



基于时间信息的 核素定位方法研究

钟 健

深圳技术大学 工程物理学院

第三届粤港澳核物理论坛



目录CONTENT



研究背景：
特殊核材料
检测



核素定位原
理



模拟仿真



应用场景

背景：特殊核材料检测

- a. 截止目前，国际原子能机构（IAEA）已报导了数千起核走私事件，其中包括了高浓缩铀和钚；
- b. 2023年3月15日，国际原子能机构（IAEA）声称，利比亚一处存放设施的大约2.5吨天然铀下落不明，引发了全球担忧；
- c. 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。

国际原子能机构说利比亚2.5吨铀失踪



新华社客户端

2023-03-16 15:32 浙江 | 新华社客户端官方帐号

关注

新华社北京3月16日电 国际原子能机构15日说，利比亚一处存放设施的大约2.5吨天然铀下落不明。

国际原子能机构总干事拉斐尔·格罗西在声明中说，国际原子能机构原计划去年前往该地点核查，由于当地安全形势推迟至本月14日。然而，核查人员发现利比亚先前申报存放于该地点的10桶约2.5吨天然铀不翼而飞。

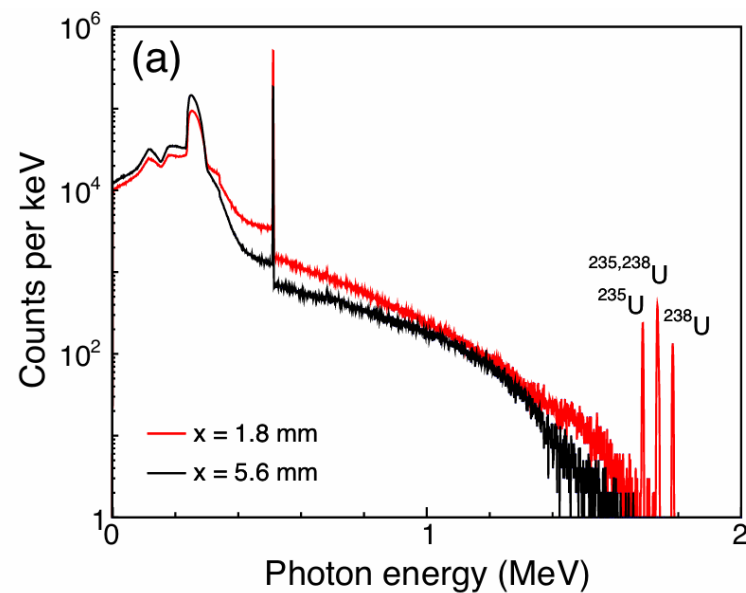
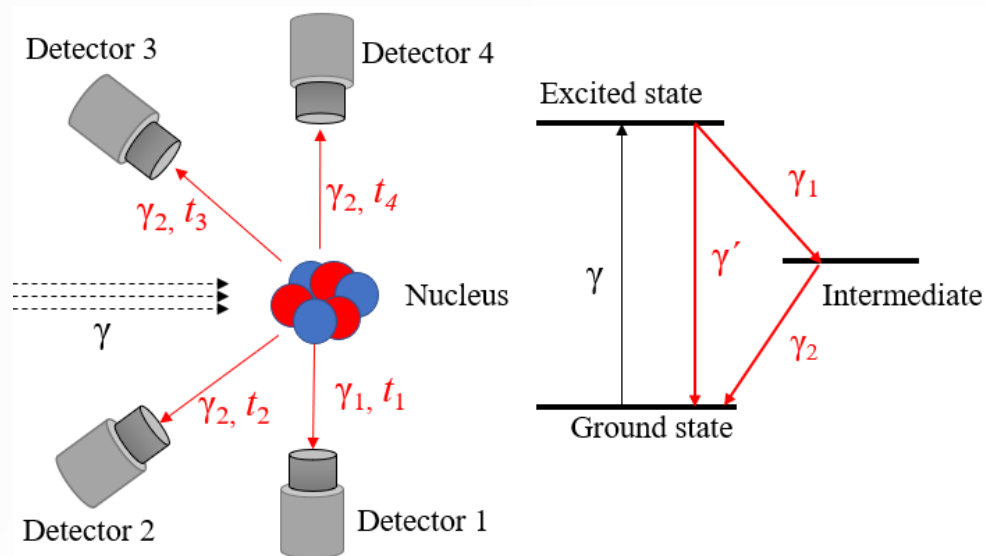


特殊核材料检测

- 核共振荧光(Nuclear Resonance Fluorescence, NRF)又称“核指纹”，是指原子核在特定能量 γ 射线的照射下，发生共振吸收，把原子核从基态激发到激发态，然后通过退激衰变，发射特征 γ 射线回到基态的过程；
- 上个世纪中，美国“氢弹之父”Edward Teller 提出用核指纹来进行核素鉴别；
- 2017年，美国护照系统公司和MIT在美国国土安全部的支持下，研发了自动化检测系统SmartScan 3D，并用于波士顿和麻省港口，并申请了专利保护。
- 很有必要开发一套具有自主知识产权的特殊核材料检测系统。

