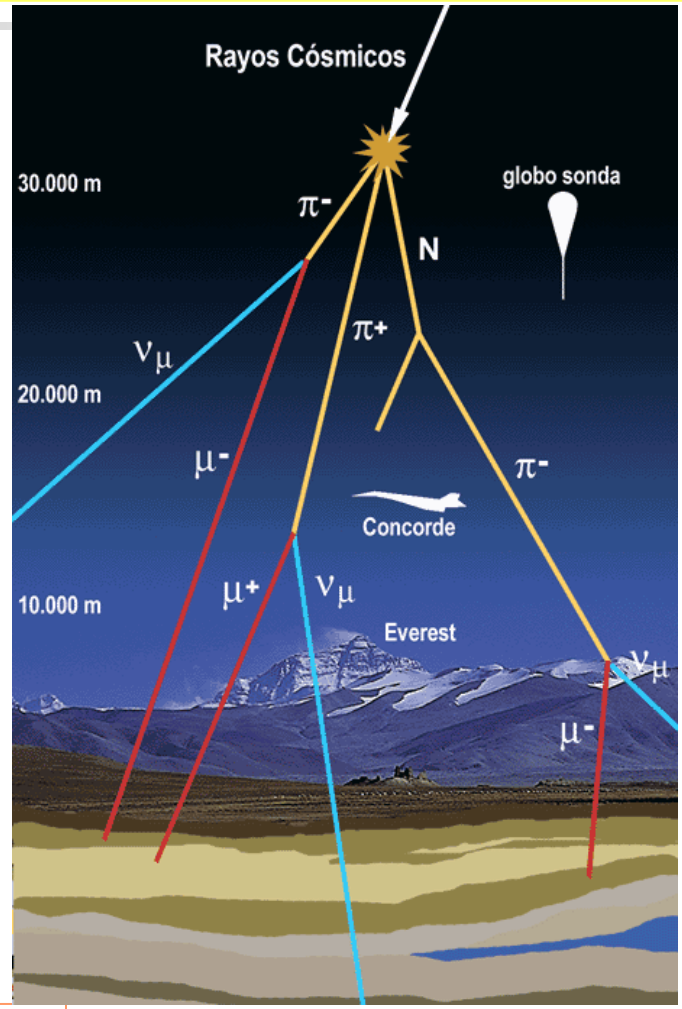
第三章 粒子源与粒子的测量

§3.0 粒子源

天然粒子源：放射源、宇宙线

加速器粒子源：

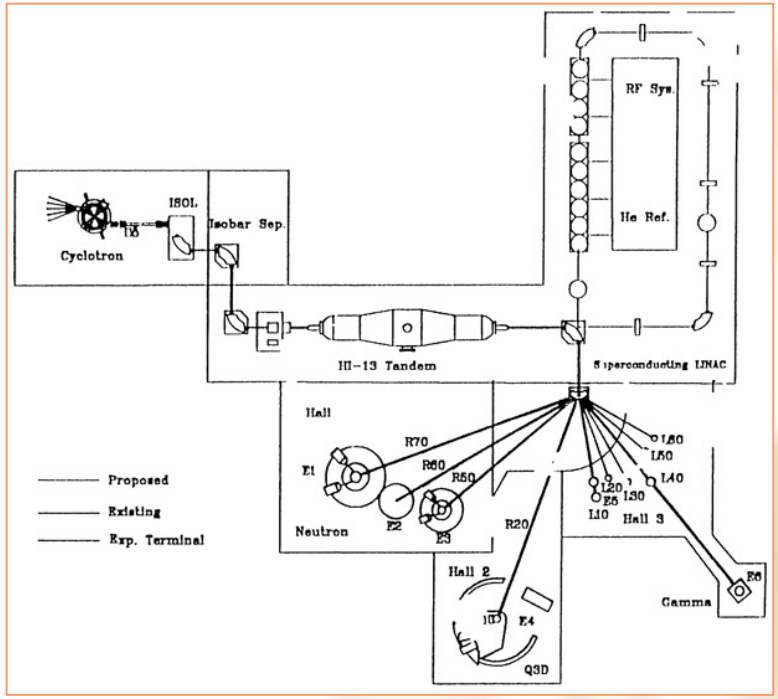
- 静电加速器
- 串列静电加速器
- 直线加速器
- 回旋加速器
- 同步回旋加速器
- 对撞机
- 次级束流线与储存环

