

博学/审问/慎思/明辨/笃行

中山大学中法核工程与技术学院

快时间gamma探测阵列

Fast-timing gamma-ray detector array



汇报人：张广鑫

中山大学中法核工程与技术学院

Institut Franco-Chinois de l'énergie nucléaire



中山大学中法核工程与技术学院
Institut franco-chinois de l'énergie nucléaire

2025年7月24日

Outline

- 快时间gamma探测器阵列：
 - ➡ 物理意义/工作原理
 - ➡ 数字化定时技术的发展和仿真
 - ➡ 探测器阵列的实验应用

快时间gamma探测器阵列



- 利用gamma谱学的方式研究原子核结构信息（激发能高度，寿命，磁矩……），测量关键核数据，贯穿整个核物理实验发展的历史；
- 与能级高度相比，能级寿命，以及推导出的退激射线的约化跃迁概率，可以被视作一个更灵敏的原子核结构探针。

快时间gamma探测器阵列

- 利用gamma谱学的方式研究原子核结构信息（激发能高度，寿命，磁矩……），测量关键核数据，贯穿整个核物理实验发展的历史；
- 与能级高度相比，能级寿命，以及推导出的退激射线的约化跃迁概率，可以被视作一个更灵敏的原子核结构探针。

$$T_{if}(\lambda L) = \frac{8\pi(L+1)}{\hbar L((2L+1)!!)^2} \left(\frac{E_\gamma}{\hbar c} \right)^{2L+1} B(\lambda L; J_i \rightarrow J_f)$$

$$B(\lambda L, j_i \rightarrow j_f) = \frac{1}{2j_i + 1} | \langle j_f | M(L) | j_i \rangle |^2$$

快时间gamma探测器阵列

- 利用gamma谱学的方式研究原子核结构信息（激发能高度，寿命，磁矩……），测量关键核数据，贯穿整个核物理实验发展的历史；
- 与能级高度相比，能级寿命，以及推导出的退激射线的约化跃迁概率，可以被视作一个更灵敏的原子核结构探针。

$$T_{if}(\lambda L) = \frac{8\pi(L+1)}{\hbar L((2L+1)!!)^2} \left(\frac{E_\gamma}{\hbar c} \right)^{2L+1} B(\lambda L; J_i \rightarrow J_f)$$

$$B(\lambda L, j_i \rightarrow j_f) = \frac{1}{2j_i + 1} | \langle j_f | M(L) | j_i \rangle |^2$$

- 特别是当初末态之间主要组态之间的跃迁被禁戒的时候，寿命测量对研究“关键”的少数组态十分重要！
- 比如：辛弱数对称性破缺，L-forbidden M1 transition 等等……

探测原子核激发态能级寿命的不同方法

Lower limit

Upper limit

直接测量：需要高时间分辨的gamma探测器

Electronic timing

10 ps

∞^*

间接测量：HPGe/Clover+多普勒效应

RDDS

1 ps

100 ps

DSAM

10 fs

10 ps

Lineshape

1 fs

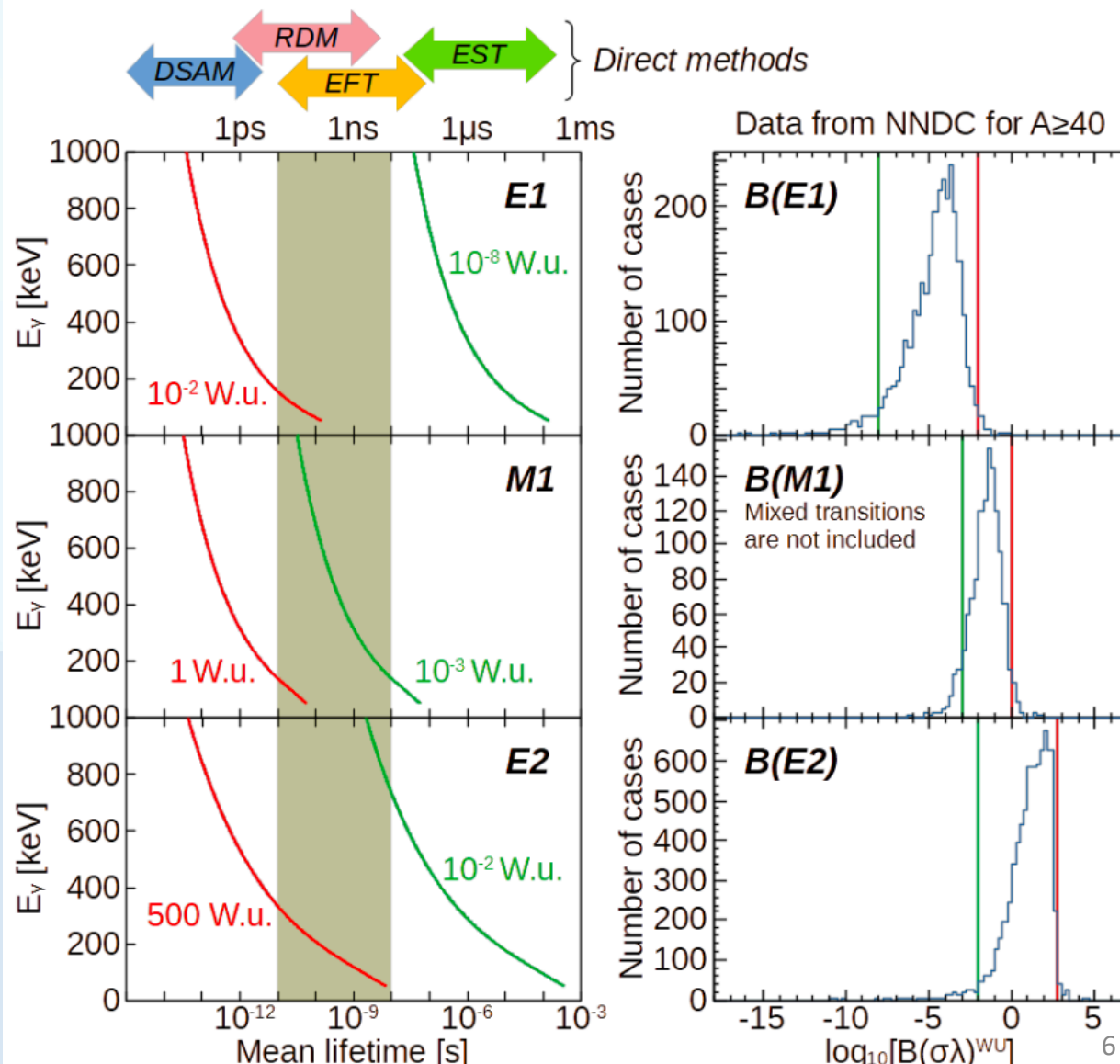
100 fs

间接测量：测量库伦激发截面

CouEx

0^*

∞^*



国际上快时间gamma探测器阵列

- FATIMA from Surrey Univ, start from 2014,
- 36 $1.5 \times 2 \text{ inch}^2$ LaBr_3 , used at Argonne, GANIL, RIBF-RIKEN, GSI.....

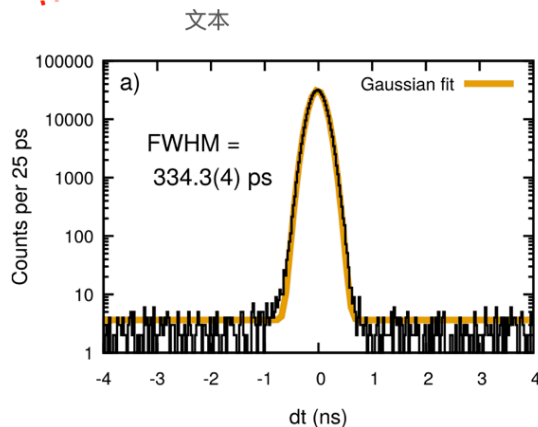


Fig. 14. (Colour online) Different setups in which the FATIMA detectors described in this paper have been mounted and used in experiments or tests. (a) At Argonne National Laboratory with half of the Gammasphere array. 25 detectors mounted in a hemisphere. (b) At the University of Surrey, some detectors are mounted on the DESPEC FATIMA frame in its core configuration with space for 36 detectors on three rings. (c) At GANIL at the LISE station together with HPGe Clover detectors. (d) At IPN Orsay during the v-Ball campaign 2017/2018. (e) At IPN Orsay for the Stella experiment. 36 detectors in a semi-cylindrical configuration. A manual lift system with counter-weights is used to allow access to the target chamber. (f) At RIKEN during the EURICA campaign. The detectors have been placed in free spaces in the array in clusters of six. (g) and (h) At GSI in the S4 cave in the configuration designed for use in the DESPEC station for FAIR (AIDA snout and rack to the left, beam from left to right).