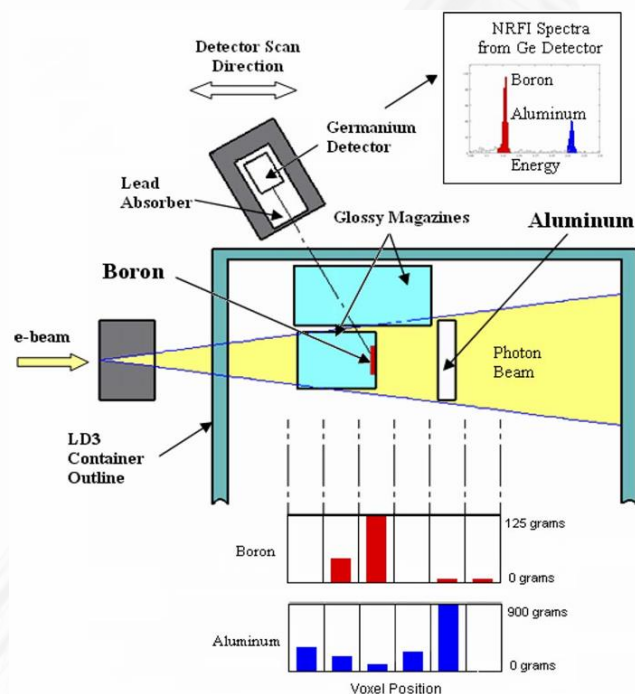
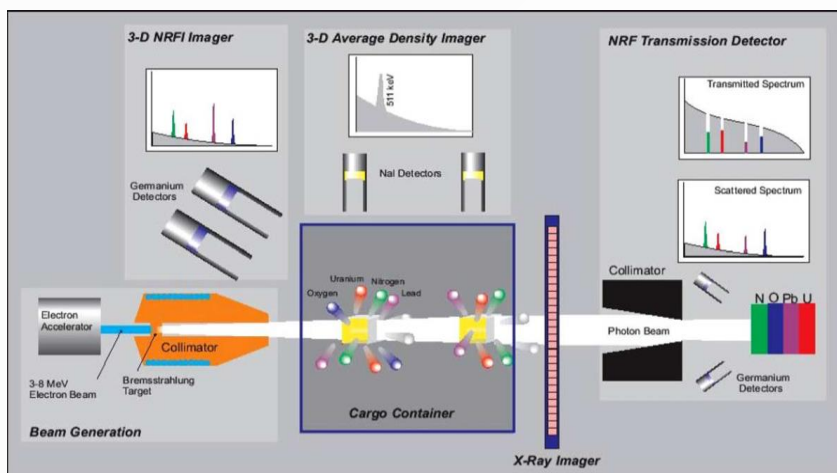
核共振荧光

- 原子核吸收高能光子后，发生核共振荧光，通过直接发射光子 γ' ，或者级联跃迁 γ_1 和 γ_2 回到基态；
- 不同的核素具有独特的特征射线 γ' ，通过 γ' 可以鉴别核素种类。



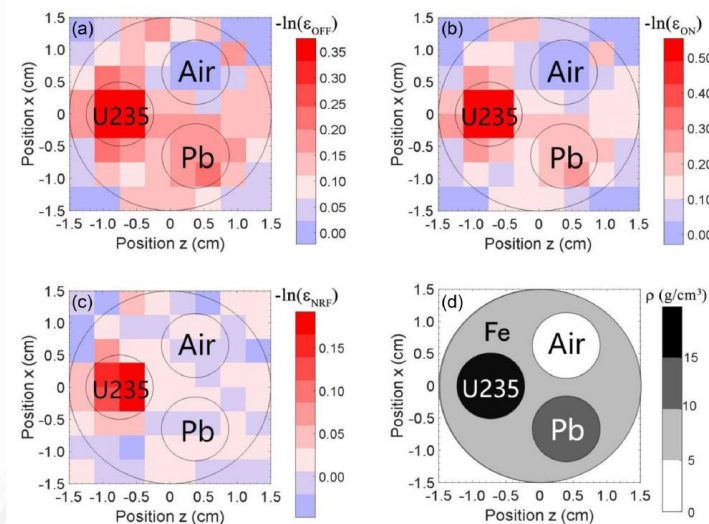
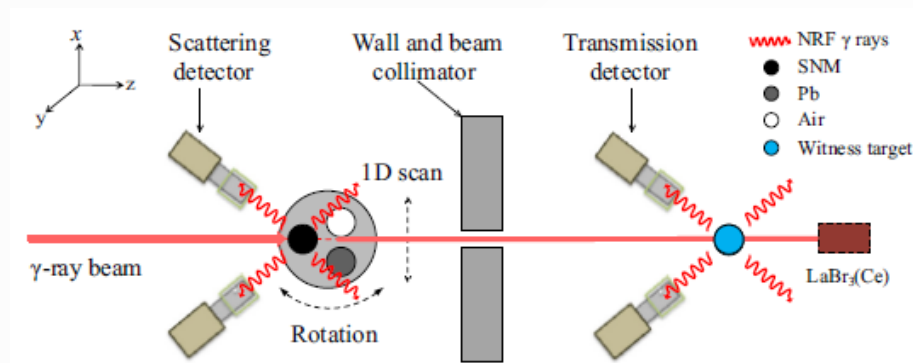
核素定位

