

Dasar Fisika Radiasi, Satuan & Pengukuran Radiasi

**Pelatihan Petugas Keahlian pada Fasilitas Produksi
Radioisotop-Radiofarmaka dari Reaktor (Batch 2)**

Haryo Seno

Tangerang Selatan, 17 – 30 Juni 2026

Acknowledgement: Pusdiklat - BATAN, 2019, Materi Pelatihan PPR IN



BIODATA

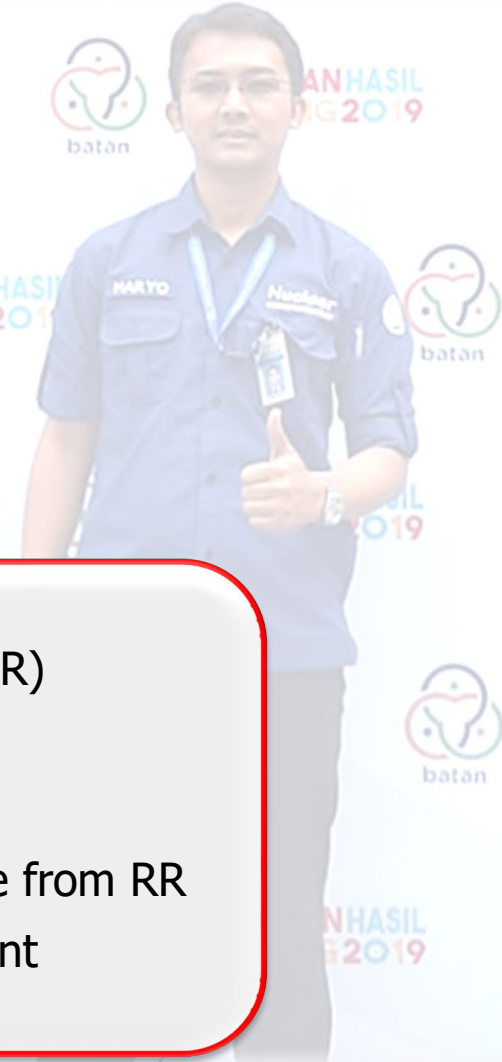
Nama : Haryo Seno, M.Si
Penugasan : PSTNT – BATAN (2008–2021), ORTN – BRIN (2022–sekarang)
Kompetensi : Radiation Safety, Nuclear Safety, RWM, RPO
e-mail : haryo.seno@brin.go.id

PENDIDIKAN

- Bachelor - Teknokimia Nuklir, STTN-BATAN (2007)
- Master - Fisika, Institut Teknologi Bandung (2015)

PELATIHAN

- ✓ Radiological Risk Assessment
- ✓ Emergency Preparedness and Responses (EPR)
- ✓ EPR Field Assistance Team (FAT)
- ✓ Nuclear Plant Safety
- ✓ Technical Meeting Management of Rad Waste from RR
- ✓ Radiological Environmental Impact Assessment
- ✓ Reactor Engineering & Safety I – II



LATAR BELAKANG

Radiasi ada di sekitar kita

Teknologi nuklir banyak dimanfaatkan di bidang Energi, Industri dan Medis (contohnya RI-RF)

Berdasarkan interaksi radiasi dengan materi

Perlu pemahaman proses terjadi dan interaksi dengan materi

MANFAAT

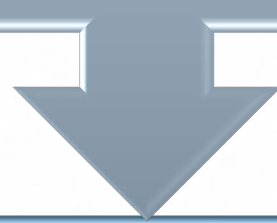
Pengetahuan memadai sumber radiasi dan interaksinya

Pemahaman potensi bahaya radiasi

Mampu menjamin keselamatan terhadap radiasi

TUJUAN PEMBELAJARAN

Menjelaskan konsep fisika radiasi yang berkaitan dengan proses terjadinya radiasi serta interaksinya dengan materi



Menerapkan pemahaman tersebut untuk tujuan keselamatan selama kegiatan/proses yang melibatkan radiasi dan dalam penanganan perihal kedaruratan radiasi

INDIKATOR KEBERHASILAN

Menjelaskan definisi radiasi

Menggambarkan struktur atom (Bohr)

Membedakan pengertian istilah isotop, isobar, isoton, dan isomer

Menyebutkan jenis peluruhan radioaktif dan sifat radiasi

Menghitung aktivitas radionuklida berdasarkan konsep waktu paro

Menjelaskan perbedaan sumber radiasi alam dan buatan

Menguraikan proses interaksi radiasi (α , β , γ dan neutron) dengan materi

Menyebutkan pengertian paparan radiasi dan dosis radiasi, serta pengertian dosimetri lainnya

Menjelaskan prinsip pengukuran dan menyebutkan jenis peralatan yang relevan

OUTLINES



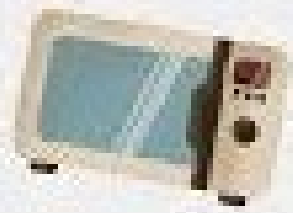
TERMINOLOGI RADIASI

Radiasi ??



Radioaktivitas ??

Radionuklida ??



Definisi

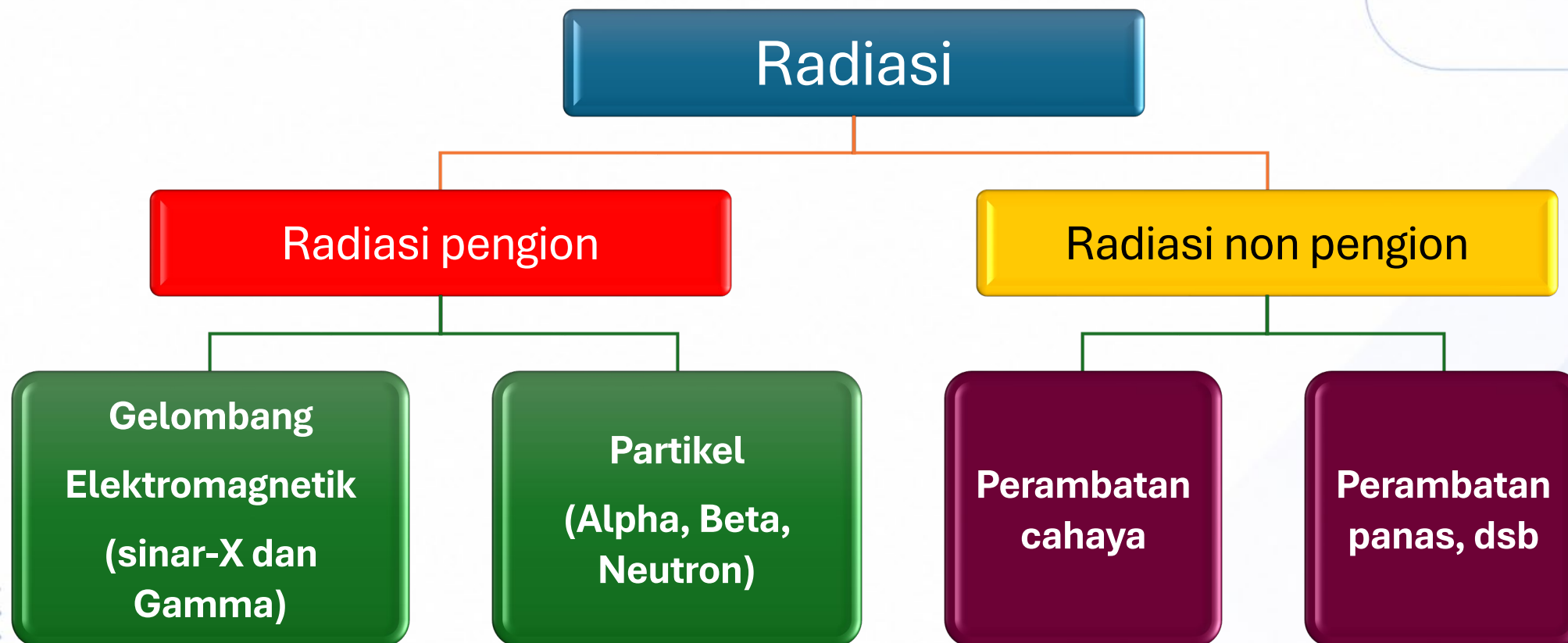
Radiasi adalah **pancaran energi** melalui suatu materi atau ruang dalam bentuk panas, partikel atau gelombang elektromagnetik / cahaya (foton) dari sumber radiasi.



