

利用ICPMS进行放射性核素含量测量及 探测器本底研究

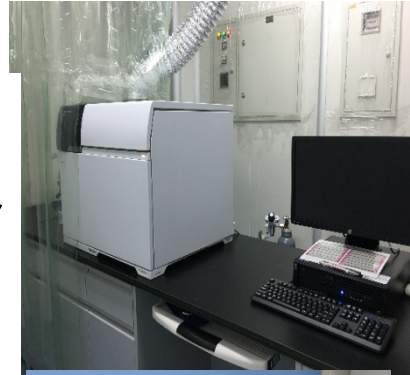
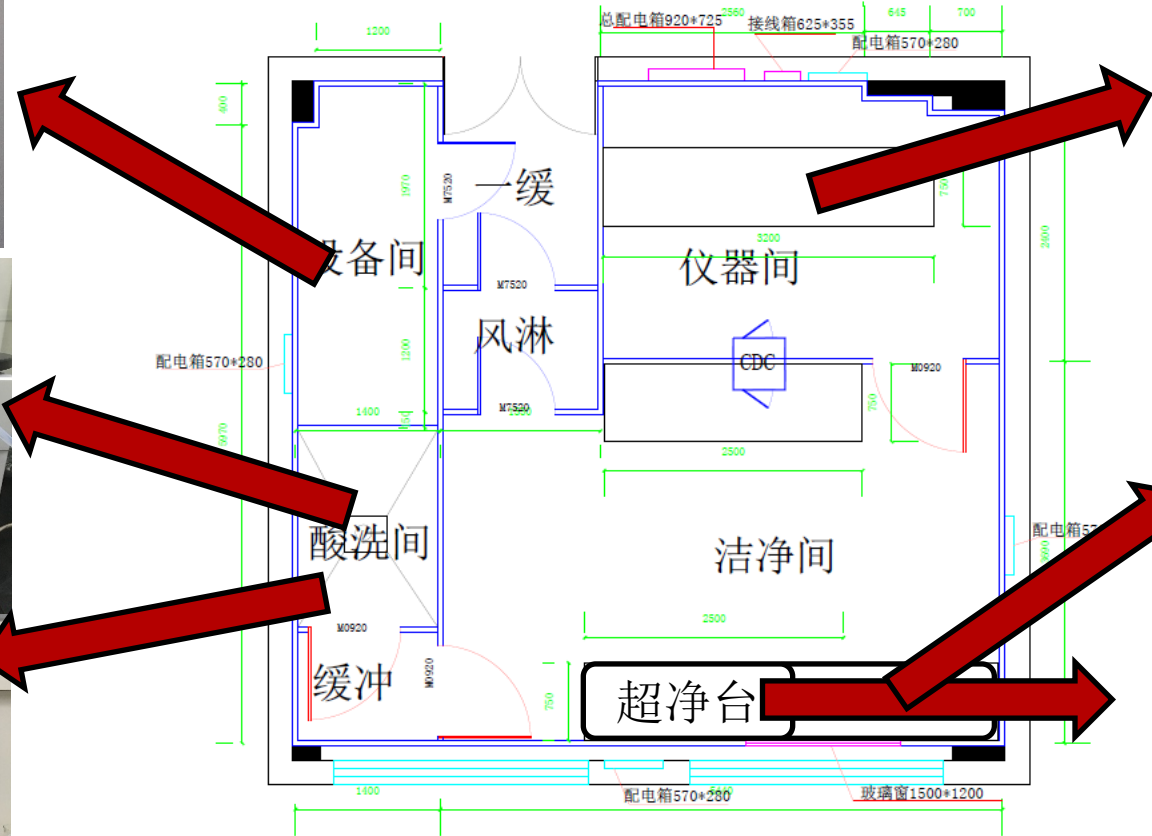
王思广

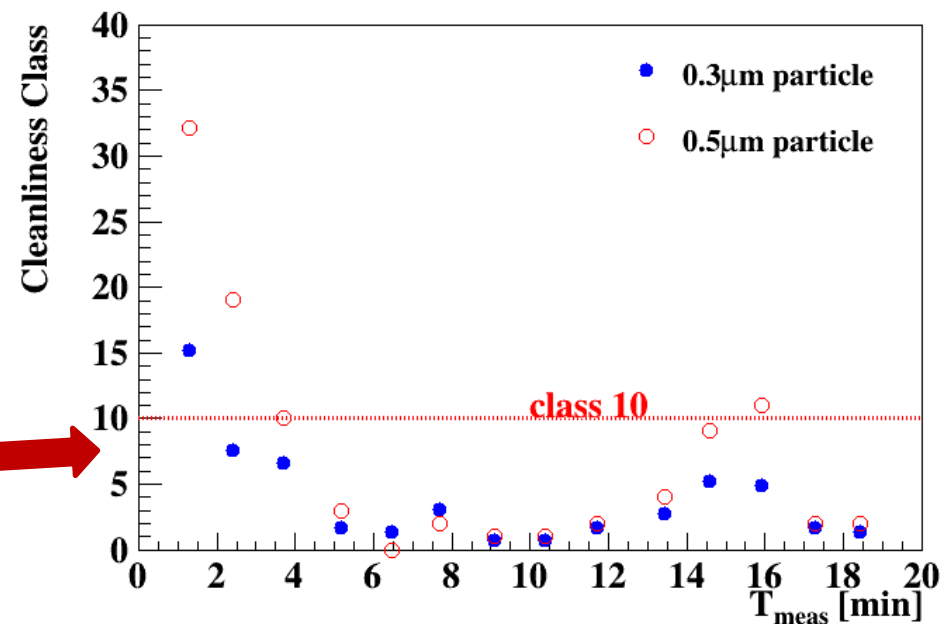
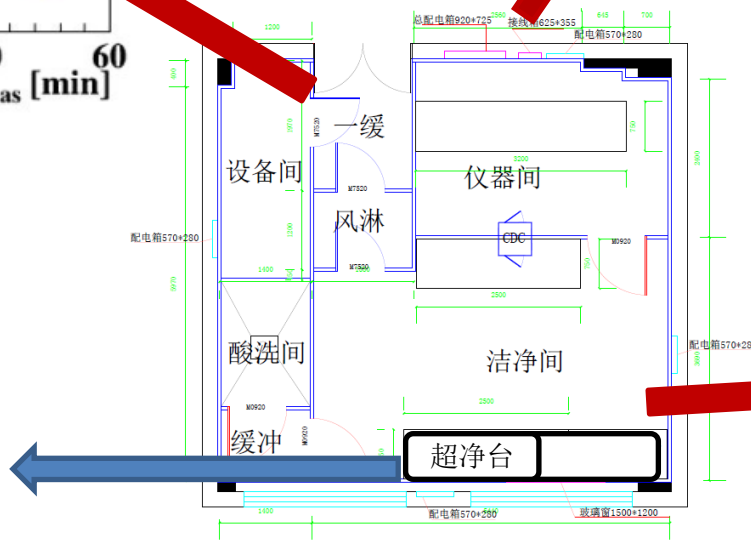
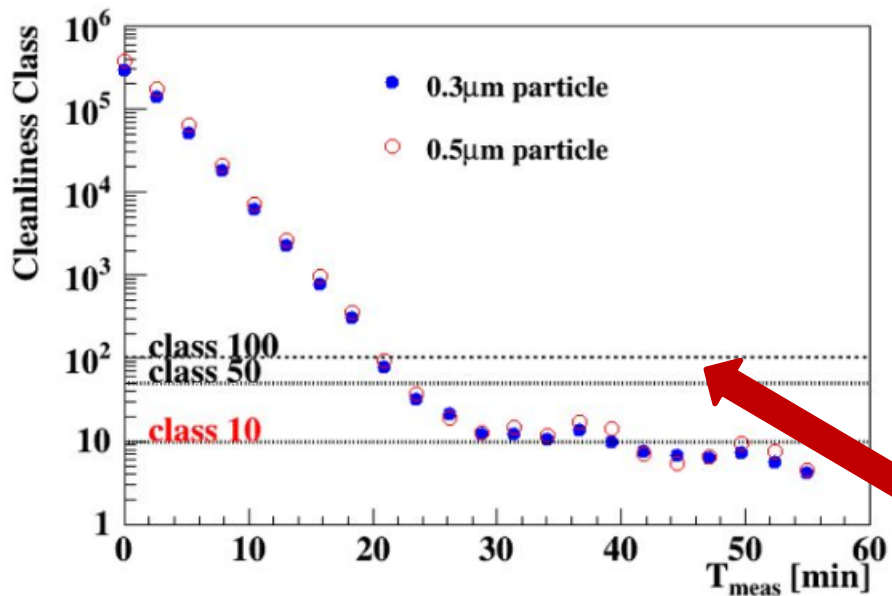
北京大学物理学院

