

碘化钠掺铊闪烁体 γ 能谱实验 与 光电倍增管的革新展望

报告人：李潇 08300300040
江宇 08300300047

实验简介

- γ 射线与物质作用产生的各种效应，其过程可以由能谱进行分析。
- 能谱：对不同的能量分别进行计数而产生的谱线。
- 闪烁体： γ 射线的作用对象，可以理解成“将 γ 光子能量转化为若干荧光光子”。
- 光电倍增管：探测光子，并将光子信号放大、转化为电信号输出。

我们所做的工作

- 使用传统光电倍增管进行 γ 能谱实验，并分析处理数据。
- 分析传统光电倍增管产生的能谱图中的背景噪音。
- 对光电倍增管的革新提出猜想，提出问题、分析问题、解决问题
- 对我们的革新方案尚存的一系列难题的列举

γ_1 光子的旅程

- 我从铯中来
- 初进闪烁体，邂逅电子云
- 与电子“合体”，涅槃于光电效应之中：

$$E_{\text{光电子}} \sim E_{\gamma} = h\nu$$

- 电子被打了出去，携带着光子几乎全部的能量，称为“次级电子”

γ_2 光子的旅程

- 邂逅电子，发生碰撞
- 碰撞位置不同，被散射和次级电子发射的方向不同。
- 当散射角为 θ 时，各自能量为：

反冲电子能量：
$$E_e = E_\gamma - E_{\gamma\text{散射}}$$

散射光子能量：
$$E_{\gamma\text{散射}} \sim \frac{E_\gamma}{1+2E_\gamma(1-\cos\theta)}$$

- 这就是康普顿散射

γ_n 光子的旅程

- 与各种电子不断发生碰撞，产生各种能量的次级电子（光电效应和康普顿效应）。
- 最终能量耗尽消失（发生了光电效应），或者能量没耗尽（没有发生光电效应）逃逸出晶体。

次级电子的旅程

- γ 光子将其激发出原子，使其变为自由电子
- 动能为 γ 光子转移给它的能量
- 与原子作用，使原子激发。
- 原子退激发，发射出荧光光子。
- 于是，次级电子的能量转化给了荧光光子。

能量归宿

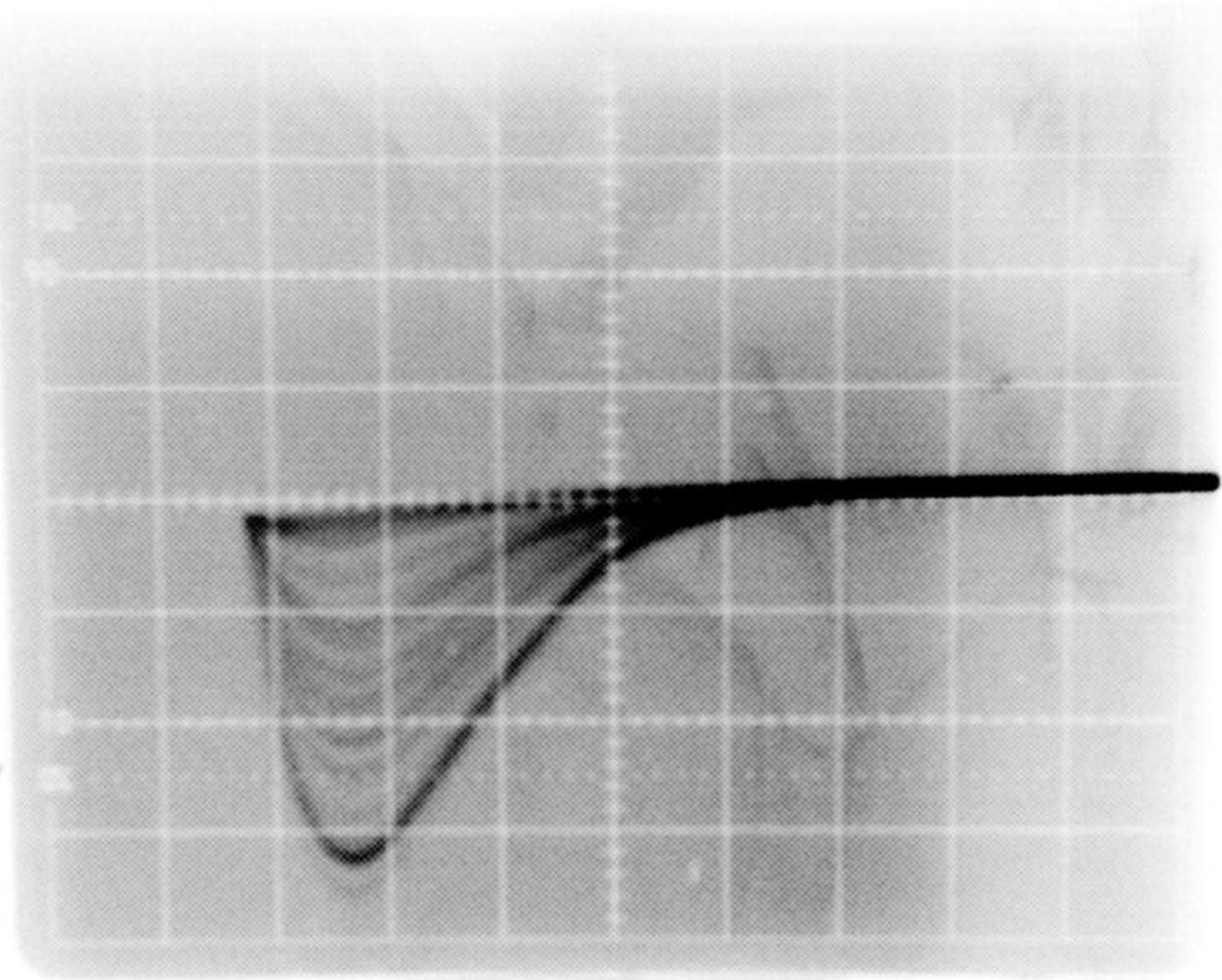
- 根据能量守恒，一个 γ 光子进入闪烁体，经过多次效应消失后，此间过程产生的荧光光子的能量总和即为该 γ 光子的能量（对应能谱图中的光电峰）
- 若没有消失而是逃逸出了闪烁体，那么此间过程产生的荧光光子能量总和就是该 γ 光子产生的效应在能量上的反应
- 少数直接穿过闪烁体打到光阴极上的 γ 光子与光阴极电子发生反散射返回闪烁体，则它被记录的能量只是返回闪烁体时的能量，与光阴极作用的能量并没有被记录（它只在光阴极上产生一个次级电子）。