Radioaktivitas adalah sifat dasar dari suatu materi.

Radionuklida atau **Radioisotop** (juga disebut nuklida radioaktif) adalah inti atom yang meluruh atau memancarkan radiasi pengion dalam proses transformasi nuklir. Radiasi yang dipancarkan dapat berupa partikel atau elektromagnetik atau keduanya.

Jenis Radiasi Berdasarkan Sifatnya



Radiasi Pengion

Energi dari radiasi apa pun dapat ditransfer ke materi.

Transfer energi ini dapat menghilangkan elektron dari kulit atom dan membentuk pasangan ion-elektron.

Jenis-jenis radiasi yang mampu menghasilkan ion dalam materi secara kolektif disebut sebagai "**radiasi pengion**"

Radiasi Pengion → radiasi yang dapat menimbulkan proses ionisasi

STRUKTUR ATOM

Struktur Atom (1)

MATERI

Benda yang tersusun dari molekul yang terdiri atas beberapa atom

ATOM

bagian terkecil dari suatu materi yang masih memiliki sifat dasar materi tersebut

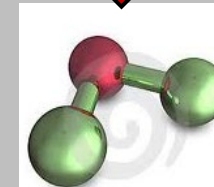
mempunyai ukuran $\pm 10^{-10}$ m (1 Angstrom)



Materi: Air

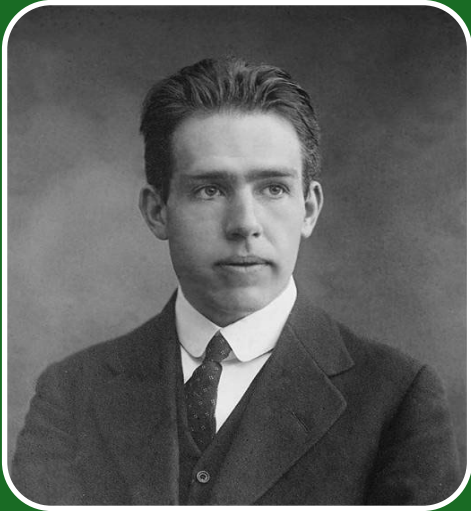


Molekul : H₂O



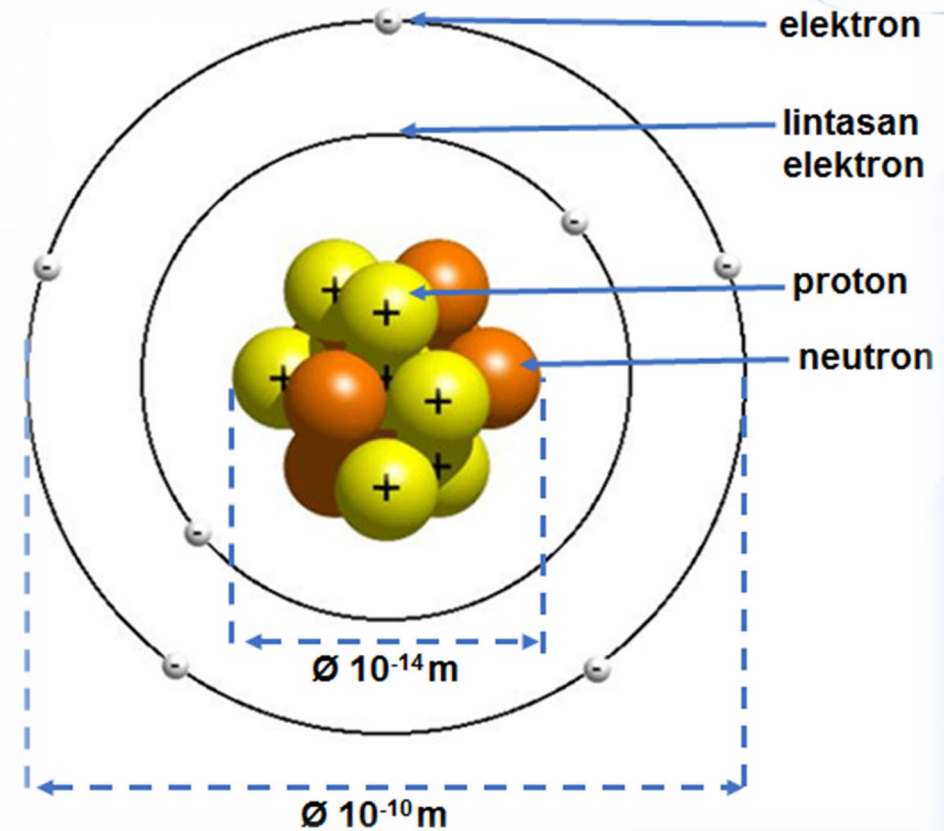
Atom: O & H

Struktur Atom (2)



atom
terdiri:
inti
atom
dan
elektron

Niels Bohr

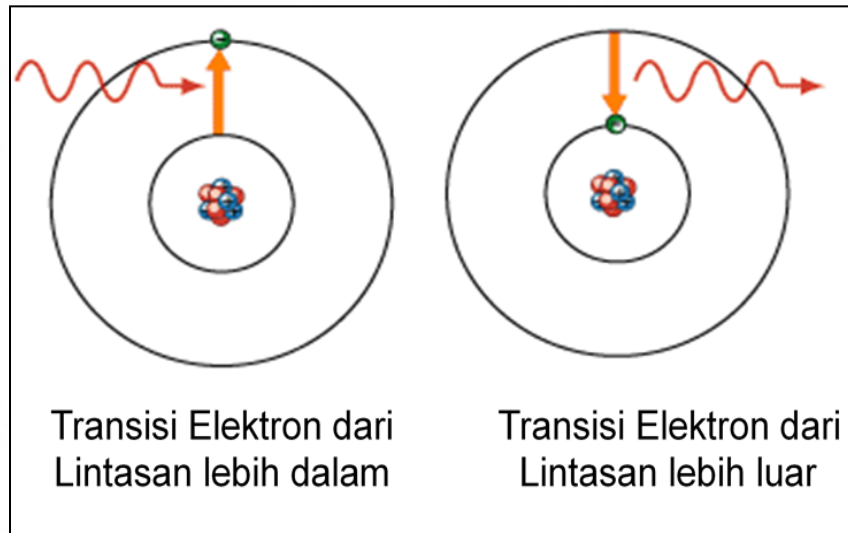


Struktur Atom (3)

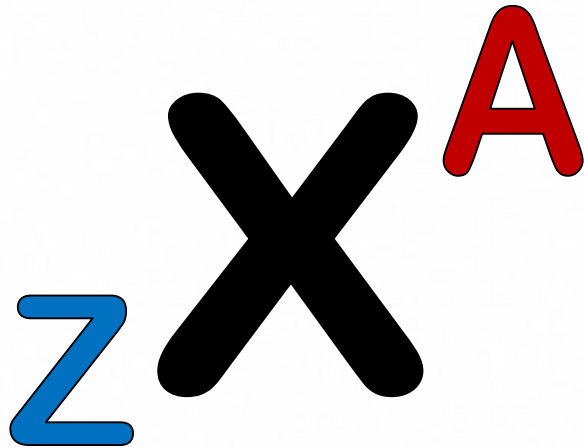
Transisi Elektron

Perpindahan elektron dari satu lintasan ke lintasan yang lain

- transisi dari lintasan yang lebih luar ke lintasan yang lebih dalam, dipancarkan energi,
- transisi dari lintasan dalam ke lintasan yang lebih luar dibutuhkan energi,