基于惰性气体探测器的直接暗物质探测实验中期总结会，2018.7，北京

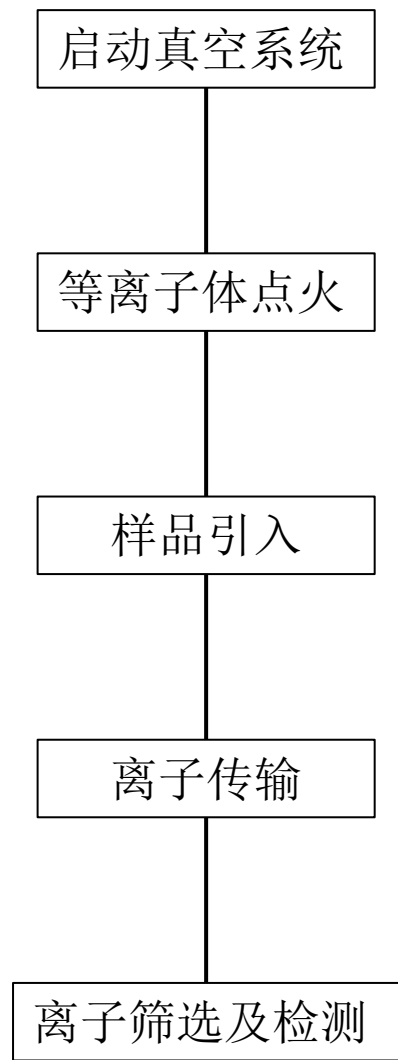
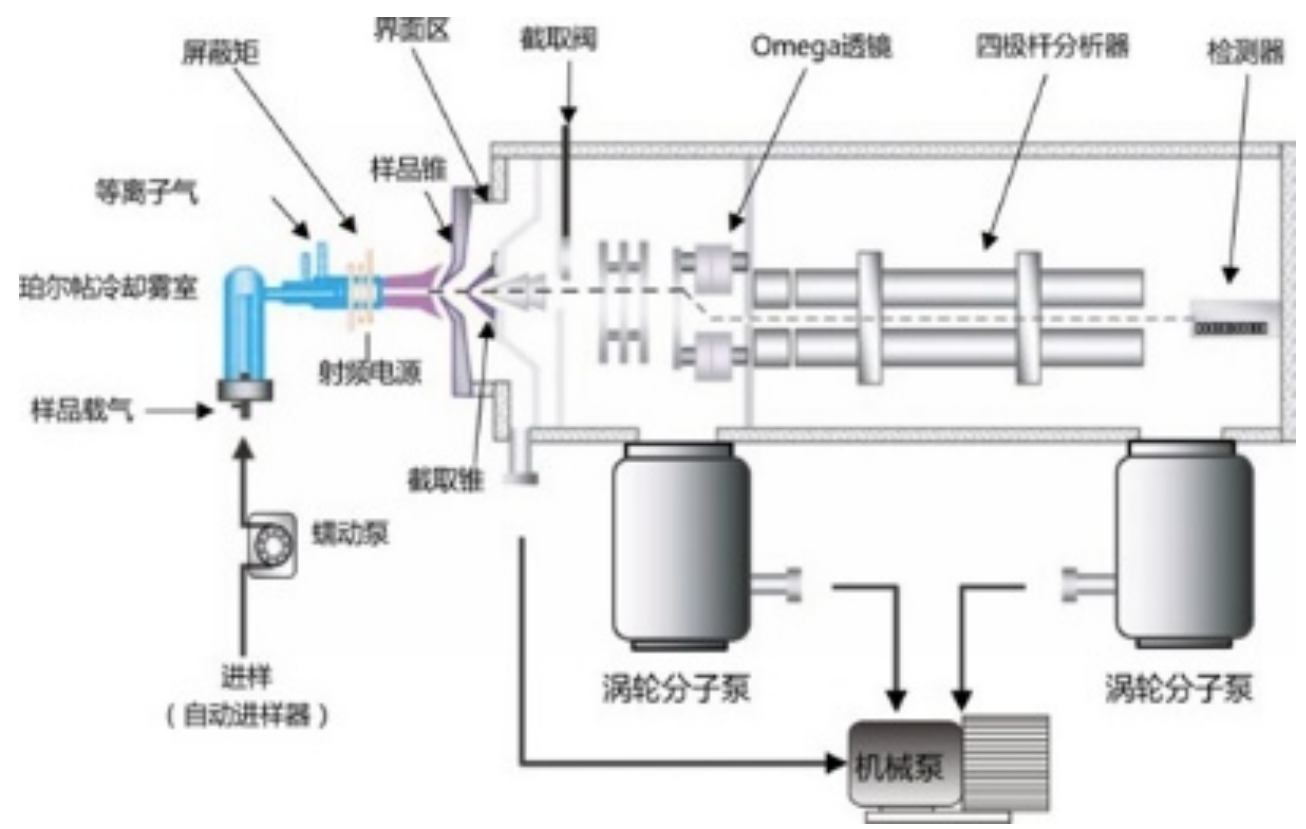
- 北大物理学院超低核素含量测量实验室简介
- 不同材料中 ^{238}U 、 ^{232}Th 含量测量
 - 铜
 - MicroMegas电路板
 - 不锈钢
 - 3D打印机材料
- 利用卷积神经网络鉴别 NLDBD 事件和本底事件
- GPU与RooFit的结合进行拟合算法的研究
- 总结

北大物理学院超低核素含量测量实验室简介





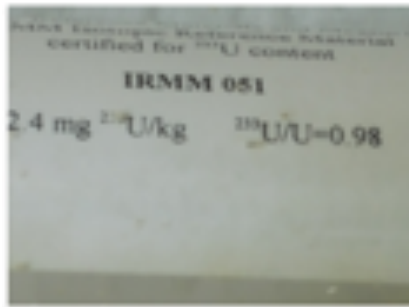
ICPMS工作原理



```
graph TD; A[启动真空系统] --> B[等离子体点火]; B --> C[样品引入]; C --> D[离子传输]; D --> E[离子筛选及检测];
```

The flowchart outlines the sequential steps of the ICP-MS process: 1. 启动真空系统 (Start vacuum system), 2. 等离子体点火 (Plasma ignition), 3. 样品引入 (Sample introduction), 4. 离子传输 (Ion transport), and 5. 离子筛选及检测 (Ion selection and detection).

标准溶液



mass fraction (-100)	
$m(^{233}\text{U})/m(\text{U})$	98.020 1(58)
$m(^{234}\text{U})/m(\text{U})$	0.918 3(02)
$m(^{235}\text{U})/m(\text{U})$	0.216 0(56)
$m(^{236}\text{U})/m(\text{U})$	0.024 4(03)
$m(^{238}\text{U})/m(\text{U})$	0.821 2(20)

2.3539(42)ppm ^{233}U



mass fraction (-100)	
$m(^{234}\text{U})/m(\text{U})$	0.035 9(02)
$m(^{235}\text{U})/m(\text{U})$	99.941 4(18)
$m(^{236}\text{U})/m(\text{U})$	0.009 6(10)
$m(^{238}\text{U})/m(\text{U})$	0.013 1(03)

0.9999(25)ppm ^{235}U



mass fraction (-100)	
$m(^{230}\text{Th})/m(\text{Th})$	99.849(50)
$m(^{232}\text{Th})/m(\text{Th})$	0.151(50)

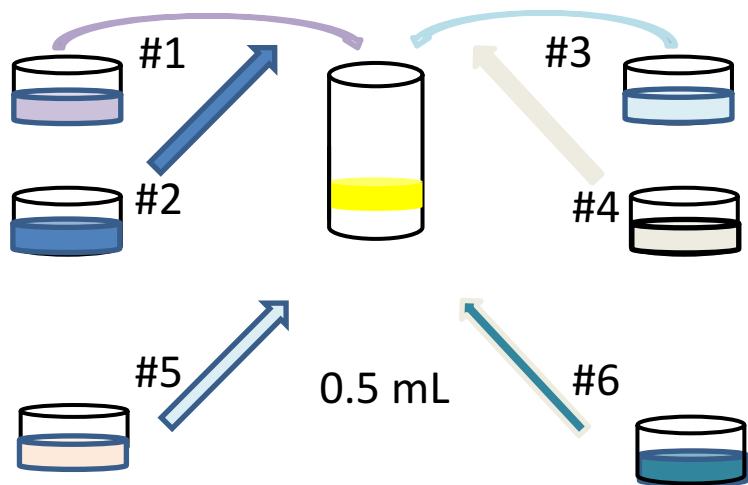
0.5691(42)ppm ^{230}Th

**Isotope dilution analysis
using radioactive tracers
for U and Th**

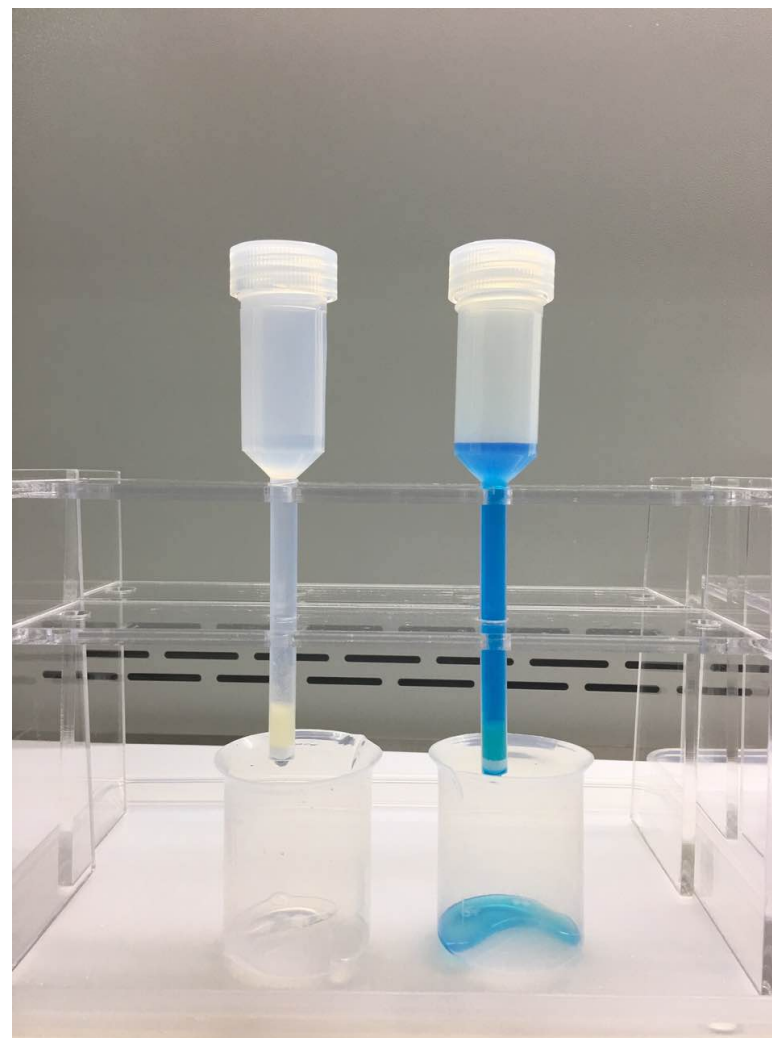


不同样品中 ^{238}U 及 ^{232}Th 的含量测量结果

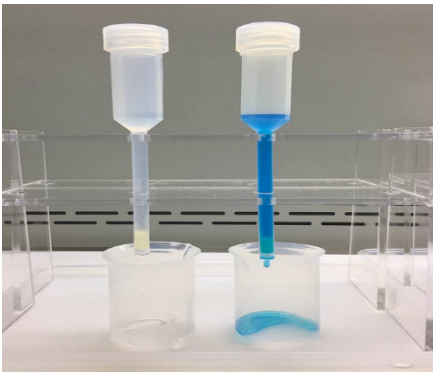
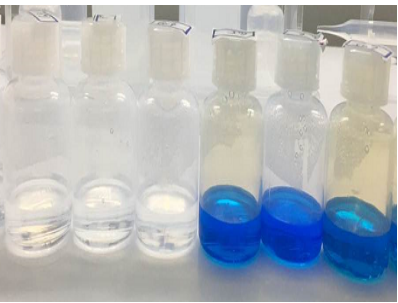
预清洗



- #1: 2ml 3 M HNO₃
- #2: 2ml UPW
- #3: 2ml HCl (37%)
- #4: 2ml 5 M HCl
- #5: 8ml 0.02 M HCl
- #6: 10ml UPW