- 关键点：
 - ➔ $\sim 330 \text{ ps}$ 的时间分辨,
 - ➔ 模拟电子学线路,
 - ➔ 可移动性强。

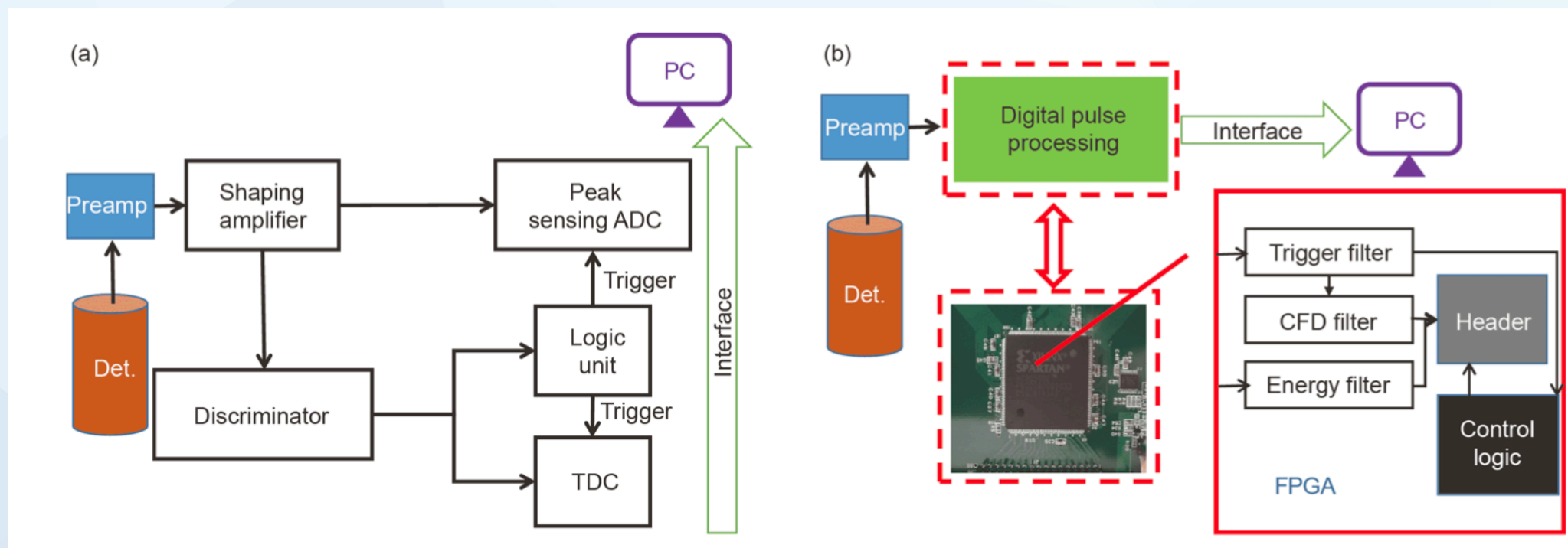
国内快时间gamma探测器阵列

- 国内不同gamma谱学实验组也都在组建快时间探测器阵列
 - ➔ IMP: around **20** LaBr₃ with crystal size of 2*3 inch², Coupled with R2083 PMT
 - ➔ CIAE: around **30** LaBr₃ with crystal size of 1.5*2 inch², Coupled with R6231 PMT
 - ➔ **SYSU-IFCEN**: **18** LaBr₃ with crystal size of 2*3 inch², Coupled with R13089 PMT
 - ➔ Shenzhen tech. University: **6** LaBr₃ with crystal size of 1.5*2 inch², Coupled with R6231 PMT
 - ➔ Beihang univ. , Shan Dong univ.....
- ***In total*** more than 60 LaBr₃
- But crystal size and PMT are quite different with each other ***Why?***
- Larger crystal, larger efficiency, worse time resolution
- R6231 PMT has a slower typical rise time (8.5 ns)
- R2083 PMT has a faster typical rise time (around 2 ns)
- R13089 PMT has a fastest typical rise time (<2 ns)
- Common: 500 MHz, 14-bit or 1 GHz, 12(10)-bit digitizer
- Which PMT is best with 500-MHz digitizer?

关键技术：数字化定时！

快时间探测阵列存的问题：

- 传统的**模拟电路**定时方法：CFD（恒比定时）+TAC（时间-幅度转换器）+ADC，时间分辨性能好；
- 但是线路复杂，需要插件多，死时间大，不适合高计数率和大规模阵列；
- **数字化获取**，滤波参数/trigger均可灵活调节，死时间小，在能谱测量上已经被证明性能由于模拟电路方法；**但定时精度仍然受到采样周期的限制！**

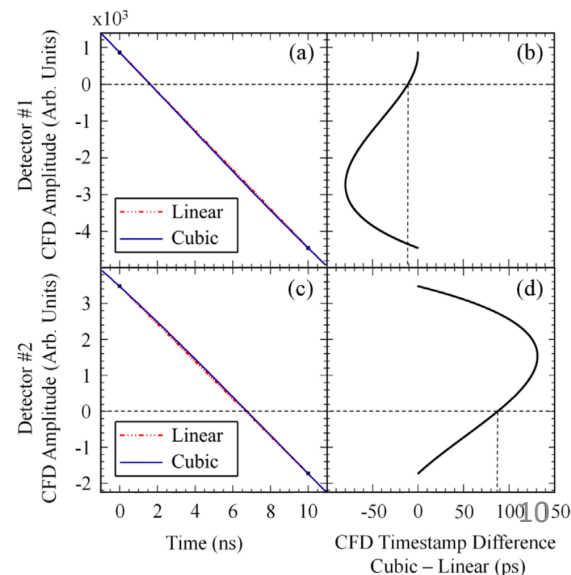
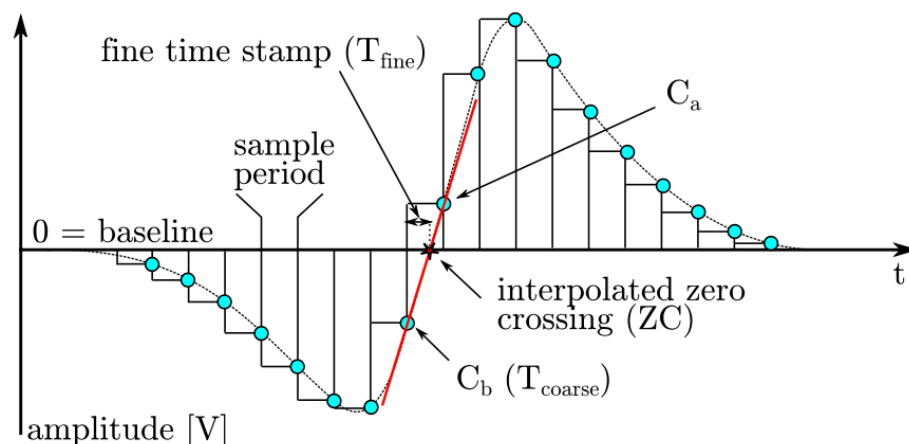
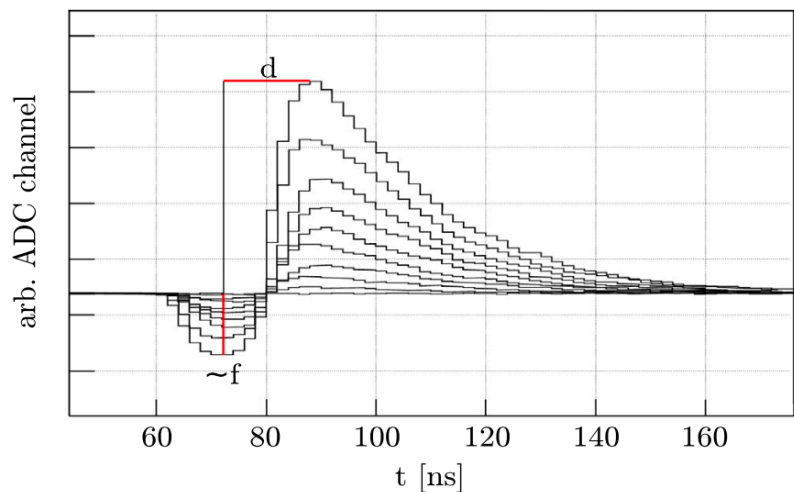


吴鸿毅, 李智焕*, 吴婧, 华辉, 王翔, 李湘庆, 徐川, 科学通报, 2021年 第66卷 第27期:3553~3560

关键技术：数字化定时(基于传统方法)

快时间探测阵列存的问题：

- 传统的**模拟电路**定时方法：CFD（恒比定时）+TAC（时间-幅度转换器）+ADC，时间分辨性能好；
- 但是线路复杂，需要插件多，死时间大，不适合高计数率和大规模阵列；
- **数字化获取**，滤波参数/trigger均可灵活调节，死时间小，在能谱测量上已经被证明性能由于模拟电路方法；**但是**
 - ➔ 恒比定时中，**delay**无法根据实际需要灵活调整，一般只能选择采样周期整数倍，
 - ➔ 过零定时精度受到采样周期和相位的影响！
- 500 MHz = 采样周期 2 ns， 1 GHz = 1ns，FPGA一般通过线性内差找过零点。



关键技术：数字化定时(新方法?)

