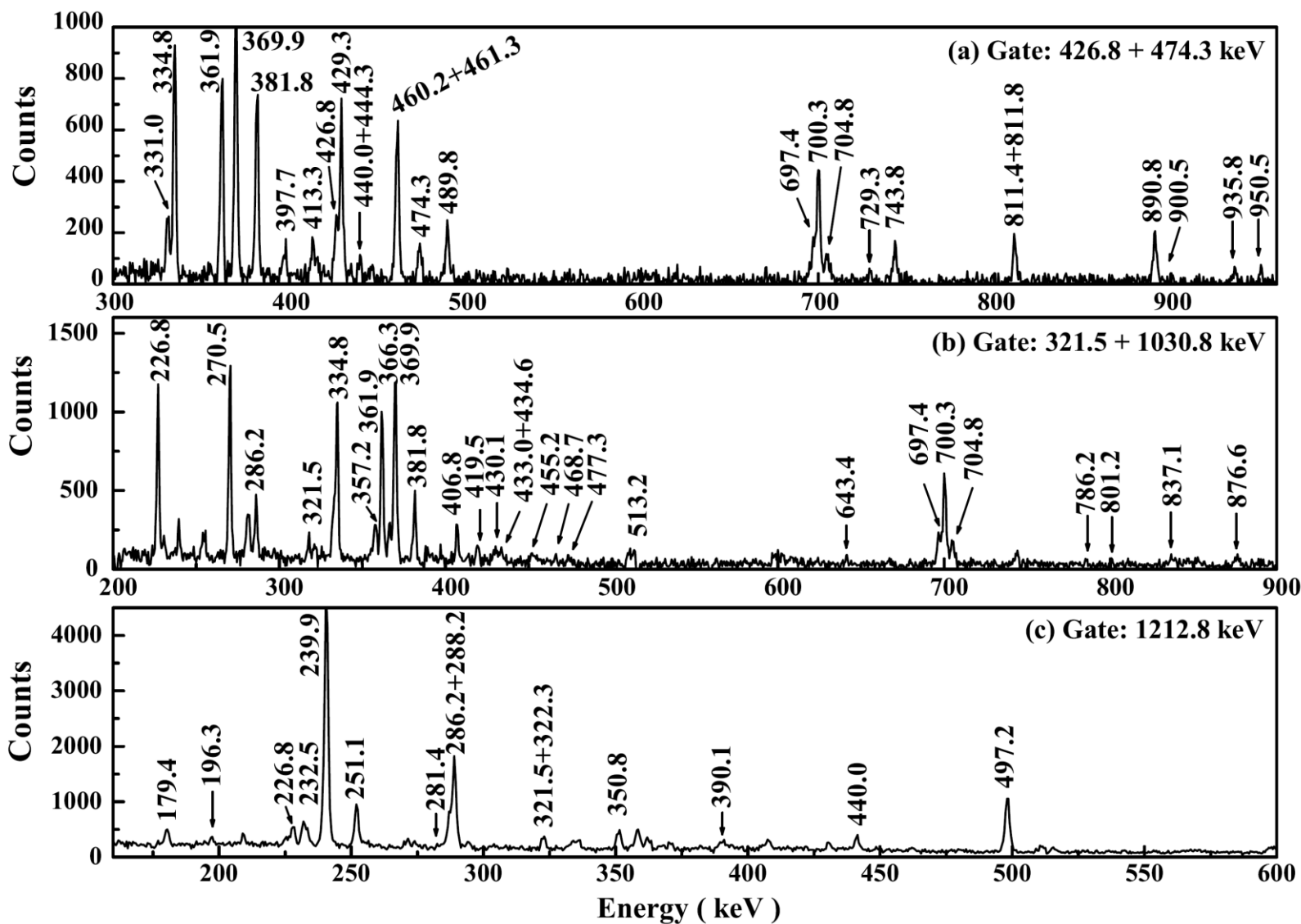
-
- Energy level diagram for ^{119}Sb showing levels 1 through 7. The diagram includes various spin-parity assignments and energy values in keV. Red arrows indicate transitions, and black arrows indicate other transitions. The ground state is $5/2^+$ at 0 keV.
- Key energy levels and transitions (in keV):
- Level 1: $29/2^+$ (440.3*), $25/2^+$ (900.5*), $21/2^+$ (964.3), $17/2^+$ (890.8), $13/2^+$ (743.8), $9/2^+$ (704.8)
 - Level 2: $33/2^+$ (444.8*), $31/2^+$ (413.3), $29/2^+$ (397.7), $27/2^+$ (331.0), $25/2^+$ (279.3*), $23/2^+$ (232.5), $21/2^+$ (191.1*), $19/2^+$ (153.9*), $17/2^+$ (119.4*), $15/2^+$ (81.1*), $13/2^+$ (44.0*), $11/2^+$ (7.5*), $9/2^+$ (0)
 - Level 3: $33/2^-$ (496.9*), $31/2^-$ (479.5), $29/2^-$ (455.2), $27/2^-$ (430.1), $25/2^-$ (406.8), $23/2^-$ (387.1), $21/2^-$ (366.3*), $19/2^-$ (346.8), $17/2^-$ (326.3*), $15/2^-$ (305.8*), $13/2^-$ (285.3*), $11/2^-$ (264.8*), $9/2^-$ (244.3*)
 - Level 4: $29/2^-$ (852.0*), $27/2^-$ (831.5*), $25/2^-$ (811.0*), $23/2^-$ (790.5*), $21/2^-$ (770.0*), $19/2^-$ (749.5*), $17/2^-$ (729.0*), $15/2^-$ (708.5*), $13/2^-$ (688.0*), $11/2^-$ (667.5*), $9/2^-$ (647.0*)
 - Level 5: $33/2^+$ (901.3), $31/2^+$ (880.8*), $29/2^+$ (860.3*), $27/2^+$ (839.8*), $25/2^+$ (819.3*), $23/2^+$ (798.8*), $21/2^+$ (778.3*), $19/2^+$ (757.8*), $17/2^+$ (737.3*), $15/2^+$ (716.8*), $13/2^+$ (696.3*), $11/2^+$ (675.8*), $9/2^+$ (655.3*)
 - Level 6: $35/2^-$ (923.5), $33/2^-$ (903.0*), $31/2^-$ (882.5*), $29/2^-$ (862.0*), $27/2^-$ (841.5*), $25/2^-$ (821.0*), $23/2^-$ (800.5*), $21/2^-$ (780.0*), $19/2^-$ (759.5*), $17/2^-$ (739.0*), $15/2^-$ (718.5*), $13/2^-$ (698.0*), $11/2^-$ (677.5*), $9/2^-$ (657.0*)
 - Level 7: $21/2^-$ (390.1*), $19/2^-$ (370.6*), $17/2^-$ (350.1*), $15/2^-$ (329.6*), $13/2^-$ (309.1*), $11/2^-$ (288.6*), $9/2^-$ (268.1*), $7/2^-$ (247.6*), $5/2^-$ (227.1*), $3/2^-$ (206.6*), $1/2^-$ (186.1*)