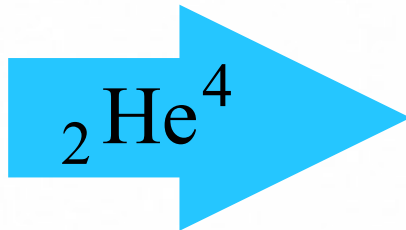
Nomenklatur Inti Atom



X : Lambang atom

A : Nomor massa (jumlah proton + jumlah neutron)

Z : Nomor atom (jumlah proton)



Jenis Unsur : Helium

Jumlah neutron (N) = 2

Jumlah proton (Z) = 2



Jenis Unsur : Cobalt

Jumlah neutron (N) = 32

Jumlah proton (Z) = 27

Bisa juga ditulis dengan:



Isotop, Isobar, Isoton, Isomer

Isotop

- nomor Atom (Z) sama, nomor Massa (A) berbeda
- Contoh : $^{59}_{27}\text{Co}$ dan $^{60}_{27}\text{Co}$; ^1_1H , ^2_1H , ^3_1H

Isobar

- nomor Massa (A) sama tetapi no Atom (Z) berbeda
- Contoh : $^{14}_6\text{C}$ dan $^{14}_7\text{N}$

Isoton

- jumlah neutron (A-Z) sama, tetapi no Atom (Z) berbeda
- Contoh : $^{26}_{12}\text{Mg}$, $^{27}_{13}\text{Al}$, $^{28}_{14}\text{Si}$

Isomer

- nomor Atom (Z) dan Massa (A) sama, tetapi tingkat energi berbeda
- Contoh : $^{60}_{28}\text{Ni}$ dan $^{60}_{28}\text{Ni}^*$

PELURUHAN RADIOAKTIF

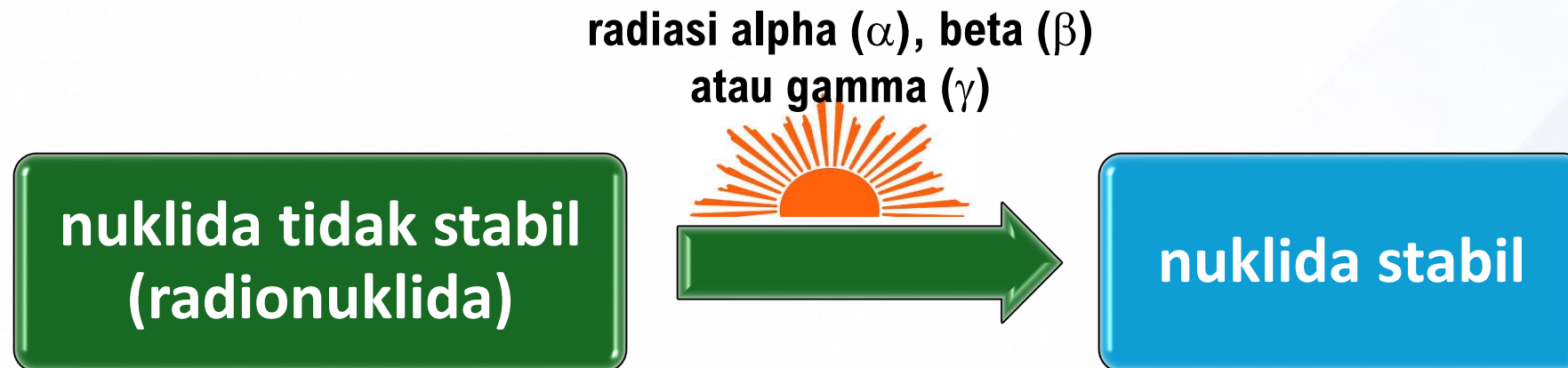
Definisi

Peluruhan radioaktif

- proses perubahan inti atom yang tidak stabil menjadi stabil

radioisotop atau *radionuklida*

- Inti atom yang meluruh



Peluruhan Alpha

Partikel alpha (α)

- 2 proton dan 2 neutron

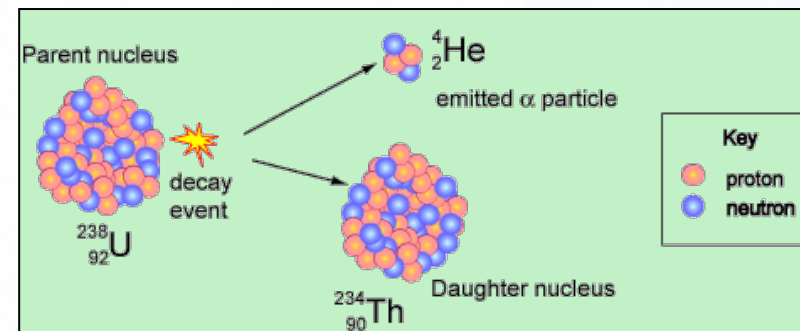
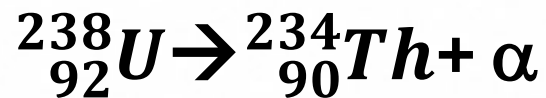
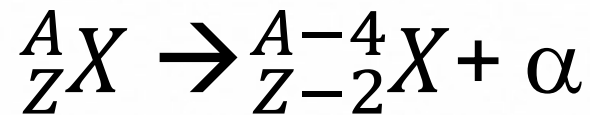
Identik dengan inti Helium

- $a \approx {}_2\text{He}^4$

Inti tidak stabil

- Relatif berat
- nomor atom > 80

Contoh:



Peluruhan Beta

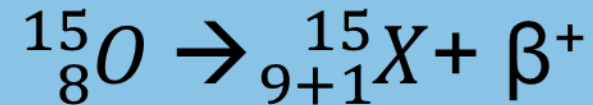
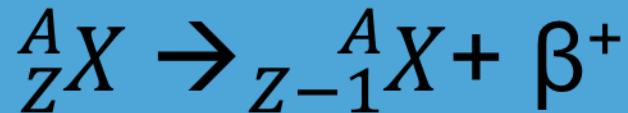
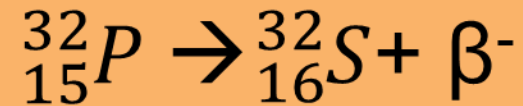
Partikel bermuatan

- **negatif (β^-) identik dengan elektron**
- **positif (β^+) identik dengan elektron tetapi bermuatan + (positron)**

Inti tidak stabil

- **relatif ringan**

Contoh:



Peluruhan Gamma

Tingkat energi inti atom

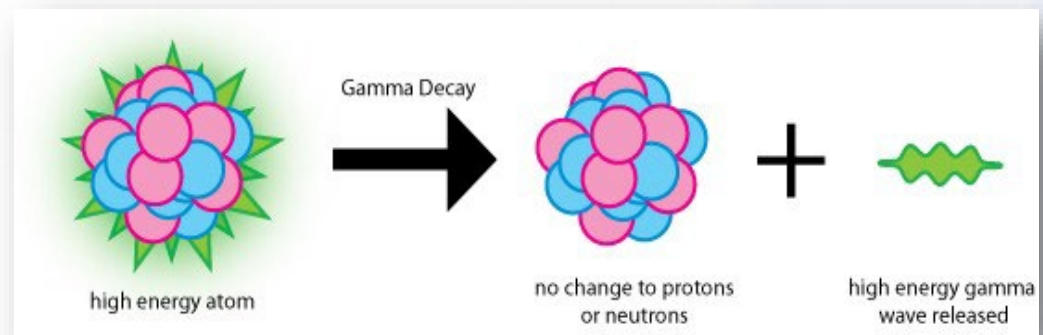
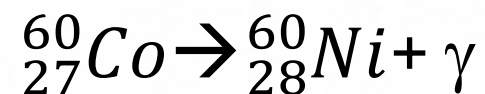
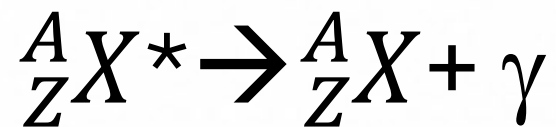
- tidak berada pada keadaan dasar (*ground state*)

