共振核反应γ射线源下的^{197}Au（γ，n）反应截面测量

杨婉莎

2019. 10. 10

内容提要

□ 研究背景

□ 主要研究内容

前期工作结果：

- ^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源的厚靶产额
- ^{197}Au（γ，n）^{196}Au光核反应截面

正在进行中的工作：

- ^{7}Li（p，γ）^{8}Be共振核反应γ源的厚靶产额
- ^{197}Au（γ，n）光核反应截面

□ 总结与展望

内容提要

中核集团 CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY 中国原子能科学研究院

BEIJING NORMAL UNIVERSITY 北京师范大学

□ 研究背景

□ 主要研究内容

前期工作结果：

- ^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源的厚靶产额
- ^{197}Au（γ，n）^{196}Au光核反应截面

正在进行中的工作：

- ^{7}Li（p，γ）^{8}Be共振核反应γ源的厚靶产额
- ^{197}Au（γ，n）光核反应截面

□ 总结与展望

光核反应-背景

中国原子能科学研究院 中核集团 CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

北京师范大学 BEIJING NORMAL UNIVERSITY

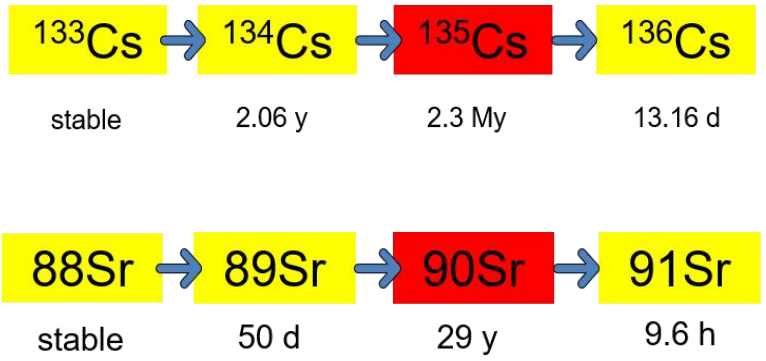
Typical nuclear waste from the nuclear reactor (1 Gwe)

Nuclei	Half Decay (year)	Neutron Cross Section (b)	Production (Ci/year)	Amount (kg/year)
FP				
85Kr	11	1.7	3.0×10^5	0.79
90Sr	29	0.014	25×10^6	17.8
93Zr	1.5×10^6	2.6	61	24.0
99Tc	2.1×10^5	20	433	25.5
107Pd	6.5×10^6	1.8	3.6	7.0
129I	1.6×10^7	27	1.0	5.8
135Cs	2.3×10^6	8.7	13.5	11.7
137Cs	30	0.25	3.5×10^6	39.5
151Sm	90	15,000	1.1×10^4	0.4
TRU				
237Np	2.1×10^6	181	11	14.4
241Am	432	603	5.0×10^3	1.46
243Am	7380	79	601	3.03
243Cm	28,5	720	55	0.01
244Cm	18	15	5.8×10^4	0.72
245Cm	8500	2,347	4.1×10^3	0.03

chen J, Imasaki K, Fujita M, Yamanaka C, Asakawa M, Nakai S, Asakuma T. Development of a Compact High Brightness X-ray Source[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1994, 341(1-3):346–350

- 某些核的中子嬗变截面较小
- 稳定核可能会嬗变为长放核

中子嬗变的补充



$^{135}Cs \rightarrow {}^{134}Cs$或$^{133}Cs$

$^{133}Cs \rightarrow {}^{132}Cs(6.5d)$或$^{131}Cs(9.7d)$

光核反应-背景

能量较大的光子能将核激发到更高能级，放出中子、质子、α 粒子或引起重核的光致裂变，反应截面随光子能量而连续变化并出现宽的峰值。

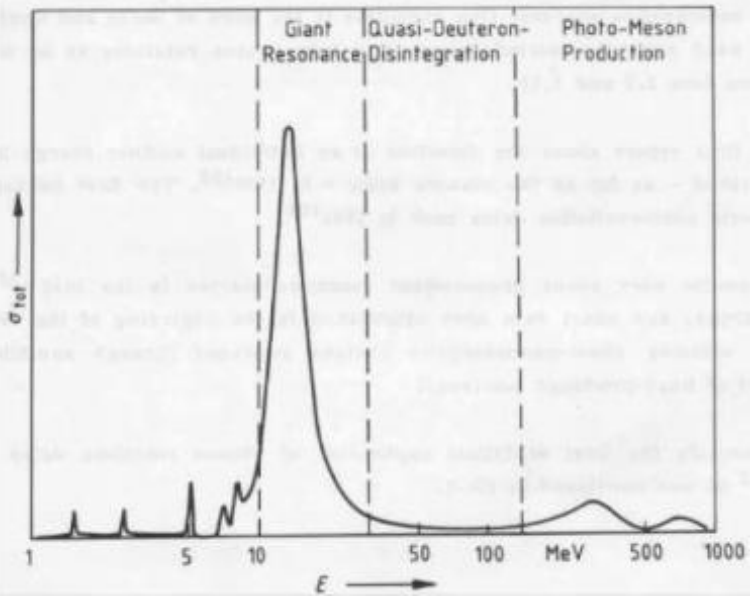
$$^{129}I+\gamma \rightarrow {}^{128}I(25m)+n$$

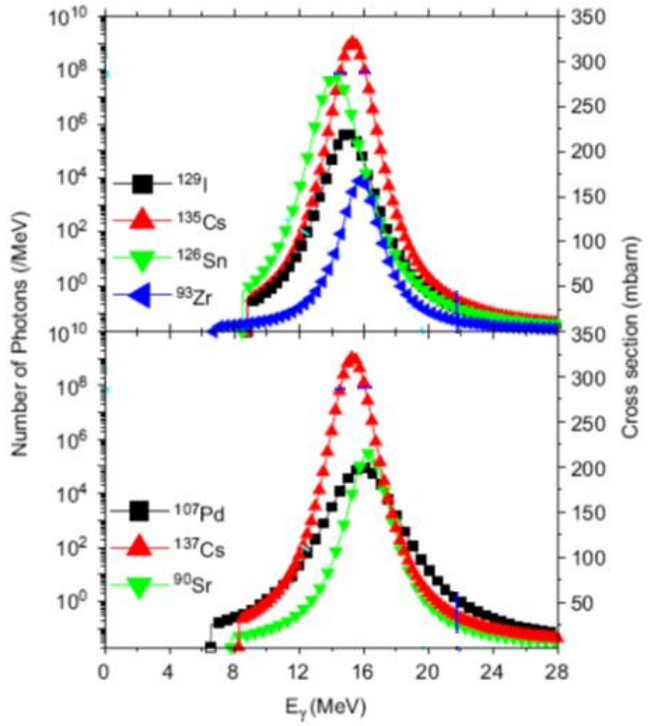
$$^{128}I \rightarrow {}^{128}Xe+\beta^{-}+\nu^{-}\ (93.1\%)$$

$$^{128}I \rightarrow {}^{128}Te+\beta^{+}+\nu \rightarrow {}^{128}Xe+2\beta^{-}+2\nu^{-}$$

Ledingham K, Magill J, Mckenna P, et al. Laser-driven photo-transmutation of (129)I - a long-lived nuclear waste product[J]. **Journal of Physics D Applied Physics**, 2003, 36(18):L79-L82.

不同能量光子被原子核吸收的反应截面





(1) 在大概8 MeV 以下是窄共振区；

(2) 在大概8 到30 MeV 是巨共振区(Giant Resonance, GR)其中巨偶极共振(Giant Dipole Resonance, GDR) 一直是光核反应研究的中心；

(3) 在30 MeV 以上到光介子阈(140 MeV 左右)是准氘核分解区(Quasi-Deuteron Disintegration)；

(4) 在140 MeV 以上为光介子产生区(Photo-Meson Production)，光子能量达到π介子产生域。

Weise H.P. Segebade, C., Lutz G. J. Photon Activation Analysis[M]. Walter de Gruyter and Co.,Berlin, 1987.

背景-伽玛射线源

1、轫致辐射γ 源：

光子能量可以覆盖整个巨共振区，但它最大的缺点就是能谱连续；

2、中子捕获γ 源：

能量宽度主要受多普勒效应限制，种γ 光子的能量一般不到10 MeV，只能测量一些在巨共振阈值附近的光核反应；

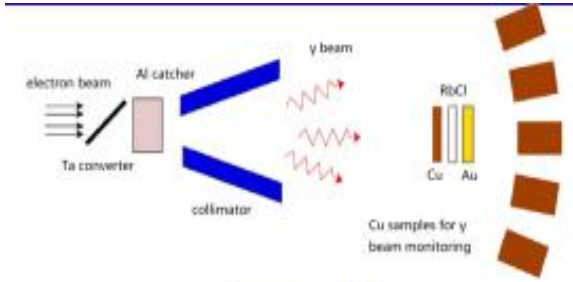
3、飞行中的正电子湮灭γ 源

4、激光康普顿背散射（LCS）γ 源：

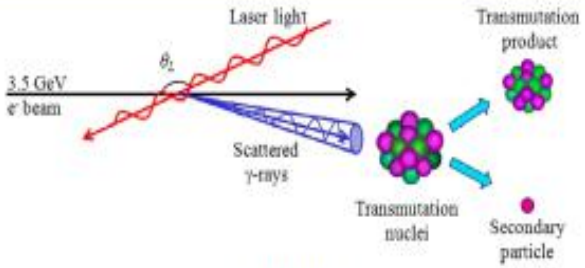
光子束亮度高、极化度高、单能性好、发散度小并且能量可调，但是由于方向性好，在大量处理核废料时需要扫描；

