

# 应用谱学方法测量熔 合反应截面

胡世鹏

中国原子能科学研究院

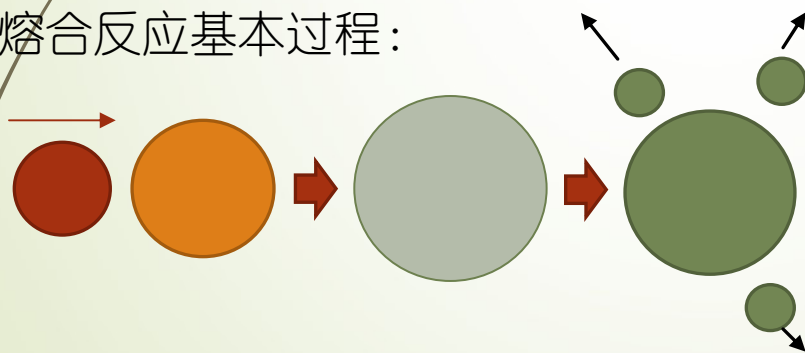
# 内容提纲

- ▶ 测量熔合反应截面的基本原理
  - ▶ 在束伽马谱学方法。
  - ▶ 离线衰变谱学方法。
- ▶ 实验条件
  - ▶ 靶室结构
  - ▶ 探测器阵列
- ▶ 本实验小组所开展的工作
  - ▶ 束缚核体系熔合反应截面研究
  - ▶ 弱束缚核体系熔合反应截面研究
- ▶ 总结与未来工作规划
  - ▶ 弱束缚核体系熔合反应体系研究
  - ▶ 相关核数据测量

# 熔合反应截面测量测量的基本原理

- 原子核与原子核之间发生熔合反应的过程包含了原子核之间的库伦相互作用、核内粒子集团之间的相互作用、核子之间的相互作用等。因此，对于熔合反应进行研究可以增进我们对于原子核结构以及反应机制的理解。而进行熔合反应研究最直接的方式就是反应截面的测量。

熔合反应基本过程：



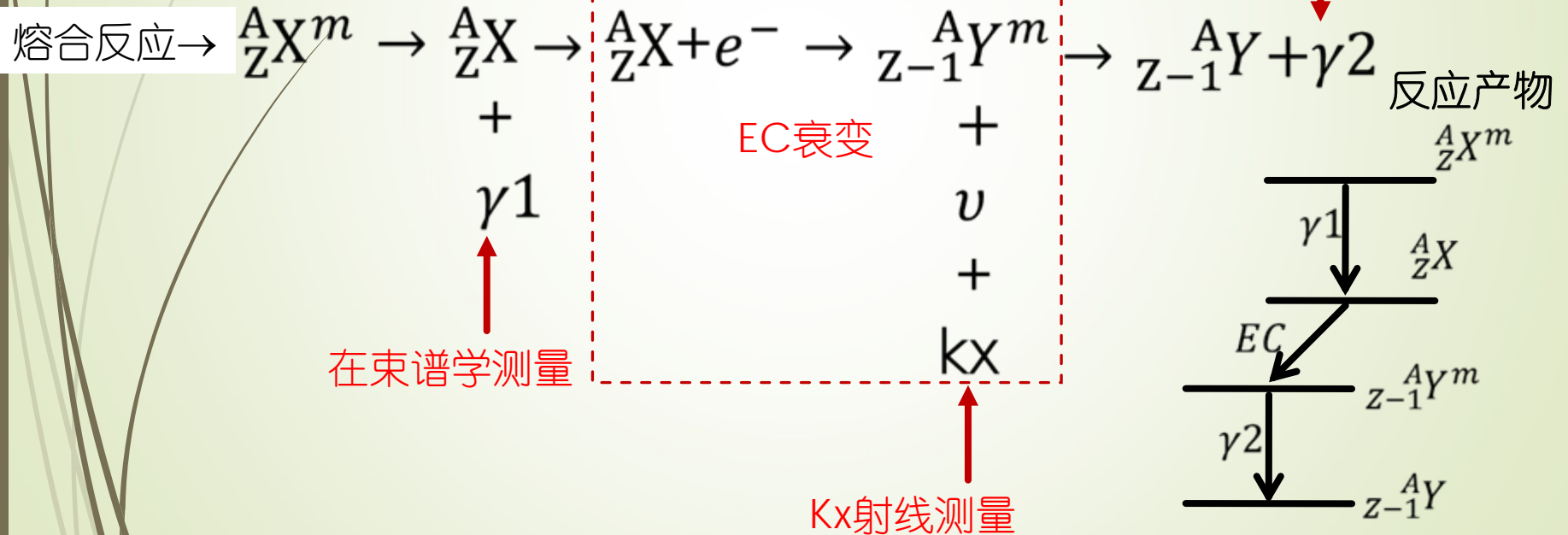
测量方法：

1. 熔合反应产物在束测量
  - $\gamma$  射线测量
  - 碎片测量
  - 带电粒子测量
2. 熔合反应产物衰变测量
  - $\gamma$  射线测量
  - $\alpha$  粒子测量
  - Kx射线测量