-
- ^{119}Sb**
- Energy level diagram for ^{119}Sb showing levels 1 through 7. The diagram includes spin-parity assignments and transition energies in keV. Levels 1 and 2 are at the top right, level 3 is at the top left, level 4 is in the middle left, level 5 is at the top left, level 6 is at the top left, and level 7 is in the middle right. Transitions are marked with red arrows and energies. Some levels are highlighted with blue boxes.
- Key levels and transitions (energies in keV):
- Level 1: $(29/2^+)$
 - Transition to $(27/2^+)$: 440.3*
 - Transition to $(25/2^+)$: 460.2*
 - Transition to $(23/2^+)$: 489.8
 - Transition to $(21/2^+)$: 964.3
 - Transition to $(19/2^+)$: 461.3
 - Transition to $(17/2^+)$: 890.8
 - Transition to $(15/2^+)$: 811.4
 - Transition to $(13/2^+)$: 743.8
 - Transition to $(11/2^+)$: 697.4
 - Transition to $(9/2^+)$: 704.8
 - Level 2: $(33/2^+)$
 - Transition to $(31/2^+)$: 444.8*
 - Transition to $(29/2^+)$: 413.3
 - Transition to $(27/2^+)$: 397.7
 - Transition to $(25/2^+)$: 729.3*
 - Transition to $(23/2^+)$: 331.0
 - Transition to $(21/2^+)$: 900.8*
 - Transition to $(19/2^+)$: 572.9*
 - Level 3: $(33/2^-)$
 - Transition to $(31/2^-)$: 496.9*
 - Transition to $(29/2^-)$: 976.8*
 - Transition to $(27/2^-)$: 479.5
 - Transition to $(25/2^-)$: 455.2
 - Transition to $(23/2^-)$: 430.1
 - Transition to $(21/2^-)$: 837.1
 - Transition to $(19/2^-)$: 406.8
 - Transition to $(17/2^-)$: 643.4
 - Transition to $(15/2^-)$: 286.2
 - Transition to $(13/2^-)$: 513.2*
 - Transition to $(11/2^-)$: 373.0*
 - Transition to $(9/2^-)$: 145.8*
 - Level 4: $(29/2^-)$
 - Transition to $(27/2^-)$: 433.0*
 - Transition to $(25/2^-)$: 852.0*
 - Transition to $(23/2^-)$: 419.5*
 - Transition to $(21/2^-)$: 786.2*
 - Transition to $(19/2^-)$: 366.3*
 - Transition to $(17/2^-)$: 801.2*
 - Transition to $(15/2^-)$: 434.6*
 - Transition to $(13/2^-)$: 468.7*
 - Transition to $(11/2^-)$: 321.5*
 - Transition to $(9/2^-)$: 548.2*
 - Level 5: $(33/2^+)$
 - Transition to $(31/2^+)$: 901.3
 - Transition to $(29/2^+)$: 888.9*
 - Transition to $(27/2^+)$: 837.9
 - Transition to $(25/2^+)$: 836.8
 - Transition to $(23/2^+)$: 744.3
 - Transition to $(21/2^+)$: 689.8
 - Transition to $(19/2^+)$: 605.8
 - Transition to $(17/2^+)$: 497.2
 - Transition to $(15/2^+)$: 526.9*
 - Transition to $(13/2^+)$: 153.9*
 - Transition to $(11/2^+)$: 440.0*
 - Transition to $(9/2^+)$: 232.5
 - Level 6: $(35/2^-)$
 - Transition to $(33/2^-)$: 923.5
 - Transition to $(31/2^-)$: 837.9
 - Transition to $(29/2^-)$: 836.8
 - Transition to $(27/2^-)$: 744.3
 - Transition to $(25/2^-)$: 689.8
 - Transition to $(23/2^-)$: 605.8
 - Transition to $(21/2^-)$: 497.2
 - Transition to $(19/2^-)$: 526.9*
 - Transition to $(17/2^-)$: 153.9*
 - Transition to $(15/2^-)$: 440.0*
 - Transition to $(13/2^-)$: 232.5
 - Level 7: $(21/2^-)$
 - Transition to $(19/2^-)$: 390.1*
 - Transition to $(17/2^-)$: 179.4*
 - Transition to $(15/2^-)$: 350.8*
 - Transition to $(13/2^-)$: 251.1*
 - Transition to $(11/2^-)$: 281.4*
 - Transition to $(9/2^-)$: 322.3*
 - Transition to $(7/2^-)$: 288.2
 - Transition to $(5/2^-)$: 239.9
 - Transition to $(3/2^-)$: 134.1
 - Transition to $(1/2^-)$: 13/2-

SHANDONG UNIVERSITY (WEI HAI)

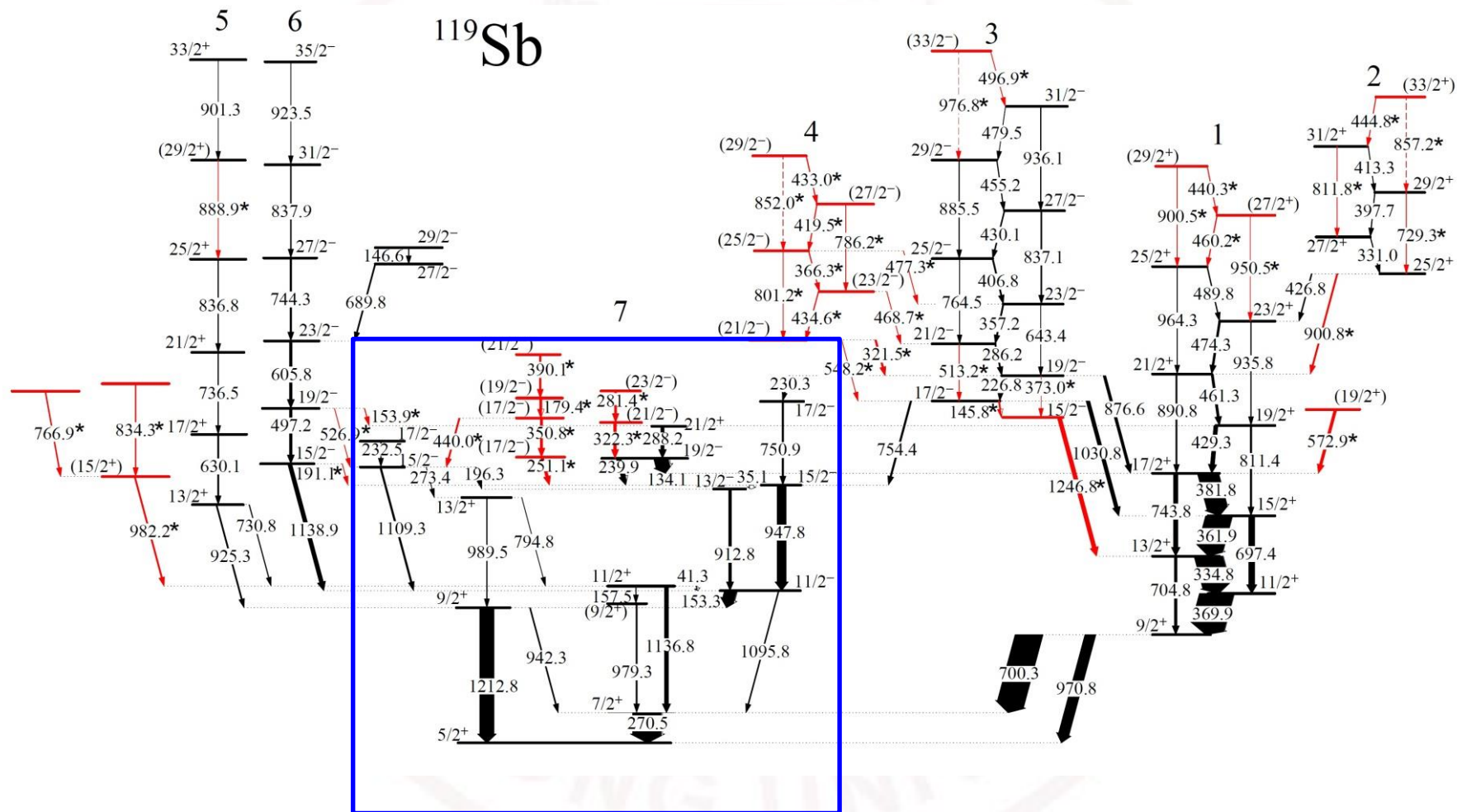
- [illegible]