Transisi isomerik

- nomor atom dan nomor massa tidak berubah
- gelombang elektromagnetik (foton)

Inti

- mengikuti peluruhan α ataupun β



Aktivitas Radiasi (1)

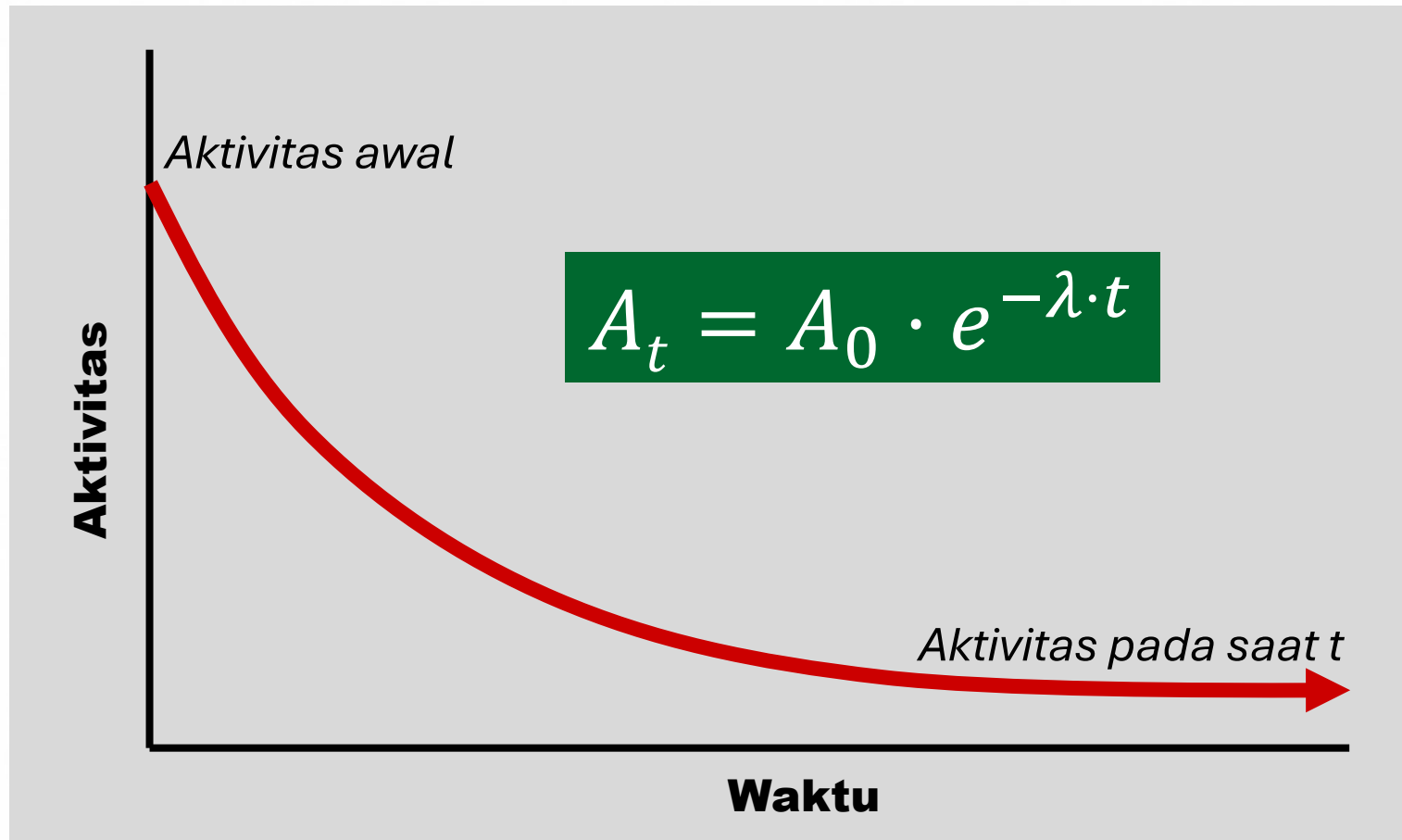
Definisi

- Jumlah peluruhan yang terjadi dalam 1 detik
- menunjukkan jumlah radionuklida yang tidak stabil berubah menjadi nuklida stabil dalam satu detik

Satuan

- Currie (Ci) → lama
- Becquerrel (Bq) → baru
- 1 Bq = 1 peluruhan per detik
- 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq

Aktivitas Radiasi (2)



A_t = Aktivitas pada saat t

A_0 = Aktivitas awal

λ = konstanta peluruhan

t = selang waktu antara saat awal sampai saat t

Waktu Paro (*Half Life*)

Disebut juga dengan **Umur Paro**

Pengertian

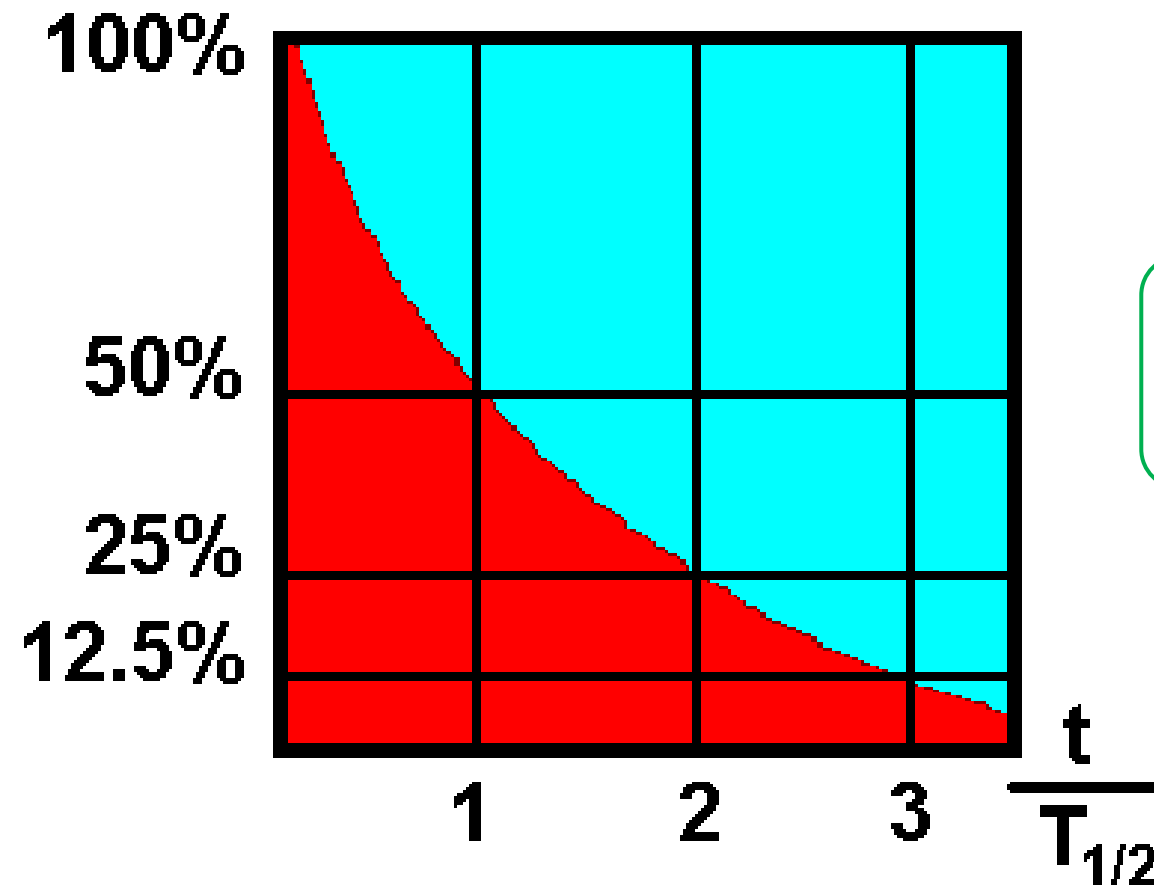
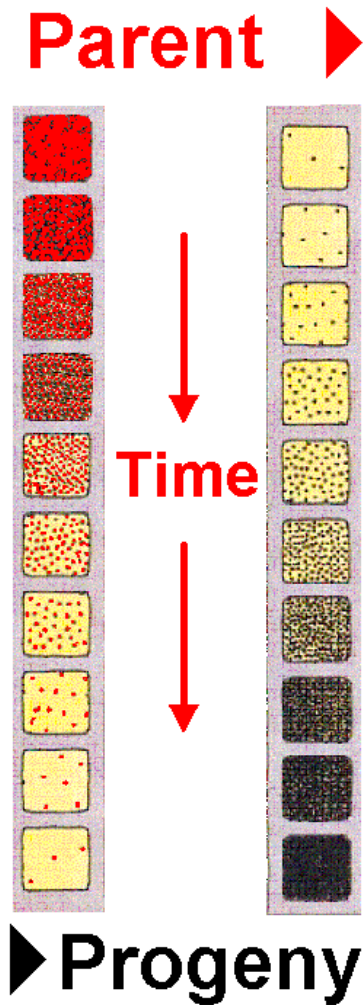
selang waktu yang dibutuhkan agar aktivitas suatu radioaktif menjadi setengahnya