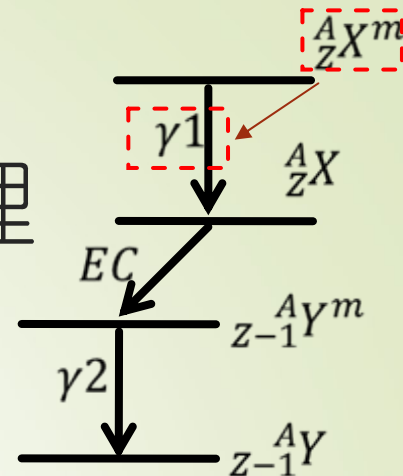
# 熔合反应截面测量

产物直接测量 (TOF, 能量)

离线衰变谱学测量



# 在束谱学融合测量截面原理



$$\sigma_{TF} = \frac{N_{Residues}}{I_{Beam} \times N_{Target}} = \frac{\sum_1^j \frac{S_{\gamma_1}}{\epsilon_{\gamma_1}}}{I_{Beam} \times N_{Target}}$$

$$N_{Residues} = \sum_1^j \frac{S_{\gamma_1}}{\epsilon_{\gamma_1}}$$

上式中：

$I_{Beam}$  为束流强度

$N_{Target}$  为单位面积靶核数

$N_{Residues}$  为单位时间产物核数

$S_{\gamma_1}$  为单位时间的特征伽马的全能峰面积

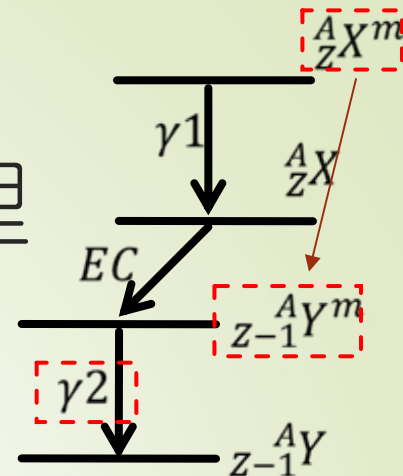
$\epsilon_{\gamma_1}$  为探测器阵列的绝对探测效率

本方法的**关键**在于统计所有退激到基态的  $\gamma_1$  射线的计数！

# 离线衰变谱学测量截面原理

$$\sigma_{TF} = \frac{\lambda N_{daughter Residues}}{I_{Beam} \times N_{Target} \times (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})}$$

$$= \frac{\lambda \frac{S_{\gamma 2}}{f_{\gamma 2} \varepsilon_{\gamma 2}}}{I_{Beam} \times N_{Target} \times (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})}$$