实验仪器

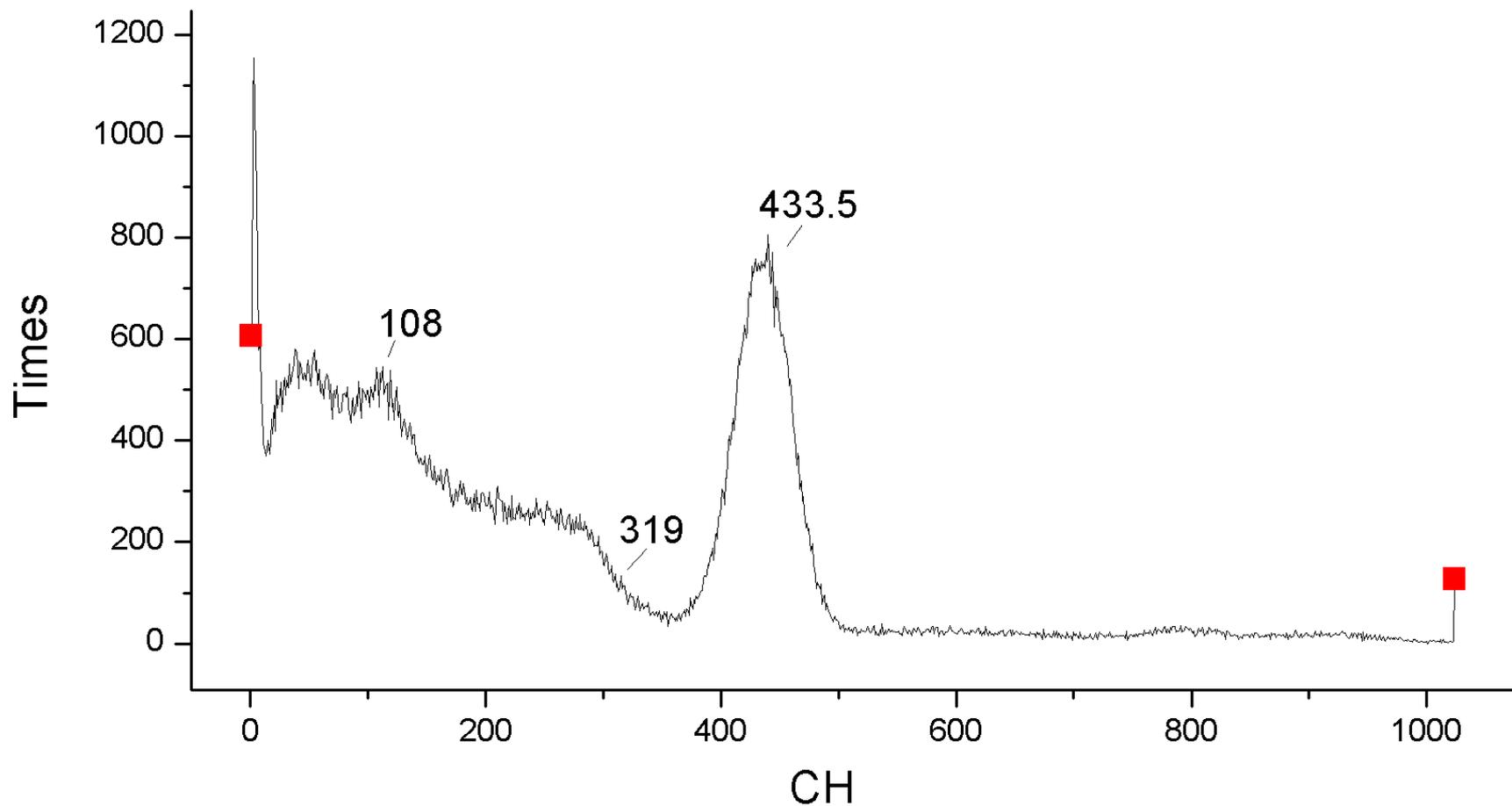
- 放射源（放射性铯，钴）
- 闪烁体（碘化钠掺铊闪烁体）
- 信号收集设备（光电倍增管，线性放大器）
- 测量设备（多道计数器，计算机）