- 奈奎斯特条件:采样频率高于信号频率的2 倍时, 可通过采样波形 $w_s(x)$ 与 $\text{sinc}(x)$ 函数在无穷范围内的卷积, 还原连续波形 $w(x)$;

IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 64, NO. 12, DECEMBER 2017

- 数字化获取新的定时方式: 在已有采样点的基础上, 内插更多的点来尽可能恢复原波形!
- 保持纵向精度的基础上, 增加横向定时精度!

$$tsinc[i] = \text{sinc}\left(\frac{i\pi}{N}\right) \exp\left(-\left(\frac{i}{T}\right)^2\right)$$

$$g(j, k) = \sum_{i=0}^{L-1} (data[j - i]tsinc[iN + k] + data[j + 1 + i]tsinc[(i + 1)N - k])$$

$$g(x) = \text{sinc}(x) * g_s(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(\lambda) g_s(x - \lambda) d\lambda$$

$$\text{sinc}(\lambda) = \sin\lambda/\lambda.$$

- Original Sampling rate: 100 MHz
- Change to 2 GHz

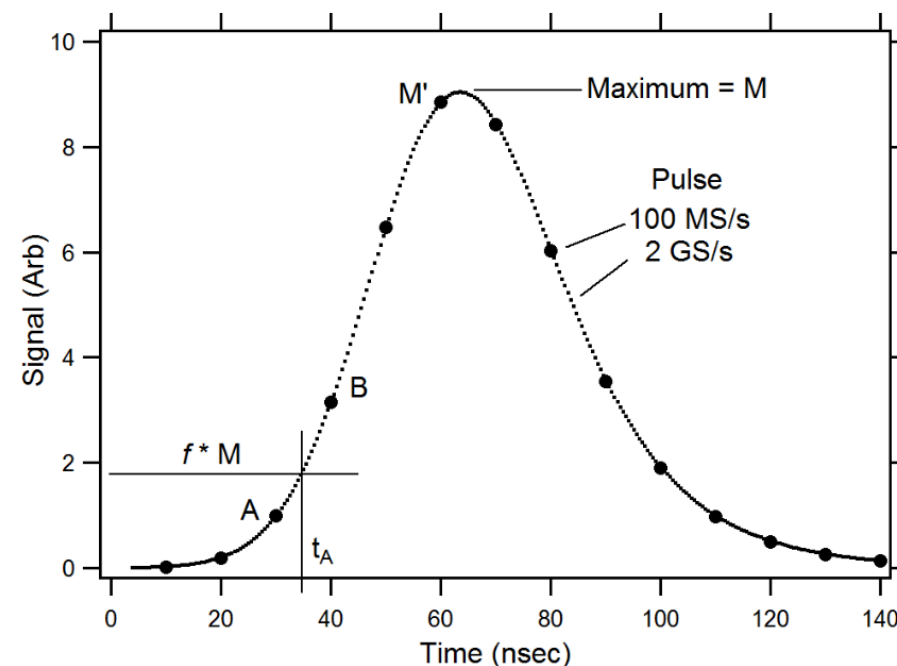
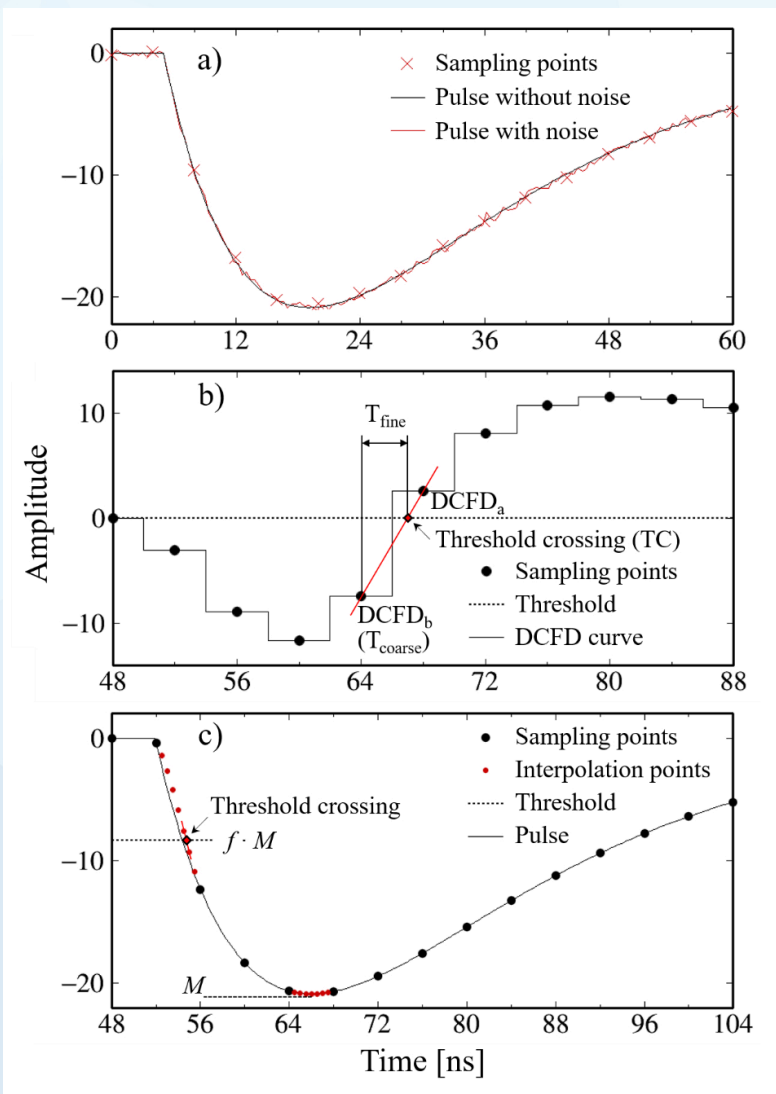


Fig. 2. Fast pulse digitized at two sampling frequencies, showing how the application of DCFD produces errors at lower sampling rates.

波形分析仿真-系统性的寻找最佳波形分析参数



- 通过 $y(t) = A \left(e^{-\frac{t-t_0}{t_d}} - e^{-\frac{t-t_0}{t_r}} \right)$ 函数模拟原始信号，添加噪音，并采样（500 MHz or 1 GHz digitizer）；
- 在两个原始信号的时间差，加入高斯晃动 σ_{in} ，模拟本征时间分辨；
- 利用不同的恒比定时方法，对两个信号进行定时，并提取两信号时间差分布的 σ_{out} ，与 σ_{in} 的区别即体现了噪音，相位，采样率等因素对定时的影响。

