

Fig. 2.1: Prinzipieller Aufbau einer Ionisationskammer. Die in einem Gasvolumen zwischen zwei an eine Gleichspannung angeschlossenen Metallektroden durch Beschuss mit ionisierender Strahlung entstehenden positiven oder negativen Ladungen werden durch das angelegte elektrische Feld von der jeweils entgegengesetzt gepolten Metallplatte eingesammelt. Dadurch entsteht ein Ionisationsstrom, der in einem Strom- oder Ladungsmessgerät (A,C) nachgewiesen wird.

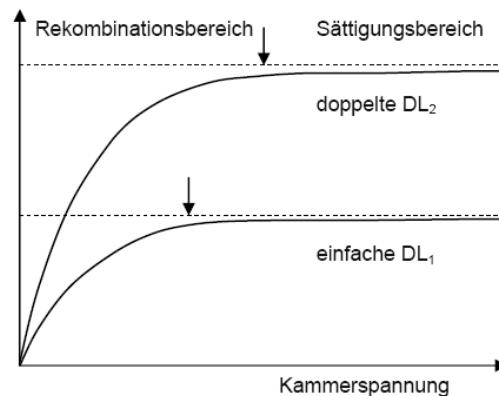


Fig. 2.2: Strom-Spannungs-Charakteristik einer Ionisationskammer für zwei verschiedene Dosisleistungen DL₁ und DL₂. Der Kammerstrom nimmt zunächst stetig mit der Kammerspannung bis zur Sättigung zu (Rekombinationsbereich). Der von der Dosisleistung abhängige Sättigungsbereich beginnt etwa bei den Pfeilen. Im Sättigungsbereich ist der Kammerstrom dann nur noch geringfügig abhängig von der Kammerspannung; der Strom ist hier proportional zur Dosisleistung.

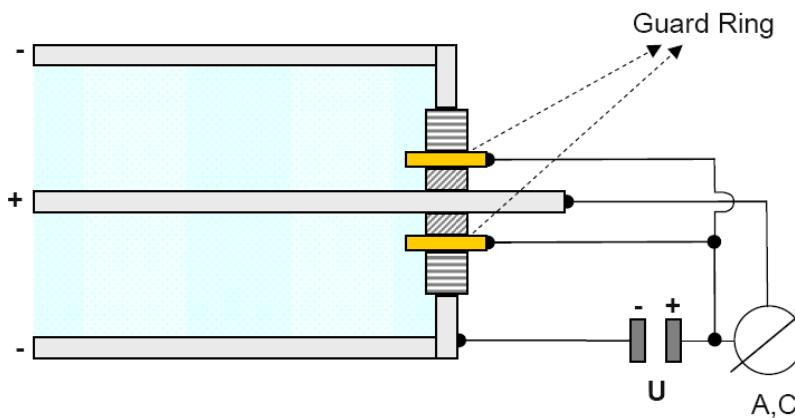


Fig. 2.8: Funktionsweise einer Schutzelektrode zur Vermeidung von Leckströmen am Beispiel einer Zylinderkammer. Zwischen Guard Ring und Zentralektrode liegt nur die durch den Ionisationsstrom ausgelöste Spannung am Elektrometereingang (A/C) an. Die Spannung ist so niedrig, dass kein Leckstrom fließt. Der Hauptspannungsanteil liegt am äußeren Isolatoreteil an. Falls dort ein Leckstrom fließt, wird er nicht über das Amperemeter abgeleitet.

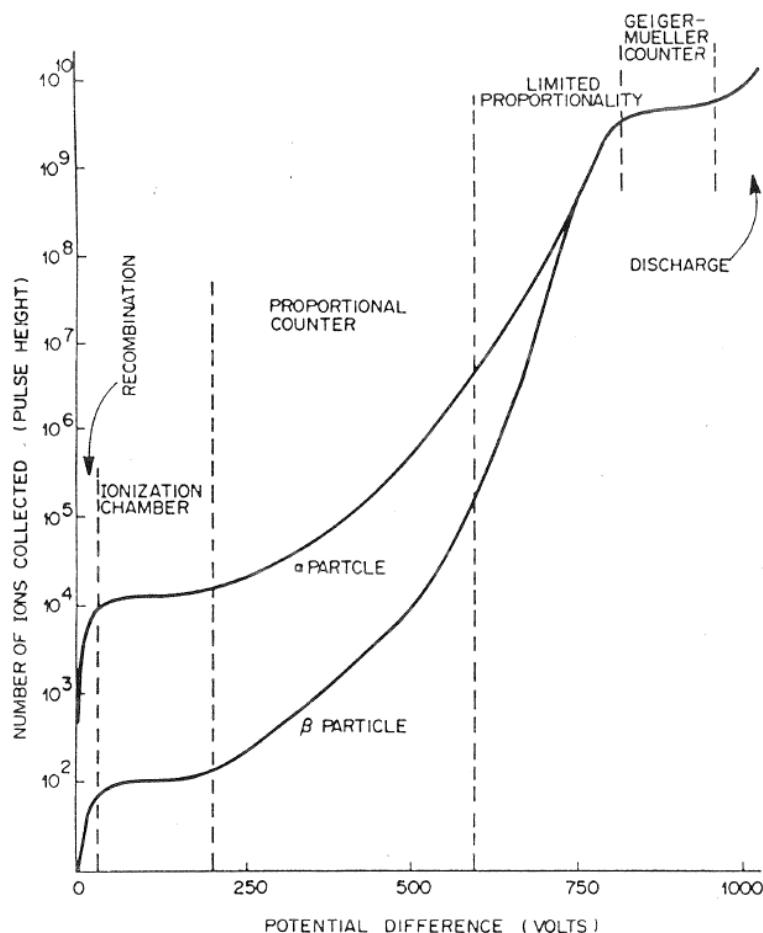


FIGURE 10.4. Regions of operation of gas-filled cylindrical ionization chamber operated in pulse mode.

- a) 60 Torr Argon + O₂
- b) 90 Torr CH₄
- c) 320 Torr CH₄

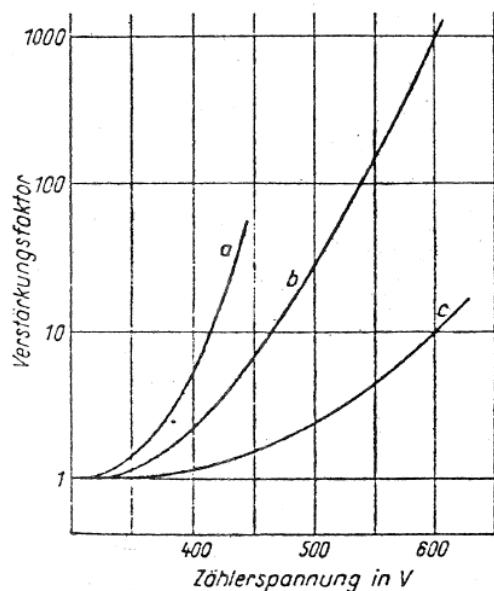
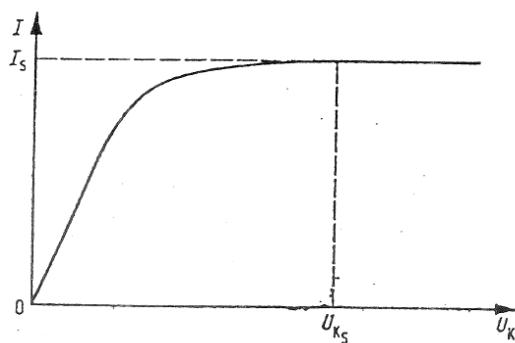


Bild 2.2 Abhängigkeit der Gasverstärkung von Gasart und Spannung, nach [2.10]

Abb. 1.4
Ionisationskammerstrom als Funktion der angelegten Kammerspannung



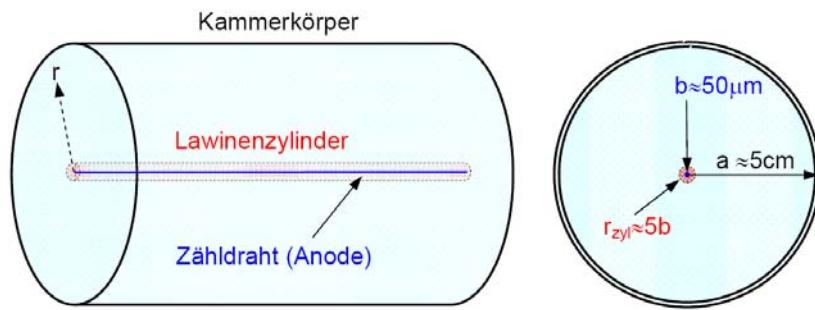


Fig. 2.14: Typische Geometrie eines Zählrohrs: Zähldrahtradius $b: 25\text{-}50 \mu\text{m}$, Radius des Entladungszyllinders: $\approx 5b$, also 5 Drahtradien, abhängig von der angelegten Spannung, Kammer-Innenradius a : einige cm. Die Zeichnung ist nicht maßstabschichtig.