上式中：

$I_{Beam}$  为束流强度  
 $N_{Target}$  为单位面积靶核数  
 $N_{daughter Residues}$  为产物衰变子核数

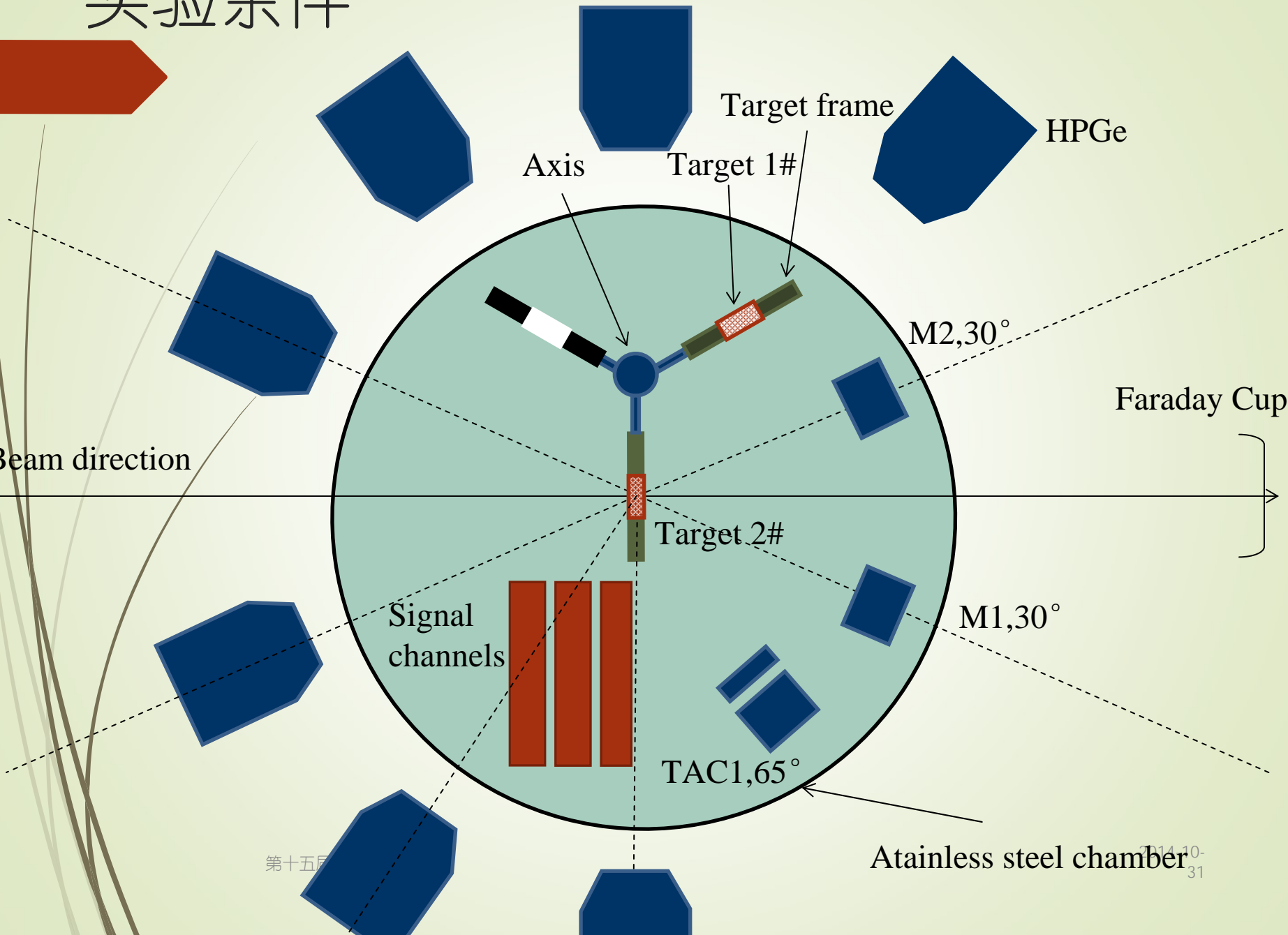
$S_{\gamma 2}$  为子核的特征  $\gamma$  射线全能峰面积  
 $\varepsilon_{\gamma 2}$  为探测器阵列的绝对探测效率  
 $f_{\gamma 2}$  为  $\gamma$  射线分支比  
 $\lambda$  为子核的衰变常数  
 $t_1$  为辐照时间  
 $t_2$  为辐照结束到离线测量开始时间  
 $t_3$  为离线测量时间

本方法的**关键**在于统计所有子核退激的  $\gamma 2$  射线的计数!