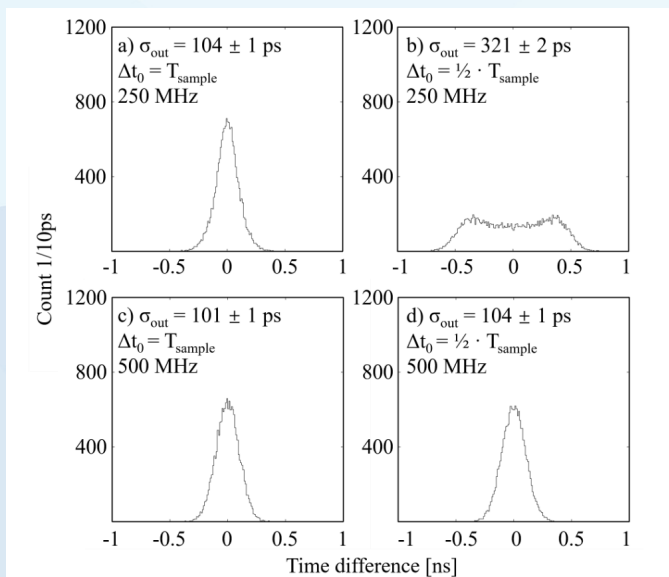


图 4 采样频率、相位差对 Traditional DCFD 定时精度的影响。

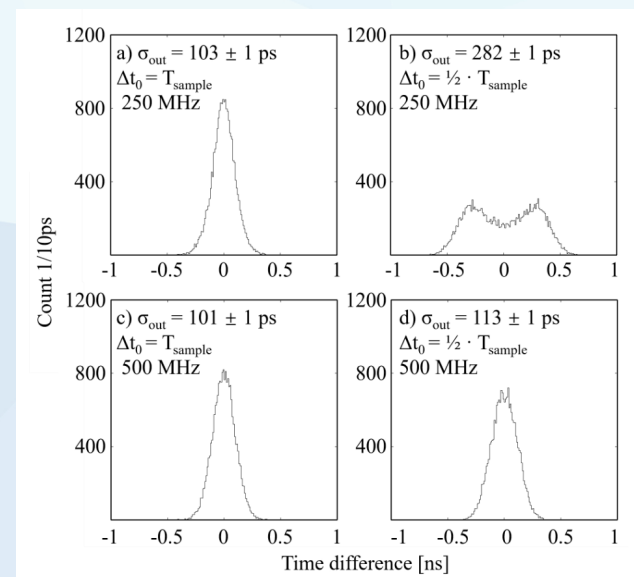


图 5 采样频率、相位差对 TSINC DCFD 定时精度的影响。

基于传统CFD方法的数字化定时方法

$$DCFD(i) = f \cdot w_s(i) - w_s(i - t_{delay})$$

基于 TSINC 插值的恒比定时方法

$$w(j, k) = \sum_{i=1}^L \left[\text{TSINC} \left((i-1) + \frac{k}{N+1} \right) w_s(j - (i-1)) \right. \\ \left. + \text{TSINC} \left(i - \frac{k}{N+1} \right) w_s(j + i) \right]$$



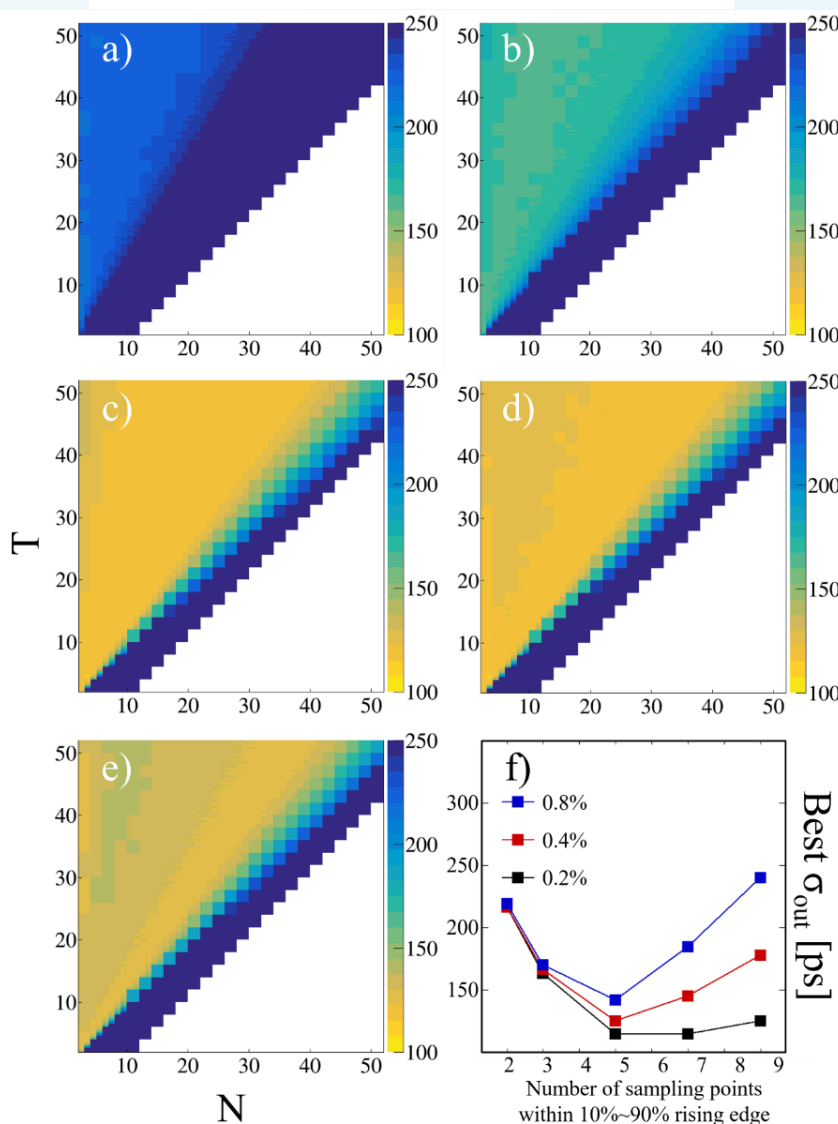
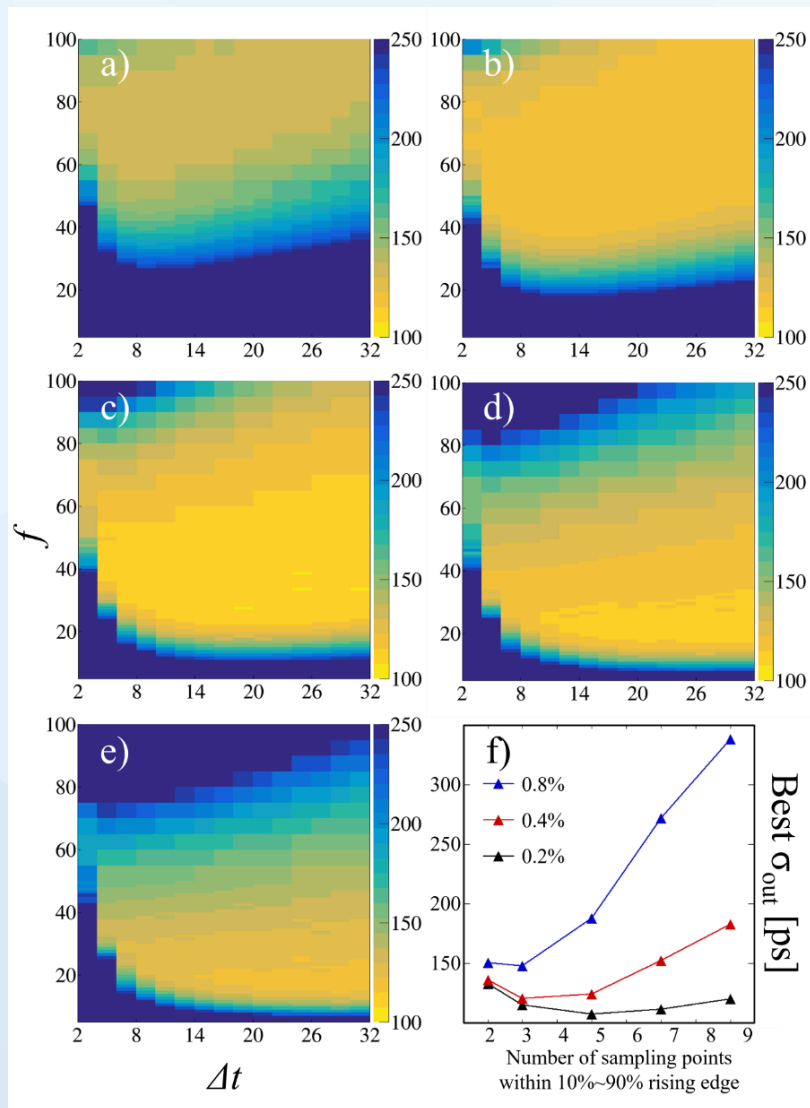
• 初步结论:

(1) 为达到300 ps左右的时间分辨, 500 MHz采样率是最低要求;

(2) 若目标是10 ps左右的时间分辨, 则采样率一定要在1 GHz以上, 否则相位对时间分辨的影响巨大;

(3) 与模拟电路不同, 数字化定时并不是上升沿越短越好;

