



第三届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

基于人工神经网络的高纯锗 γ 能谱仪 康普顿散射事例甄别方法

Method Based on An Artificial Neural Network for Discriminating Compton Scattering Cases in A High-purity Germanium γ -ray Spectrometer

汇报人：樊纯頔 博士研究生

导师：曾国强 教授

汇报时间：2024.05.08

先进核探测技术与仪器团队

目录

CONTENT



成都理工大学
CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

01

研究背景
BACKGROUND

02

理论研究
THEORY

03

方法研究
METHOD

04

实验结果和讨论
RESULT AND DISCUSSION

05

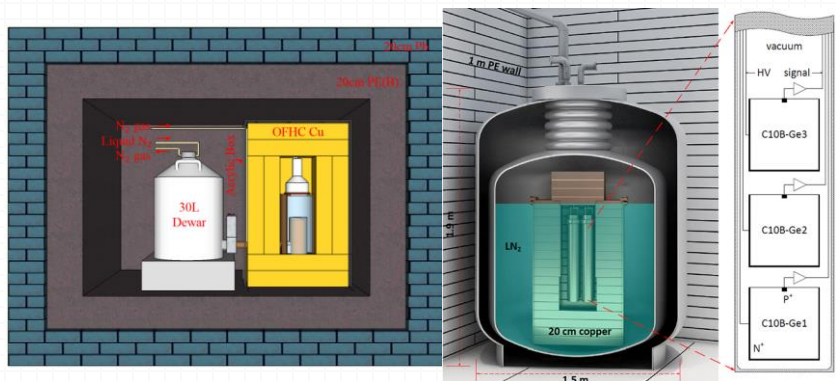
总结与展望
CONCLUSION

穷究于理

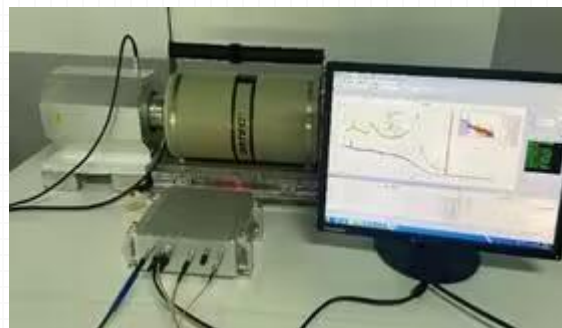
成就于工

• 研究背景

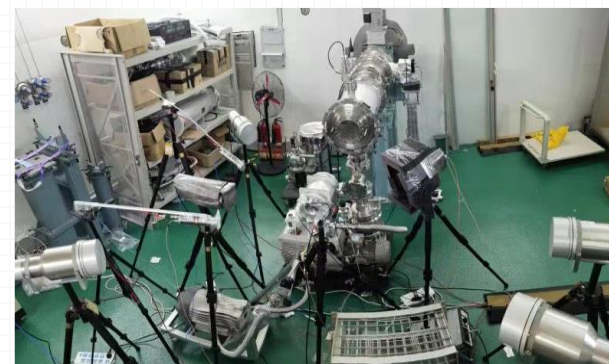
核反应事例类型甄别在核物理研究以及辐射探测中具有重要的意义。



$0\nu\beta\beta$ 衰变实验



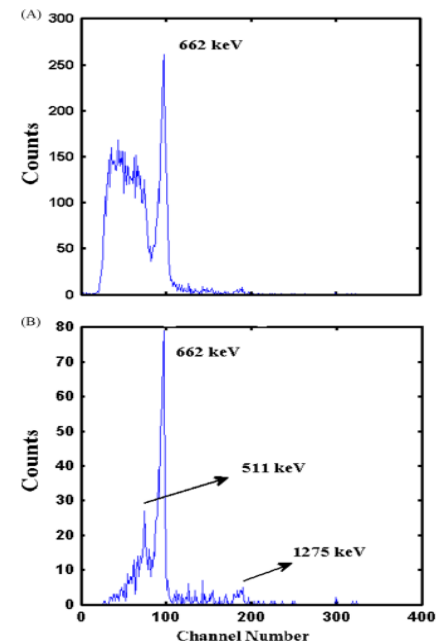
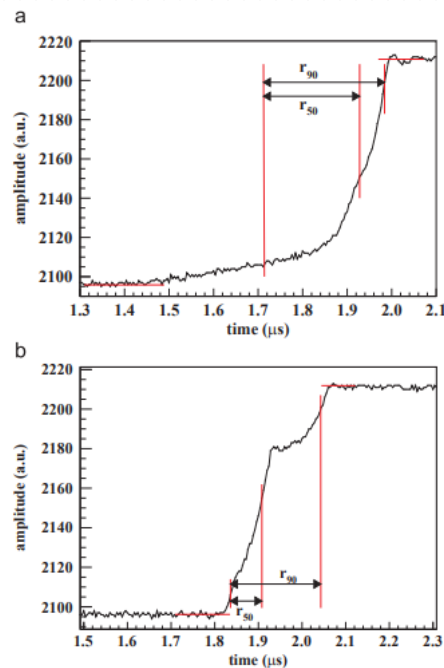
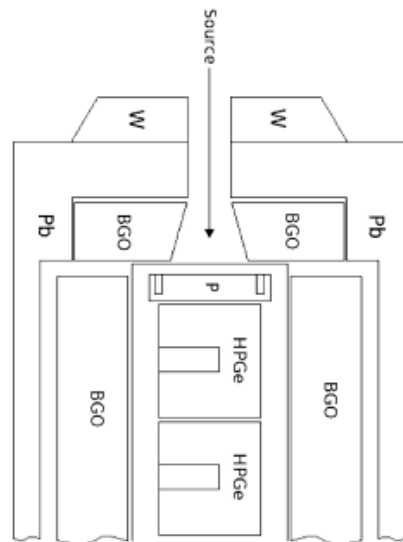
伽马射线能谱测量



中子探测

最小可探测活度 (MDA) 就是辐射探测系统的重要的性能指标之一，它直接关系到辐射探测系统对放射性核素的探测能力和探测灵敏度，是预判探测系统在给定测量环境中的应用中的适应性及探测灵敏度的重要指标。

研究背景



技术:

反康普顿高纯锗能谱仪

脉冲形状甄别(PSD)技术

特点:

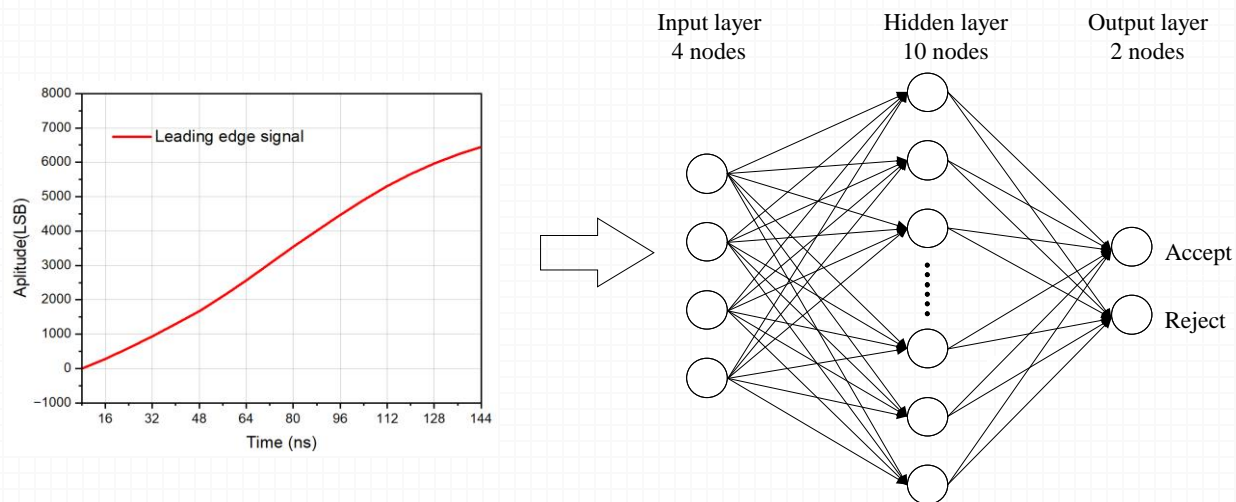
本底抑制效果好, 但设备昂贵、复杂, 难维护

容易实现, 但准确率低, 难以降低最小可探测活度 (MDA)

[1] Y.-H. Mi, H. Ma, Z. Zeng, J.-P. Cheng, J.-L. Li and H. Zhang, Compton suppression in BEGe detectors by digital pulse shape analysis, Applied Radiation and Isotopes, 121 (2017) 96-100.

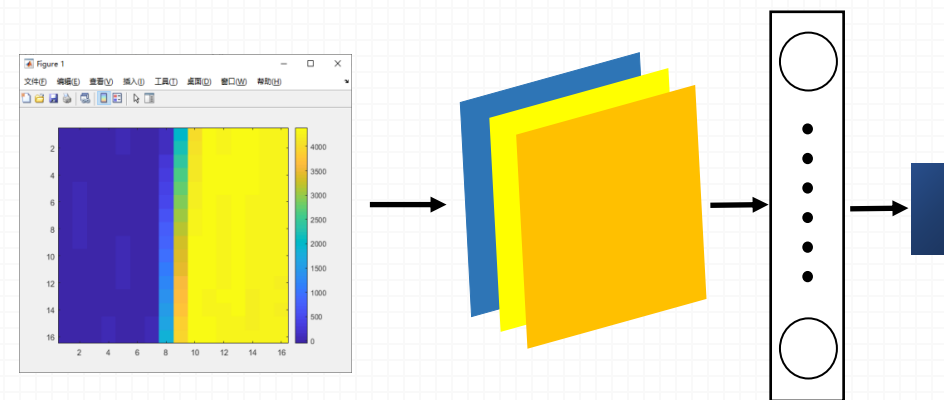
[2] M. Nakhostin, Z. Podolyak and P. J. Sellin, Application of pulse-shape discrimination to coplanar CdZnTe detectors, Nuclear Instruments and Methods A 729 (2013) 541-545.

研究背景



技术: 脉冲形状甄别(PSD)技术+全连接神经网络 (FC network)

特点: 准确率高, 可在单高纯锗探测器系统中降低最小可探测活度



卷积神经网络 (CNN)

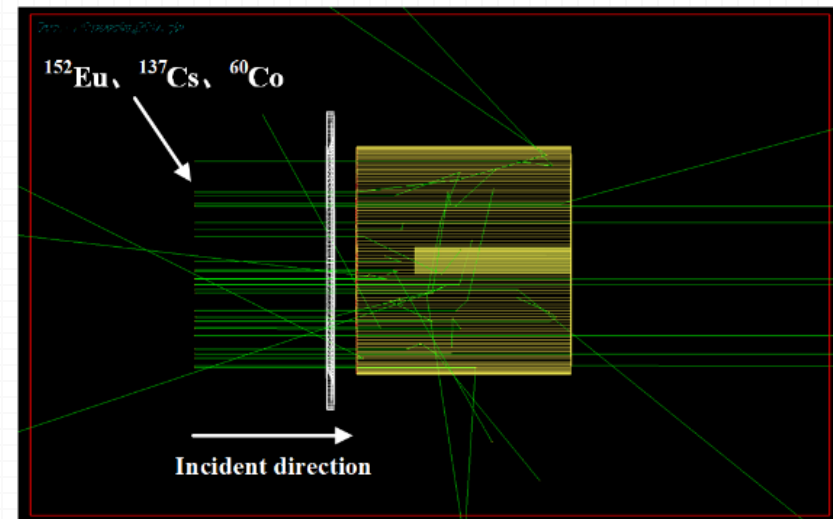
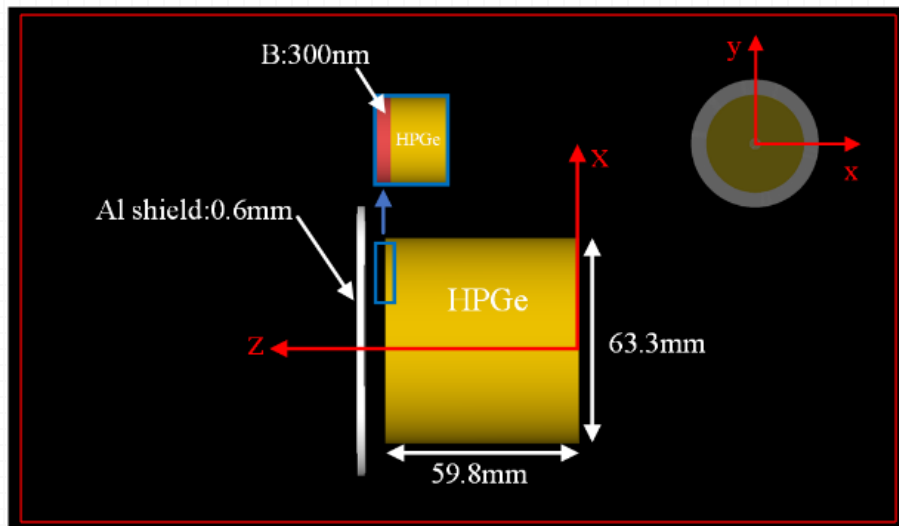
在全能量区间都有很高的准确率, 大大降低最小可探测活度

[1] Y.-H. Mi, H. Ma, Z. Zeng, J.-P. Cheng, J.-L. Li and H. Zhang, Compton suppression in BEGe detectors by digital pulse shape analysis, Applied Radiation and Isotopes, 121 (2017) 96-100.

[2] M. Nakhostin, Z. Podolyak and P. J. Sellin, Application of pulse-shape discrimination to coplanar CdZnTe detectors, Nuclear Instruments and Methods A 729 (2013) 541-545.