单晶铜测测量流程

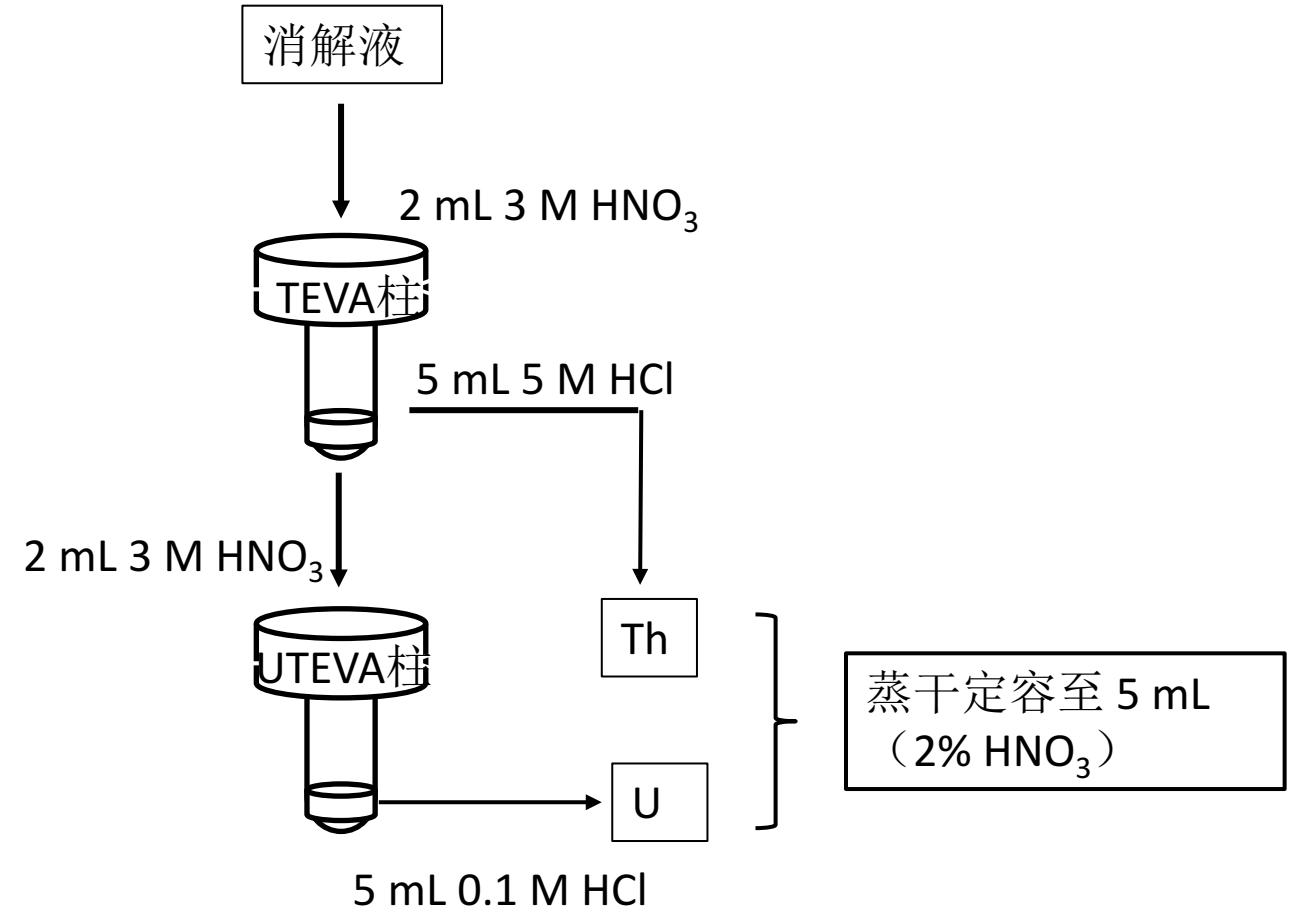


6 M HNO₃ 去除样品表层

8 M HNO₃ 消解样品
加入已知量的²³⁵U
及²³⁰Th进行标记

萃取树脂提取 Th、U

ICP-MS 分析



单晶铜的测量结果

Sample	^{232}Th pg/g	^{238}U pg/g
Cu 1	0.22±0.07	0.37±0.08
Cu 2	0.28 ±0.14	0.37±0.07
Cu 3	0.27±0.07	0.59±0.19
Cu 4	0.16±0.07	0.58±0.03
Cu 5	0.14±0.07	0.54±0.15
Cu 6	0.30 ±0.11	0.54±0.11
Cu 7	0.05 ±0.15	0.50 ±0.09
平均值	0.20±0.09	0.50 ±0.09

方法检出限:

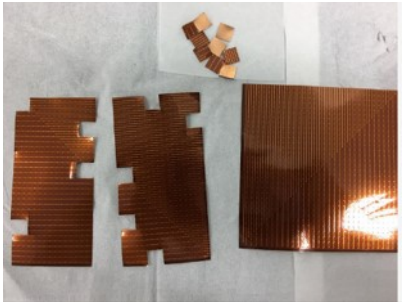
0.21 pg $^{232}\text{Th}/\text{g}$

0.45 pg $^{238}\text{U}/\text{g}$

方法检出限 = $3 \times (\text{重复11次测量空白样品的标准偏差}) \times \text{样品定容后质量} \div \text{所消解样品质量}$

微波消解程序:

步骤	温度 °C	升温时间 min	保持时间 min	功率%
步骤 1	120	5	10	60
步骤 2	170	5	10	80
步骤 3	200	10	30	90
步骤 4	230	5	5	80
步骤 5	50	5	0	60

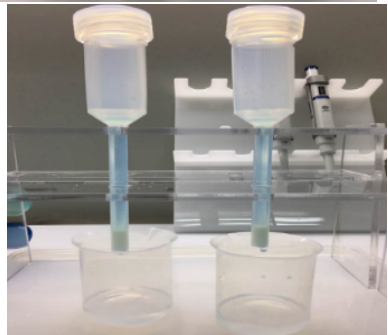
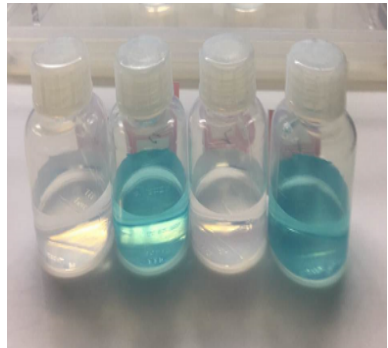


5% HNO₃ 清洗样品表层

微波消解仪-浓 HNO₃ 消解
样品加入已知量的 ²³⁵U 及 ²³⁰Th 进行标记

萃取树脂提取 Th、U

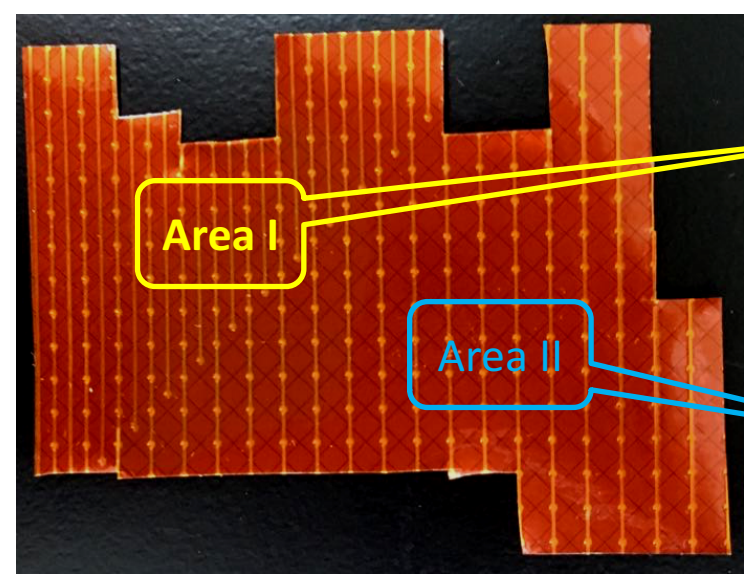
ICP-MS 分析



Preliminary results

Sample	²³² Th pg/g	²³⁸ U pg/g
GEM 1	36 ±16	273±7
GEM 2	34 ±13	308±42
GEM 3	118±25	292±34
BIPO 1	46	287
BIPO 2	43	266

MicroMegas电路板中U、Th含量测量结果（中山大学刘洪涛老师）



Parallel sample	Th (pg/g)	U (pg/g)
1	33.9	646
2	2.28	579
3	4.78	607

Parallel sample	Th (pg/g)	U (pg/g)
1	2.64	595
2	203	2.13×10^3
3	64.3	984

- ◆ Surface treatment
- ◆ Microwave Digestion
- ◆ Solid phase extraction to remove Cu
- ◆ Evaporated into dryness
- ◆ Add fixed volume of 2% HNO_3 + 0.5% HCl
- ◆ Analyze

PKU:

Sample	^{232}Th pg/g	^{238}U pg/g
BIPO 1	46	287
BIPO 2	43	266

中山大学与北大的测量结果基本符合。

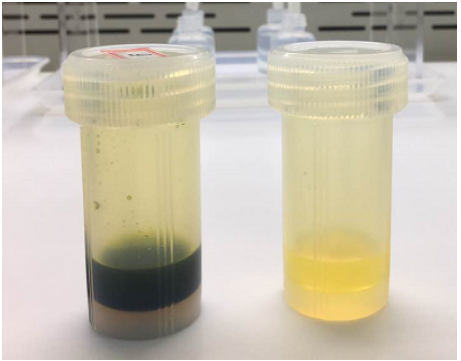
**Inhomogenous!
Sources?**

- ✿ Kapton foil?
- ✿ Copper?
- ✿ Read strips/pads?
- ✿ Reagents used in the producing period?
- ✿?