使用示波器直接观察

- 将探头直接接在示波器上，示波器扫描模式调为“触发”。可以看到示波器的图像是由不同振幅和亮度的一系列峰构成的

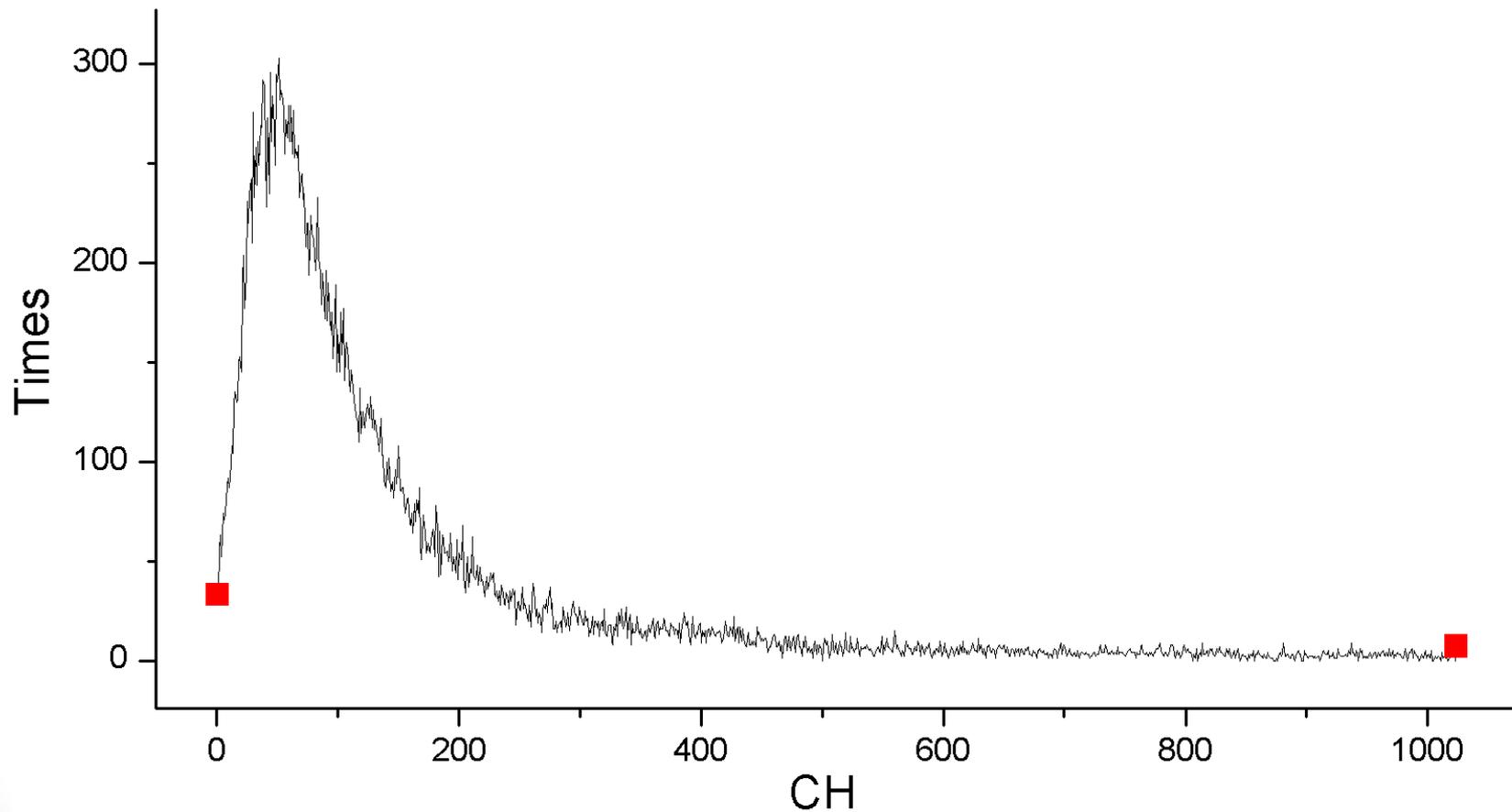


- 使用电脑记录 γ 能谱图，使用的是 ^{137}Cs 放射源，记录时间200s

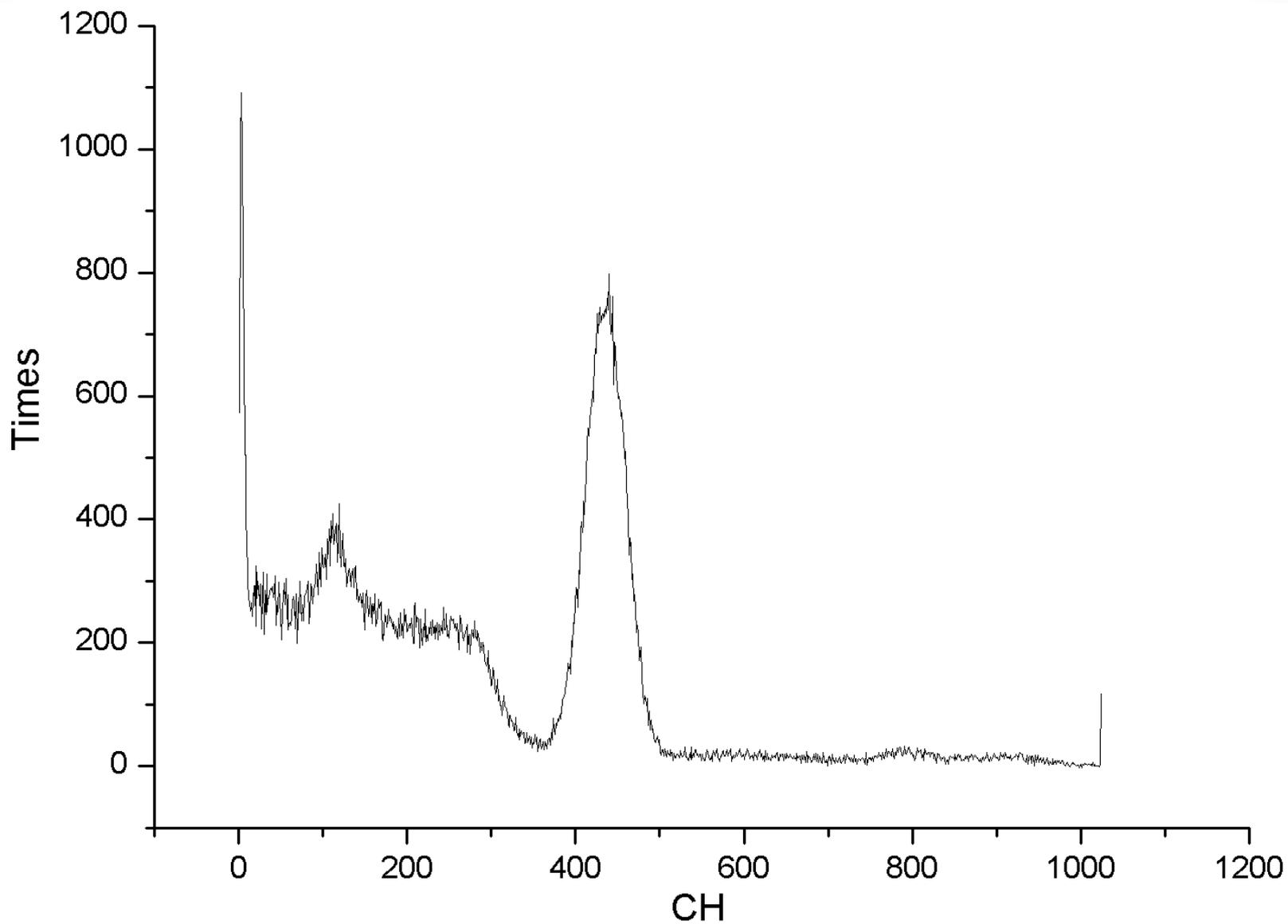


噪音问题

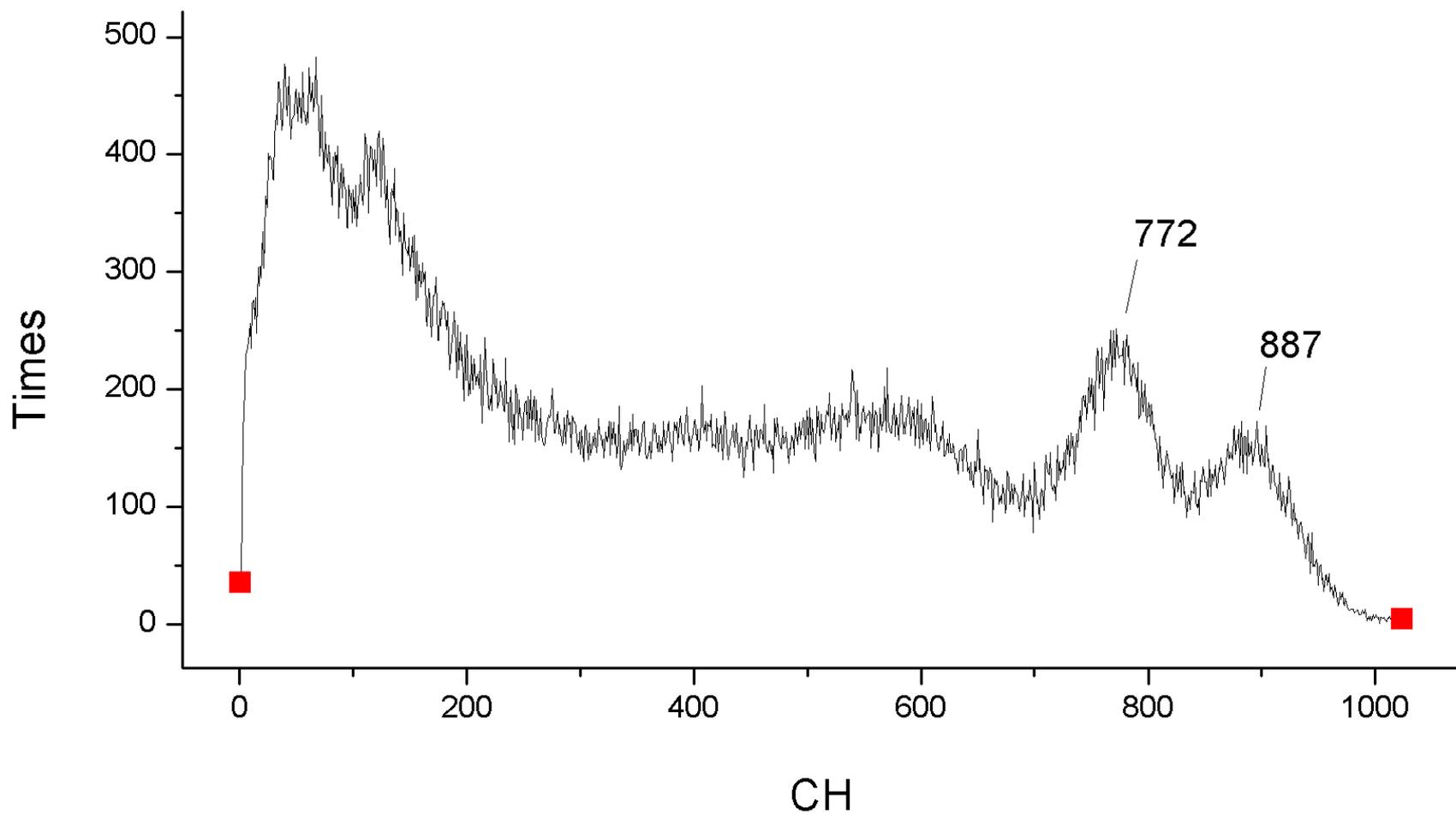
计数200s



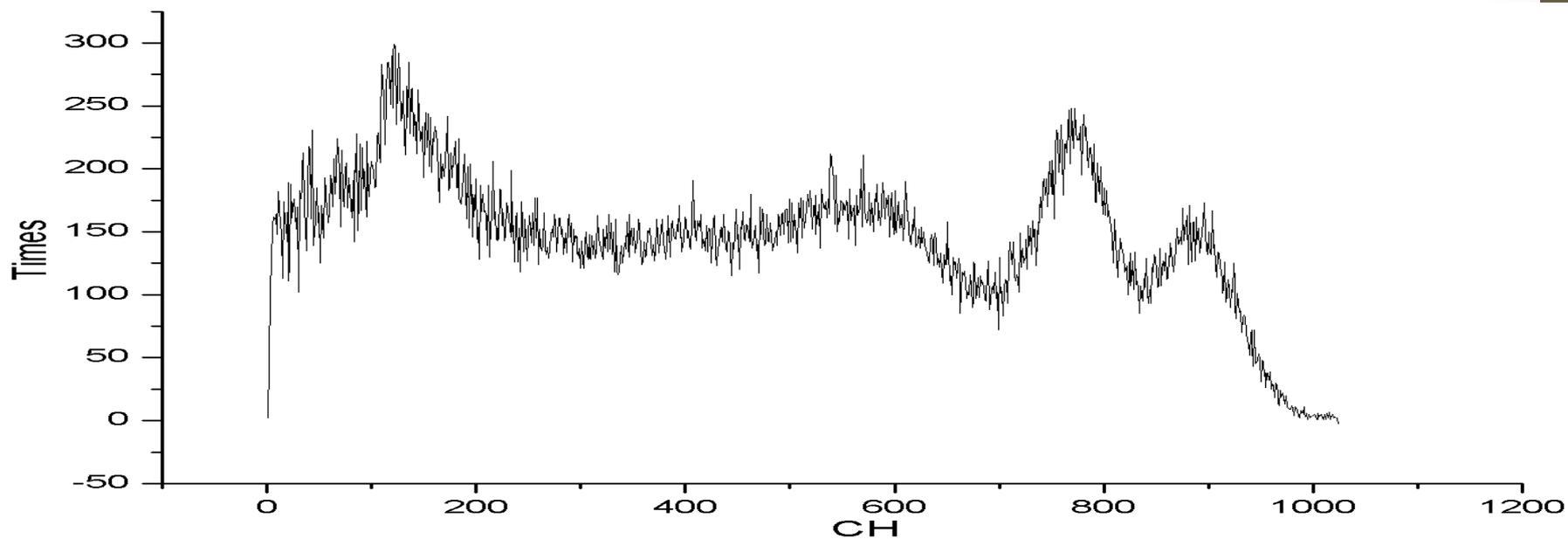