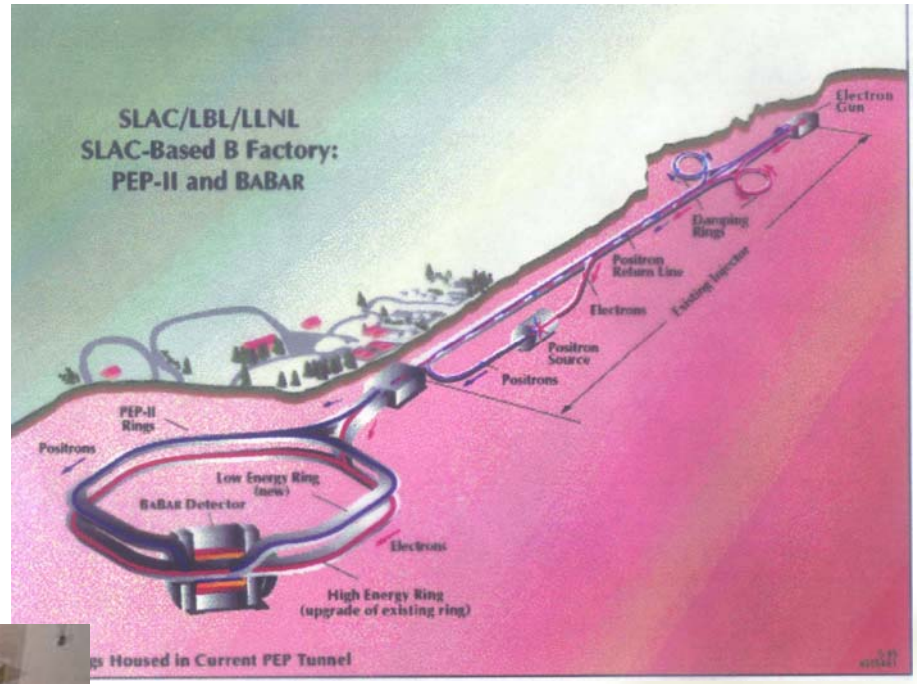


后续课程：《辐射物理基础》《加速器物理基础》



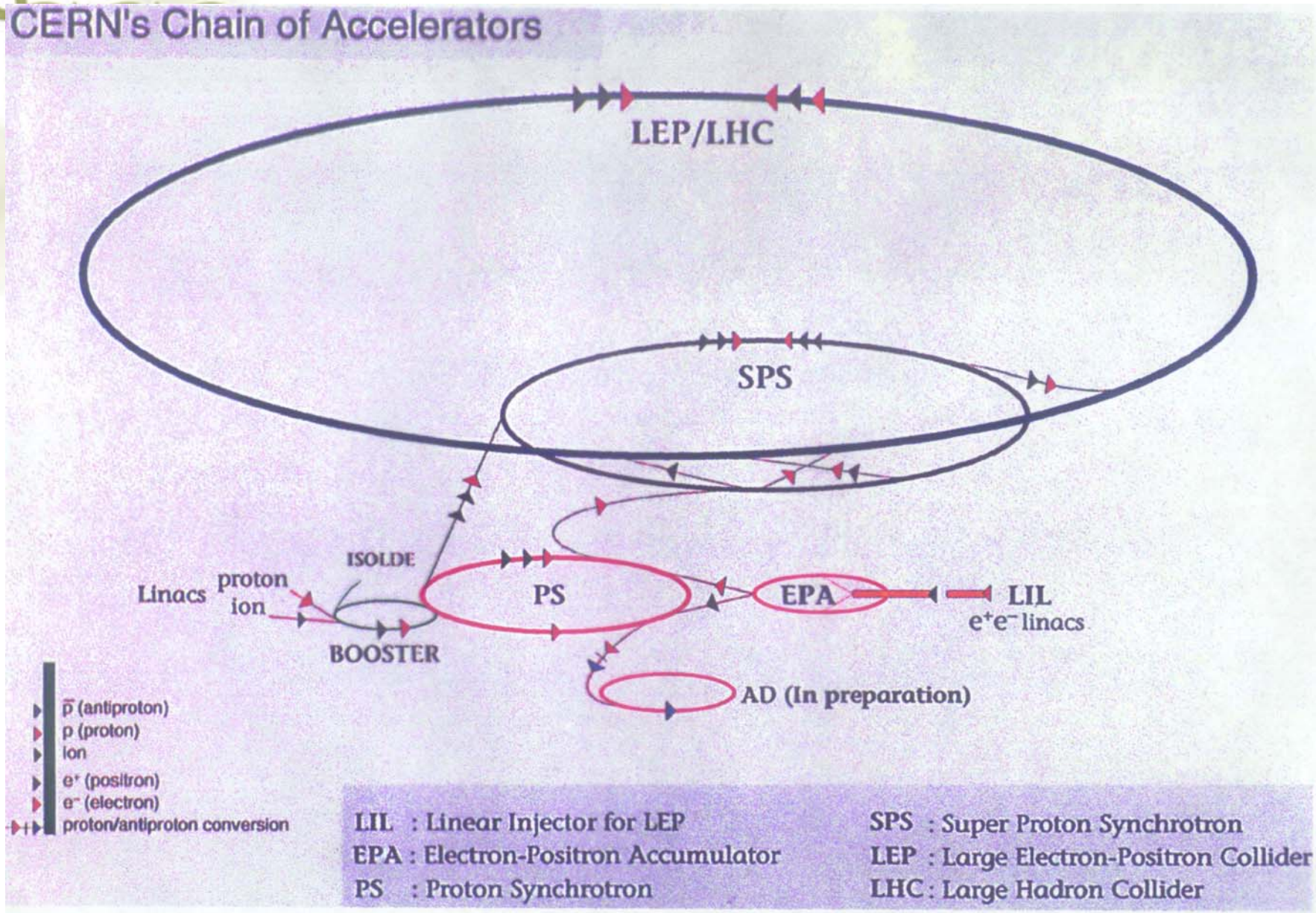



RF Sys.
He Ref.
ISOL
Isobar Sep.
Cyclotron
HI-13 Tandem
Superconducting LINAC
Hall
R70
R60
R50
E1
E2
E3
Neutron
R20
L60
L50
L40
L30
L20
L10
E5
Hall 3
Hall 2
E6
Gamma
E4
Q3D
Proposed
Existing
Exp. Terminal

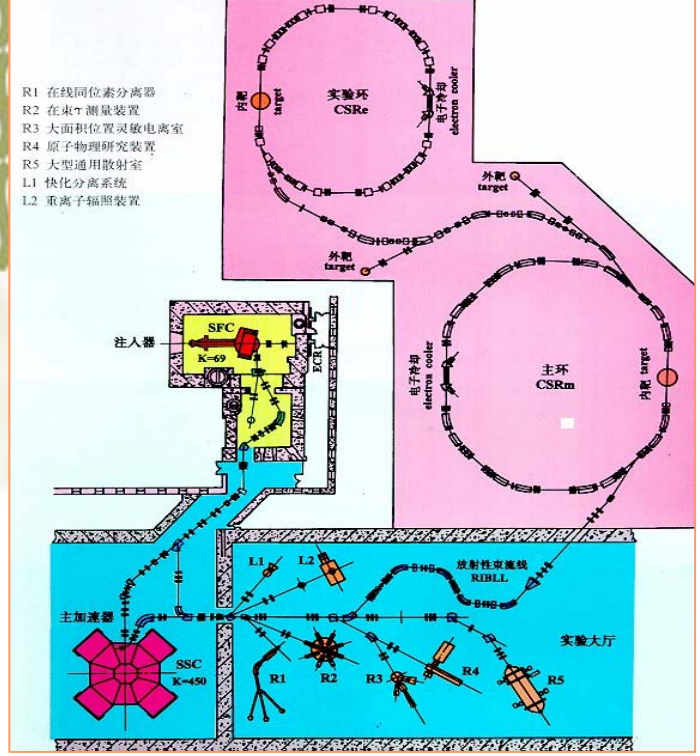

SLAC/LBL/LLNL
SLAC-Based B Factory:
PEP-II and BABAR
Electron Gun
Damping Rings
Positron Return Line
Existing Injector
Electrons
Positron Source
Positrons
PEP-II Rings
Positrons
Low Energy Ring (new)
BABAR Detector
Electrons
High Energy Ring (upgrade of existing ring)
Housed in Current PEP Tunnel

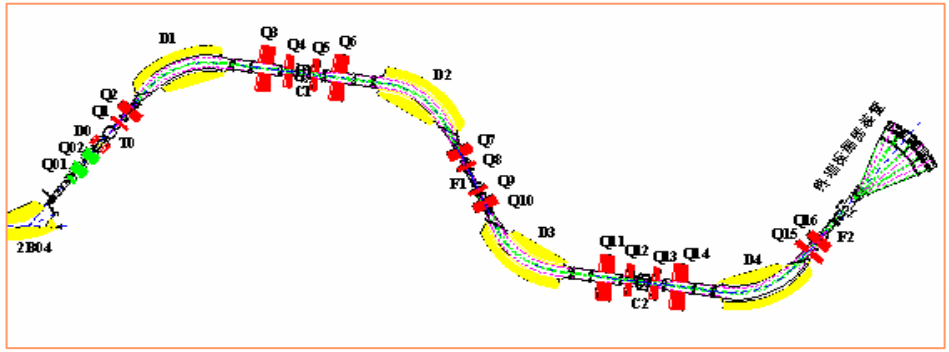


CERN's Chain of Accelerators



LIL : Linear Injector for LEP
EPA : Electron-Positron Accumulator
PS : Proton Synchrotron
SPS : Super Proton Synchrotron
LEP : Large Electron-Positron Collider
LHC : Large Hadron Collider