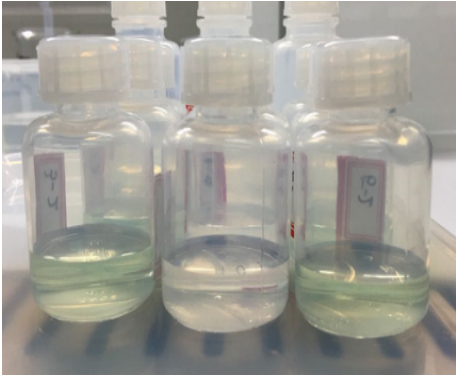
Raw material analysis



稀王水去除样品表层



王水消解样品



稀释 (TDS<0.05%)

标准加入法-ICP-MS
分析

方法检出限:

3.5 pg ²³²Th/g

58.6 pg ²³⁸U/g

初步结果

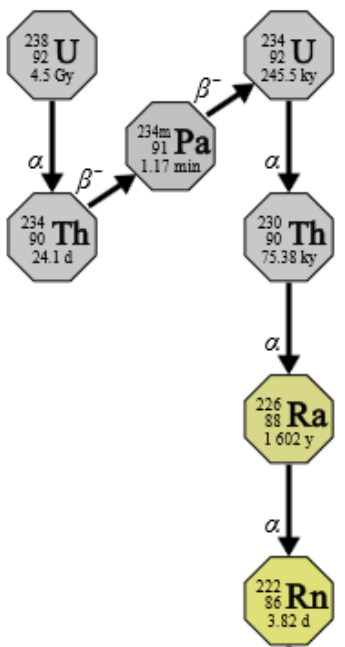
Samples	Th-232 (pg/g)*	U-238 (pg/g)*
P4TC	378 ±17	312 ± 24
P4TF	606 ±129	1087 ±100
P4TN	303±50	755±71
P4TM	309±76	600±86
P4TO	56±10	1026±100
P4TP	872±58	764±87

*Note: average±stdev

不锈钢中U、Th含量测量比较: HPGe 和 ICPMS

同一样品太钢核级不锈钢:

Method	Unit; mBq/kg		
	U-238(Ra-226)	Th-232(Ac-228)	Th-232(Th-228)
HPGe CJPL (SJTU)	5.67±2.81	13.19±2.86	3.05±3.14
ICP-MS(PKU)	1.53±0.12	3.86±0.18	



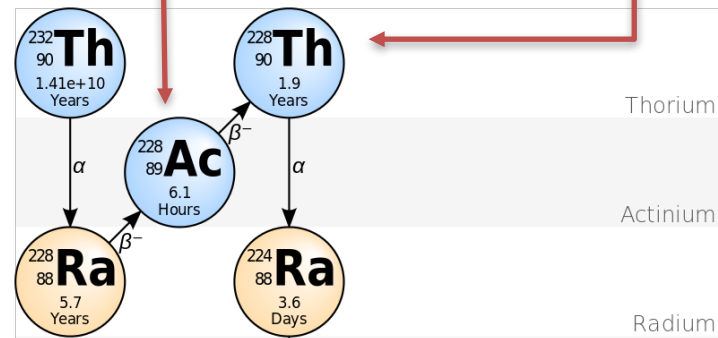
Uranium

Protactinium

Thorium

Radium

Radon



Thorium

Actinium

Radium

HPGe: 假定放射性核素平衡

ICP-MS: 取样约1g, 样品取样代表性问题

238U: 1ppb=12.4mBq/kg
232Th: 1ppb=4mBq/kg

6mm钢板：

Unit; mBq/kg

Method	U-238(Ra-226)	Th-232(Ac-228)	Th-232(Th-228)
HPGe CJPL (SJTU)	1.29 ± 1.80	<2.21	1.45 ± 2.10
ICP-MS(PKU)	12.8 ± 1.2	0.23 ± 0.04	

Unit: mBq/kg

φ400mm 棒材

Method	U-238(Ra-226)	Th-232(Ac-228)	Th-232(Th-228)
HPGe CJPL (SJTU)	0.76 ± 1.35	2.26 ± 1.80	2.08 ± 1.56
ICP-MS(PKU)	13.5 ± 1.2	2.46 ± 0.52	

φ400mm 棒材 两端

Unit: mBq/kg

Method	U-238(Ra-226)	Th-232(Ac-228)	Th-232(Th-228)
HPGe CJPL (SJTU)	9.77 ± 1.80	10.58 ± 2.70	15.99 ± 2.15
	0.64 ± 3.92	0.63 ± 3.40	3.61 ± 4.44
ICP-MS(PKU)	9.4 ± 0.9	1.23 ± 0.20	
	7.5 ± 1.1	1.25 ± 0.31	

不锈钢中K含量测量比较：HPGe 和 ICPMS

P4TO 中³⁹K的含量：3个样品27、26 及28(ng/g) (ICP-MS in PKU)

丰度比例：⁴⁰K:³⁹K=1.17×10⁻⁴: 0.932581

ICPMS(PKU)给出的结果：

$${}^{40}\text{K} = \frac{0.000117}{0.932581} {}^{39}\text{K} = \frac{0.000117}{0.932581} \times 27 \text{ppb} = 3.39 \text{ppt} = 0.90 \text{mBq/kg}$$

HPGe(SJTU)的结果 ⁴⁰K: <13.34 mBq/kg

● 3D 打印材料名称：“Feinpolyamide PA 2200 for EOSINT P”



测量流程:

- 利用微波消解进行消解仪
- 定容
- 稀释测量

Sample	Weight g	^{232}Th pg/g	^{238}U pg/g
1	0.09522	283	3586
2	0.09369	290	3386

使用蒙特卡洛方法进行探测器背景模拟

本底来源及探测器结构

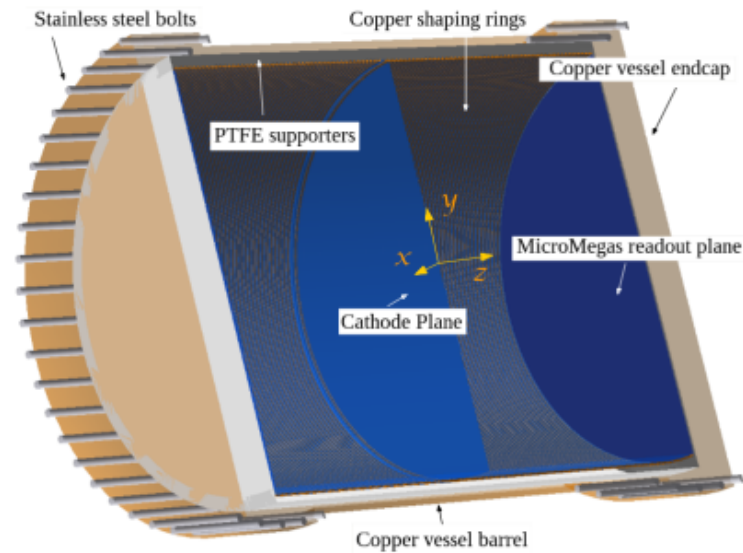
^{136}Xe NLDBD 事件

$Q=2458\text{keV}$ ROI: [2395keV, 2520keV]

^{214}Bi : 2447.8keV

^{208}Tl : 2614.5keV

^{60}Co : 1.33MeV+1.17MeV



材料	放射性活度 ($\mu\text{Bq/kg}$)		
	^{232}Th	^{238}U	^{60}Co
铜	0.2	0.75	100
PTFE	0.1	4.94	-
不锈钢	0.32×10^3	0.5×10^3	2.6×10^3
超纯水	0.04	0.12	-
混凝土	9.9×10^6	4.4×10^6	-

探测器不同材料放射性活度表

组件	参数	值	材料	质量
铜罐罐体	内径	80 cm	铜	3438 kg
	高度	200 cm		
	壁厚	3 cm		
铜罐端盖	直径	88 cm	铜	3320 kg
	厚度	15 cm		
螺钉	直径	1.4 cm	不锈钢	230.1 kg
	高度	40 cm		
场笼	内径	75 cm	PTFE	1042 kg
	高度	200 cm		
	厚度	5 cm		
	铜环个数	99		
中心极板	厚度	50 μm	铜	0.79 kg

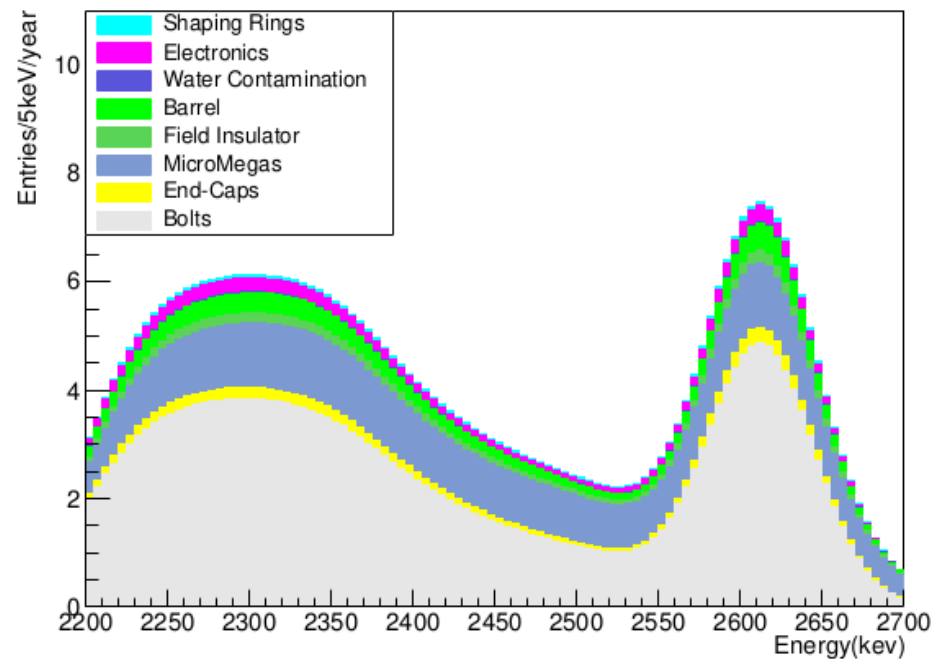
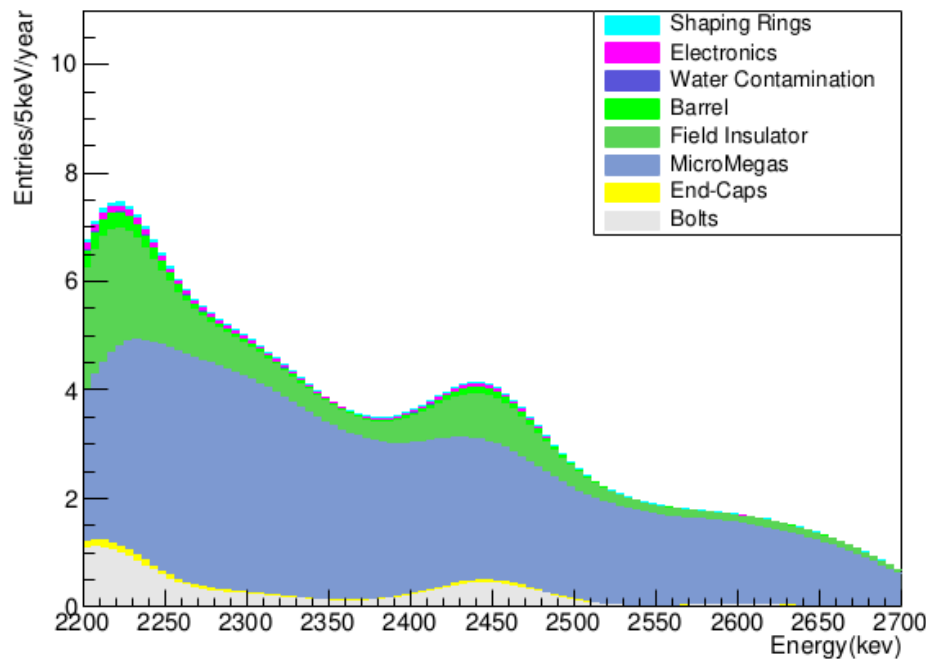
探测器背景模拟结果

- 使用 Geant4 进行了衰变元素的全衰变链模拟。
- 统计了位于不同部件中元素衰变沉积能量位于 ROI 中的事件数目。
- 考虑了气体探测器响应（电离效率，电子漂移速度，电子扩散速度等）。
- 考虑了电子学触发（512bins@5MHz, 102us）

部件	元素	活度	每年计数	BI ($10^{-5} \text{ c}/(\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{y})$)
读出平面	^{238}U	45nBq/cm ²	60.5	241.6
螺钉	^{232}Th	0.32mBq/kg	39.8	159
读出平面	^{232}Th	14nBq/cm ²	23.5	93.9
场笼	^{238}U	4.95uBq/kg	15.0	59.9
螺钉	^{238}U	0.5mBq/kg	7.5	30.1
...