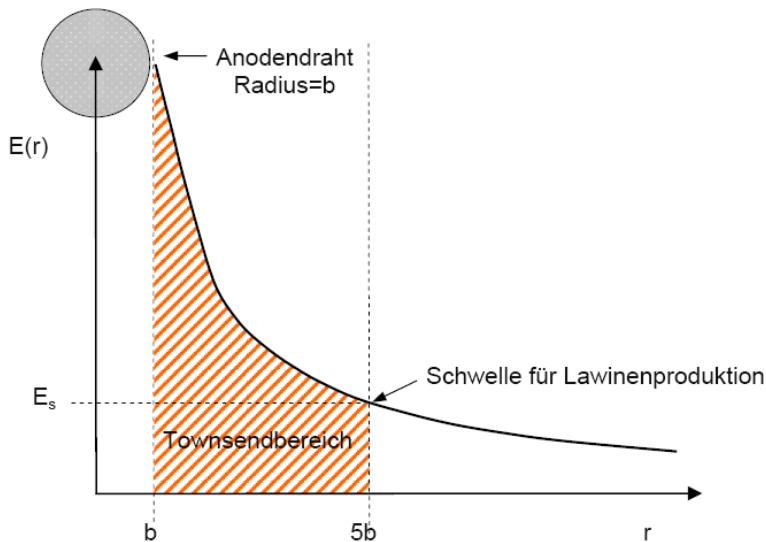


Fig. 2.15: Feldstärkenverhältnisse im Zylinderzählrohr: $E(r)$: Betrag der elektrischen Feldstärke, r : Abstand von der Mitte der Zentralelektrode, b : Zähldrahtradius, E_s : Schwellenfeldstärke für den Beginn der Gasverstärkung.

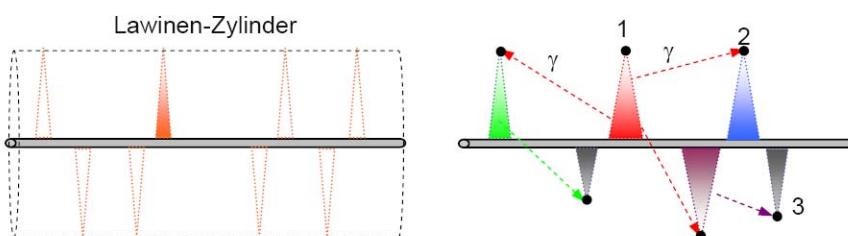


Fig. 2.17: Links: Lawinenmuster im Proportionalbetrieb einer Zylinderkammer. Die Lawinen sind voneinander unabhängig und getrennt. Sie haben für eine bestimmte Betriebsart eine einheitliche Größe. Rechts Vorgänge im Auslösezählrohr: Eine primäre Lawine (1, rot) löst durch Photonemission mit anschließendem Photoeffekt weitere Lawinen (2, 3,...) aus. Die Lawinen entstehen im gesamten Volumen um den Zähldraht, emittieren ihrerseits Photonen aus dem UV-Bereich und führen insgesamt zu einem Einheitsimpuls unabhängig von der beim primären Wechselwirkungsakt übertragenen Energie.

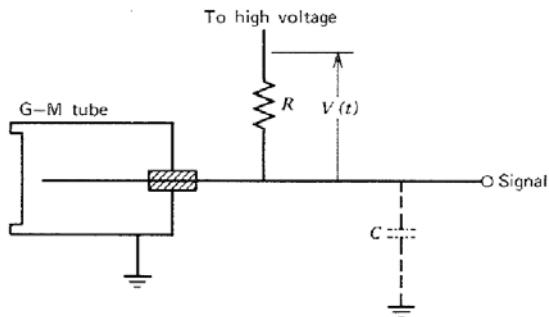


FIGURE 7-2. Equivalent counting circuit for a G-M tube. The product of resistance R and capacitance C (usually only inherent capacitance of the tube and electronics) determines the time constant of the restoration of the high voltage following a Geiger discharge.

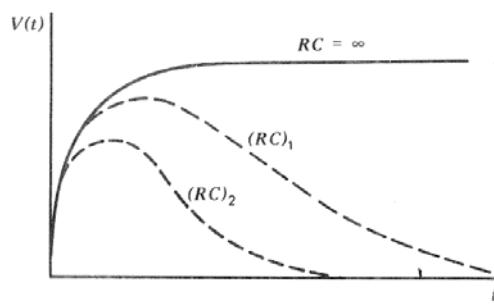


FIGURE 7-3. Shape of the G-M tube output pulse for different assumed time constants RC of the counting circuit. Here $(RC)_2 < (RC)_1 <$ infinite time constant. The signal voltage $V(t)$ is assumed to be measured as indicated in Fig. 7-2, giving a positive polarity. More conventionally, the pulse is measured with respect to ground within the amplifier, leading to inverted shape or negative polarity.

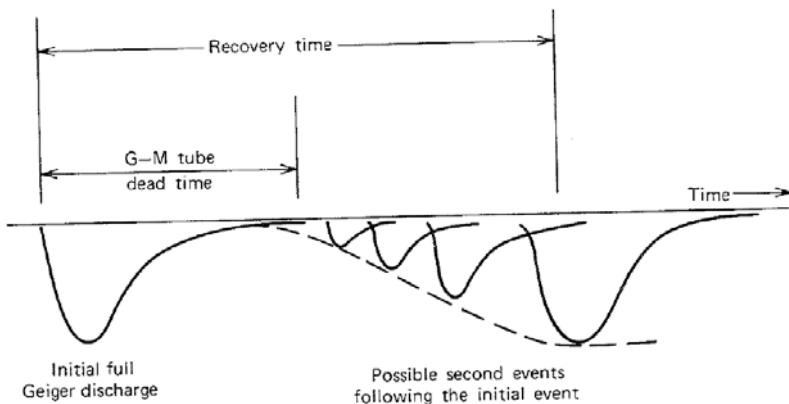


FIGURE 7-4. Illustration of the dead time of a G-M tube. Pulses of negative polarity conventionally observed from the detector are shown.

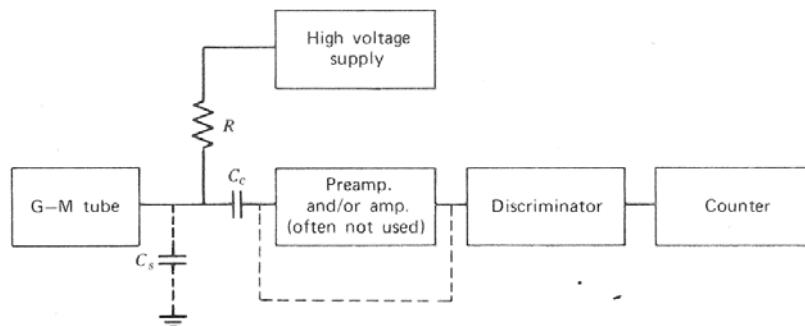
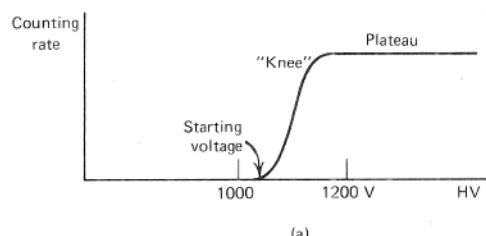
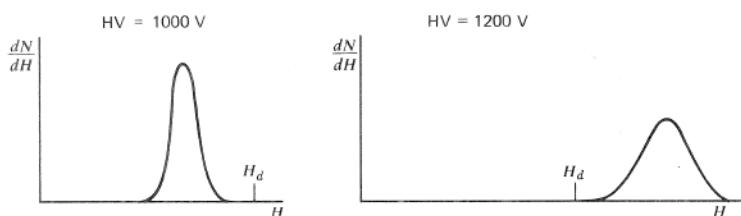
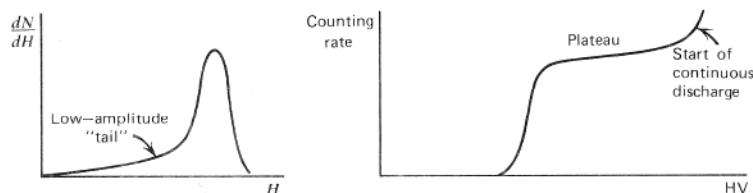


FIGURE 7-7. Block diagram of the counting electronics normally associated with a G-M tube. These functions are often combined on a single chassis traditionally called a “scaler” (see Chapter 17).



(a)



(b)

FIGURE 7-5. (a) The establishment of the counting plateau for a G-M tube. As the high voltage is varied in this example from 1000–1200 V, the output pulses change from falling below the counter threshold H_d to a situation in which all pulses are larger than H_d . (b) The low-amplitude “tail” on the pulse height spectrum at the left causes a finite slope of the plateau in the counting curve.

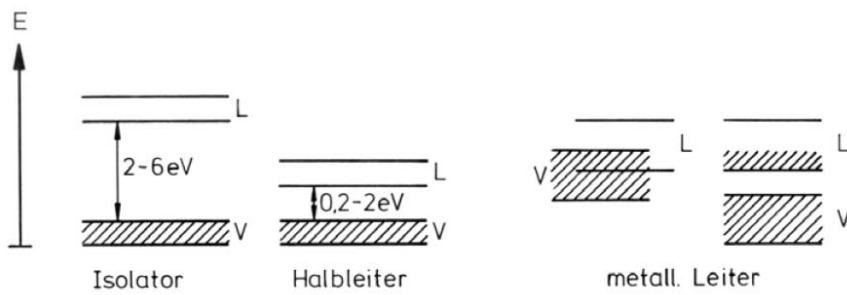


Fig. 4.2: Anordnung von Valenzband und Leitungsband in Festkörpern (V: Valenzband, L: Leitungsband). Beim Isolator ist der Bandabstand typisch ca. 2-6 eV, beim Halbleiter etwa 0,2-2 eV. Beim Metallgitter überlappen entweder V- und L-Band oder das L-Band ist nur zur Hälfte gefüllt. In beiden Fällen sind Elektronen frei im Kristall beweglich.