典型开窗谱



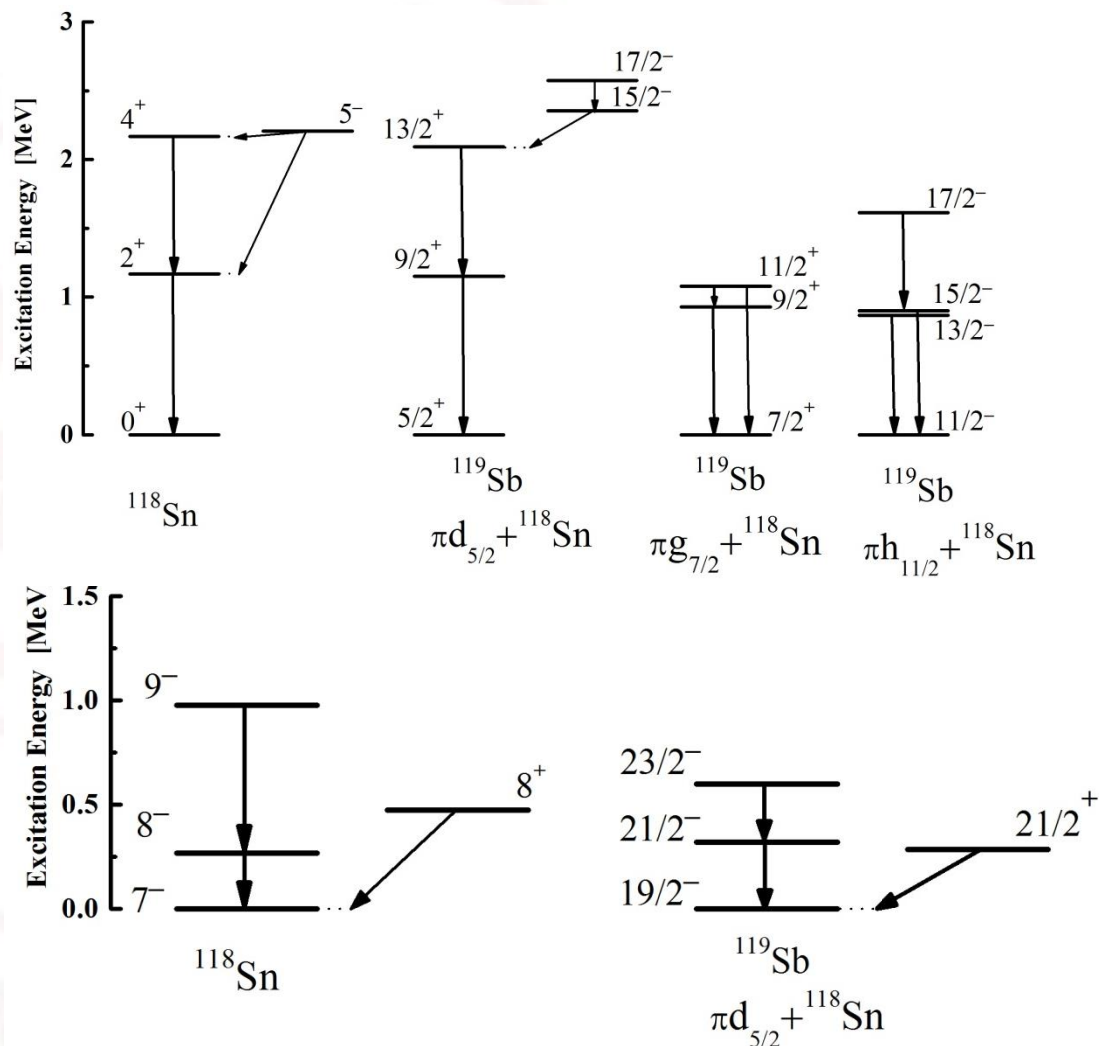
开窗谱示例图。图中可以看到大多数本工作中新观测到的跃迁。

 山东大学 (威海)
SHANDONG UNIVERSITY WEIHAI



单粒子结构

- ^{119}Sb 的质子数为 **51**，中子数为 **68**。
- ^{119}Sb 中的单粒子态来源于价质子占据 $Z=50$ 满壳之外的 $\pi d_{5/2}$ ， $\pi g_{7/2}$ 和 $\pi h_{11/2}$ 单粒子轨道耦合不同 ^{118}Sn 核芯态得到的。



