

The 5st workshop on applications of high energy circular electron-positron collider (CEPC) synchrotron radiation source

中国东莞，2021年4月23日



南 华 大 学
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

Photonuclear studies using high-intensity gamma-ray source

罗 文

南华大学核科学技术学院，421001，中国衡阳

Email address: wen.luo@usc.edu.cn

USC

University of South China



Main collaborators



南 華 大 学
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA



南 華 大 学
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

朱志超、蓝浩洋、潘琬婷、孙向阳、颜卓鑫、
曹宗威、樊文茹、张景丽、王冠霖 等



北京大學
PEKING UNIVERSITY

颜学庆，马文君，徐智怡



中国工程物理研究院
CHINA ACADEMY OF ENGINEERING PHYSICS

吴玉迟，张智猛，齐伟，杨月 等

中国科学院上海高等研究院
SHANGHAI ADVANCED RESEARCH INSTITUTE, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

范功涛



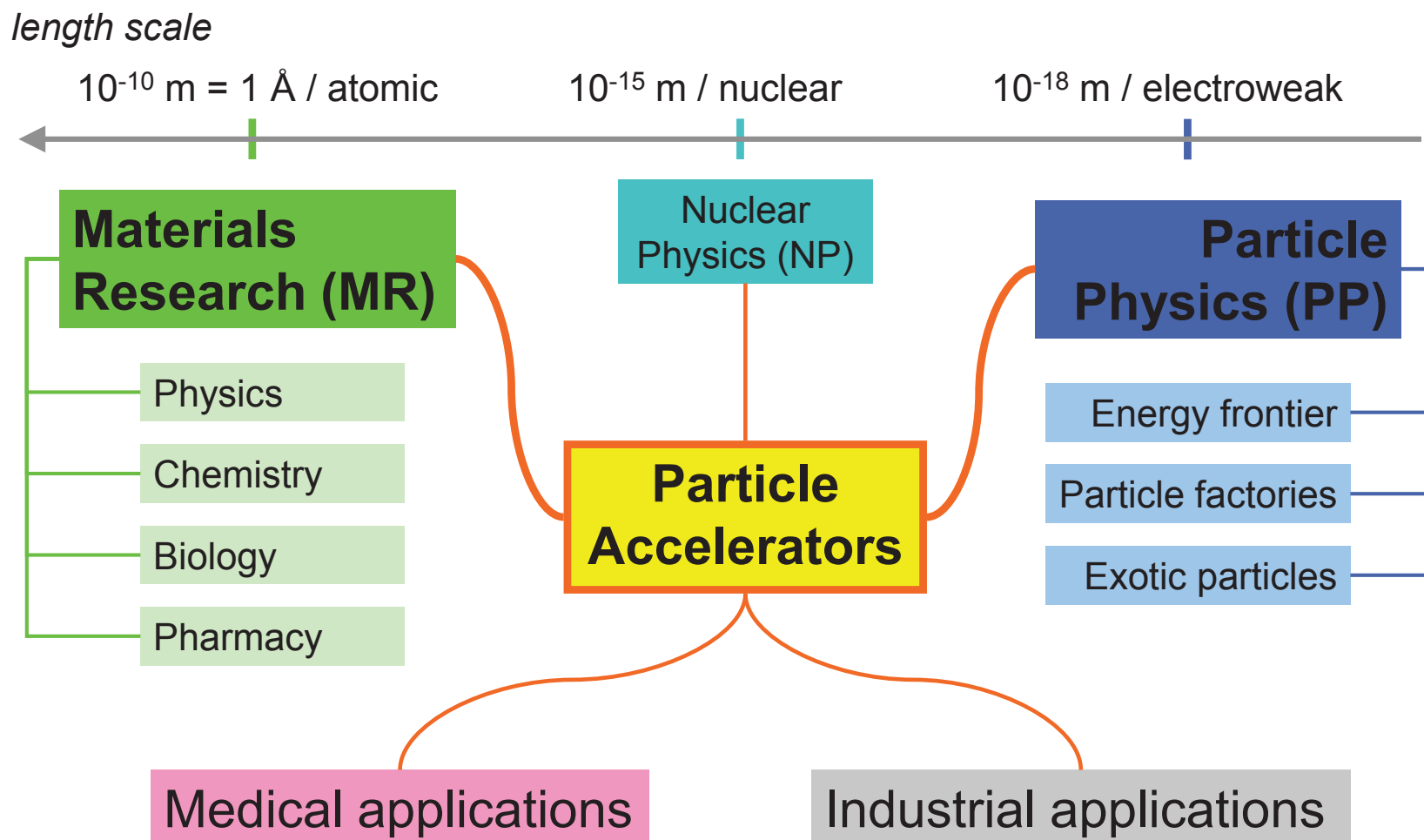
徐毅、D. Filipescu、D. L. Balabanski



Outline

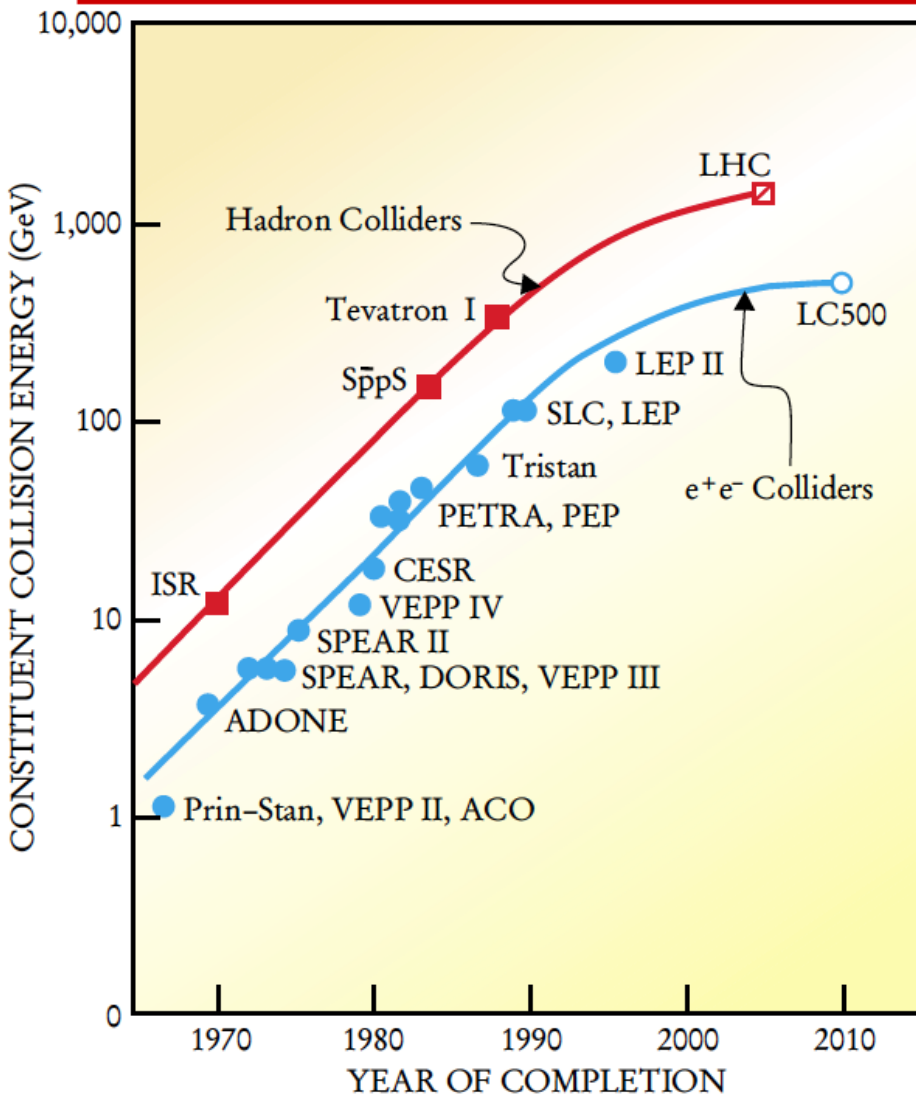
- ❖ 研究背景与动机
- ❖ 伽玛光核物理及应用研究
 - 1. 光致蜕变反应
 - 2. 伽马光致激发
 - 3. 核材料和化学品识别
 - 4. 医用同位素产生
- ❖ 小结与展望

加速器推动着人类文明进步，20世纪近半数的诺贝尔物理和化学奖与粒子加速及其应用有关！





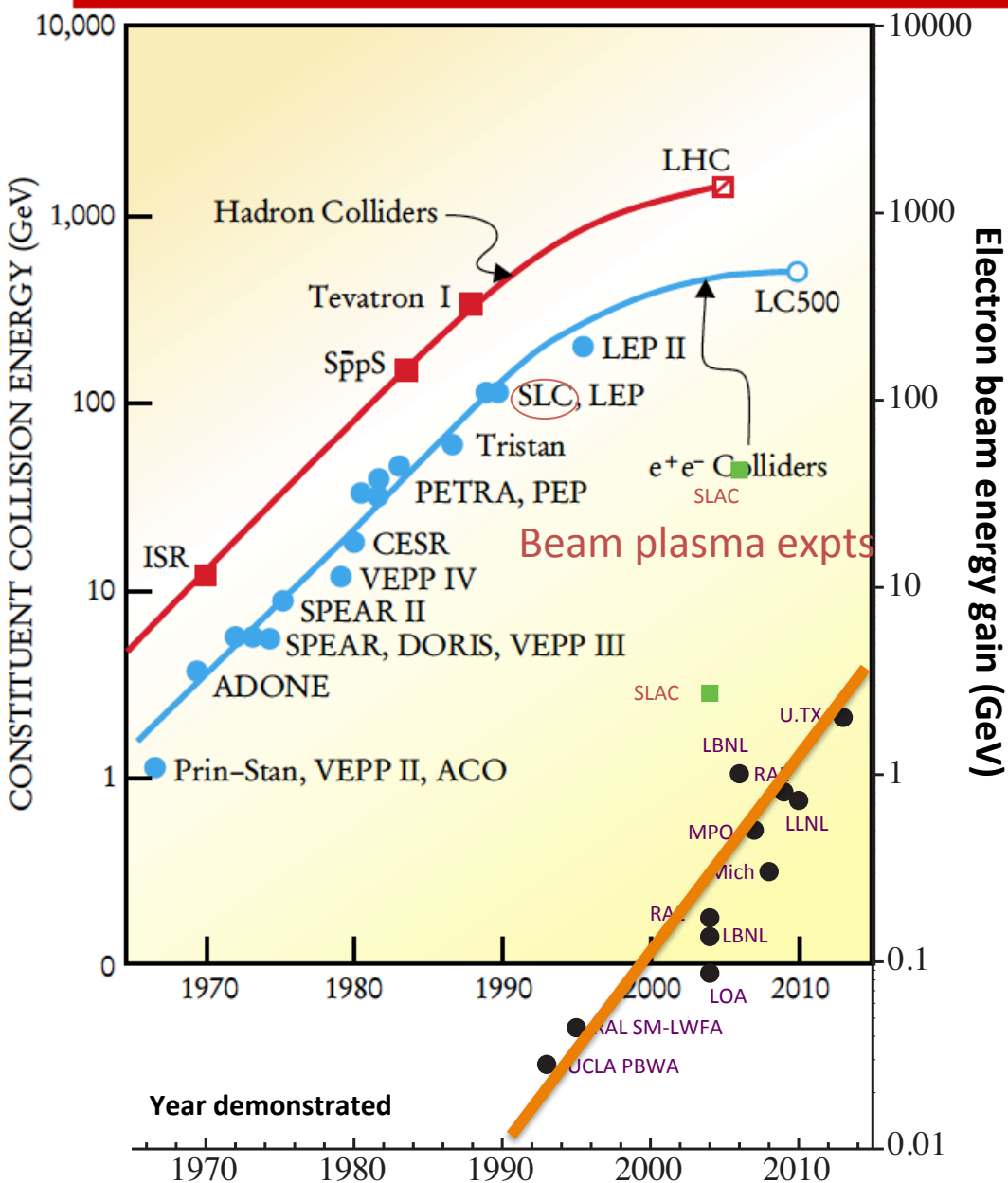
研究背景与动机——加速器的发展历史与新革命



- “Livingston Plot” 常规加速器能量增长趋向饱和
 - 常规加速器技术的现实极限 (RF 金属结构)
 - 加速梯度局限于材料损伤阈值
 - 比如, X频段 100 MV/m
- 最大的成本驱动是加速
 - **~50 MV/m 意味着 ~20 km/TeV**
 - 装置成本随尺寸 (功率消耗) 近似线性增长
- 未来的TeV直线对撞机是一个宏大甚至超宏大的工程
 - 加速器新技术或新方案能否成功降低装置尺寸和成本, 用于未来的粒子对撞机?
 - 要求加速梯度 > 数量级的提升: >GV/m



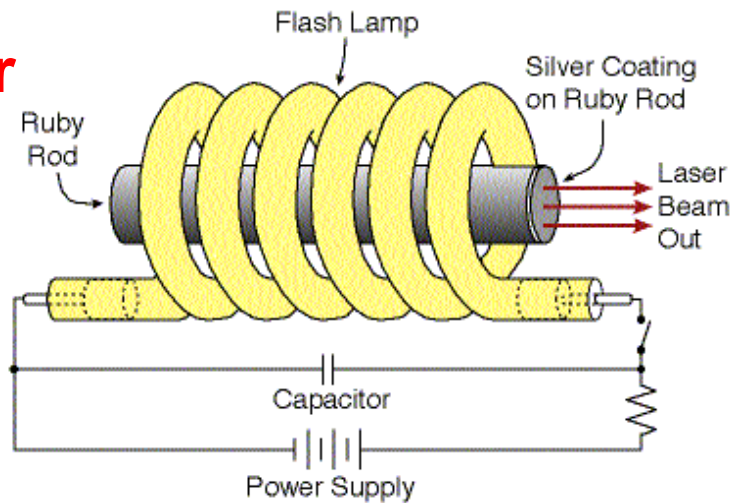
研究背景与动机——加速器的发展历史与新革命



- 超高梯度要求加速介质忍受高的场强：
 - 电介质结构（损伤阈值上限） $\sim 1 \text{ GV/m}$
 - 等离子体（“已经被损伤”） $\sim 10 \text{ GV/m}$
- 高梯度要求高的峰值功率：
 - 激光驱动
 - 粒子束驱动
- 国际上非常重视先进加速器的研究&开发，以及在探索新原理方面付出了 ~ 30 年的努力。
- 关键进展：
 - 激光等离子体加速
 - 最新纪录： $\sim 8 \text{ GeV}$ in 2019
 - 发展激光技术用于高功率传输

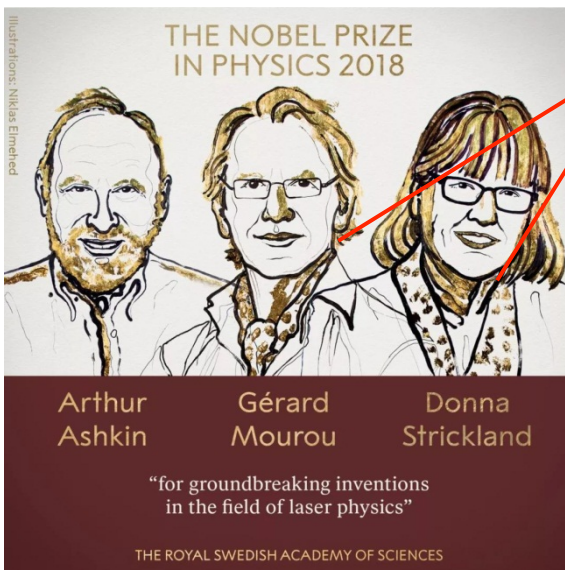
研究背景与动机——超强超短激光技术及应用

First Laser



Maiman (1960)

Ruby Laser

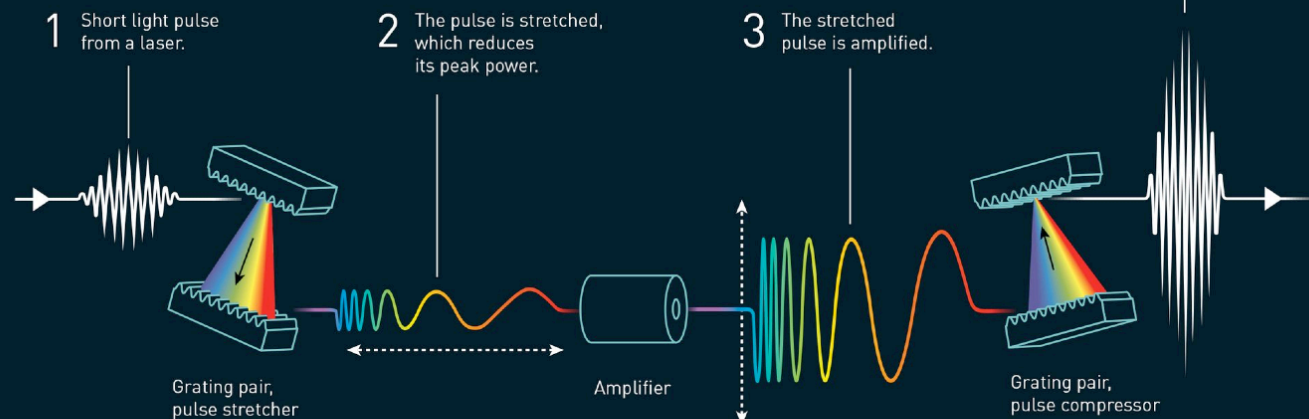


Nobel Prize 2018

CPA - chirped pulse amplification

1985年发明

4 The pulse is compressed and its intensity increases dramatically.



研究背景与动机——超强超短激光技术及应用



南 華 大 學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

欧盟极端强光装置 (ELI) 3个10拍瓦激光装置平台



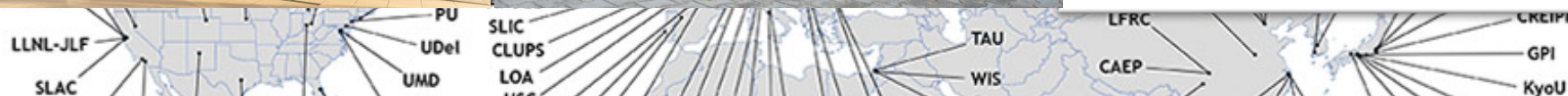
罗马尼亚ELI-NP 10.9拍瓦



韩国光州GIST 4拍瓦



1 PW, 4PW laser laboratory



ELI-ALPS: 阿秒物理 (匈牙利赛格德)

ELI-NP: 核物理、强场物理 (罗马尼亚布加勒斯特, 2×10 PW, 10^{22}Wcm^{-2})

ELI-BL: 激光加速、强场物理 (捷克布拉格)

全世界现有 ~ 50套拍瓦级强激光装置，
美国、日本、俄罗斯 正在构思百拍瓦的极强激光装置。

上海超强超短激光实验装置 (SULF)

中物院OPCPA数拍瓦激光装置



中国的百拍瓦激光设施

2017年立项：极端光物理线站SEL:SHINE

100 PW Laser@800nm+XFEL@1nm, $I > 10^{23} \text{ Wcm}^{-2}$

2019年底：建成用户装置

(重大科技基础设施项目)