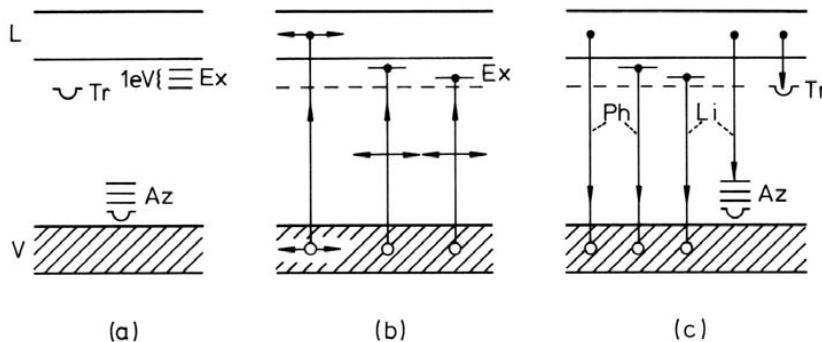
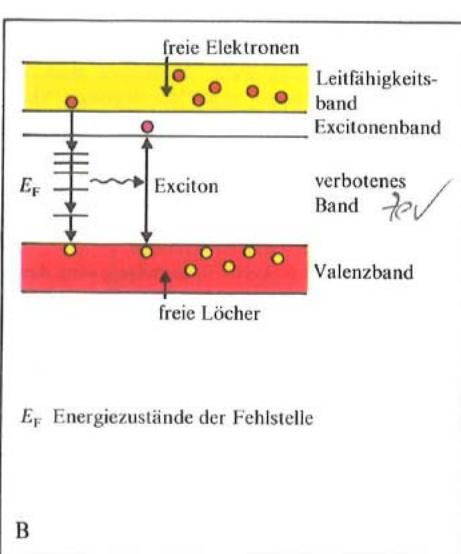
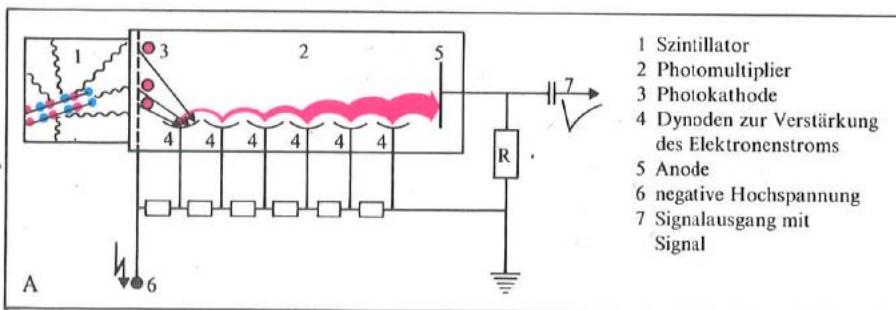
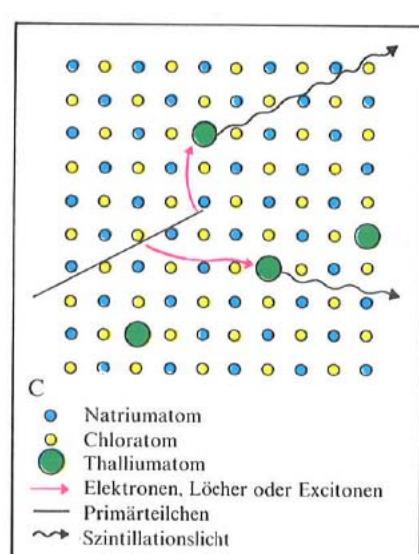


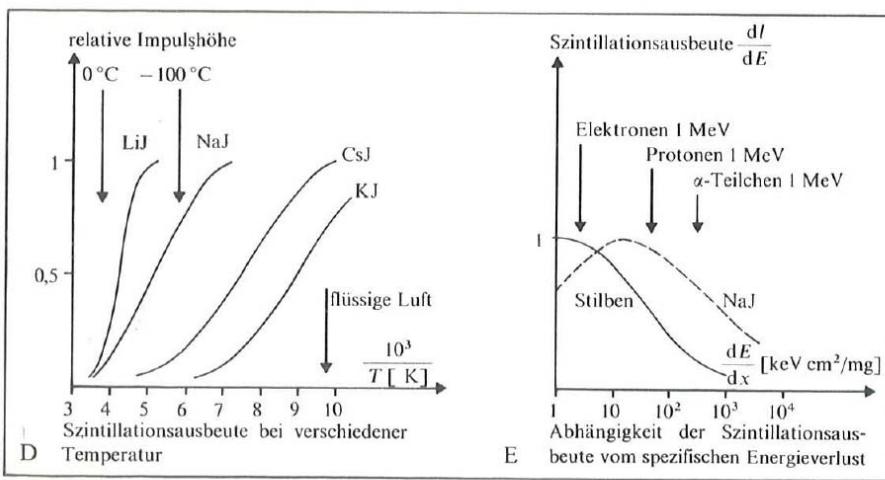
Fig. 4.4: Vorgänge bei der An- und Abregung von Festkörpern mit ionisierender Strahlung.
 (a): Festkörper vor der Strahlungsexposition: V: vollbesetztes Valenzband, L: leeres Leitungsband, Tr: Unbesetztes Elektron-Trap, Az: angeregtes Loch-Trap (Aktivatorzentrum), Ex: mögliche Exzitonenzustände unmittelbar unterhalb des Leitungsbandes. (b): Anregung eines Elektrons in das Leitungsband mit Entstehung eines frei beweglichen Elektron-Loch-Paares oder Anregung eines Elektrons in Exzitonenzustände unterhalb des Leitungsbandes. (c): Strahlungloser Übergang eines Elektrons zurück ins Valenzband unter Bildung eines Phonons (Ph), Rekombination eines Exzitons unter Lichtemission oder Phonon-Bildung (Li, Ph) und Einfang eines freien Elektrons in ein angeregtes Lochtrap (Az) unter Abgabe von Licht (Li), Trappen eines Elektrons in vorher nicht besetzte Elektronentrapzustände (Tr).



Bändermodell für organische Szintillatoren



Modellvorstellung der Szintillation im NaJ(Tl)



Szintillationsausbeute

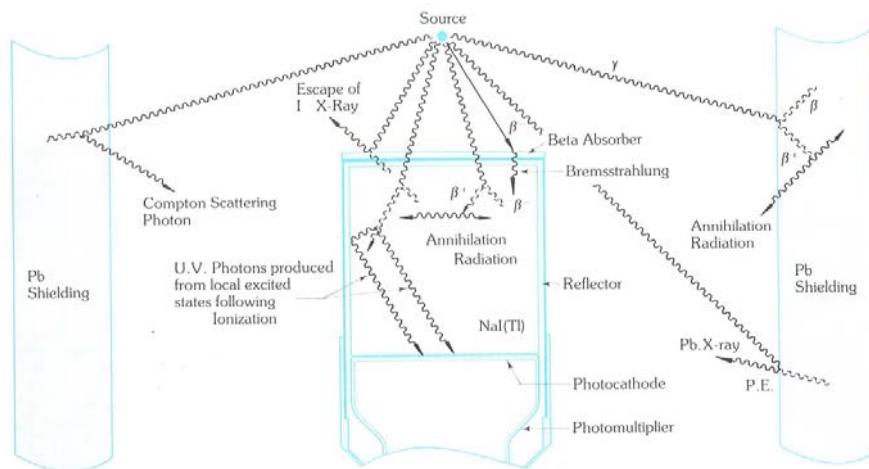


Fig. 1.4. Illustration of various processes which contribute to the response of a detector to a gamma ray source.

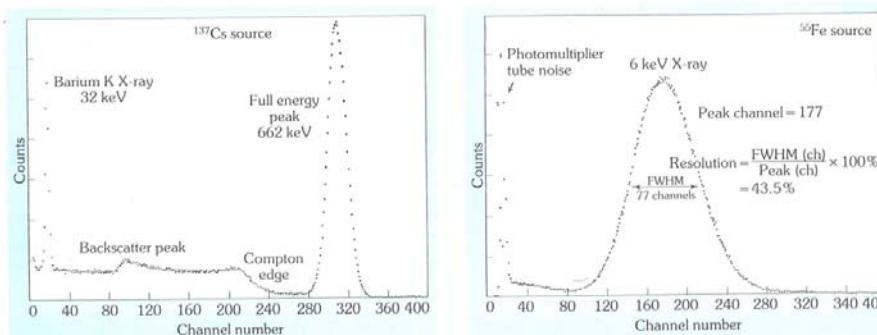
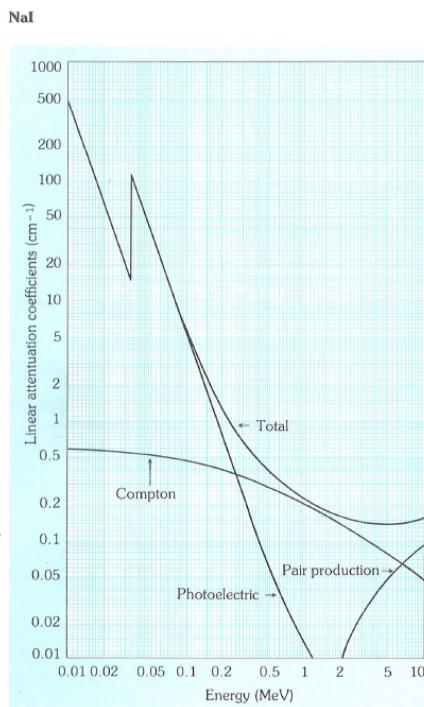
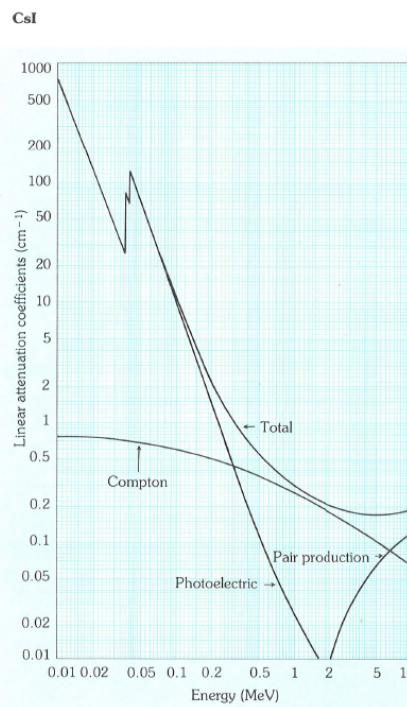


Fig. 1.5. ^{137}Cs pulse height spectrum obtained with a selected Harshaw type 12S12 NaI(Tl) detector.
Harshaw/Filtrol Research Laboratory Report.