能级系统学比较图

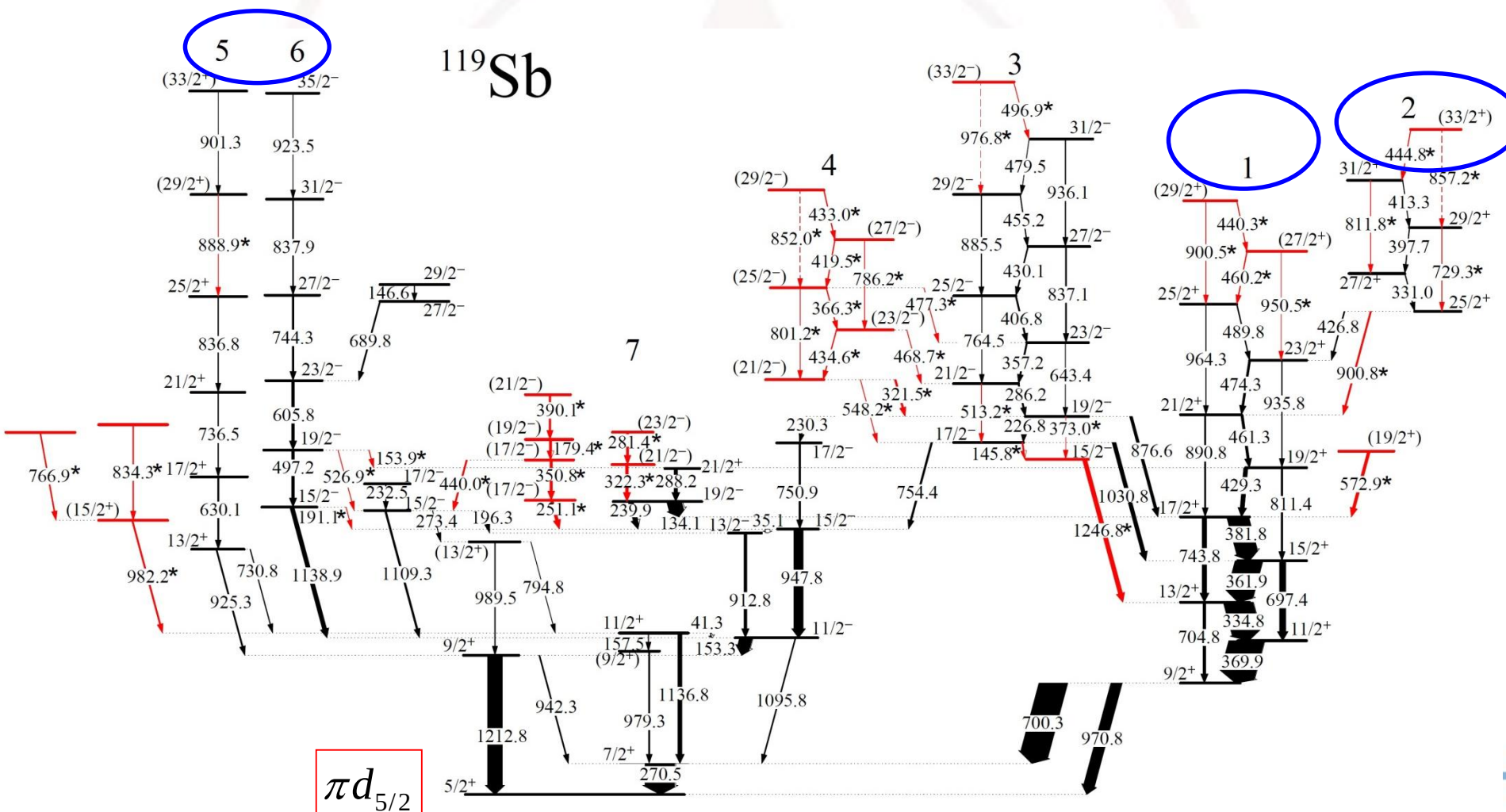
转动带结构

Band 5: $\pi d_{5/2} (g_{9/2})^{-2} (d_{5/2} / g_{7/2})^2$

Band 6: $\pi h_{11/2} (g_{9/2})^{-2} (d_{5/2} / g_{7/2})^2$

Band 1: $\pi g_{9/2}^{-1} (d_{5/2} g_{7/2})^2$

Band 2: $\pi g_{9/2}^{-1} (d_{5/2} g_{7/2})^2 \otimes \nu h_{11/2} h_{11/2}$



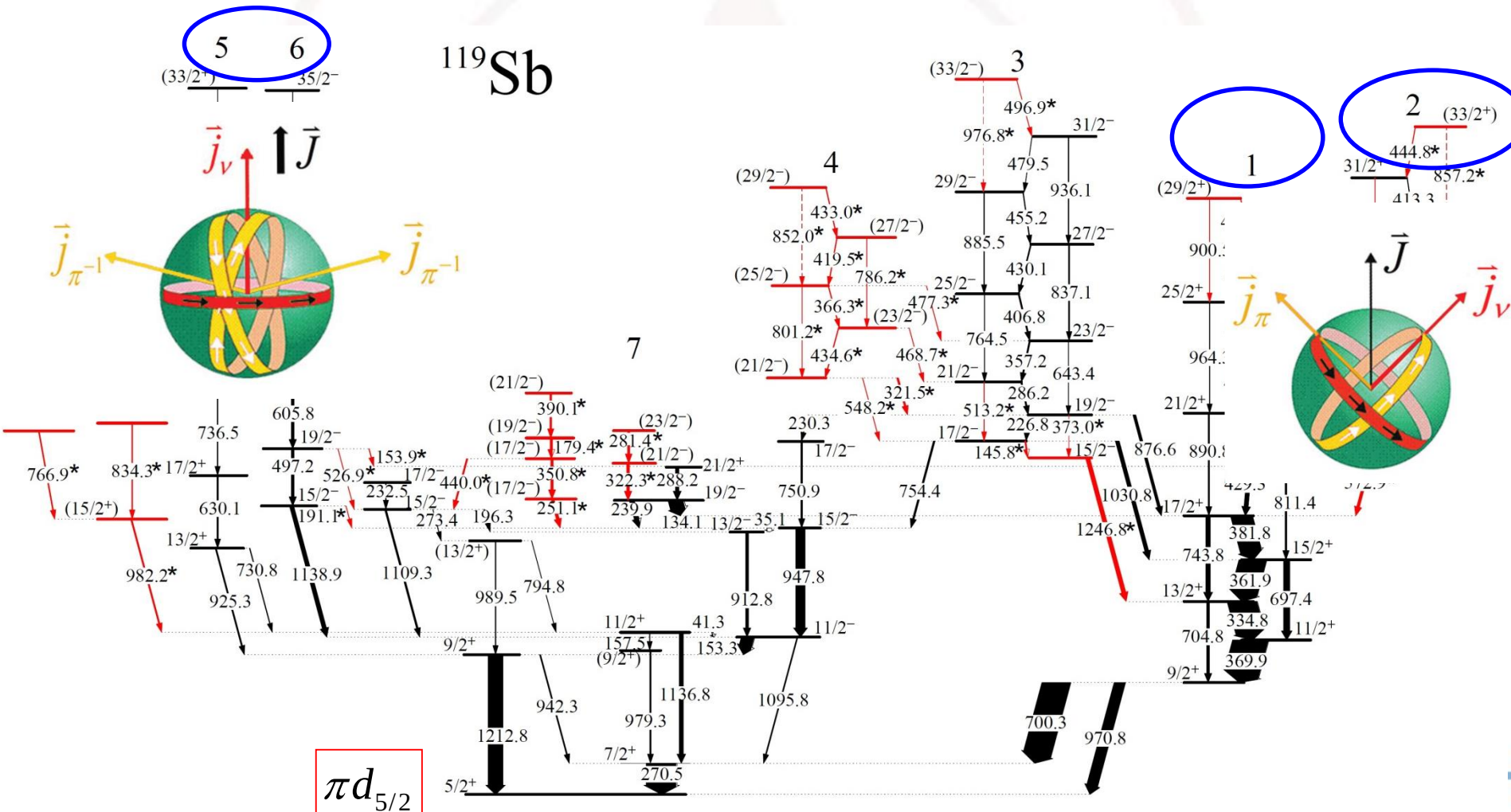
转动带结构

Band 5: $\pi d_{5/2} (g_{9/2})^{-2} (d_{5/2} / g_{7/2})^2$

Band 6: $\pi h_{11/2} (g_{9/2})^{-2} (d_{5/2} / g_{7/2})^2$

Band 1: $\pi g_{9/2}^{-1} (d_{5/2} g_{7/2})^2$

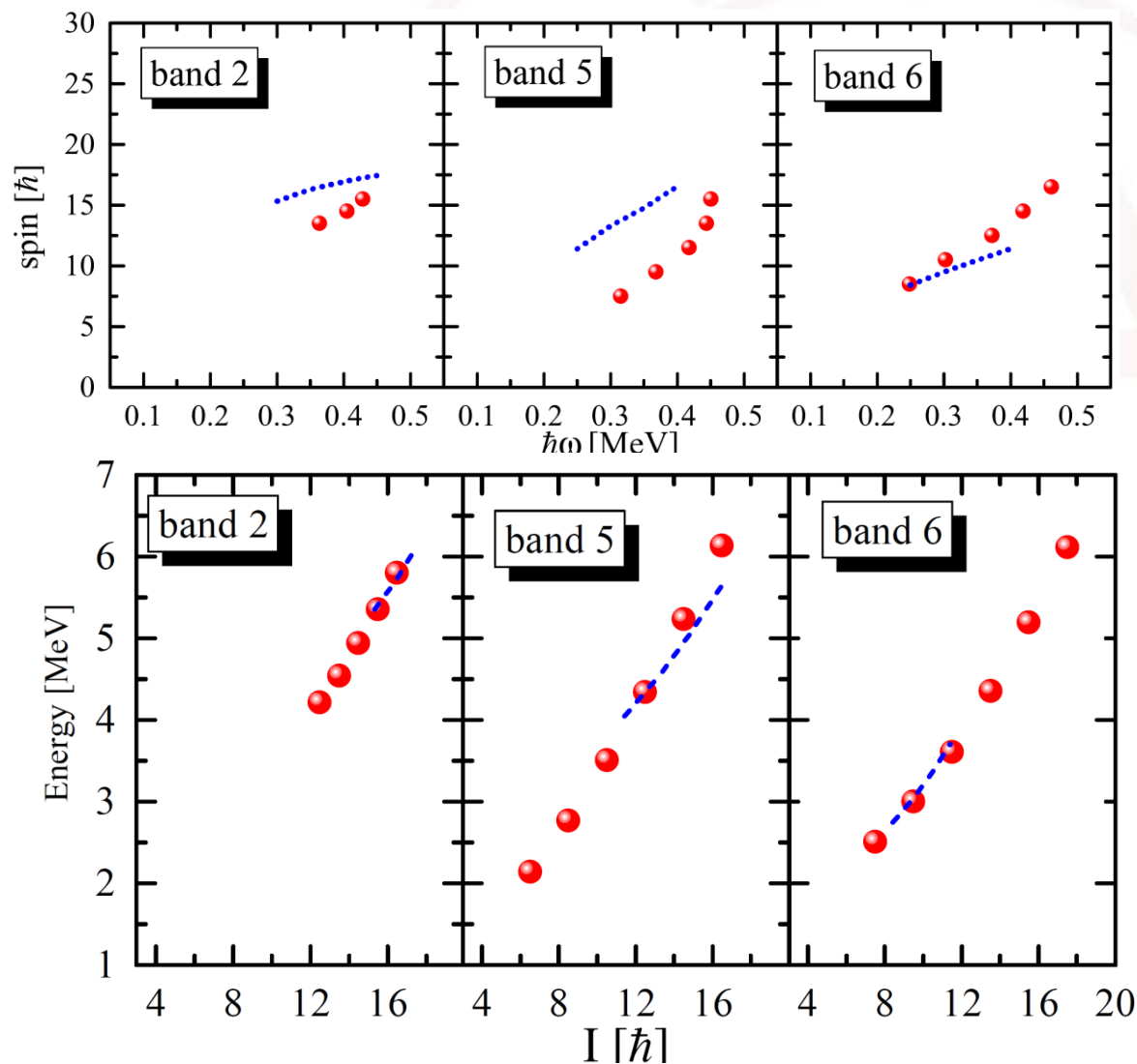
Band 2: $\pi g_{9/2}^{-1} (d_{5/2} g_{7/2})^2 \otimes \nu h_{11/2} h_{11/2}$



带2,5,6: 磁转动与反磁转动

- 理论模型: 基于协变密度泛函理论的倾斜推转模型(TAC-CDFT), 费米子壳10, 有效相互作用:PC-PK1.

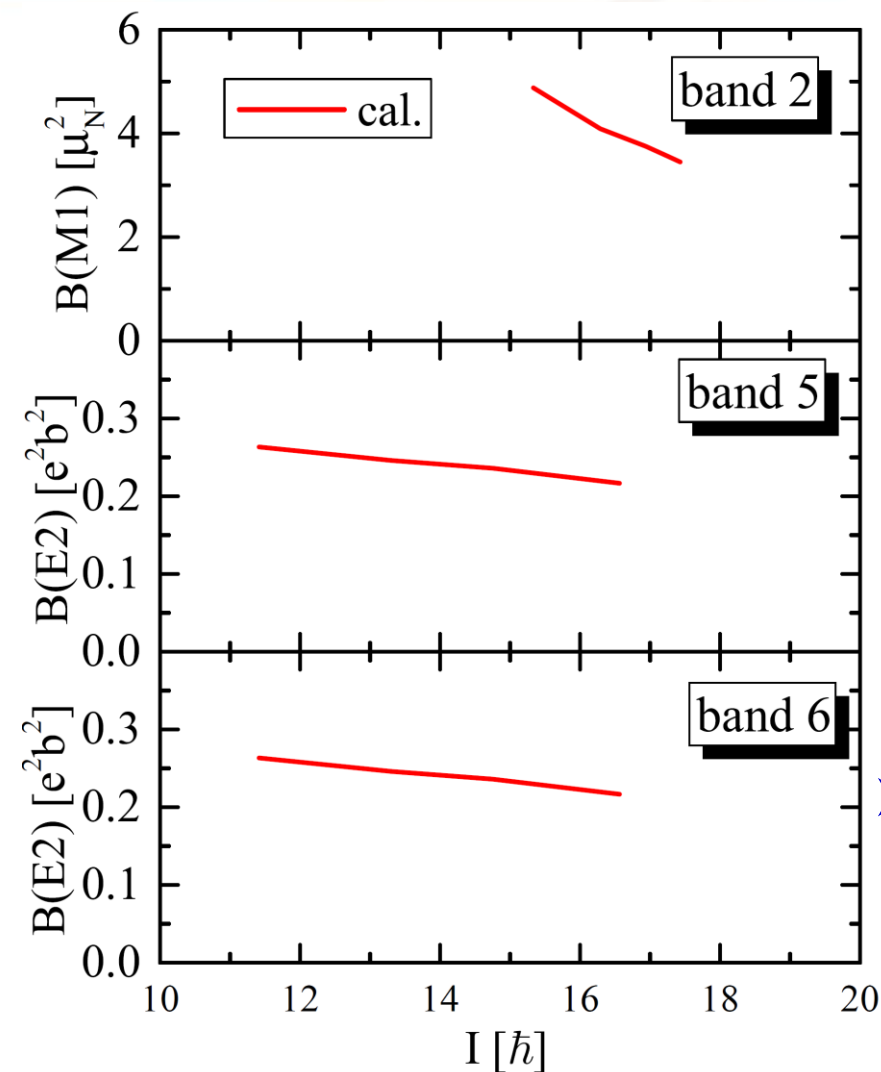
P. W. Zhao *et al.*, Phys. Rev. C **85**, 054310 (2012). Phys. Rev. Lett. **107**, 122501 (2011).
Phys Lett B, **699**: 181–186 (2011)