上海浦东

2018年底：300焦，30飞秒；

基本建成

能量：168.7焦（压缩前），

91.1焦（压缩后）

■ 激光脉宽：平均18.6飞秒

■ 峰值功率：4.9 拍瓦

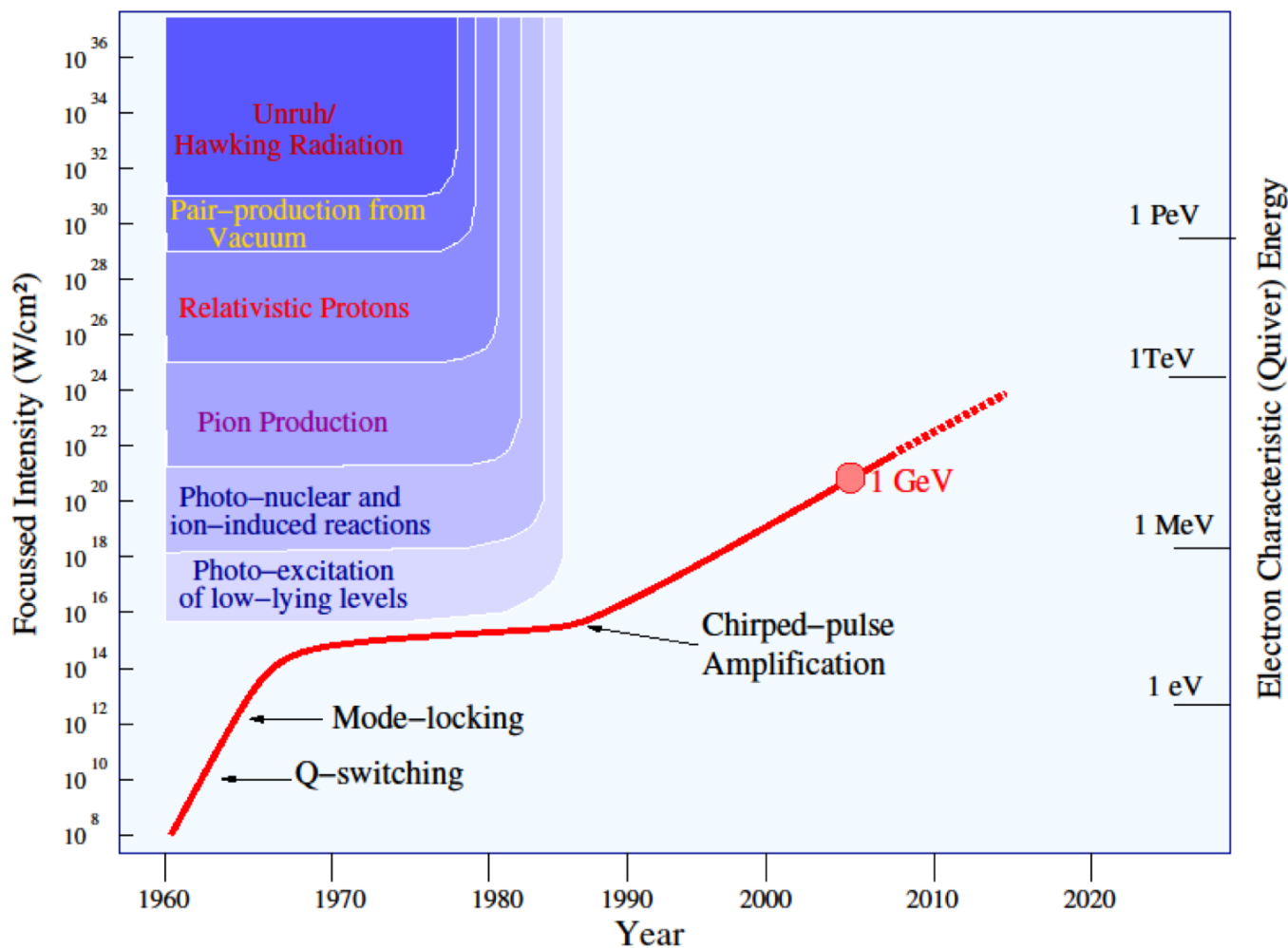
■ 信噪比：优于 10^{-10}

2017年10月：实现10拍瓦放大输出，
是目前人类能掌握的最高功率光源

2016年8月：实现5拍瓦放大输出

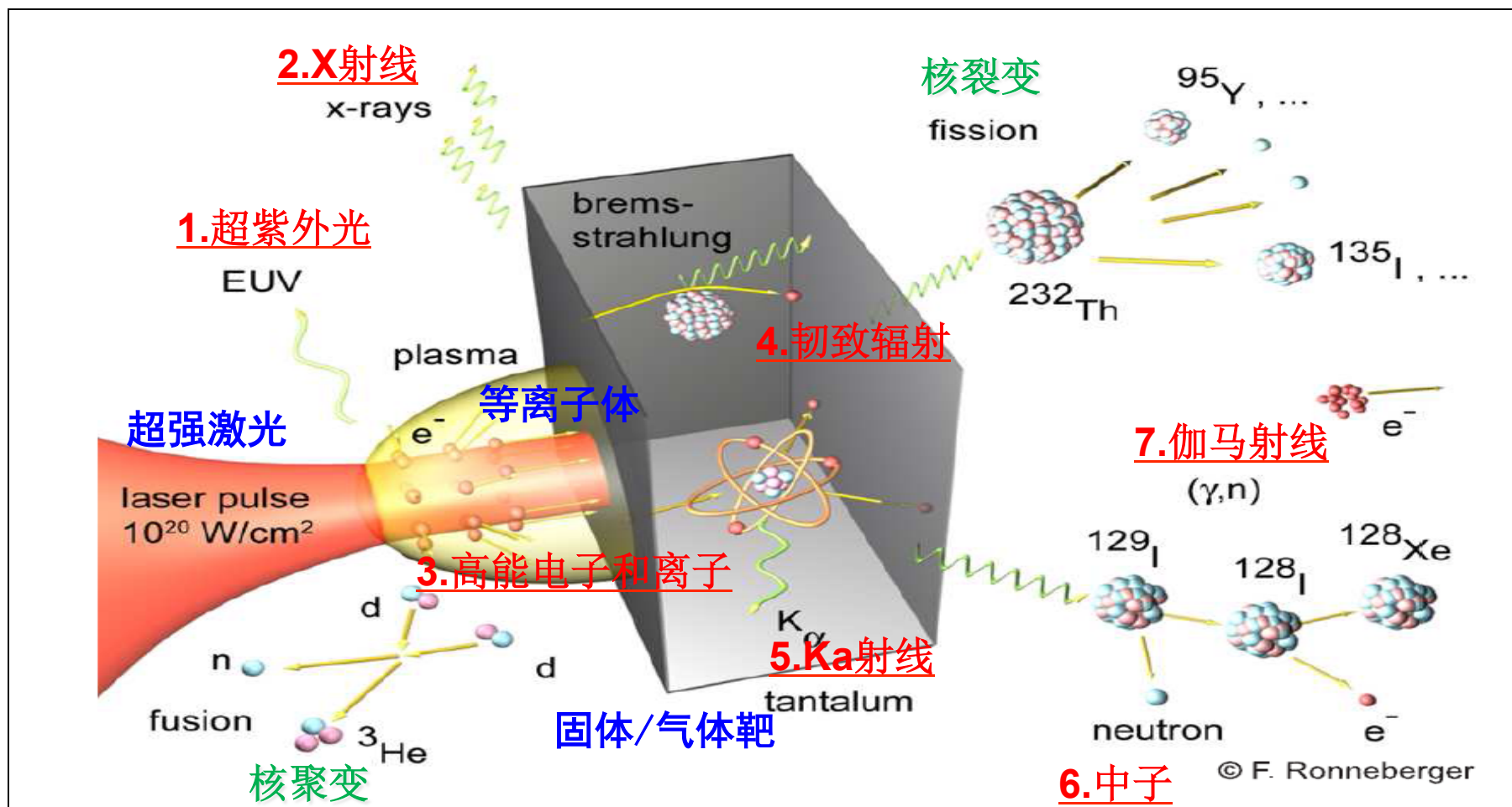


研究背景与动机——超强超短激光技术及应用



- 已建或在建的一批超强超短激光装置和伽马光源装置，包括**ELI-NP**, **XCELS**, **CLF Vulcan**, 上海超强超快激光装置, **SLEGS**等，为重新审视高品质伽马束产生以及光核研究提供了崭新的窗口期。

高度非线性的物理过程，蕴含着丰富的物理现象！



Photonuclear Physics when a Multiterawatt Laser Pulse Interacts with Solid Targets

K. W. D. Ledingham,¹ I. Spencer,¹ T. McCanny,¹ R. P. Singhal,¹ M. I. K. Santala,² E. Clark,² I. Watts,² F. N. Beg,² M. Zepf,² K. Krushelnick,² M. Tatarakis,² A. E. Dangor,² P. A. Norreys,³ R. Allott,³ D. Neely,³ R. J. Clark,³ A. C. Machacek,⁴ J. S. Wark,⁴ A. J. Cresswell,⁵ D. C. W. Sanderson,⁵ and J. Magill⁶

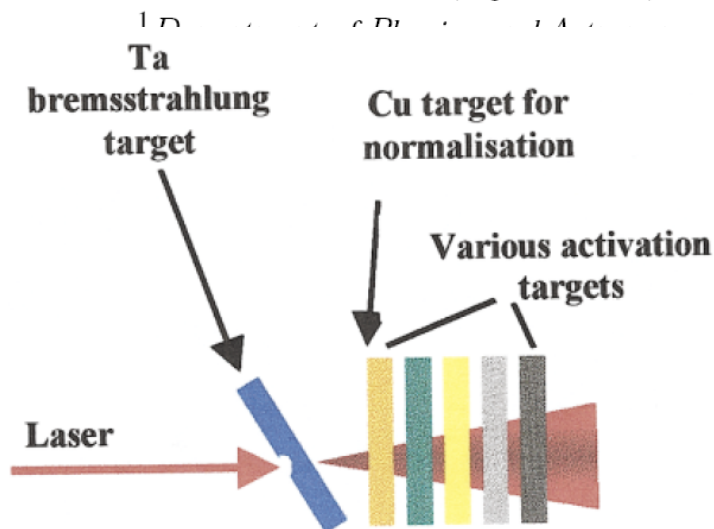


FIG. 1 (color). The arrangement for irradiating a number of different targets simultaneously. All samples had dimensions $\sim 10 \times 10 \times 3$ mm. The copper target was used for normalization of activities.

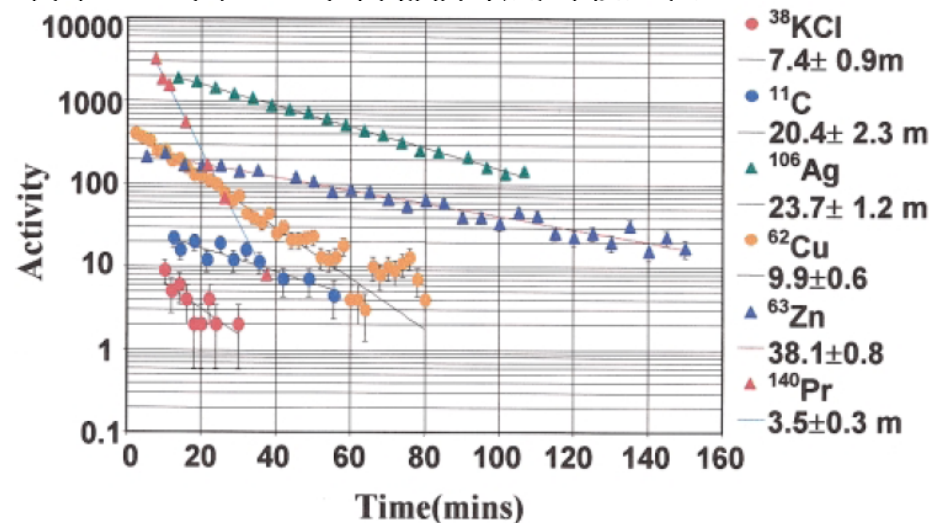
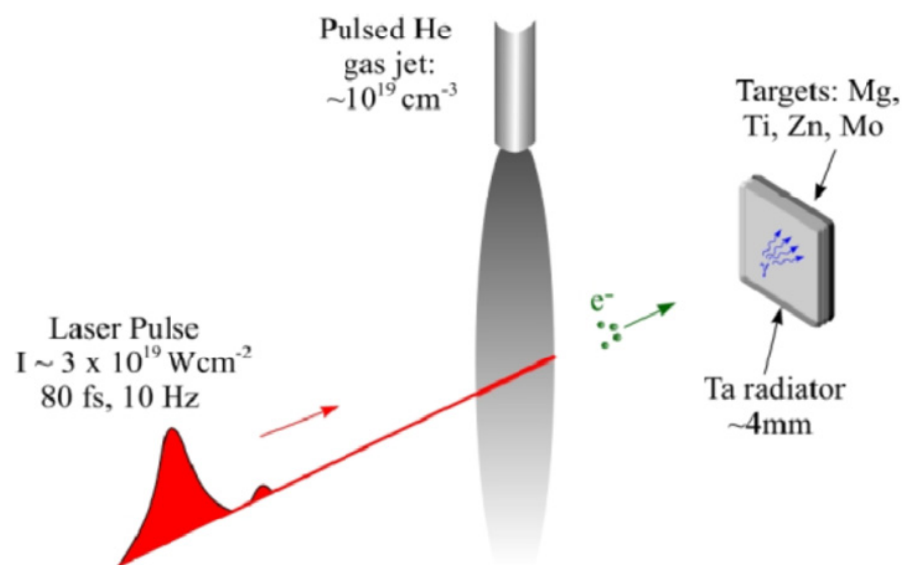
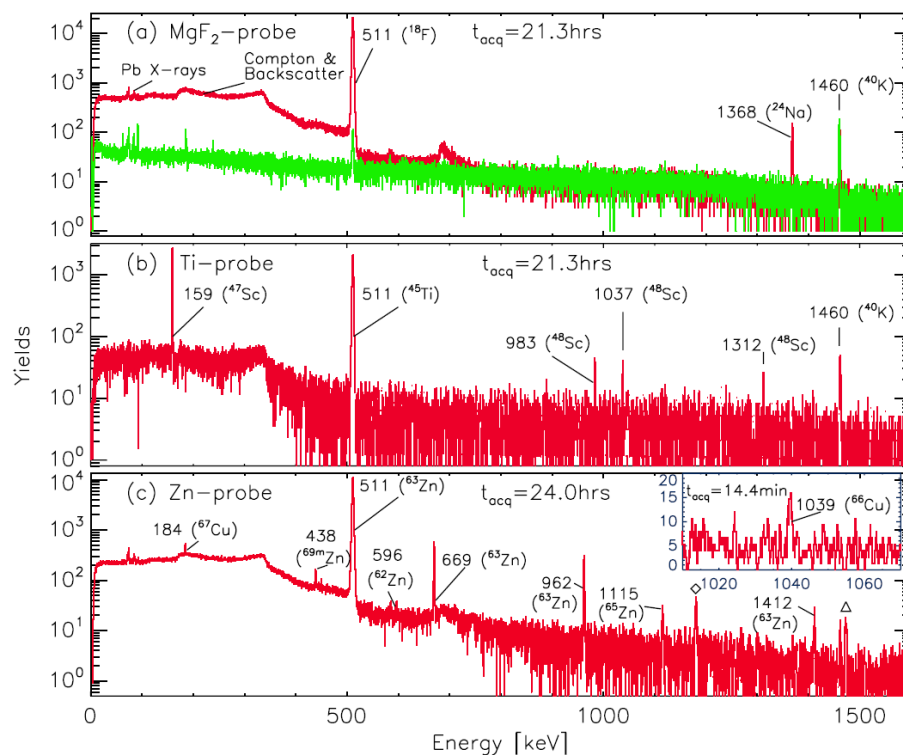


FIG. 3 (color). The activities of the isotopes listed in text as a function of time. The measured half-lives agree well with the accepted values.

利用激光加速电子束开展光核活化研究



基于激光加速电子的光核活化实验
示意图



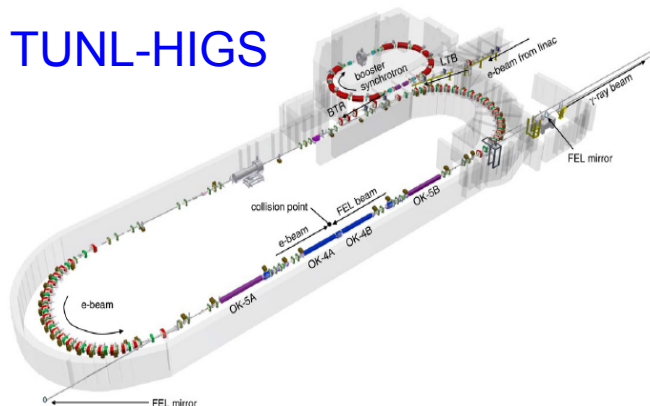
几种典型靶材的光核活化谱，5000发
激光脉冲，测量时间21.3小时

激光器与常规加速器的完美结合：激光康普顿散射(LCS)光源

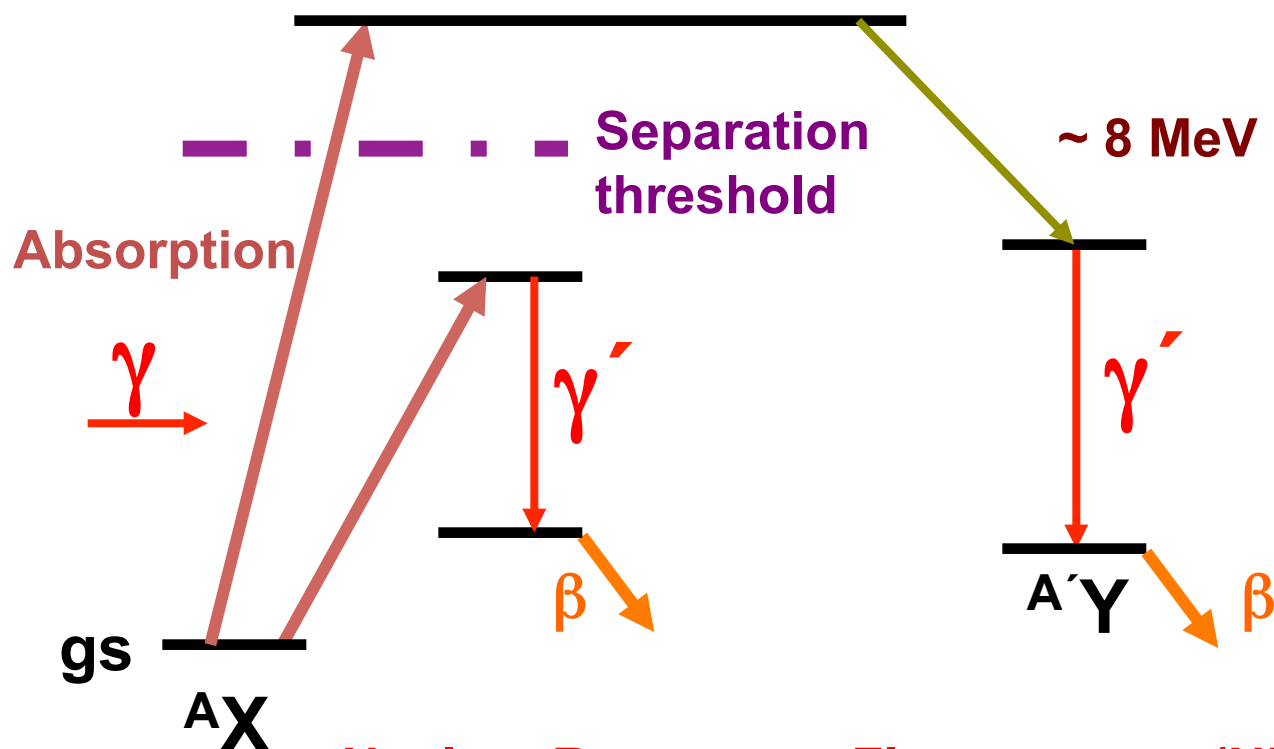
LCS光源具有准直、准单能、能量可调且覆盖范围广等特点

Beamline name	SSRF-SLEGS (China)	TUNL-HIGS (USA)	UVSOR-II (Japan)	ELI-NP (Romania)	NewSUBARU (Japan)	Spring-8 LEPSII (Japan)
Energy region (MeV)	0.4-20	2-100 (158)	<6.6	1-19.5	1.7-73	1500-2900 1500-2400
Resolution ($\Delta E/E$)	<5%	0.8-10%	—	0.5%	—	<0.5%
Flux (phs/s)	0.2×10^5 - 10^7	10^8	$>10^7$	$10^{12\sim 13}$	10^6	10^6 - 10^7
Status	2022	running	running	Late 2022	running	running

TUNL-HIGS



光 核 反 应



Nuclear Resonance Fluorescence (NRF)

Photoactivation

Photodesintegration (-activation)

Photofission

γ beam revolution of nuclear physics: similar to **laser** revolution of atomic physics in '60s

γ rays: opens new nuclear physics

- measurement of neutron cross section of rare nuclei by inverse process (γ , n)
- nuclear resonance fluorescence and spectroscopy
- particular excitation
 - *nuclear electroweak excitation such as parity measurement
 - *isomer creation
 - *particular excitation and interaction with inner-shell electrons
- manipulation of nuclei by more than one gamma pulse
 - *consecutive excitation to higher levels
 - *exploration of exotic nuclear states?
 - *quantum control of nuclear states

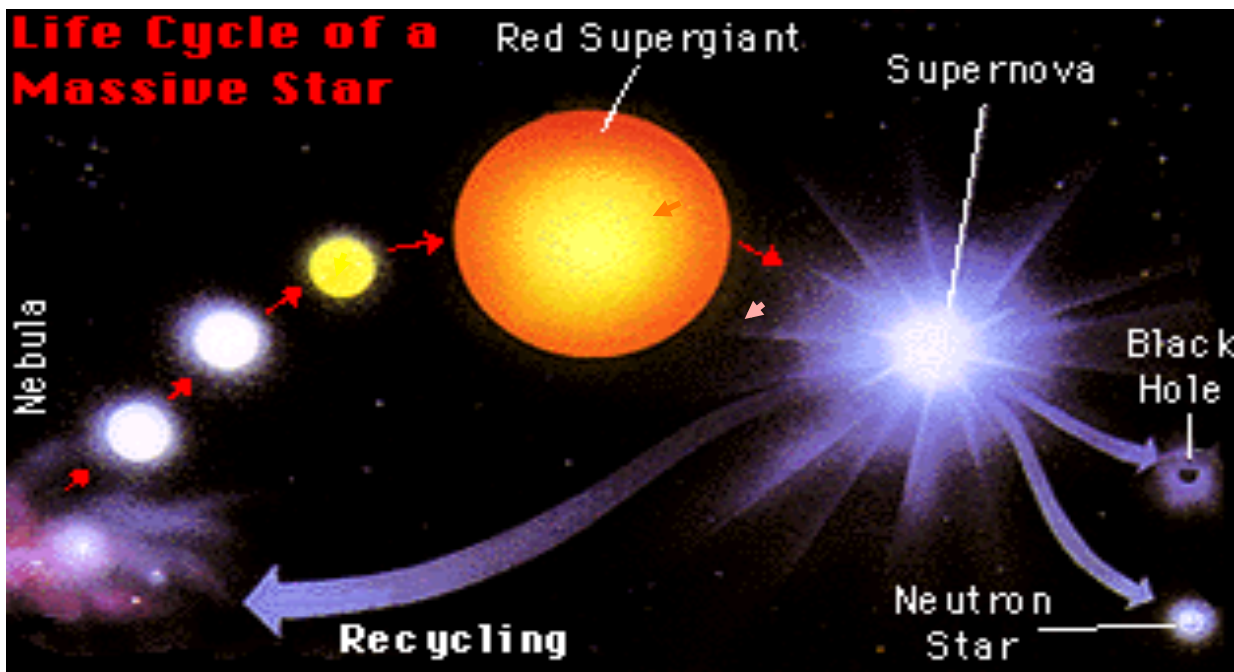
γ beam revolution of nuclear physics: similar to **laser revolution of atomic physics in '60s**

γ rays: opens new nuclear physics (continued)

- polarized positrons
- non-contact and fast detection of nuclear materials
- monitoring of nuclear reprocessing
- transmutation of nuclei with small neutron cross section
- materials research with nuclear resonance, Moessbauer
- cold neutron beam generation, etc. etc.