5、质子共振核反应γ 源：

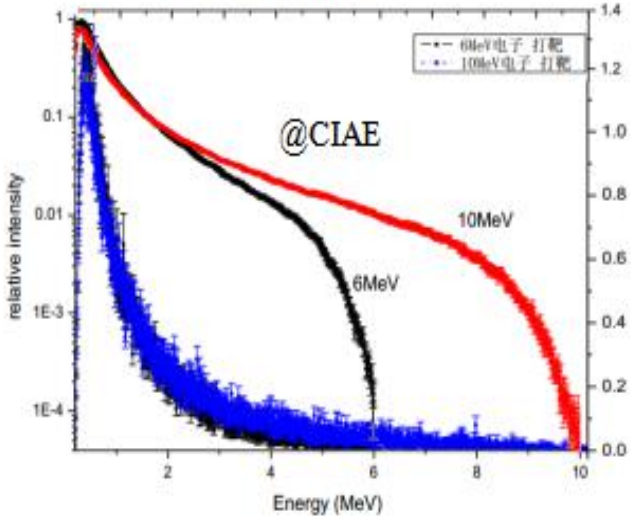
入射质子只需很小的质心系能量撞击靶核就能达到复合核的高能量激发态，复合核退激放出能量很高的单能γ光子，而且在4π方向上放射γ光子，有利于处理大面积的核废料。

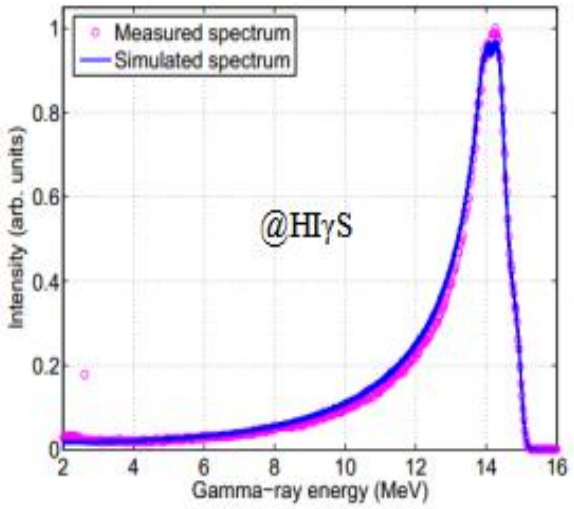


@德国的BLBE



@SLEGS





Henry R. Research opportunities at the upgraded HIγS facility,Progress in Particle and Nuclear Physics,Volume 62, Issue 1,2009,Pages 257-303,

背景-质子共振 γ 源

伽玛射线能量为：

入射质子能量＋B核最后一个质子结合能

Reactions	Resonance energy /keV	γ-ray energy /MeV	Thick target yield /proton	Width Γ/keV
$^{7}Li(p,\gamma)$	441.4 ± 0.5	14.8.(33%) 17.6(67%)	1.9×10^{-8}	12
$^{9}Be(p,\gamma)$	998.0 ± 4 1087.0 ± 2	7.4 6.7, 0.72	1.78×10^{-8} 1.01×10^{-9}	94 4
$^{19}F(p,\alpha\gamma)$	340.0 ± 2	6.1(96%) 7.0(4%)	1.74×10^{-8}	3.2
	873.5 ± 1	6.1(72%) 7.0(28%)	3.6×10^{-7}	5.2
	935.3 ± 1	6.1(77%) 7.0(23%)	2.0×10^{-7}	8.0
	$All \leq 960$	6.1(72%) 7.0(28%)	6.9×10^{-7}	-
$^{13}C(p,\gamma)$	1747	9.17	7.4×10^{-9}	-

Ref:Fowler W A, Lauritsen C C, Lauritsen T. Gamma-Radiation from Excited States of Light Nuclei[J]. Reviews of Modern Physics, 1948, 20(1):236-277.

背景-质子共振γ源

^{197}Au（γ，n）^{196}Au反应阈值：

Reaction	(γ, n)	(γ, p)	(γ, 2n)	(γ, 2p)	(γ, np)	(γ, 3n)	(γ, 3p)	(γ, 2np)
Threshold *B*, MeV	8.1	5.8	14.7	14.0	13.7	23.1	20.6	19.8

Reactions	Resonance energy /keV	γ-ray energy /MeV	Thick target yield /proton	Width Γ/keV
$^{7}Li(p,\gamma)$	441.4 ± 0.5	14.8.(33%) 17.6(67%)	1.9×10^{-8}	12
$^{9}Be(p,\gamma)$	998.0 ± 4 1087.0 ± 2	7.4 6.7, 0.72	1.78×10^{-8} 1.01×10^{-9}	94 4
$^{19}F(p,\alpha\gamma)$	340.0 ± 2	6.1(96%) 7.0(4%)	1.74×10^{-8}	3.2
	873.5 ± 1	6.1(72%) 7.0(28%)	3.6×10^{-7}	5.2
	935.3 ± 1	6.1(77%) 7.0(23%)	2.0×10^{-7}	8.0
	$All \leq 960$	6.1(72%) 7.0(28%)	6.9×10^{-7}	-
$^{13}C(p,\gamma)$	1747	9.17	7.4×10^{-9}	-

内容提要

□ 研究背景

□ 主要研究内容

前期工作结果：

- ^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源的厚靶产额
- ^{197}Au（γ，n）^{196}Au光核反应截面

正在进行中的工作：

- ^{7}Li（p，γ）^{8}Be共振核反应γ源的厚靶产额
- ^{197}Au（γ，n）光核反应截面

□ 总结与展望

^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源

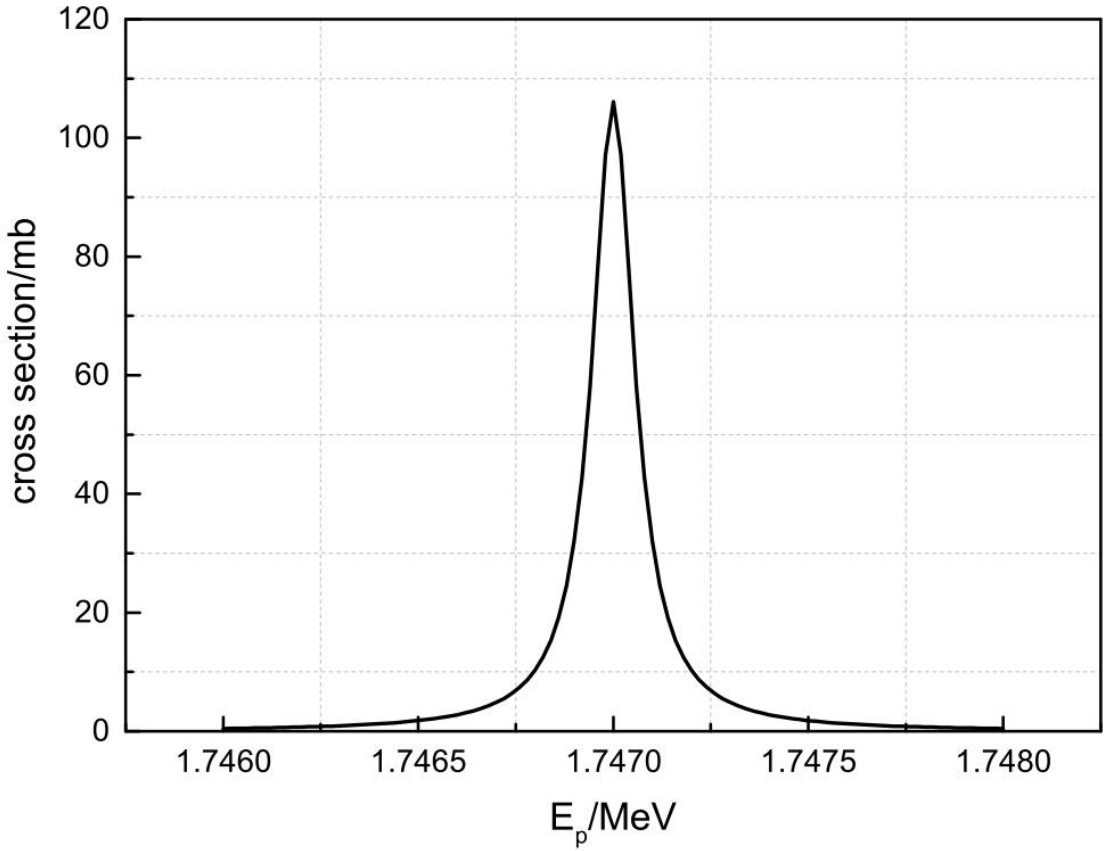
$^{13}C(p,\ \gamma)$ @$E_p = 1.747MeV$

$$^{13}C + p \xrightarrow{\Gamma_T = 122eV} {}^{14}N^* \begin{cases} {}^{13}C + p & \Gamma_p = 115.7eV \\ {}^{14}N + \gamma & \Gamma_\gamma = 6.3eV \end{cases}$$

由布莱特-维格纳(Breit-Wigner)公式：

$$\sigma(E_p) = \frac{\pi\lambda_p^2 g\Gamma_p\Gamma_\gamma}{(E_{pc.m.} - E_{Rc.m.})^2 + (\frac{\Gamma_T}{2})^2}$$