探测器部件主要本底贡献 (Top 5)，表中BI指本底水平(Background index)，即为每年计数除以元素质量除以ROI范围。

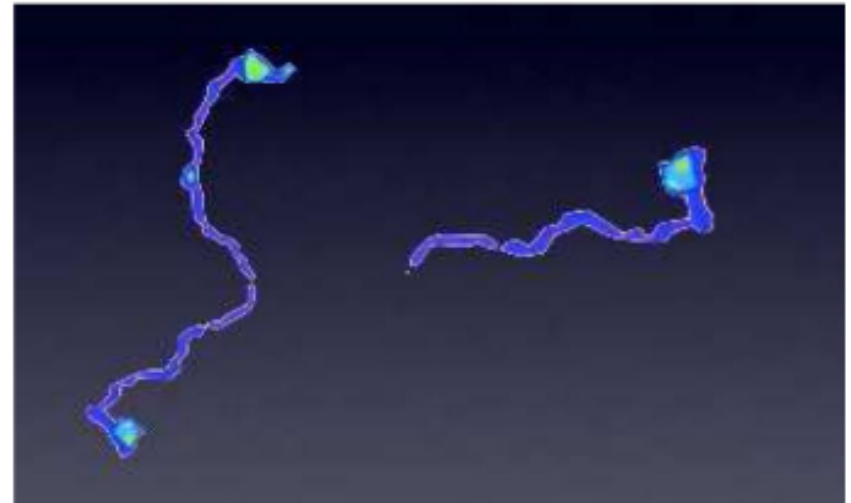
- 本底主要来自于最接近探测器灵敏气体的 Micromegas，以及较为不洁净的不锈钢螺钉。
- 总计本底水平约 3.08×10^{-3} count/(keV·kg·y)。对与200kg探测器而言每年背景计数约为 78 个。
- 因为电子学读出窗口的限制(102us)，来自于⁶⁰Co的两个Gamma沉积的能量在同一时间窗口被读出的概率较低，其计数被极大压低。



探测器不同组件所贡献的本底事件能谱分布

利用卷积神经网络鉴别 NLDBD 事件和本底事件

- 事件特征明显：
 - 信号NLDBD：两个高能电子，径迹的末端会有两个明显的布拉格峰。
 - 背景Gamma：一个或多个次级电子，一个或多个单末端布拉格峰的径迹。
- 像素读出的困难：
 - 极多的通道数目(>32万/探测器)，电子学部分庞大。
- Micromegas 读出引入的困难：
 - 无法同时获取到漂移到 MM 读出板上电子的 X 和 Y 的位置,只能得到它的 X 或 Y 的位置。难于重建三维径迹。
- 传统分析方法的困难：
 - 丢失大量的详尽径迹信息
- 使用 CNN 的原因：
 - CNN 擅长于图片分类，我们期待 CNN 能够像人一样从投影中分辨事件类型。
 - CNN 能够极大利用探测得到的信息。



CNN 介绍

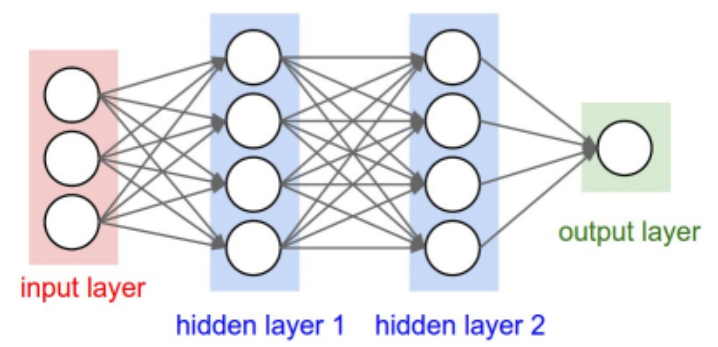
- 神经网络由神经元组成，每个神经元可以如下表示：

$$y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n, a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})$$

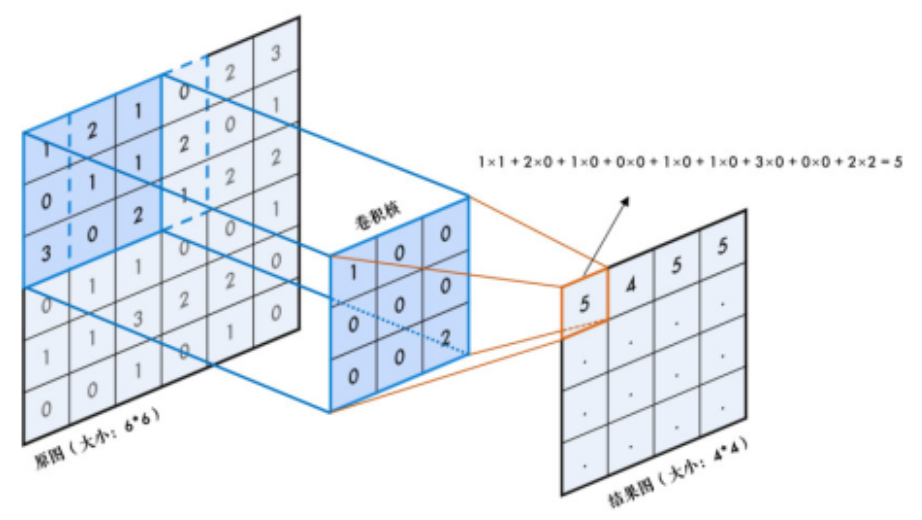
- 多个神经元组成 网络层
- 整个神经网络可以认为是一个非线性系统

$$\vec{Y}_0 = \mathcal{F}(\vec{X}_0, W)$$

- 一个神经网络中所有神经元的参数便被称为该网络的**权重 (Weight)**，而神经网络中的层的类型和层的属性(神经元数目, 组合方式)则被称作**模型(Model)**。
- 卷积神经网络是指拥有至少一层**卷积层**的神经网络。
 - 以较少的参数数目达到较好的效果



全连接神经网络示意图



卷积层示意图

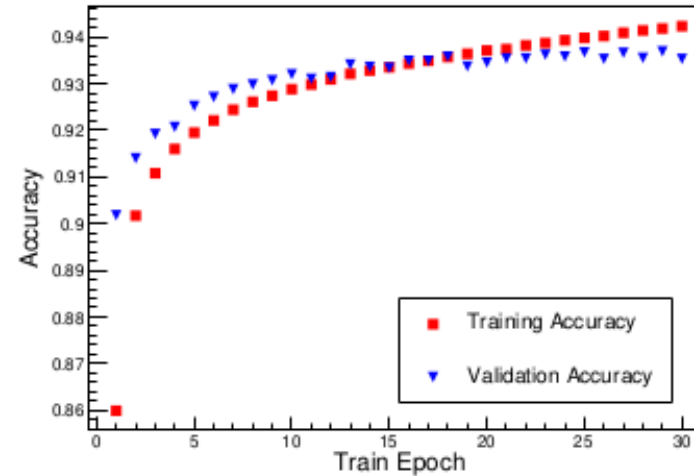
- Resnet50 能够达到最优效果。
- 16-20 轮训练结果比较接近。

需要寻找一个最优的 cut 来分离信号和背景，所以定义了(Figure Of Merit)

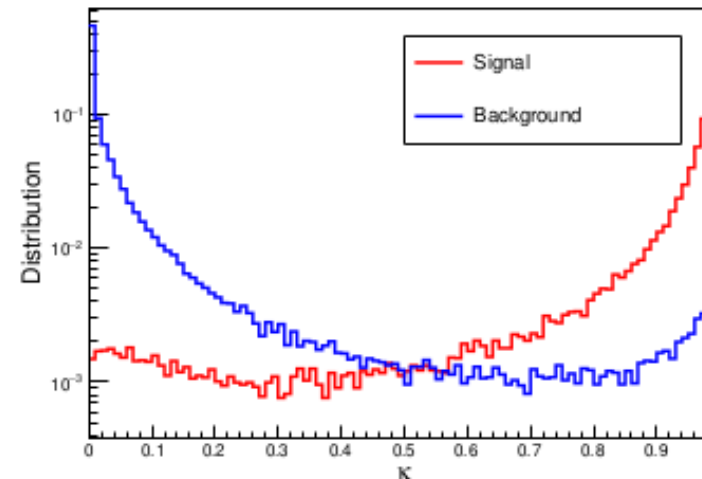
$$FOM \propto \frac{S}{\sqrt{b}} = \frac{S_d}{\sqrt{b_d}} \cdot \frac{\epsilon_{s,cnn}}{\sqrt{\epsilon_{b,cnn}}} \propto \frac{\epsilon_{s,cnn}}{\sqrt{\epsilon_{b,cnn}}}$$

epoch	optimized κ_c	$\epsilon_{s,cnn}$	$1 - \epsilon_{b,cnn}$	$\epsilon_{s,cnn}/\sqrt{\epsilon_{b,cnn}}$	final BI
16	0.983	0.475	0.9943	6.264	1.775×10^{-5}
17	0.976	0.569	0.9916	6.196	2.605×10^{-5}
18	0.981	0.487	0.9936	6.098	1.968×10^{-5}
19	0.966	0.540	0.9923	6.165	2.369×10^{-5}
20	0.976	0.520	0.9928	6.145	2.215×10^{-5}
average				6.174 ± 0.055	

κ_c 为CNN的输出的cut值
BI (count/kg/keV/year)