Dawn of **Photonuclear Physics: similar to the eve of the **laser invention**, spawning new atomic physics**

□ 核反应过程决定了恒星燃烧阶段的演化寿命

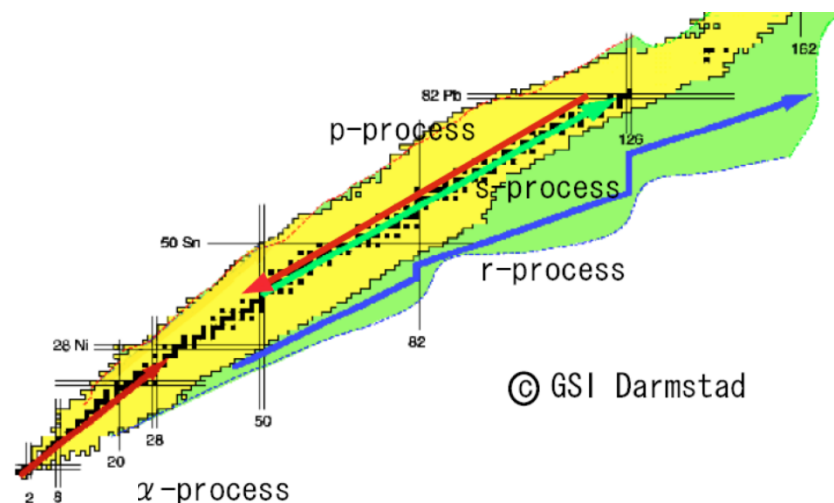
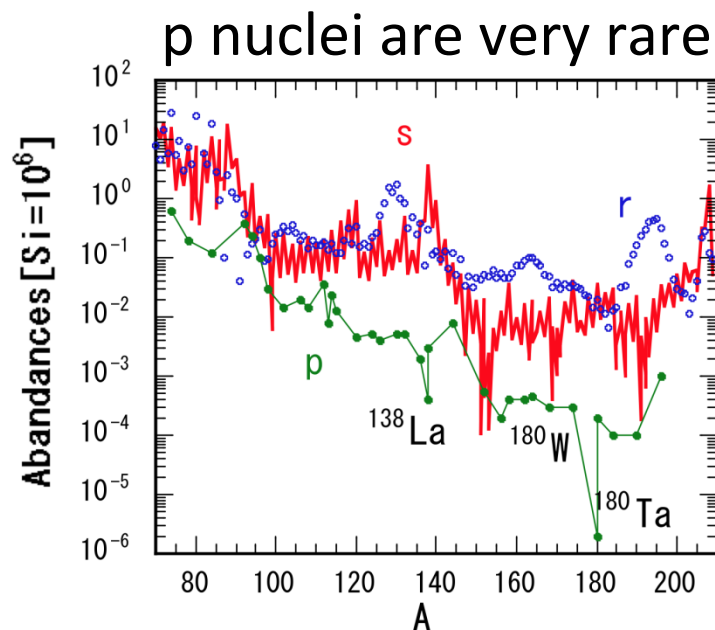


□ 核反应过程决定了恒星爆炸的能量释放尺度

总之，核反应是恒星演化和爆炸的引擎！

核天体物理中的光核过程

- Nuclear astrophysics - the prediction of radiative neutron capture cross sections for short-lived radioactive nuclei that are difficult to measure can be obtained using inverse photoneutron reaction data near threshold
- Abundances of 35 neutron deficient p-nuclides from ^{74}Se to ^{196}Hg not produced in neutron capture chains of s- or r-types could be explained using photonuclear reactions data
- Rare isotope measurements for the p-process nucleosynthesis



© GSI Darmstad

PHYSICAL REVIEW C **98**, 054601 (2018)

光致蜕变反应率的确定：基于高通量的ELI-NP伽玛源的系统 计算和实验提议

Determination of the photodisintegration reaction rates involving charged particles: Systematic calculations and proposed measurements based on the facility for Extreme Light Infrastructure–Nuclear Physics

H. Y. Lan,¹ Y. Xu,^{2,*} W. Luo,^{1,†} D. L. Balabanski,² S. Goriely,³ M. La Cognata,⁴ C. Matei,² A. Anzalone,⁴ S. Chesnevskaya,² G. L. Guardo,² D. Lattuada,² R. G. Pizzone,⁴ S. Romano,^{4,5} C. Spitaleri,^{4,5} A. Taffara,⁴ A. Tumino,^{4,6} and Z. C. Zhu¹

¹*School of Nuclear Science and Technology, University of South China, 421001, Hengyang, China*

²*Extreme Light Infrastructure–Nuclear Physics, RO-077125, Magurele, Romania*

³*Institut d'Astronomie et d'Astrophysique, CP-226, Universite Libre de Bruxelles, 1050, Brussels, Belgium*

⁴*INFN–Laboratori Nazionali del Sud, 95123, Catania, Italy*

⁵*Department of Physics and Astronomy, University of Catania, 95123, Catania, Italy*

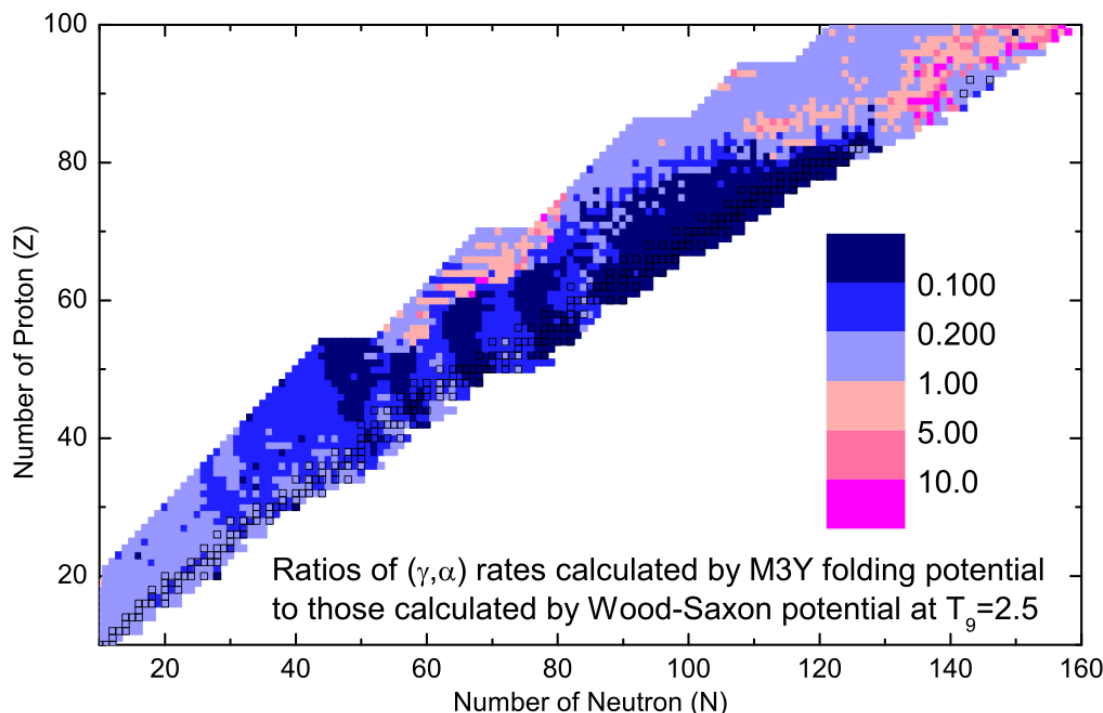
⁶*Kore University, 94100, Enna, Italy*



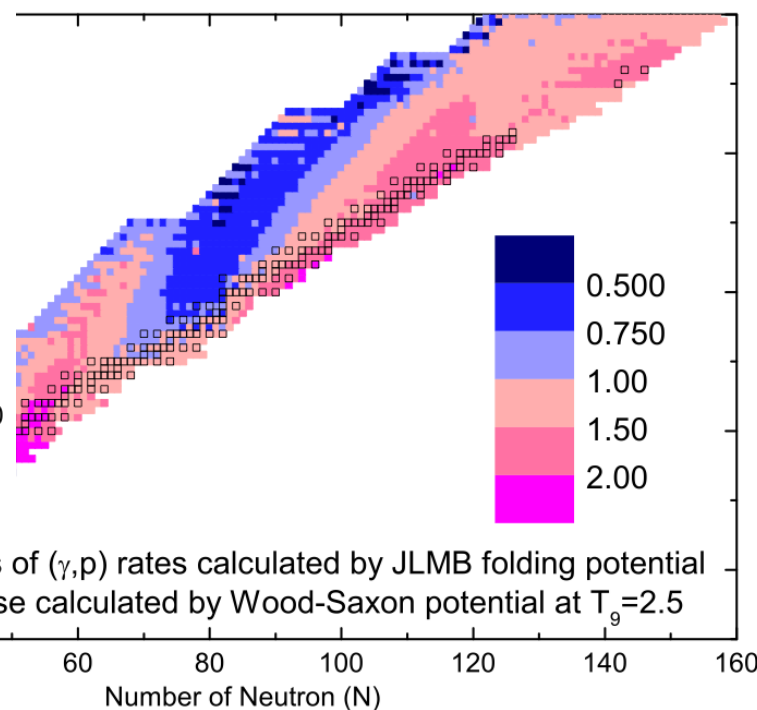
(Received 23 April 2018; revised manuscript received 2 August 2018; published 1 November 2018)

Photodisintegration reaction rates involving charged particles are relevant to the p-process nucleosynthesis that aims at explaining the production of stable neutron-deficient nuclides heavier than iron. In this study, considering the compound and pre-equilibrium reaction mechanisms, the cross sections and astrophysical rates of (γ, p) and (γ, α) reactions for about 3000 target nuclei with $10 \leq Z \leq 100$ ranging from stable to proton dripline

由于光学势对p-核素的 (γ, α) 和 (γ, p) 反应率有显著影响，开展光致蜕变反应截面的实验测量，对带电粒子光学势进行约束，这将有利于降低p-核素合成反应率的不确定性！

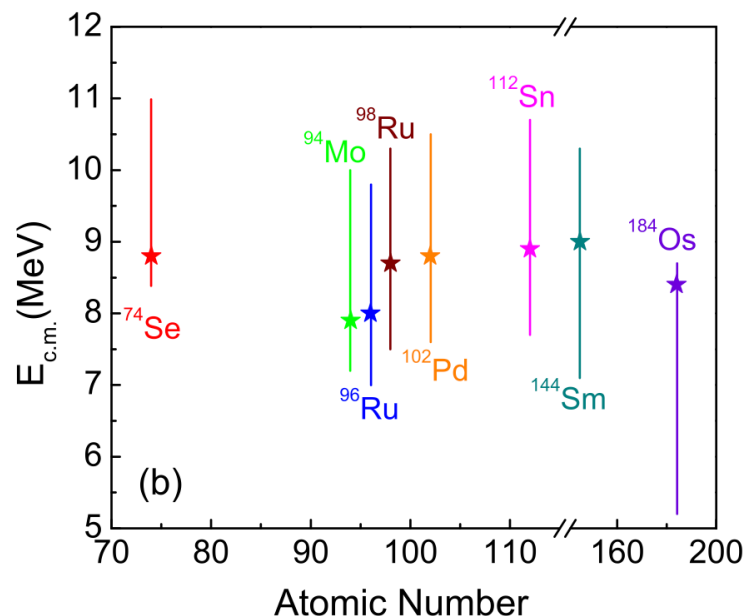
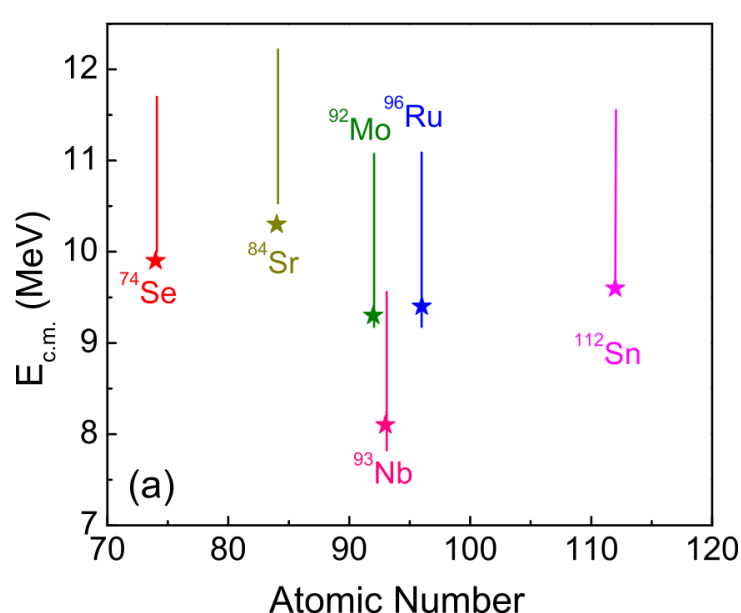


对于 $40 < Z < 80$ 的丰质子核素，不同光学势下的 (γ, α) 反应率差异高达一个数量级！



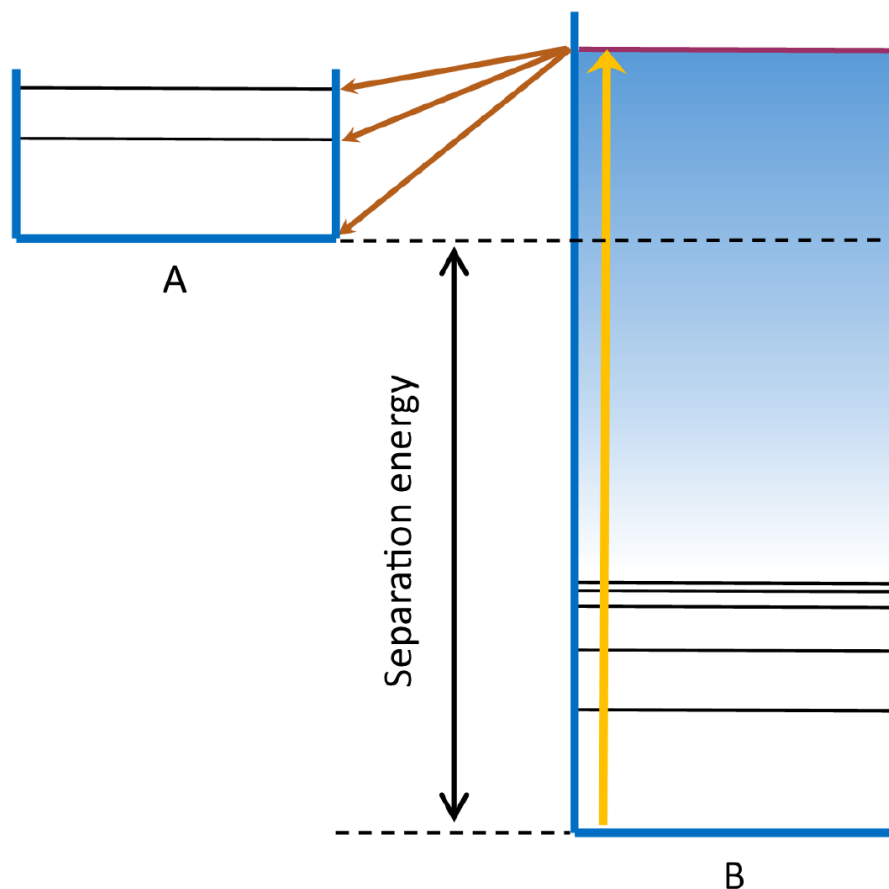
开展~3000个稳定核素和丰质子核素的模拟计算

利用高通量的ELI-NP伽玛源和高分辨率的带电粒子探测器阵列，有望在Gamow窗区开展p-核素的光致蜕变截面直接测量。



伽玛光流强 10^{11} /秒，辐照1天的计算结果（线条区域指Gamow能区，星号指探测能量下限）

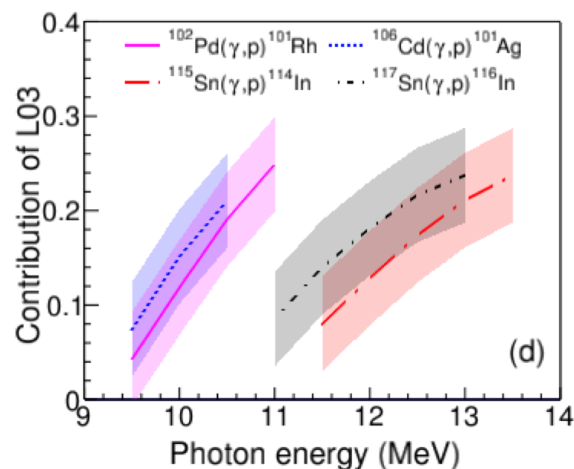
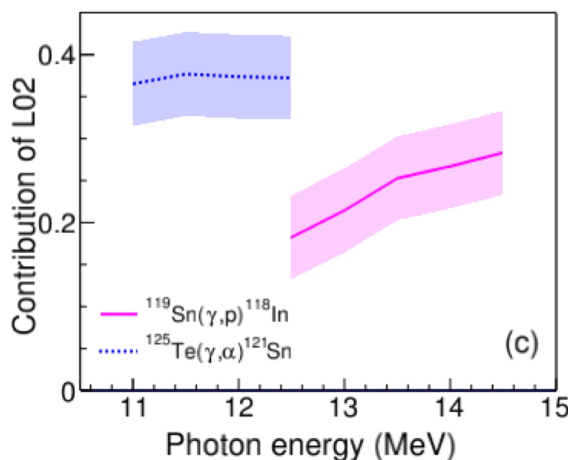
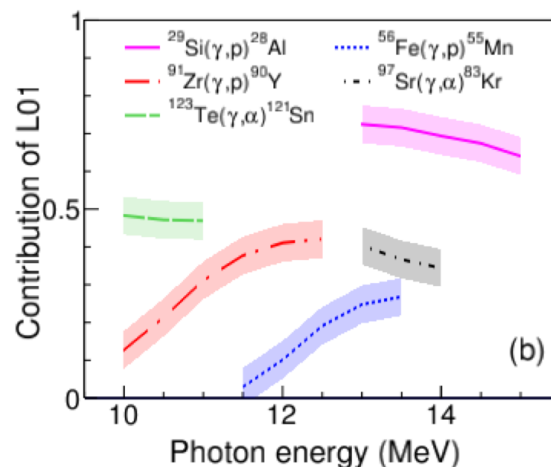
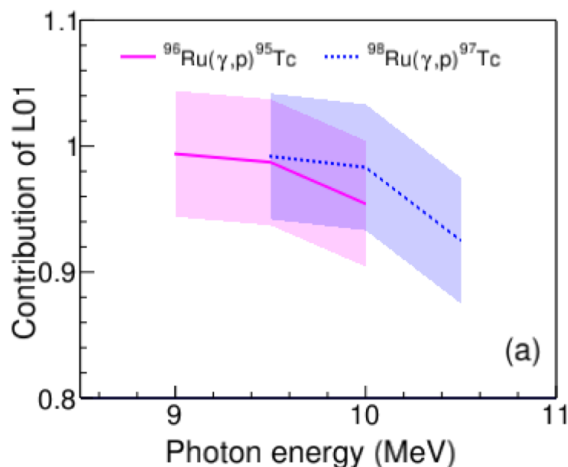
天体环境中辐射俘获反应和光致蜕变反应不仅来自于核的基态，还很可能来自于核的激发态。开展核激发态对天体反应率的贡献研究有助于我们更好的理解天体p-核素的合成！



光致蜕变实验可以探测粒子发射
跃迁到核基态或激发态的情形

核激发态对天体反应率的贡献

部分核激发态的产生截面非常显著（相对于基态），这是基于**ELI-NP**高强度康普顿伽马光源的模拟结果





伽玛光核物理及应用研究——光致蜕变反应

核激发态对天体反应率的贡献

可以区分的反应道（其贡献超过90%）

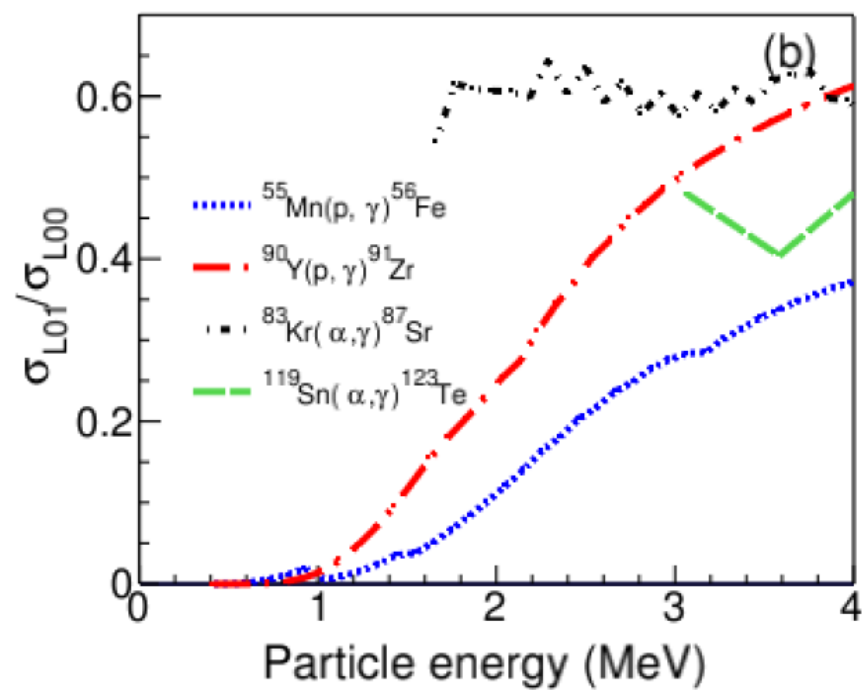
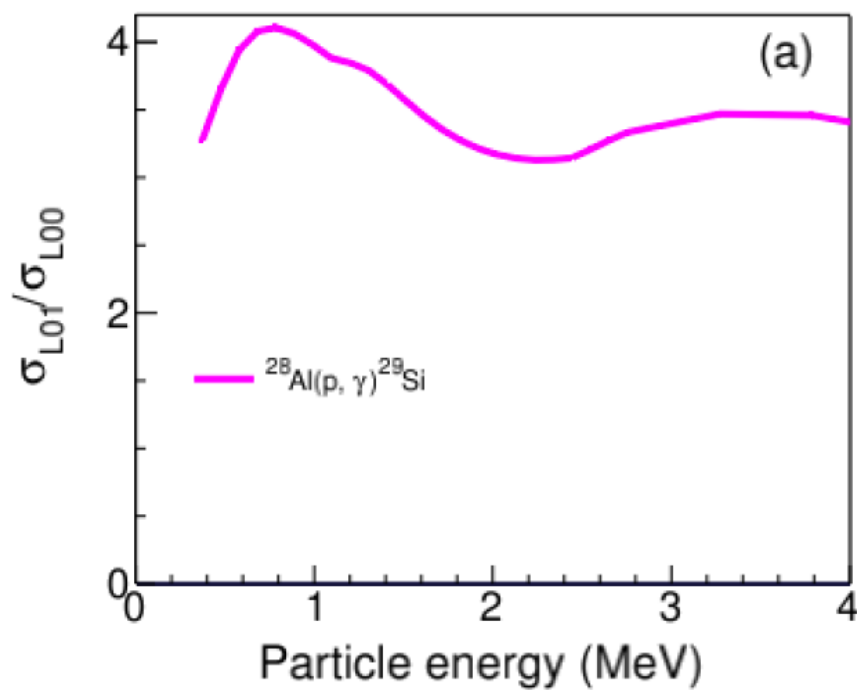
Reaction	Discriminable channels	E_γ (MeV)	Contribution (%)
$^{96}\text{Ru}(\gamma, p_i)^{95}\text{Tc}$	(γ, p_1)	9.0 – 10.0	95.4 – 99.4
$^{98}\text{Ru}(\gamma, p_i)^{97}\text{Tc}$	(γ, p_1)	9.5 – 10.5	92.5 – 99.2
$^{56}\text{Fe}(\gamma, p_i)^{55}\text{Mn}$	$(\gamma, p_5) + (\gamma, p_6)$	14.0 – 14.5	95.5 – 98.8 *
$^{96}\text{Ru}(\gamma, p_i)^{95}\text{Tc}$	$(\gamma, p_1) + (\gamma, p_4)$	10.5 – 11.5	90.0 – 96.6
$^{29}\text{Si}(\gamma, p_i)^{28}\text{Al}$	$(\gamma, p_0) + (\gamma, p_1)$	13.0 – 15.0	91.5 – 100 *
$^{56}\text{Fe}(\gamma, p_i)^{55}\text{Mn}$	$(\gamma, p_0) + (\gamma, p_1)$	11.5 – 13.5	92.9 – 100 *
$^{91}\text{Zr}(\gamma, p_i)^{90}\text{Y}$	$(\gamma, p_0) + (\gamma, p_1)$	10.0 – 12.5	94.9 – 100
$^{87}\text{Sr}(\gamma, \alpha_i)^{83}\text{Kr}$	$(\gamma, \alpha_0) + (\gamma, \alpha_1)$	13.0 – 13.5	92.9 – 97.0
$^{123}\text{Te}(\gamma, \alpha_i)^{119}\text{Sn}$	$(\gamma, \alpha_0) + (\gamma, \alpha_1)$	10.0 – 11.5	90.5 – 91.0
$^{119}\text{Sn}(\gamma, p_i)^{118}\text{In}$	$(\gamma, p_0) + (\gamma, p_2)$	12.5 – 14.5	90.0 – 91.0
$^{125}\text{Te}(\gamma, \alpha_i)^{121}\text{Sn}$	$(\gamma, \alpha_0) + (\gamma, \alpha_2)$	11.0 – 12.5	90.0 – 91.3
$^{102}\text{Pd}(\gamma, p_i)^{101}\text{Rh}$	$(\gamma, p_0) + (\gamma, p_3)$	9.5 – 11.0	91.8 – 99.5
$^{106}\text{Cd}(\gamma, p_i)^{105}\text{Ag}$	$(\gamma, p_0) + (\gamma, p_3)$	9.5 – 10.5	90.8 – 98.0
$^{115}\text{Sn}(\gamma, p_i)^{114}\text{In}$	$(\gamma, p_0) + (\gamma, p_3)$	11.0 – 13.0	91.3 – 98.4
$^{117}\text{Sn}(\gamma, p_i)^{116}\text{In}$	$(\gamma, p_0) + (\gamma, p_3)$	11.5 – 14.0	90.8 – 98.9