Fig. 1.6. A low energy spectrum obtained with a Harshaw type SH NaI(Tl) detector.
Harshaw/Filtrol Research Laboratory Report.



Specific mass = 3670 kg/m³
Atomic Number: Z(l) = 13
Z(Na) = 11
Electron Binding Energies:
K-edge (l) = 33.17 keV
L₁-edge (l) = 5.19 keV
L₁₁-edge (l) = 4.85 keV
L₁₁₁-edge (l) = 4.56 keV
Average K X-Ray Energy (l) = 29.2 keV



Specific mass = 4510 kg/m³
Atomic number: Z (l) = 53
Z (Cs) = 55
Electron Binding Energies:
K-edge (l) = 33.17 keV
K-edge (Cs) = 35.98 keV
L₁-edge (Cs) = 5.72 keV
L₁₁-edge (Cs) = 5.36 keV
L₁₁₁-edge (Cs) = 5.01 keV
Average K X-Ray Energy (Cs) = 31.6

TABLE 8-3 Properties of Common Inorganic Scintillators

Material	Specific Gravity	Wavelength of Maximum Emission (λ_{\max})	Index of Refraction at λ_{\max}	Principal Decay Constant (μs)	Pulse Rise Time (μs)	Total Light Yield in Photons/MeV	Absolute Scintillation Efficiency for Fast Electrons	Relative γ -Ray Pulse Height with Bialkali PM Tube
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	0.5	38000	11.3%	1.00
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	1.0	4	52000	11.9	0.49
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.63	4	39000	11.4	1.11
LiI(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	—	11000	2.8	0.23
BGO	7.13	505	2.15	0.30	0.8	8200	2.1	0.13
BaF ₂ slow component	4.89	310	1.49	0.62	3	10000	4.5	0.13
BaF ₂ fast component	4.89	220	—	0.0006	—	—	—	0.03 ^a
ZnS(Ag) (polycrystalline)	4.09	450	2.36	0.2	—	—	—	1.30 ^b
CaF ₂ (Eu)	3.19	435	1.44	0.9	4	24000	6.7	0.78
CsF	4.11	390	1.48	0.004	—	—	—	0.05
Li glass ^c	2.5	395	1.55	0.075	—	—	1.5	0.10
For comparison, a typical organic (plastic) scintillator:								
NE 102A	1.03	423	1.58	0.002		10000	3.0	0.25

^aUsing UV-sensitive PM tube.^bFor alpha particles.^cProperties vary with exact formulation. Also see Table 15-1.

Source: Data derived primarily from Refs. 56-58.

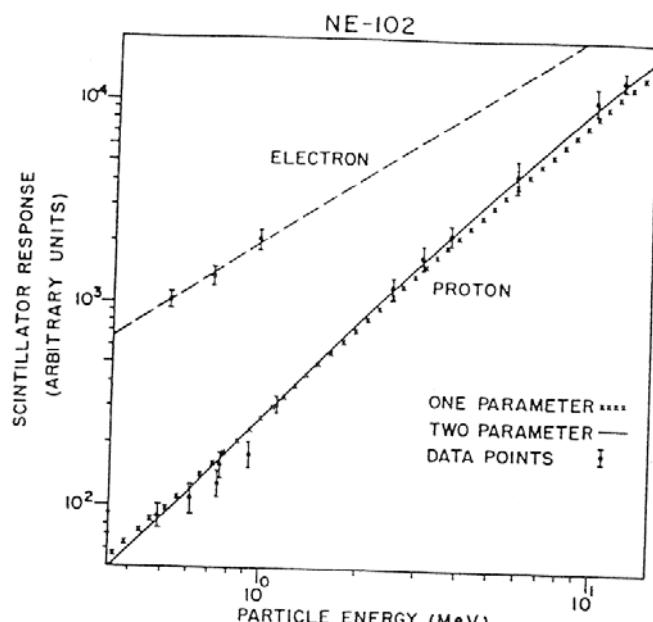


Figure 8-3 The scintillation light yield for a commercially available plastic scintillator (NE 102) when excited by electrons and protons. The data are fit by curves from Eq. (8-3) (one parameter) and Eq. (8-9) (two parameter). (From Craun and Smith.²⁶)

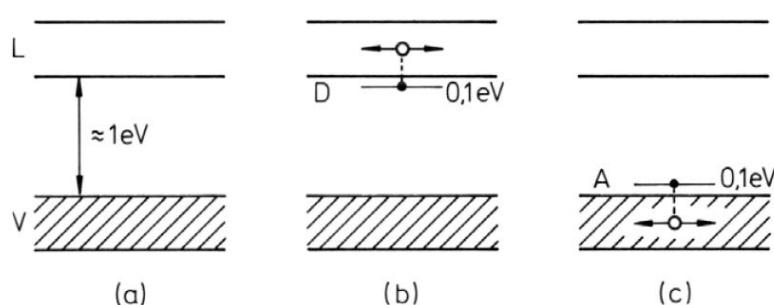


Fig. 4.5: Vorgänge im Halbleiterkristall bei der Dotierung. (a): Reiner Halbleiter mit einem Bandabstand von etwa 1 eV. (b): Erzeugung eines n-Halbleiters durch Dotierung mit einer 5-wertigen Substanz. Das Donatorniveau D befindet sich unmittelbar unter dem Leitungsbau. Nach thermischer Anregung des Elektrons ins Leitungsbau mit nur 0,1 eV bleibt ein ortsfester positiv geladener Donatorplatz und ein im Leitungsbau bewegliches Elektron zurück. (c): Erzeugung eines p-Halbleiters durch Dotierung mit einer 3-wertigen Substanz. Thermische Anregung eines Elektrons aus dem Valenzbau in das Akzeptorniveau A erzeugt einen ortsfesten, negativ geladenen Akzeptorplatz und ein bewegliches Loch im Valenzbau. Die n- und p-Leitfähigkeit übertrifft die Eigenleitfähigkeit des Halbleiters.

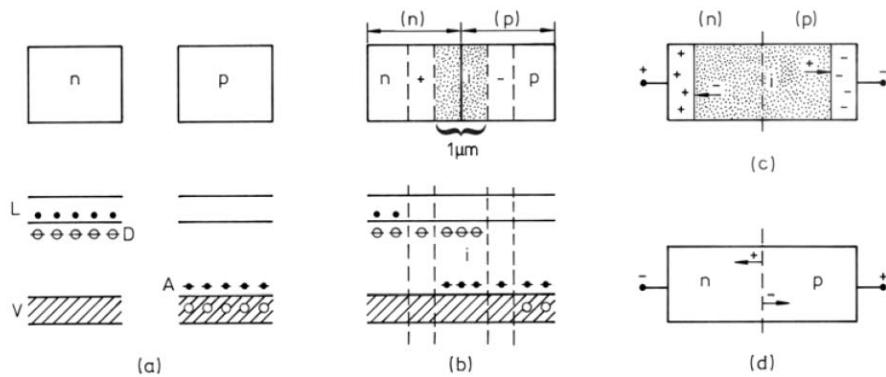


Fig. 4.6: Entstehung eines p-n-Überganges (Halbleiterdiode) beim Zusammenfügen eines p- und eines n-leitenden Halbleiters. (a): Räumlich getrennte, ladungsneutrale n- und p-leitende Kristalle mit entsprechendem Bändermodellbild. (b): Bildung einer intrinsischen Zone i ohne Majoritätsladungsträger durch Neutralisation der jeweiligen Majoritätsladungsträger durch aus der Nachbarzone diffundierende entgegen gesetzte Ladungen. Entstehung eines die Diffusion behindernden elektrischen Gegenfeldes durch zurückbleibende lokal fixierte, geladene Gitterplätze. (c): Verbreiterung der i-Zone nach Anschluss einer externen Spannung (Pluspol bei n, Minuspol bei p, Sperrbetrieb der Diode). (d): Verschwinden der i-Zonen bei umgedrehter Polarität der externen Spannung (Minuspol an n, Pluspol an p, Durchlassbetrieb der Diode).

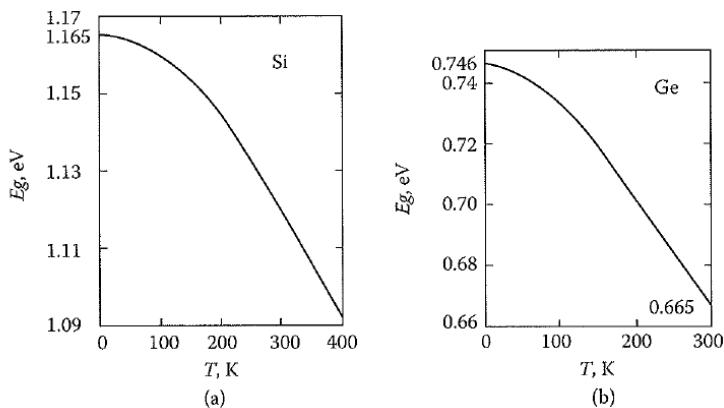


Figure 7.8 The variation of E_g with temperature: (a) for silicon; (b) for germanium. (From Bertolini, G., and Coche, A., *Semiconductor Detectors*, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, Chapter 1.1.1, 1968.).

Figure 7.8 The variation of E_g with temperature: (a) for silicon; (b) for germanium. (From Bertolini, G., and Coche, A., *Semiconductor Detectors*, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, Chapter 1.1.1, 1968.)

