



中华医学会核医学分会  
技术与继续教育学组

中华医学会核医学分会第十一届委员会  
技术与继续教育学组  
系列专家讲座

# PET技术原理

## Principle of PET technology

李从心  
北京协和医院



- 学士，主管技师
- 北京协和医院核医学科
- 中华医学会核医学分会技术与继续教育学组委员

# 内 容

- 正电子衰变及湮灭辐射
- 光子作用形式
- 符合事件及符合探测
- PET探测器及采集模式

# PET物理基础

含有过量质子的放射性核素有两种衰变方式：

- 电子虏获 (electron capture)

衰变释放的能量 $<1.20\text{MkeV}$ ，不能进行PET显像

- 正电子衰变 (positron decay)

至少大于 $1.02\text{MkeV}$ 的能量



# PET物理基础

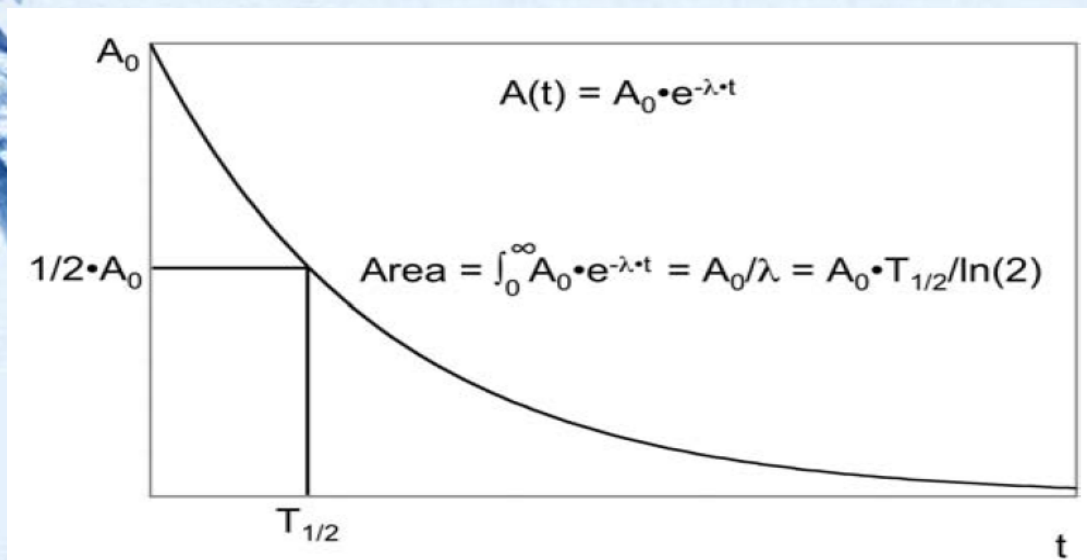
- 以正电子衰变为主的核素 (  $^{18}\text{F}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$  )
- 正电子衰变

一个带正电的质子发生正电子衰变，发射一个正电子；

一个正电子发生湮灭辐射，发射出两个呈 $180^\circ$ 方向运动的511keV的 $\gamma$ 光子

# PET物理基础

- 指数形式衰变



$^{18}\text{F}$ 衰变公式

$$A = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{110}}$$

# PET物理基础

## 511keV $\gamma$ 光子与组织的作用形式

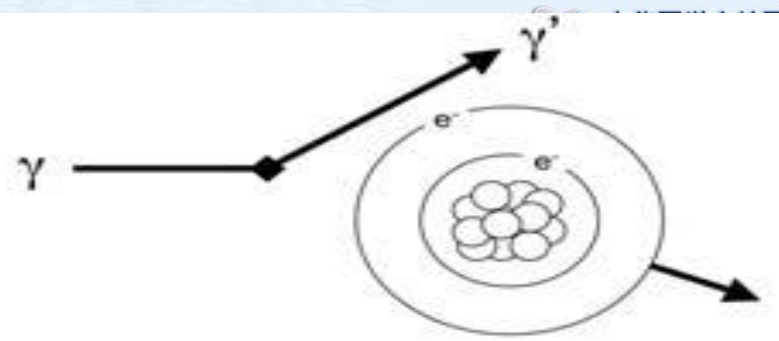
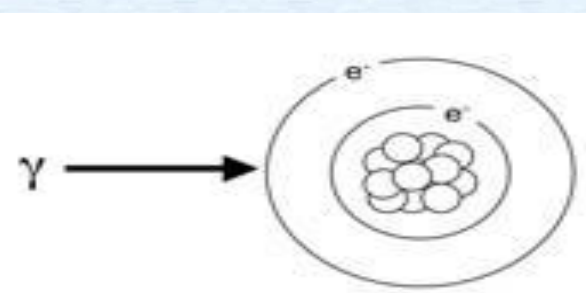
- 相干散射 ( coherent scattering )
- 光电效应 ( photoelectric effect )