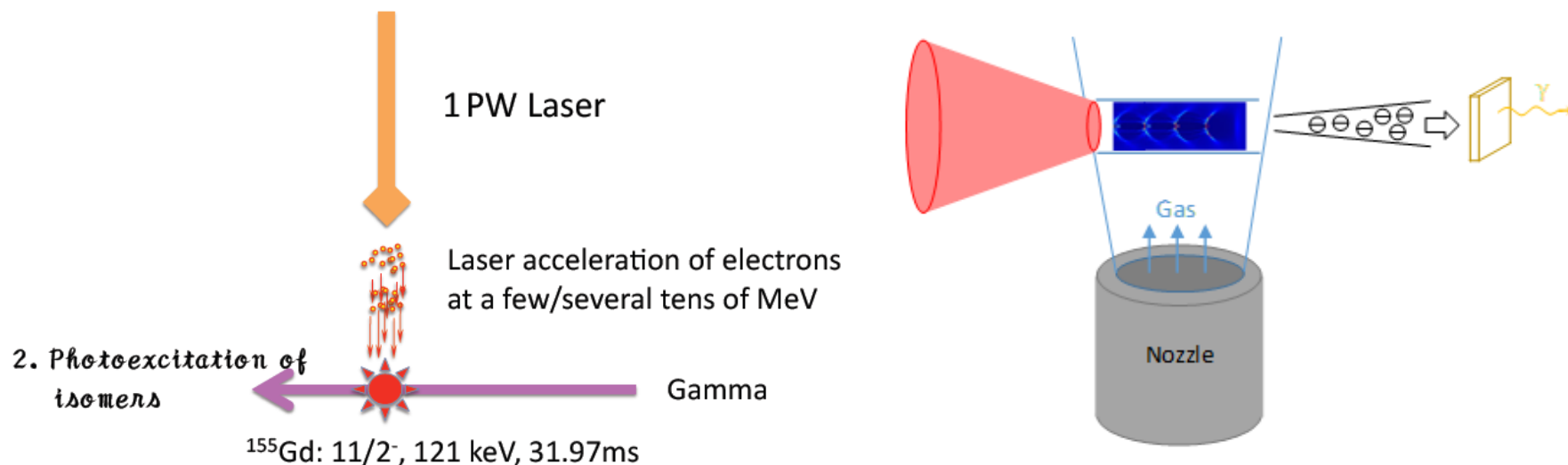
伽玛光核物理及应用研究——光致蜕变反应

核激发态对天体反应率的贡献

进一步推测天体环境中由核激发态贡献的（带电粒子）辐射俘获反应截面



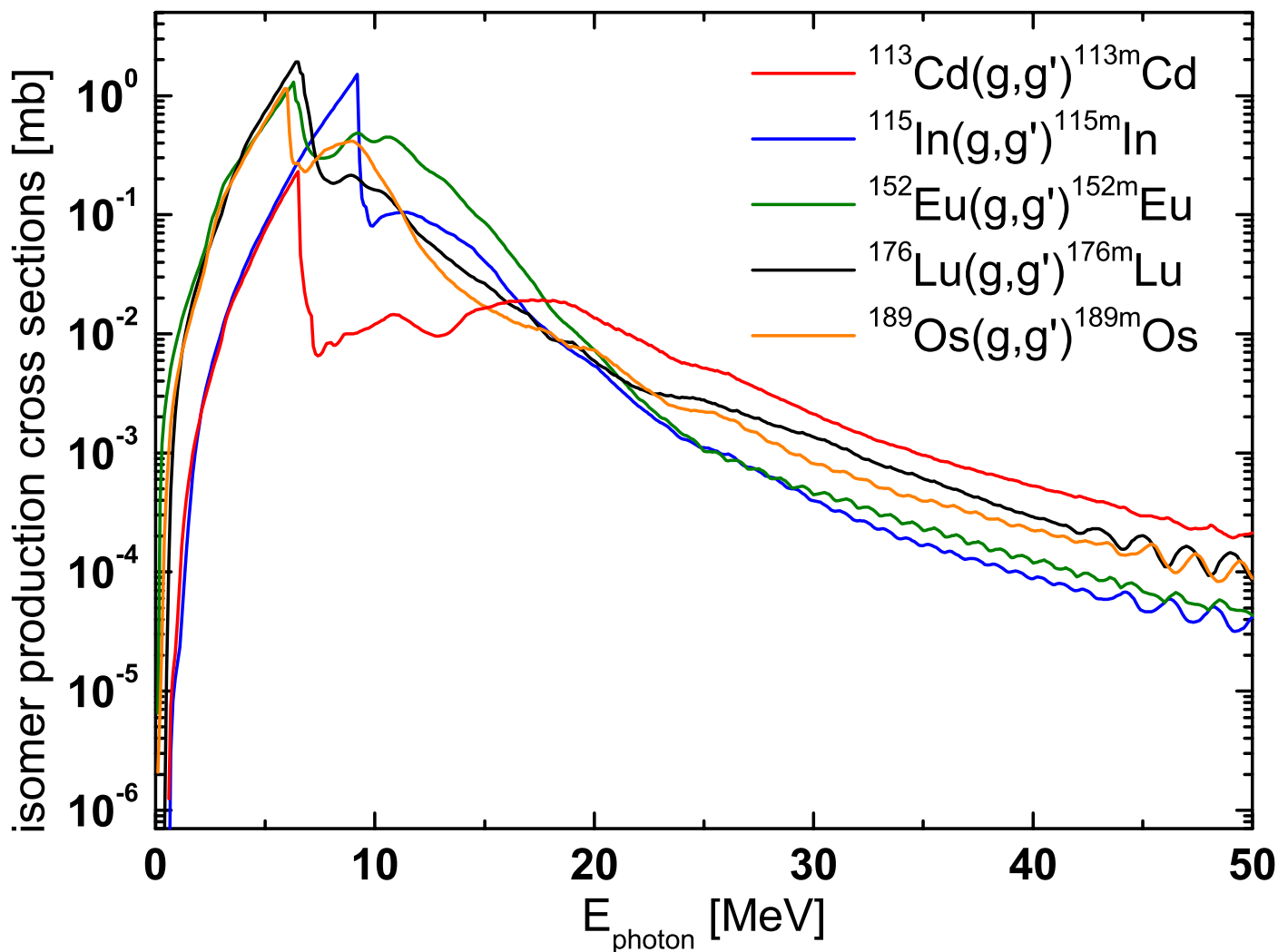
- 在恒星环境中，具有内部区域高达 10^9K 量级的温度，譬如SN-II型超新星，原子核通过热布居可处于各种能级的激发态，相当大的一部分光核过程可能来自于这些核激发态。
- 为精准评估核天体环境中的光核反应率，需要充分考虑作用于激发态的光核反应截面。
- 我们认为利用实验室尺度的高通量伽玛光源开展核天体物理或医用感兴趣的光致激光（同质异能核素）研究，也是一个非常有意义的课题！



ELI-NP上产生同质异能核素的初步方案（见左图）：一束伽玛光（譬如，激光尾场加速电子驱动的轫致辐射伽玛光，见右图）用于激发核进而产生同质异能核素；另一束伽玛光（譬如，LCS伽玛光）用于诱发同质异能核素的光核反应！

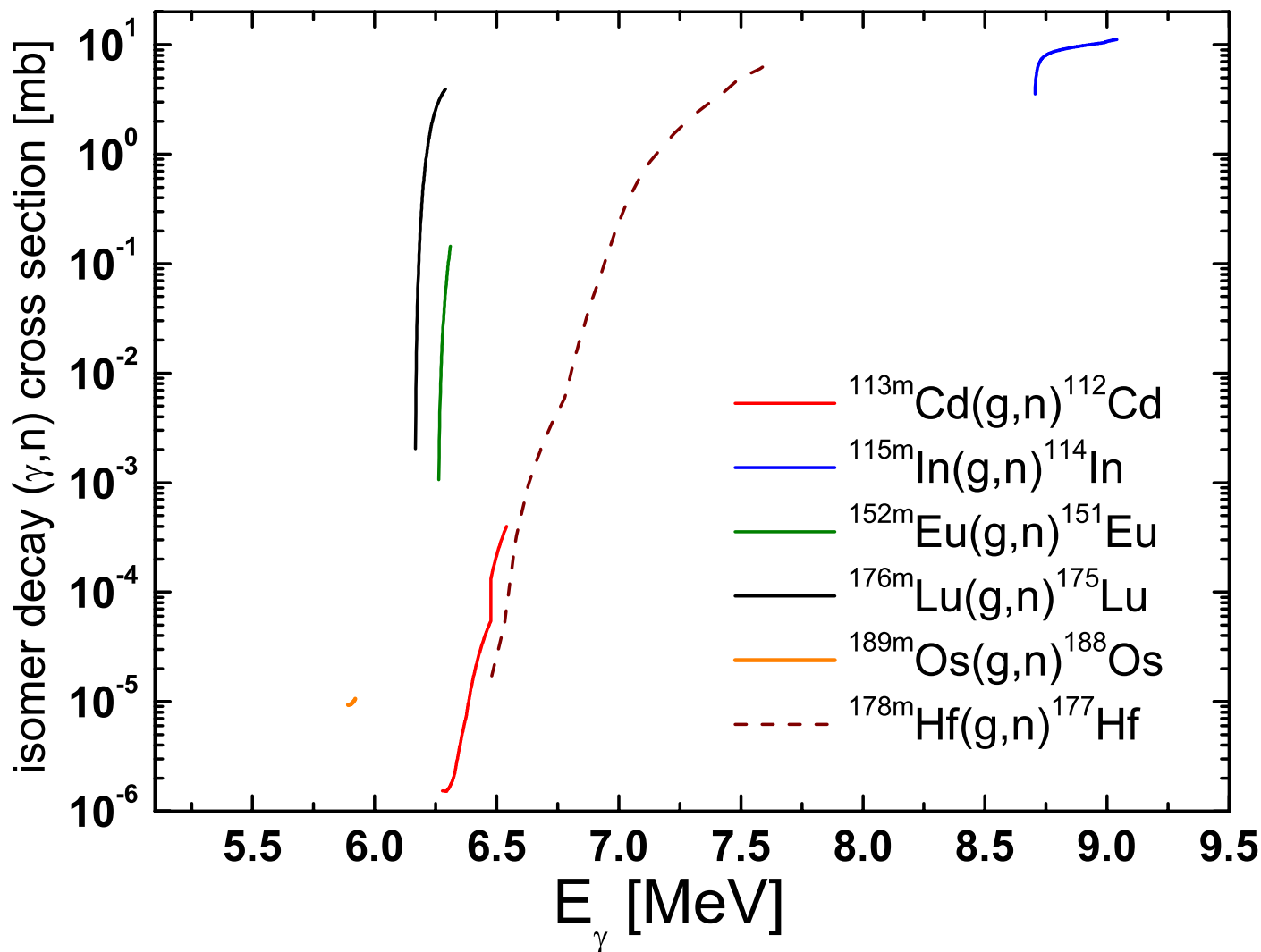
另一种研究方案是：高能伽玛光束同时扮演光致激发和光核反应两种角色！

➤ Nuclear isomer产生截面

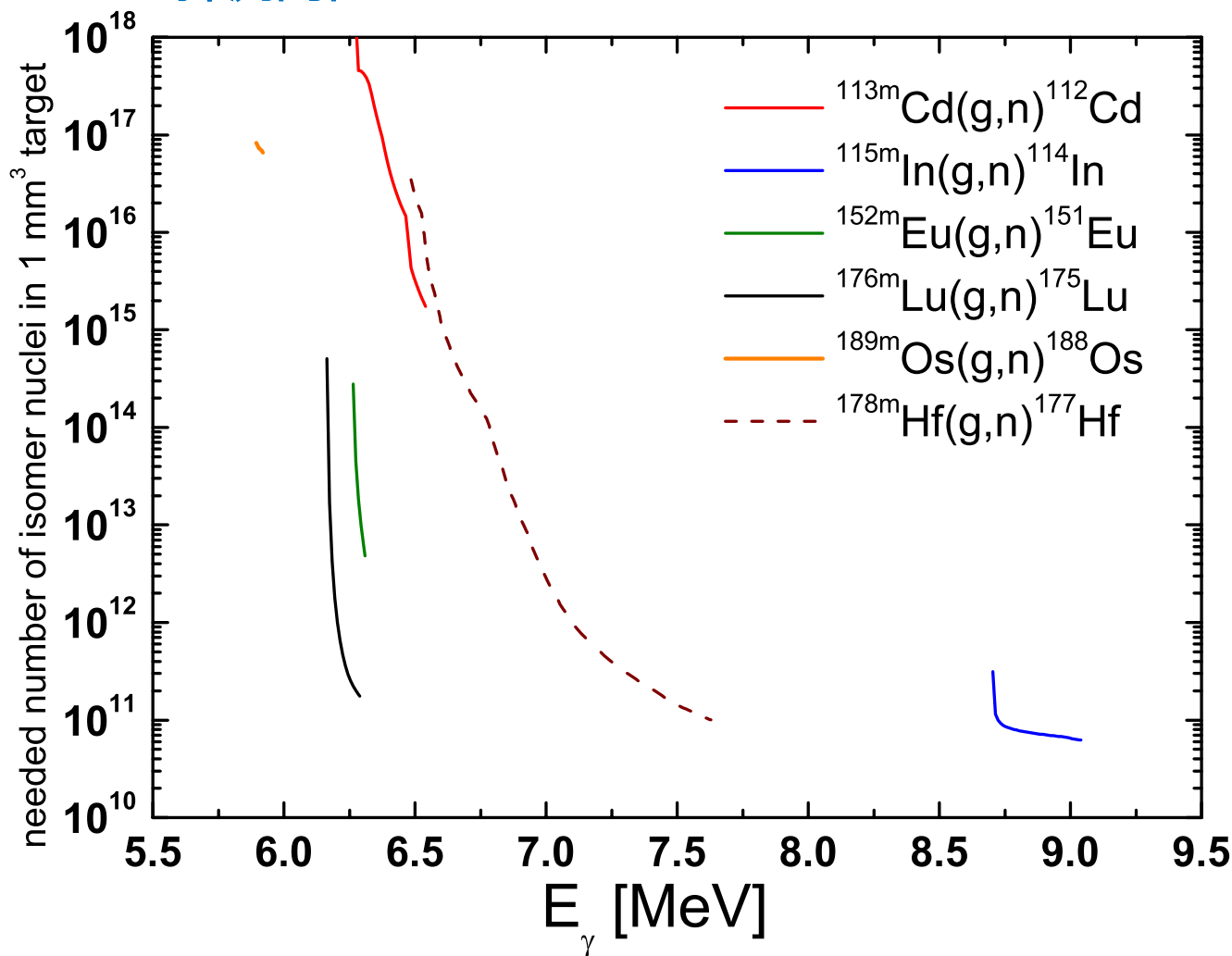


➤ Nuclear isomer产生截面

能区: $[S_n - E_L, S_n]$



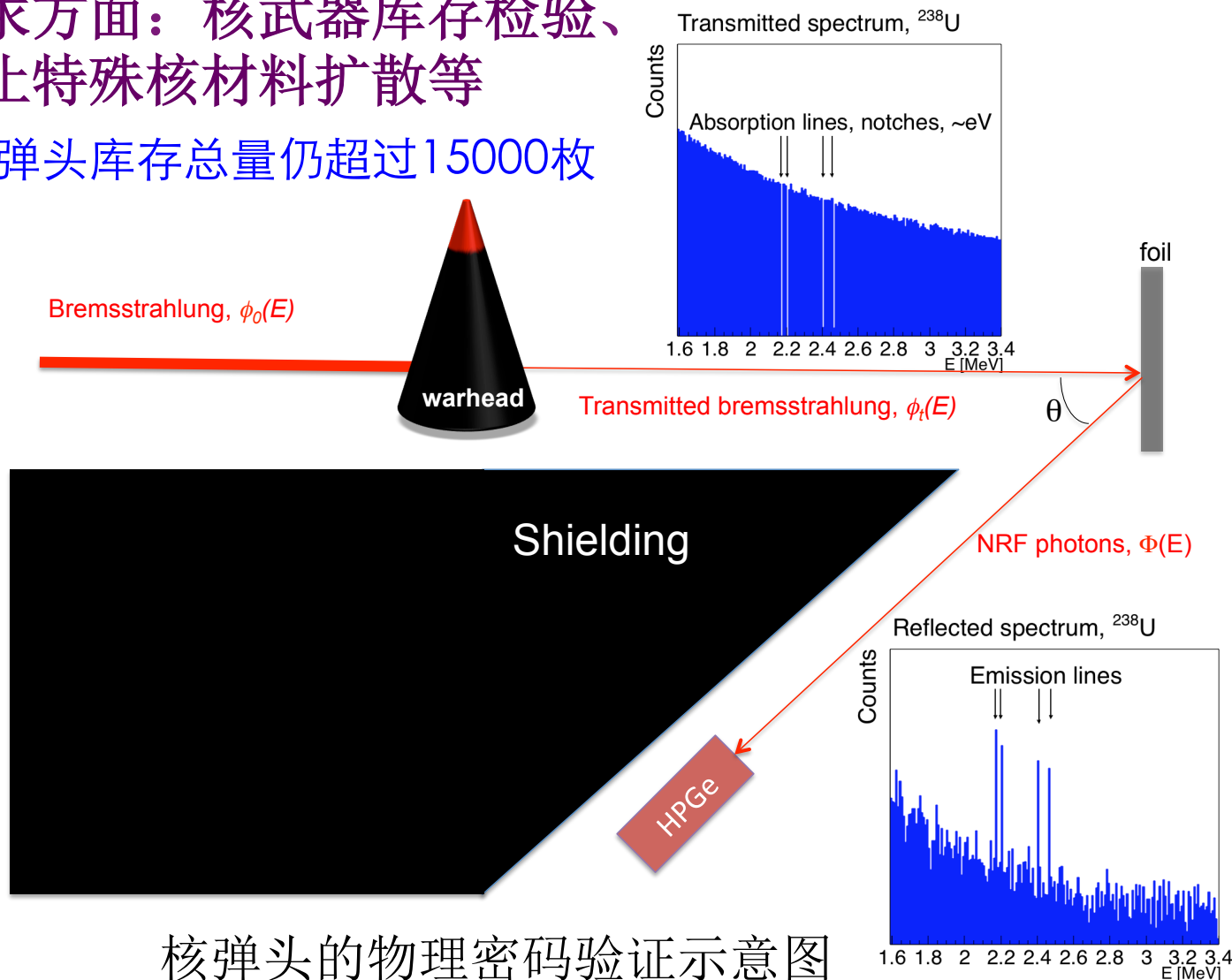
Nuclear isomer探测阈值



- 要达到探测阈值所需要的Isomer靶核的密度。 ^{115m}In （蓝线）所需要的Isomer最少，因此最有可能率先用于实验！

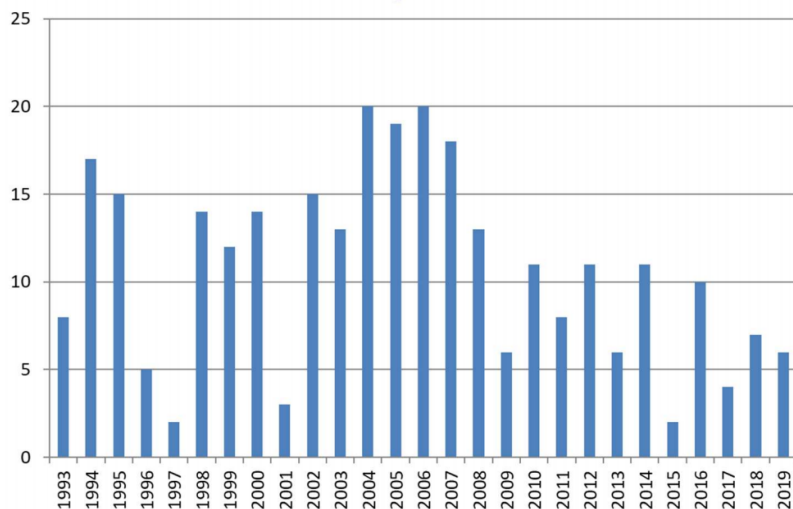
军事需求方面：核武器库存检验、
防止特殊核材料扩散等

全球的核弹头库存总量仍超过15000枚

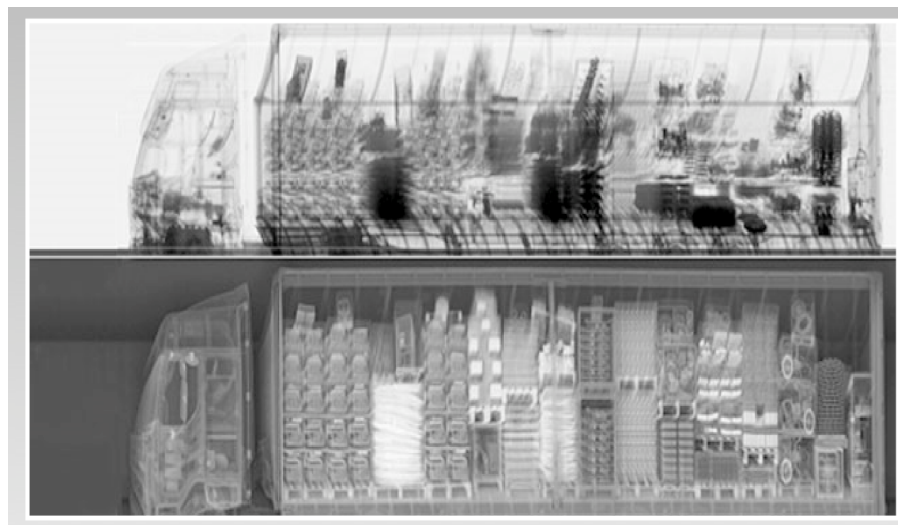


核弹头的物理密码验证示意图

- 截至2019年12月31日，国际原子能机构非法贩运数据库（ITDB）共报告了**3686起**核走私事件，其中包括高浓缩铀和钚等敏感材料。
- 目前，在港口、边境使用的传统X射线检测装置不能对特殊核材料进行有效检测。
- 针对特殊核材料走私，开发快速、准确的无损检测技术迫在眉睫。