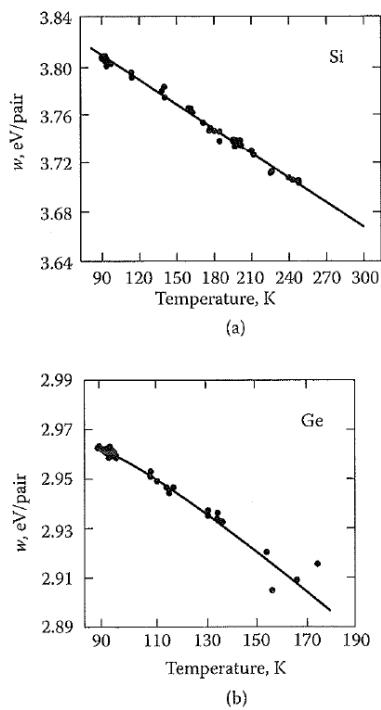


Figure 7.9 Energy needed to produce an electron-hole pair in (a) silicon and (b) germanium, as a function of temperature. (From Pehl, R. H., et al., *Nucl. Instrum. Meth.*, 59, 45, 1968.)

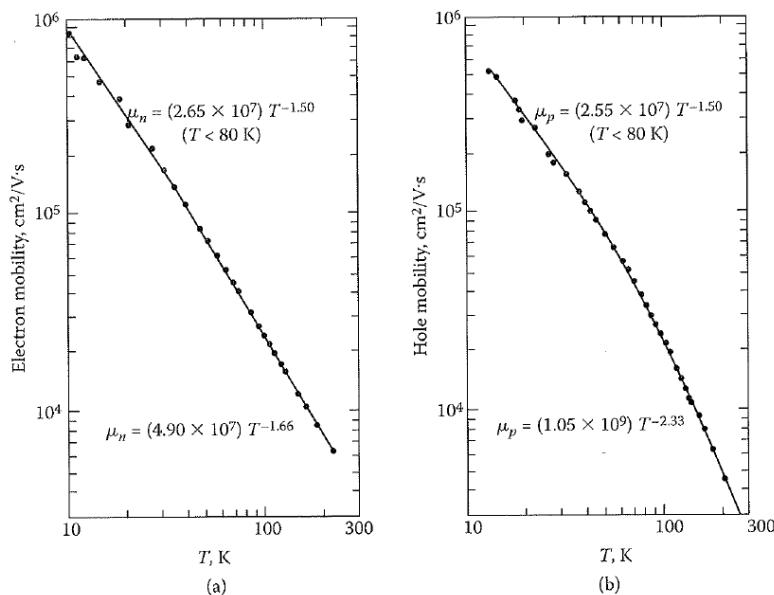


Figure 7.10 (a) Electron mobility versus temperature for n -type germanium, (b) hole mobility versus temperature for p -type germanium. (From Delaet, L. H., et al., *Nucl. Instrum. Meth.*, 101, 11, 1972.)

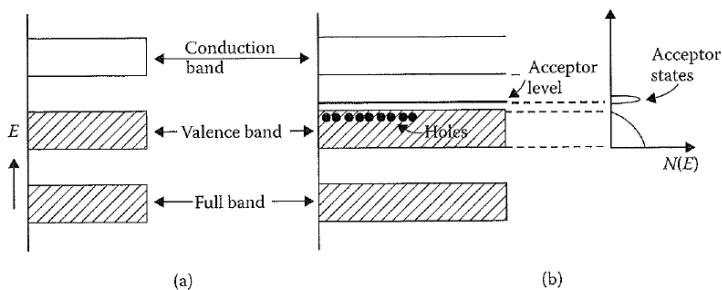


Figure 7.14 (a) Intrinsic and (b) p-type semiconductor. New hole states (acceptor states) are created close to the top of the valence band.

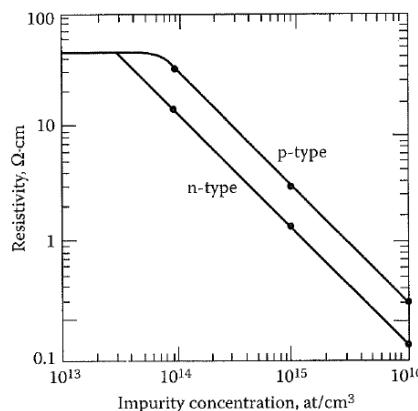


Figure 7.15 Resistivity as a function of impurity concentration in germanium. (From Bertolini, G., and Coche, A., *Semiconductor Detectors*, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, Chapter 1.1.3, 1968.)

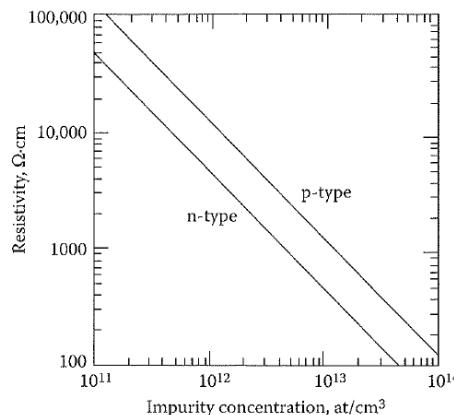


Figure 7.16 Resistivity as a function of impurity concentration in silicon. (From Bertolini, G., and Coche, A., *Semiconductor Detectors*, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, Chapter 1.1.3, 1968.)

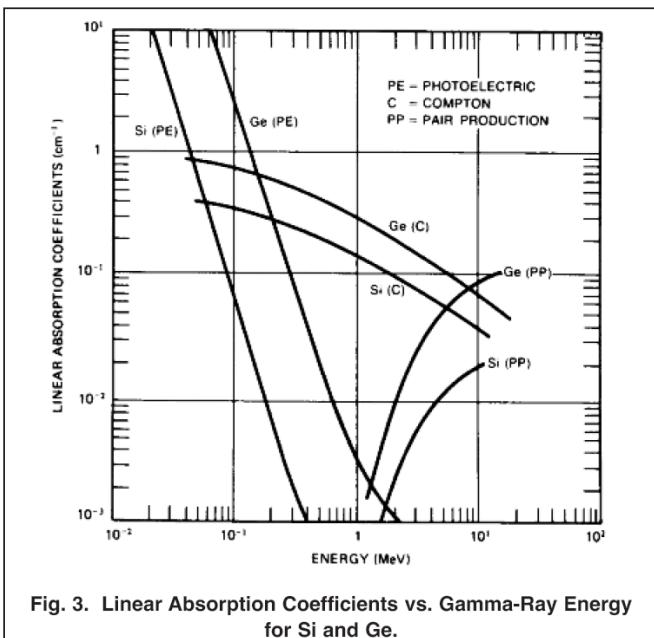


Fig. 3. Linear Absorption Coefficients vs. Gamma-Ray Energy for Si and Ge.

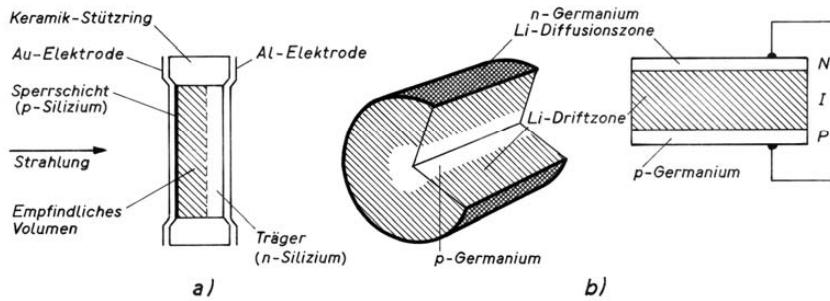


Fig. 4.7: Bauformen von Halbleiterdetektoren. (a) Oberflächen-Sperrschiichtdetektor (p-n-Diode). (b) Lithiumgedriftete Germaniumdetektoren (Ge(Li)) mit p-i-n-Struktur in koaxialer (links) und planarer (rechts) Ausführung.

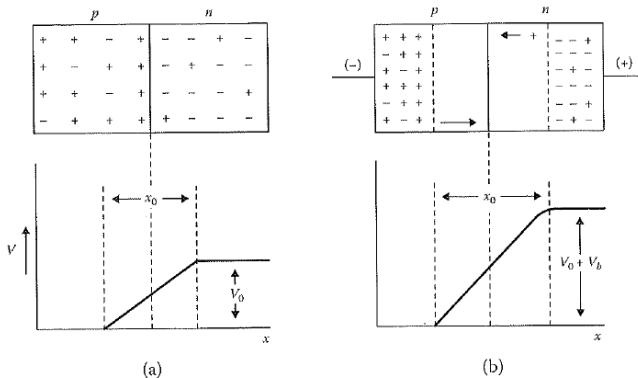


Figure 7.17 (a) A p-n junction without external voltage, (b) If a reverse voltage is applied externally, the potential across the junction increases, and so does the depth x_0 along which an electric field exists.

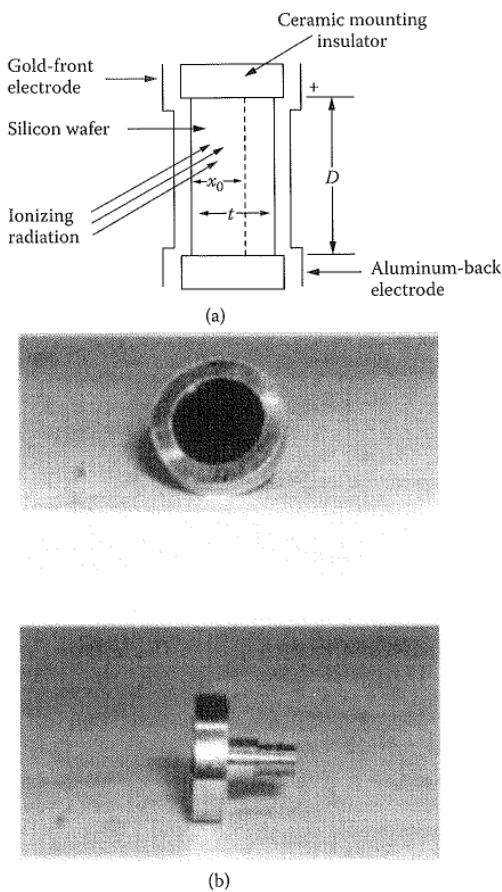


Figure 7.19 A typical surface barrier detector: (a) a schematic representation; (b) photograph of a commercial detector. (Reproduced from *Instruments for Research and Applied Science* by permission of EG & GORTEC, Oak Ridge, Tennessee.)