光子能量被完全吸收，并发射特征性X线,是光子在组织内衰减的重要原因

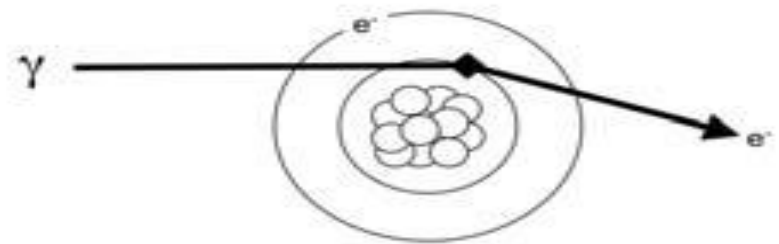
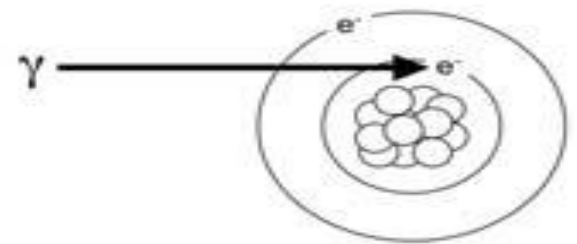
- 康普顿散射 ( compton scattering )

511keV光子与临近外层电子作用，会损失部分能量，并且运动方向会发生改变

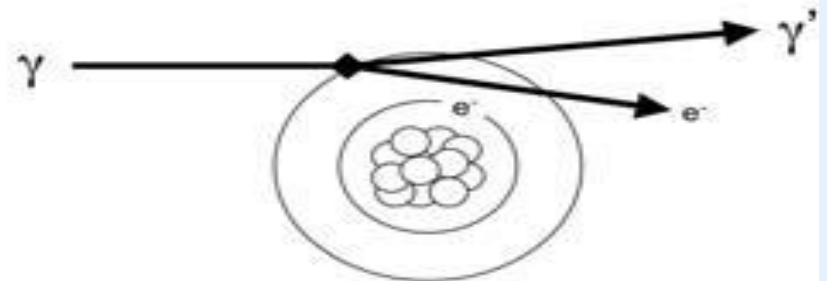
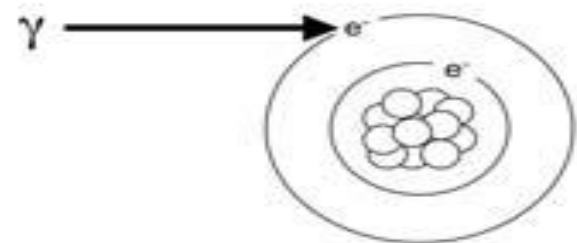
Rayleigh