- 带2, 5的理论计算的自旋值比实验值高约2~4 $\hbar$, 由于计算未考虑对力。

- 理论计算很好的再现了带6的实验数据。

- 理论计算很好的再现了带2, 带5和带6的实验能谱。



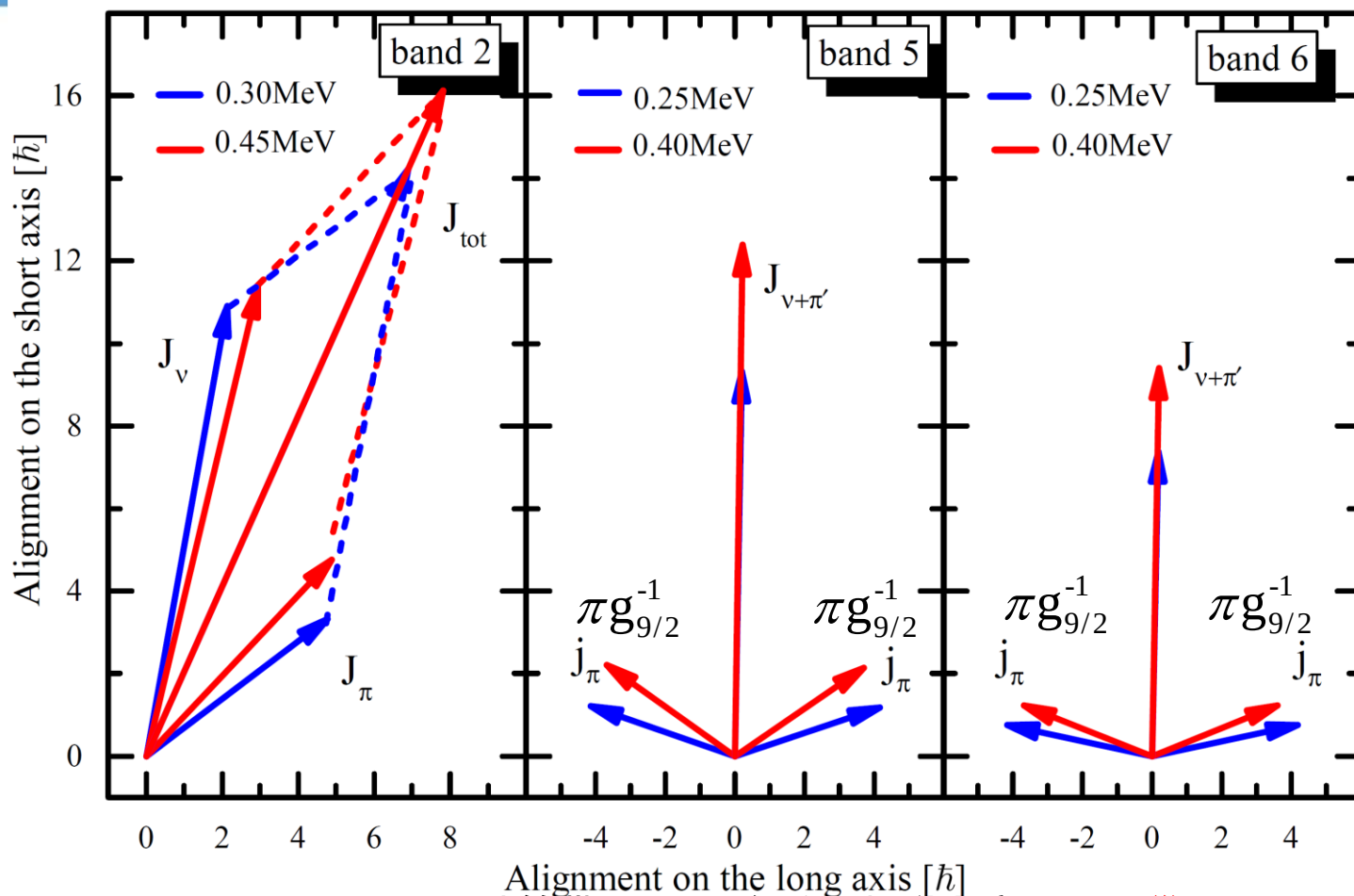
➤ 理论计算带2的 $B(M1)$ 随着自旋的增加呈一个缓慢下降的趋势，符合**磁转动**的典型特征。

➤ 理论计算带5, 6的 $B(E2)$ 随着自旋的增加呈一个缓慢下降的趋势，符合**反磁转动**的典型特征。

➤ 建议带2是磁转动带，带5, 6是反磁转动带

TAC-CDFT计算带2, 5, 6的 $B(M1)$ 和 $B(E2)$

角动量耦合图像



带2:

TAC-CDFT计算带2, 5, 6角动量耦合示意图。

带5, 6:

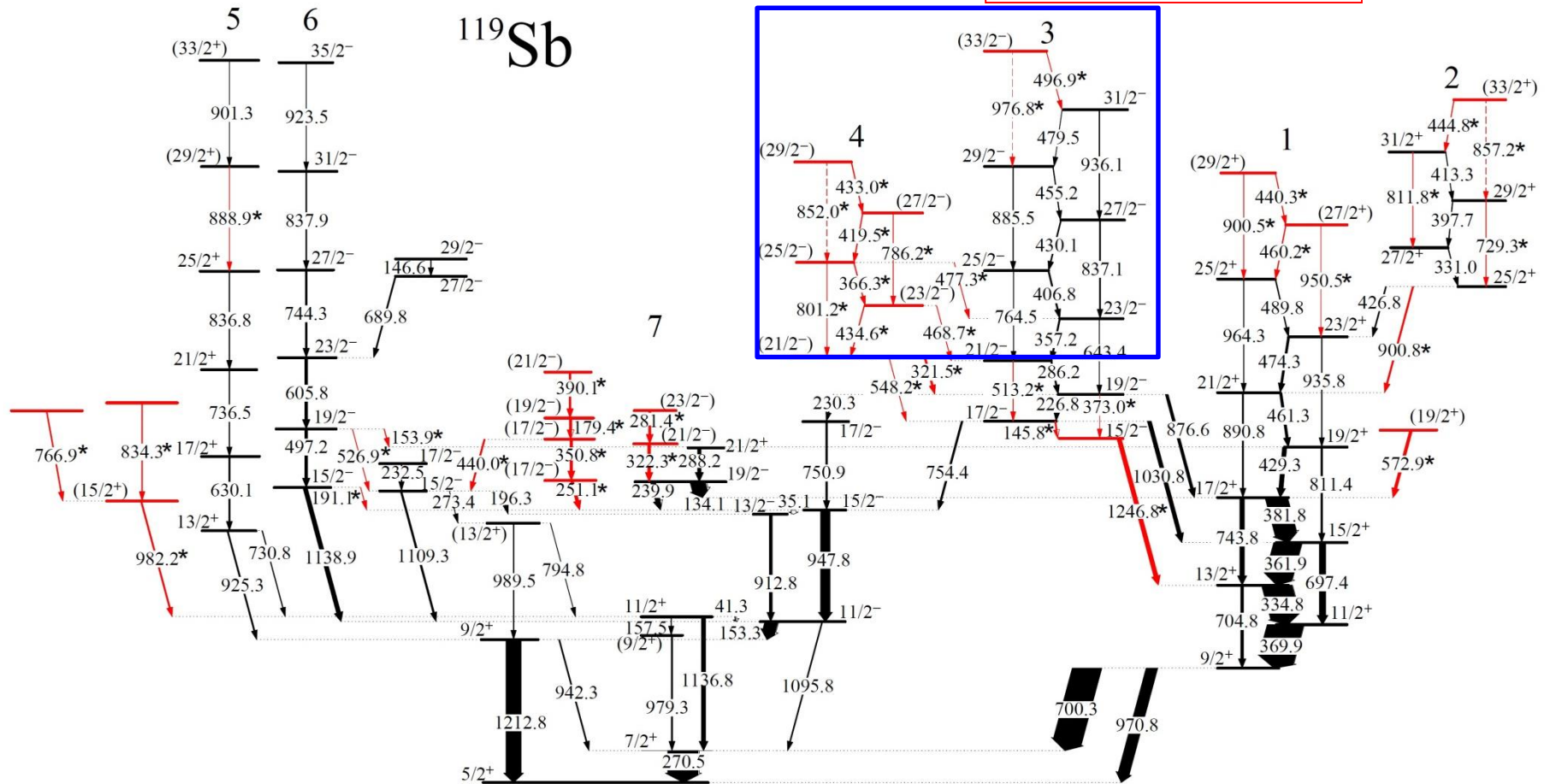
- 质子总角动量和中子总角动量同时向总角动量方向逐渐靠拢。
- 展示出了**磁转动机制**的角动量耦合经典图像。