# 实验条件



Beam direction



Target frame

HPGe

Axis

Target 1#

M2,30°

Faraday Cup

Target 2#

Signal channels

M1,30°

TAC1,65°

Atainless steel chamber

第十五

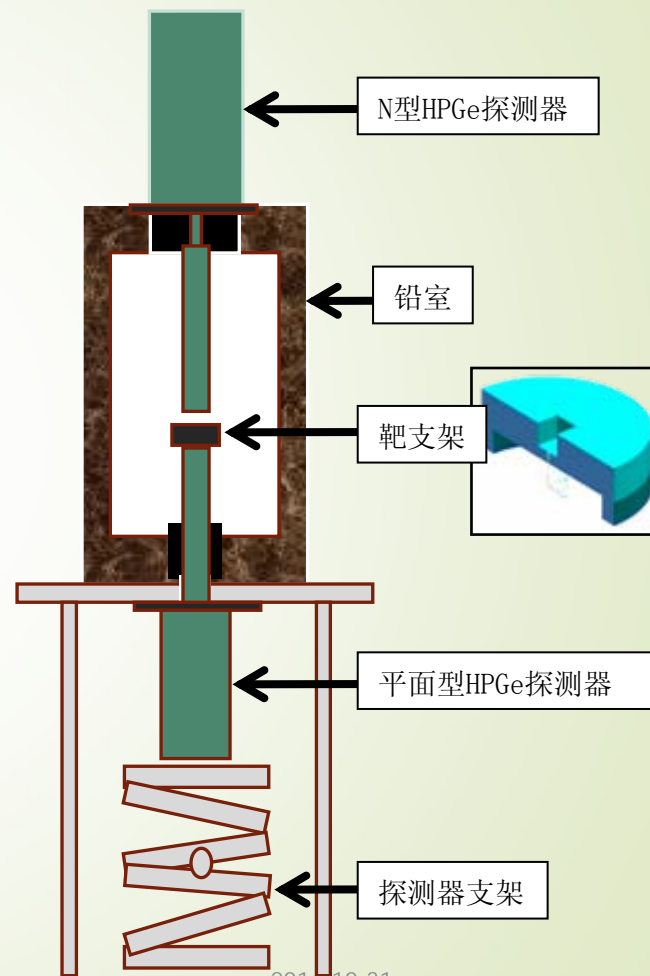
# 实验条件



靶室实物图

外径为15cm，内径13cm，内高28cm

## 低本底离线测量系统



2014-10-31

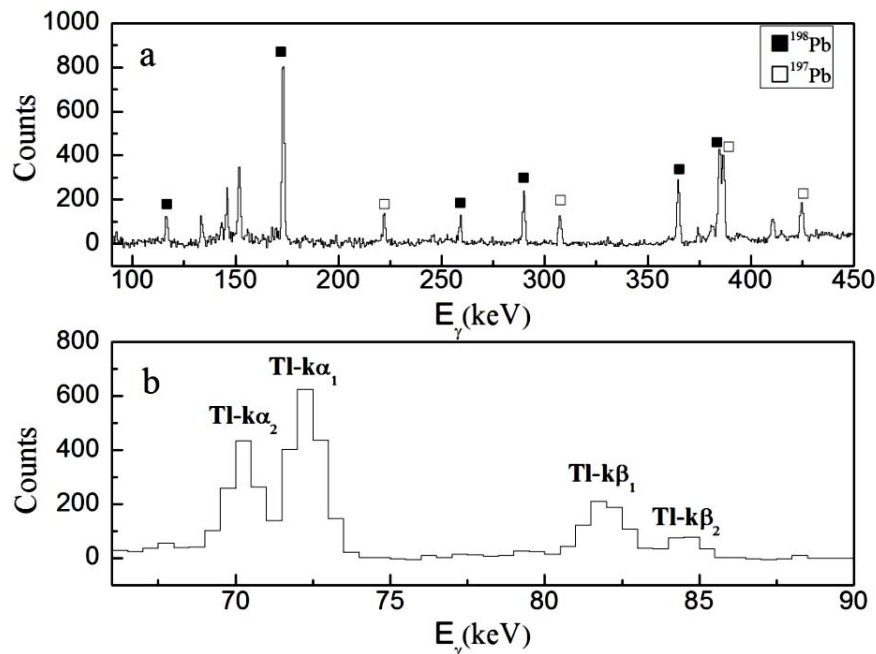


# 束缚核融合反应截面测量

熔合反应:  $^{186}\text{W}(^{16}\text{O},\text{Xn})^{196-200}\text{Pb}$



符合测量能谱



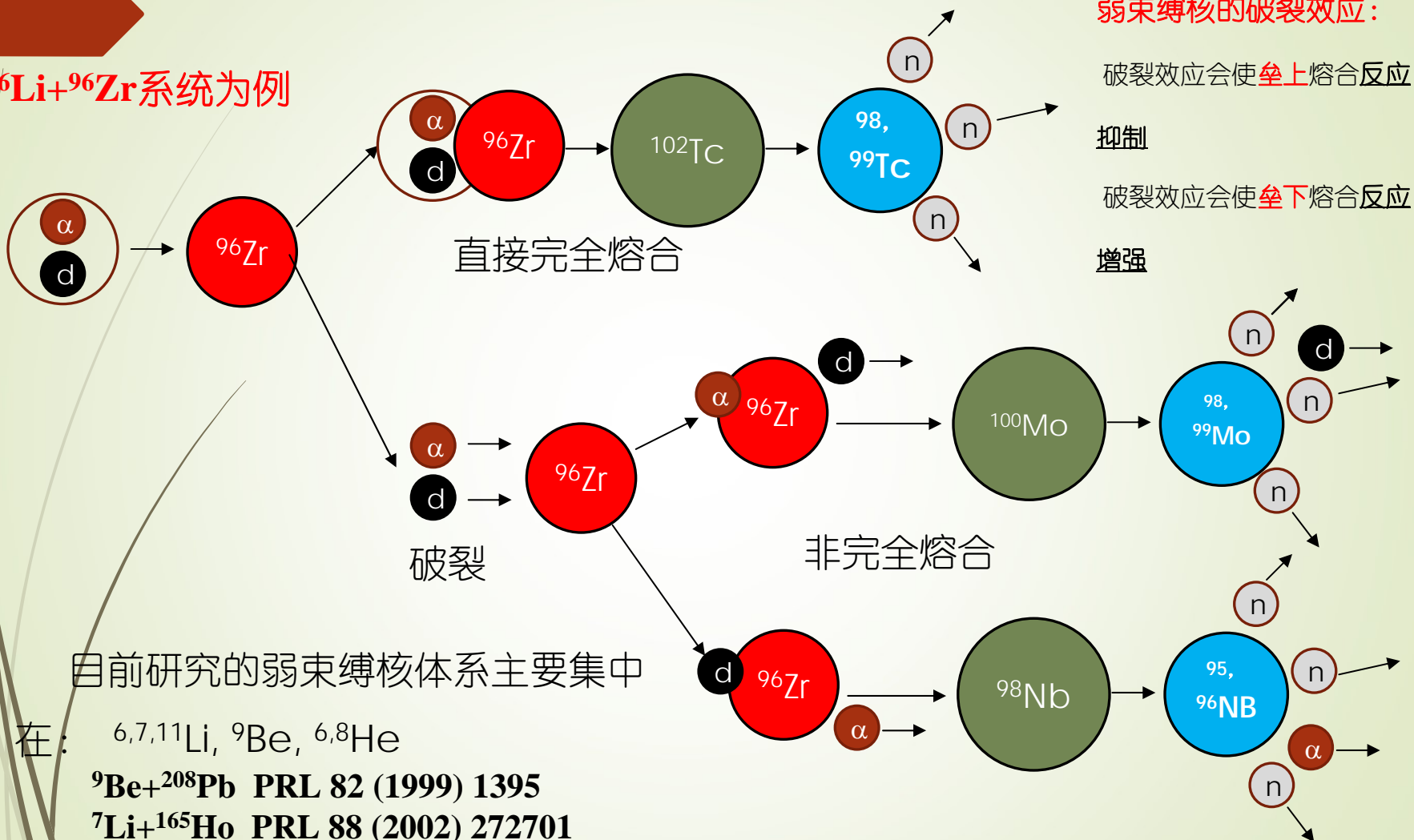
截面测量结果

$E_{\text{lab}}$ (MeV)	出射道	截面 (mb)	参考总截面 (mb)
72	$^{199}\text{Pb}$	2.8(1)	17.9(0.5)
	$^{198}\text{Pb}$	19(4)	
84	$^{198}\text{Pb}$	341(6)	430(5)
	$^{197}\text{Pb}$	54(9)	

测量终端与符合逻辑电路

# 弱束缚稳定核熔合反应截面测量

以 ${}^6\text{Li}+{}^{96}\text{Zr}$ 系统为例



目前研究的弱束缚核体系主要集中在：

${}^6,{}^7,{}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^6,{}^8\text{He}$

${}^9\text{Be}+{}^{208}\text{Pb}$  PRL 82 (1999) 1395

${}^7\text{Li}+{}^{165}\text{Ho}$  PRL 88 (2002) 272701

${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$  PRL 81 (1998) 4580

${}^6\text{Li}+{}^{198}\text{Pt}$  PRL 103 (2009) 232702

${}^6\text{Li}+{}^{209}\text{Bi}$  PRC 66 (2002) 041602(R)

# 弱束缚稳定核熔合反应截面测量— ${}^6\text{Li}+{}^{96}\text{Zr}, {}^{144}\text{Sm}, {}^{154}\text{Sm}$

## 研究目的:

1. 比较 ${}^6\text{Li}$ 的破裂效应对于中重核与重核体系熔合反应过程的不同影响。  
(对比研究破裂效应随靶核Z的变化)
2. 比较靶核形变大小对于熔合反应的影响。  
(对比研究Zr的同位素体系与Sm的同位素体系)