RIビームファクトリー



電子リニアック
電子を300MeVまで加速します。

二重蓄積リング(DSR)
世界初の重イオン・RI・電子・放射光の高エネルギー衝突実験を行います。

超電導リングサイクロトロン(SRC-4・SRC-6)
RRCのビームを、全元素にわたってRIビームが発生可能なエネルギーまで加速します。

RIビーム発生装置(Big RIPS)
SRC-6のビームから全元素にわたる大強度のRIビームを発生します。

ブースターシンクロトロン(BSR)
RIビームをより高いエネルギーまで加速します。

蓄積・冷却リング(ACR)
RIビームを高品質化します。

探测对象：带电粒子，中性粒子；稳定粒子，

非稳定粒子；重粒子；轻粒子

观测量：粒子种类；强度；能量；角分布；自旋等

§3.1 射线与物质的相互作用

1．带电粒子与物质相互作用：

主要是与核外电子发生库仑相互作用

带电粒子在阻止介质中，由于与核外电子的非弹性碰撞使原子发生激发或电离而损失自己的能量，称电离损失。研究结果表明：只要不是能量低的很重的带电粒子（比α粒子重），电离损失或电子阻止是带电粒子穿过阻止介质时能量损失的主要方式。

（1）质子、α粒子等重带电粒子与物质相互作用：

一个速度为υ、电荷ze的带电粒子穿过由原子序数Z的元素组成的纯阻止介质时，由于与介质原子核外电子发生非弹性碰撞，经过单位路程后的能量损失或称阻止本领为：

$$-\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}=\frac{4\pi z^2e^4ZN}{m_0\upsilon^2}\left[\ln\left(\frac{2m_0\upsilon^2}{I}\right)-\ln\left(1-\beta^2\right)-\beta^2\right]$$

式中m_0为电子静止质量，$\beta=\upsilon/c$，c为光速，N为阻止介质中单位体积的原子数目，I为介质原子的平均电离电势，代表该原子中各壳层电子的激发和电离能之平均值。方括号中第二、三两项是相对论修正项，其结果是使$-\mathrm{d}E/\mathrm{d}x$随带电粒子速度增加而减少到一极小值之后，又重新随速度增加而增加。这就是著名的贝特－布洛赫（Bethe-Block）公式。

$$-\mathrm{d}E/\mathrm{d}x \sim \frac{mz^2}{E}$$

入射带电粒子能量E和在阻止介质中能量损失ΔE的乘积与mz^2成正比,与E成反比。

射程：

$$R = \int_{E_0}^{0} \mathrm{d}E/\left(-\mathrm{d}E/\mathrm{d}x\right)$$

能量损失歧离与射程歧离：

$$N(E)/N = \frac{1}{\alpha\pi^{1/2}} \exp\left[-\frac{\left(E-\bar{E}\right)^2}{\alpha^2}\right]$$

α为分布宽度

$$\alpha = 2\sqrt{2}ze^2\left[\pi ZNt\right]^{1/2}$$

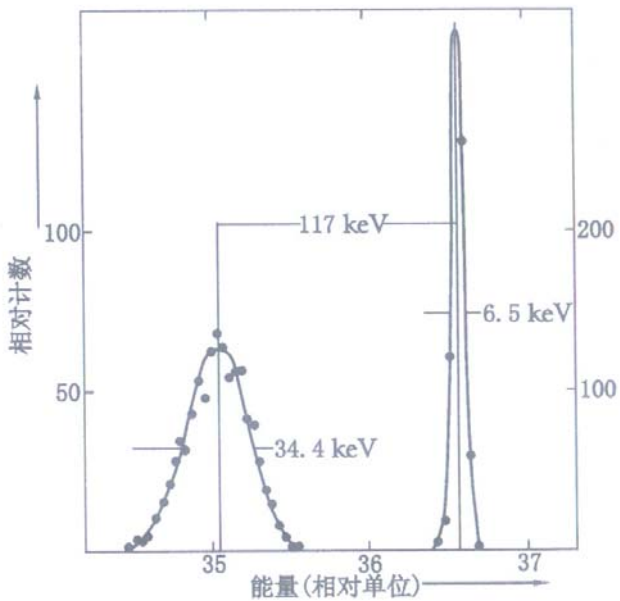


图 3-3　3 MeV 质子穿过 3.3 mg/cm^2 Au 箔后的能量损失

2．γ射线与物质的相互作用：

γ射线和X射线分别起源于原子核能量变化过程和原子核外电子能量状态变化过程。

γ射线与物质相互作用主要有三种机制，即光电效应、康普顿散射和电子—正电子对产生。

$$I/I_0 = e^{-\mu d}$$

总衰减系数μ可以分解为相对于光电效应、康普顿散射及电子对产生效应的三部分衰减系数，即 $\mu = \tau + \sigma + k$

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu}$$

$$\overline{R} = \frac{\int_0^\infty x e^{-\mu x} \mu \, \mathrm{d}x}{\int_0^\infty e^{-\mu x} \, \mathrm{d}x} = \frac{1}{\mu}$$