• 理论研究

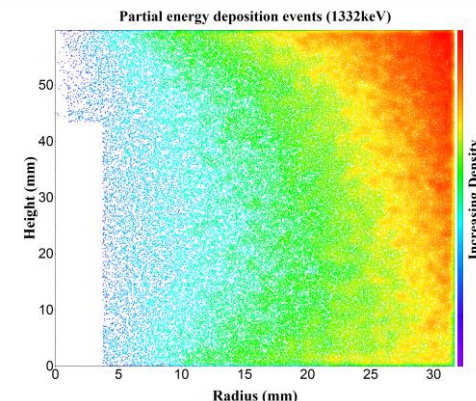
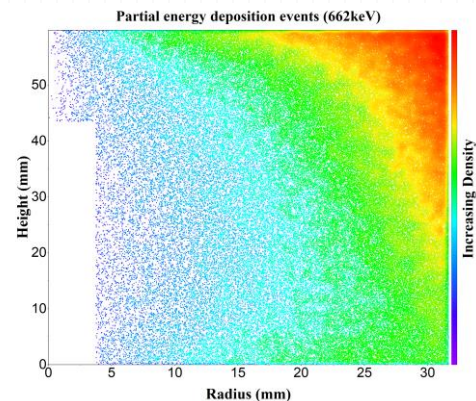
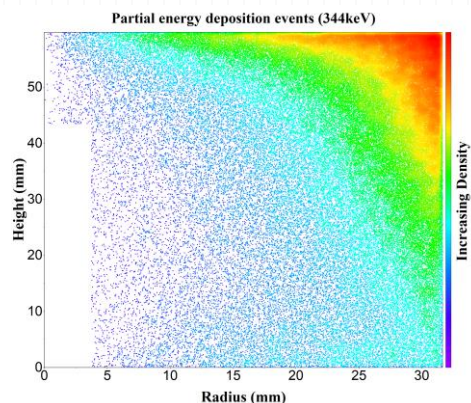
建立事例类型与能量沉积位置之间的联系。使用GEANT4工具包对高纯锗探测器进行建模，将来自 ^{152}Eu 、 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 放射源的344keV、662keV和1332keV能量的伽马射线从高纯锗探测器正上方入射进入探测器与之发射相互作用。



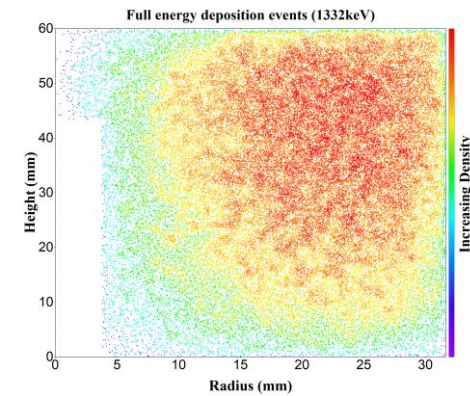
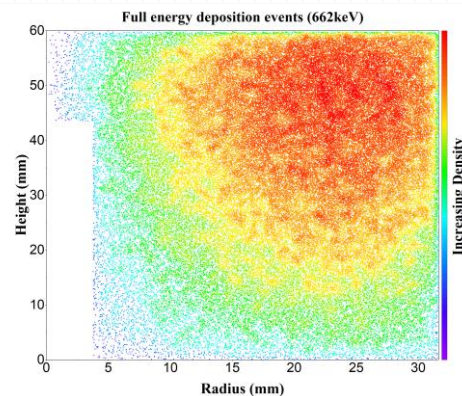
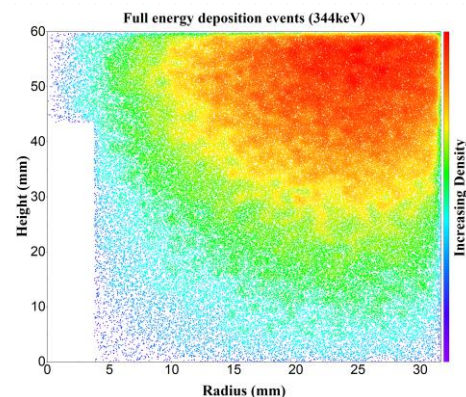
• 原理及方法

统计分析了 γ 射线在高纯锗探测器中的能量沉积位置。上面一排图逃逸事件的能量沉积位置靠近探测器边缘的阳极区域，右图全部能量沉积事件的位置靠近探测器中心区域。

部分能量沉积事例
位置分布



全能量沉积事例
位置分布



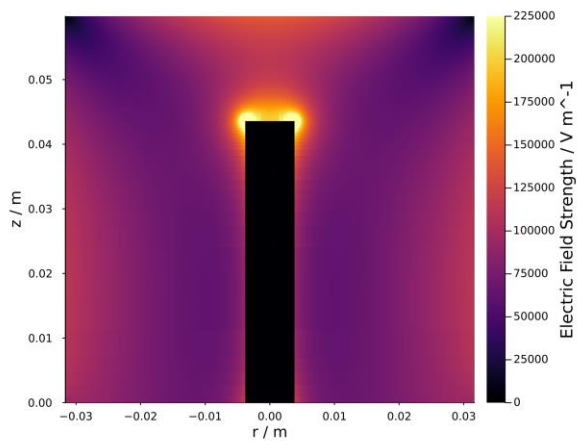
^{152}Eu (344-keV)

^{137}Cs (662-keV)

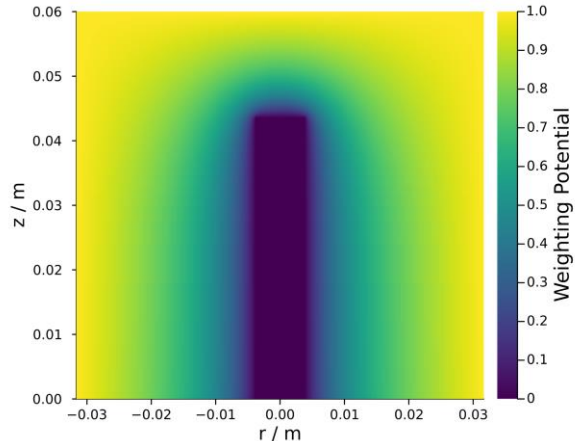
^{60}Co (1332-keV)

建立能量沉积位置与脉冲波形形状之间的联系

使用SolidStateDetectors.jl工具仿真了同轴型HPGe探测器内部的场强分布。



电场强度分布

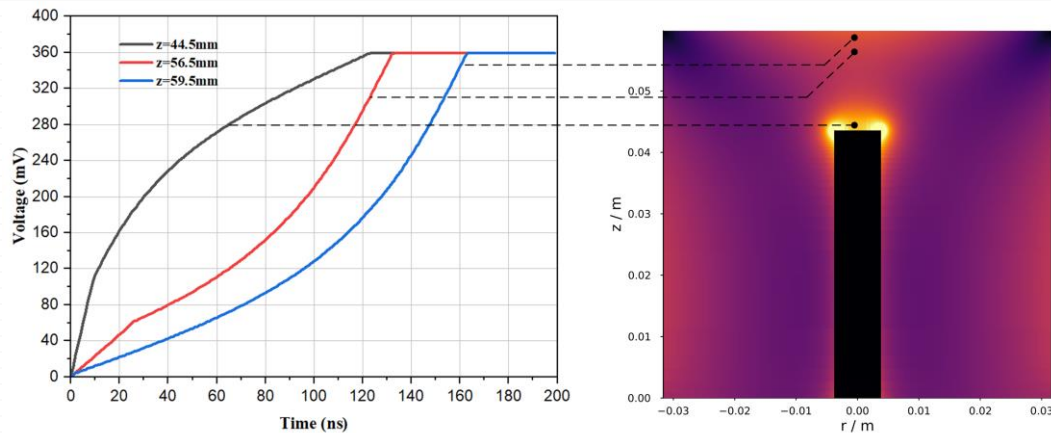


权电势分布

Shockley-Ramo定理:

$$Q(t) = -q\{\phi[r_h(t)] - \phi[r_e(t)]\}$$

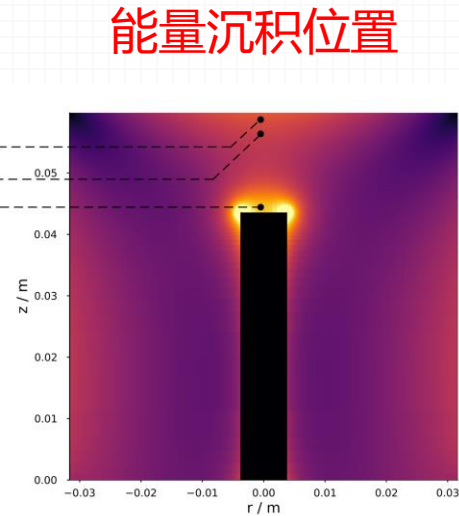
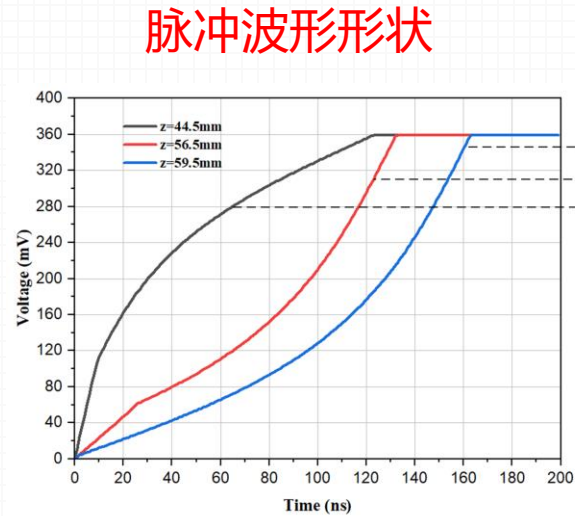
能量沉积位置从探测器阳极到探测器阴极变化时，前放输出的脉冲形状逐渐发生改变。



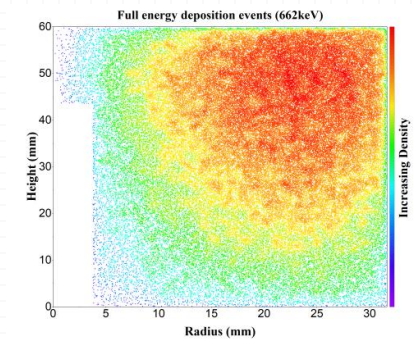
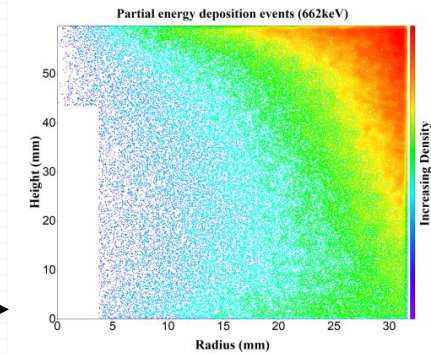
前置放大器输出电压信号:

$$U_{out}(t) \approx \frac{Q(t) \cdot e_0}{C_f}$$

建立与脉冲波形形状、能量沉积位置、事例类型之间的联系



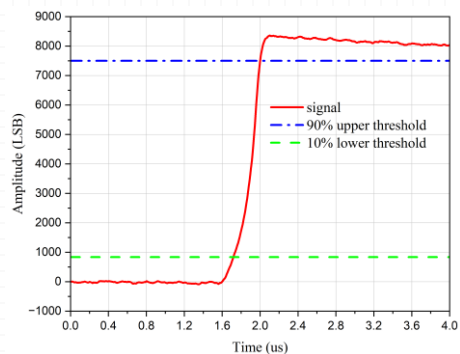
事例类型



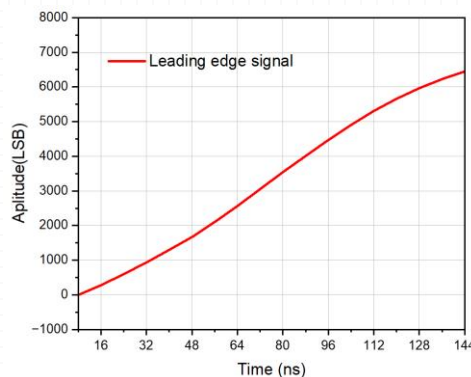
• 方法研究

PSD+ FC network

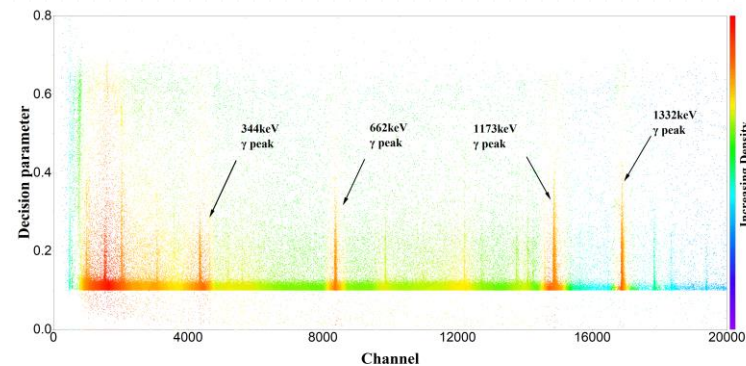
PSD算法提取脉冲波形的多个特征+全连接神经网络模型对特征赋予权重，根据输入的多个特征参数对事件类型进行分类，可更加精确的区分两类事件。