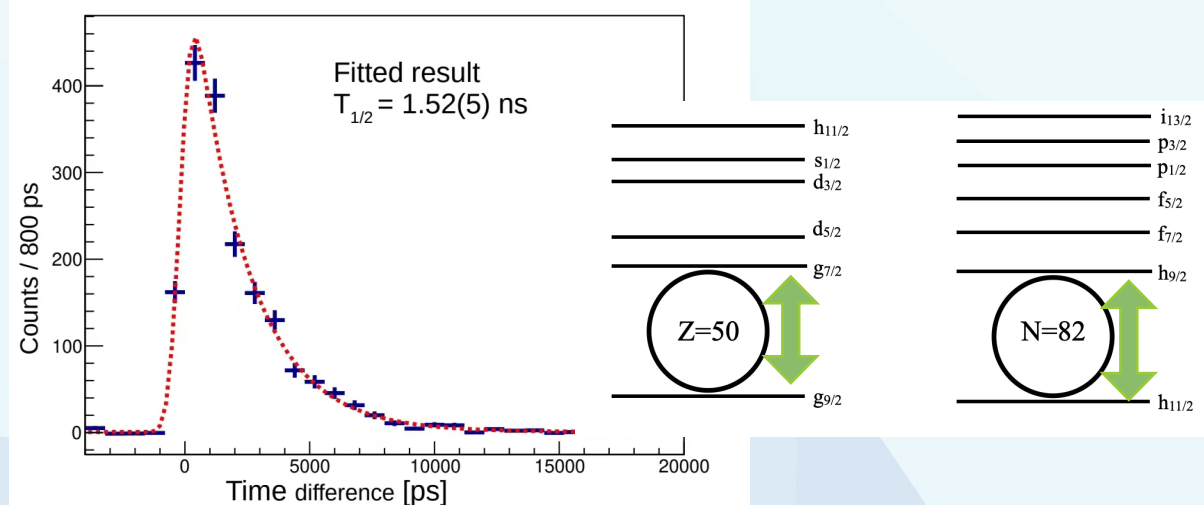
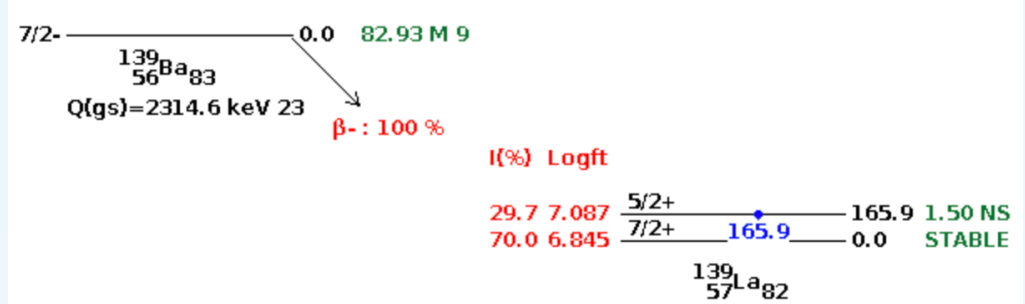
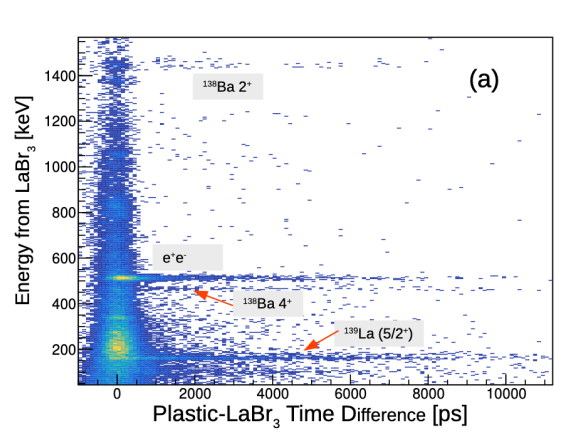
(4) 需要得到不同探测器(晶体尺寸+PMT类别)的输出信号的“样本函数”, 才能有效确定需要的定时参数。



国内快时间gamma探测器阵列：测试实验



- 2023年11月，2个2*3 inch² 的LaBr₃，塑闪+PMT，数字化获取，离线测量阵列，
- ¹³⁸Ba靶放在中子束流线上辐照活化，然后进行离线测量，
 - ¹³⁸Ba中子俘获后产生¹³⁹Ba，beta-衰变到¹³⁹La，主要布局基态和第一激发态，
 - ¹³⁹La, N=82, Z=57，第一激发态到基态之间的跃迁：L-forbidden M1 transition (g7/2, d5/2).



- 结论：
 - (1) LaBr₃ + 数字化获取 (500 MHz) + 离线beta-gamma符合测量，足够测量ns量级原子核激发态寿命；
 - (2) 根据壳模型理论计算，质子-中子跨壳激发对解释L-forbidden M1 transition 强度至关重要！

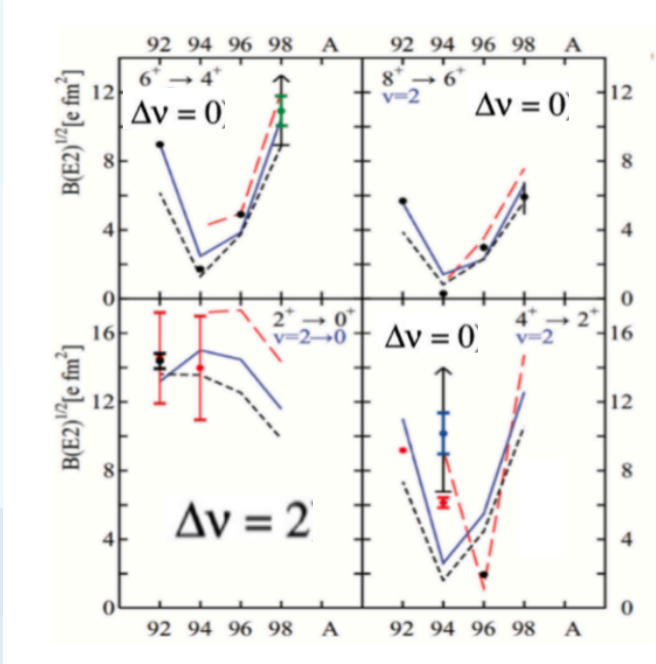
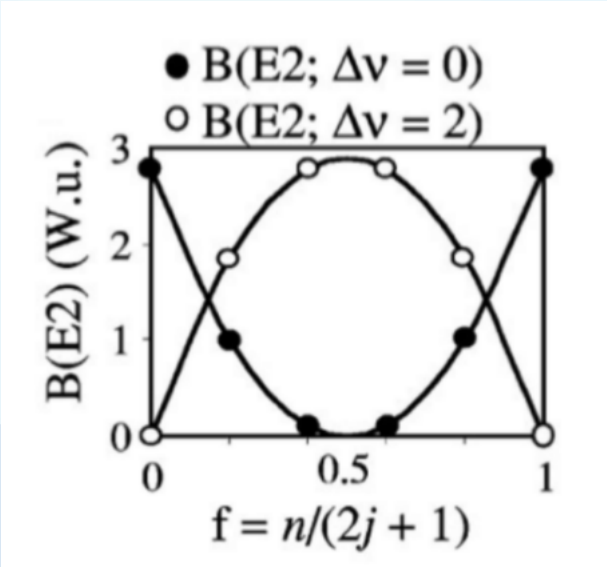
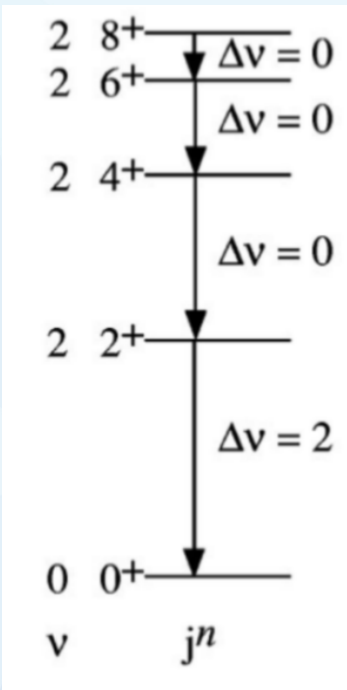
Table 1 Theoretical predictions of the 5/2⁺ → 7/2⁺ transition strength in ¹³⁹La with different truncations

Core-excitation	$B(M1) [\mu_N^2]$	$T_{1/2}^{partial} (M1) [ns]$	$B(E2) [e^2 fm^4]$	$T_{1/2}^{partial} (E2) [ns]$	$T_{1/2}^{total} [ns]$	$B(M1)^* [\mu_N^2]$	$T_{1/2}^{total*} [ns]$
None	2.2×10^{-5}	309.8	0.938	142.3	97.5	1.5×10^{-3}	4.5
p1	6.9×10^{-4}	9.9	0.478	279.5	9.5	3.5×10^{-3}	1.9
n1	2.8×10^{-4}	24.6	0.802	166.5	21.5	2.5×10^{-3}	2.7
p1n1	1.3×10^{-3}	5.4	0.348	383.9	5.3	4.6×10^{-3}	1.5