可以得到：$\sigma_{max} = \sigma(E_p = 1.747MeV) = \frac{4\pi\lambda_p^2 g\Gamma_p\Gamma_\gamma}{(\Gamma_T)^2} \approx \mathbf{106mb}$

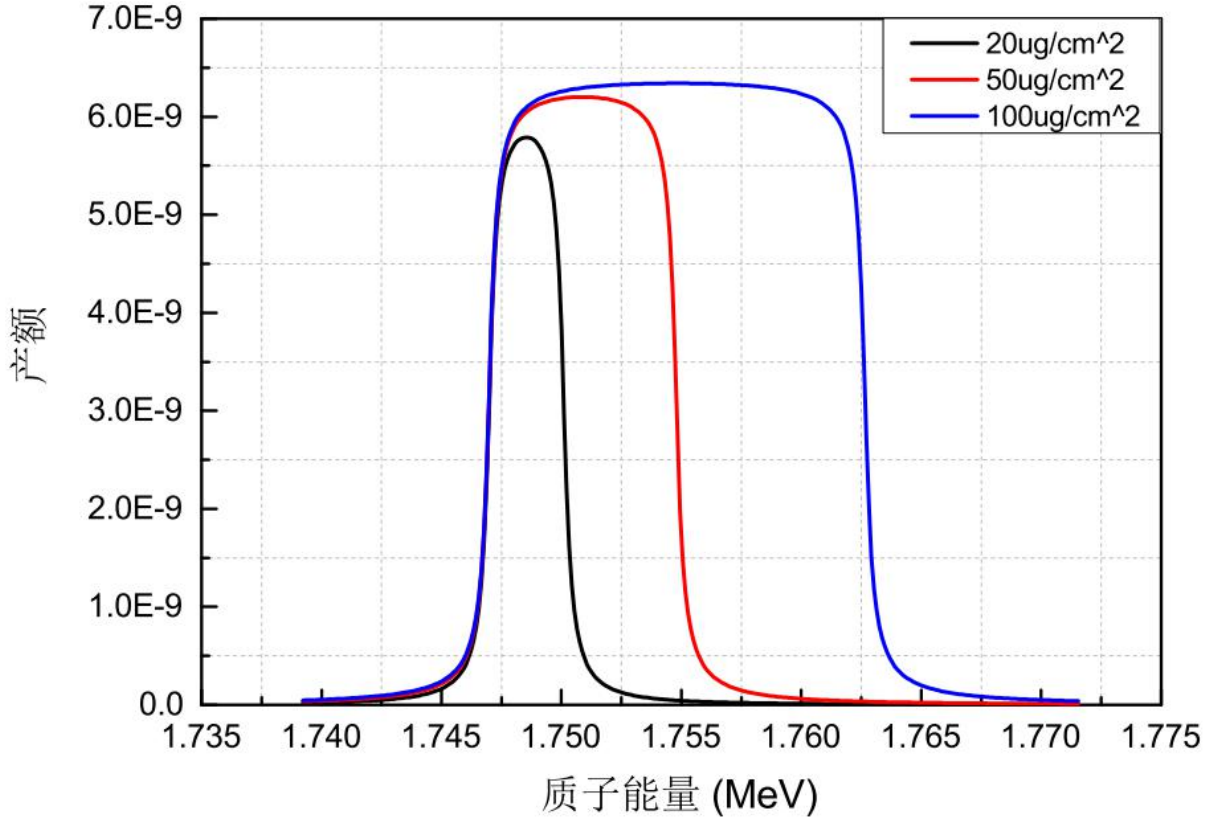


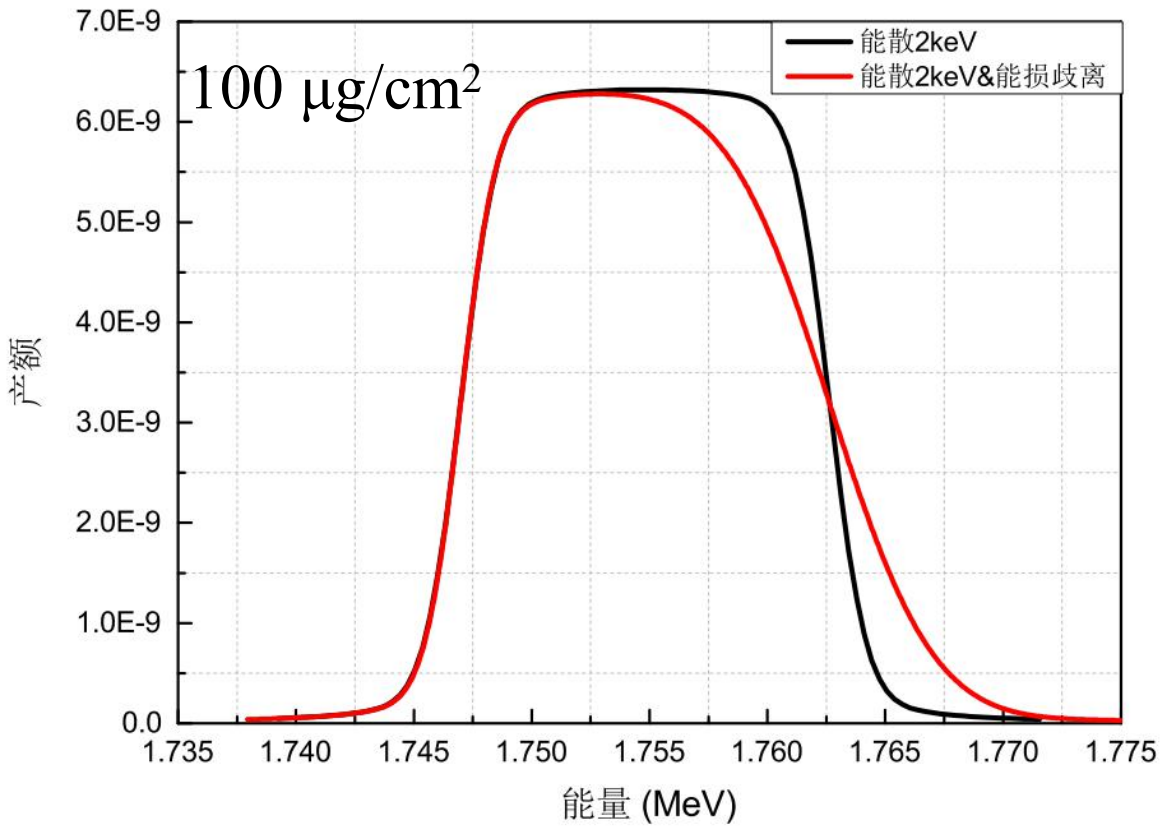
$^{13}C(p,\ \gamma)$在1.75 MeV处的激发曲线

^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源

- 靶厚选择

靶厚：100ug/cm²





$$Y(E_p,\Delta)=\frac{\Gamma\sigma_R}{2\epsilon}(\arctan(\frac{E_p-E_R}{\Gamma/2})-\arctan(\frac{E_p-E_R-\Delta}{\Gamma/2}))$$

$$Y''(E_p,\Delta)=\int\int Y(E_p+\delta,\Delta+\delta')\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\delta^2/2\sigma^2}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma'}e^{-\delta'^2/2\sigma'^2}d\delta d\delta'$$