ITBD核走私事件简报



X射线检测系统的集装箱成像

用于无损检测系统的现有技术

X-rays



- 短的穿透深度
- => 经障碍物隐蔽
- 不能识别同位素

D-T neutrons

Rapiscan co.(US)



- 氚：放射性同位素
=> 自身可能导致污染
- 超强的中子源
=> 放射性产生，屏蔽问题

Bremsstrahlung gamma-rays



Passport Systems Inc (US)

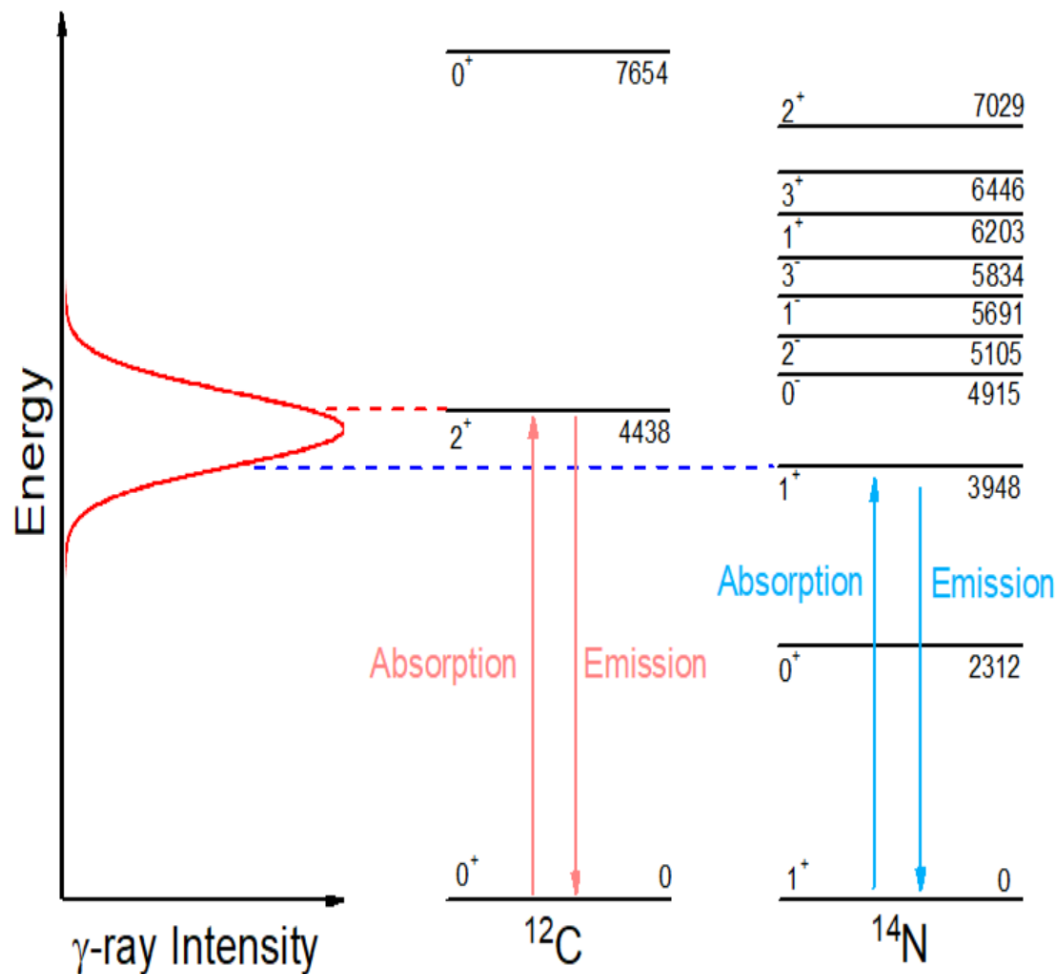
- 大的本底 => 低的S/N比，
屏蔽问题



- 研发用于船用集装箱的新的SNM检测系统是必需的！
检测时间短，容易屏蔽，无放射性

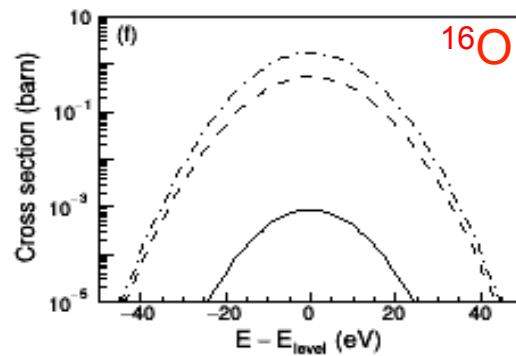
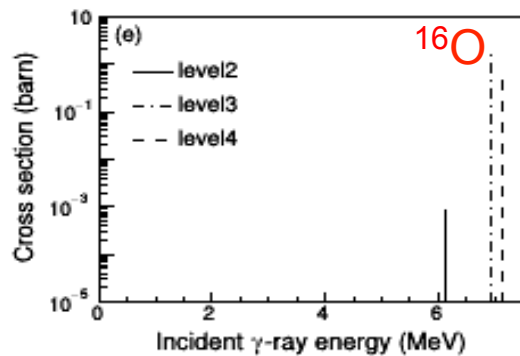
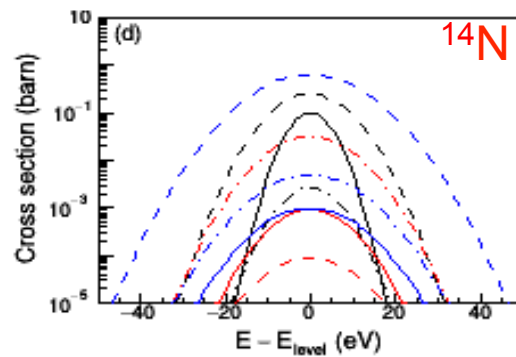
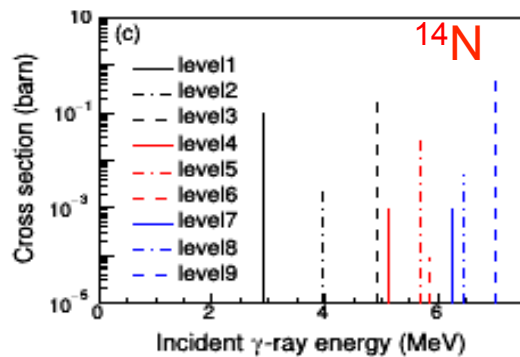
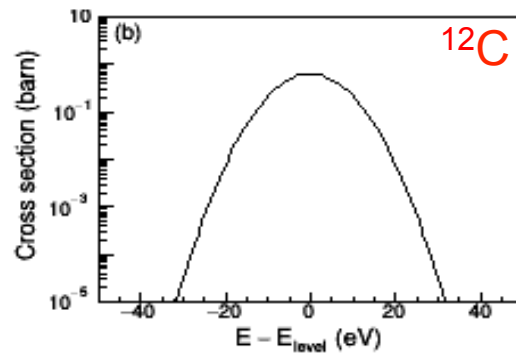
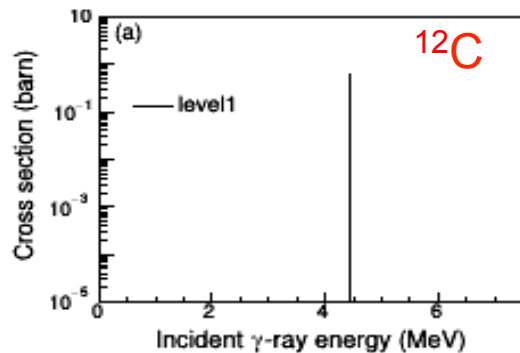
基于LCS-NRF的无损识别方法

- ✓ 核共振荧光是核同位素的指纹，即物理密码。这种指纹由核内的质子和中子数决定。
- ✓ 核共振荧光可提供一种同时解析物体几何和同位素组成的断层扫描方法
- ✓ 核共振荧光方法具有无损性，追加密钥靶测量时可进一步保护物体的内在属性包括隐私性。



NRF过程示意图：退激能量由核的能级决定

NRf反应截面



Breit-Wigner分布

$$\sigma_{NRF}(E) =$$

$$\frac{g}{2} \pi \frac{(\hbar c)^2}{E_\gamma^2} \frac{\Gamma \Gamma_0}{(E - E_\gamma)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

这里， Γ 和 Γ_0 是共振能级的总衰变宽度和退激到基态的宽度，与共振能级状态的平均寿命 τ 有关， g 是统计因子

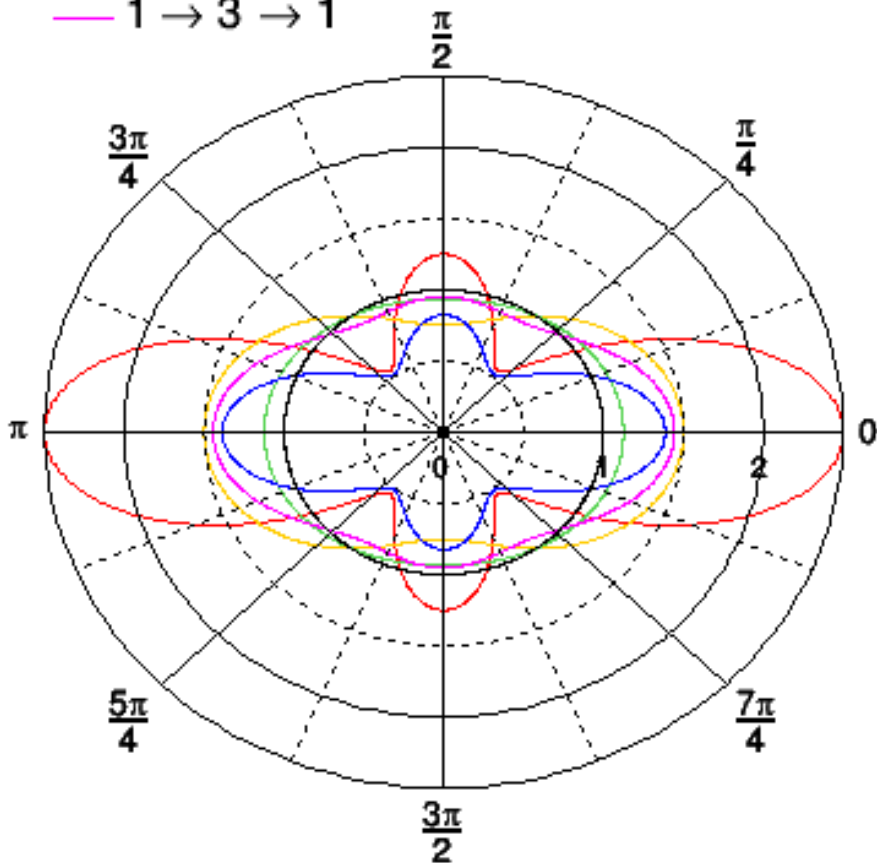
$$g = \frac{2J_i + 1}{2J_0 + 1}$$

与激发态和基态的自旋状态相关。

核共振荧光截面及其多普勒展宽后的截面

NRf光子角分布

- $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$
- $0 \rightarrow 2 \rightarrow 0$
- $1 \rightarrow 0 \rightarrow 1$
- $1 \rightarrow 1 \rightarrow 1$
- $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$
- $1 \rightarrow 3 \rightarrow 1$



角分布函数

$$W(\theta) = 1 + A_2 P_2(\cos \theta) + A_4 P_4(\cos \theta) + \dots + A_{2n} P_{2n}(\cos \theta)$$

$$A_{2n} = F_{2n}(L_1 J_a J_b) \cdot F_{2n}(L_2 J_c J_b)$$

$P_{2n}(\cos \theta)$ 是勒让德多项式

$$P_0(\cos \theta) = 1$$

$$P_2(\cos \theta) = \frac{1}{2}(3\cos^2 \theta - 1)$$

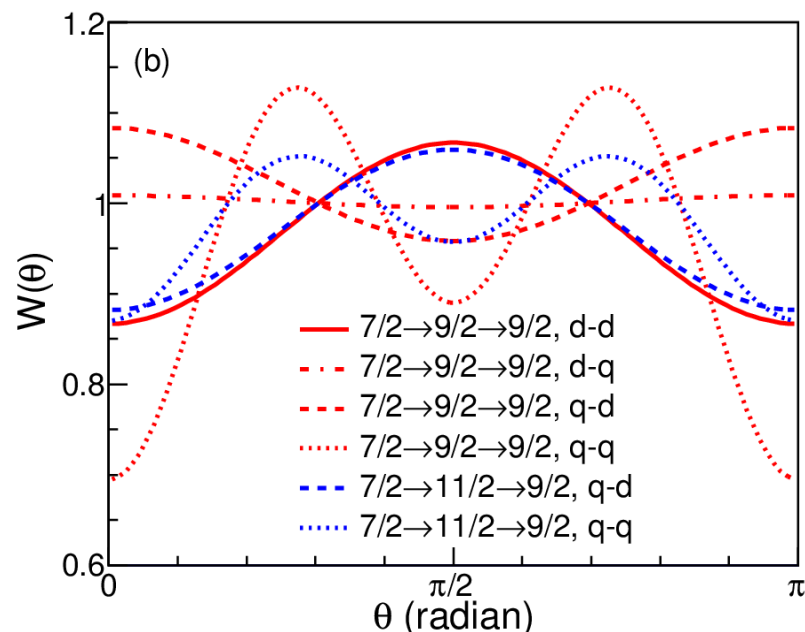
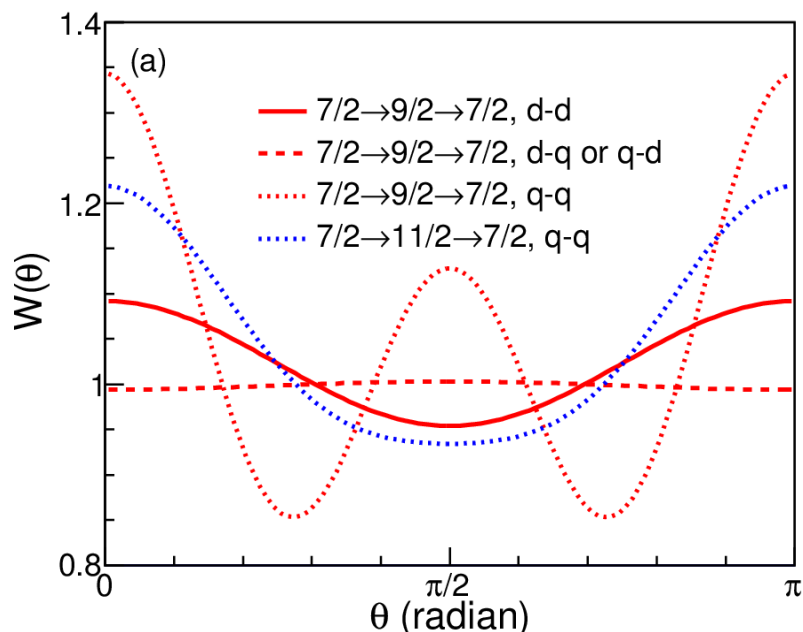
$$P_4(\cos \theta) = \frac{1}{8}(35\cos^4 \theta - 30\cos^2 \theta - 1)$$

纯四极和纯偶极发射光子的角分布：

$$W(\theta)_{\text{Dipole}} = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \theta)$$

$$W(\theta)_{\text{Quadrupole}} = \frac{5}{4}(1 - 3\cos^2 \theta + 4\cos^4 \theta)$$

NRF光子角分布



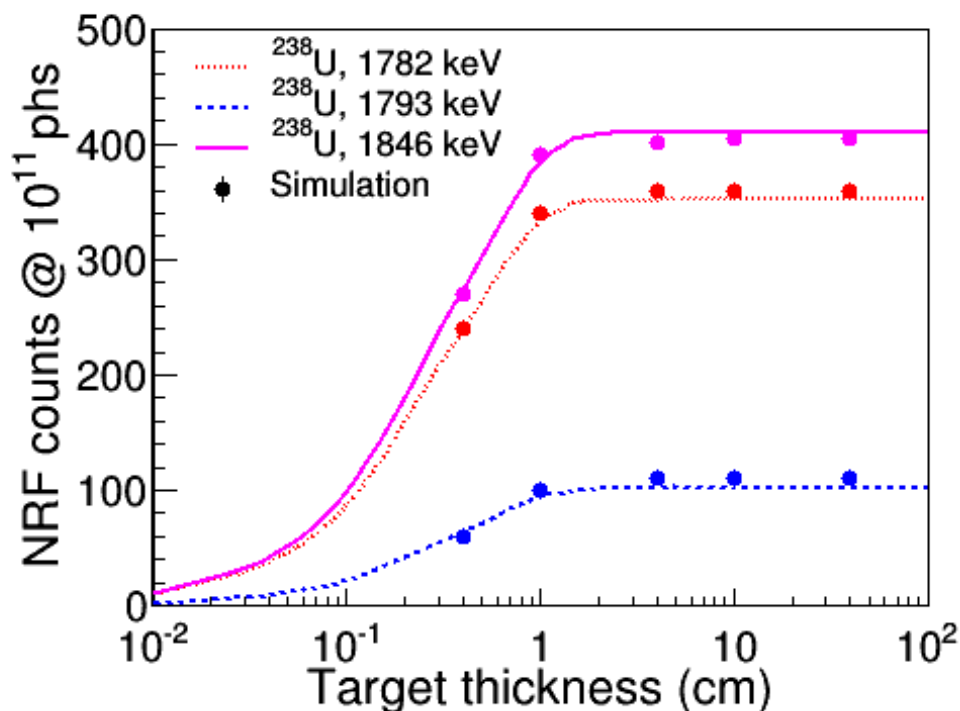
1734 keV共振能级的NRF光子角分布函数
 (假定能级自旋为9/2或11/2)

- 1782 keV (^{238}U)的共振能级的NRF 反应遵循 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ 的跃迁次序，其角分布函数可以表示为 $W(\theta) = 0.75 \times (1 + \cos^2 \theta)$ 。
- 1734 keV (^{235}U)的共振能级的自旋是未知的，并且这些能级之间的跃迁不包括自旋 0 态，其角分布函数的描述更为复杂。

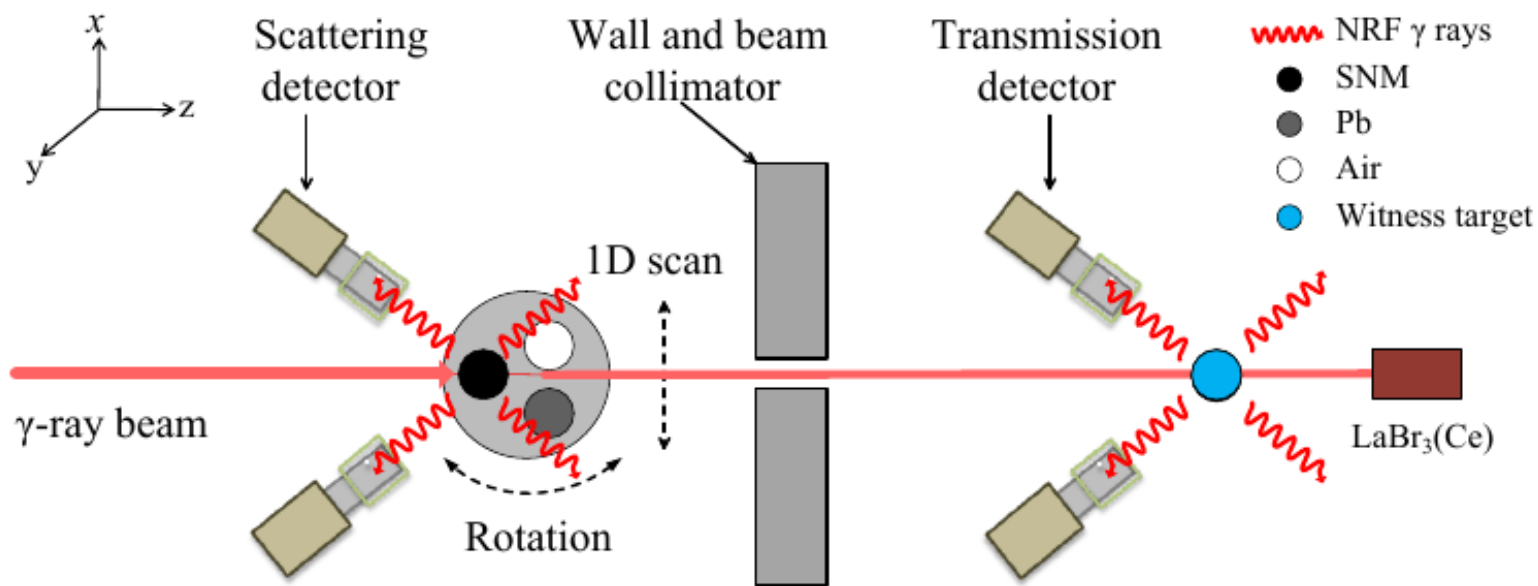
^{238}U 的无损检测以及 G4NRF 的基准

$$\frac{d^3Y}{d\Omega dE} = I(E)\sigma(E) \frac{\rho N_A}{(\mu_{nr} + \mu_{\text{NRF}} + \frac{\mu_{nr}}{\cos\theta})M} [1 - \exp(-x(\mu_{nr} + \mu_{\text{NRF}} + \frac{\mu_{nr}}{\cos\theta}))] \epsilon \frac{W(\theta)}{4\pi}$$