预处理



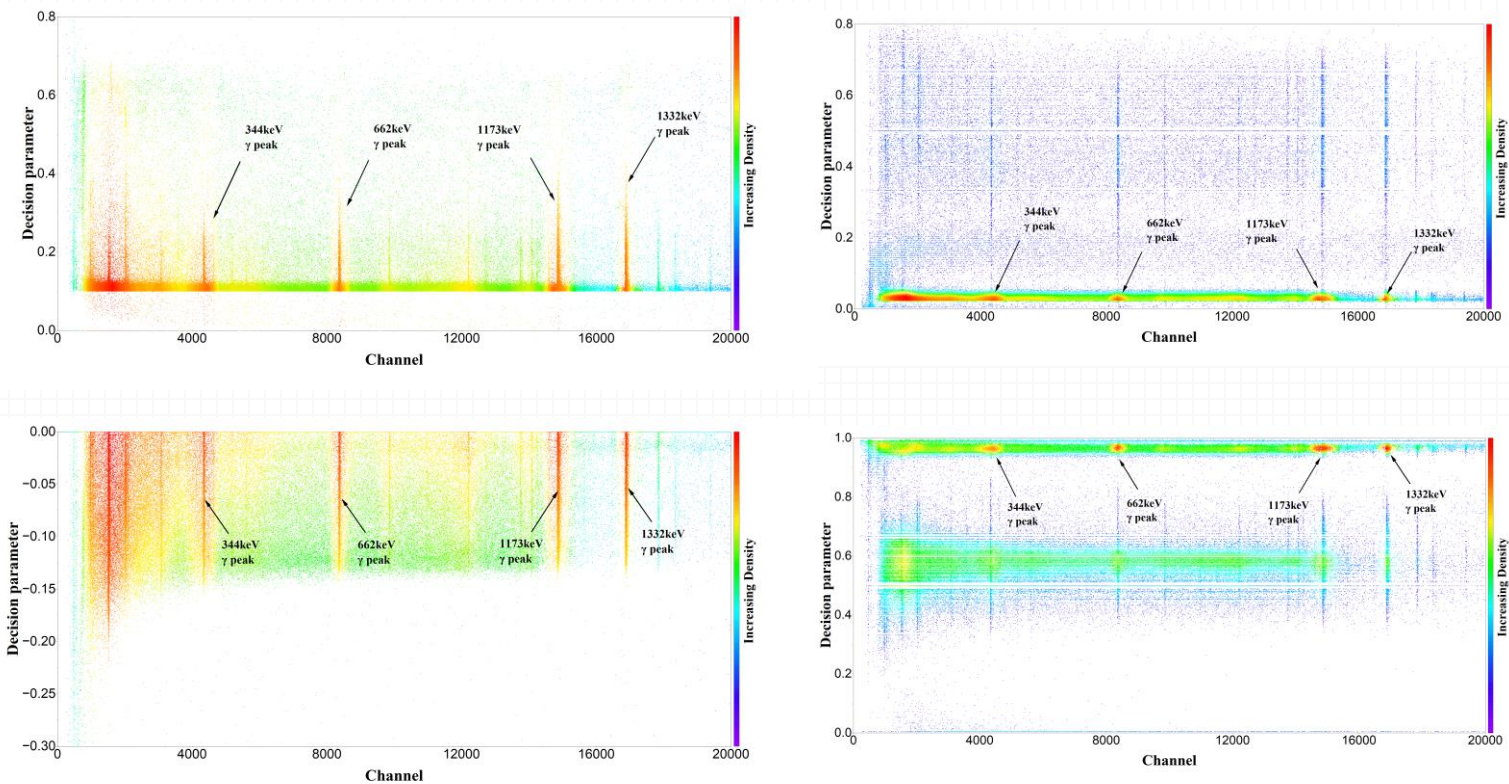
特征参数提取



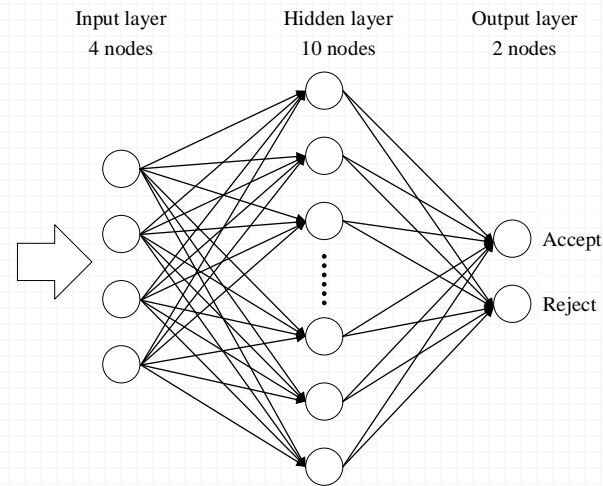
对原始脉冲信号提取特征参数。

神经网络模型预测。

脉冲的形状特征可一定程度上反映事件的类型。



Decision parameters



FC network网络结构

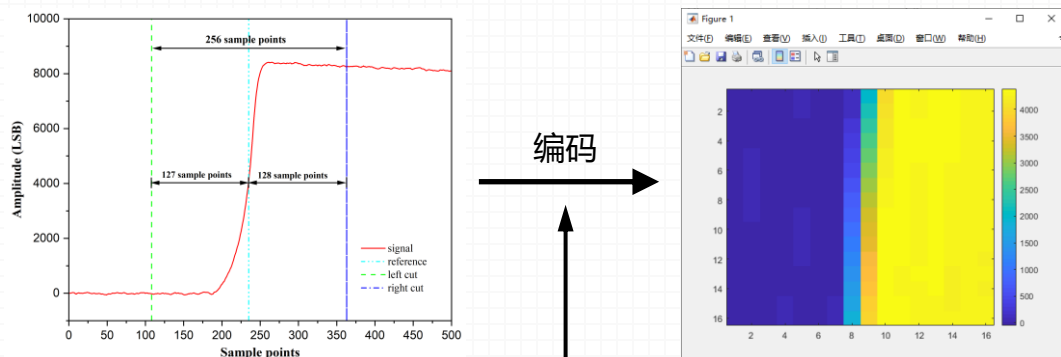
四种特征参数在全能峰区域和康普顿坪区分布的散点密度图

- 全/部分能量沉积事例分布不同;
- 不同特征下, 两种事例的分布不同。

- Levenberg-Marquardt (列文伯格-马夸尔特) 算法
- 训练集近21万组数据

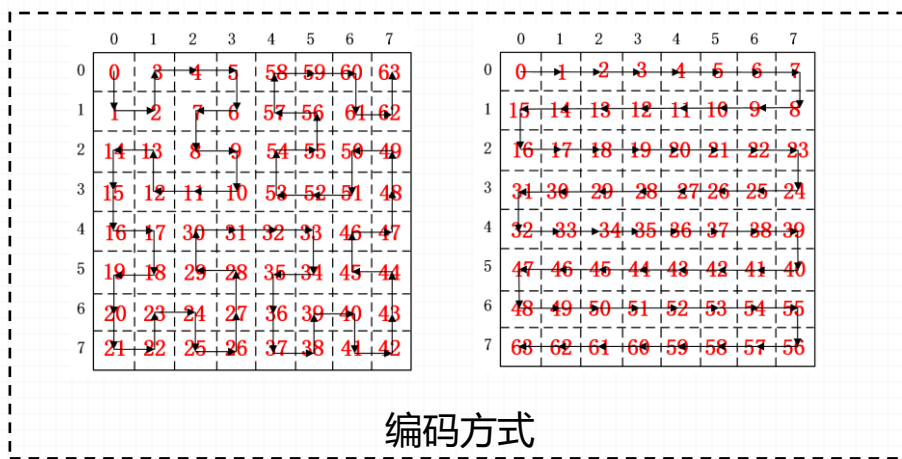
CNN

将整个脉冲波形的离散数据输入到卷积神经网络，卷积神经网络在训练过程中自动提取波形数据中的有效信息对波形类别进行甄别。



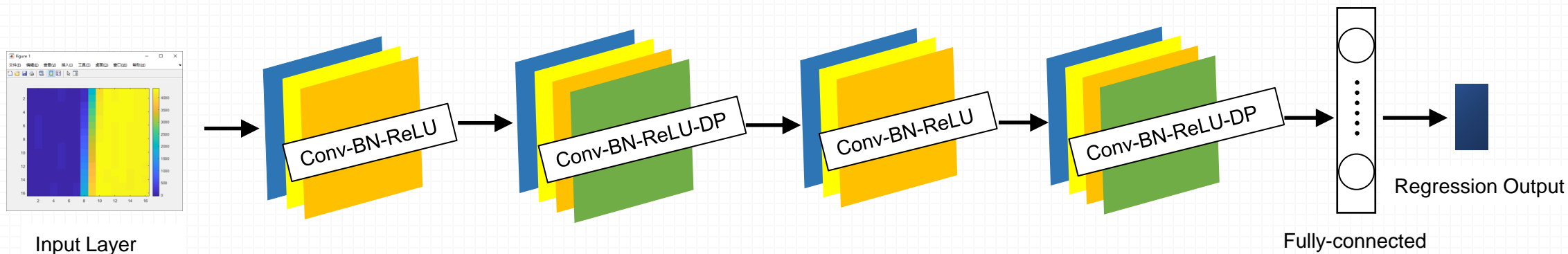
原始脉冲波形离散数据

矩阵