^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源

中国原子能科学研究院 中核集团 CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

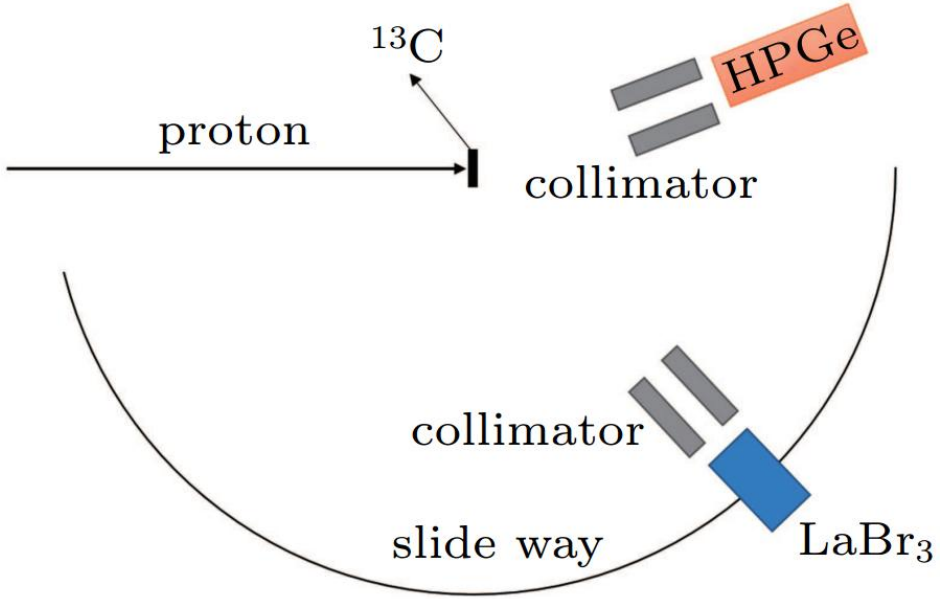
北京师范大学 BEIJING NORMAL UNIVERSITY

- 实验设置

➢ 加速器质子束：E=1.75 MeV， I=8μA，束流能散1‰

➢ 同位素^{13}C靶：靶厚100μg/cm^2

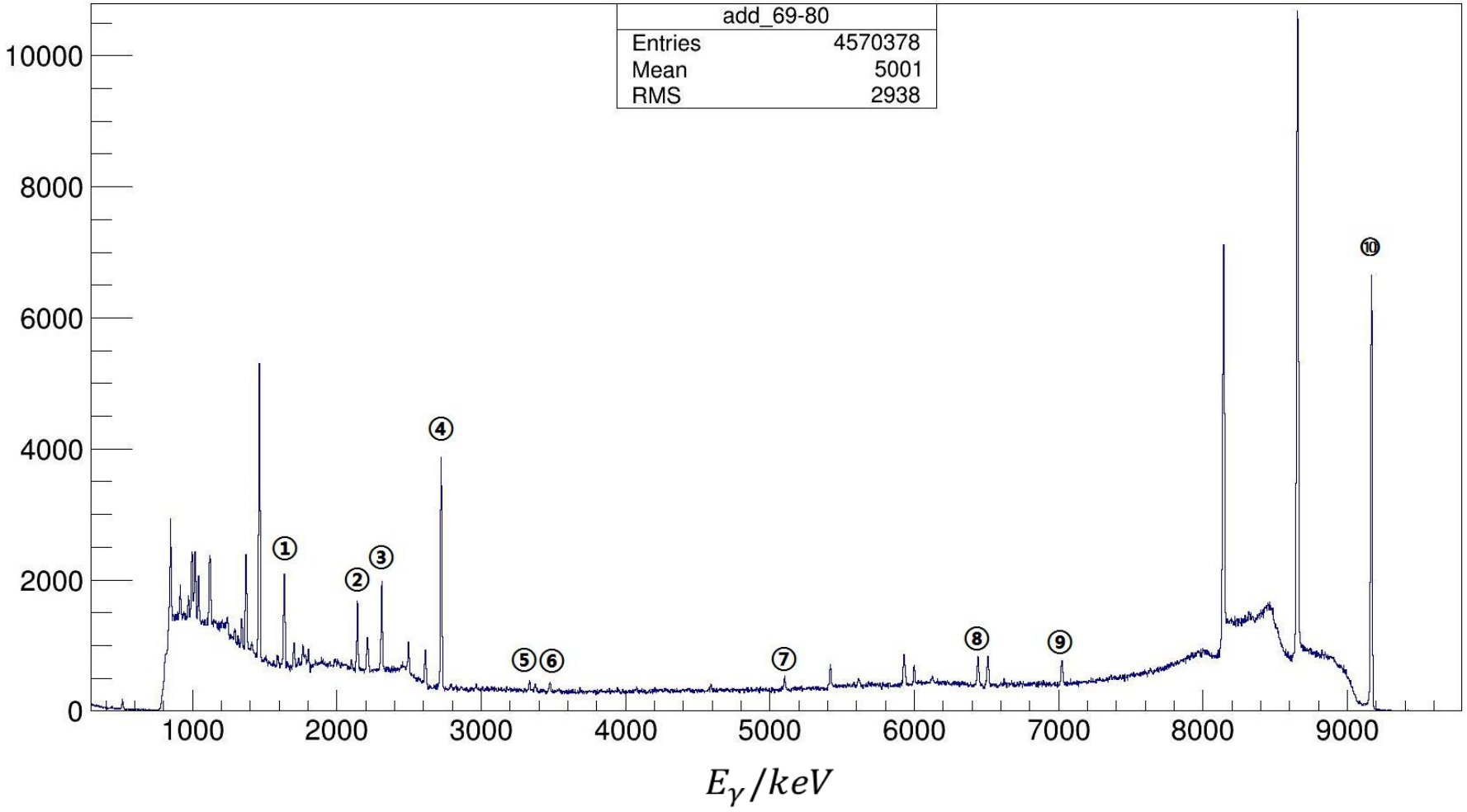
➢ 探测器：φ55.5mm同轴型高纯锗、3″×3″溴化镧探测器、5″×5″碘化钠探测器



Detector	L/cm	θ/°
高纯锗	69	28
溴化镧	81	38
碘化钠	43.5	81

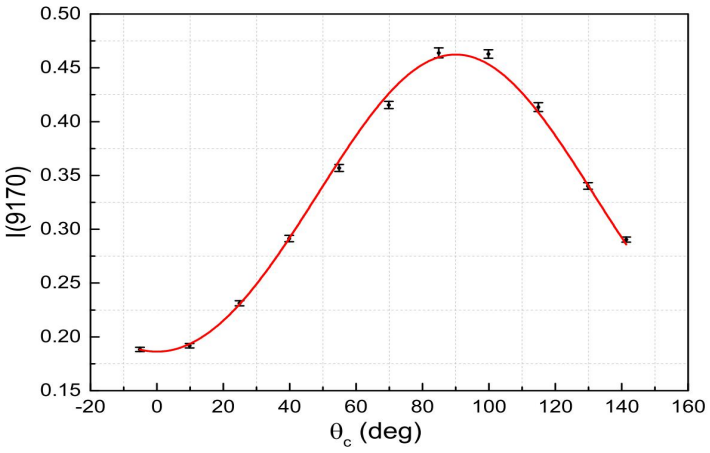
^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源

- HPGe探测器能谱图

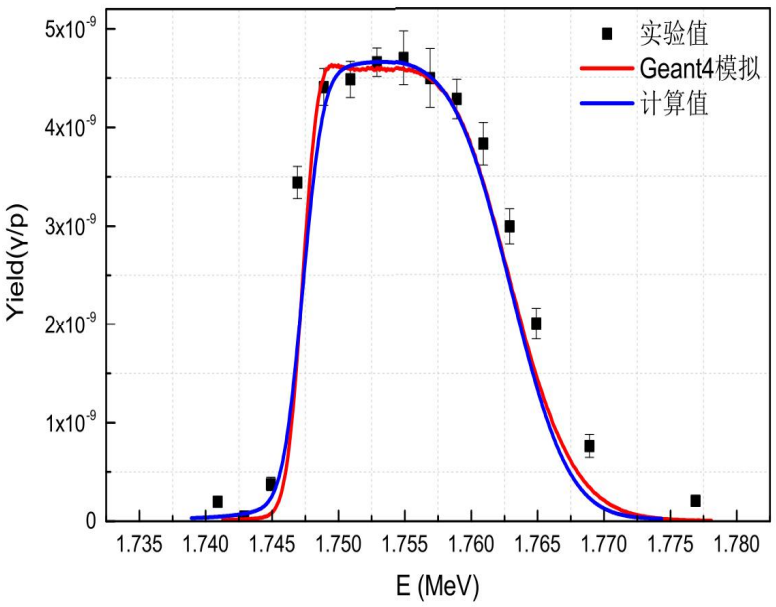


序号	能量/keV
①	1635
②	2143
③	2313
④	2726
⑤	3338
⑥	3480
⑦	5105
⑧	6445
⑨	7027
⑩	9169

^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源



9.17MeV 伽玛产额角分布



9.17MeV 伽玛厚靶产额

$$Y(\theta) = \frac{N_\gamma W(\theta)}{N_p \epsilon W(\theta_0)}$$

$$Y = \int\int_0^\pi Y(\theta)\sin(\theta)\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\varphi = 2\pi\int_0^\pi Y(\theta)\sin(\theta)\mathrm{d}\theta$$

9.17MeV 伽玛的厚靶产额

$$Y_{max} = 4.7 \pm 0.4 * 10^{-9}\gamma/proton$$

9.17MeV 伽玛产量

$I_\gamma = 2.4 * 10^5 s^{-1}$ @8 μA

$I_\gamma = 3.7 * 10^9 s^{-1}$ @125 mA

F. Scantamburlo, et al. LIPAc, the 125mA / 9MeV / CW Deuteron IFMIF' s Prototype Accelerator: What Lessons Have We Learnt from LEDA?[C]//Proc. 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC'14), Dresden, Germany, June 15-20, 2014. Geneva, Switzerland:JACoW, 2014:3256–3258

内容提要

□ 研究背景

□ 主要研究内容

前期工作结果：

- ^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源的厚靶产额
- **^{197}Au（γ，n）^{196}Au光核反应截面**

正在进行中的工作：

- ^{7}Li（p，γ）^{8}Be共振核反应γ源的厚靶产额
- ^{197}Au（γ，n）光核反应截面

□ 总结与展望

^{197}Au（γ，n）光核反应

中国原子能科学研究院 中核集团 CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

北京师范大学 BEIJING NORMAL UNIVERSITY

测量方法：

- 直接测量反应产物，如(γ,n)的中子：统计误差
  - 优点是测量效率高，适合于测量小截面反应
  - 缺点是在线测量时易受束流和其他反应道影响
- 活化法，测量衰变产物：最小可测活度
  - 缺点是测量效率相对较低，要求产物核半衰期适中，束流时间估算相对较难；优点是离线测量干扰小
  - 计量站专用屏蔽系统，HPGe，最小可测活度1mBq
  - 普通屏蔽系统，HPGe，10-100mBq