## ${}^6\text{Li}+{}^{144}\text{Sm}$ 体系熔合截面测量

### 实验条件:

束流能量: 40、30、24 MeV

束流强度: 7-10 enA

靶: 745 ug/cm<sup>2</sup>

衬: 950 ug/cm<sup>2</sup>

### 实验结果:

2n+3n反应道反应截面比例		
束流能量 MeV	印度科学家	本工作
40	374	418
30	192	205
24	8.2	8.2

Phys.Rev.C 79(2009)0051601

# 弱束缚稳定核熔合反应截面测量— ${}^6\text{Li}+{}^{96}\text{Zr}, {}^{144}\text{Sm}, {}^{154}\text{Sm}$

## ${}^6\text{Li}+{}^{96}\text{Zr}$ 体系熔合截面测量

实验条件:

束流能量: 28至12MeV

间隔2MeV

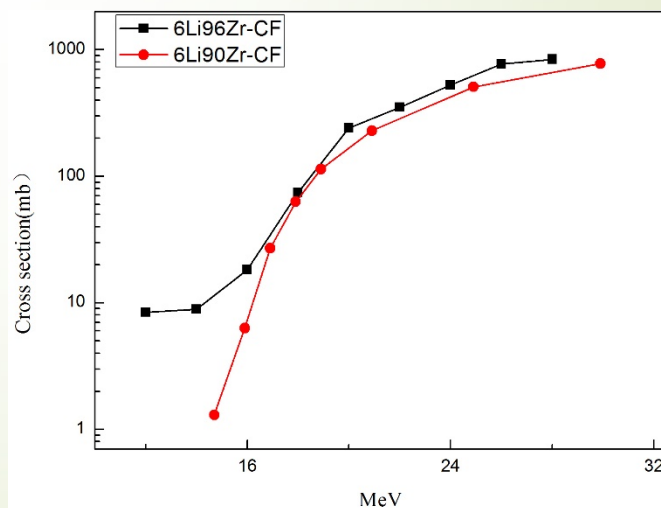
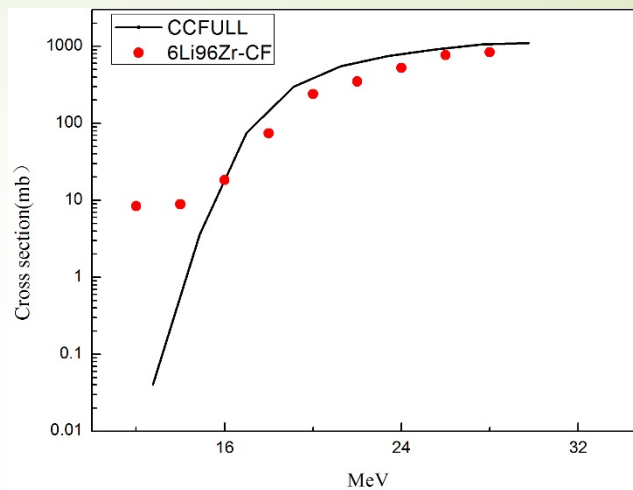
共计9个能量点

束流强度: 5-20enA

靶:  $745 \mu\text{g}/\text{cm}^2$

衬:  $950 \mu\text{g}/\text{cm}^2$

实验结果:



这一工作由中国原子能科学研究院与北京航空航天大学共同完成。

# 弱束缚稳定核熔合反应截面测量— $^9\text{Be}$ 破裂效应的研究

## $^9\text{Be} + ^{186}\text{W}$ 体系研究-衰变谱学方法测量截面

实验条件:

束流能量: 41、44、45、49、53

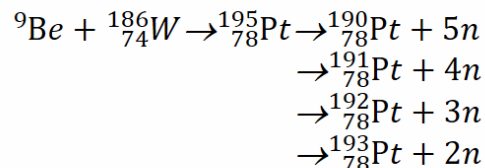
束流强度: 6nA

时间: 0.5h/point

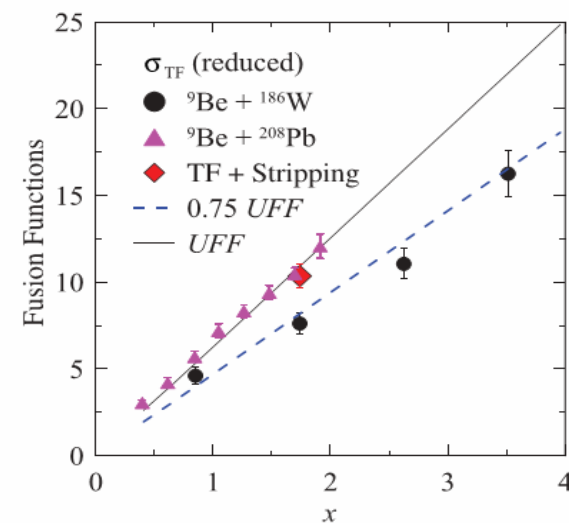
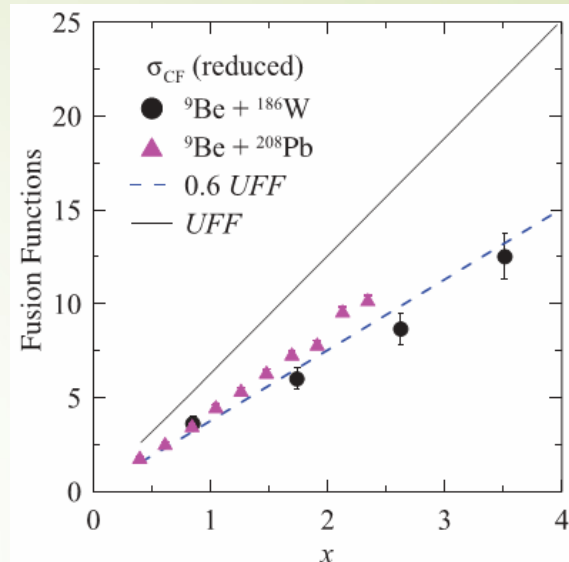
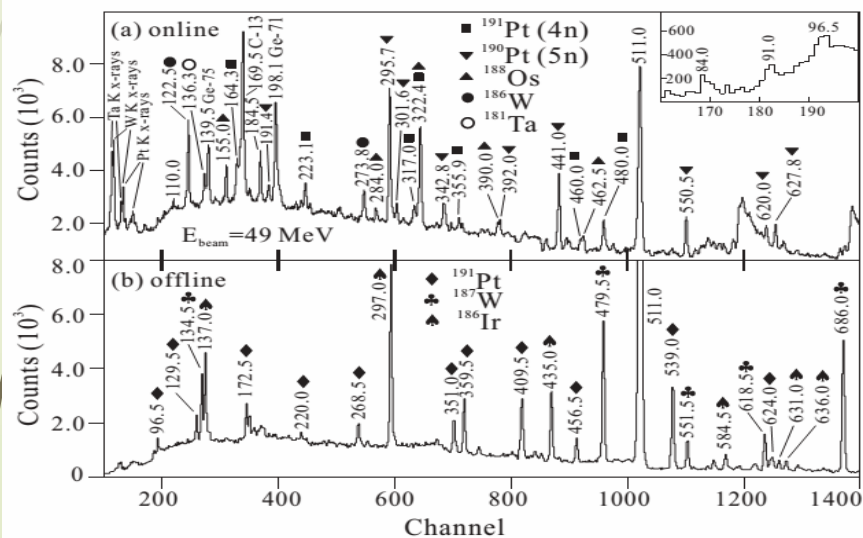
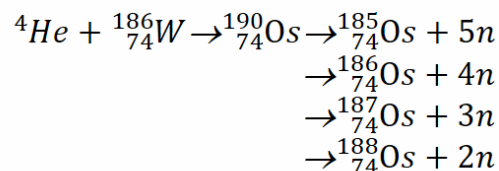
靶: 1.1mg/cm<sup>2</sup>

碳衬: 1.3mg/cm<sup>2</sup>

CF:



ICF:



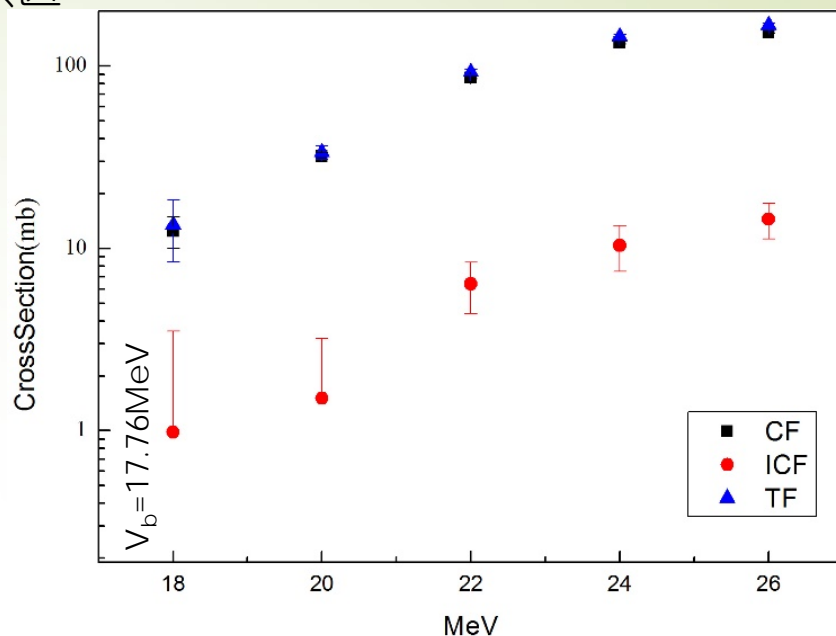
PHYSICAL REVIEW C **87**, 024604 (2013)