Photoelectric



Compton





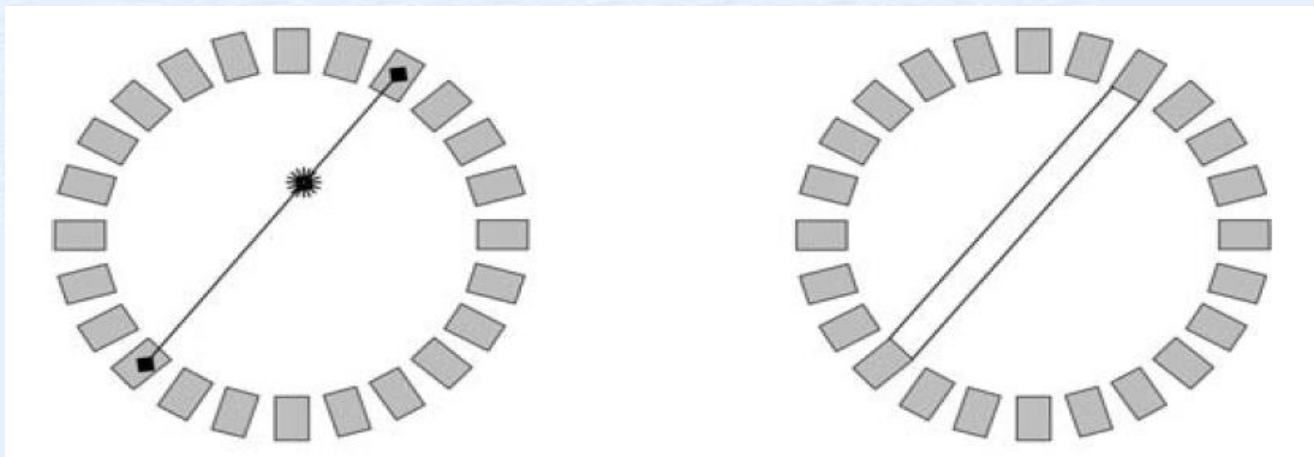


# 光电效应与康普顿散射的结果

# PET成像基础

- 符合探测 ( coincidence detection )

符合时间窗：在一段时间内到达的光子被认为是同一个事件，通常为10ns左右。

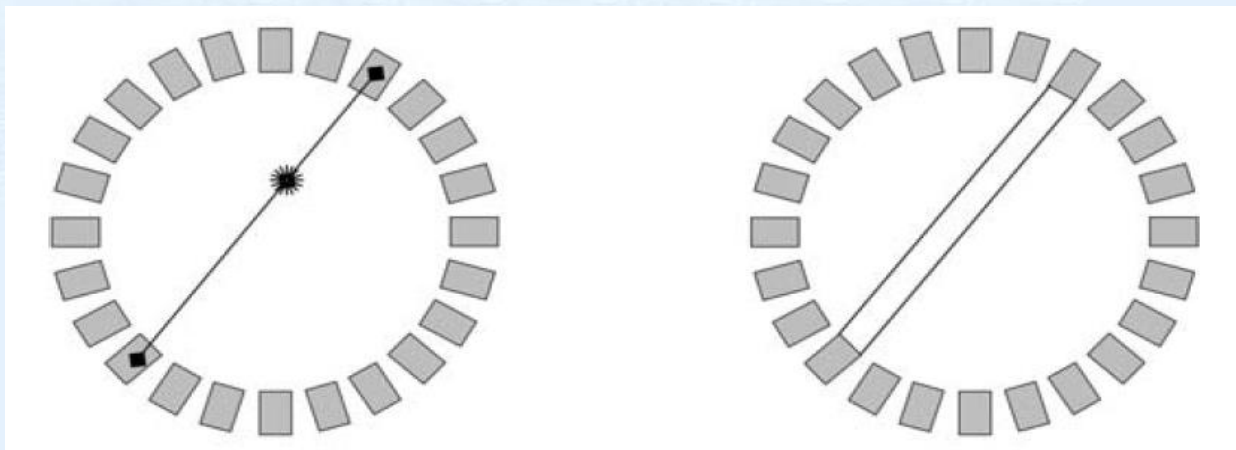


# PET成像基础

- 响应线 ( line of response )