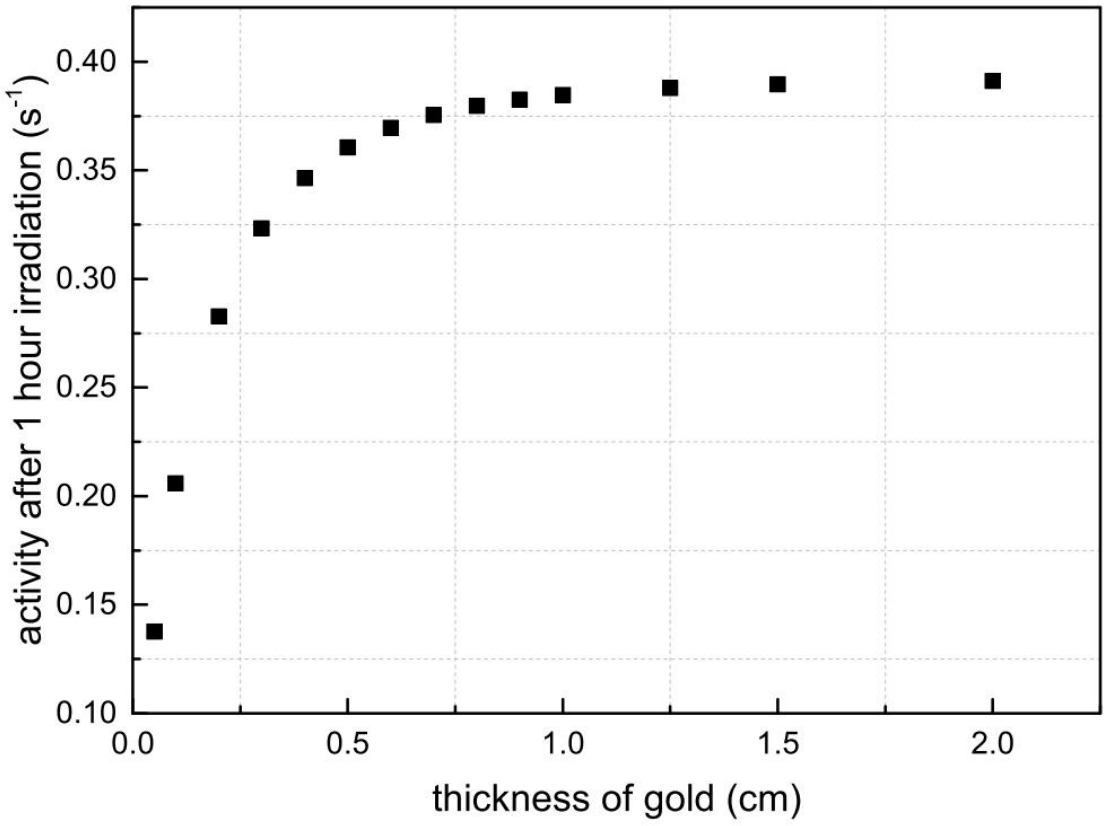
➢ ^{197}Au(γ，n)的产物^{196}Au会进行轨道电子俘获或β^{+}衰变到^{196}Pt ($T_{1/2}$ = 6.18天)或β^{-}衰变到^{196}Hg

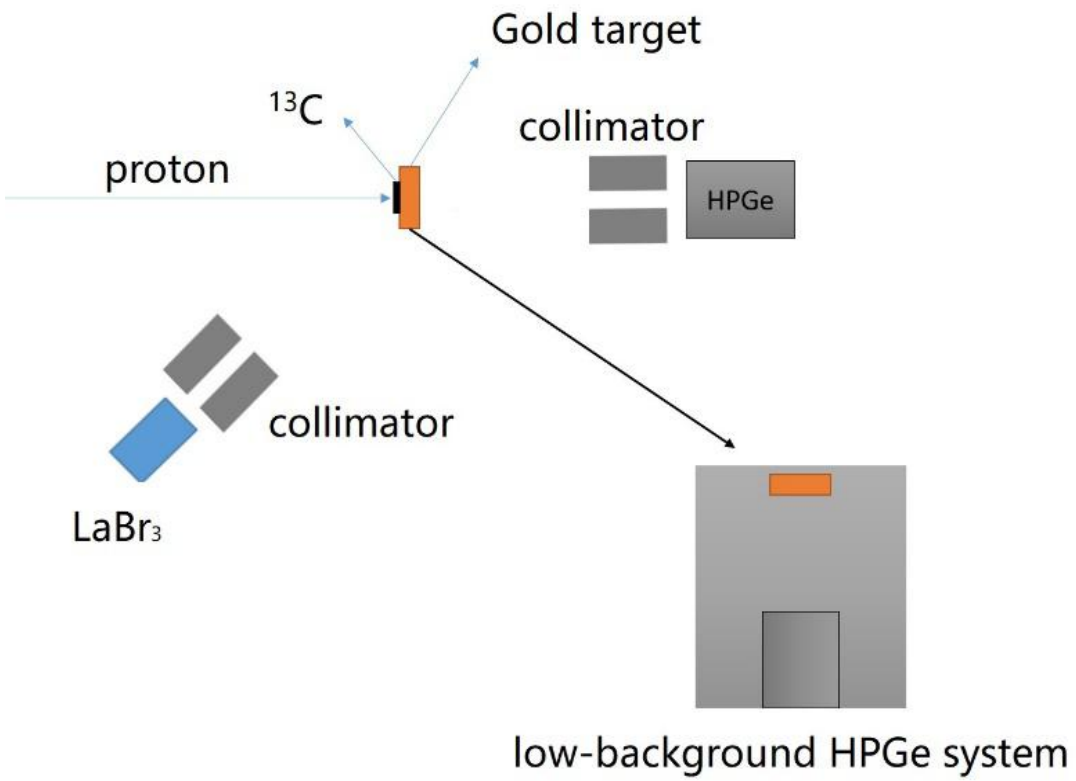
S_n = 8.07 MeV　　S_{2n} = 14.7 MeV

衰变子核	E_γ/ keV	发射强度
^{196}Pt	333.03	0.229
^{196}Pt	355.73	0.87
^{196}Hg	426.10	0.066