Setiap radionuklida mempunyai umur paro yang unik dan tetap

Radionuklida	Waktu paro ($T_{1/2}$)
Ir-192	74,3 hari
Se-75	120 hari
Co-60	5,27 tahun
Kr-85	10,7 tahun
Cs-137	30,1 tahun
Am-241	456 tahun
Ra-226	1620 tahun

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Konsep Waktu Paro



$$\lambda_R = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

Source: EPR_FUNDAMENTALS/T-2010, IAEA, 2010.

Probabilitas Pemancaran Radiasi

No	Nama Isotop	Energi (keV)	Probabilitas (p, %)
1	Cobalt-60	1173,2	100
		1332,5	100
2	Cesium-137	662	85
3	Americium-241	59,5	36
4	Radium-226	351,9	35
		609.3	44
		1120.3	15

Panjang Gelombang dan Energi (1)

Energi dipengaruhi oleh frekuensi dan panjang gelombang

- Energi sebanding dengan frekuensi
- Energi berbanding terbalik dengan panjang gelombang

$$E = h \nu$$

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

h = konstanta Planck, $4,15 \times 10^{-15}$ eV-detik

ν = frekuensi (detik⁻¹)

λ = panjang gelombang (meter)

c = kecepatan cahaya, 3×10^8 m/detik

Energi mempengaruhi daya tembus pada material

- Energi besar, daya tembus besar

Panjang Gelombang dan Energi (2)

Satuan energi sinar-X dan sinar gamma

- ❑ eV → elektron volt
- ❑ KeV → kilo elektron volt = seribu eV
- ❑ MeV → Mega elektron volt = satu juta eV

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

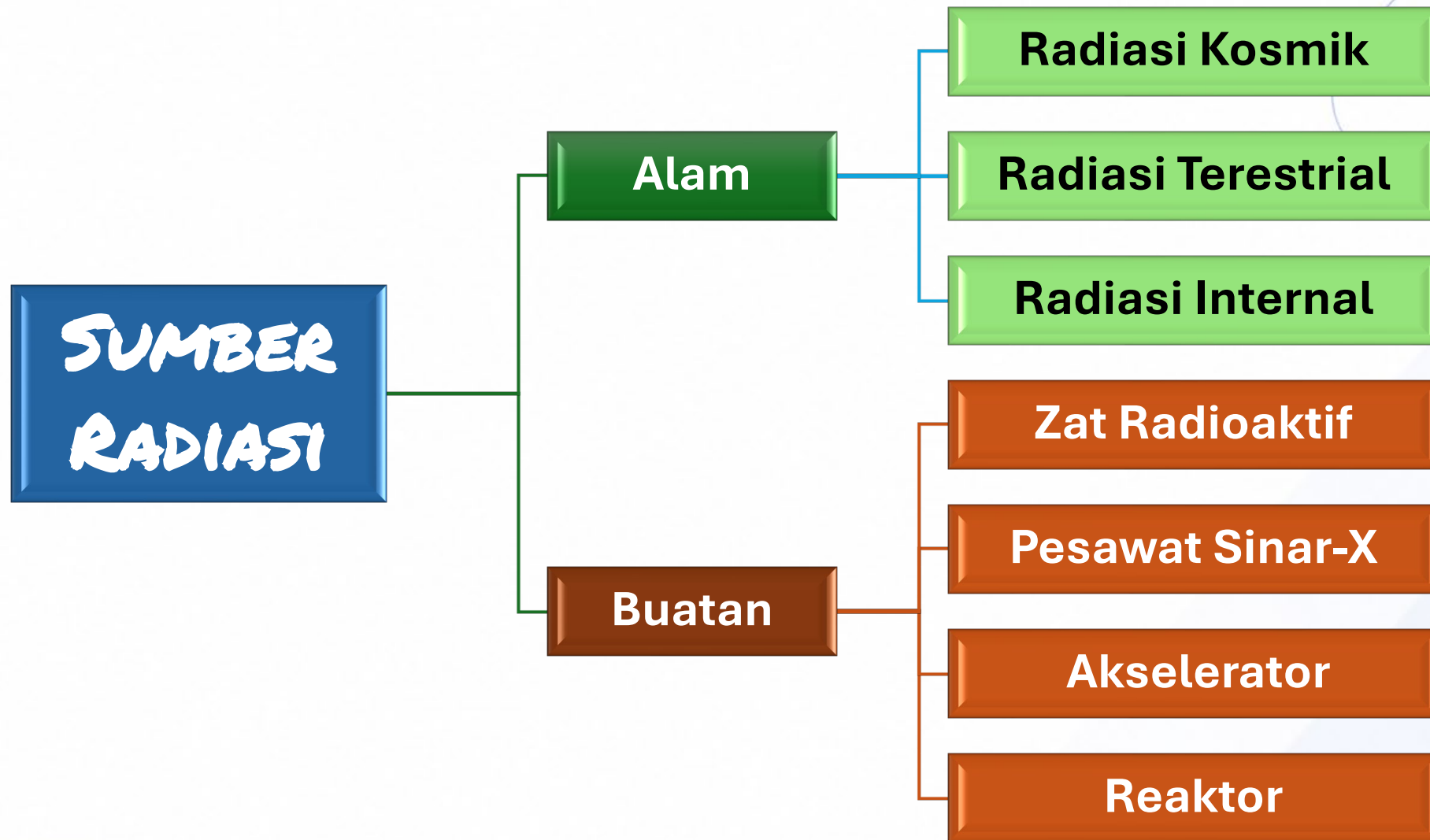
Pengertian 1 eV

Jumlah energi yang sama dengan energi kinetik elektron saat elektron tersebut melewati beda potensial 1 Volt