探测器排列成环状，晶体阻截光子，探测到响应线。

正电子的湮灭地点可能在响应线上任何一点。





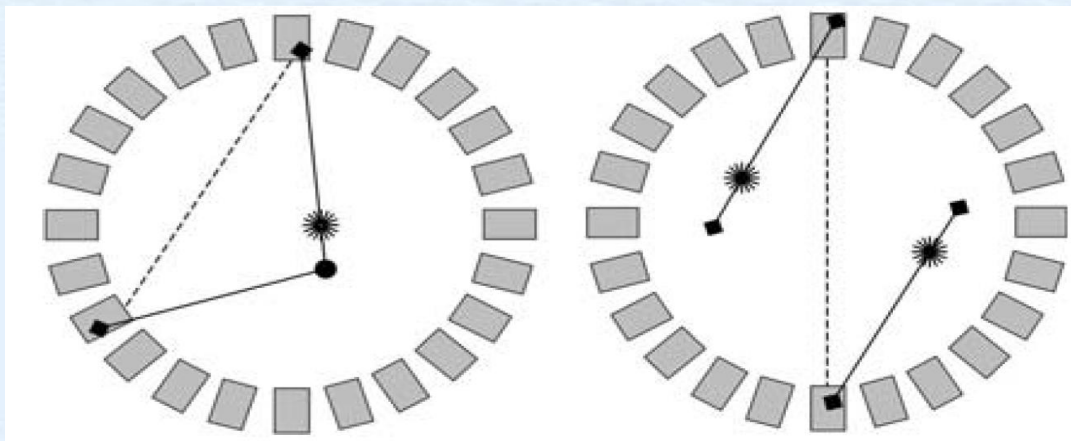
# SPECT与PET探测器的区别



# PET成像基础

## 符合事件 ( coincidence event )

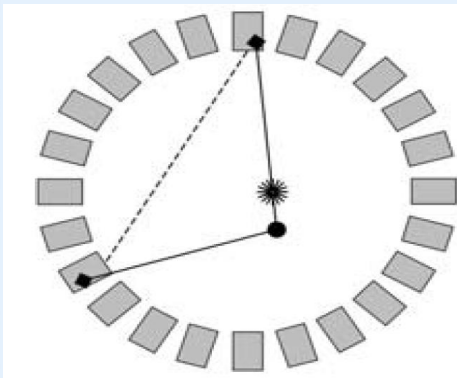
- 真实符合 ( true coincidence )
- 散射符合 ( scatter coincidence )
- 随机符合 ( random coincidence )



# PET成像基础

## 散射符合

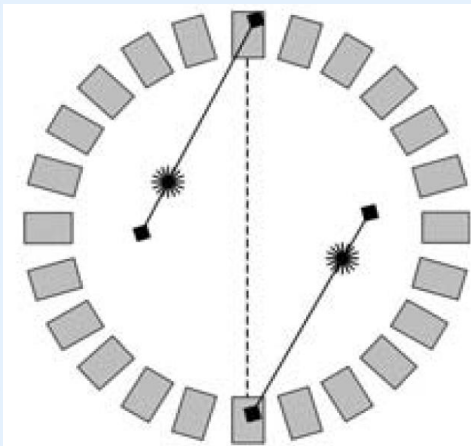
- 经过Compton散射，511keV光子的运动方向会改变，且能量会有损失，可能导致能量衰减（大部分情况下损失的能量很小，探测器仍会记录为photopeak event）
- 导致晶体探测LOR的错误，是限制PET分辨率的最重要原因。肥胖病人散射分数大。



# PET成像基础

## 随机符合

- 由于各种原因（几何、衰减、晶体探测效率等），绝大部分时间都是一个511keV光子击中探测器。所以可能会出现random coincidence（只要在符合时间窗内到达晶体），造成LOR错误，影响分辨率





**探测错误响应线的结果**

**$^{18}\text{F}$ -FDG注射剂量**



# PET探测器

- 晶体

- 光电倍增管

可区分scintillation发生的部位

- Pulse height analyzer

只记录能窗内的信号，将低能量的光子去除

# PET探测器

## 晶体

- 一个PET探测环中通常有500个以上的晶体，不同机型的探测环数不同。
- 晶体通常在轴向（axial）和经线（transaxial）方向上大小为4-6mm，分别影响层厚和横断层内的分辨率；在radial方向上晶体厚度为20-30mm，影响阻截光子的能力。
- 晶体中Compton散射的影响：进入晶体中的光子若经过compton散射离开晶体，会使灵敏度降低；若未离开晶体而是被晶体吸收，则会降低分辨率。

# PET探测器

## 晶体的性能

- 透明度 ( transparency )

使光电效应产生的可见光粒子能被光电倍增管探测到
- 阻截能力 ( stopping power )

原子序数越高、密度越高的材料阻截能力越强
- 光输出量 ( light output )