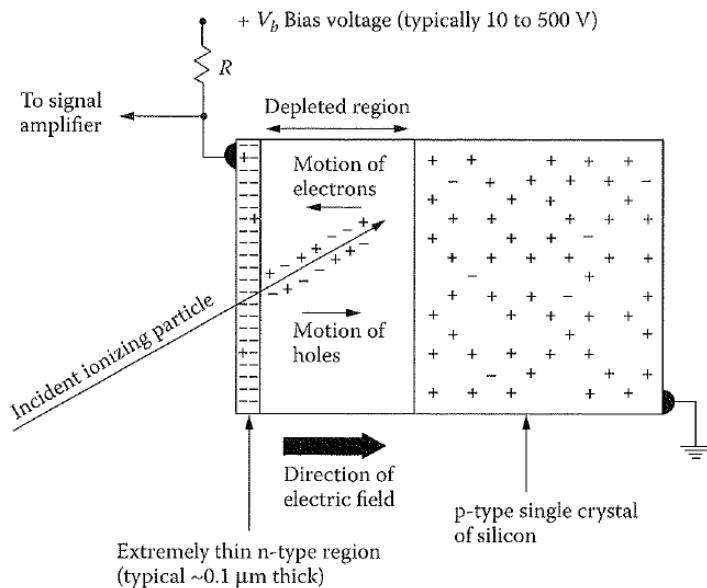


Figure 7.20 A diffused-junction detector.

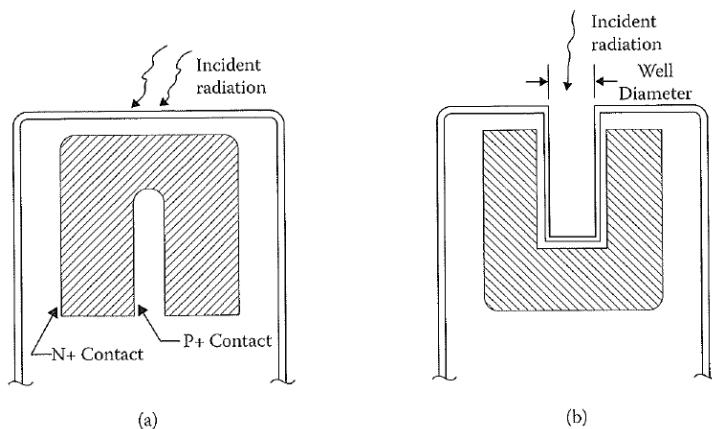


Figure 7.24 Two examples of geometries used for Ge Detectors; (a) coaxial; (b) well type. (From Canberra Nuclear, *Edition Nine Instruments Catalog*.)

Table 7.2
Properties of Si, Ge, CdTe, HgI₂, and CdZnTe

Material	Atomic Number	Energy Gap (eV)	Energy Needed to Form the Pair (eV)
Si	14	1.106 (300 K)	3.65 (300 K)
Ge	32	0.67 (77 K)	2.96 (77 K)
CdTe	48 and 52	1.47 (300 K)	4.43 (300 K)
HgI ₂	80 and 53	2.13 (300 K)	4.22 (300 K)
CdZnTe	48, 30, and 52	1.64 (300 K)	5.0 (300 K)

Table 1.2 Energy Resolution (keV FWHM) vs. Detector Type			
Energy (keV)	5.9	1.22	1.332
Proportional Counter	1.2	—	—
X-ray NaI(Tl)	3.0	12.0	—
3 x 3 NaI(Tl)	—	12.0	60
Si(Li)	0.16	—	—
Low Energy Ge	0.14	0.5	—
Coaxial Ge	—	0.8	1.8

Improved Resolution and Efficiency

As shown in Figure 1, LaBr provides better resolution performance over NaI(Tl) systems by approximately a factor of 2. Note that neither the NaI(Tl) detectors nor the lanthanum bromide detectors can approach the resolution of a HPGe detector.

The efficiency for LaBr is about 1.3 times that of NaI(Tl) for the same volume and the decay time constant is slightly more than 10% of the NaI detector decay time (see Table 1). On the basis of photoelectron yield, LaBr has higher efficiency and temperature stability than NaI(Tl).

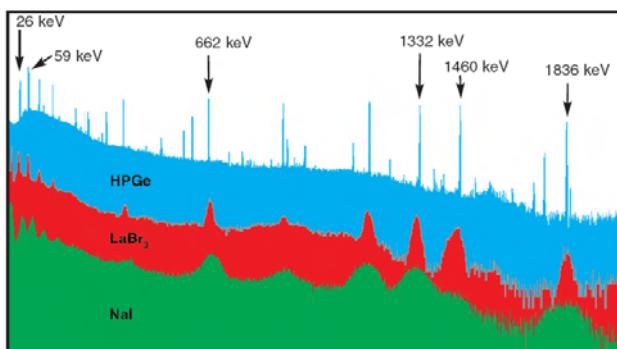


Figure 1. Comparison for LaBr₃(Ce), NaI(Tl), and HPGe spectra.

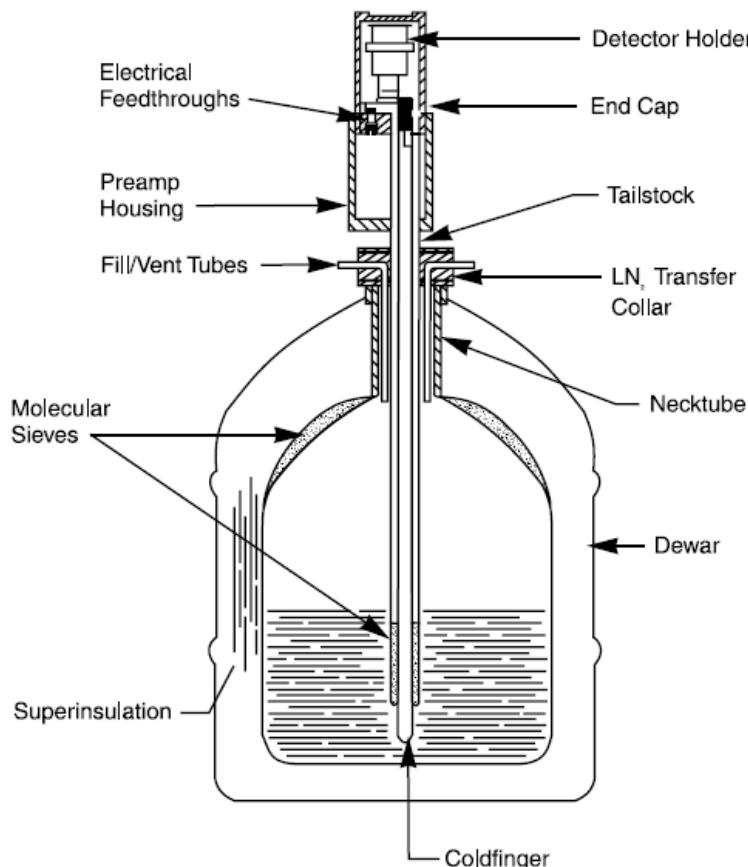


Figure 1.8 Model 7500SL Vertical Dipstick Cryostat

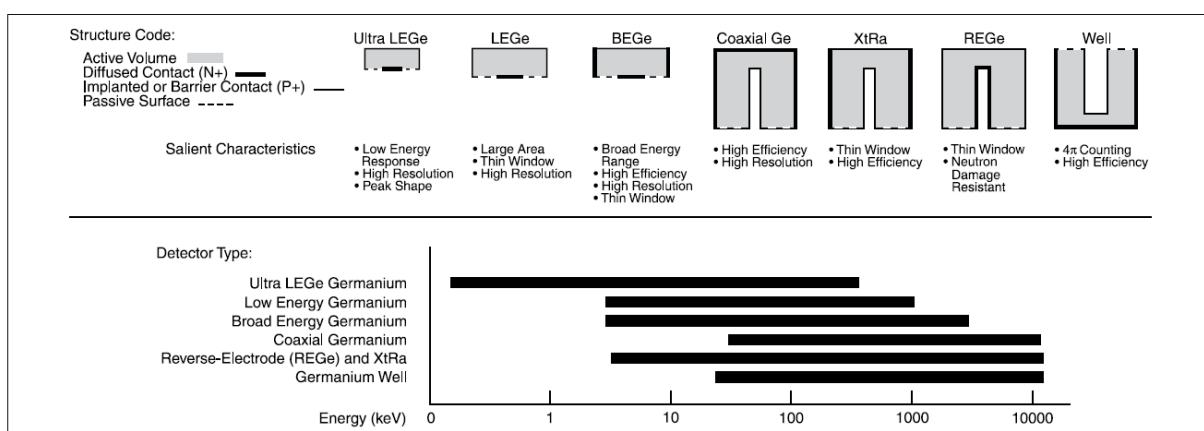


Figure 1.9 Detector Structures and Energy Ranges

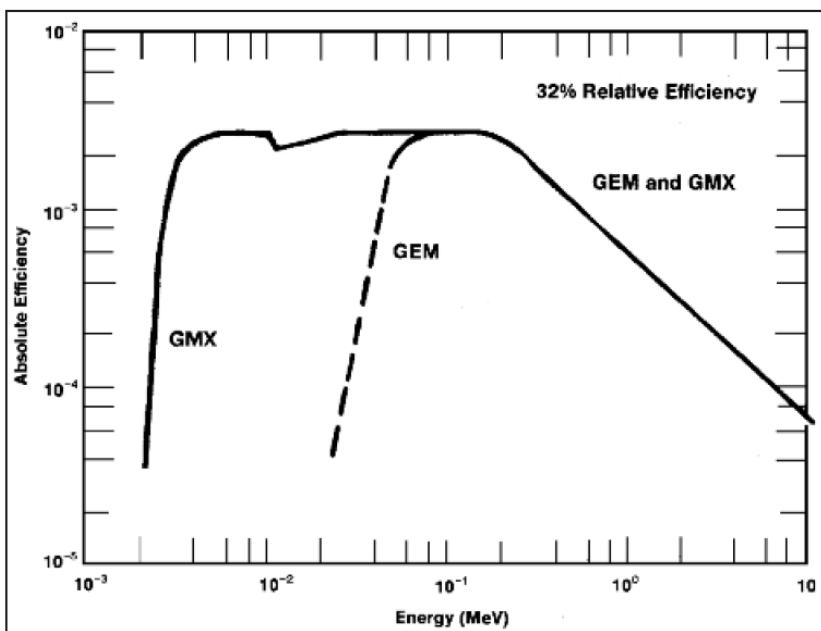


Fig. 2. Absolute Efficiency vs. Energy for 32% GEM and GAMMA-X HPGe Coaxial Detectors.