Contoh, 1 elektron melewati beda potensial 100 KV pada tabung sinar X, energi elektron tsb. Adalah 100 KeV

SUMBER RADIASI

Sumber Radiasi (1)



Sumber Radiasi (2)

Sumber Radiasi Alam

1. Sumber Radiasi Kosmik

- partikel dan sinar yang berenergi tinggi (10^{17} eV)
- menghasilkan radionuklida cosmogenic (C-14, Be-7, Na-22 dan H-3)
- bergantung kepada ketinggian, radiasi semakin besar apabila posisinya semakin tinggi
- dipengaruhi oleh medan magnet bumi. Karena medan magnet bumi di daerah kutub lebih kuat, maka radiasi yang diterima di kutub lebih kecil daripada di daerah katulistiwa

Sumber Radiasi ⁽³⁾

Sumber Radiasi Alam

2. Sumber Radiasi Terrestrial

- secara natural dipancarkan oleh radionuklida di dalam kerak bumi,
- disebut primordial dengan waktu paro berorde milyar (10^9) tahun.
- ada sejak terbentuknya bumi
- Radiasi terrestrial terbesar berasal dari Radon (Rn-222) dan Thoron (Rn-220)
- bergantung kepada konsentrasi sumber radiasi di dalam kerak bumi

Sumber Radiasi (4)

Sumber Radiasi Alam

3. Sumber Radiasi Internal (di dalam tubuh)

- berada di dalam tubuh manusia sejak dilahirkan
- atau masuk ke dalam tubuh manusia melalui makanan, minuman, pernafasan, atau luka
- terutama diterima dari radionuklida C-14, H-3, K-40, radon.
- sumber lain seperti Pb-210 dan Po-210 banyak berasal dari ikan dan kerang-kerangan
- Buah-buahan biasanya mengandung unsur K-40

Sumber Radiasi (5)

Sumber Radiasi Buatan

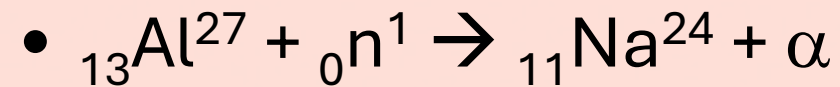
Zat Radioaktif

- Pembuatan
 - reaksi inti antara nuklida yang tidak radioaktif dengan neutron (reaksi fisi di dalam reaktor atom),
 - aktivasi neutron,
 - penembakan nuklida yang tidak radioaktif dengan partikel atau ion cepat
- bisa memancarkan jenis radiasi alpha, beta, gamma dan neutron.

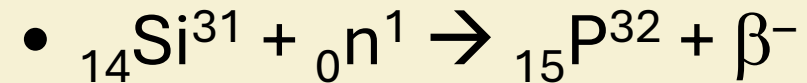
Sumber Radiasi (6)

Sumber Radiasi Buatan

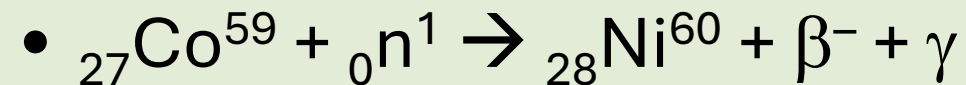
Pemancar Alpha



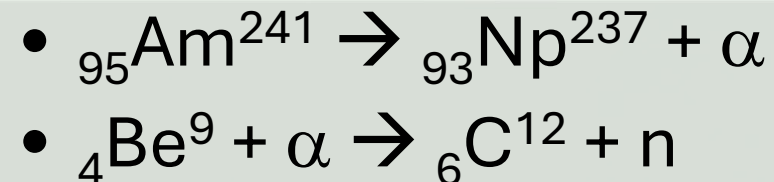
Pemancar Beta



Pemancar Gamma



Pemancar Neutron



Sumber Radiasi (7)

Sumber Radiasi Buatan

Pembangkit Radiasi Pengion

- alat yang digunakan untuk mempercepat partikel bermuatan (ion).
- untuk memproduksi zat radioaktif dengan proton berenergi tinggi, sinar-X berenergi tinggi dengan elektron yang dipercepat,
- Contoh :
 - akselerator linier (LINAC = linear accelerator)
 - cyclotron

Sumber Radiasi (8)

Sumber Radiasi Buatan



linear accelerator
(linac)



cyclotron

Cyclotron terbesar di dunia (CERN di Swiss)
Panjang 26 km

Sumber Radiasi (9)

Sumber Radiasi Buatan

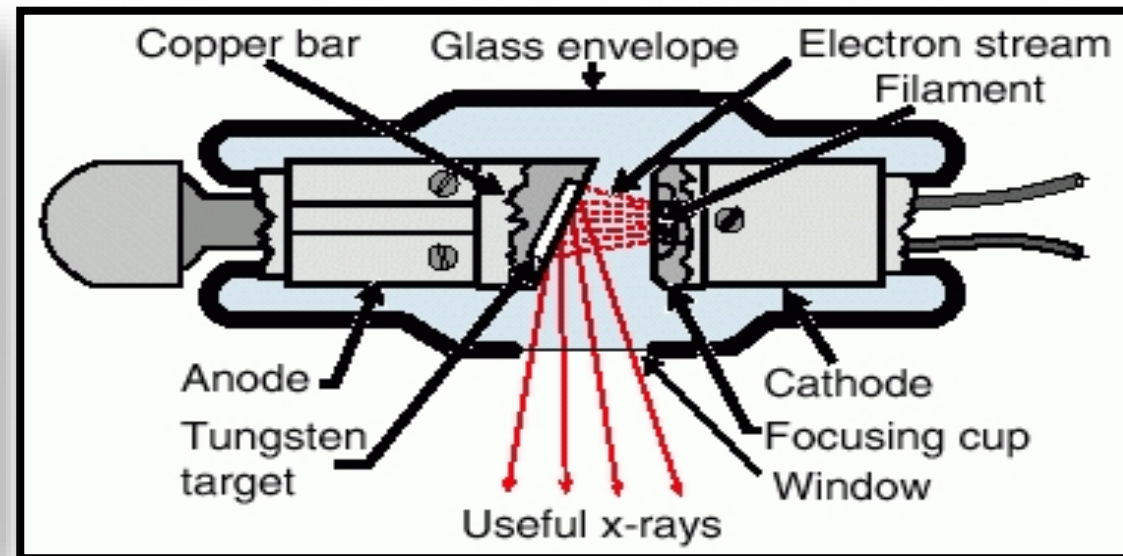
Pembangkit Sinar-X



Sumber Radiasi (10)

Sumber Radiasi Buatan

Pembangkit Sinar-X



Tabung sinar-X

Sumber Radiasi (11)

Sumber Radiasi Buatan

Jenis Sinar-X

sinar-X karakteristik

memiliki spektrum energi diskrit (tidak kontinu)

khas sesuai material targetnya

akan hilang dari spektrum sinar-X setelah melalui filter

bremsstrahlung

spektrum energi kontinu (dari yang terendah sampai maksimum)

Sumber Radiasi (11)

Sumber Radiasi Buatan

Reaktor Nuklir



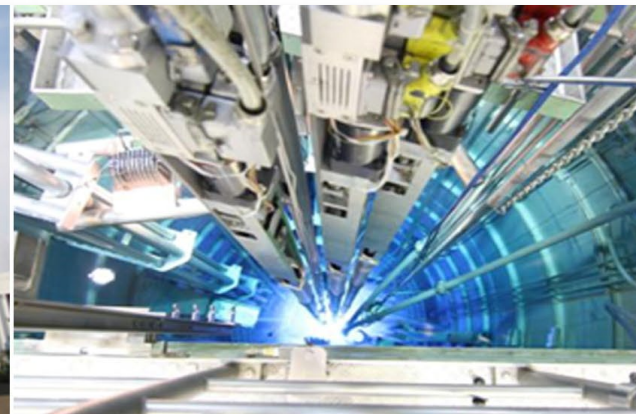
Reaktor Triga 2000

- Lokasi : Bandung
- Dioperasikan pertama tahun 1964 dengan daya 250 kW, sekarang daya nominal 2 MW
- Fungsi: penelitian dan produksi isotop