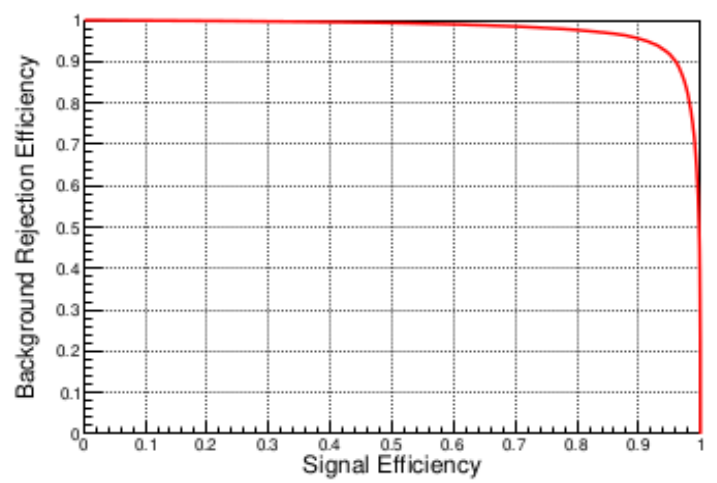


准确度随训练轮数变化图

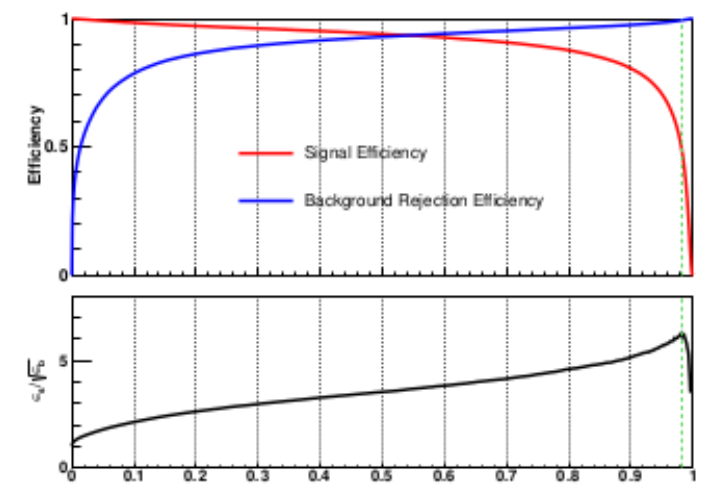


与信号像的本底引发的上翘

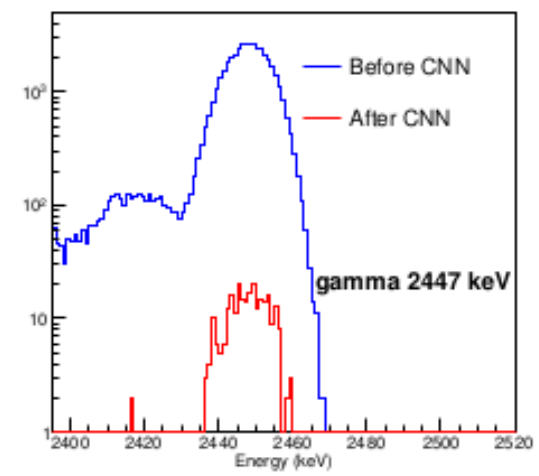
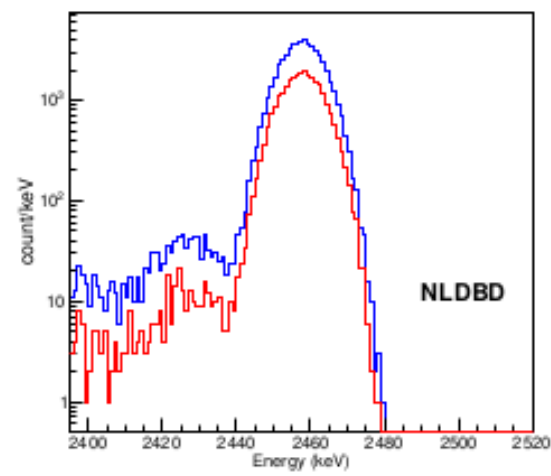
鉴别结果分布图



信号-本底剔除效率曲线



探测效率及FOM曲线



GPU与RooFit的结合进行拟合算法的研究

- GPU 拥有着众多的计算单元和超长的流水线设计，但只有很简单的逻辑控制部分。
- GPU的操作 高延迟，高带宽。
- GPU适合与并行处理简单计算。

所以在数值积分中，计算函数在各个节点 x_i 的值比较适合使用GPU加速。

Nvidia 的 CUDA 中的并行框架 Thrust 可以快速方便的完成这一操作。

理想情况下，如果GPU拥有无限的计算单元：

Map 操作时间复杂度 $O(1)$

Reduce 操作事件复杂度 $O(\log(n))$

算法 2 使用GPU的黎曼积分

输入: X_{max} , X_{min} : 积分上下界, $Bins$: 分bin数目

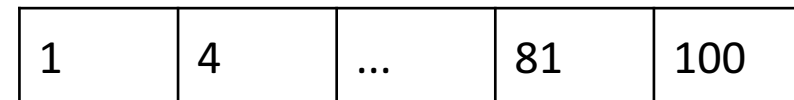
输出: 积分结果

```

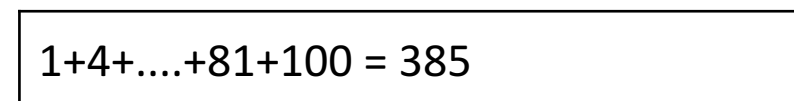
1: function GPURIEMANNEVALUATE
2:    $result \leftarrow 0$ 
3:    $step \leftarrow (X_{max} - X_{min})/Bins$ 
4:    $t \leftarrow \text{SEQUENCE}(Bins, X_{min} + 0.5 * step, step)$ 
5:    $t \leftarrow \text{MAP}(t, \text{GetVal})$ 
6:    $result \leftarrow step * \text{REDUCE}(t, 0, +)$ 
7:   return  $result$ 
8: end function
    
```



↓ Map(vector, Square)



↓ Reduce(vector, Plus)



测试平台：

CPU：Intel E5-2603 v3

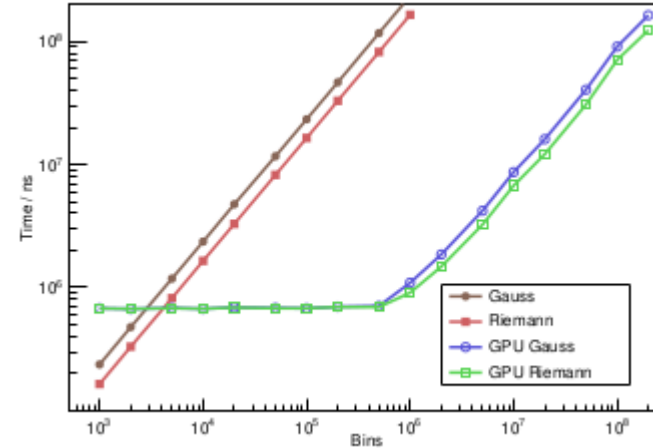
GPU：Nvidia Tesla K80

测试函数：

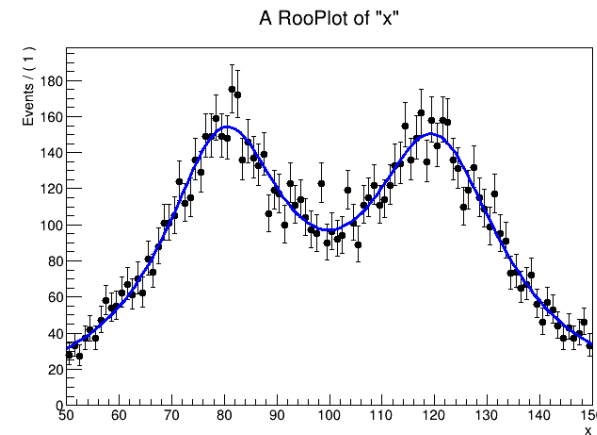
能谱函数：柯西函数形式

探测器分辨函数：高斯函数形式

- GPU带来的性能提升和积分节点数目有关，当节点数目为 10^6 时，GPU能够带来约**218倍**的性能提升。
- GPU的内存申请操作较慢，尽可能预分配内存以提高速度。



单次积分时间消耗随 Bin 数目变化图



测试拟合双峰

- 从无到有建立了一超低放射性核素测量实验室并进行了相关材料（铜、电路板、不锈钢等）的测量研究，测量结果与交大HPGe及中山大学ICPMS进行比对，考虑不能确保样品中待测核素均匀，取样的代表性因素，测量结果基本符合。
- 对探测器的本底进行模拟
- 用卷积神经网络对探测器信号与本底进行区分研究
- GPU与RooFit软件包结合，提高拟合速度约200倍

发表的文章：

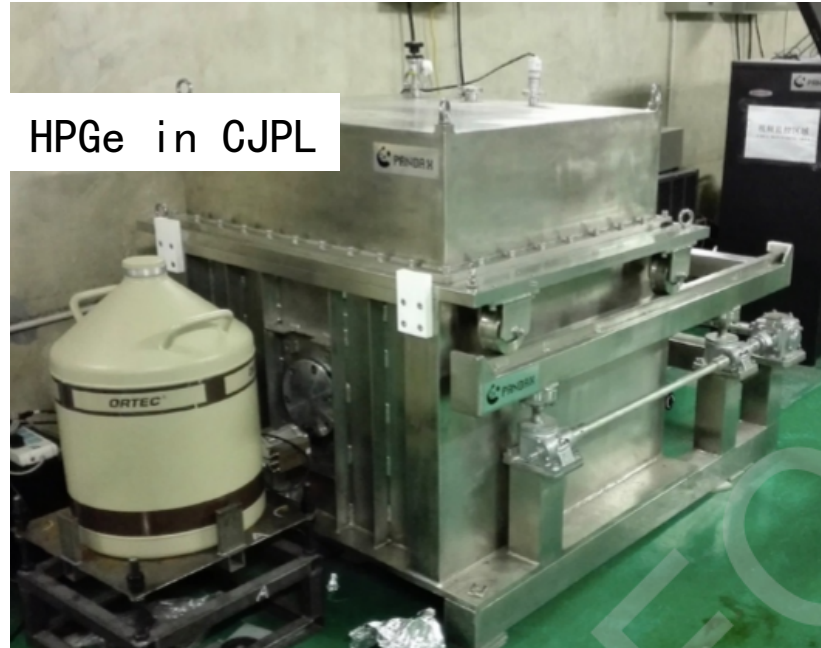
- 1、袁影 王思广*，电感耦合等离子体质谱法测定单晶铜中痕量放射性核素钷和铀的含量，《核技术》已接收
- 2、Hao Qiao, Chunyu Lu, Xun Chen*, Ke Han, Xiangdong Ji and Siguang Wang*, Signal-background discrimination with convolutional neural networks in the PandaX-III experiment using MC simulation, SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy ; doi: 10.1007/s11433-018-9233-5; <http://engine.scichina.com/doi/10.1007/s11433-018-9233-5>
- 3、乔颢 王思广*，利用GPU加速信号形状与探测器分辨率随能量变化的卷积，《核技术》已接收
- 4、Chen X, Fu C B, Galan J, et al. PandaX-III: Searching for neutrinoless double beta decay with high pressure ^{136}Xe gas time projection chambers[J]. Science China(Physics, Mechanics & Astronomy), 2017, 60(6):061011. 合作组文章(乔颢参加背景模拟工作)