NRF 反应截面
 伽玛光流强
 原子衰减系数
 共振衰减系数
 退激辐射角分布
 全能峰探测效率



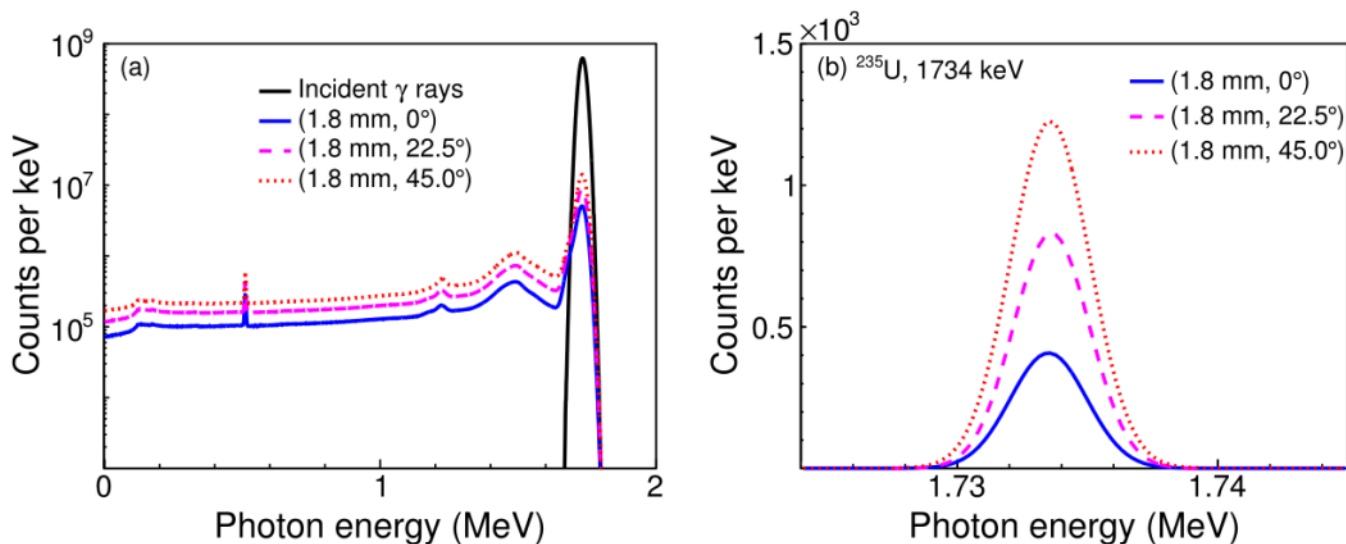
➡ sNRF+tNRF方法



- 通过散射式NRF信号 (**sNRF**) 探测，检查铀同位素的NRF峰的存在与否，可以定性地推测被测物中是否包含 ^{235}U 和/或 ^{238}U ，由于信号显著，检测时间在接受范围内。
- 通过透射式NRF信号 (**tNRF**) 探测，获取不同测量点的tNRF投影矩阵，对被测物中的特定同位素进行断层扫描成像，准确度高，但是检测时间长。
- 由此，提出sNRF+tNRF方法，旨在用于核材料的高效、准确且无损识别！

tNRF同位素成像

tNRF特征信号谱



- 当使用准单能的入射光进行检测时，NRF衰减系数 $-\ln[\varepsilon_{NRF}(x, \theta)]$ 仅取决于同位素的数密度 $N_t(x, \theta)$ ，因此可用于重建被测物中特定SNM同位素的断层图像。

$$\text{NRF衰减系数} \quad -\ln[\varepsilon_{NRF}(x, \theta)] = -\{\ln[\varepsilon_{ON}(x, \theta)] - \ln[\varepsilon_{OFF}(x, \theta)]\} = \sigma_{NRF} \cdot N_t(x, \theta) \cdot L$$

$$\text{共振衰减系数} \quad \varepsilon_{ON}(x, \theta) = \frac{C_{ON}(x, \theta)}{C_{ON,blank}}$$

$$\text{非共振衰减系数} \quad \varepsilon_{OFF}(x, \theta) = \frac{C_{OFF}(x, \theta)}{C_{OFF,blank}}$$

tNRF同位素成像

tNRF断层扫描成像结果

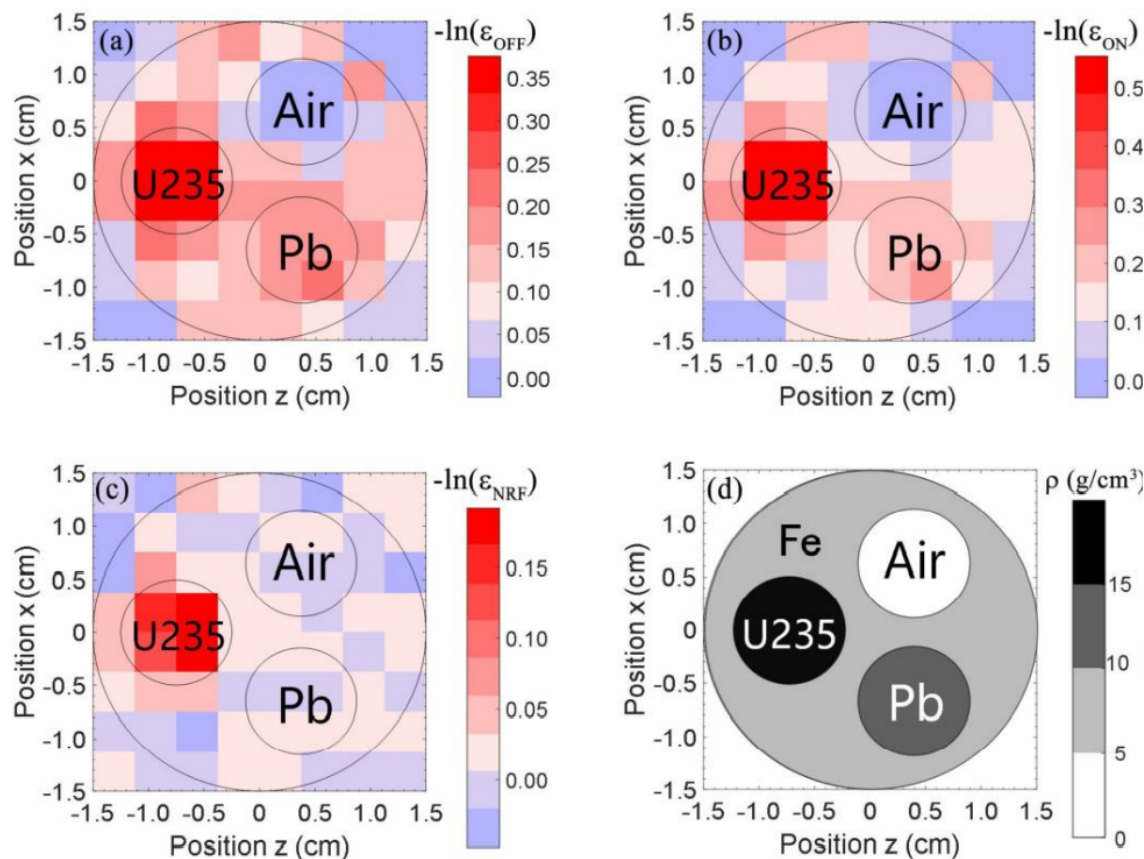


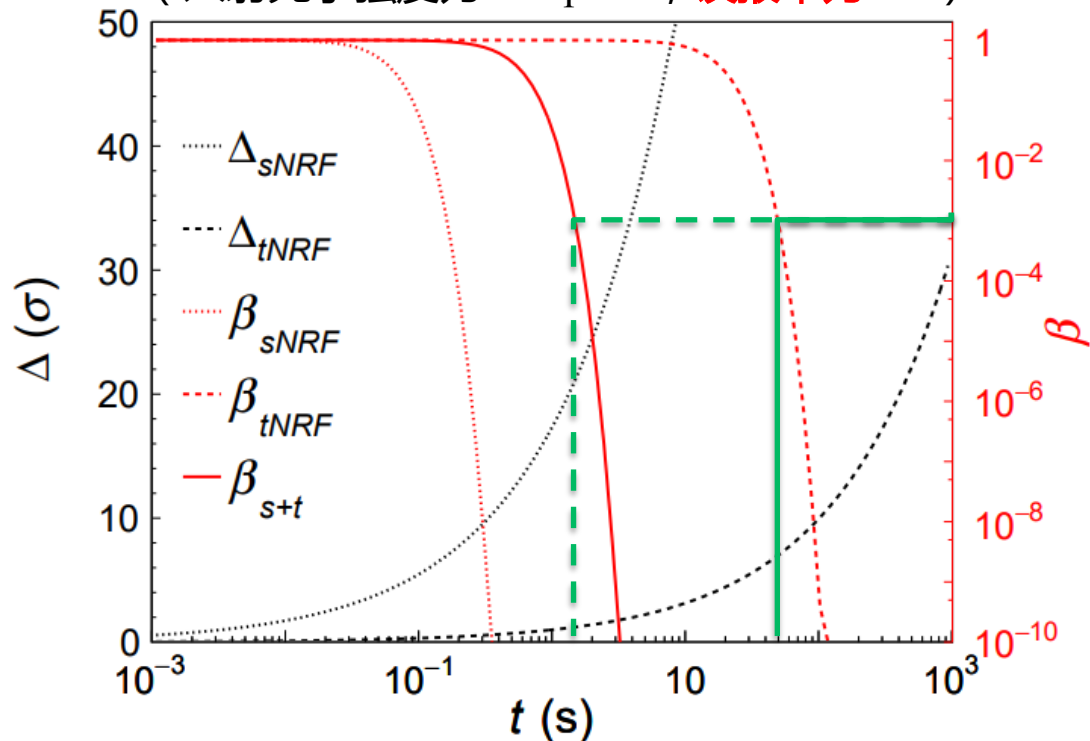
图 (c) 中铀棒与背景的对比度最高。这是由于 $-\ln[\epsilon_{\text{NRF}}(x, \theta)]$ 完全扣除了原子衰减引起的影响，重建出的图像也更为清晰。

结果表明，tNRF成像方法获取被金属包裹的特殊核材料的断层图像是可行的。

tNRF成像方法的主要缺点是成像时间长！

sNRF+tNRF方法的漏检率/测量时间

(入射光子强度为 10^{10} phs/s, 误报率为 10^{-4})



- 从tNRF和sNRF计算结果中得到信号显著度 Δ_{tNRF} 和 Δ_{sNRF} 。

- 若 Δ_{tNRF} 或 Δ_{sNRF} 超过阈值 Δ_t , 则探测系统发出警报。误报率为:

$$\alpha = 1 - [\Phi(\Delta_t) - \Phi(-\Delta_t)]^1$$

若要使 $\alpha = 10^{-4}$, 则 $\Delta_{t+s}^t = 3.9\sigma$ 。

- 选定警报阈值后, 漏检率为:

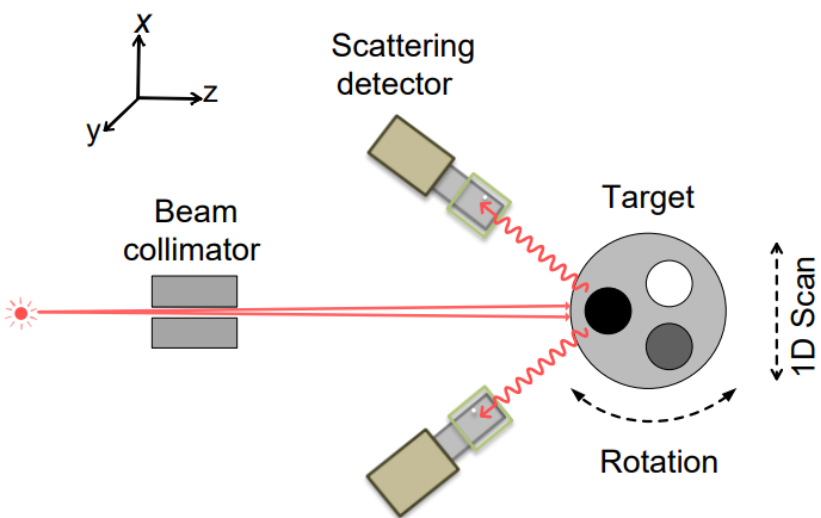
$$\begin{aligned} & \beta_{s+t} \\ &= \Phi\left(\Delta_t - \Delta_{sNRF}^0 \times \sqrt{t_{s+t}/t^0}\right) \\ & \times \Phi\left(\Delta_t - \Delta_{tNRF}^0 \times \sqrt{t_{s+t}/t^0}\right) \end{aligned}$$

- 若达到相同的漏检率 10^{-3} , sNRF+tNRF方法所需的测量时间 (数秒) 比tNRF方法 (数十秒) 小一个数量级。

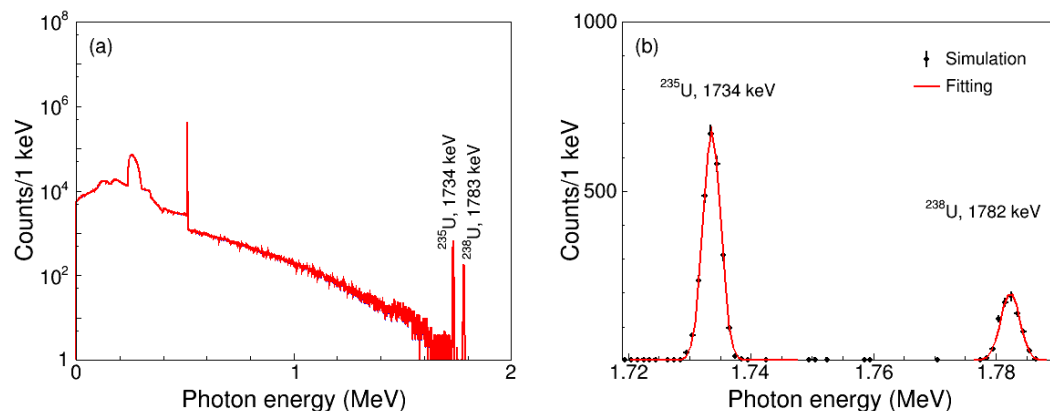
特殊核材料的sNRF-CT成像

提出散射法核共振荧光-断层扫描成像 (sNRF-CT)

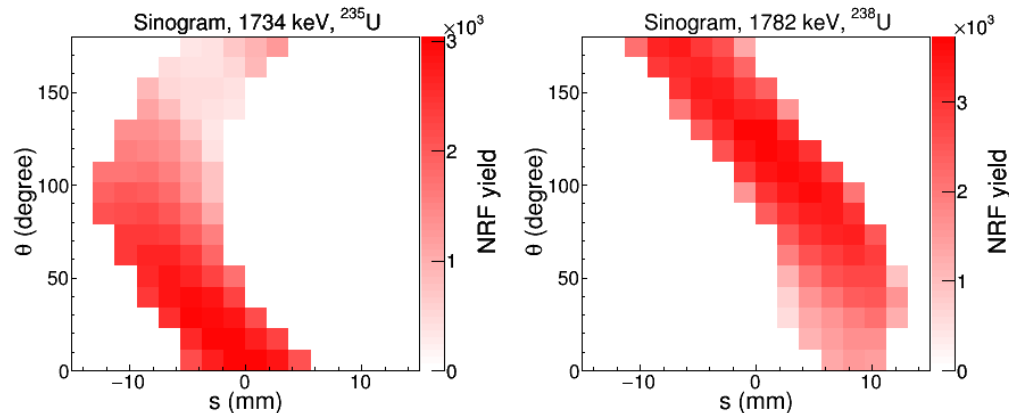
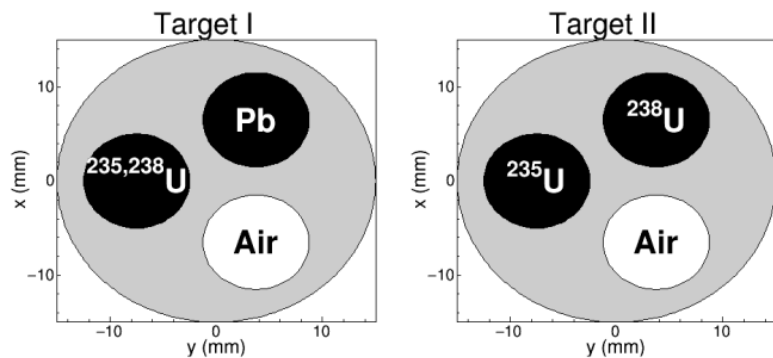
sNRF-CT探测布局



sNRF光谱

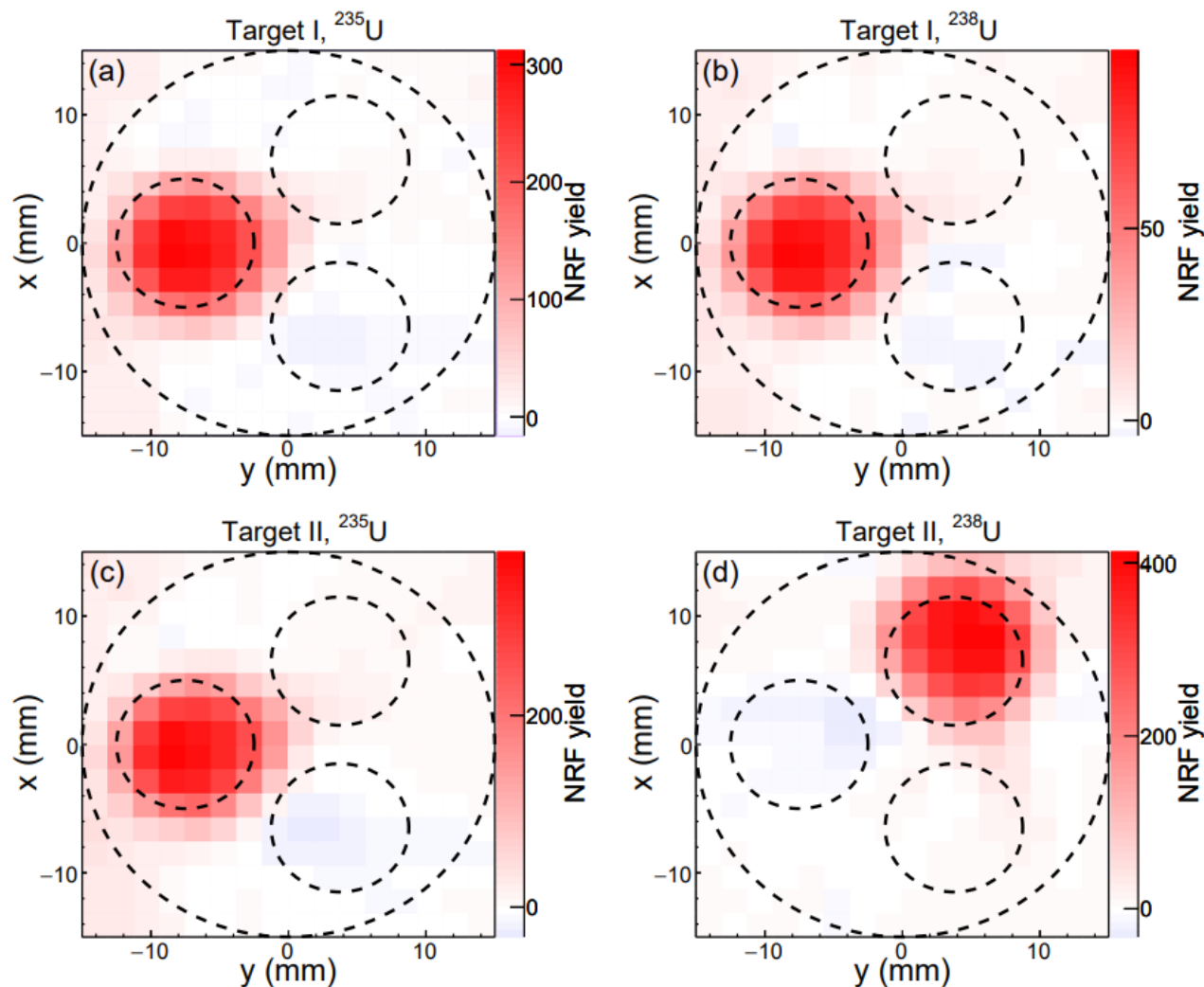


不同测量点的NRF信号分布



特殊核材料的sNRF-CT成像

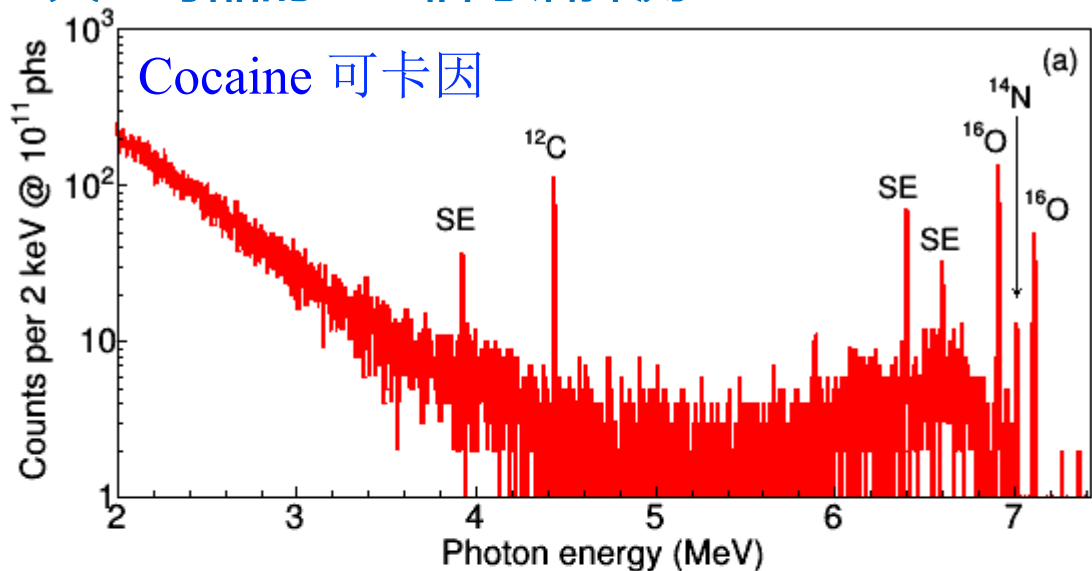
sNRF-CT图像重建



获取不同旋转角度下待测靶的NRF投影值。

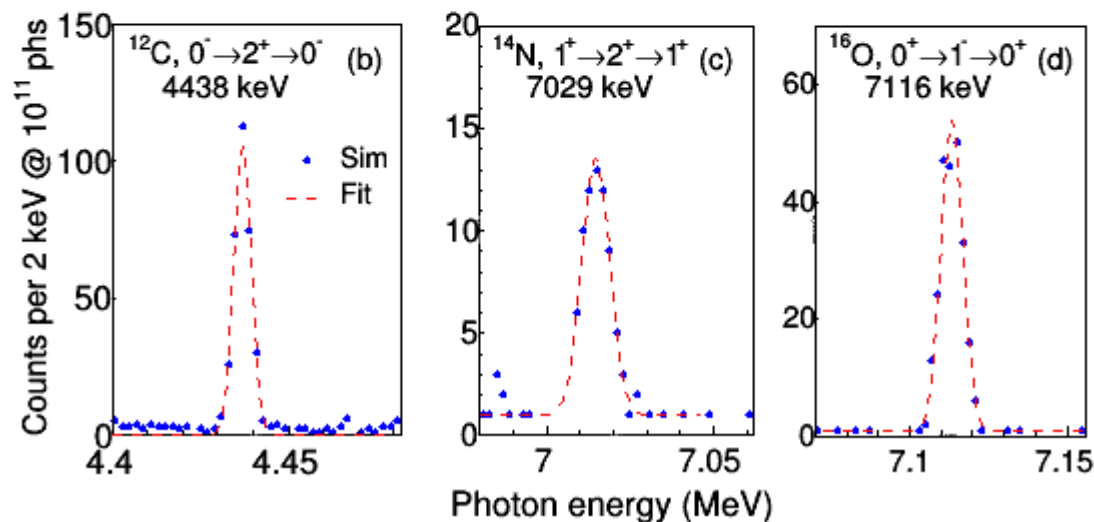
利用滤波反投影算法或迭代算法，可以有效重建特殊核材料的空间分布，有望**快速**实现核同位素的**高分辨率**CT成像。