Reaktor Kartini

- Lokasi : Yogyakarta
- Dioperasikan pertama tahun 1979
- Daya nominal 100 kW
- Fungsi: penelitian dan pelatihan operator reaktor



RSG G.A Siwabessy

- Lokasi : Serpong, Tangerang Selatan
- Dioperasikan pertama tahun 1987
- Daya nominal 30 MW
- Fungsi: penelitian, produksi isotop dan pengujian material



INTERAKSI RADIASI DENGAN MATERI

Interaksi Radiasi dengan Materi

Interaksi α

ionisasi

eksitasi

Reaksi inti

Interaksi β

ionisasi

eksitasi

Bremstrahlung

Interaksi γ dan sinar-X

efek
fotolistrik

efek
Compton

produksi
pasangan

Interaksi neutron

proses
tumbukan
elastik

tak elastik

reaksi inti
(penangkapan
neutron)

Interaksi Partikel Alpha ⁽¹⁾

Ionisasi

- **terlepasnya elektron dari orbitnya yang menjadi elektron bebas dan dihasilkan atom bermuatan positif**

Eksitasi

- **berpindahnya elektron ke kulit yang lebih luar karena adanya energi eksternal**

Reaksi inti

- **Interaksi antara radiasi α dengan inti menghasilkan inti atom baru**

Interaksi Partikel Alpha (2)

Ionisasi

Pengertian

Terlepasnya elektron dari orbitnya sehingga menjadi ion

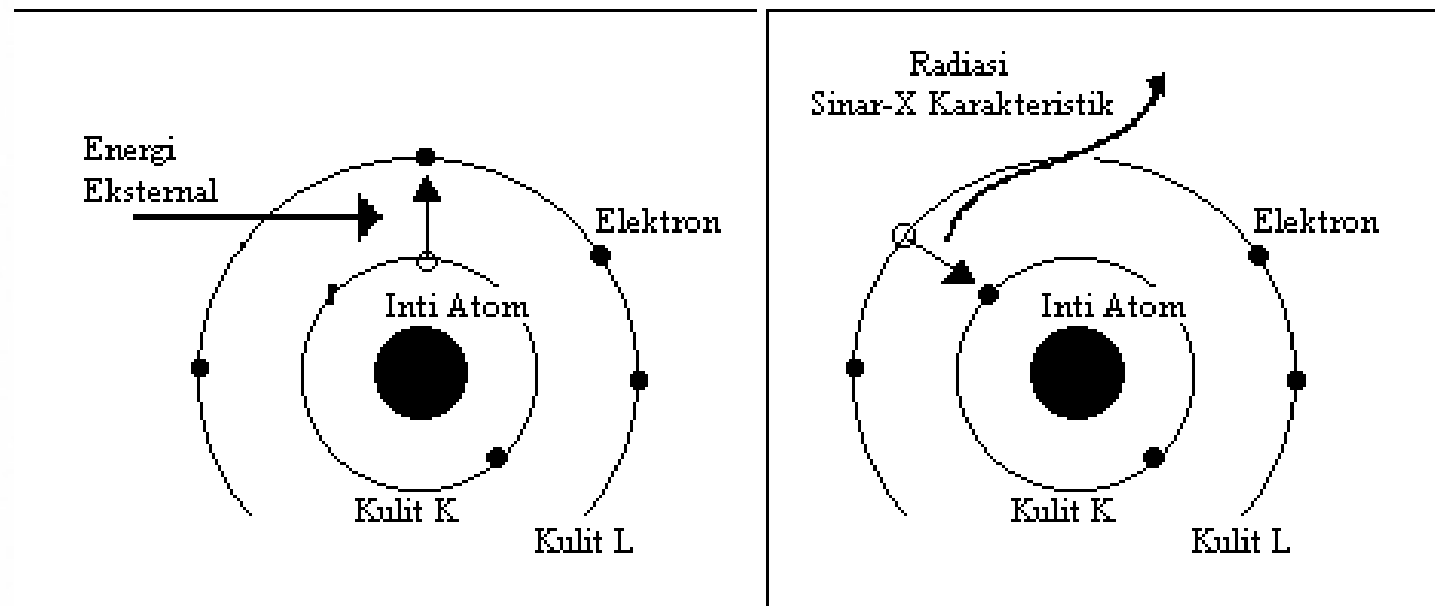
Menjadi atom yang tidak netral

Terjadi bila energi yang datang lebih besar dari energi ikat elektron

Interaksi Partikel Alpha (3)

Eksitasi

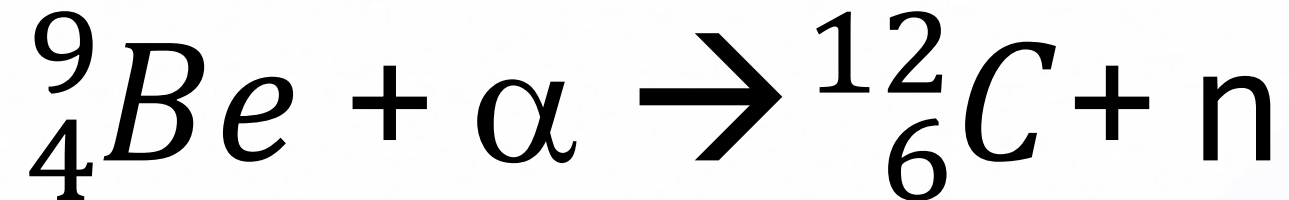
- mirip dengan proses ionisasi, tetapi elektron tidak sampai lepas dari atomnya hanya berpindah ke lintasan yang lebih luar.



Interaksi Partikel Alpha ⁽⁴⁾

Reaksi Inti

Terjadi jika radiasi alpha mampu menembus atom hingga berdekatan dengan inti atom bahan