活化法　低本底测量室

^{197}Au（γ，n）光核反应

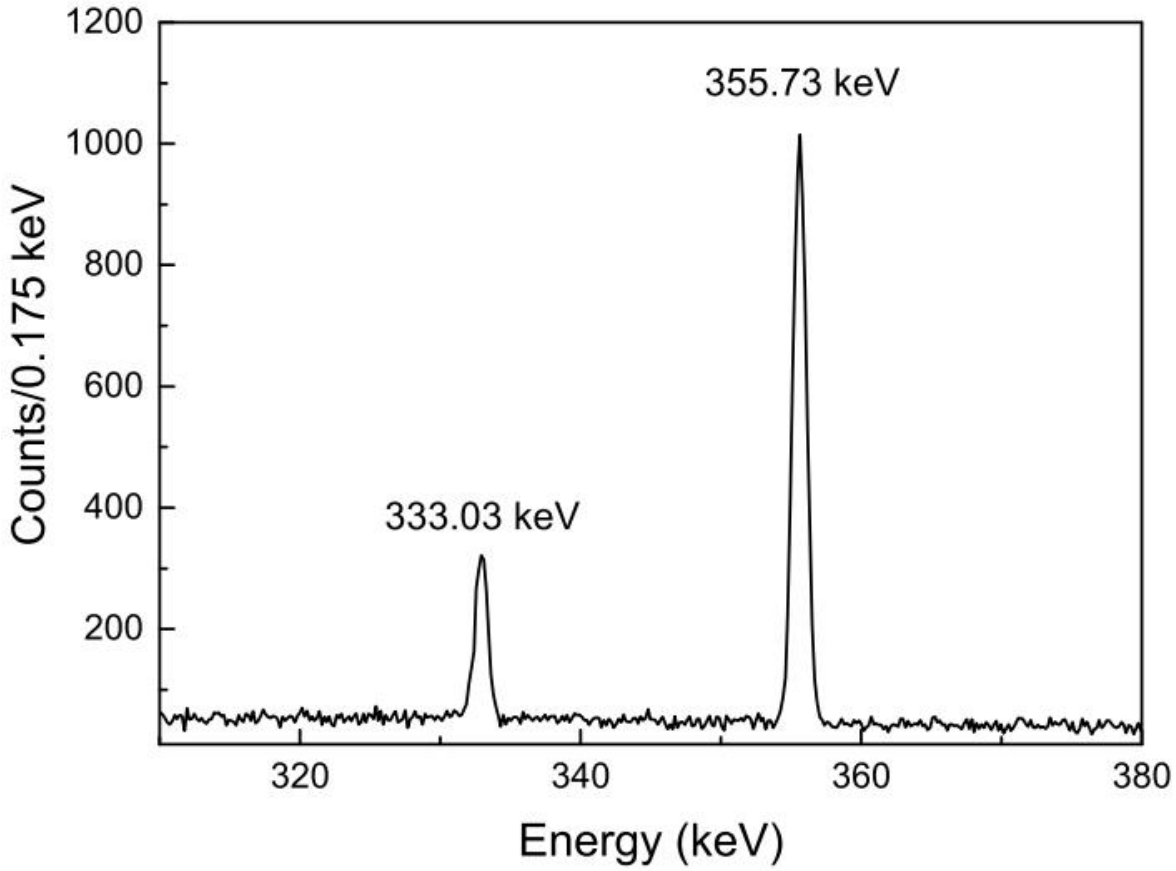


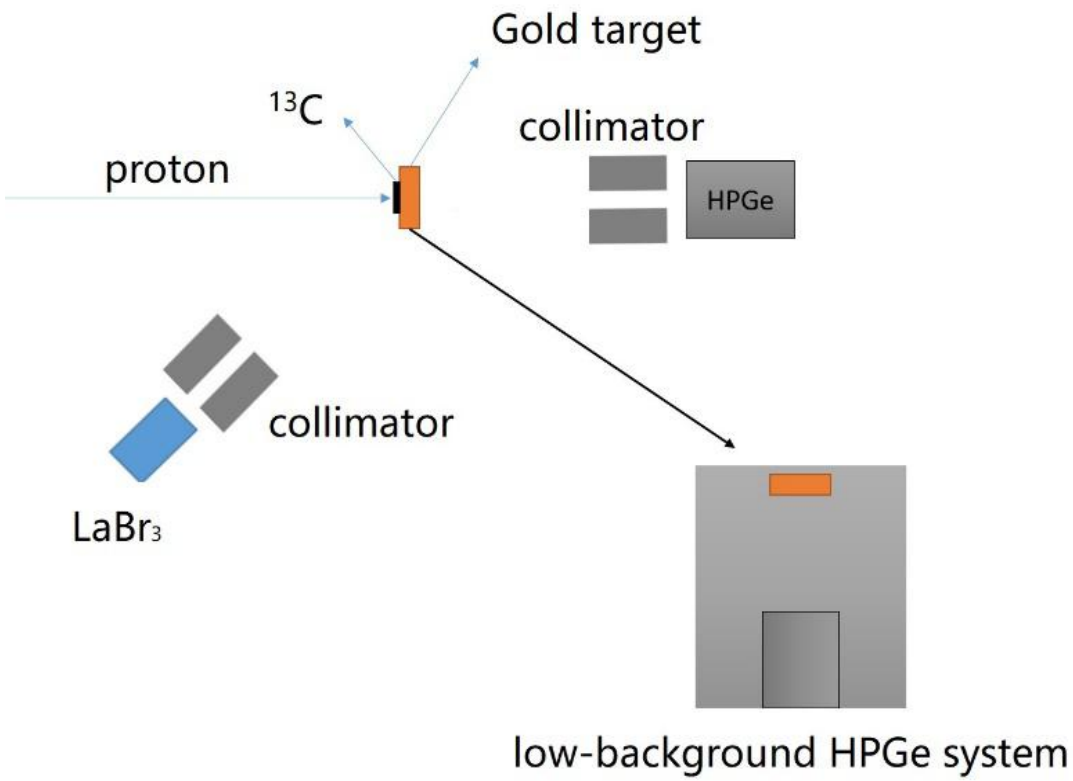


照射时长/s	放置时长/s	测量时长/s	N_{356}
21600	12900	74320	1566
19800	11040	339000	6610

综合考虑：靶厚**0.2cm**

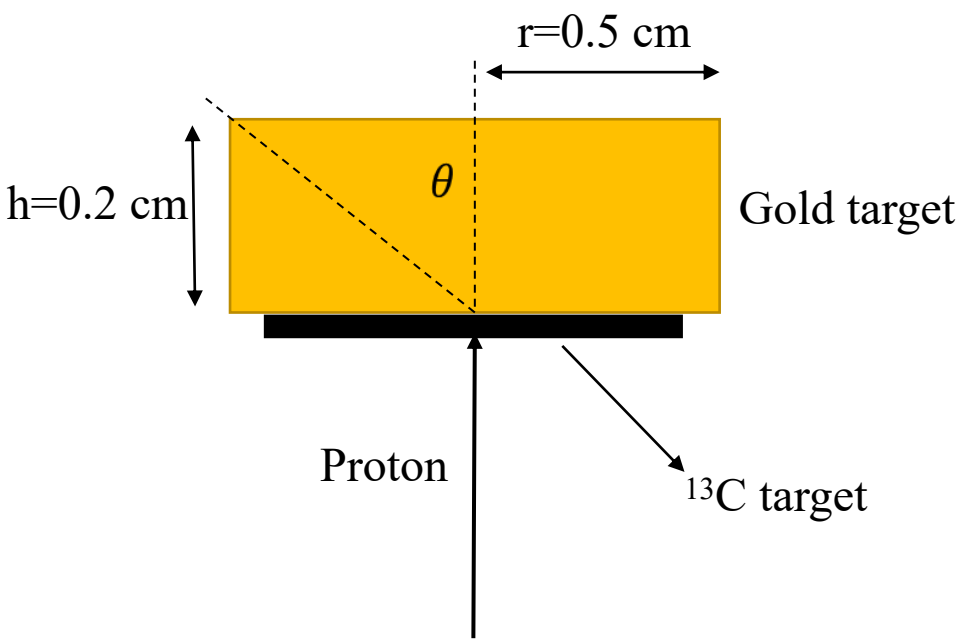
^{197}Au（γ，n）光核反应





照射时长/s	放置时长/s	测量时长/s	N_{356}
21600	12900	74320	1566
19800	11040	339000	6610

^{197}Au（γ，n）光核反应



$$N_s(\theta) = \begin{cases} \frac{h}{\cos(\theta)} \frac{\rho}{A} N_A, & 0 \le \theta < \theta_0 \\ \frac{r}{\sin(\theta)} \frac{\rho}{A} N_A, & \theta_0 \le \theta \le \pi/2 \end{cases}$$

$$P = 2\pi \int_0^{\pi/2} I(\theta)(1 - e^{-N_s(\theta)\sigma_g}) \sin(\theta) \mathrm{d}\theta$$

$$\varepsilon' = \frac{\int_0^h P'(h) e^{-N_v h \sigma'} \mathrm{d}h}{P(h)} \varepsilon$$

Sample	N_{Det}	$N_{Reaction}$	σ_g / mb
1	1566±49	$1.01 \pm 0.03 \times 10^6$	40.1±6.9
2	6610±100	$1.09 \pm 0.02 \times 10^6$	40.4±6.9

内容提要

□ 研究背景

□ 主要研究内容

前期工作结果：

- ^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源的厚靶产额
- **^{197}Au（γ，n）^{196}Au光核反应截面**

正在进行中的工作：

- ^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源的厚靶产额
- ^{197}Au（γ，n）^{196}Au光核反应截面

□ 总结与展望

内容提要

□ 研究背景

□ 主要研究内容

- ^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源的厚靶产额
- ^{197}Au（γ，n）^{196}Au光核反应截面

□ 总结与展望

小结

- 小结

准确测量了9.17 MeV伽玛射线的厚靶产额，并应用该能量的伽玛射线对光核反应的标准反应^{197}Au(γ, *n*)的反应截面进行了测量。

- 现在正在进行的工作

➢ 研究^{7}Li(p, γ)在440 keV处共振反应所产生的γ射线在光核截面测量中的应用 。

内容提要

□ 研究背景

□ 主要研究内容

前期工作结果：

- ^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源的厚靶产额
- ^{197}Au（γ，n）^{196}Au光核反应截面

正在进行中的工作：

- ^{13}C（p，γ）^{14}N共振核反应γ源的厚靶产额
- ^{197}Au（γ，n）^{196}Au光核反应截面

□ 总结与展望

^{197}Au（γ，n）@ ^{7}Li（p，γ）^{8}Be

中国原子能科学研究院 中核集团 CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

北京师范大学 BEIJING NORMAL UNIVERSITY

Reactions	Resonance energy /keV	γ-ray energy /MeV	Thick target yield /proton	Width Γ/keV
$^{7}Li(p,\gamma)$	441.4 ± 0.5	14.8.(33%) 17.6(67%)	1.9×10^{-8}	12
$^{9}Be(p,\gamma)$	998.0 ± 4 1087.0 ± 2	7.4 6.7, 0.72	1.78×10^{-8} 1.01×10^{-9}	94 4
$^{19}F(p,\alpha\gamma)$	340.0 ± 2	6.1(96%) 7.0(4%)	1.74×10^{-8}	3.2
	873.5 ± 1	6.1(72%) 7.0(28%)	3.6×10^{-7}	5.2
	935.3 ± 1	6.1(77%) 7.0(23%)	2.0×10^{-7}	8.0
	$All \leq 960$	6.1(72%) 7.0(28%)	6.9×10^{-7}	-
$^{13}C(p,\gamma)$	1747	9.17	7.4×10^{-9}	-

两个问题：

1、达到了两个中子阈值，怎么区分？

（能量和数量上都能区分）

2、14.8MeV和17.6MeV产生的反应伽马怎么区分？

^{197}Au（γ，n）反应阈值：

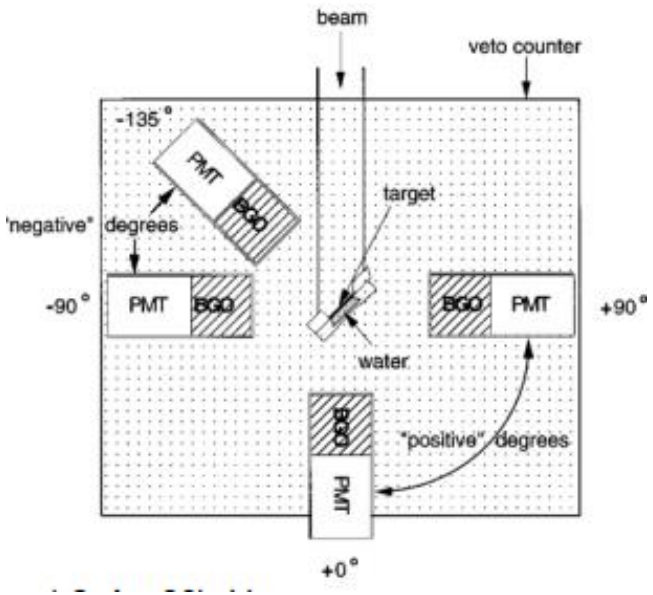
Reaction	(γ, n)	(γ, p)	(γ, 2n)	(γ, 2p)	(γ, np)	(γ, 3n)	(γ, 3p)	(γ, 2np)
Threshold *B*, MeV	8.1	5.8	14.7	14.0	13.7	23.1	20.6	19.8