SmartScan 3D的核素定位成像通过在背散射探测器前加入准直限位孔，让每个探测器只探测特定方向的射线，每个探测器探测方向延长线与 γ 束线的交点，即为一个像素点。



核素定位

另外，国内罗文教授等人基于断层扫描（CT）技术的核素定位方法也获得了不错的效果。



问题与思考

问题

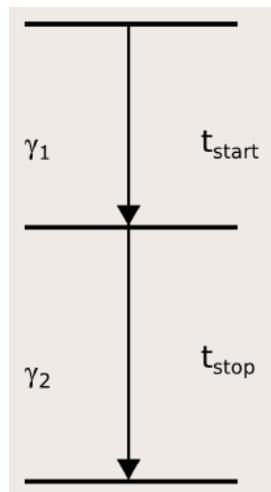
- 在集装箱检测中，利用单个探测器当作一个像素点，需要大量的探测器对探测范围进行覆盖，成本较高；
- 或者通过传动装置移动集装箱，利用探测阵列扫描检测区域，操作相对复杂，耗时较长。

思考

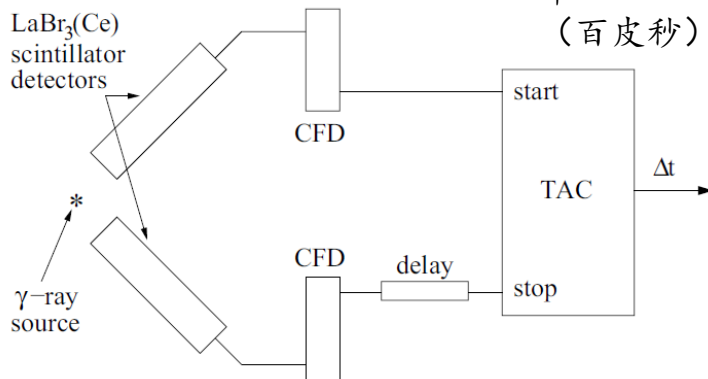
- 能量信息和时间信息是核物理实验中的重要探测对象；
- 目前在核检测技术中，主要关注能量信息；
- 是否能把时间信息也引入到核检测技术中？

核物理实验中的时间信息

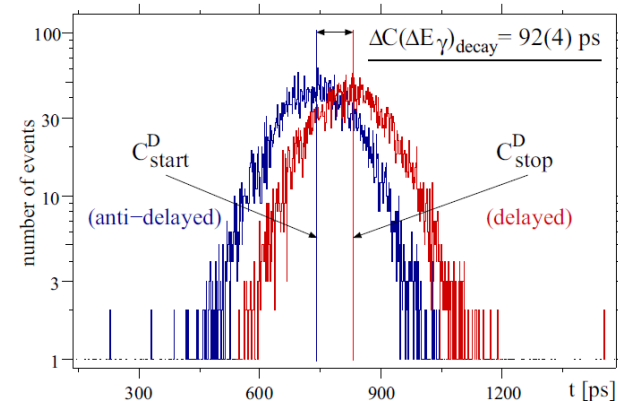
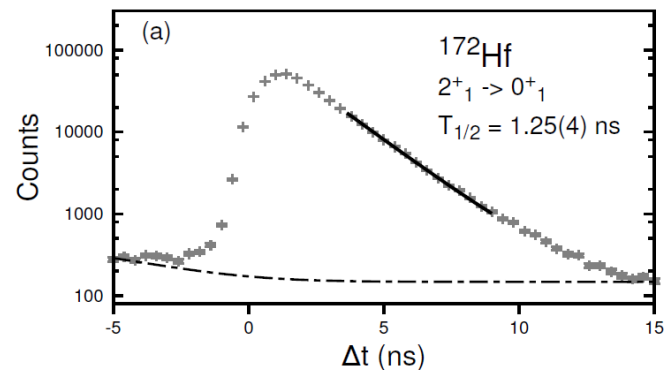
- 时间信息通常用于飞行时间和能级寿命分析；
- 在能级寿命分析中，需修正gamma射线的光程差；
- 假设能级寿命已知，利用光程差可以对核素进行定位。



延迟符合法测能级寿命
(百皮秒)

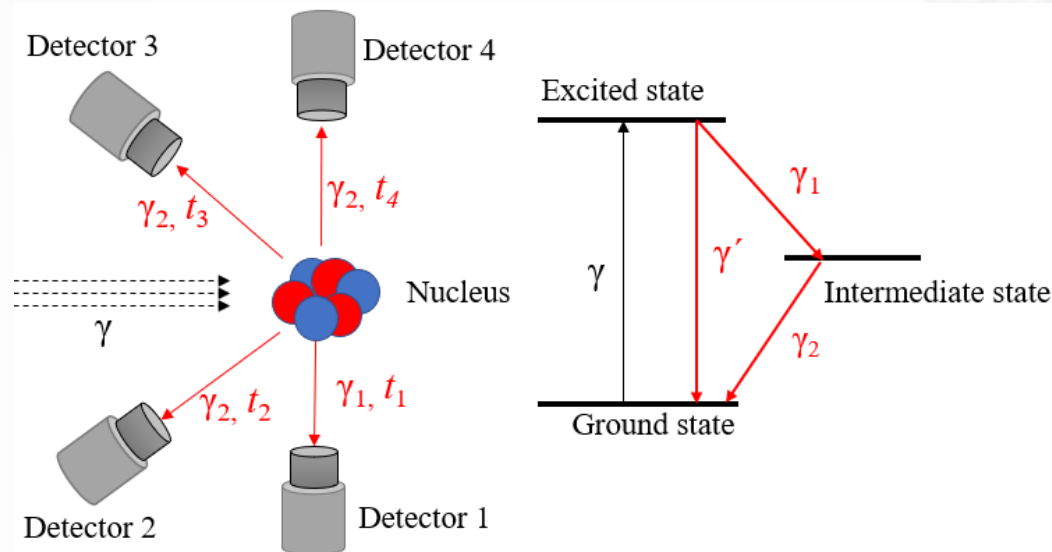


矩心位移法测能级寿命
(数十皮秒)