- 減去背景噪音后，康普頓平台之上的反散射峰已可以分辨



- 使用 ^{60}Co 作为放射源，计时200s



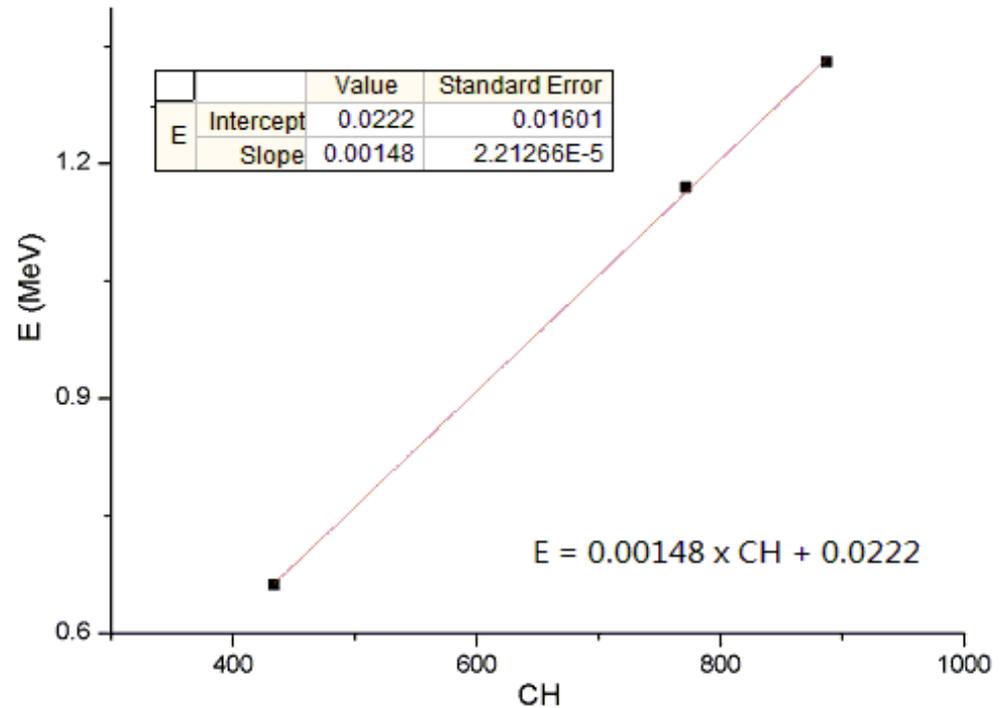
- 減去本底后



数据处理：E-CH定标曲线

E (MeV)	0.662	1.17	1.33
CH	433.5	772	887

E-CH 关系



数据处理：峰位计算

- ^{137}Cs 反散射峰道址为108， $E = 0.18204 \sim 0.182 \text{ MeV}$ ，理论值为0.184 MeV，误差为1.10%；
- ^{137}Cs 康普顿边缘道址为319， $E = 0.494 \text{ MeV}$ ，理论值为0.478 MeV，误差为3.34%；

对于本底噪音的猜测

- 本底噪音的峰位与铯源的X射线特征峰位置接近
- 隔壁是X光系列实验室
- ? ? ? ? ? ? ? ? ☹️

- 后话：做了X光实验之后才发现人家X光过不来的

外部噪音源的排除

- 实验目的：使用隔离外部放射源的做法排除
- 实验仪器：铅板，电脑机箱金属罩
- 实验原理：隔板对电磁辐射有吸收。
- 实验步骤：将整个探头尽可能包上。
- 预期结果：本底噪音应该减弱。
- 实际结果：但是没有。
- 实验结论：噪音源来自仪器内部。