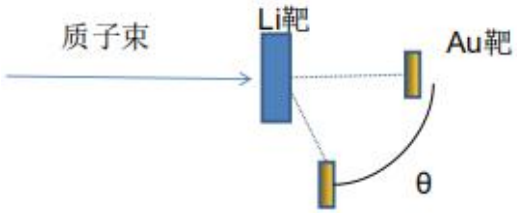
$^{197}Au(\gamma, n)@^{7}Li(p, \gamma)^{8}Be$

中国原子能科学研究院 中核集团 CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

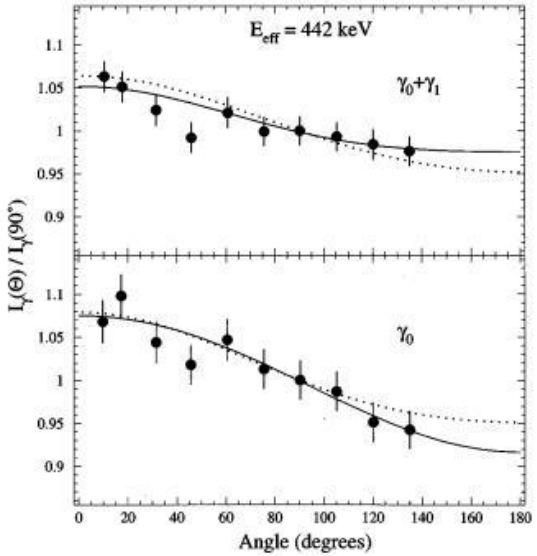
北京师范大学 BEIJING NORMAL UNIVERSITY

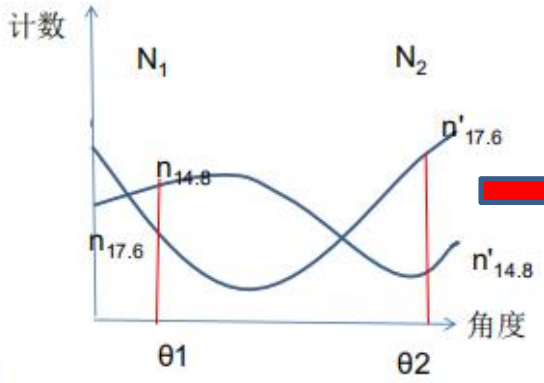
1、角分布法



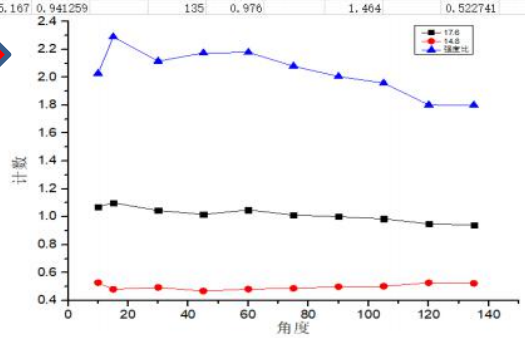


$$\begin{cases} N_1 = n_{14.8} * \sigma_{14.8} + n_{17.6} * \sigma_{17.6} \\ N_2 = n'_{14.8} * \sigma_{14.8} + n'_{17.6} * \sigma_{17.6} \end{cases}$$





	17.6		总			14.8	强度比
10	9.36803	1.07093	10.0746	1.066	1.599	0.52807	2.028008
15	17.3978	1.10045	17.4627	1.054	1.581	0.48055	2.28998
30	31.4498	1.04503	31.5672	1.026	1.539	0.49397	2.115574
45	45.5019	1.01724	45.6716	0.99	1.485	0.46776	2.174705
60	60.223	1.04866	60.4478	1.02	1.53	0.48134	2.178626
75	75.6134	1.01296	75.2239	1	1.5	0.48704	2.079829
90	89.6654	1.00097	90	1	1.5	0.49903	2.005831
105	105.056	0.98501	105.448	0.992	1.488	0.50299	1.958309
120	119.777	0.949323	120.224	0.984	1.476	0.526677	1.802477
135	135.167	0.941259	135	0.976	1.464	0.522741	1.800622

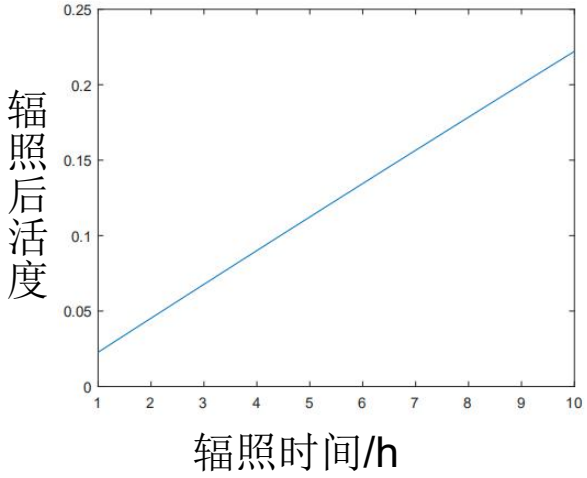


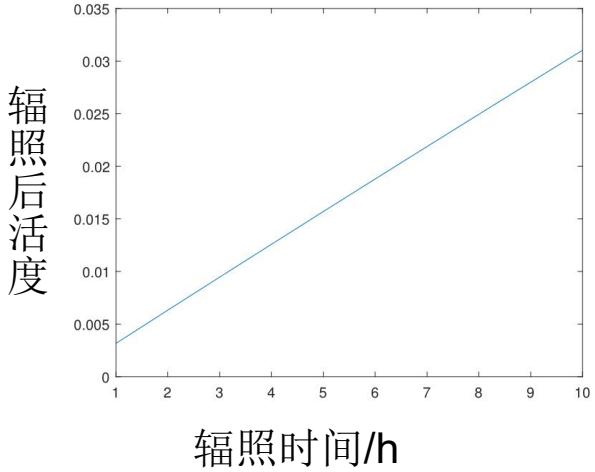
角度(°)	γ能量（MeV）	辐照时间	离线测量时间	截面(mb)	伽玛数	统计精度
90	14.8	8	24	430	345	5.38%
	17.6	8	24	30	24	20.4%
15	14.8	8	24	430	332	5.46%
	17.6	8	24	30	26	19.6%
135	14.8	8	24	430	361	5.26%
	17.6	8	24	30	23	31.1%

PHYSICAL REVIEW C VOLUME 53, NUMBER 3

中国原子能科学研究院 中核集团 CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY
北京师范大学 BEIJING NORMAL UNIVERSITY