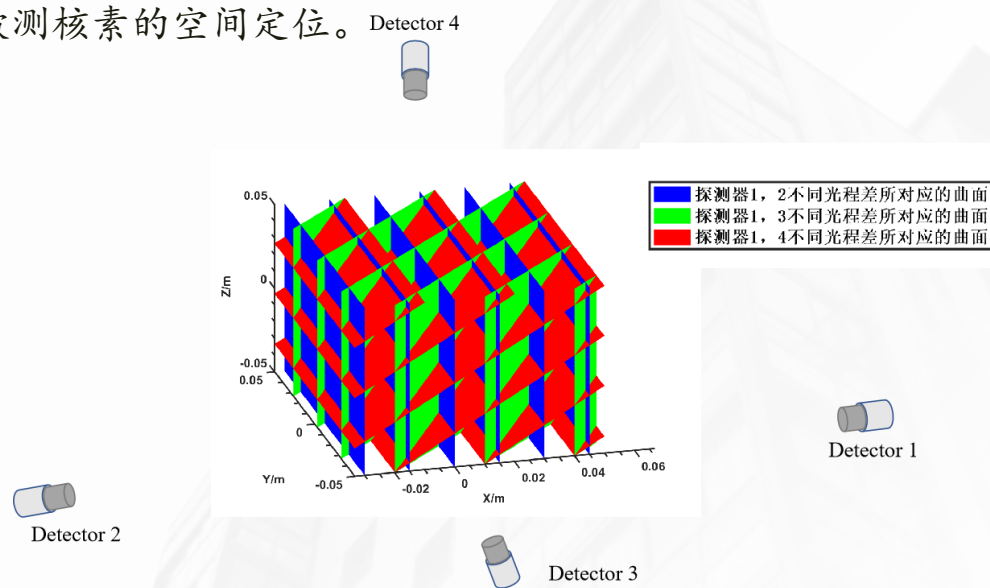
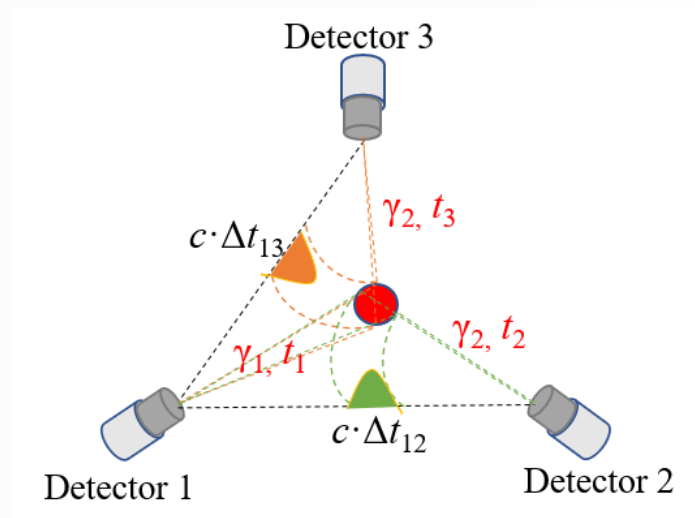
级联跃迁的核素定位

- 参考能级寿命测量，利用级联跃迁的上下两个射线作为start和stop信号；
- 假设射线 γ_1 在 t_1 时刻被探测器1探测到，而随之放出的射线 γ_2 在 t_2 时刻刚好被探测器2探测到；
- 光速 c 与时间差 Δt_{12} 的乘积 $c \cdot \Delta t_{12}$ 即为原子核到探测器1和探测器2的光程差。



定位方法

- 两个探测器之间的光程差，可以确定一个单曲面；
- 加入探测器3和探测器4，用同样的方法，每一个光程差的边界都能在对应的两个探测器之间画出一个单曲面；
- 所有单曲面交叉的中间区域即为被测核素的空间定位。