- 反向排列的质子空穴的角动量同时向着总角动量方向闭合。
- 展示出了**反磁转动机制**的角动量耦合经典图像。

带3&4:手征双重带

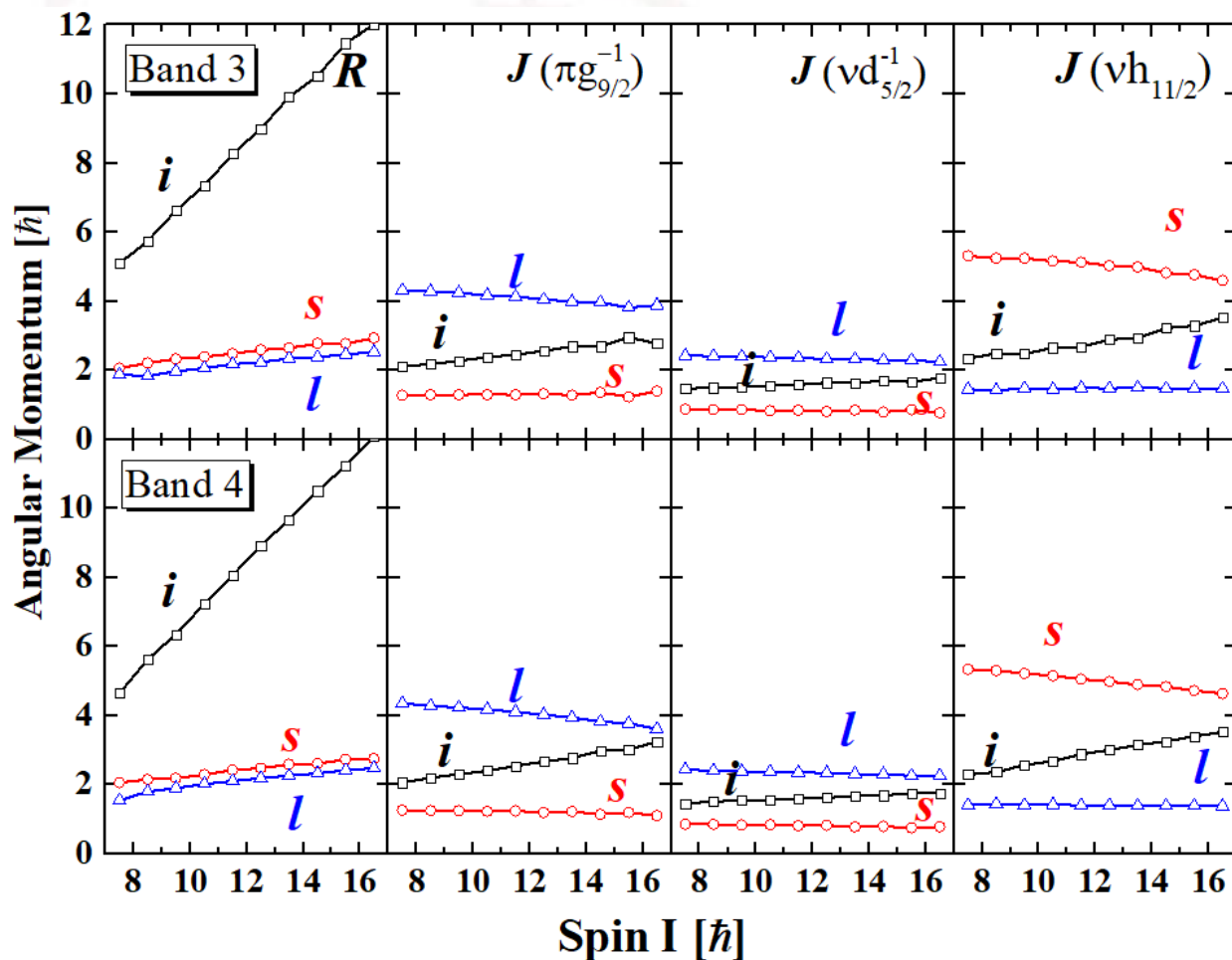
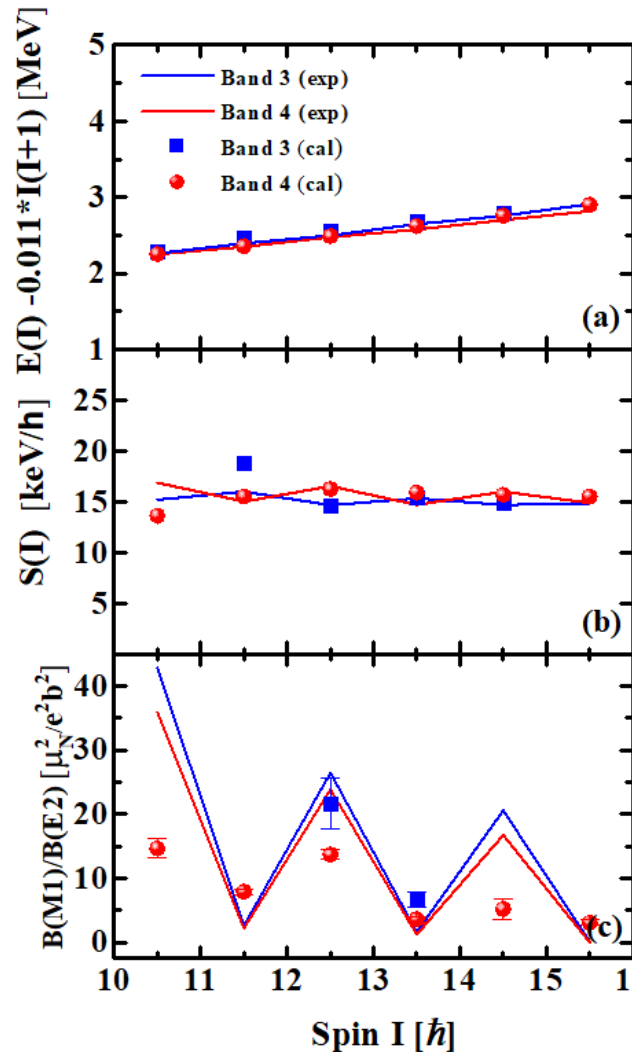
Band 3&4: $\pi g_{9/2}^{-1} (g_{7/2})^2 \otimes \nu d_{5/2}^{-1} h_{11/2}$

^{119}Sb



- 带3和带4的能谱非常简并，因此我们猜测带3和带4可能是一对手征双重带；
- 前人建议带3的两种可能组态： $\pi g_{9/2}^{-1} (g_{7/2})^2 \otimes \nu d_{3/2}^{-1} h_{11/2}$ ， $\pi g_{9/2}^{-1} (g_{7/2})^2 \otimes \nu s_{1/2} h_{11/2}$
- 带3和带1之间存在3条E1连接跃迁，因此我们猜测带3和带1之间存在八极关联，并建议带3的组态为 $\pi g_{9/2}^{-1} (g_{7/2})^2 \otimes \nu d_{5/2}^{-1} h_{11/2}$ 。

带3&4:手征双重带



组态: $\pi(g_{9/2})^{-1} \otimes \nu(d_{5/2})^{-1}h_{11/2}$

形变: $(\beta, \gamma) = (0.17, 32^\circ)$

科氏减弱因子 0.85

- 相对论平均场理论(RMF)计算组态和形变值;
- 多粒子转子模型MPRM计算再现了实验的能谱, $S(I)$ 与 $B(M1)/B(E2)$ 值;
- 角动量呈现出非平面转动的手征几何图像。