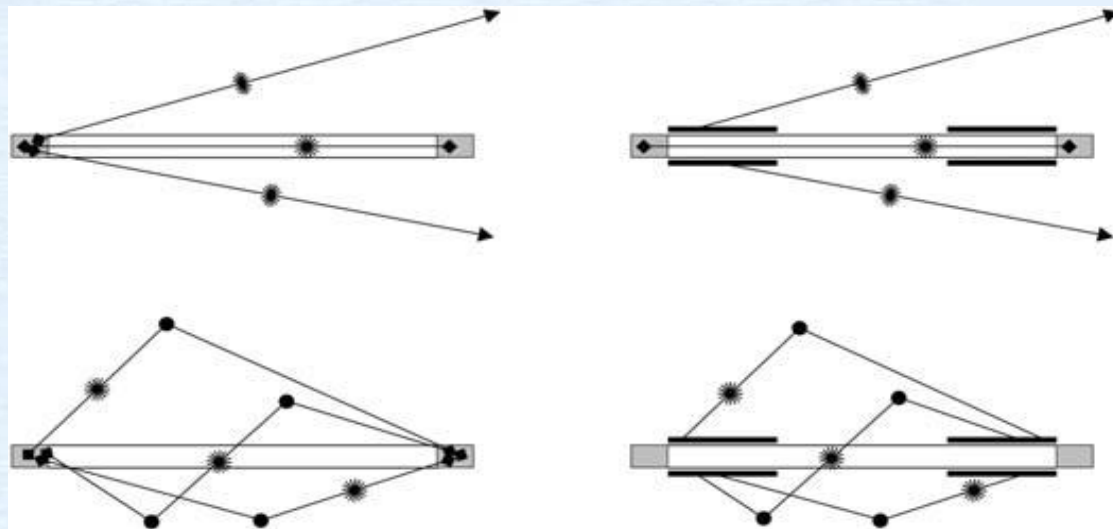
与能量分辨率有关，也影响空间分辨率和符合时间窗
- 衰减时间 ( decay time )

影响符合时间窗的长短，也是影响死时间的关键因素

# PET采集模式

## 准直 ( collimation )

- 减少了scatter coincidence，而true coincidence不受影响。采集灵敏度降低，scatter fraction低。





# PET采集模式

- 2D采集

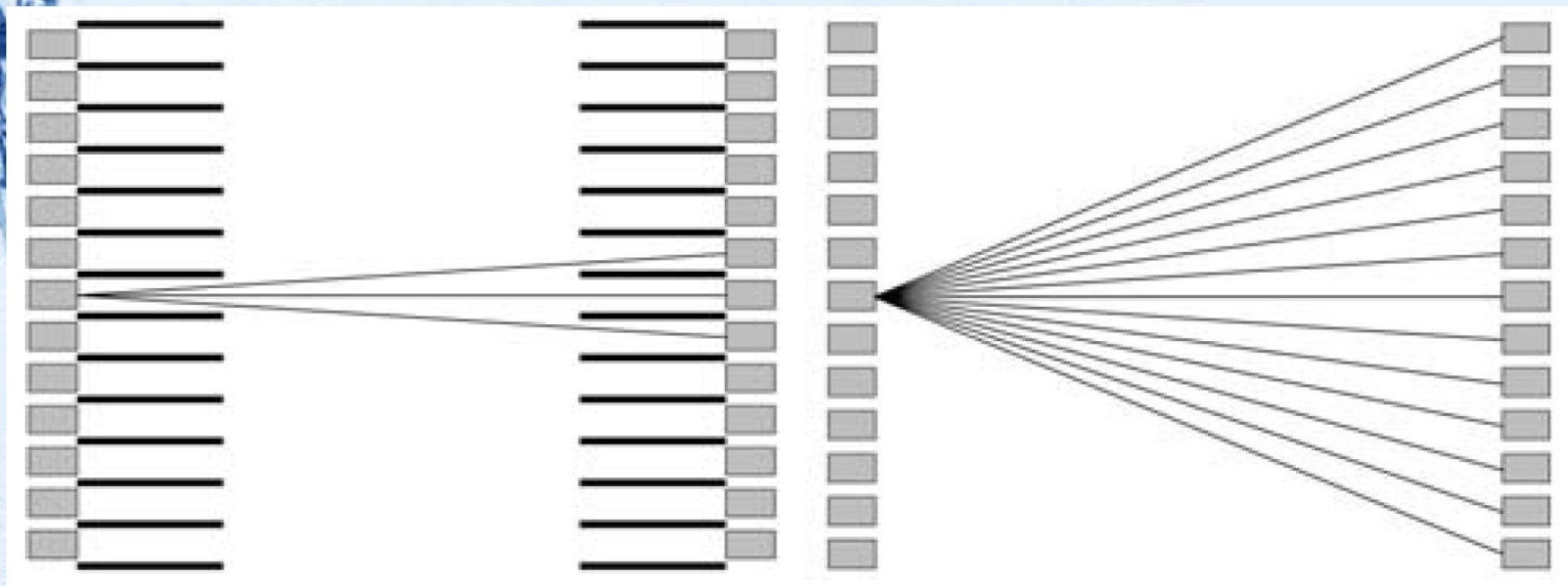
每个探测环之间有铅栅（或钨栅），阻挡其他层面的光子。2D采集模式灵敏度低，采集时间长，但散射符合和随机符合少。