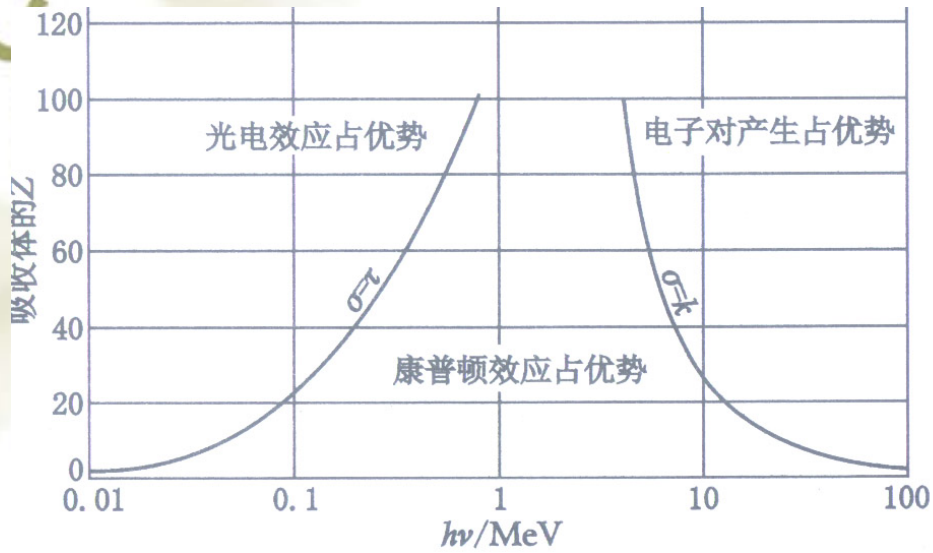


图 3-11　γ射线产生光电效应、康普顿效应和电子对效应的相对重要性

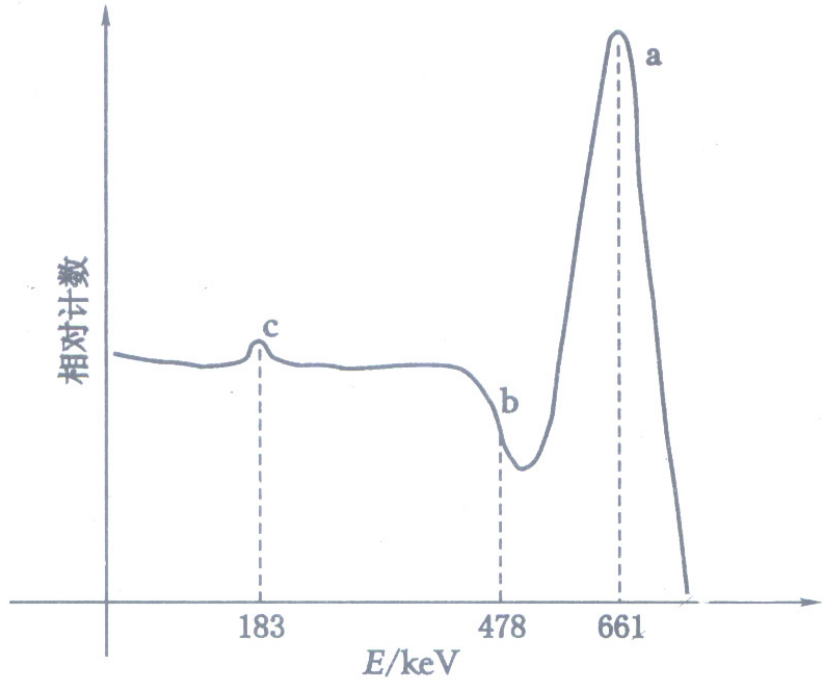


图 3-12　0.661 MeV γ射线产生的次级电子能谱

§3.2 核辐射探测器

通过核辐射与物质相互作用提供有关核辐射信息并对其进行分析处理的实验仪器。

1. 气体探测器：

电离室、正比室和雪崩室。它们的共同特点是通过收集射线穿过工作气体时产生的电子—正离子对来获得核辐射的信息

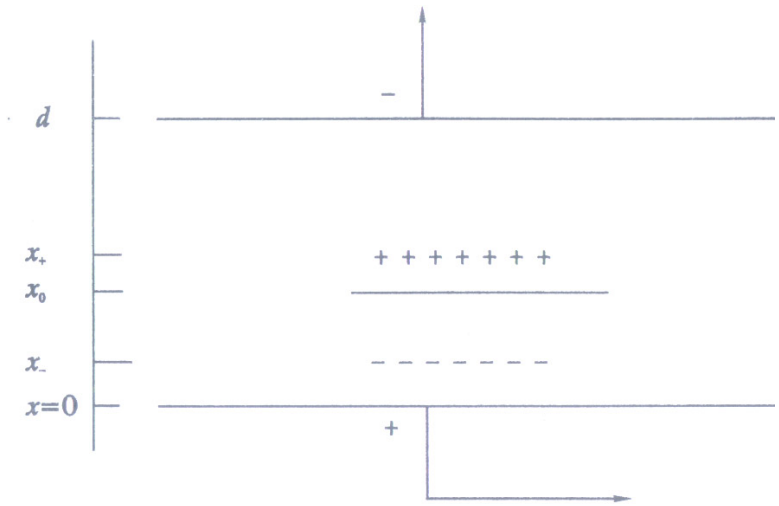


图 3-16　平行板电离室内电子-离子对的运动

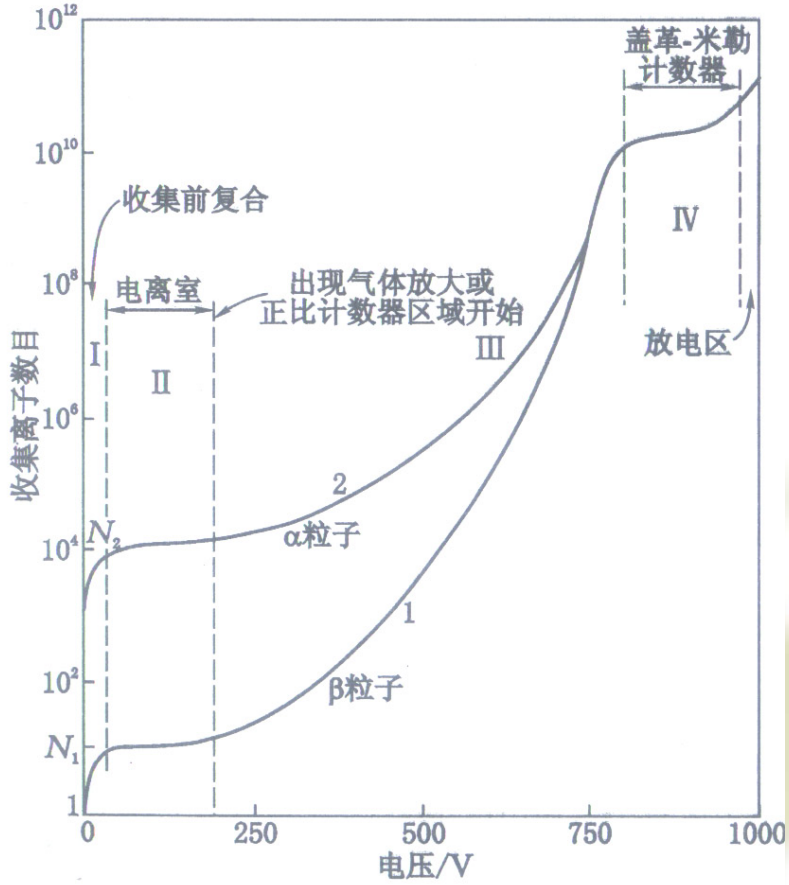
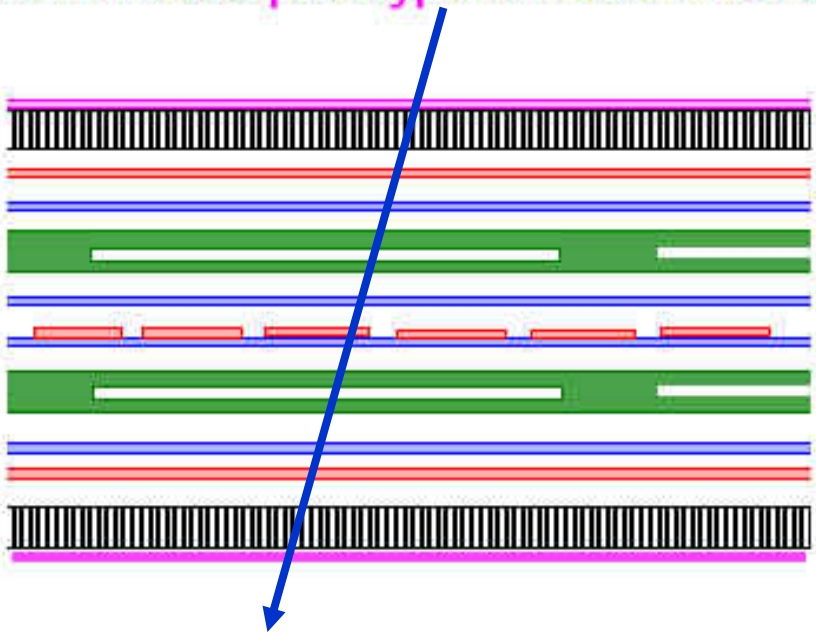