国内快时间gamma探测器阵列：测试实验



- 2024年5月在兰州gamma终端, $^{36}\text{Ar} + ^{64}\text{Zn}$, 束流能量160 MeV;
- 4 Clover and 26 LaBr₃ + 数字化获取;
- 测量 ^{92}Mo , ^{93}Tc , ^{94}Ru 等核素激发态寿命, 解决之前的实验矛盾;
- 质子g_{9/2}轨道辛弱数对称性破缺研究。



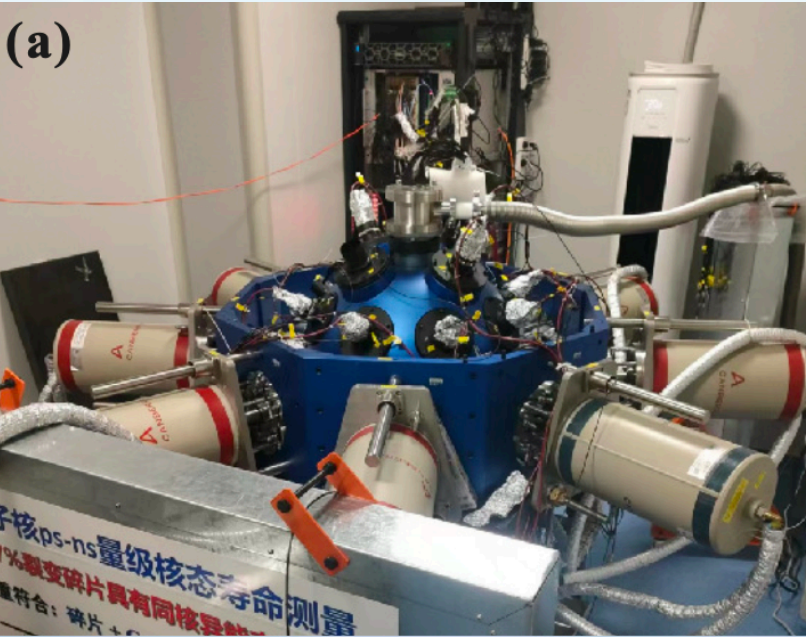
Nucleus	J ^π	τ(ps)	
^{92}Mo	4^+	35.5(6)	PHYSICAL REVIEW LETTERS 129, 112501 (2022)
		22.5(11)	PHYSICAL REVIEW C 108, 064313 (2023)

Nucleus	J ^π	τ(ps)	
^{94}Ru	4^+	87(8)	PHYSICAL REVIEW LETTERS 129, 112501 (2022)
		32(11)	PHYSICAL REVIEW C 105, L031304 (2022)
		66(2)	PHYSICAL REVIEW C 110, 034320 (2024)

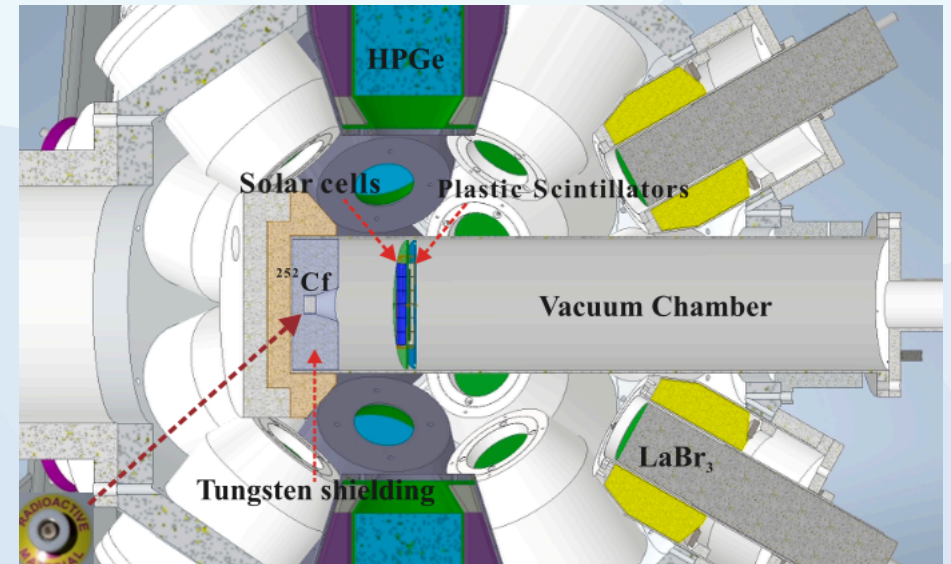
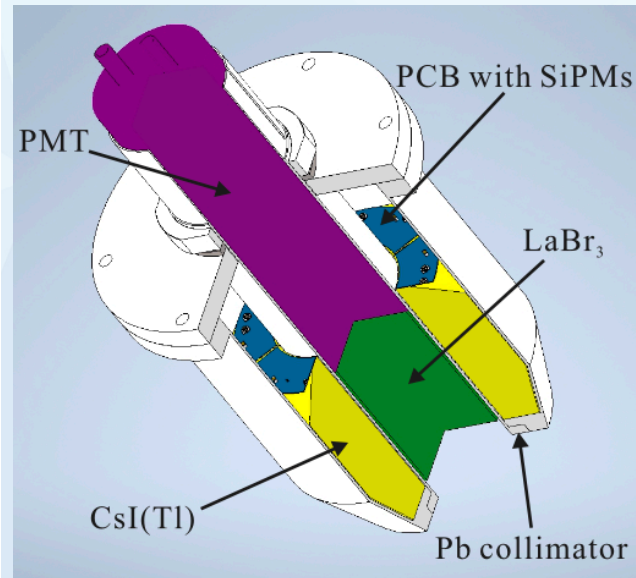
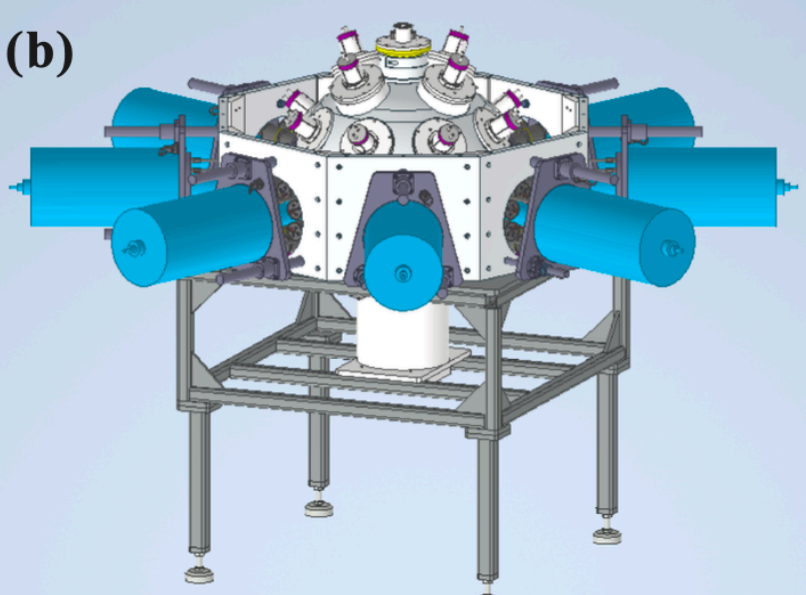
国内快时间gamma探测器阵列: HALIMA@IMP



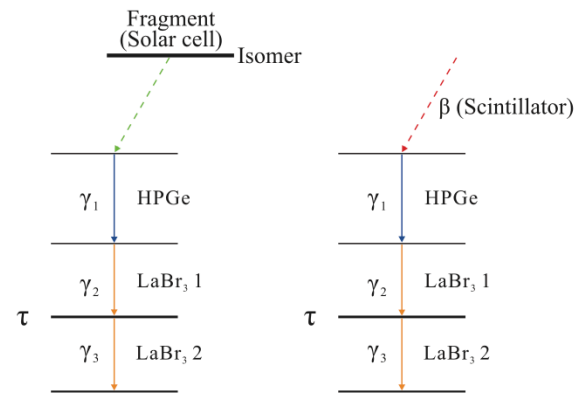
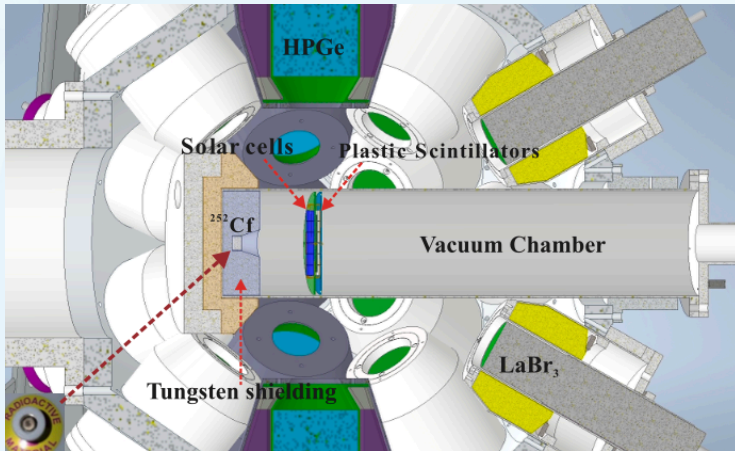
中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



- ➔ HALIMA (Hybrid Array for Lifetime MeAsurement)
- ➔ 100 μCi ^{252}Cf source
- ➔ Solar detector to stop fission fragment,
- ➔ Plastic scintillator to measure beta-ray,
- ➔ 8 HPGe + 20 LaBr₃ for gamma-ray,
- ➔ Accumulated more than 12 months data (2023.11– now), and the analysis seems promising!