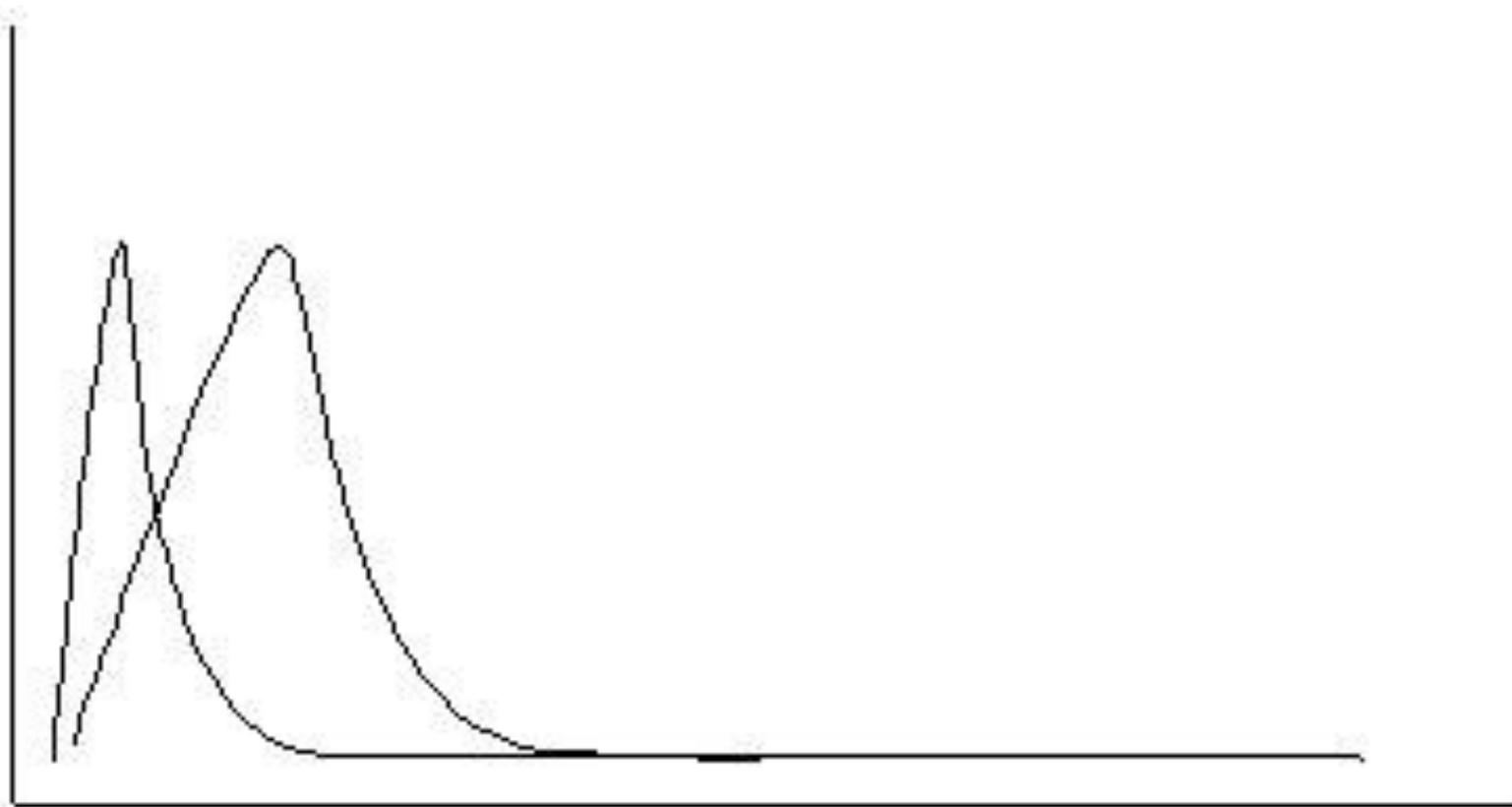
噪音源的发现

- 对各种实验参数进行调校（计算机除外）
- 使用控制变量的办法寻找哪种变量对本底影响最大
- 是线性放大器放大倍数和光电倍增管的高压
- 线性放大器产生的只是噪音图像单纯的向右展宽（线性放大）
- 光电倍增管不光使图像展宽，还使峰长大，增高：