典型毒品的NRF信号谱探测



特点：

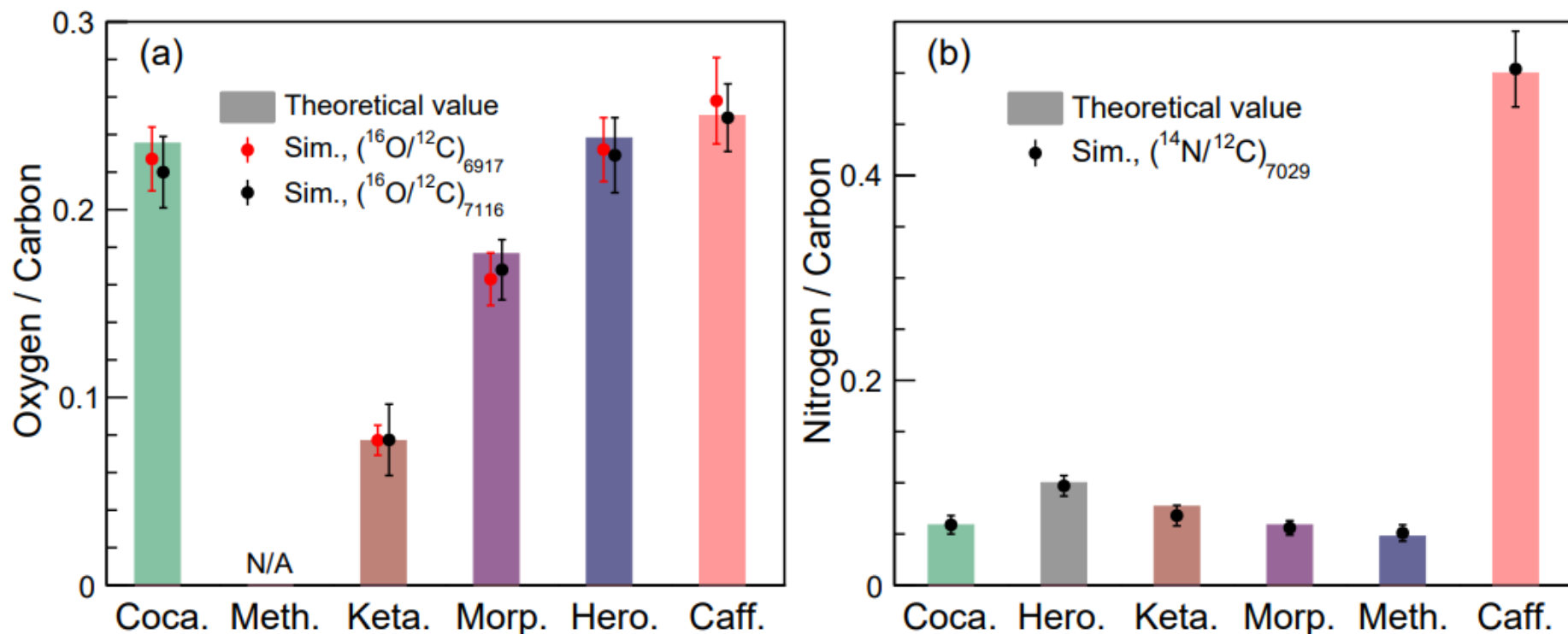
低本底、无放射性、采用高通量的伽玛光源时，拥有高的信噪比和短的检测时间。



由于准单能的LCS光源具有能量可调的特点，非常适合用于特定核素的核共振荧光检测。

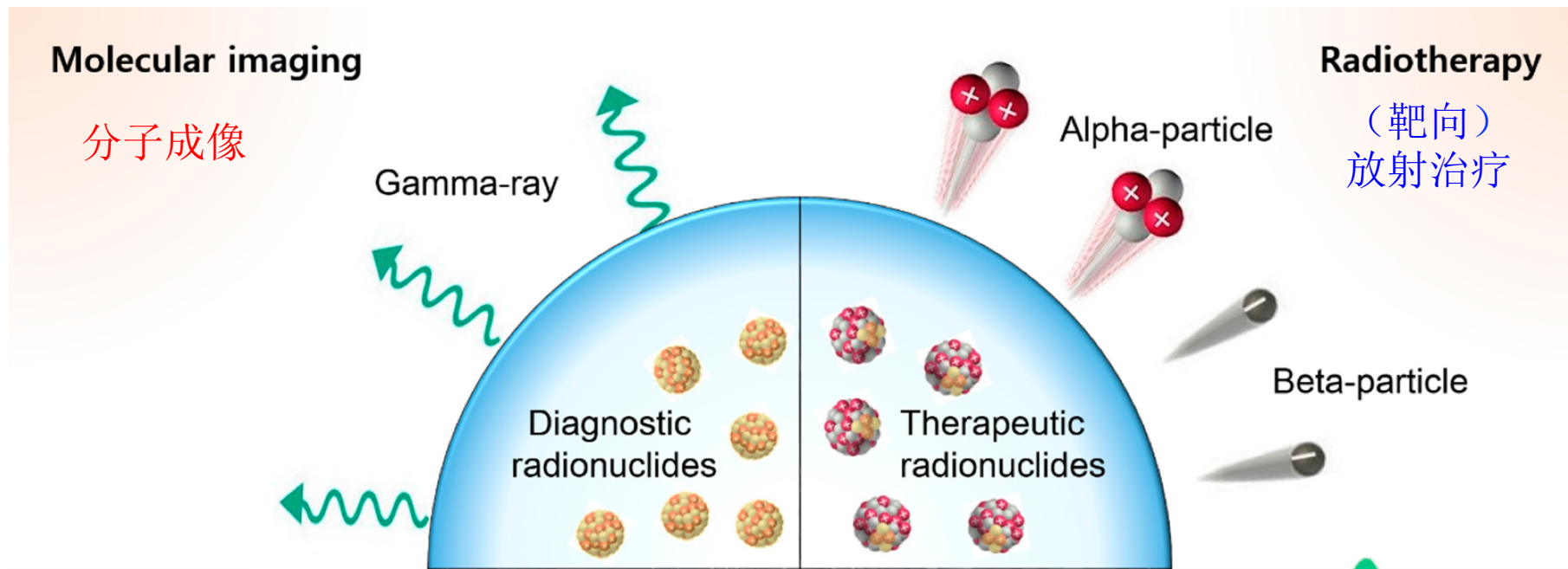
典型毒品的氮碳、氧碳含量比

提出利用元素比方法来准确预测毒品的种类



通过选择合适的伽马光源（能谱）、高分辨率的NRF探测器、优化的探测器方位角，准确模拟不同核素的共振荧光峰，可以在较短时间内预测几种典型毒品的核素含量比，与理论值相当吻合，可以用于准确预测毒品的种类。

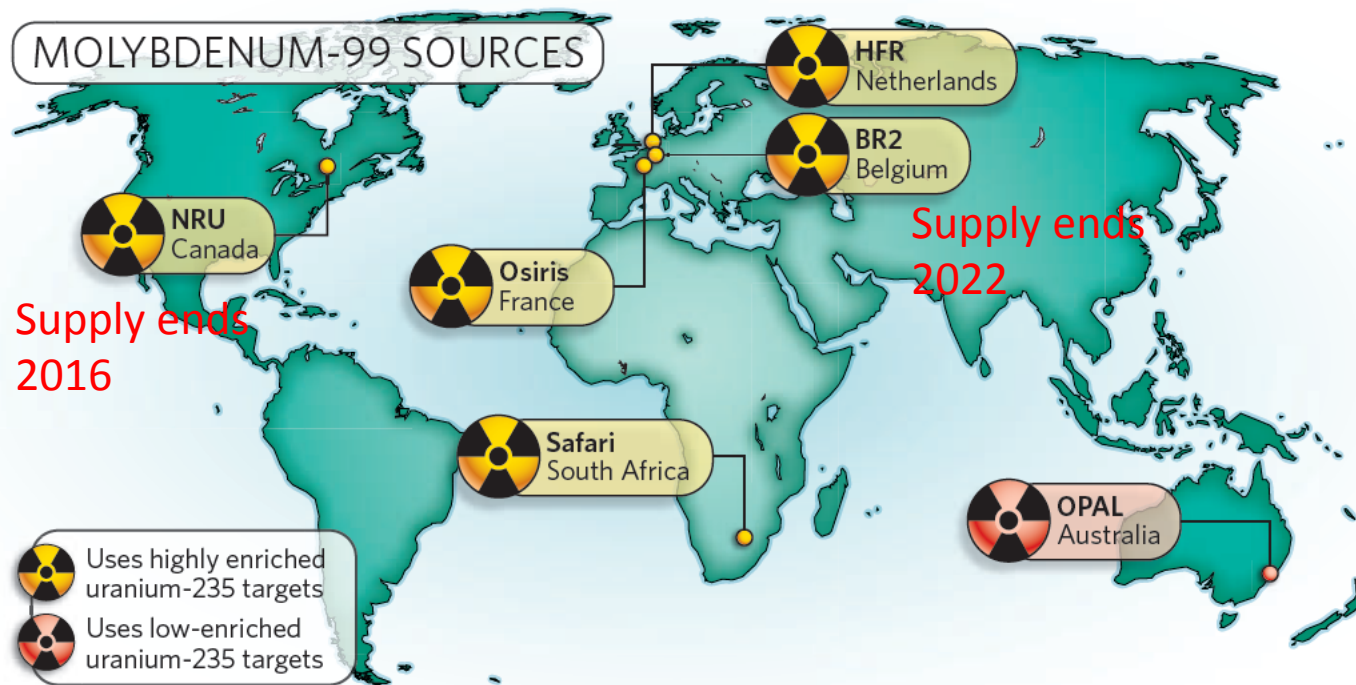
放射性同位素用于医学领域已有百年历史，在医学诊断和放射治疗中发挥至关重要的作用！



Nuclear medicine uses radiation

- (1) to provide information about the **morphology** (形态学) and **functioning** of a person's specific organs (分子成像)
- (2) but also to direct highly destructive charged particles to **pathological sites/processes** aiming palliative or curative effects (放射治疗)

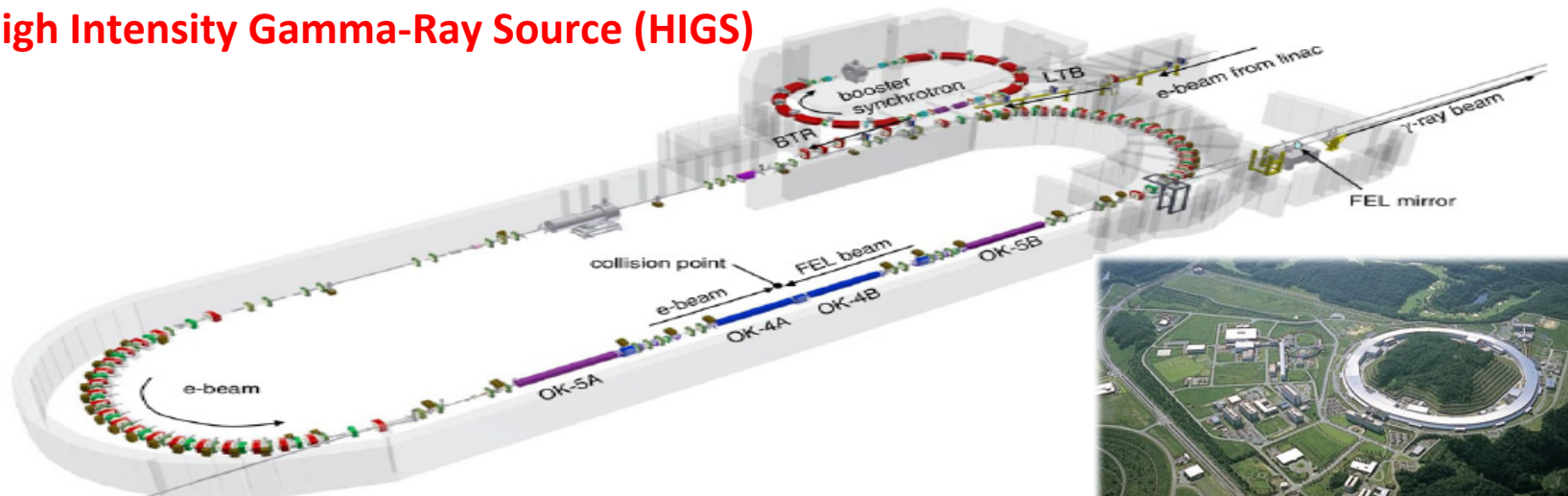
英国自然杂志多次报导：核反应堆关闭，全球医用同位素紧缺！



Nature News in Brief: Researchers urge action on medical-isotope shortage (敦促采取行动来应对医用同位素短缺) [J]. Nature 459, 1045 (2009).

国际上HGIS, ELI-NP等大科学装置对医用同位素产生非常有兴趣

High Intensity Gamma-Ray Source (HIGS)



RADIOISOTOPE PRODUCTION FOR MEDICAL APPLICATIONS AT ELI-NP

技术设计报告：同位素产生用于医学应用

M. BOBEICA¹, D. NICULAE^{2,*}, D. BALABANSKI¹, D. FILIPESCU^{1,2},
I. GHEORGHE^{1,4}, D.G. GHITA^{1,2}, W. LUO^{1,3} 罗文

¹ELI-NP, “Horia Hulubei” National Institute for Physics and Nuclear Engineering, 30 Reactorului Street, RO-077125, Bucharest-Magurele, Romania

²“Horia Hulubei” National Institute for Physics and Nuclear Engineering (IFIN-HH), 30 Reactorului Street, RO-077125, Bucharest-Magurele, Romania

Romanian Reports in Physics, 68 (2016) S847–S883

³School of Nuclear Science and Technology, University of South China, 721001 Hengyang, China

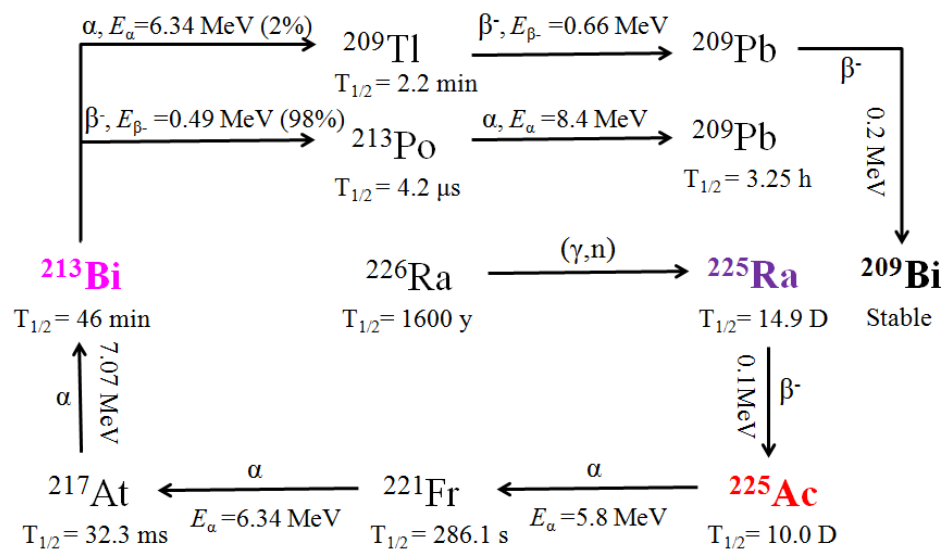
⁴Faculty of Physics, University of Bucharest, 077125, Bucharest, Romania

几种感兴趣的光核医用同位素

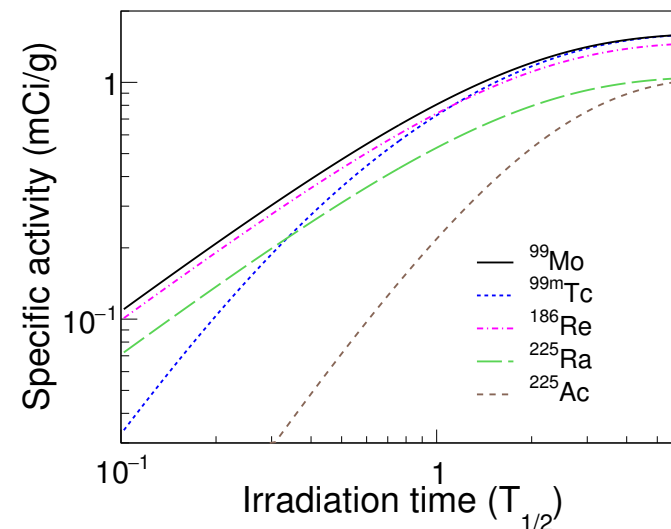
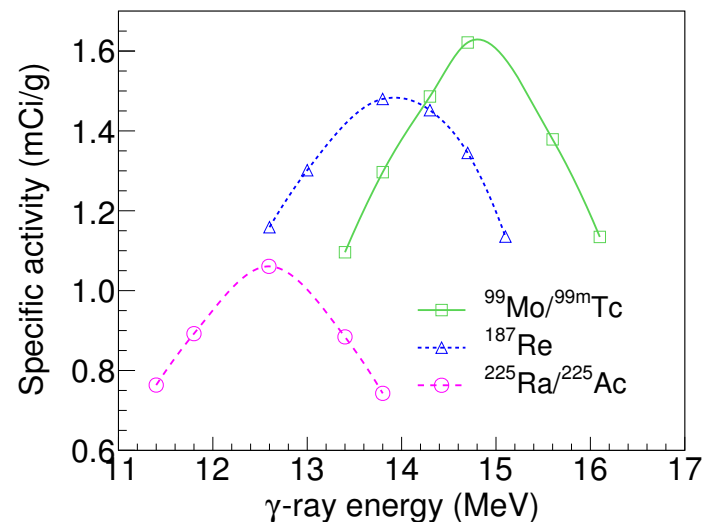
Research Activity	Isotope	Issue/Action
Alpha therapy	^{225}Ac ^{211}At ^{212}Pb	Current sources are limited. One valuable source for ^{225}Ac , extraction of ^{229}Th from ^{233}U may soon be lost.
Diagnostic dosimetry for proven therapeutic agents	^{64}Cu ^{86}Y ^{124}I ^{203}Pb	Used in conjunction with ^{67}Cu therapy ^{90}Y therapy ^{131}I therapy and immune-diagnosis ^{212}Pb therapy The issue is the need for a coordinated network of production facilities to provide broad availability. There is need for R&D for common target and chemical extraction procedures.
Diagnostic tracer	^{89}Zr	Immune-diagnosis 3.27 d half-life allows longer temporal window for imaging of MoAbs, metabolism, bioincorporation, stemcell trafficking, etc.
Therapeutic	^{67}Cu	Requires specialized high-energy production facilities and enriched targets.

探讨利用ELI-NP装置开展医用同位素产生研究

(举例) $^{225}\text{Ra}/^{225}\text{Ac}$ isotopes. A possible isotope production with an actinide target.