图 3-14　气体探测器的不同工作区域

assembly of RE1/2 fullsize prototype at CERN: RPC structure



gas-gaps(with graphite and insulation layer)
insulation layer
copper signal ground layer

honeycomb plate
read-out strips
Al. shielding layer









R&D at
PKU
1999年

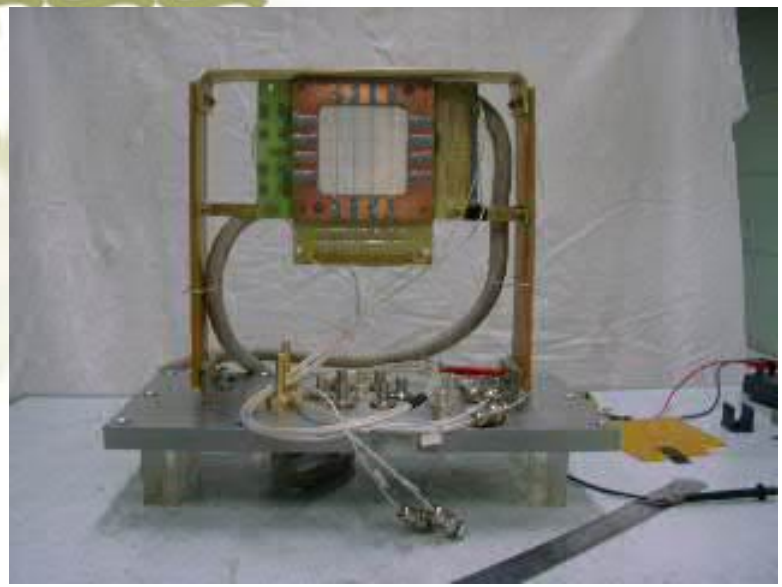




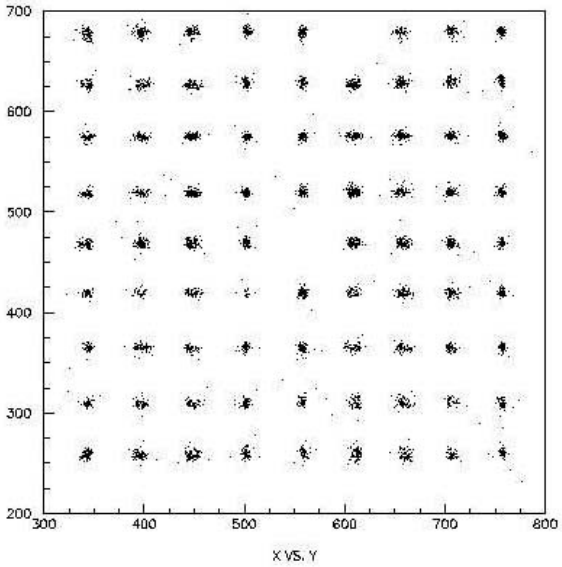


RE1/2 prototype，
2002年9月

G.Iaselli：“I am glad to hear that the test went well. The PU group certainly deserve congratulation for the good job”.