高压电压值 (V)	500	400	300	200	100
背景噪声图谱面积	4669	963	0	0	0

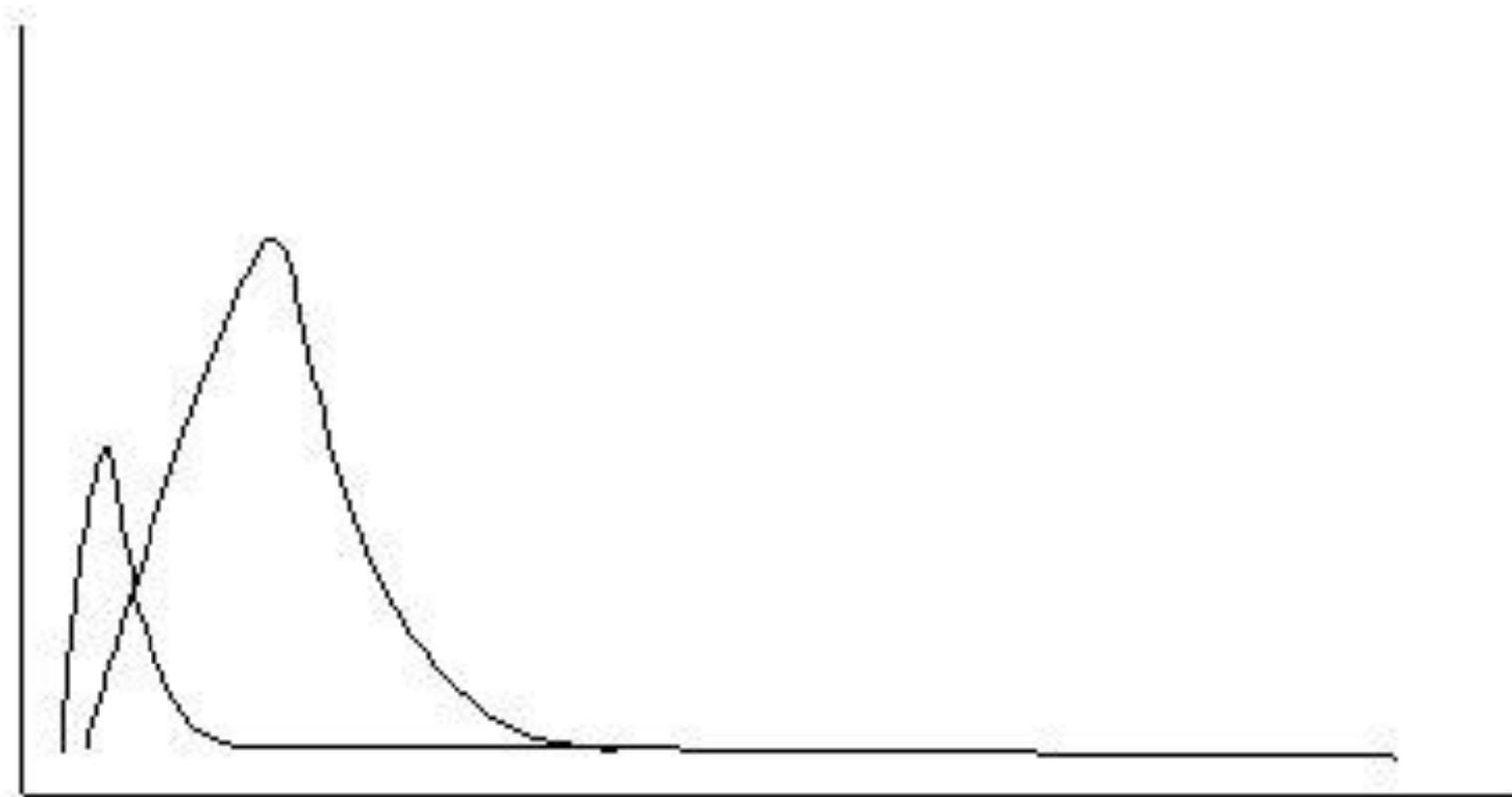
注明：此图是定性表达，不能 以此为定量认识！

- 线性放大器增益变化导致的噪音变化（同高压下）：



注明：此图是定性表达，不能 以此为定量认识！

- 光电倍增管高压导致的噪音变化（同放大器增益下）



结论：光电倍增管影响了噪音信号的计数率

- 光电倍增管中会产生什么样的噪音？

来自光电倍增管的噪音

- 暗电流：倍增管上没有辐照的时候，光阴极依旧会有热电子发射，其发射大小与温度有关，随温度升高而升高：

$$N=120 T \exp(-\varphi/kT)$$

- 倍增系统噪声：打拿极的二次发射系数是存在统计涨落的，即平稳的光照仍然会导致输出电流有起伏。

噪音的处理办法

- 对于暗电流，可以采用冷冻光电倍增管的方法，降低暗电流的发射量
- 光电倍增管高压不必加太高，容易使电场过大导致强电场发射，增加暗电流的大小。
- 对光电倍增管进行革新

革新光电倍增管的理论基础

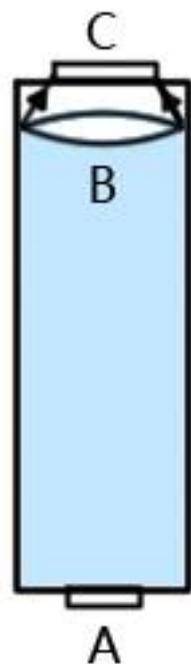
- 闪烁体出来的是荧光光子
 - γ 光子能量几乎转化为大量荧光光子能量
 - 半导体具有光电转换特性
-
- 有请李潇同学为大家作详解

光电倍增管替代物的要求

- 光电信号的转换
- 放大增益 ($10^4 \sim 10^9$)
- 单次脉冲弛豫时间
- 脉冲信号强度的分辨率
- 对荧光光子的灵敏度(3eV)
- 室温工作

方案一

高能光子对半导体器件是否有不良影响？