Backup

Sample	unit	Ra226(U238)	Ac228	Th228	U235	Cs137	Co60	K40	material	source	application	measurement
P4TA	mBq/kg	5.67 ± 2.81	13.19 ± 2.86	3.05±3.14	<1.90	<0.71	0.78±0.82	10.82±15.15	SS	太钢核级不锈钢随机取样		CJPL
P4TB	mBq/kg	<17.72	<24.85	<17.67	<11.06	<8.55	<6.42	<84.94	SS			redhouse
P4TC	mBq/kg	1.53±0.12	3.86±0.18						SS			ICP-MS
P4TD_1	mBq/kg	0.76± 1.35	2.26± 1.80	2.08± 1.56	<1.33	<0.35	0.11± 0.39	4.61± 7.63	SS	φ400mm 棒材	内外罐法兰&螺栓	CJPL
P4TF	mBq/kg	13.5±1.2	2.46±0.52						SS			
P4TG_2	mBq/kg	9.77± 1.80	10.58± 2.70	15.99± 2.15	6.52± 1.55	0.32± 0.77	1.93± 0.80	12.32± 14.08	SS	φ400mm 棒材 一端		CJPL
P4TH	mBq/kg	0.64 ± 3.92	0.63± 3.40	3.61 ± 4.44	6.73 ± 2.17	3.01 ± 0.73	0.07 ± 0.86	< 14.14	SS			CJPL
P4TI	mBq/kg	14.47± 2.12	12.07± 3.11	13.99± 2.35	8.68± 1.88	1.82± 1.00	1.10± 0.79	<13.53	SS	10mm SS board	外罐封头&TPC电极环	CJPL
P4TJ	mBq/kg	5.23±2.27	9.27±3.76	10.40±2.69	5.93±2.10	0.65±1.11	<0.83	<17.64	SS	8mm SS board	外罐筒体	CJPL
P4TK	mBq/kg	1.16±1.15	0.38±1.78	2.66±1.41	2.00±1.42	0.53±0.66	0.31±0.47	<8.50	SS	10mm SS board	外罐封头&TPC电极环	CJPL
P4TL	mBq/kg	1.29± 1.80	<2.21	1.45± 2.10	3.65± 2.11	0.89± 1.05	0.43± 0.77	<13.34	SS	6mm board	内罐封头&筒体	CJPL
P4TO	mBq/kg	12.8±1.2	0.23±0.04						SS			
P4TN	mBq/kg	9.4±0.9	1.23±0.20						SS	φ400mm 棒材 一端	内外罐法兰&螺栓	ICP-MS
P4TM	mBq/kg	7.5±1.1	1.25±0.31						SS			
T4	mBq/kg	<44.30	114.26±87.14	87.35±40.70	60.86±36.35	<34.17	78.25±28.24	9043.29±504.69	titanium	宝钛		redhouse
slag	Bq/kg	19.48±0.11	33.37±0.33	32.04±0.19	14.35±0.10	3.04±0.10	2.10±0.08	59.58±1.52	blast furnace slag	太钢炉渣		redhouse
less reliable data												
P4TD_2		2.94± 1.08	<1.45	1.48± 1.20	1.74± 1.18	<0.49	<0.40	<7.77				
P4TG_1		18.42±2.10	42.16±3.08	56.17±2.71	10.55±1.38	2.61±0.71	2.00±0.62	<10.65				

A\B\C取自同一个样品，太钢核级不锈钢随机取样
D\E\F取自同一样品，与G、H来自同一炼钢炉，G\H分别取自400mm直径棒材两端
M、N也是分别分别取自400mm直径棒材两端，用北大ICP-MS测量
I取自10mm板材中的一件，J取自8mm钢板，K取自另一张10mm钢板，I、J来自同一炼钢炉
L、O来自同一张6mm板材

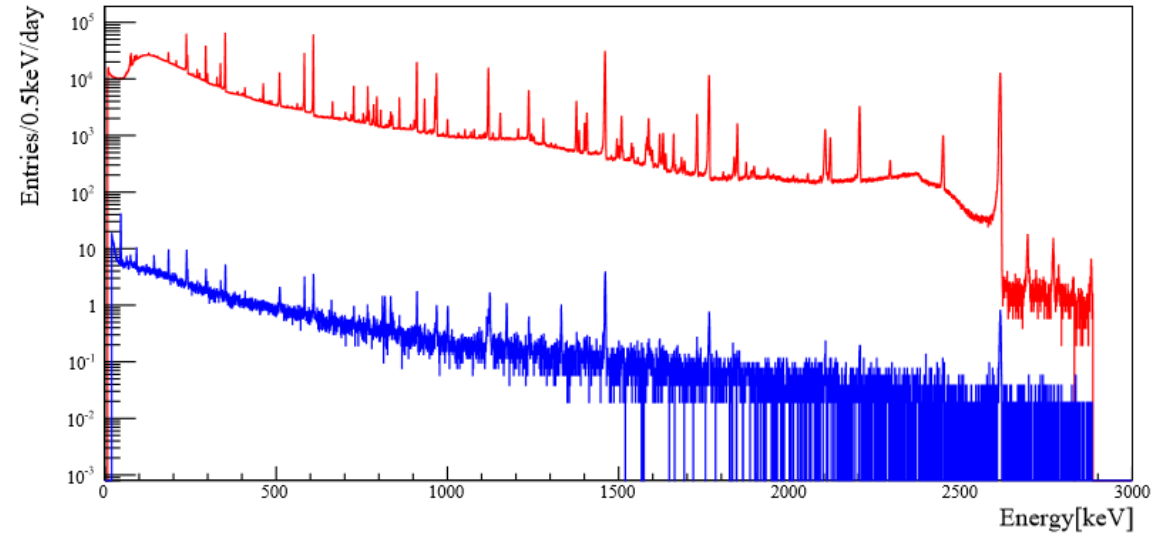
- HPGe γ -ray counting station in CJPL, worked for PandaX-I and -II for detector material Screen, The Sensitivity can reach as low as 0.1mBq



HPGe in CJPL

- 175% relative detection efficiency HPGe, sensitive mass 3.69kg
- BK γ -ray rate of **2.6 count/min** in 10keV-2.7MeV
- Copper Chamber and Lead fully filled in the stainless steel shielding box

2018/7/28



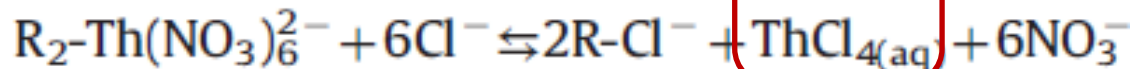
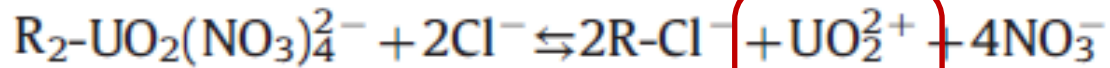
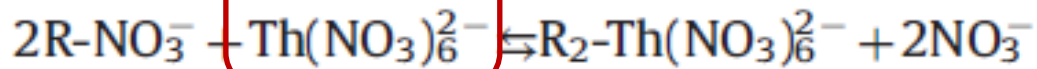
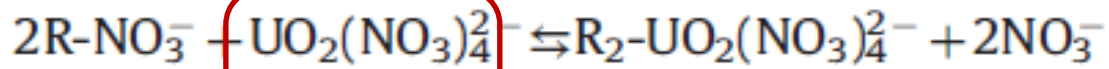
Comparison of the backgrounds with and without passive shielding system in CJPL. The red line stands for the **5-day** spectrum taken without the γ shielding system, while the blue one is a **51-day** pure background with the passive shields and nitrogen flushing

D.D. LaFerriere, T.C. Maiti, I.J. Arnquist, E. W. Hope*, Pacific Northwest National Laboratory. NIMA 775 (2015) 93-98

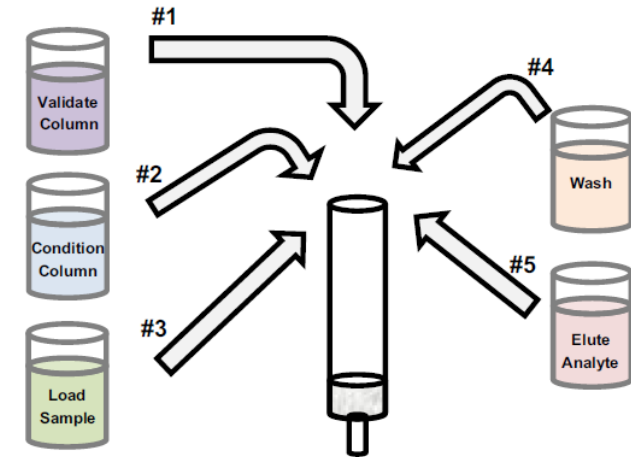
²³⁸U: 0.313 μBq/kg (0.0106ppt)

²³²Th: 0.034 μBq/kg (0.0084ppt)

Class 10 000 clean-room
Agilent 7700 ICP-MS



Spiked with ²²⁹Th and ²³³U



AG 1 × 4, 100–200 离子交换树脂 (Bio-Rad Corp)