Low Pressure Multi-Wire Proportional Chamber

2. 闪烁探测器

核辐射与物质相互作用会使阻止介质原子被激发，当这些被激发原子退激回到其基态时会发射光脉冲即称作闪烁。基于这种现象来探测核辐射的器件称作闪烁探测器。

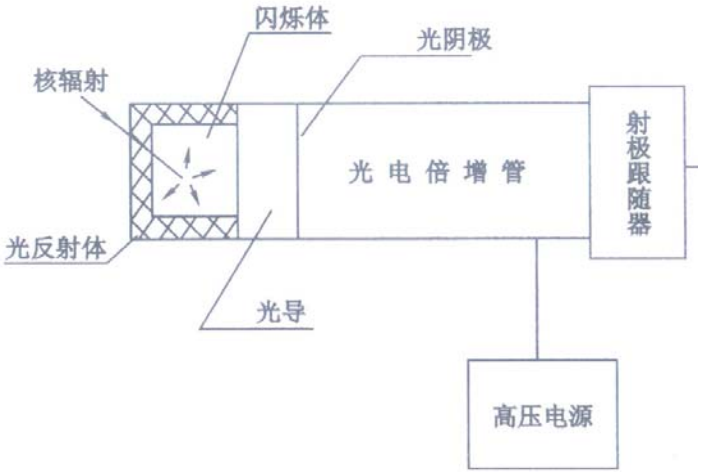


图 3-20　闪烁探测器的示意图

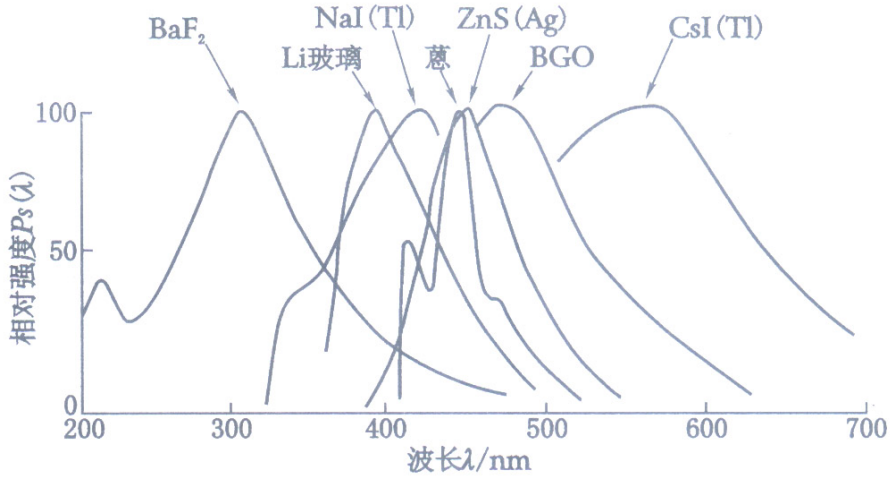
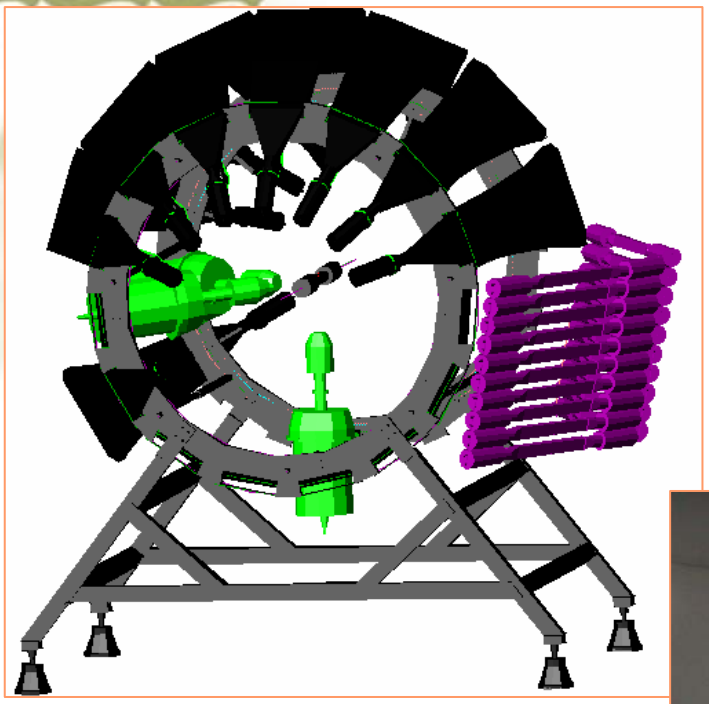


图 3-21　几种典型闪烁体的发射光谱

表 3-2　几种常见闪烁体的主要性能[①]

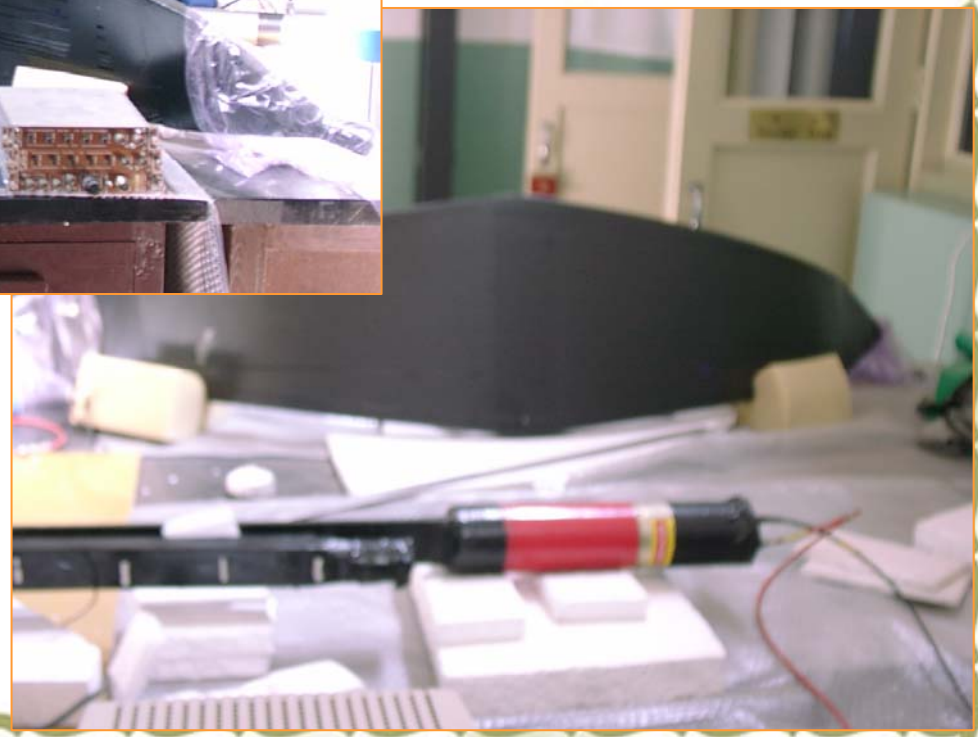
类　别	闪烁体	最强发射波长/nm	闪烁衰减时间/μs	相应最强发射波长折射率	密度/(g/cm^3)	相对光输出(%)	
无机闪烁体	NaI(Tl)	415	0.23	1.775	3.67	100	230
	CsI(Tl)	565	1.00	1.80	4.51	45	
	BaF_2	325	0.63	1.49	4.88	20	
	ZnS(Ag)	450	0.070	2.356	4.09	130	300
有机闪烁体	蒽($C_{14}H_{10}$)	447	0.030	1.62	1.25	43	100
	联三苯($C_{18}H_{14}$)	415	0.0045		1.234		40
	联四苯($C_{24}H_{18}$)	440	0.0045		1.206		88
塑料闪烁体		370～434	0.002～0.02	1.58	1.03～1.14	30	33～40
液体闪烁体		385～430	0.0026～0.004	1.38～1.53	0.71～1.08	7～27	
锂玻璃闪烁体		395	0.020,0.060	1.55～1.58	2.4～2.5	14	

① 摘自：汲长松编著．核辐射探测器及实验技术手册．北京：原子能出版社，1990









Prototyping and testing

3．半导体探测器：

半导体探测器也是基于核辐射在阻止介质中产生的电离效应。在像Si和Ge半导体材料中，核辐射产生一对电子—空穴的平均能量损失仅(3～5)eV，与之相比，在气体中相应物理量约30eV，而在闪烁探测器中，为在光电倍增管的第一倍增电极上接收一个光电子，核辐射需在闪烁体中平均损失约300eV。主要缺点是：

灵敏体积不能太大（10^2cm^3）限制了它在探测高能核辐射和需要大探测立体角场合的应用。它对核辐射造成的损伤灵敏，在每平方厘米灵敏面积累积接收10^{12}快中子或10^8重离子后，探测器性能会明显变坏而且不能自行恢复，因而限制了它的使用寿命。