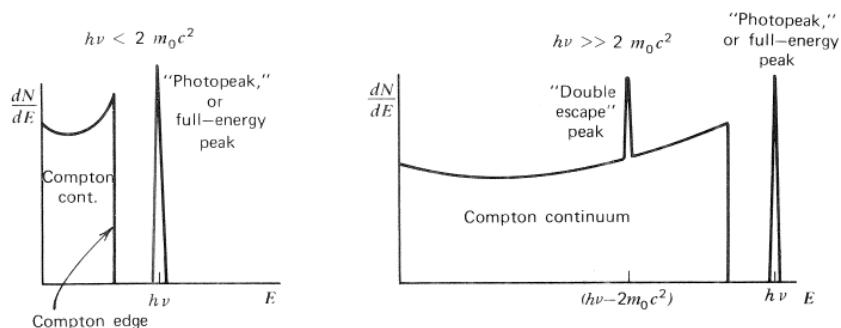
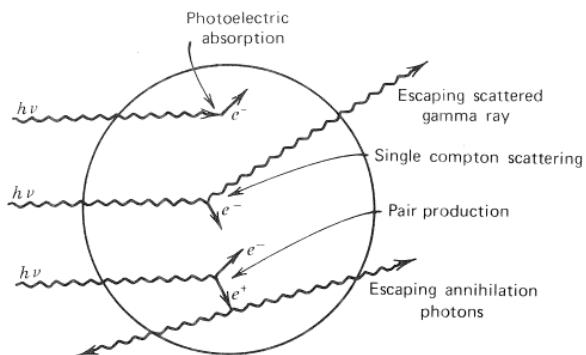


FIGURE 10-2. The “small detector” extreme in gamma ray spectroscopy. The processes of photoelectric absorption and single Compton scattering give rise to the low-energy spectrum at the left. At higher energies, the pair production process adds a “double escape” peak shown in the spectrum at the right.

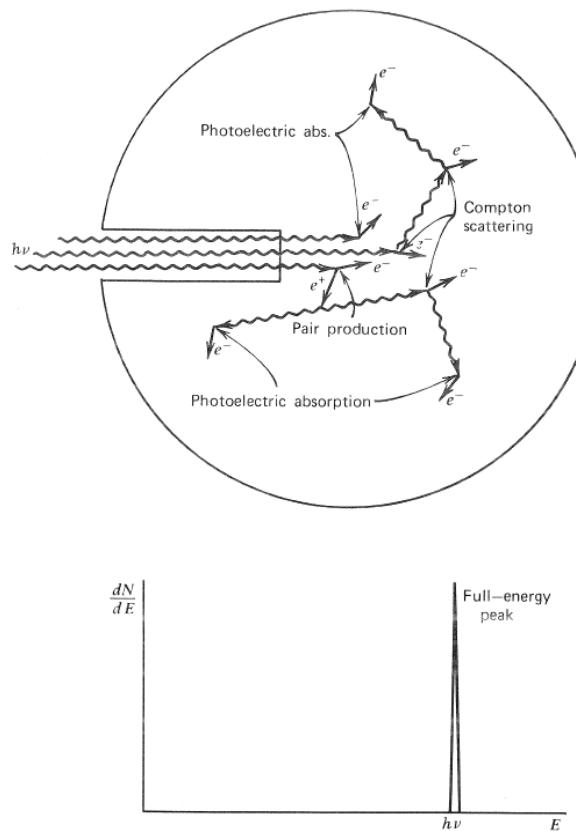


FIGURE 10-3. The “large detector” extreme in gamma ray spectroscopy. All gamma ray photons, no matter how complex their mode of interaction, ultimately deposit all their energy in the detector. Some representative histories are shown at the top.

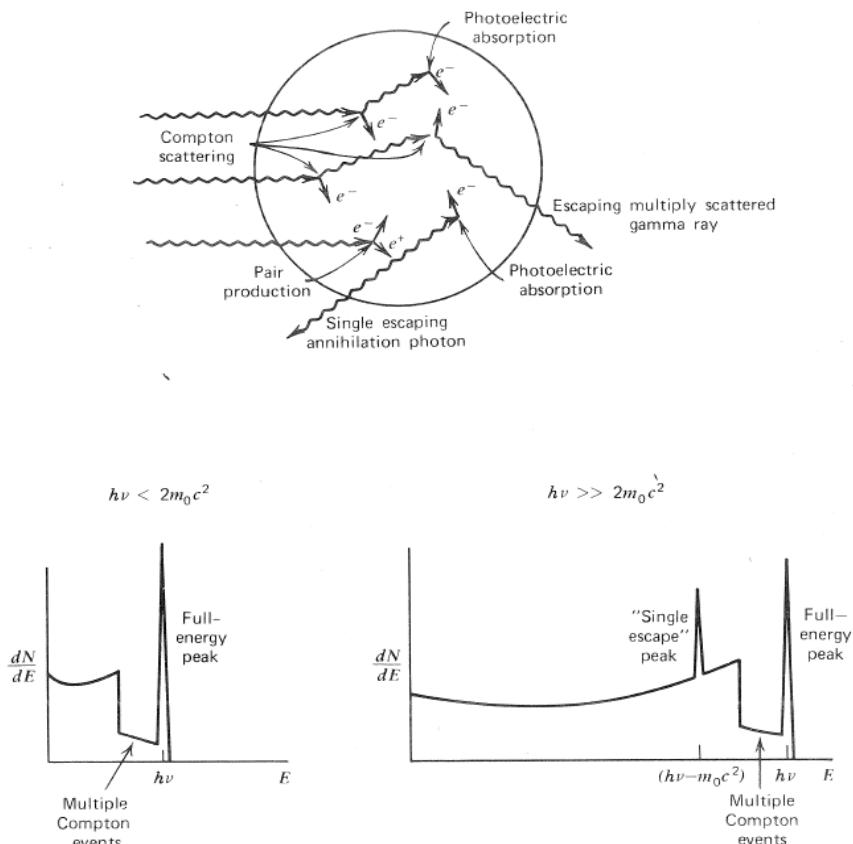
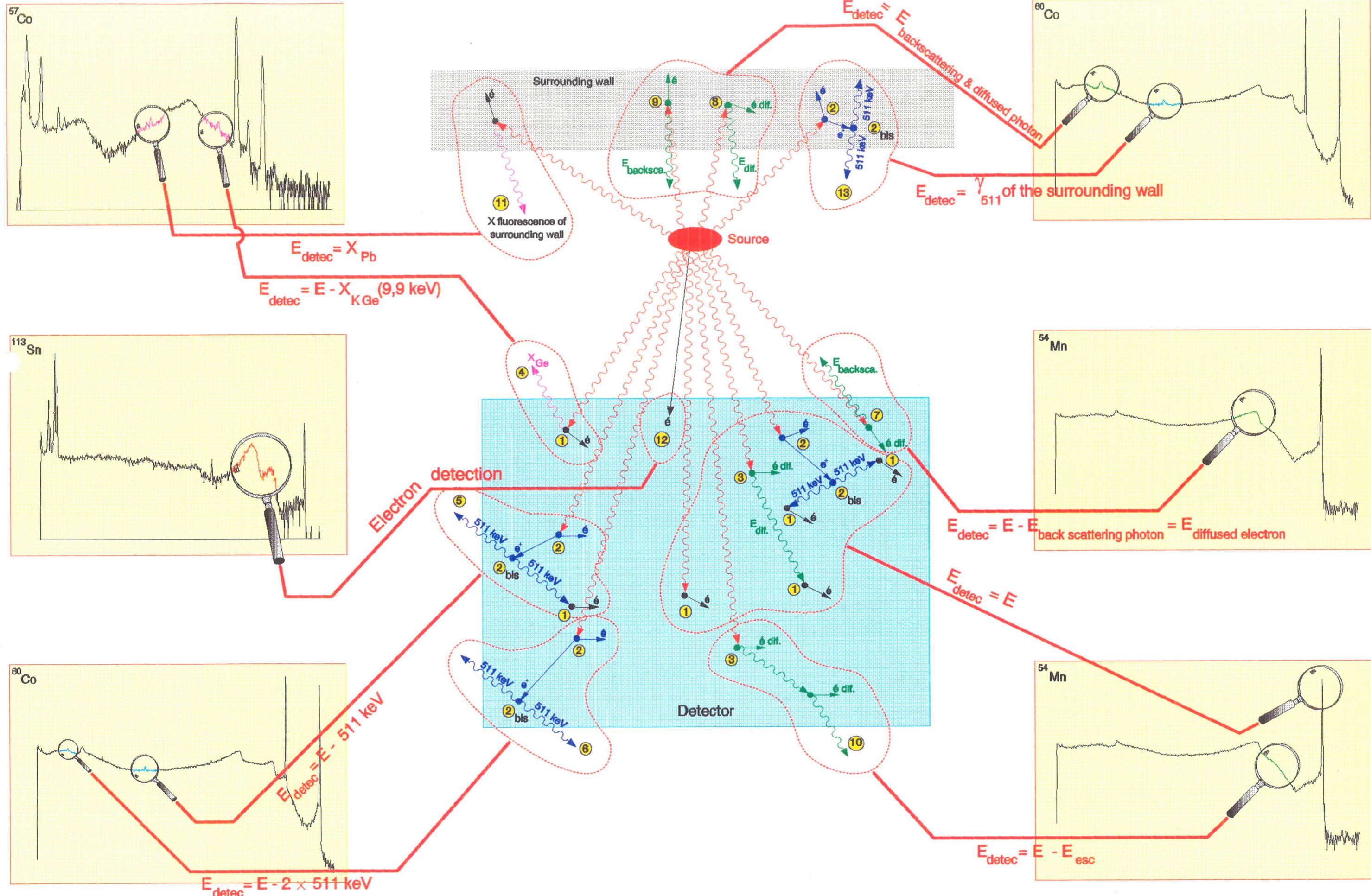