目录

- ☐ 研究背景
- ☐ 实验介绍
- ☐ 结果与讨论
- ☐ 总结

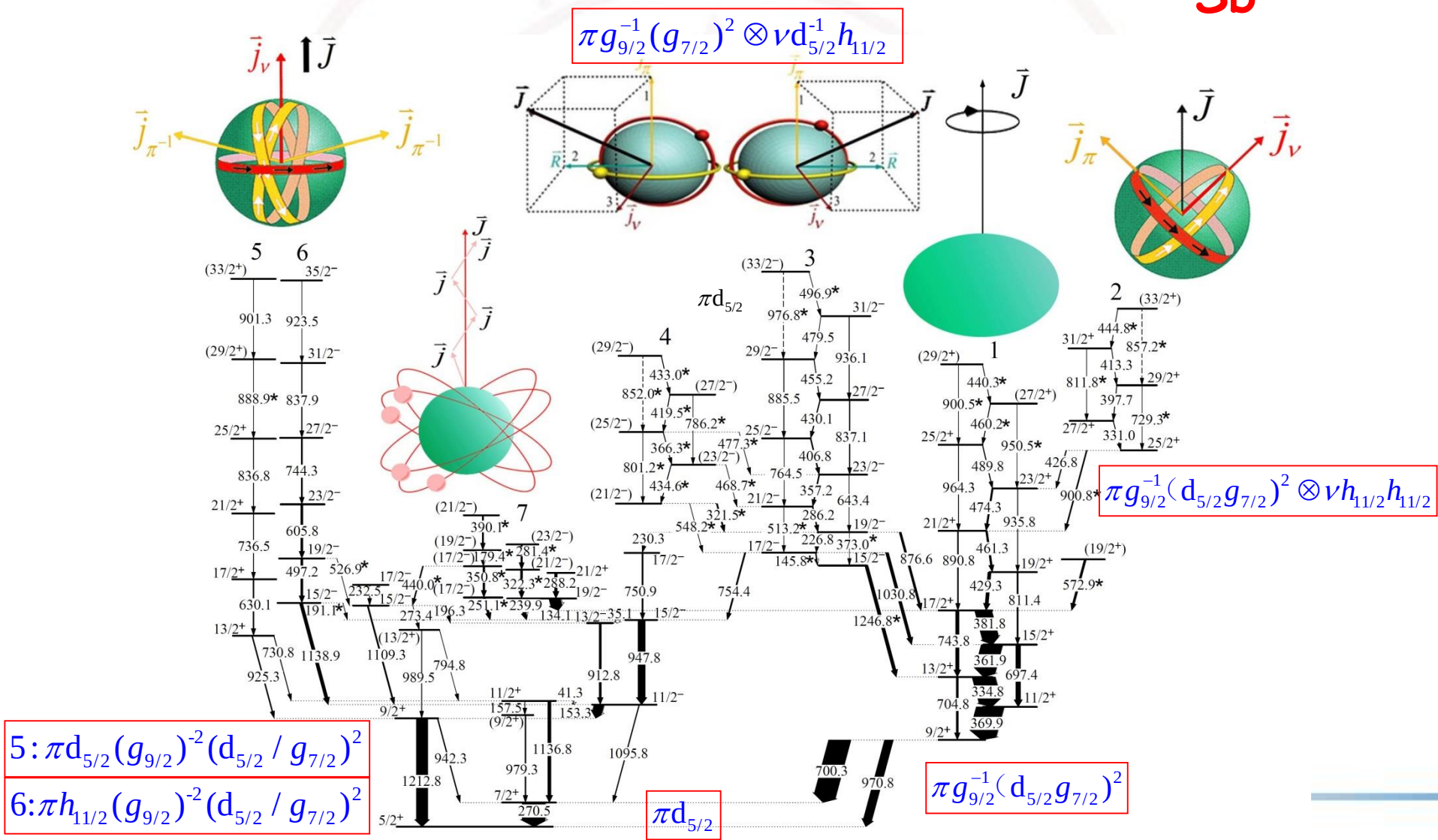
总结

- 利用 $^{116}\text{Cd}(^7\text{Li}, 4n)^{119}\text{Sb}$ 反应布居 ^{119}Sb 的高自旋态；
- 增加了40条新跃迁, 20个新能级, 扩展了 ^{119}Sb 的能级纲图；
- ^{119}Sb 能级结构表现出了清晰的单粒子结构与转动带结构的共存, 其中单粒子结构基本上都是由 $Z = 50$ 满壳之外的价核子分别占据 $\pi d_{5/2}$ 、 $\pi g_{7/2}$ 和 $\pi h_{11/2}$ 轨道与 ^{118}Sn 核芯的相应能级耦合而形成的。
- 通过理论计算与实验结果对比表明: 带1、带2分别是电转动带和磁转动带, 带3和带4是手征双重带, 带5和带6是反磁转动带,

首次在同一个原子核中观测到多种运动模式共存

首次在同一个原子核中发现单粒子激发，电转动，磁转动，反磁转动以及手征转动如此多种类的运动模式共存。

^{119}Sb



谢谢大家!

□ 实验提取公式:

$\Delta I=1$ 的带转动频率与自旋提取公式:

$$\hbar\Omega_{\text{exp}} = \frac{1}{2}[E_{\gamma}(I+1 \rightarrow I) + E_{\gamma}(I \rightarrow I-1)]$$

$\Delta I=2$ 的带转动频率与自旋提取公式:

$$\hbar\Omega_{\text{exp}} = \frac{1}{2}E_{\gamma}(I \rightarrow I-2)$$

□ 理论模型：基于密度泛函理论的倾斜推转模型。

- ^{119}Sb : $Z=51$, $N=68$
- $(\text{nof}, \text{nob}) = (8, 10)$
- 有效相互作用: PC-PK1

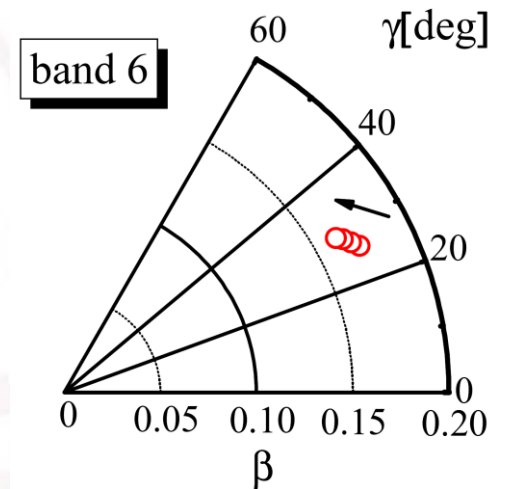
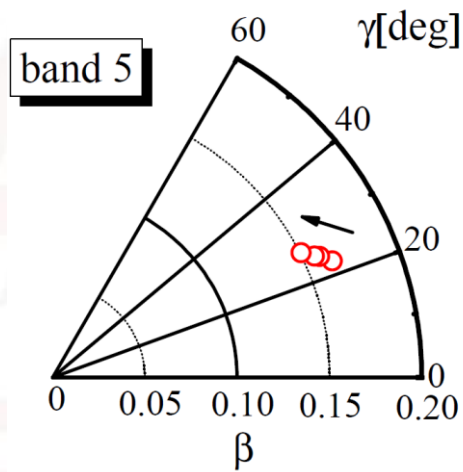
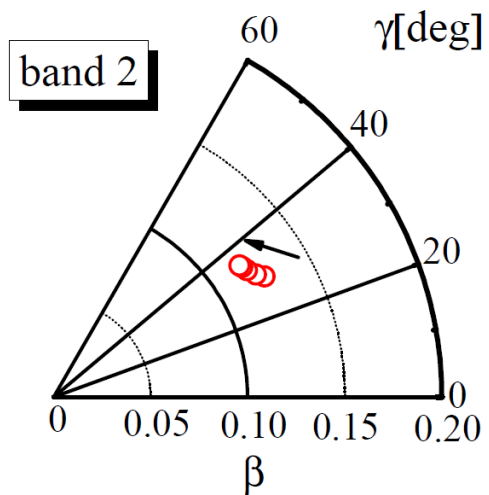
□ 实验提取公式：

$$\hbar\omega(I) = \frac{E_{\gamma}(I+1) \rightarrow E_{\gamma}(I-1)}{\sqrt{(I+1)(I+2) - K^2} - \sqrt{I(I-1) - K^2}}$$

K取带头自旋值， E_{γ} 是对应能级的能量，I是对应能级的自旋值。

各带的组态

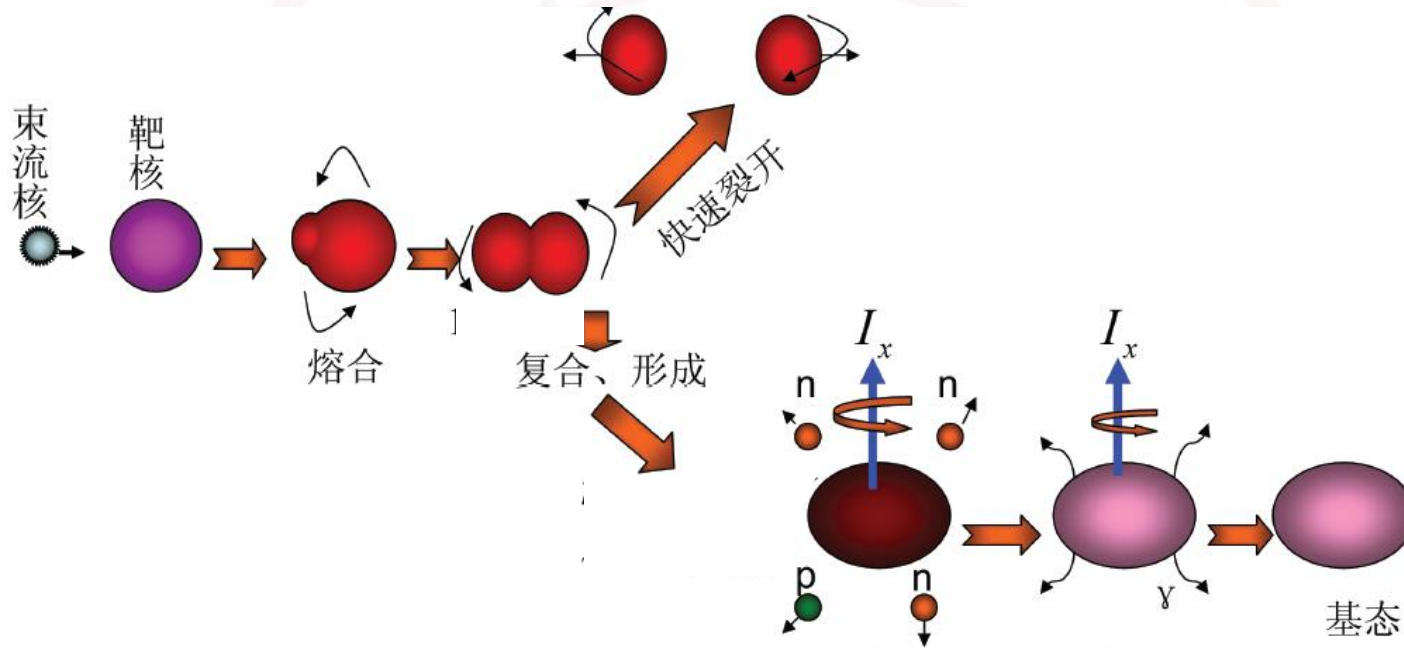
带	组态
带1	$\pi g_{9/2}^{-1}(g_{7/2})^2 \otimes \nu(d_{3/2})^2(h_{11/2})^2$
带2	$\pi g_{9/2}^{-1}(g_{7/2})^2 \otimes \nu(d_{3/2})^2 h_{11/2} h_{11/2}$
带3+带4	$\pi g_{9/2}^{-1}(g_{7/2})^2 \otimes \nu(d_{3/2})^2 d_{3/2} h_{11/2}$
带5	$\pi d_{5/2}(g_{9/2})^{-2}(d_{5/2} g_{7/2})^2 \otimes \nu(d_{3/2})^2(h_{11/2})^2$
带6	$\pi h_{11/2}(g_{9/2})^{-2}(d_{5/2} g_{7/2})^2 \otimes \nu(d_{3/2})^2(h_{11/2})^2$