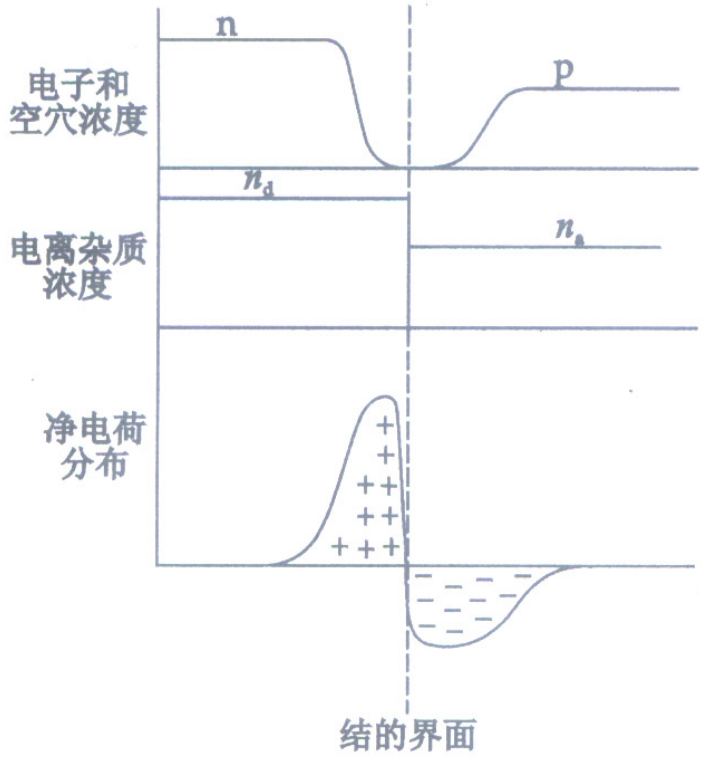
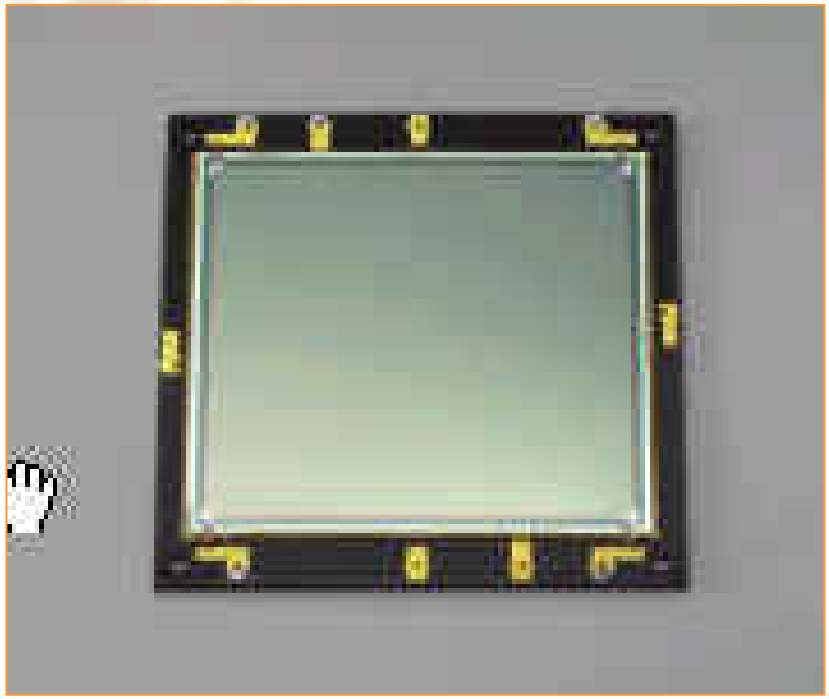
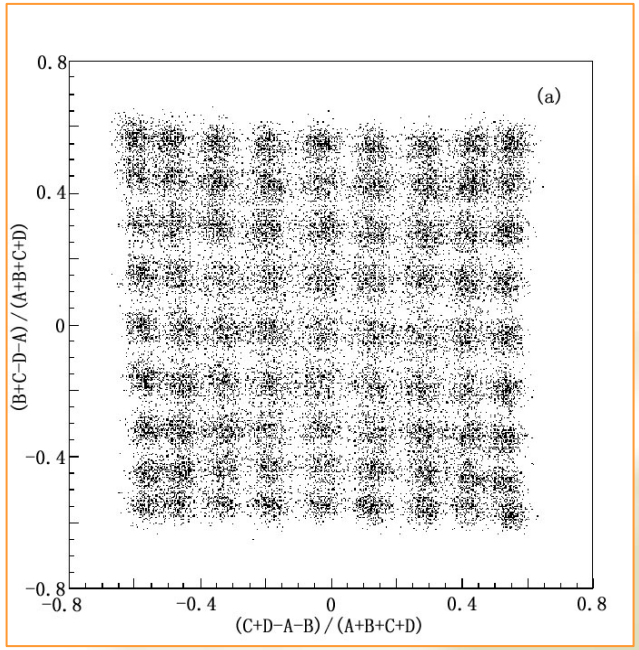


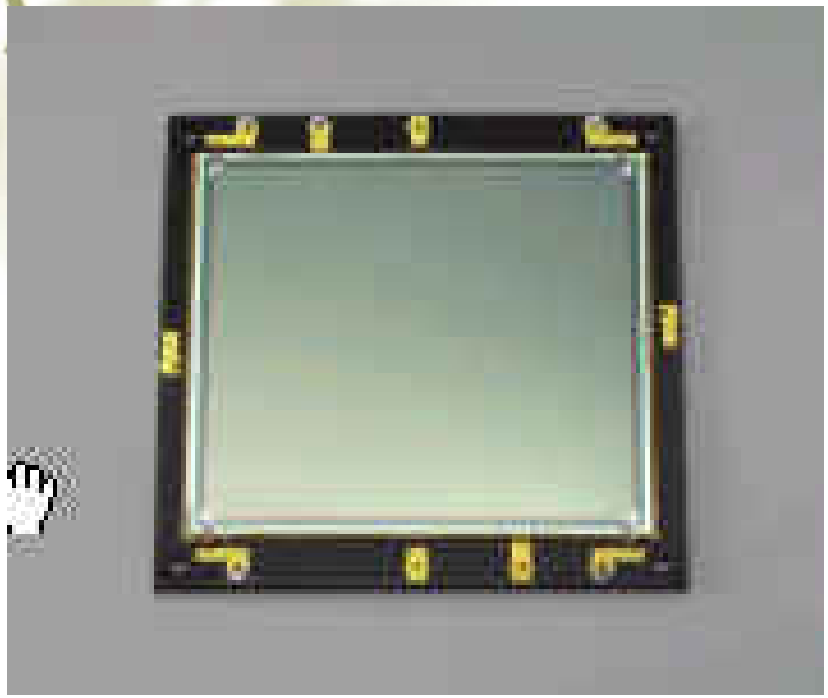
图 3-25　半导体 p-n 结性质

PSD：HAMAMATSU离子注入型硅探测器，灵敏面积为45mm×45mm，厚度为325±15μm，阳极的四个角上读出位置信号，从探测器背面的金层取出能量信号。全耗尽电压为80V，最大可达100V，暗电流为100nA，最大可达500nA，全耗尽时电容为780pF。前放用Amptek A250 组装 。经测试，位置分辨率约2mm。