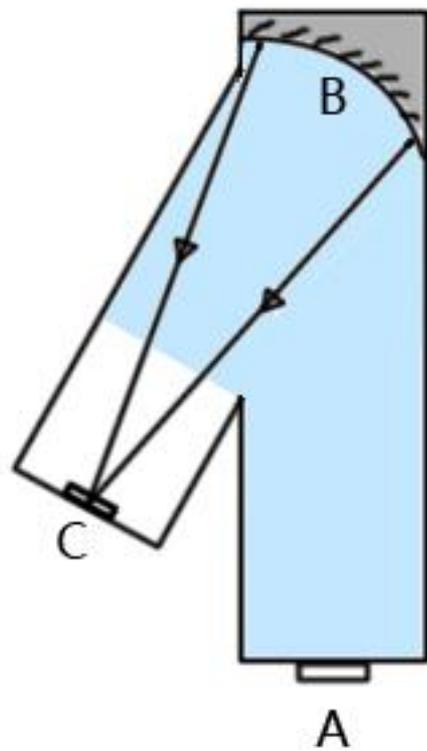
A 放射源辐照入口

B 透镜

C 半导体传感器

否
决

方案二



A 放射源辐照入口

B 凹面反射镜

C 半导体传感器

方案二对于传感器性能要求的估算

- 假定器件大小 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，最低分辨能量为钡的X射线特征峰，最高能量为 2MeV ，多道分析道数1024道
- 传感器上最小感应照度 0.01lx
- 传感器分辨能力要求优于 0.001lx

光电导效应方案

- 使用光敏电阻
- 测量半导体电导率随光照强度的变化
- 记录电导率变化脉冲，根据脉冲幅度进行分道
- 瓶颈1：非线性放大
- 瓶颈2：分辨率不好保证
- 瓶颈3：不适合快速响应

光生伏特效应方案

- 优势：线性放大，增益大
- 光照脉冲计数，通过测量脉冲幅度经行分道。
- 光电池方案
- 光敏二极管/三极管方案

光电池方案

- 市场上已有部分照度计分辨能力达到 0.0001lx ，工作下限也能达到 0.0001lx
- 不了解相关产品的响应速度

光敏二极管/三极管方案

- 光敏二极管的工作频带很宽
- 缺点：PIN型光敏二极管反向电阻一般很大，输出电流小，雪崩型光敏二极管噪声大，反向工作电压也很高

参考资料

- 《近代物理实验（第二版）》，戴道宣/戴乐山，高等教育出版社
- 《半导体物理（第二版）》，叶良修，高等教育出版社
- 《半导体传感器》，佚名，道客888(<http://www.doc888.com>)
- 《Photo-2000M弱光照度计简介》

感谢

- 各位物理教学实验中心辅导老师
- 乐于助人的各位同学

- 新年快乐！