CNN

将整个脉冲波形的离散数据输入到卷积神经网络，卷积神经网络在训练过程中自动提取波形数据中的有效信息对波形类别进行甄别。

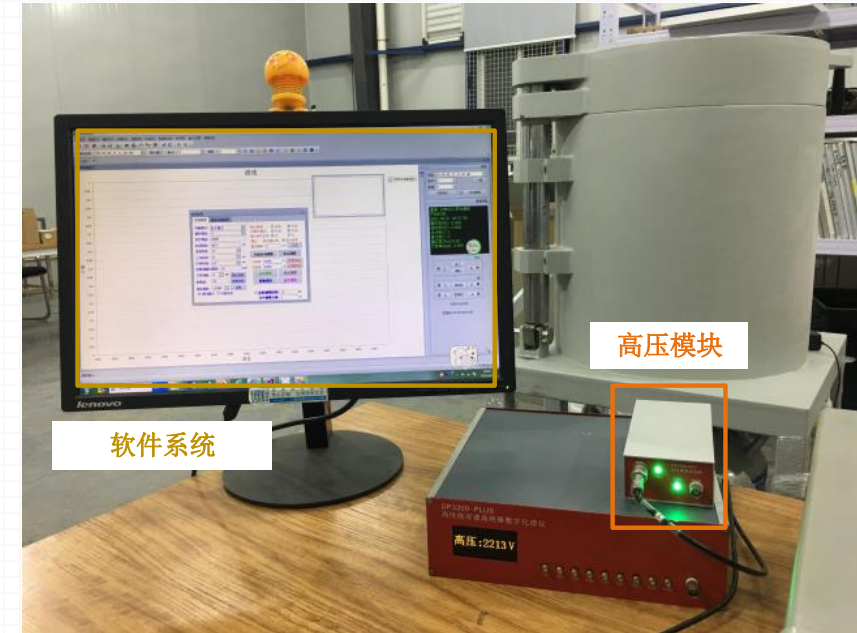
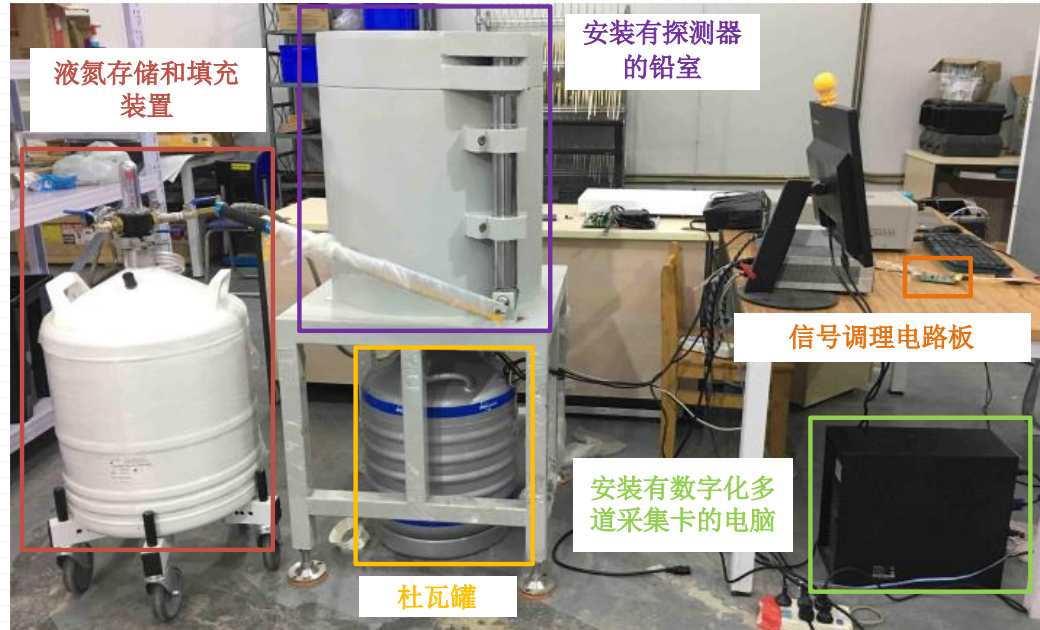


Conv: Convolution
BN: Batch Normalization
ReLU: Rectified Linear Unit
DP: Dropout

- **SGDM**深度学习优化器
- 每次随机抽样的小批量数据数量 (MiniBatchSize) =1024
- 最大迭代轮数 (MaxEpochs) =20
- 初始学习率=0.001
- 每轮训练将数据集打乱，防止训练中的模型抖动和过拟合,提升模型预测表现。
- **训练集3.6万组数据**

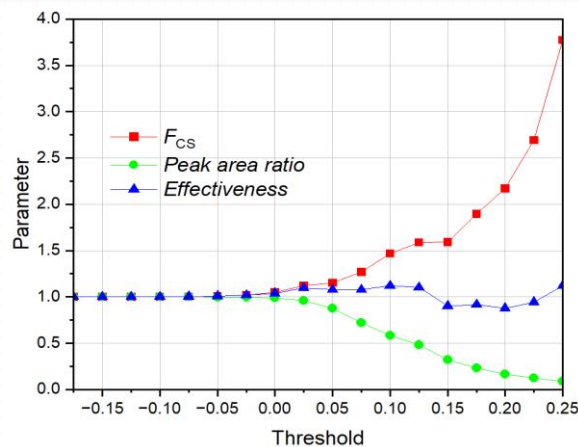
• 实验结果和讨论

系统组成

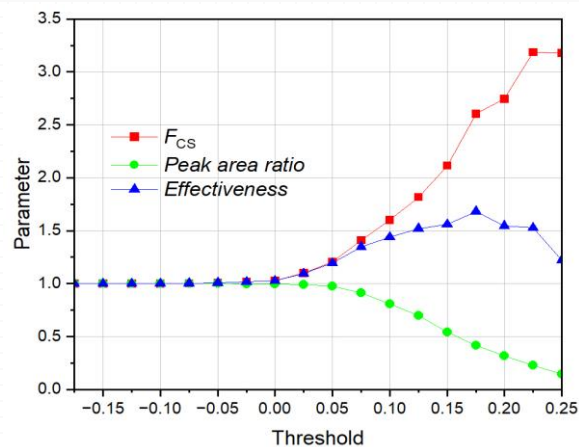


康普顿抑制因子、峰面积比、效率分析 (PSD+FC network)