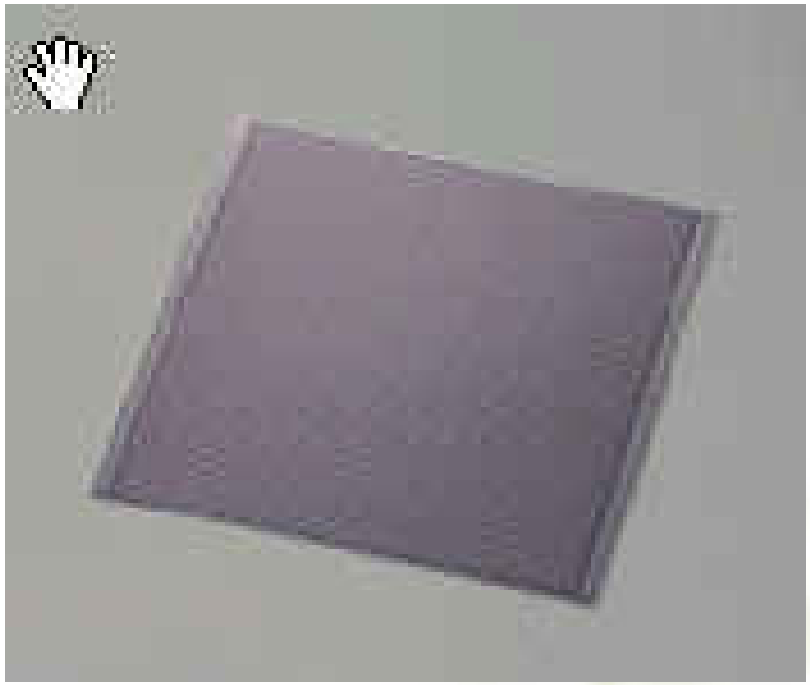




Hamamatsu-S5378



Hamamatsu-S5378PSD



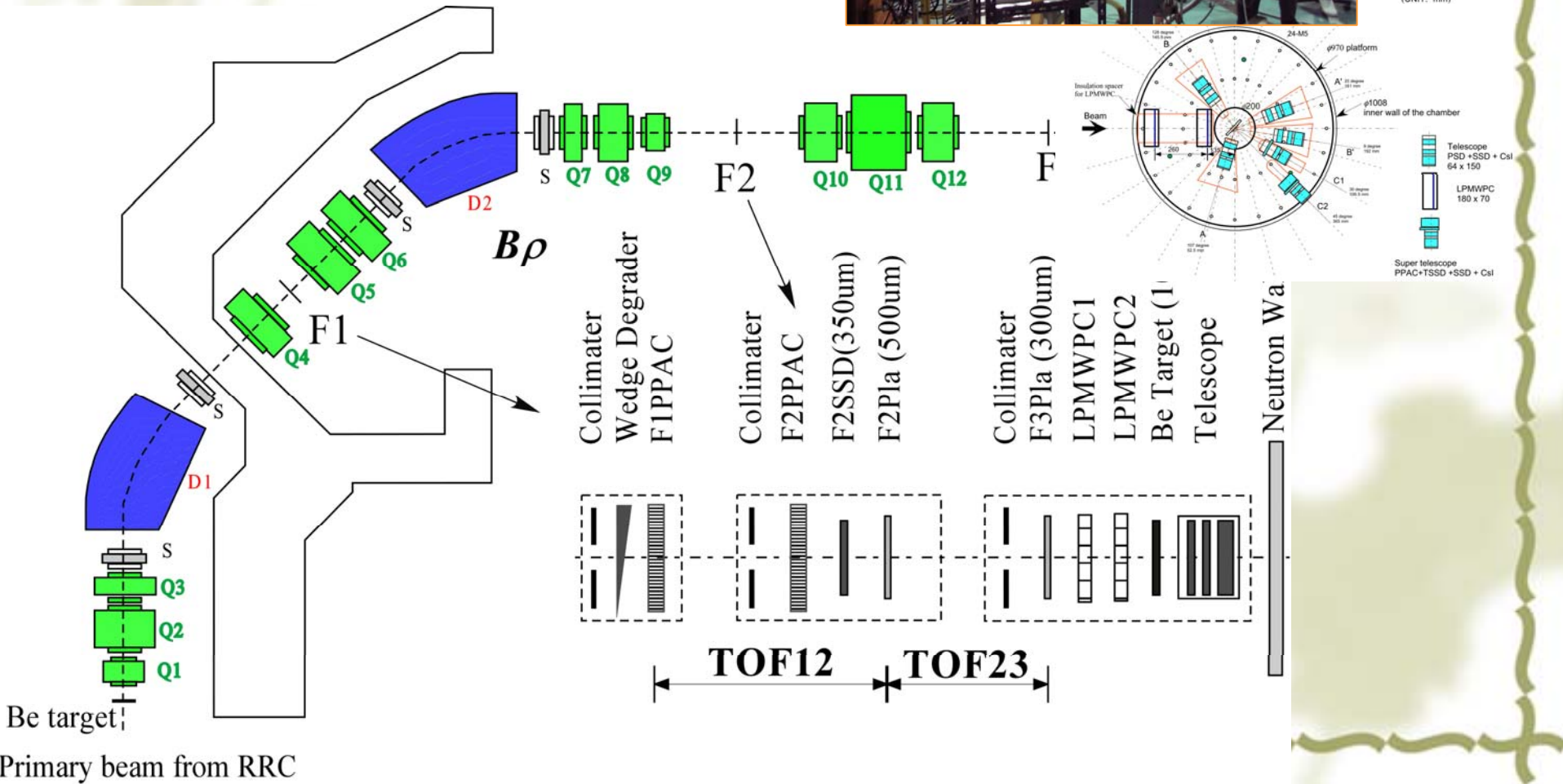
Hamamatsu-S6933strip



Super Telescope II: PPAC+TSSD+SSD+CsI

RIPS setup




Be target
Primary beam from RRC
Q1
Q2
Q3
D1
S
Q4
Q5
Q6
F1
D2
Bρ
S
Q7
Q8
Q9
F2
Q10
Q11
Q12
F
Collimater
Wedge Degrader
F1PPAC
Collimater
F2PPAC
F2SSD(350um)
F2Pla (500um)
Collimater
F3Pla (300um)
LPMWPC1
LPMWPC2
Be Target (1
Telescope
Neutron Wa
TOF12
TOF23
(UNIT: mm)
24-M5
φ970 platform
φ1008
inner wall of the chamber
Insulation spacer
for LPMWPC
Beam
Telescope
PSD +SSD + CsI
64 x 150
LPMWPC
180 x 70
Super telescope
PPAC+TSSD +SSD + CsI



Csl

Scin.

107 degree
52.5 mm

Super telescope
PPAC+TSSD +SSD + Csl

- 能量测量
- 时间测量
- 动量测量
- 粒子分辨
- 符合测量
- 电子学、数据获取、计算机