#1: 0.1M HCl

#2: Cu: 8 M HNO₃

Pb: 6M HNO₃

#3: Sample loaded

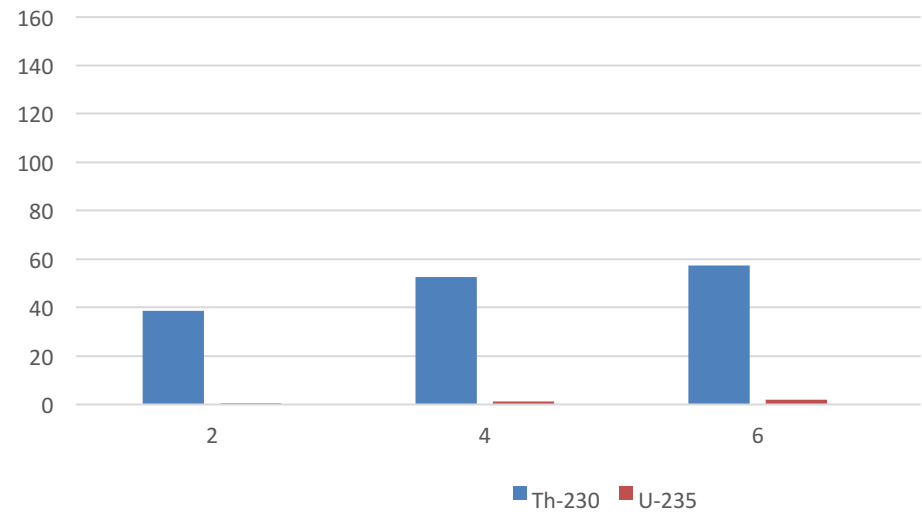
(spiked with ²²⁹Th、²³³U)

#4: Cu: 8 M HNO₃

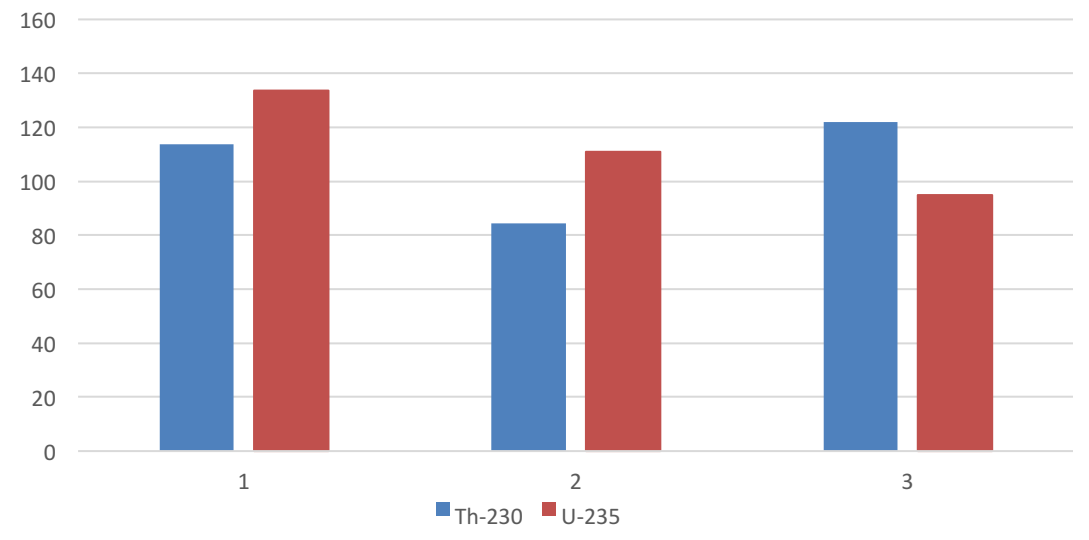
Pb: 6M HNO₃

#5: 0.1 M HCl

离子交换树脂 6mL 累积回收率%



TEVA\UTEVA 树脂 5mL 回收率%

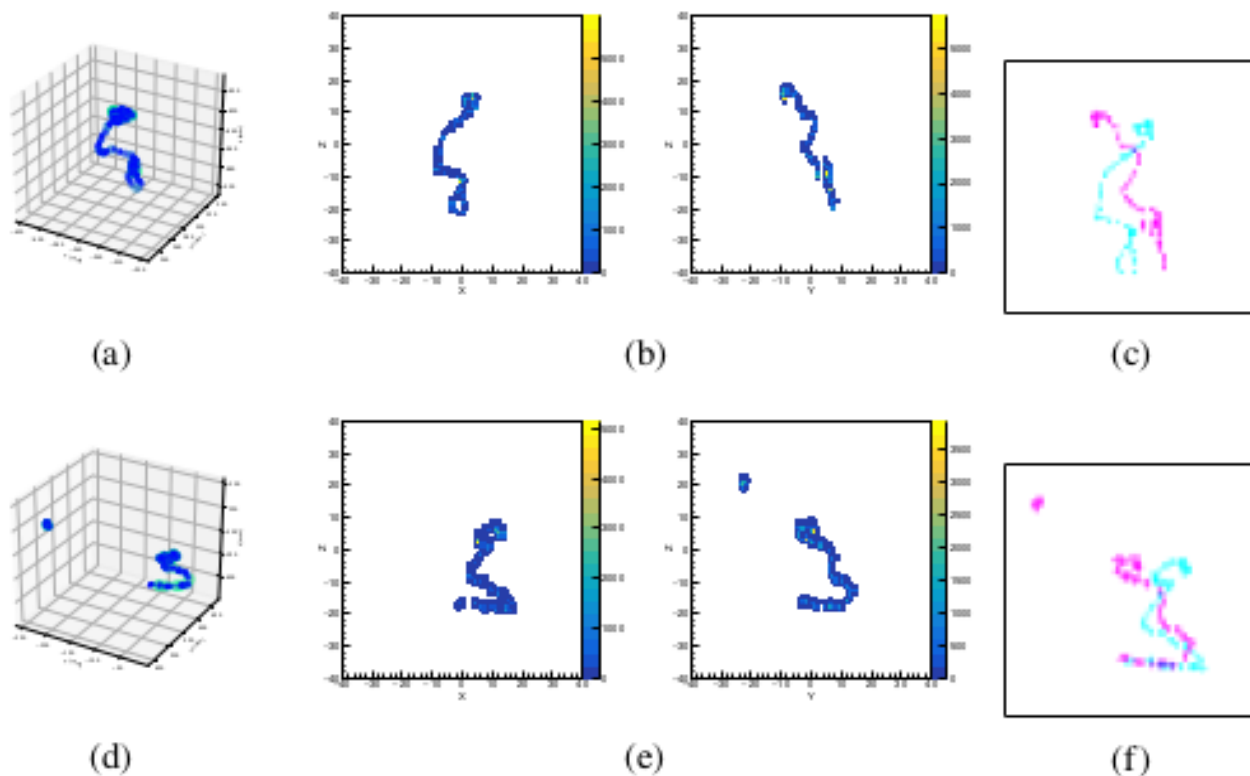


CNN 介绍

1. 确定网络的**输入和输出**,即明确问题的输入张量和输出张量分别是什么。
2. 根据输入张量输出张量以及问题的特性**构造合适的模型**。
3. 准备足够的输入输出**样本数据**。
4. 使用合适的算法**训练模型**,得出最符合样本的权重数据。
5. 使用该模型和训练得到的权重去**预测未知的输入**。

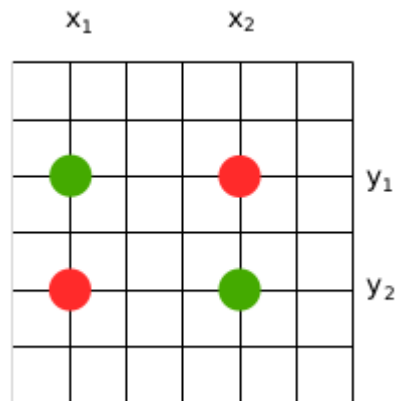
- PandaX-III 输入：重建后得到的 X-Z-Energy 投影和 Y-Z-Energy 投影组成的图片（60x60像素）
- PandaX-III 输出：0（背景）——1（信号） 小数
- PandaX-III 模型：3层简单卷积神经网络，VGG16, Resnet50
- PandaX-III 样本：Geant4 模拟，考虑到探测器响应，电子学触发及读出平面结构。
 - 背景：位于铜罐中的2447keV和2615keV Gamma射线。
 - 信号：位于灵敏气体中，由Decay0模拟得到动量信息的 NLDBD 事件双电子。
 - 总计 11.2万 组样本数据。80%用于训练，10%用于训练中的验证，10%用于测试和检验。

训练样本示意图片

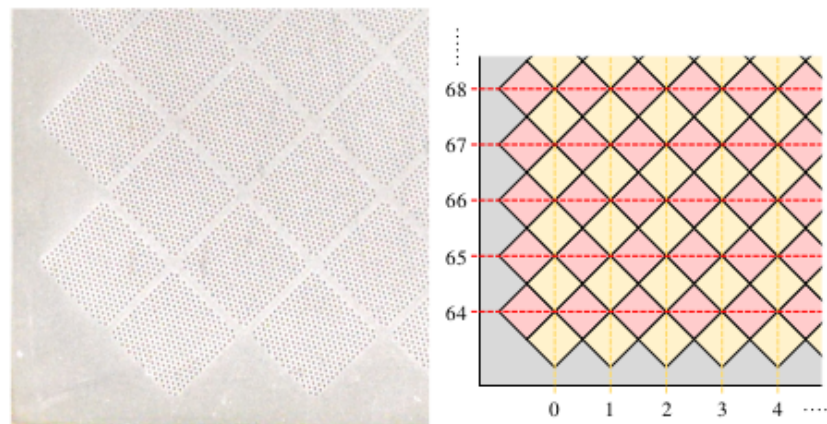


NLDBD事件以及背景事件转换示意图。上部分： ^{136}Xe NLDBD 事件，下部分： $2447\text{keV } \gamma$ 本底事件。(a) 和 (d)：BambooMC 模拟得到的原始 hit 信息。(b) 和 (e)：重建后得到的 X-Z-energy 以及 Y-Z-energy 投影。(c) 和 (f)：转换完成后的图片示意图，该图片并非 CNN 训练中所使用的图片，而是为了方便读者观看图片的颜色被后期处理过，其中青色代表着红色通道，粉红色代表着绿色通道。

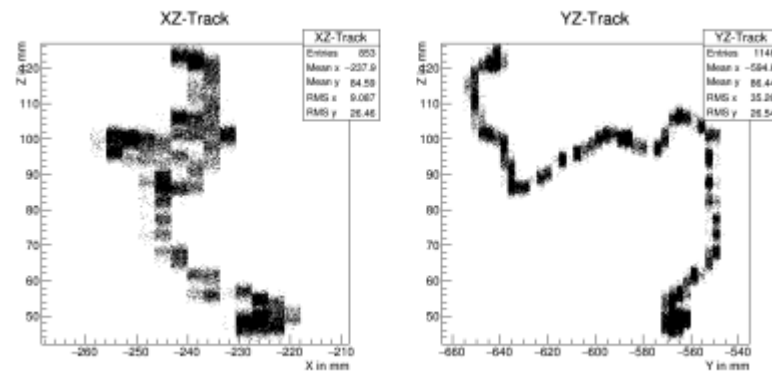
使用 CNN 进行事件鉴别的必要性



误重建示意图



Micromegas 结构示意图



一个难于重建的事例径迹投影