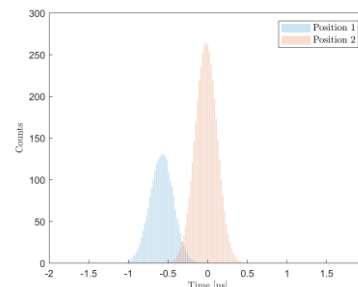
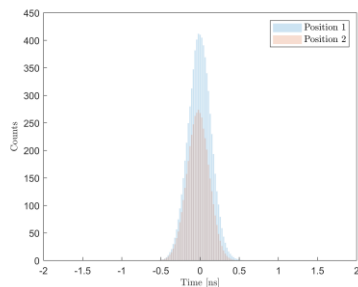
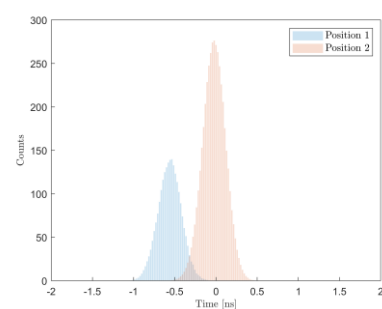
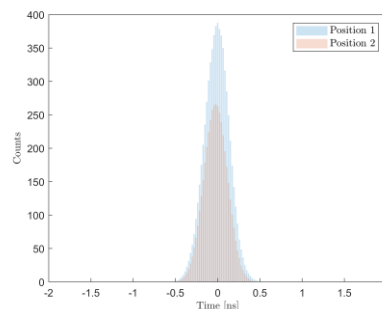
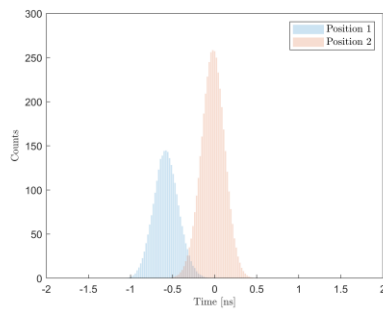


60Co源模拟仿真

- 60Co放射源分别放置在空间(0,0,0)和(10,10,10)厘米处；
- 可以看出不同位置的探测器之间时间谱存在明显差异。

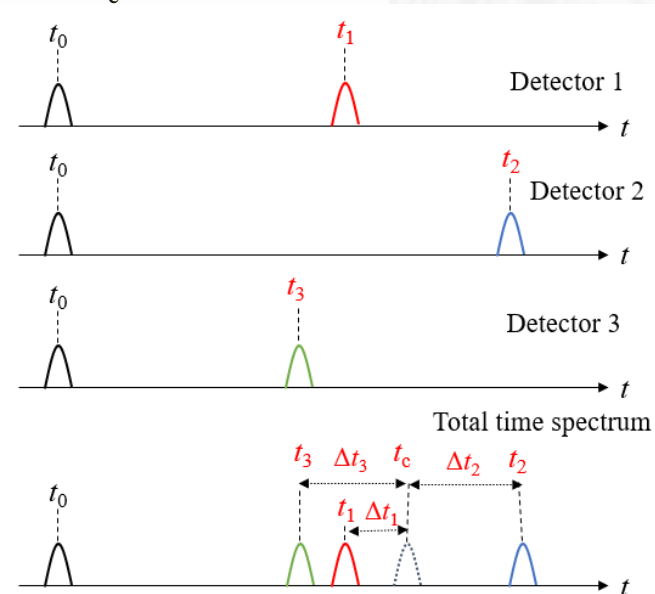
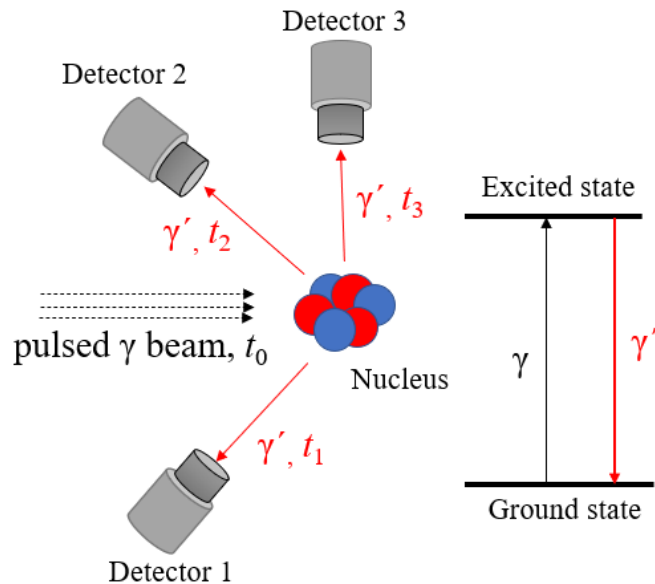


探测器摆放图



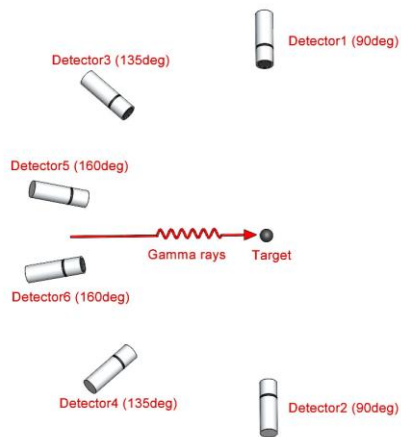
NRF时间信息定位

- 在NRF中引入时间信息，通过NRF能量信息进行核素鉴别，通过时间信息进行定位。
- 以每个探测器特征射线信号的时间点 t_i 为stop，以脉冲束的脉冲信号 t_0 为start，作时间差和光程差；
- 也可以利用标准靶在探测中心校准参考点时间 t_c 。