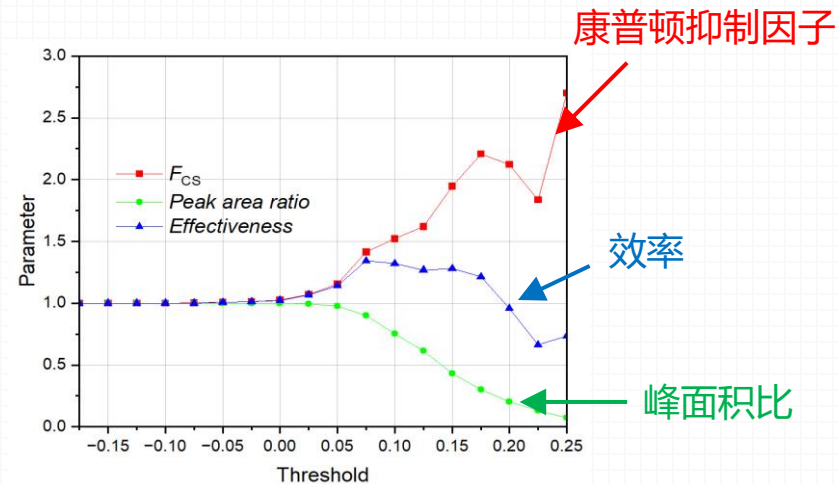
来自¹⁵²Eu、¹³⁷Cs和⁶⁰Co放射源能量分别为344keV、662keV和1332keV伽马射线对应全能峰的康普顿抑制系数、峰面积比、效率分别与阈值之间的关系。



344keV



662keV



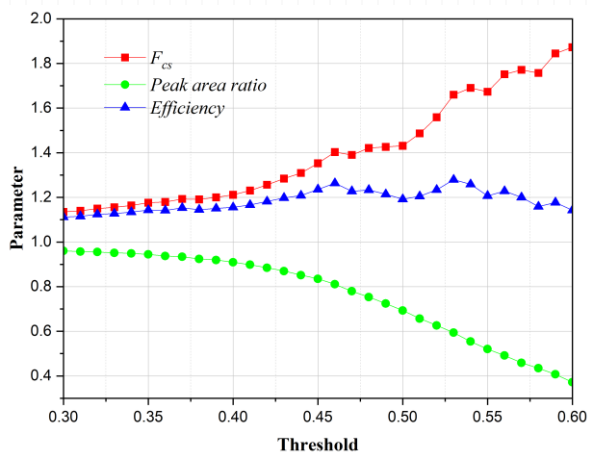
1332keV

表1 ¹⁵²Eu、¹³⁷Cs和⁶⁰Co放射源的康普顿抑制系数、峰面积比和效率。

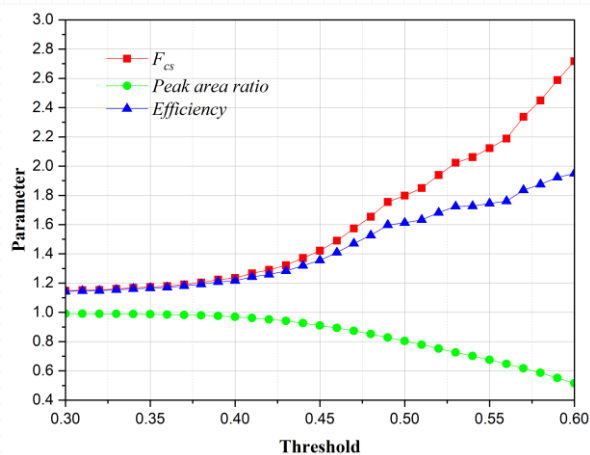
核素	能量 (keV)	康普顿抑制系数	峰面积比	效率
¹⁵² Eu	344	1.13	0.95	1.11
¹³⁷ Cs	662	1.11	0.99	1.10
⁶⁰ Co	1332	1.08	0.99	1.08

康普顿抑制因子、峰面积比、效率分析 (CNN)

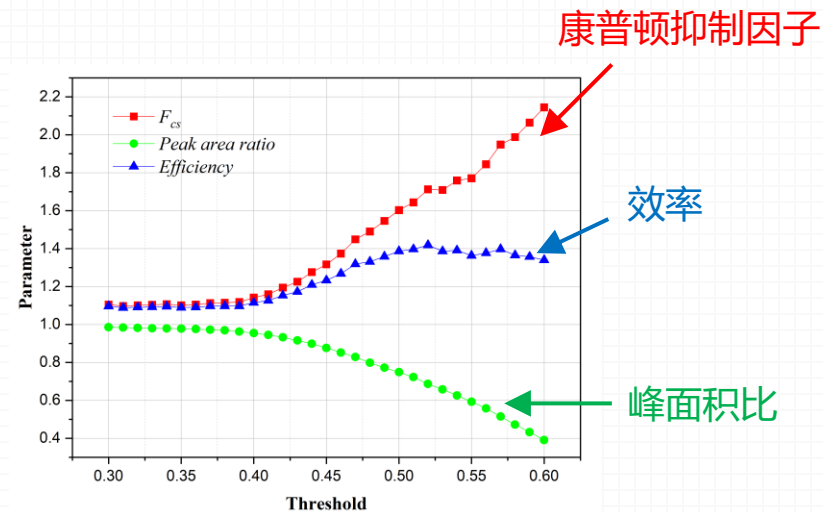
来自¹⁵²Eu、¹³⁷Cs和⁶⁰Co放射源能量分别为344keV、662keV和1332keV伽马射线对应全能峰的康普顿抑制系数、峰面积比、效率分别与阈值之间的关系。



344keV



662keV



1332keV

表2 ¹⁵²Eu、¹³⁷Cs和⁶⁰Co放射源的康普顿抑制系数、峰面积比和效率。

核素	能量 (keV)	康普顿抑制系数	峰面积比	效率
¹⁵² Eu	344	1.43	0.69	1.19
¹³⁷ Cs	662	1.79	0.80	1.61
⁶⁰ Co	1332	1.60	0.74	1.38

最小可探测活度(MDA)计算

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{B}}{m \times t \times \varepsilon \times I}$$

↑ 样本质量 ↑ 测量时间 ↑ 绝对探测效率 ↑ 射线发射强度

最小可探测活度比计算

$$\alpha = \frac{MDA_2}{MDA_1} = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{B_2}}{2.71 + 4.65\sqrt{B_1}} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{B_2}}{2.71 + 4.65\sqrt{B_1}} \cdot \frac{N_1}{N_2}$$

↑ 本底计数 ↑ 净峰面积计数

降低最小可探测活度(MDA)的关键:

- 根据脉冲形状特征准确映射出全能量沉积事例和康普顿散射逃逸事例的位置分布
- 在尽可能多的保留全能量沉积事例的前提下扣除逃逸事例

MDA Ratio在不同阈值下的趋势图。

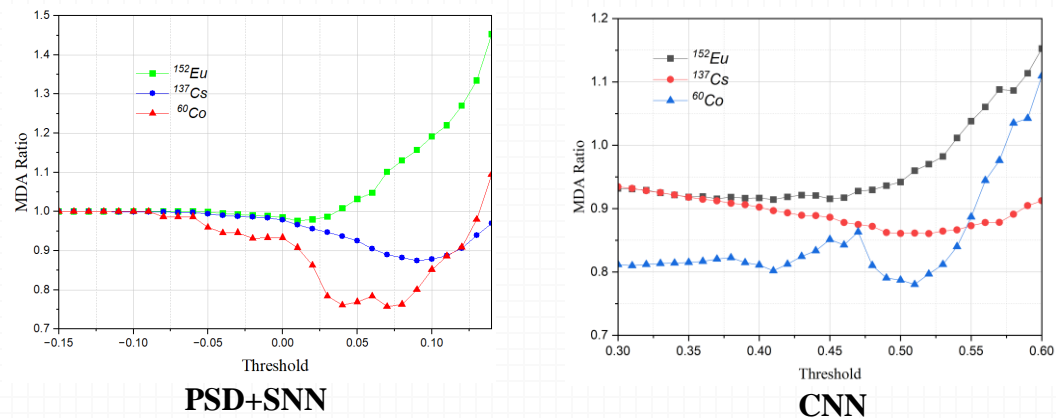
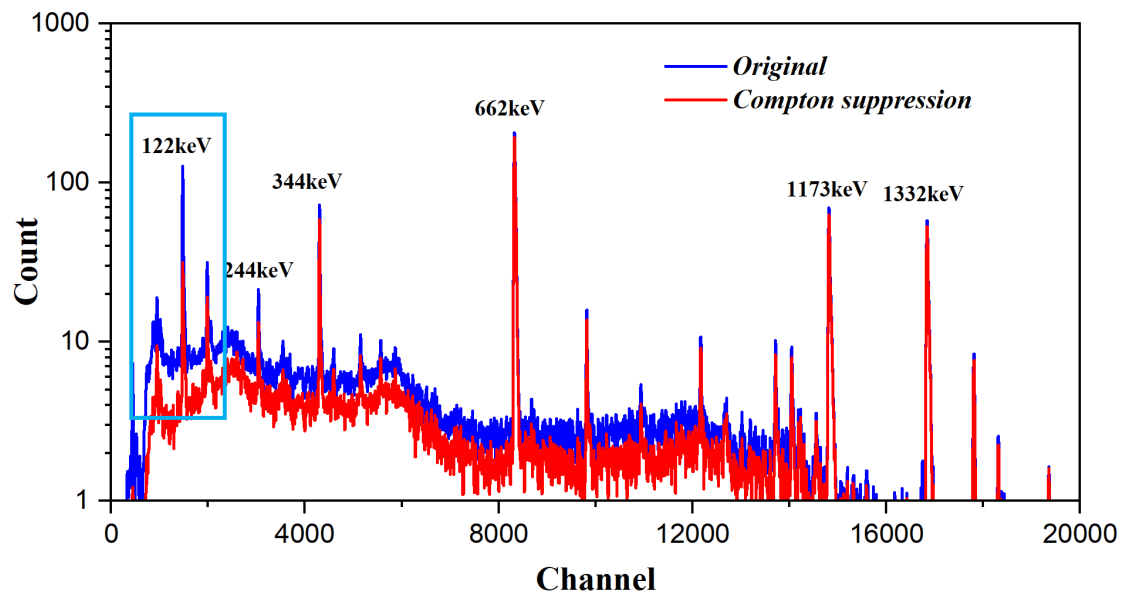


表2 ¹⁵²Eu、¹³⁷Cs和⁶⁰Co放射源对应全能峰的MDA比值。

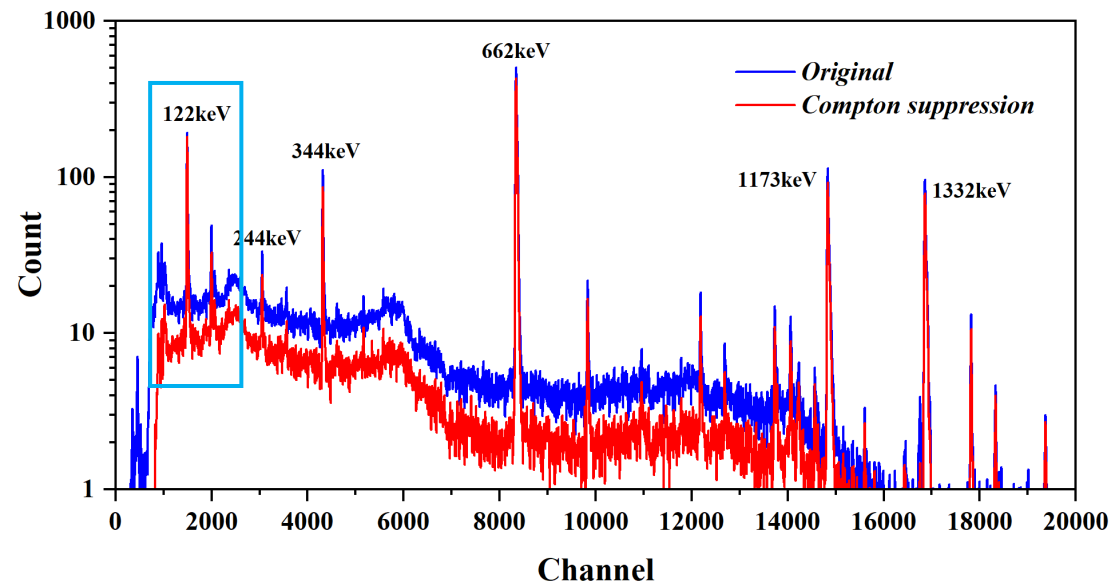
Nuclide	Energy(keV)	MDA Ratio		Decrease percentage (%)	
		PSD+FC network	CNN	PSD+FC network	CNN
¹⁵² Eu	344	0.986	0.925	1.4	5.8
¹³⁷ Cs	662	0.947	0.884	5.3	13.9
⁶⁰ Co	1332	0.784	0.788	21.6	21.2

¹⁵²Eu、¹³⁷Cs和⁶⁰Co放射源对应的344keV、662keV 以及1332keV全能峰的最小可探测活度分别降低了**1.4%、5.3%、21.6% (PSD+SNN)** 以及**5.8%、13.9%、21.2%(CNN)**。

采用PSD+FC network以及CNN两种方法进行本底抑制效果的对数谱图。



PSD+ FC network



CNN

- 两种方法都有效果;
- CNN相比于PSD+SNN在低能区有更好的表现。

• 总结与展望

创新点

- 提出了脉冲波形**多特征提取**的方法，对脉冲波形形状的特征更加精细。
- 将**脉冲形状甄别(PSD)技术+全连接神经网络 (FC network)**以及**卷积神经网络(CNN)**两种方法应用到事例甄别中，降低了系统最小可探测活度 (MDA) 。

解决的问题

- 显著提升了事例甄别准确度。尤其对低能区的本底也取得了较好的抑制效果。

后期展望

- 将本方法拓展到更多类别的事例甄别中，比如**中子伽马甄别**， **α 、 β 粒子与伽马射线**之间的甄别等；
- 优化**CNN的参数和超参数**，如卷积核形状、隐藏层结构和深度等，找出更优的CNN模型。
- 脉冲波形数据可以看作是一维序列数据，可以尝试构建并训练**LSTM、Transformer**等新一代神经网络对脉冲波形数据进行分析和推理，以实现事例甄别效果上的突破；



第三届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

谢谢！恳请各位老师批评指正！

Thank you for your criticism and corrections!

汇报人：樊纯頔 博士研究生

导师：曾国强 教授

汇报时间：2024年05月08日

先进核探测技术与仪器团队

手机：13723408405

邮箱：358943895@qq.com