理论计算带2, 5和6的形变参数 β 、 γ 与转动频率的关系

实验方法介绍

我们采用重离子熔合蒸发反应布局 ^{119}Sb 的高自旋态。

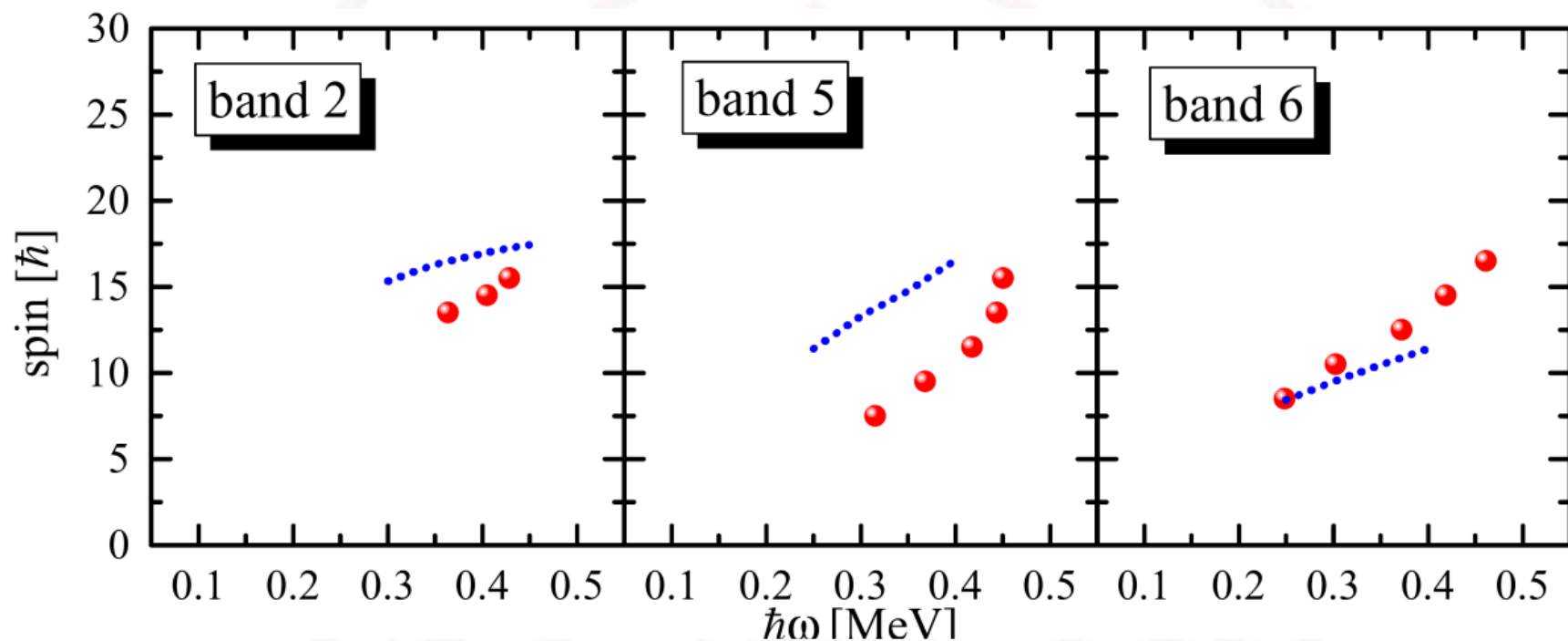


重离子熔合蒸发反应示意图

带2,5,6: 磁转动与反磁转动

➤ 理论模型：基于协变密度泛函理论的倾斜推转模型 (TAC-CDFT)

费米子壳 $\text{nof}=10$, 有效相互作用:PC-PK1



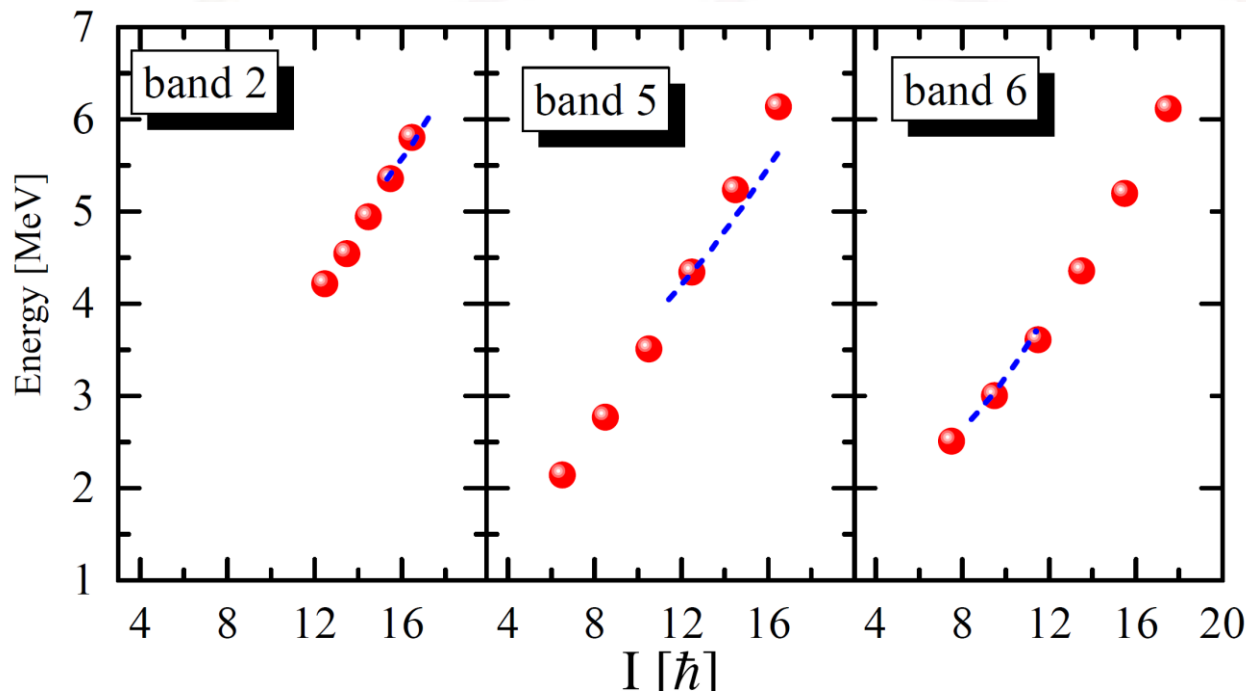
TAC-CDFT计算自旋随转动频率的变化与实验数据的比较。

- 带2, 5的理论计算的自旋值比实验值高约 $2\sim 4\hbar$, 由于计算未考虑对力, $g_{7/2}, d_{5/2}$ 轨道上的质子拆对贡献了 $2\sim 4\hbar$ 的角动量。
- 理论计算很好的再现了带6的实验数据。

带2,5,6: 磁转动与反磁转动

➤ 理论模型: 基于协变密度泛函理论的倾斜推转模型 (TAC-CDFT)

费米子壳 $\text{nof}=10$, 有效相互作用: PC-PK1



TAC-CDFT计算能谱与实验数据的比较。

➤ TAC-CDFT理论计算很好的再现了带2, 带5和带6的实验能谱。