^{225}Ac 被称为“地球上最稀有的药物”



探讨利用ELI-NP装置开展医用同位素产生研究

Product isotope	$T_{1/2}$ (day)	(γ, n) target	Target Mass* (g)	$E_{\gamma, max}^{\dagger}$ (MeV)	Cross section r.m.s. width (MeV)	σ_{max} (barn)	e-beam energy (MeV)	γ -ray energy (MeV)	γ -beam flux (s^{-1})	Specific activity ^{††} (mCi/g)	Amount per day (MBq)
^{99m}Tc	0.25	$^{100}\text{MoO}_3$	0.40	14.5	2.09	0.15	650	14.7	10^{11}	1.6	8.9
^{186}Re	3.7	^{187}Re	2.64	13.0	1.72	0.43	630	13.8	10^{11}	1.5	24.7
^{225}Ac	10.0	^{226}Ra	0.63	12.0	1.65	0.29	600	12.6	10^{11}	1.1	1.2
^{65}Cu	0.53	^{64}Cu	1.12	17.0	2.27	0.09	710	17.6	10^{11}	1.6	65

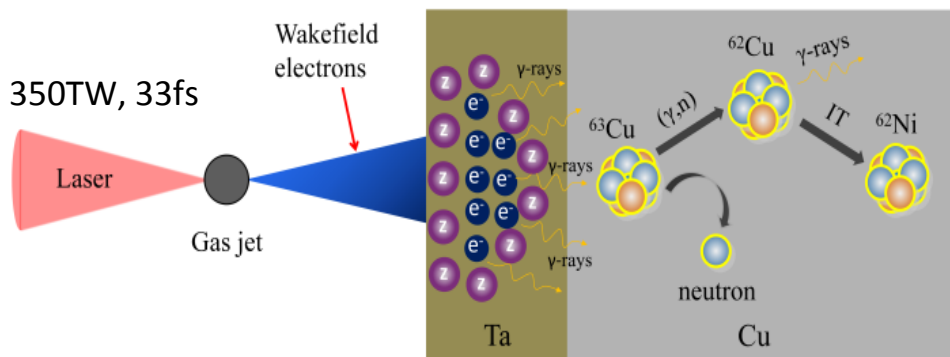
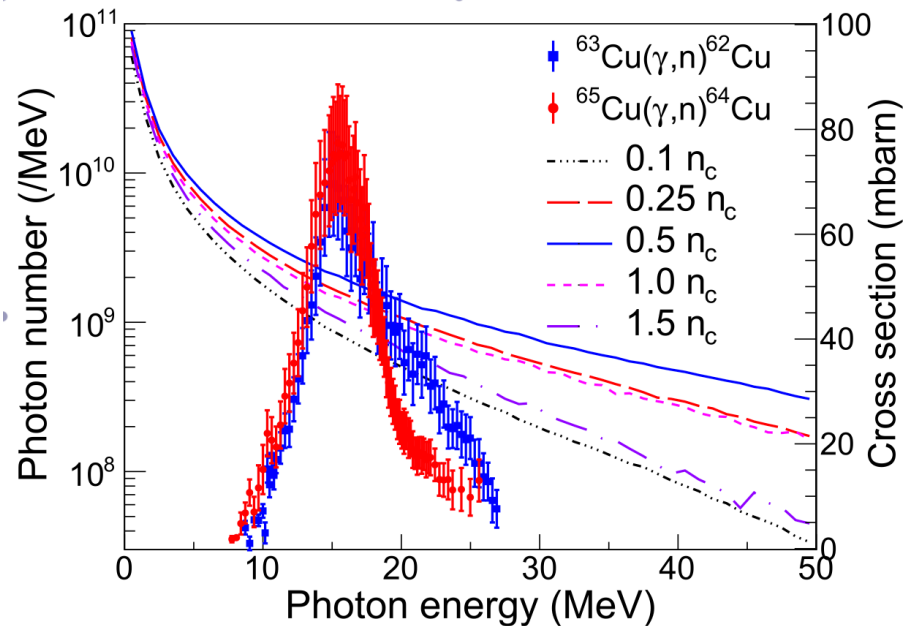
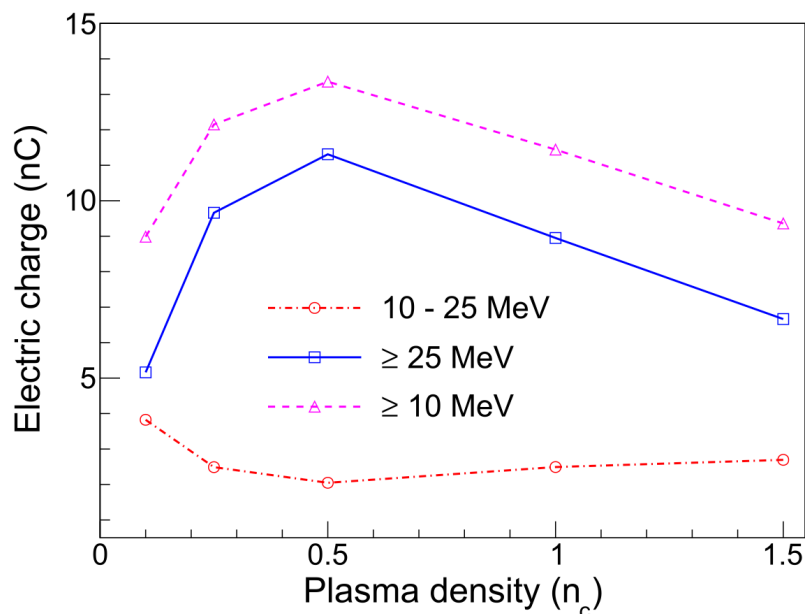
* An isotopic target with 2.0 mm radius and 1.0 cm thickness was used for calculation.

[†] Corresponds to a γ -ray energy at the maximum of the reaction cross section.

^{††} Corresponds to a saturation specific activity after a long enough irradiation integral.

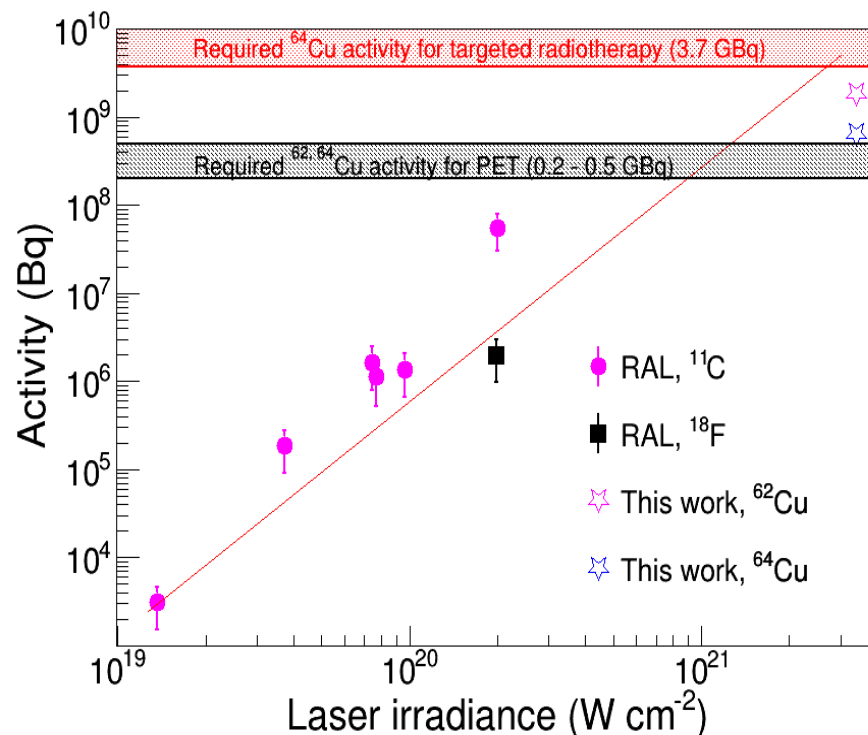
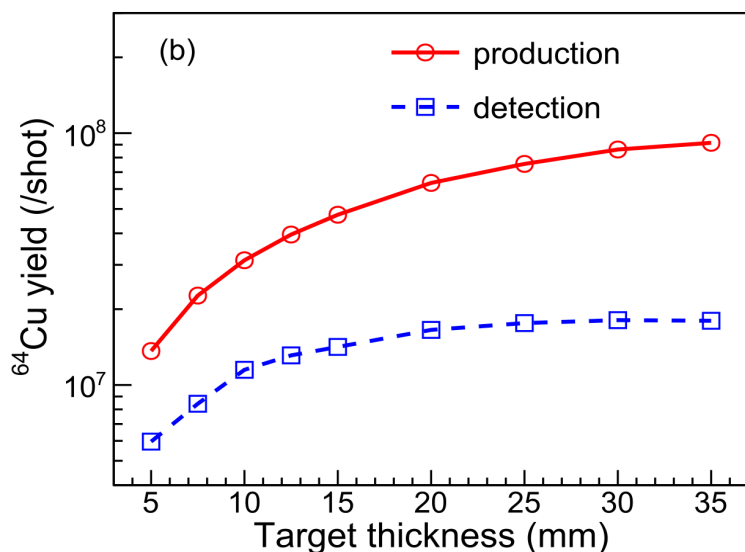
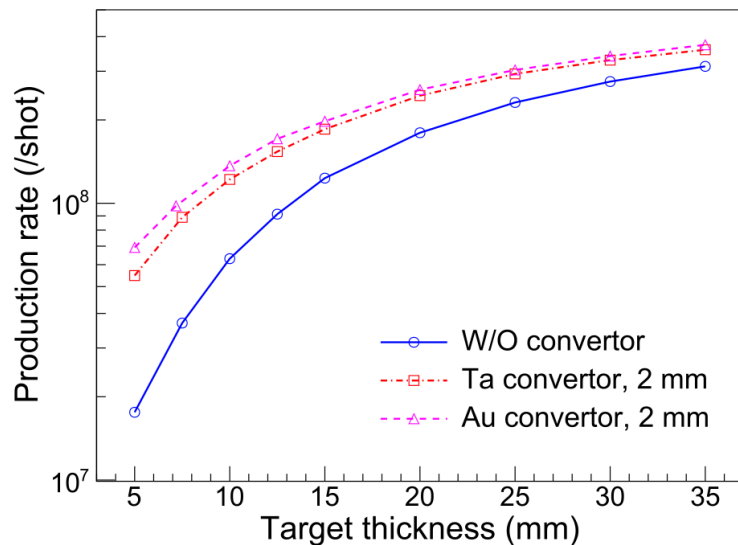
- The optimum values of the on-axis γ -beam energy at a LCS γ -source facility, with respect to the energy (E_{γ}) at the maximum of the reaction cross section (σ_{max}) for the above discussed radioisotopes.
- Table 1 also shows the estimates of the achievable specific activities for $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$, $^{225}\text{Ra}/^{225}\text{Ac}$, ^{186}Re and ^{64}Cu radioisotopes which are of the order of a few mCi/g for thin targets with about one gram of mass, a γ -beam flux of $10^{11} s^{-1}$ and a beam radius of 2.5 mm for an optimized e-beam energy.

探讨强激光驱动的医用同位素产生

强激光驱动的 $^{64}, ^{62}\text{Cu}$ 同位素产生示意图

高能电子束及其诱发的韧致辐射优
化产生

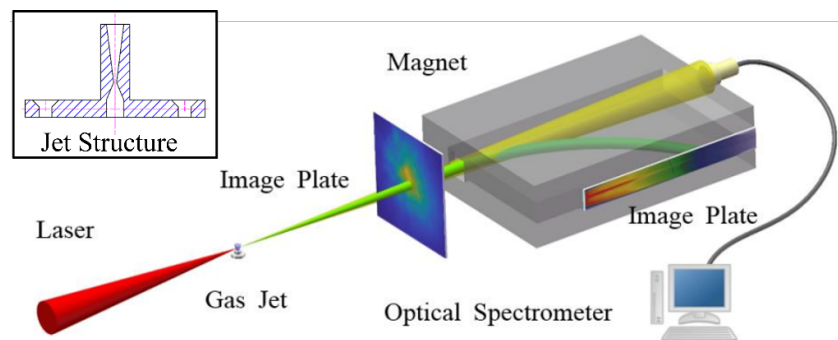
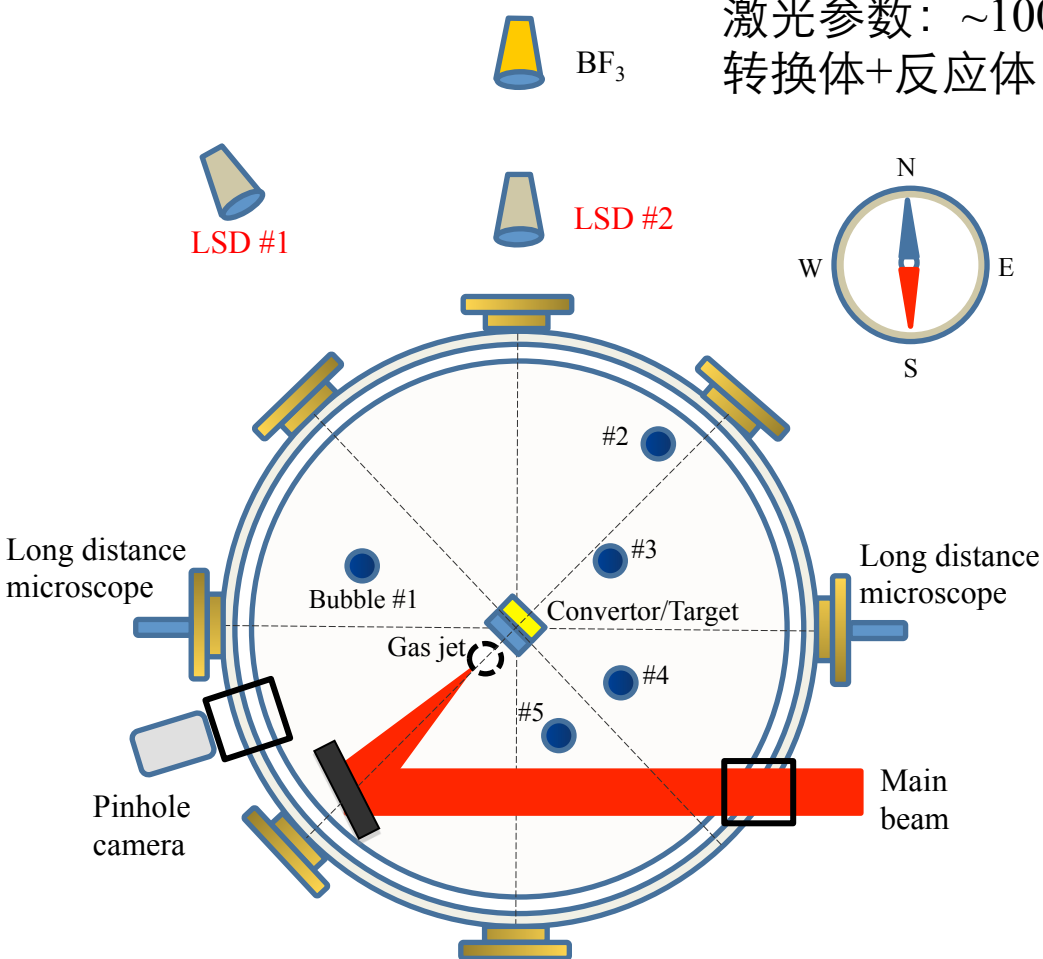
探讨强激光驱动的医用同位素产生



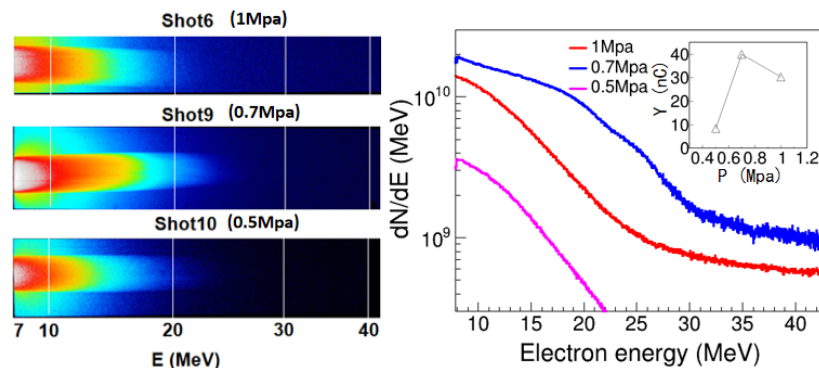
PET同位素产生潜力与激光辐照强度
呈近似线性增长趋势
有望超过PET源所需的剂量

基于XGIII装置的医用同位素产生实验

激光参数: ~ 100 J, ~ 0.9 ps; N_2 气体: 0.5-1.0 Mpa
转换体+反应体: 2mm Ta + 5mm Cu + 5mm Ga_2O_3



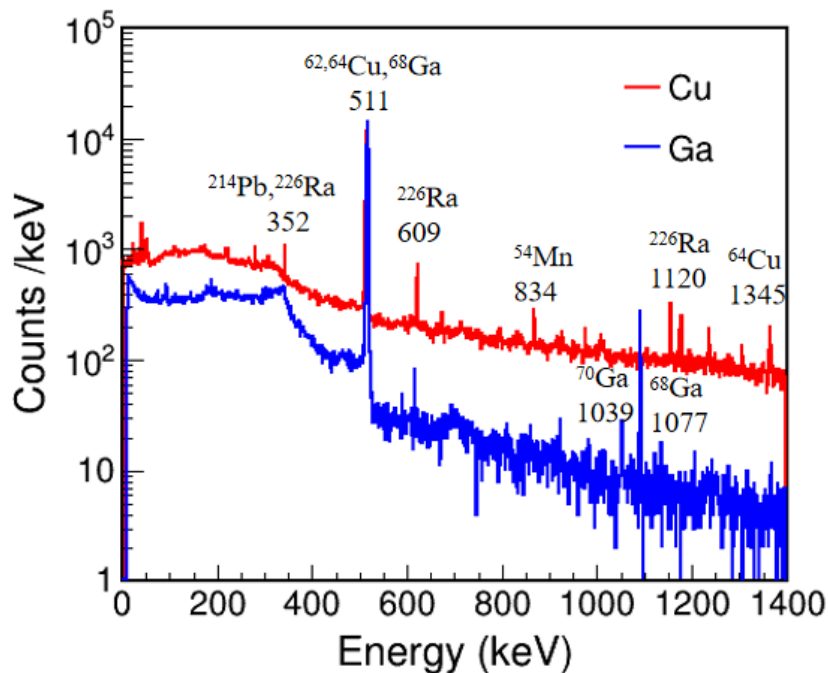
自调制尾波场加速电子及其诊断布局



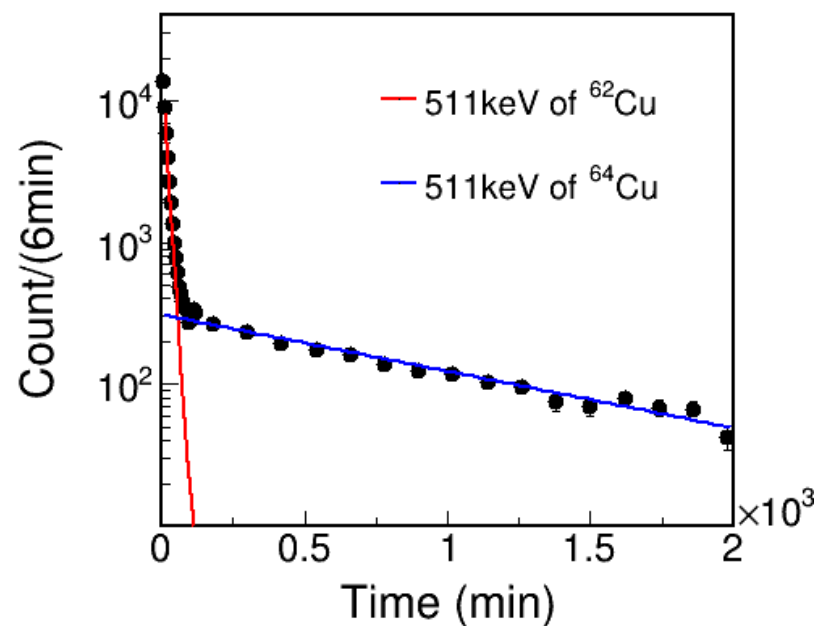
基于XGIII装置的医用同位素产生实验布局

不同气压下的加速电子能谱分布

基于XGIII装置的医用同位素产生实验



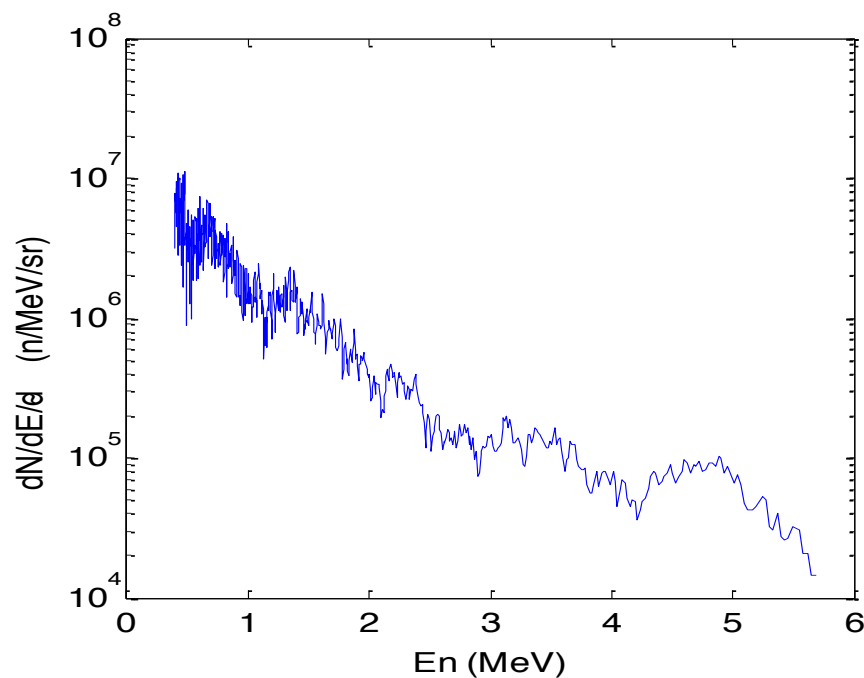
活化产物的特征伽马射线测量结果



放射性同位素 $^{62,64}\text{Cu}$ 的衰变曲线

初步估计，本次打靶实验的医用同位素 $^{62,64}\text{Cu}$ 产量为 5×10^6 per shot

基于XGIII装置的医用同位素产生实验



液闪探测器（LSD）解谱获取的中子能谱图

- 常规加速器驱动的高能准单能伽玛光源是开展光核物理研究及其应用的重要工具。
- 由于激光器和先进加速器技术的突破性进展，基于激光等离子体的X/伽玛光源及其应用研究，正在受到国际上的广泛重视。
- 本研究团队和国内外多个科研团队紧密合作，已在伽玛光核物理领域开展一些研究工作，并取得了一些研究成果。
- 国内已经建成多个超强超短激光实验平台，以及正在建设多个高功率拍瓦激光装置和加速器驱动的LCS伽玛光源，期待可以进一步利用这些科研装置开展丰富多样的光核物理研究及其应用探索！



感谢各位的聆听和建议

Thank you for your attention!

南华大学 罗文