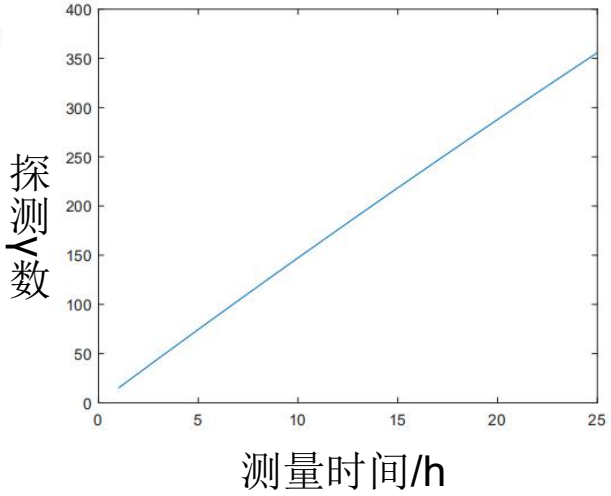
1、角分布法

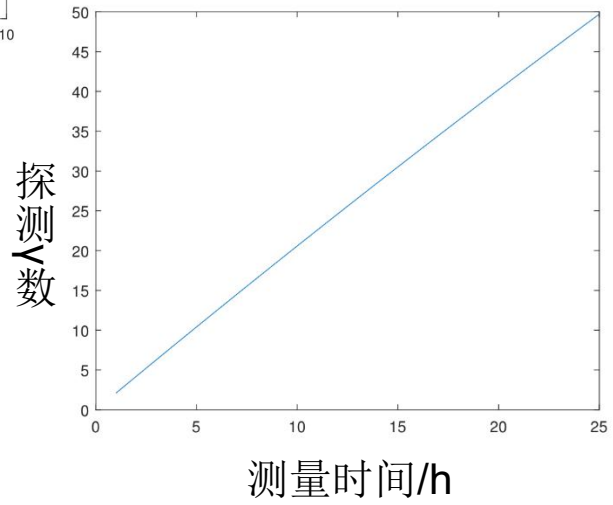




17.6MeV

14.8MeV





共振 靶距：2cm 放置时间：3h

2、相对强度法

共振和非共振情况下，
两条γ射线的相对强度比不同！！

TABLE 1

Gamma rays used in experiment

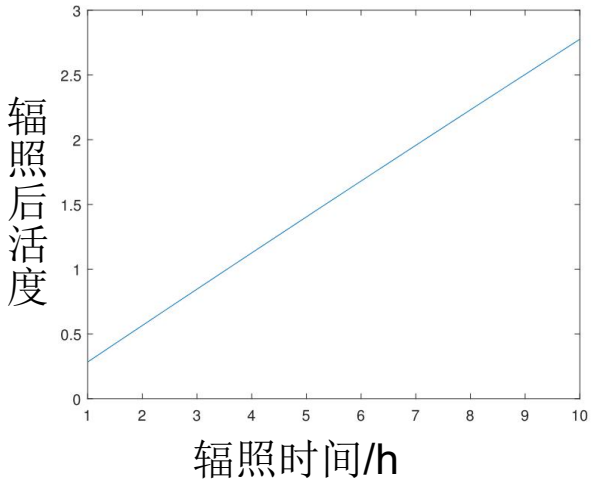
Reaction	Gamma ray energies (MeV)	Target preparation	Target thickness	E_p. (keV)	Intensity ratio at 0° (present work)	Nomen-clature	Angular distribution	Approximate relative intensity
$Li^7(p,\gamma)Be^8$	"14.8" $14.35+\frac{7}{8}E_p$. "17.6" $17.25+\frac{7}{8}E_p$.	Vacuum evaporation of natural lithium	Thick	450--550	17.6 : 14.8 / 1.94 ± 0.1	Lithium "resonance radiation"	Both isotropic	100
			150—200 keV	800—900	≈0.53	Lithium "non-resonance radiation"	Both anisotropic	6
$B^{11}(p,\gamma)C^{12}$	"12.2" $11.53+\frac{11}{12}E_p$. "16.7" $15.96+\frac{11}{12}E_p$.	Evaporation of slurry of boron in alcohol	1 mg/cm²	660	12.2 : 16.7 / 5.62 ± 0.1		Both anisotropic	5
				900	2.76±0.05		Both anisotropic	8

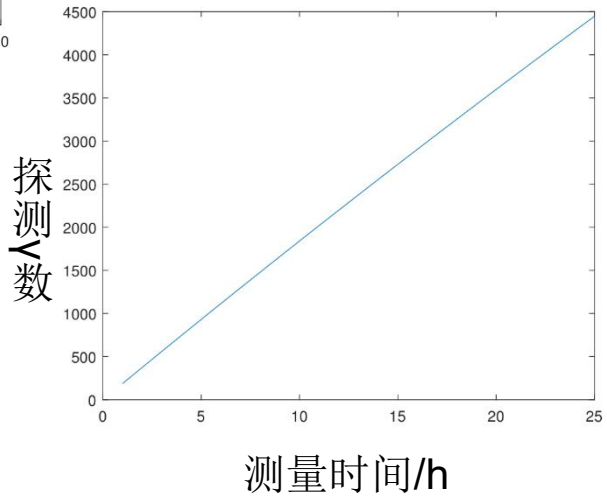
共振： 17.6MeV：14.8MeV=**2：1**

非共振： 14.8MeV：17.6MeV=**2：1**

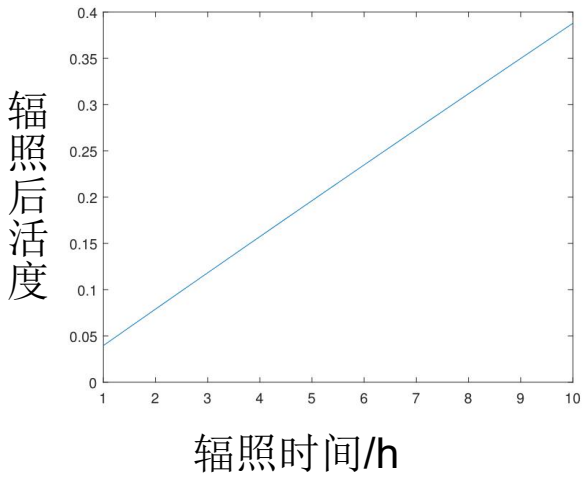
Nuclear Physics 23 (1961) 468--480;

2、相对强度法

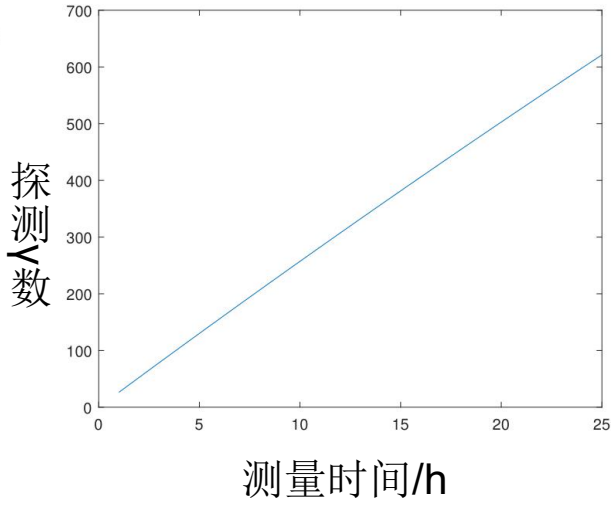




14.8MeV

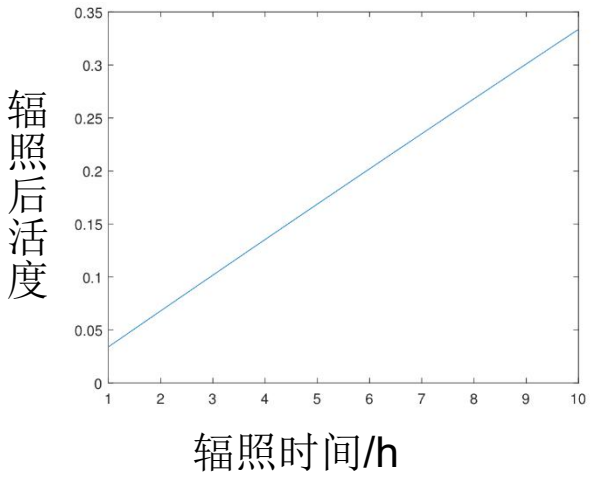


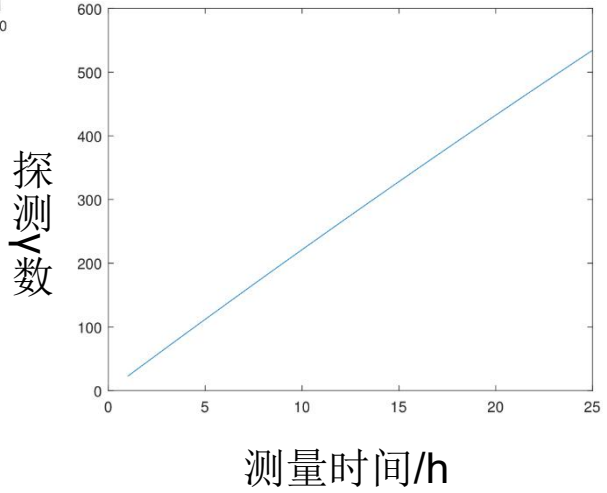
17.6MeV



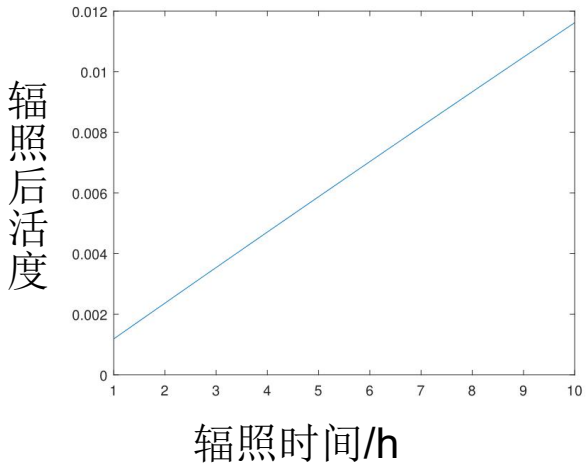
共振 镀靶 放置时间：3h

2、相对强度法

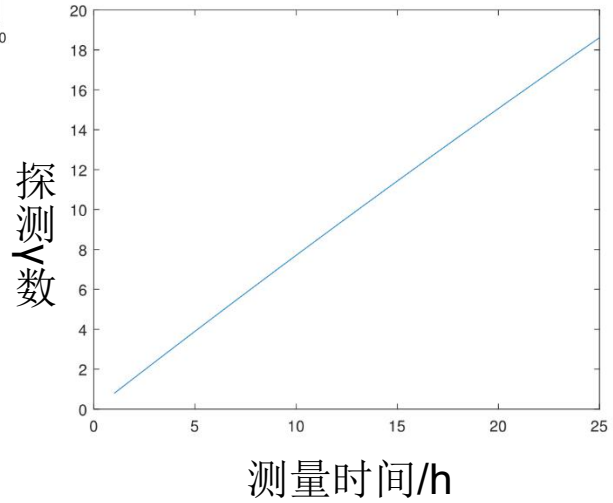




14.8MeV



17.6MeV



非共振 镀靶 放置时间：3h

其它展望

- 开展强流质子加速器方面的研究以获得有竞争力的单能伽玛射线源。
- 开发新型伽玛探测器以测量高能量伽玛射线，比如9.17 MeV伽玛射线可以通过掺杂14N的液体闪烁体探测器进行测量。
- 建立基于9.17 MeV共振吸收爆炸物检测方法的集装箱、车辆检测系统，并加入成像系统。
- 深入研究核反应伽玛源在核共振荧光中的应用。

感谢聆听！

请各位老师批评指正！

中国原子能科学研究院
中核集团