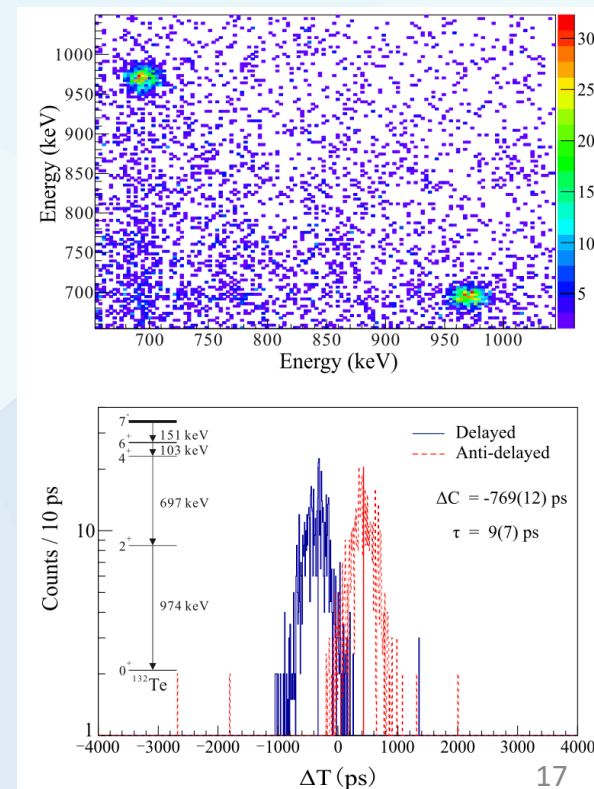
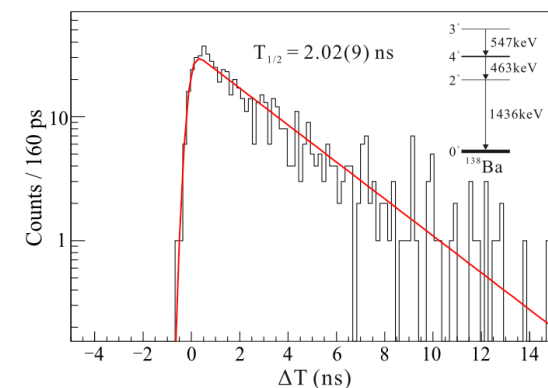
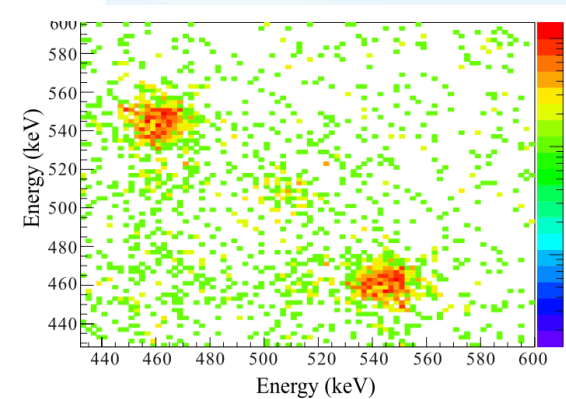
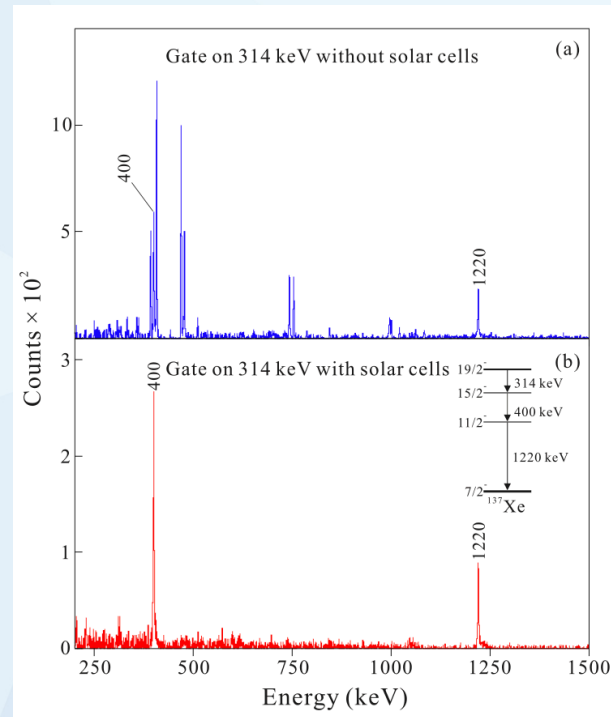


国内快时间gamma探测器阵列: HALIMA@IMP



- ➔ HALIMA (Hybrid Array for Lifetime Measurement)
- ➔ Lifetime measurement from
 - (a) Solar + triple gamma: Isomeric decay,
 - or (b) Plastic + triple gamma: beta decay,

➔ More detailed in Huang Yuyan's (黄雨嫣) presentation 《²⁵²Cf裂变碎片中^{115,117}Cd激发态寿命测量》



Conclusion

- 快时间gamma阵列，可以从更精确的揭示奇特原子核结构信息，探究跨壳激发，形状共存等关键物理问题；
- 目前，中山大学中法核团队拥有18个溴化镧探测器，正规划再购买相同探测器6个；
- 数据化获取系统的发展，大大简化了测量流程，提高测量精度和效率；
- 高精度数字化定时方法仍在发展，大量的实验工作、物理分析有待开展；
- 在白光继续开展离线衰变测量（伴随）实验；
- 期待在白光进行在线gamma/裂变碎片激发态寿命测量实验。

感谢团队/合作者：

中山大学中法核：袁岑溪，苏军，祝龙，魏月环，梅波，
滑伟，张振，张玉美，张一怒，方晓.....

近代物理研究所：方永得，李广顺，郭松，刘忠，张文强

白光：樊瑞睿，蒋伟，陈永浩，孙康.....

原子能院：吴晓光，吴鸿毅

深圳大学：胡世鹏

深圳技术大学：钟健

北大：华辉，李智焕

北航：孙保华，赵建伟.....



Welcome to IFCEN @ SYSU!