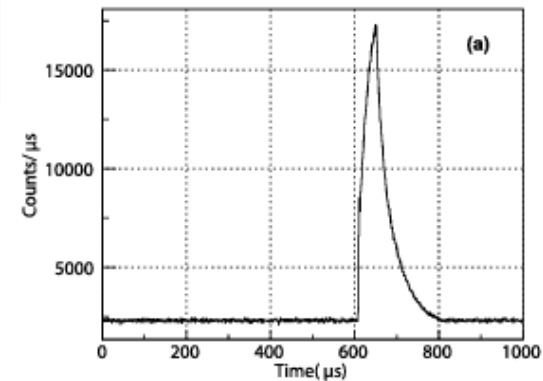
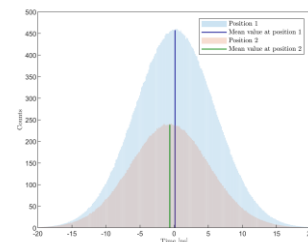
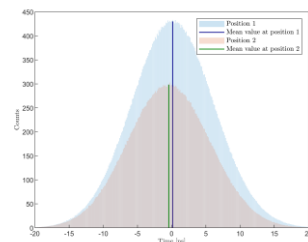
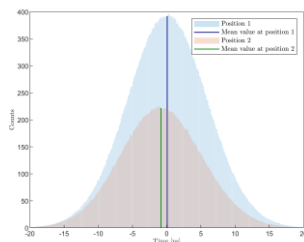
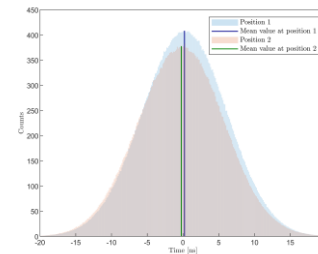
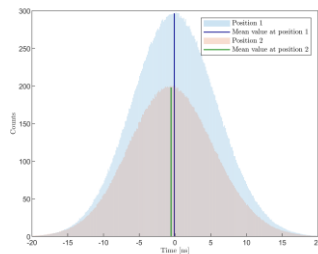


LCS束线模拟仿真

- 样品分别放置在空间(0,0,0)和(10,10,10)厘米处；
- 简单的模拟结果看出，峰位的差异并不大，可能是SLEGS光源的束线时间参数分布过大有关。

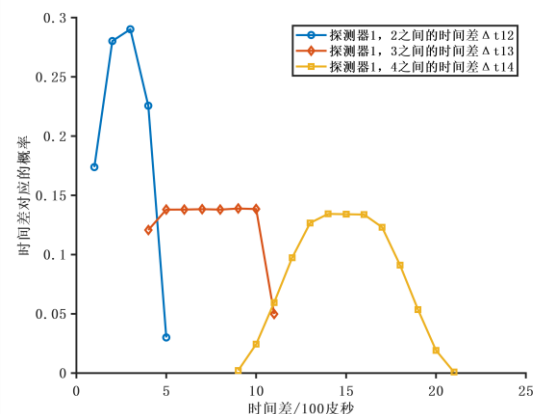
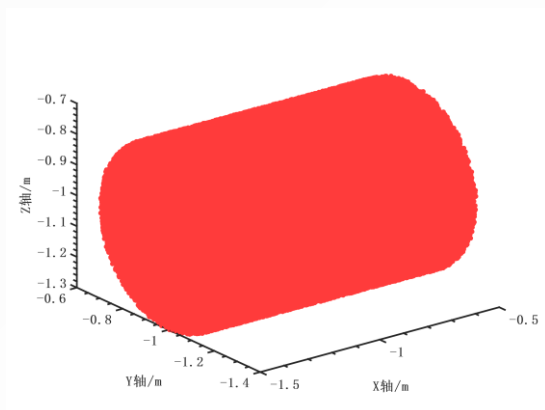


探测器摆放图



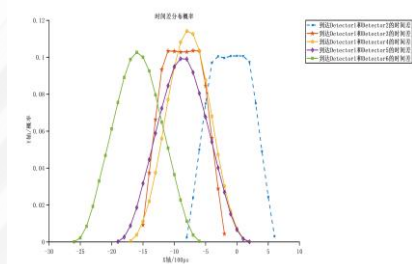
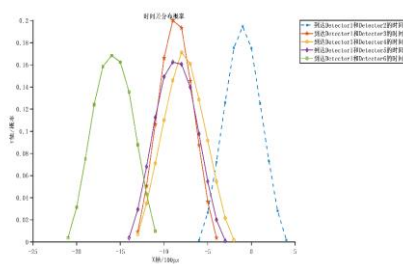
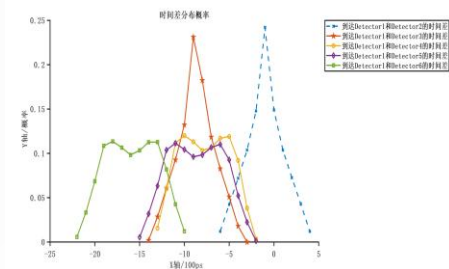
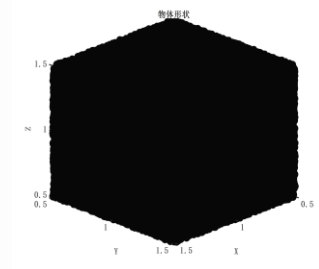
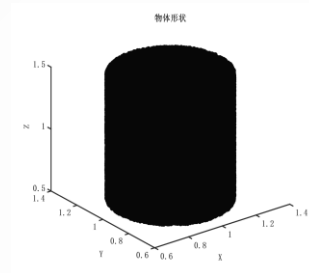
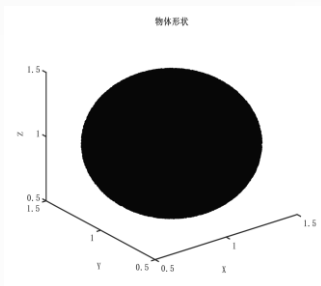
成像方法