Fusion and one-neutron stripping reactions in the  $^9\text{Be} + ^{186}\text{W}$  system above the Coulomb barrier

# 弱束缚稳定核融合反应截面测量— $^9\text{Be}$ 破裂效应的研究

$^9\text{Be}$ 的CF Compression对于不同核区  
差别巨大

$^9\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$	➔	30-35%
$^9\text{Be} + ^{209}\text{Bi}$		
$^9\text{Be} + ^{181}\text{Ta}$	-----	
$^9\text{Be} + ^{186}\text{W}$	➔	25%
$^9\text{Be} + ^{144}\text{Sm}$		
$^9\text{Be} + ^{89}\text{Y}$	➔	20%
$^9\text{Be} + ^{64}\text{Zn}$		
$^9\text{Be} + ^{27}\text{Al}$	➔	0%

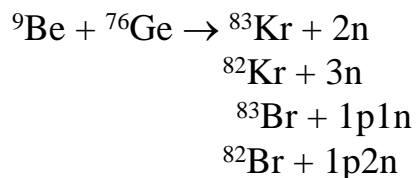


## $^9\text{Be} + ^{76}\text{Ge}$ 体系研究-在束谱学方法测量截面

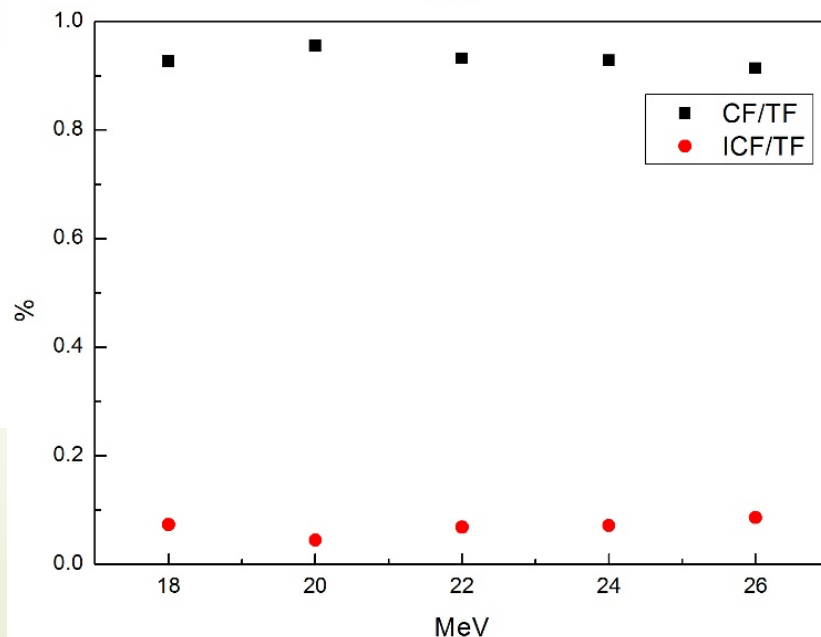
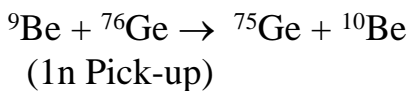
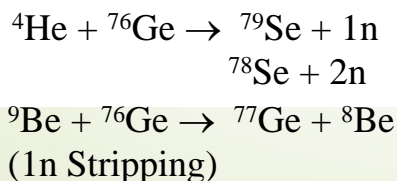
实验条件:

- 束流能量: 18至26MeV
- 间隔2MeV
- 共计5个能量点
- 束流强度: 5-20enA
- 靶:  $540\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$
- C衬:  $46\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$

CF:



ICF:





# 总结

1. 利用谱学方法测量熔合反应截面的方法。
2. 实验靶室以及探测阵列系统的结构。
3. 本小组正在进行的项目与实验
  1.  ${}^6\text{Li}$ 弱束缚核破裂效应研究。
  2.  ${}^9\text{Be}$ 弱束缚核破裂效应研究。

# 未来工作计划

1. 继续研究弱束缚核与中重质量核区靶核的熔合反应，进而推广到更轻质量核区。
2. 开展放射性核素的破裂效应研究。
3. 相关核数据的测量工作。

# 谢谢