FIGURE 10-4. The case of intermediate detector size in gamma ray spectroscopy. In addition to the continuum from single Compton scattering and the full-energy peak, the spectrum at the left shows the influence of multiple Compton events followed by photon escape. The full-energy peak also contains some histories that began with Compton scattering.

At the right, the “single escape” peak corresponds to initial pair production interactions in which only one annihilation photon leaves the detector without further interaction.



GAMMA RAY INTERACTIONS IN THE DETECTOR

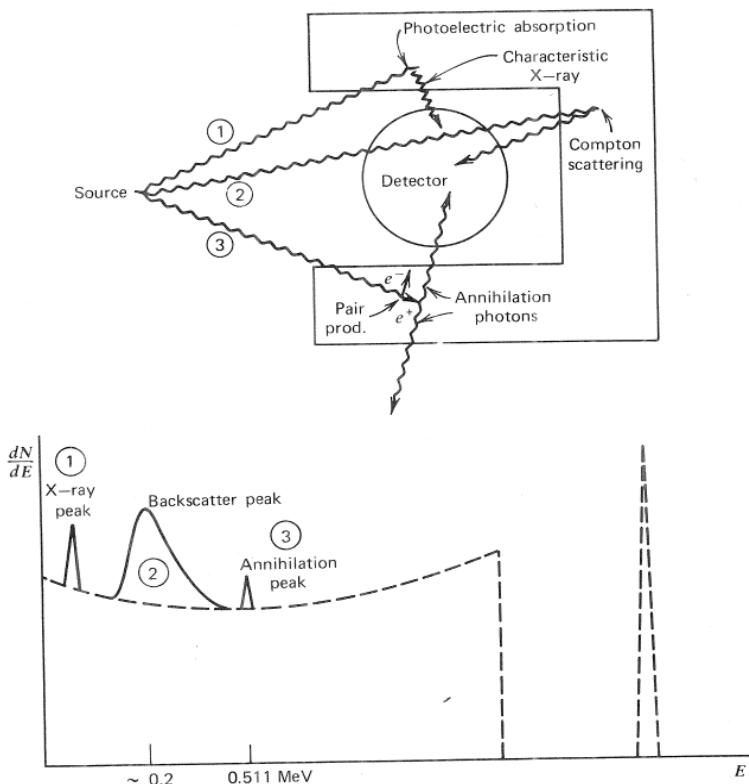


FIGURE 10-6. Influence of surrounding materials on detector response. In addition to the expected spectrum (shown as a dashed line), the representative histories shown at the top lead to the indicated corresponding features in the response function.

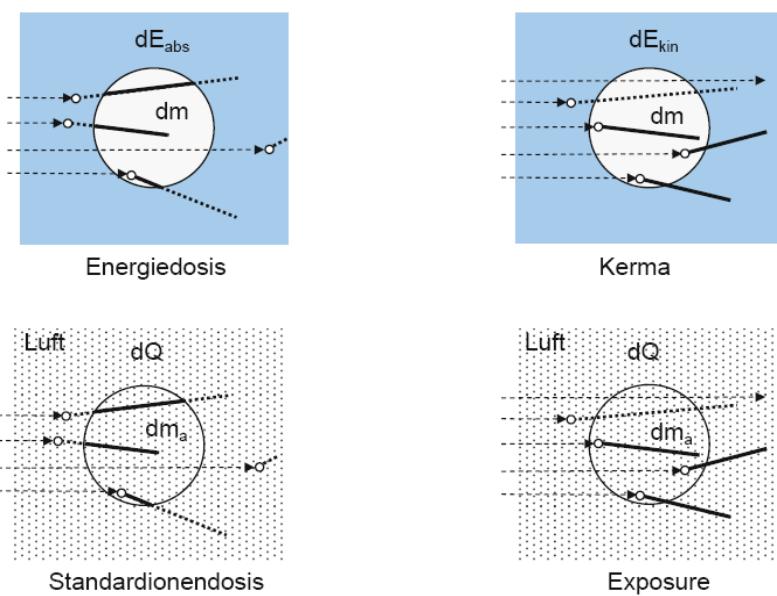


Fig. 9.1: Zur Definition der Dosisgrößen. Obere Reihe: Links Energiedosis, rechts Kerma für beliebige Medien für Umgebung und/oder Bezugsvolumen. Untere Reihe: Links Standardionendosis, rechts Exposure für Bezugs- und Umgebungsmedium Luft. Die gestrichelten Linien deuten die Primärphotonen an. Die kleinen Kreise markieren die Entstehungsorte für die Sekundärelektronen. Gepunktete Linien stellen die Energieüberträge bzw. die durch Sekundärelektronen erzeugten Ladungen dar. Dicke Linien stehen für die bei der jeweiligen Dosisgröße zu berücksichtigenden Energieüberträge bzw. für die durch Sekundärelektronen freigesetzten elektrischen Ladungen.

Größe	SI-Einheit	Größendefinition	alte Einheit	Einheitenzeichen	Umrechnung
Aktivität	Becquerel Einheitenzeichen: Bq $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$	Anzahl radioaktiver Kernumwandlungen pro Zeiteinheit	Curie	Ci	$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$
Energiedosis	Gray Einheitenzeichen: Gy $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$	Gesamte absorbierte Strahlungsenergie in der Masseneinheit	Rad	rd	$1 \text{ rd} = 10^{-2} \text{ Gy}$
Äquivalentdosis	Sievert Einheitenzeichen: Sv $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$	Energiedosis multipliziert mit dem dimensionslosen Bewertungsfaktor der vorliegenden Strahlenart	Rem	rem	$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$
Ionendosis	Coulomb pro Kilogramm Einheitenzeichen: C/kg	Elektrische Ladung der in einer luftgefüllten Ionisationskammer erzeugten Ionen, dividiert durch die Masse der darin enthaltenen Luft	Röntgen	R	$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$
Energiedosisleistung	Gray pro Sekunde (bzw. Gray pro Stunde) Einheitenzeichen: Gy/s (bzw. Gy/h)	Energiedosis pro Zeiteinheit	Rad pro Sekunde (bzw. Rad pro Stunde)	rd/s rd/h	$1 \text{ rd/s} = 10^{-2} \text{ Gy/s}$ $1 \text{ rd/h} = 10^{-2} \text{ Gy/h}$
Äquivalentdosleistung	Sievert pro Sekunde (bzw. Sievert pro Stunde) Einheitenzeichen: Sv/s (bzw. Sv/h)	Äquivalentdosis pro Zeiteinheit	Rem pro Sekunde (bzw. Rem pro Stunde)	rem/s rem/h	$1 \text{ rem/s} = 10^{-2} \text{ Sv/s}$ $1 \text{ rem/h} = 10^{-2} \text{ Sv/h}$
Ionendosisleistung	Ampere pro Kilogramm Einheitenzeichen: A/kg	Ionendosis pro Zeiteinheit	Röntgen pro Sekunde (bzw. Röntgen pro Stunde)	R/s R/h	$1 \text{ R/s} = 0,93 \text{ A/kg}$ $1 \text{ R/h} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ A/kg}$

Radionuklid	Γ_{20} (mGy · m ² /h · GBq)	Γ_H (mSv · m ² /h · GBq)
²² Na	0.281	0.3206
⁵⁷ Co	0.0133	0.0152
⁶⁰ Co	0.307	0.3503
⁹⁹ Mo	0.0341	0.0389
⁹⁹ Tc-m	0.0141	0.0161
¹³¹ I	0.0518	0.0591
¹³³ Xe	0.0121	0.0138
¹³⁷ Cs*	0.0768	0.0876
¹⁹² Ir	0.109	0.1244
¹⁹⁸ Au	0.0548	0.0625
²²⁶ Ra**	0.197	0.225
²⁴¹ Am	0.00576	0.00657

Fehler 1,14

Tab. 8.3: Dosisleistungskonstanten für Photonenstrahlung aus [Reich]. Γ_H ist mit dem im Text erwähnten Umrechnungsfaktor aus den Kermakonstanten Γ_{20} berechnet. *: im Gleichgewicht mit Folgeprodukten, **: gefiltert mit 0.5 mm Pt und im Gleichgewicht mit Folgeprodukten. Die numerischen Werte für ¹³⁷Cs und ⁶⁰Co unterscheiden sich geringfügig von den Ergebnissen in den Beispielen 2 und 3, da dort etwas abweichende Werte für die Energieumwandlungskoeffizienten verwendet wurden.