中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

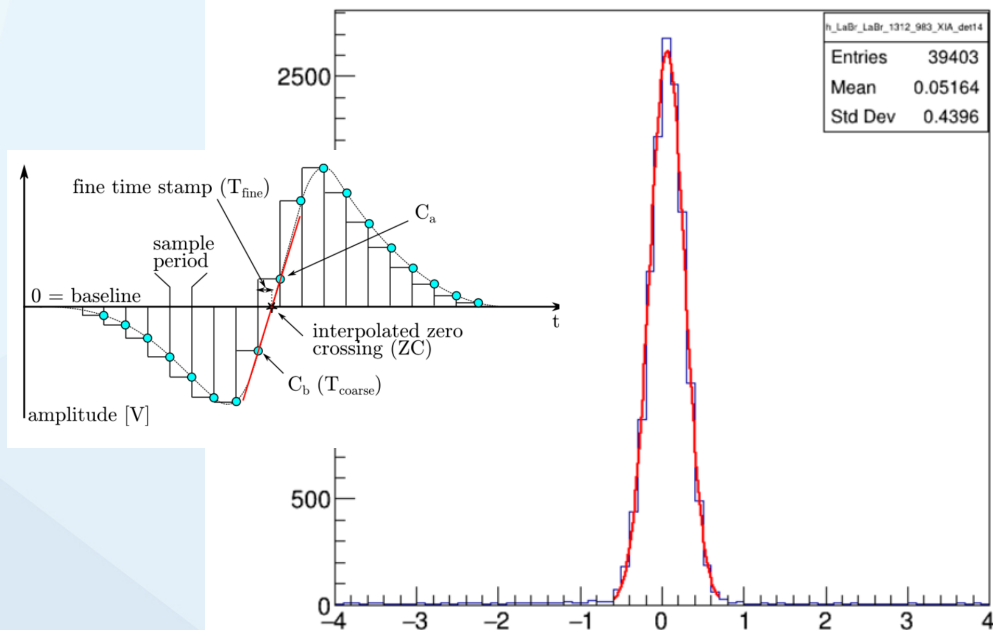
数字化定时

>> 利用实验数据初步观测到了时间分辨的提升

LaBr3 48Ti

det15 timeresolution

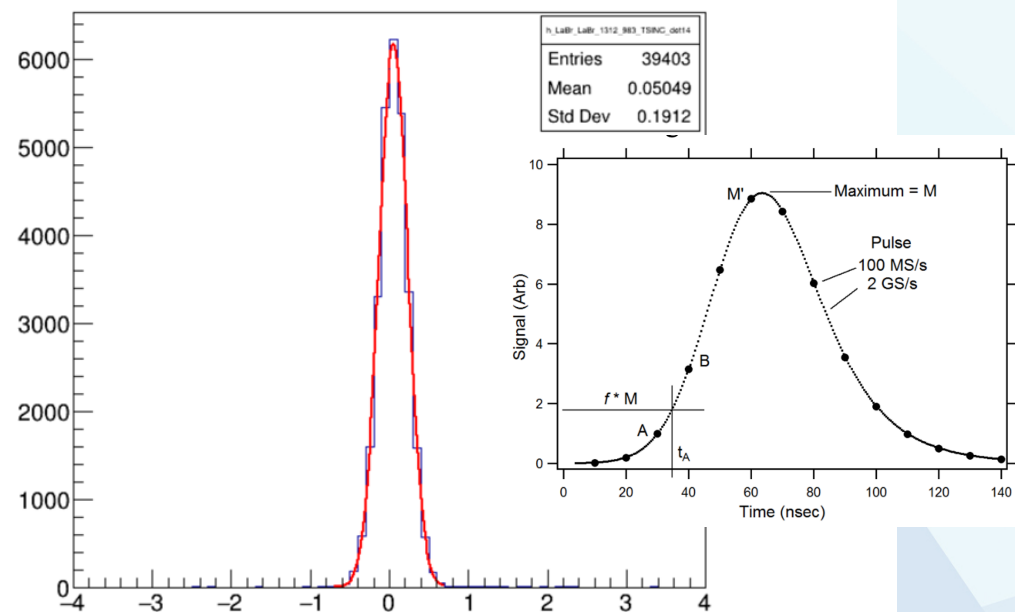
XIA CFD算法



FWHM=507(3)ps

传统的数字化双极性CFD

TSINC算法



FWHM=432(1)ps

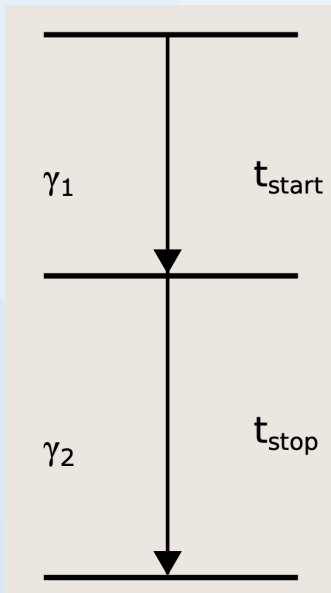
数字化内差法CFD

14%的提升!

Vs

Lifetime of Nuclear Excited states

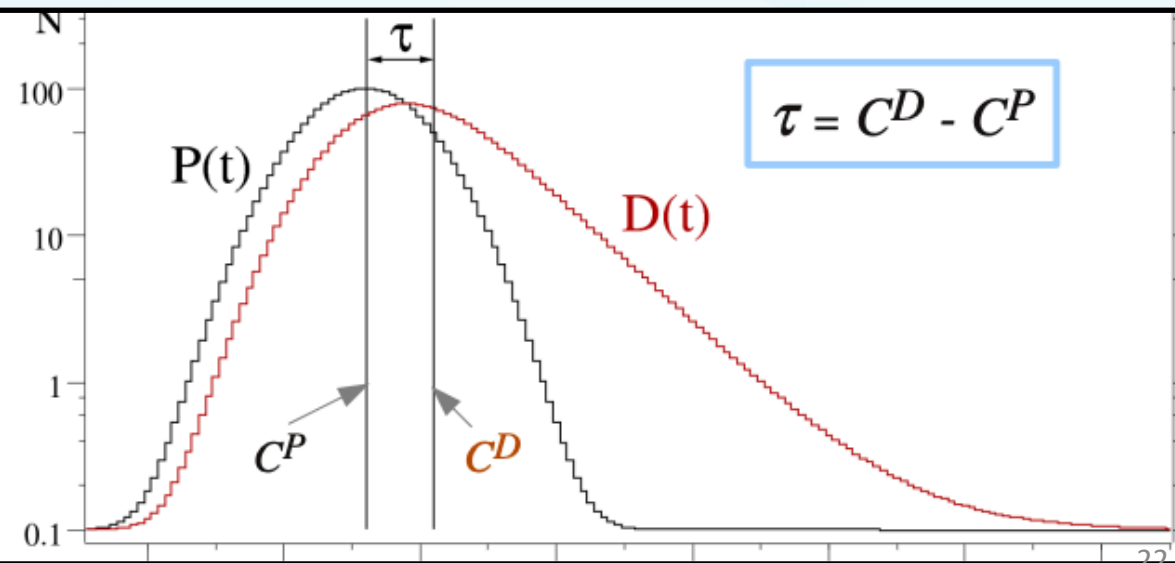
- Direct electronic timing measurement
 1. When τ is *significantly larger than* the *time resolution* (FWHM of the prompt time-difference distribution), *slope fitting* of the measured time distribution with an EXPO function,
 2. When τ is *comparable* to the *time resolution*, *convolution* fitting (between the *Gaussian and EXPO*)
 3. When τ is *smaller* than the time resolution, only the centroid of time distribution deviates from the prompt one (*centroid shift* or centroid difference method)



The centroid or center of gravity is the first moment of a time distribution $D(t)$:

$$C^D = \langle t \rangle = \frac{\int t D(t) dt}{\int D(t) dt}$$

The statistical uncertainty is given by the standard deviation $\sigma = \text{FWHM}/2.355$ of the PRF:



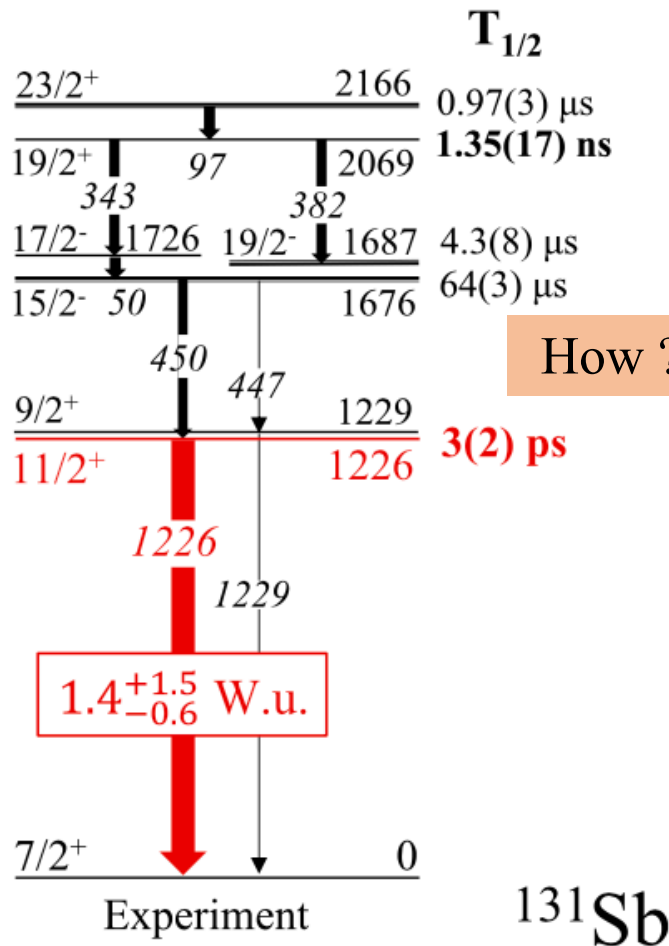
An example

- In PRC 107, 014322 (2023), S. Bottoni et al. measured a 3(2) ps lifetime for the first excited state in ^{131}Sb at LOHENGRIN spectrometer of the Institut Laue-Langevin

• Nearly background-free

• High statistic / good time resolution

$$\Rightarrow \text{Uncertainty of centroid} \propto \frac{FWHM}{\sqrt{N}}$$



How ?