- 若放射源具有一定的空间分布，时间差 Δt 不再是理想的高斯分布，而是根据被测核素的空间分布进行展宽；
- 借助峰形拟合和图像重构算法，把全部时间差 Δt 的分布情况结合起来，可以重新描绘特定核素的空间分布轮廓。



成像方法

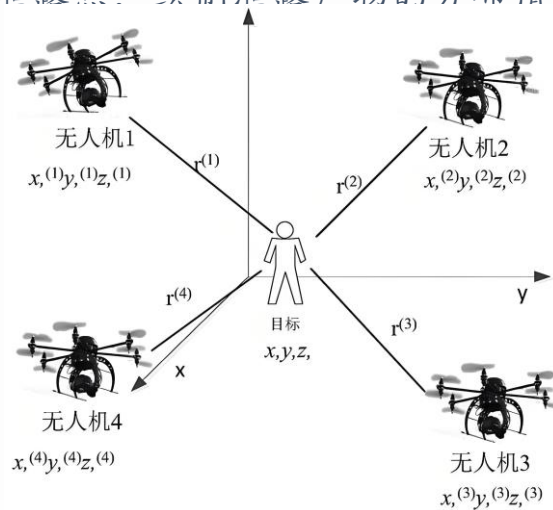
不同形状物体的对应时间差分布图



展望

利用待测样品自身的级联跃迁时间信息对核素进行定位，可应用于以下场景：

- 核医疗成像：可扩充同位素药物的选取范围；在PET成像中，针对511 keV射线，可牺牲部分能量分辨来提高时间分辨；
- 放射源丢失寻找：利用放射源的级联特征射线的时间信息，可以快速定位放射源的位置，有利于公共安全；
- 核泄漏版图绘制：在核泄漏等核应急场景中，在探测泄露产物特征射线的同时，可以通过时间信息，定位泄露点。绘制泄露产物的分布情况，有利于及时制定应对方案。



展望



利用脉冲束活化样品，利用时间信息定位的方法，可扩充现有的共振成像、CT成像等技术，有望应用于以下场景：

- 文物鉴定；可用于文物内部的核素分布成像，实现无损检测；
- 内部结构检测。某些装置由于长时间存放，需要定期检测其内部结构以排除隐患，相比中子成像，核共振荧光时间信息定位成像法，所使用的共振光子束流能量在中子分离阈下，不会引入额外的中子，具有安全可靠的特点。

成果转化



国家知识产权局

100088

北京市海淀区马甸东路 19 号 4 层 510-1 北京正华智诚专利代理事
务所(普通合伙)
李梦蝶(010-62626208)

发文日:

2024 年 04 月 08 日



申请号: 202410412084.3

发文序号: 2024040800458110

专利申请受理通知书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 43 条、第 44 条的规定,申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日等信息通知如下:

申请号: 2024104120843

申请日: 2024 年 04 月 08 日

申请人: 深圳技术大学

发明人: 钟健,李天权,曹磊峰,周沧海,阮双琛

发明创造名称: 一种基于级联跃迁的核素定位方法及其射线探测系统

经核实,国家知识产权局确认收到文件如下:

权利要求书 1 份 3 页,权利要求项数: 8 项

说明书 1 份 10 页

说明书附图 1 份 3 页

说明书摘要 1 份 1 页

专利代理委托书 1 份 2 页

发明专利请求书 1 份 5 页

实质审查请求书 文件份数: 1 份

申请方案卷号: CN1240122

提示:

1.申请人收到专利申请受理通知书之后,认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时,可以向国家知识产权局请求更正。

2.申请人收到专利申请受理通知书之后,再向国家知识产权局办理各种手续时,均应当准确、清晰地写明申请号。

审查员: 自动受理
联系电话: 010-62356655

审查部门: 审查及专利管理部
专利审查业务章

200101 纸质申请, 回函请寄: 100088 北京市海淀区前门桥西土城路 6 号 国家知识产权局专利局受理处收
2023.03 电子申请, 应当通过专利业务办理系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外, 以纸件等其他形式提交的
文件视为未提交。



国家知识产权局

100088

北京市海淀区马甸东路 19 号 4 层 510-1 北京正华智诚专利代理事
务所(普通合伙)
郭艳艳(010-62626208)

发文日:

2024 年 08 月 07 日



申请号: 202411079990.2

发文序号: 2024080701354760

专利申请受理通知书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 43 条、第 44 条的规定,申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日等信息通知如下:

申请号: 2024110799902

申请日: 2024 年 08 月 07 日

申请人: 深圳技术大学

发明人: 钟健,李天权,曹磊峰,周沧海,阮双琛

发明创造名称: 一种基于核共振荧光特征信号的特殊核材料定位方法

经核实,国家知识产权局确认收到文件如下:

权利要求书 1 份 2 页,权利要求项数: 7 项

说明书 1 份 9 页

说明书附图 1 份 3 页

说明书摘要 1 份 1 页

专利代理委托书 1 份 2 页

发明专利请求书 1 份 5 页

实质审查请求书 文件份数: 1 份

申请方案卷号: CN1243417

提示:

1.申请人收到专利申请受理通知书之后,认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时,可以向国家知识产权局请求更正。

2.申请人收到专利申请受理通知书之后,再向国家知识产权局办理各种手续时,均应当准确、清晰地写明申请号。

审查员: 自动受理
联系电话: 010-62356655

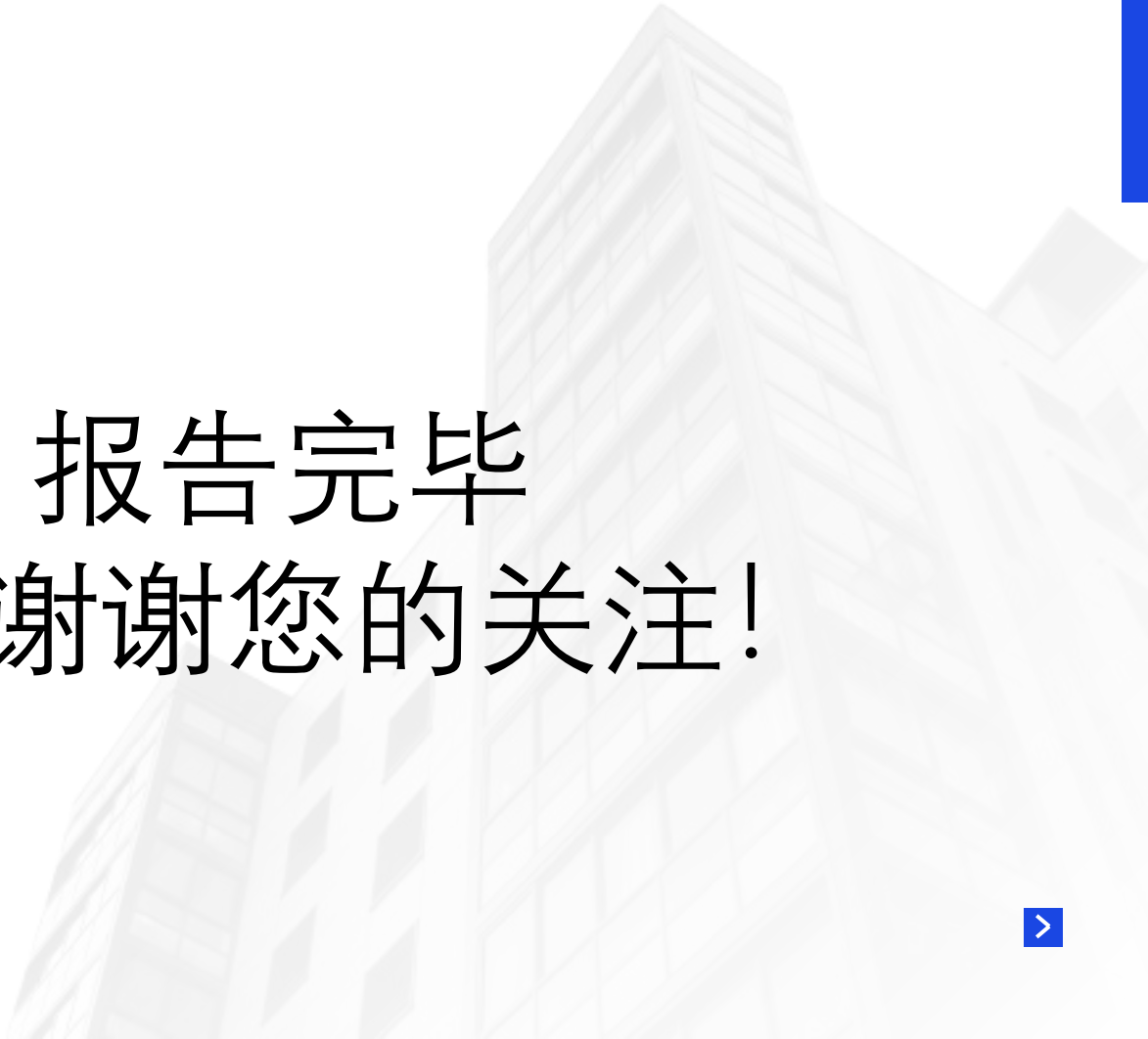

审查部门: 审查及专利管理部
专利审查业务章

200101 纸质申请, 回函请寄: 100088 北京市海淀区前门桥西土城路 6 号 国家知识产权局专利局受理处收
2023.03 电子申请, 应当通过专利业务办理系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外, 以纸件等其他形式提交的
文件视为未提交。

总结



- 提出了一种基于时间信息的核素定位方法；
- 最少只需要4个探测器即可实现空间定位；
- 以现有的探测器条件，预计可实现厘米级的空间定位成像，满足集装箱等大尺度范围的检测需求；
- 探测器时间性能提升后，本方法可用于更多的场景。



报告完毕
感谢您的关注!