- 3D采集

采集灵敏度提高，采集时间短；散射符合和随机符合多；靠近探测环两端的晶体采集的灵敏度明显低于中间的晶体。

# PET采集模式

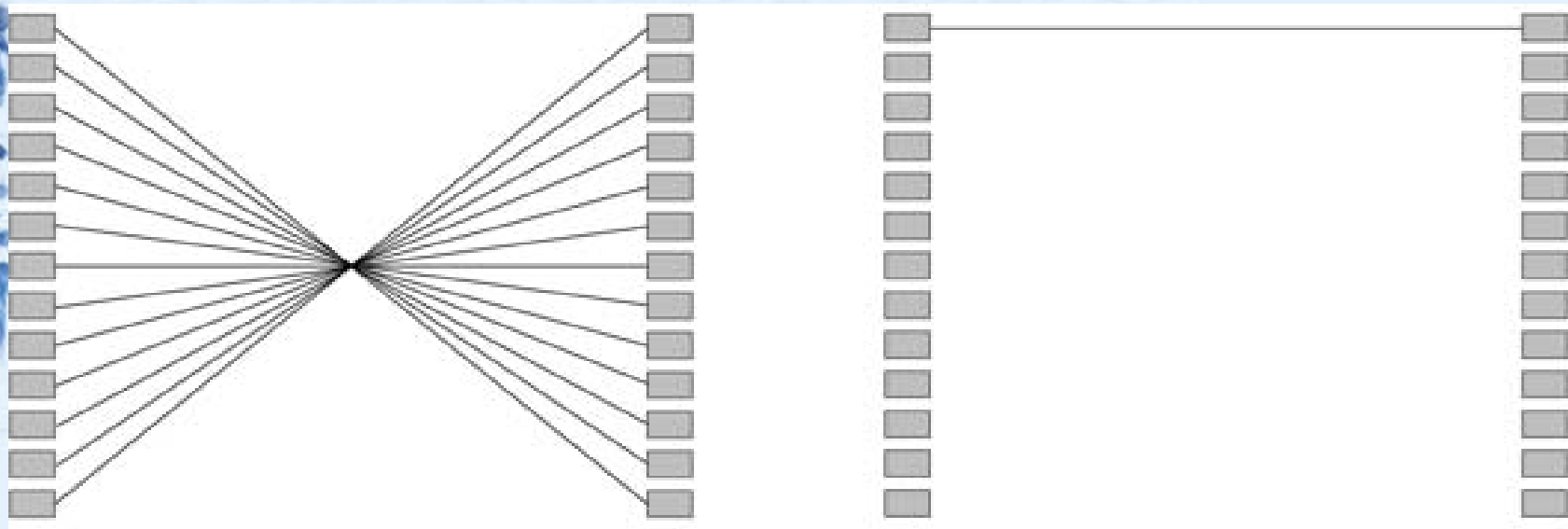
## 2D和3D采集



# PET采集模式

## 3D采集

- 采集灵敏度提高（ true coincidence探测效率提高）
- scattered coincidence提高：对于体型较瘦的病人具有优势
- Random coincidence提高：注射剂量合适，符合时间窗窄，3D效果好
- 靠近探测环两端的晶体采集的灵敏度明显低于中间的晶体





# 中华医学会核医学分会第十一届委员会 技术与继续教育学组成员名单



中华医学会核医学分会  
技术与继续教育学组

组 长	姚稚明、缪蔚冰
副组长	王茜、范岩、刘纯
传媒管理	林端瑜、余飞
秘 书	李旭、郑山
委 员	陈亮、杨治平、肖茜、李梦春、郑堃、李从心、王闯、程兵、黄斌豪、邓群力、袁梦晖、边艳珠、李忠原、黄占文、张卫方、李凤岐、褚玉、潘建英、程祝忠、梅丽努尔·阿布都热西提、肖欢、耿建华、武兆忠、杨吉琴、农天雷、徐微娜、苏莉、江勇、董萍、黄谋清、马宏星、向阳