Interaksi Partikel Beta ⁽¹⁾

Ionisasi

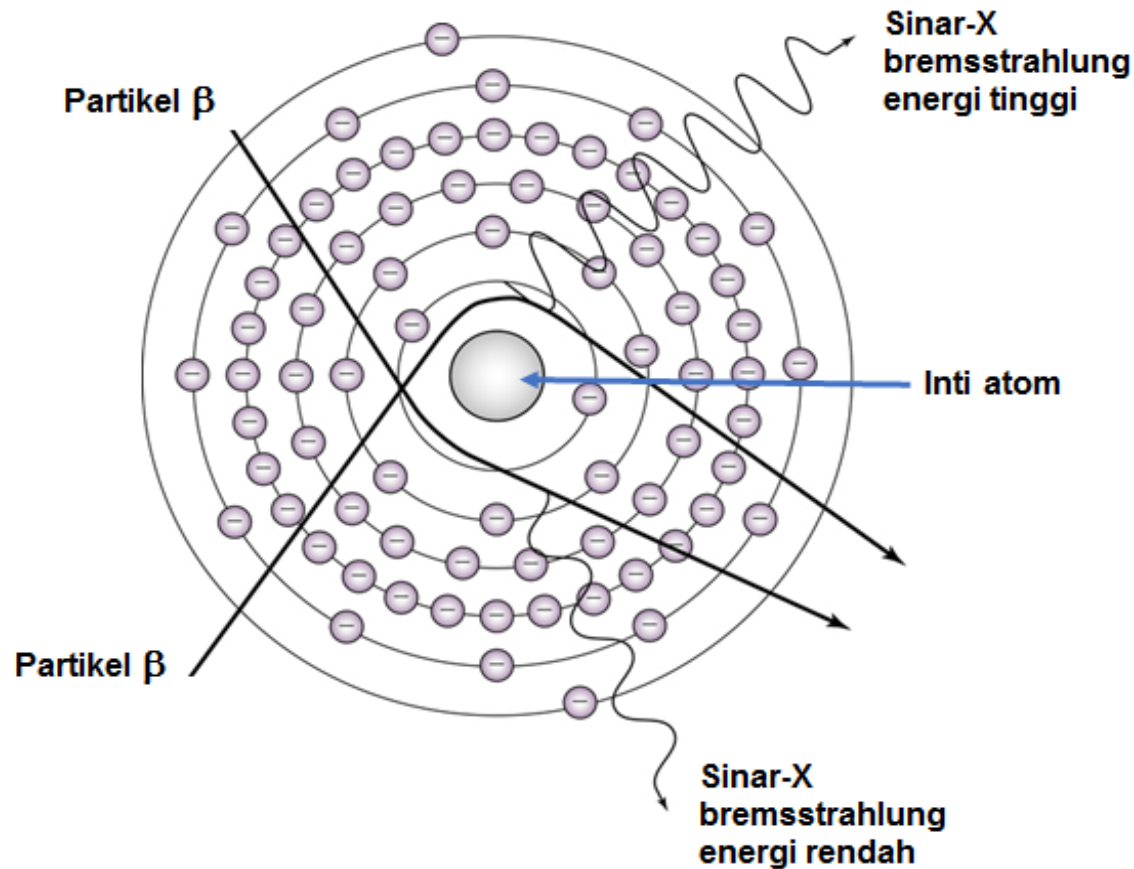
Eksitasi

Proses Bremstrahlung

- **pemancaran radiasi gelombang elektromagnetik (sinar-X kontinu) ketika radiasi β , dibelokkan atau diperlambat oleh inti atom yang bermuatan positif**

Interaksi Partikel Beta (2)

Proses Bremsstrahlung



Interaksi Partikel Beta ⁽³⁾

Proses Bremsstrahlung

- **Fraksi energi (f) dari sinar-X bremsstrahlung yang dihasilkan:**

$$f = 3,5 \times 10^{-4} \cdot Z \cdot E_{maks}$$

- **Energi partikel β yang lebih besar akan menghasilkan radiasi bremsstrahlung yang lebih besar.**
- **Semakin besar nomor atom bahan penyerap (semakin berat) akan menghasilkan radiasi sinar-X yang lebih besar**

Interaksi Radiasi Gamma / Sinar-X ⁽¹⁾

Transmisi

Foton tidak berinteraksi dengan materi

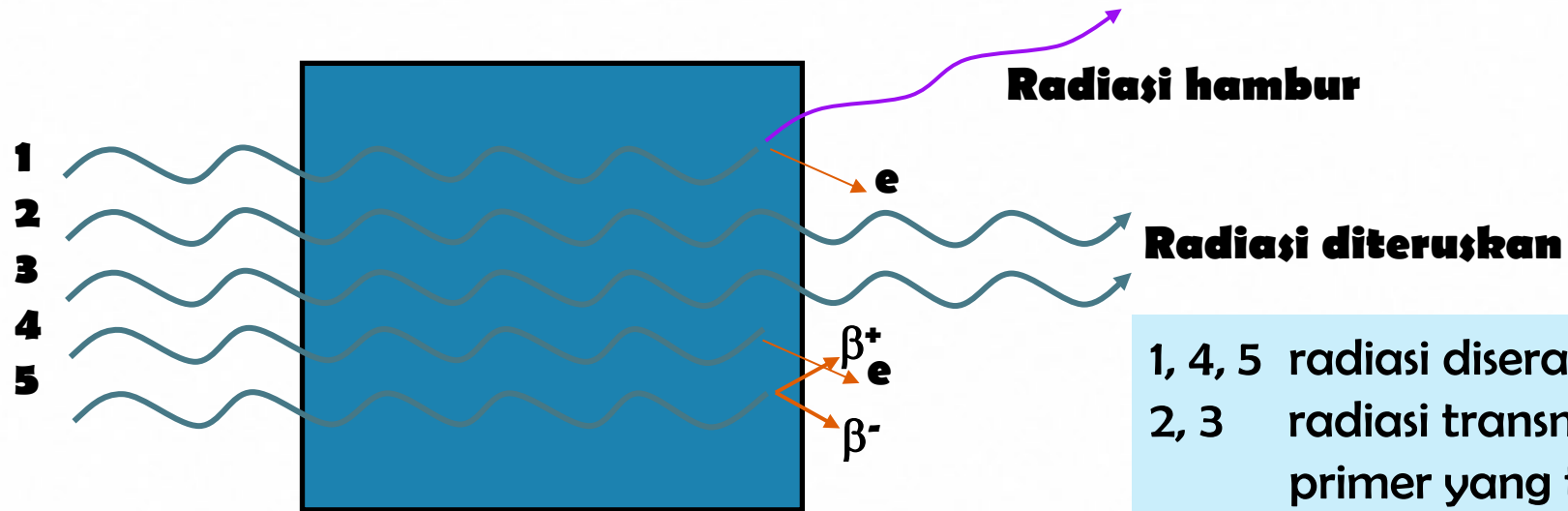
Penyerapan

Foton diserap semuanya

Hamburan

Foton dihamburkan ke arah yang berbeda dengan arah berkas semula

Interaksi Radiasi Gamma / Sinar-X (2)



1, 4, 5 radiasi diserap
2, 3 radiasi transmisi, radiasi primer yang tidak mengalami perubahan energi

Interaksi yang terjadi

- Efek fotolistrik**
- Hamburan Compton**
- Efek produksi pasangan**

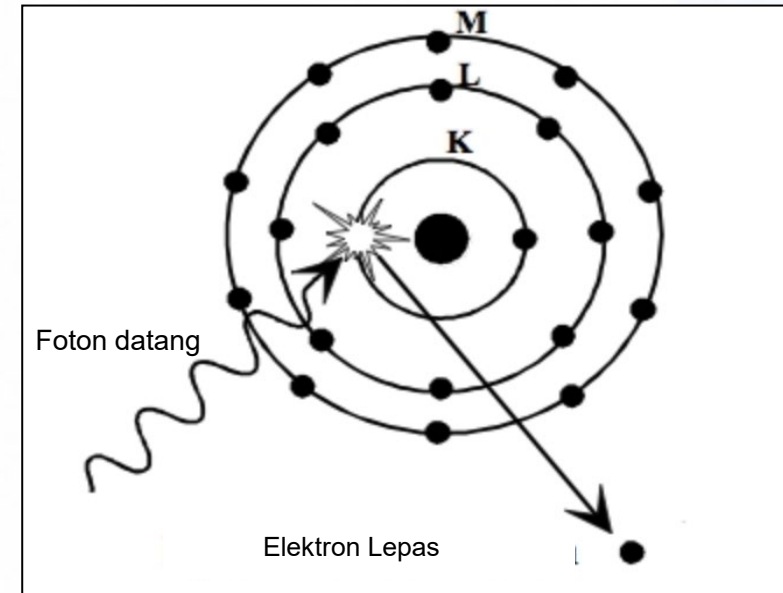
Interaksi Radiasi Gamma / Sinar-X ⁽³⁾

Efek Fotolistrik

terjadi energi foton rendah ($< 100 \text{ keV}$)

energi foton diserap seluruhnya oleh elektron orbit

elektron orbit terlepas dari atom \rightarrow fotoelektron



Interaksi Radiasi Gamma / Sinar-X (4)

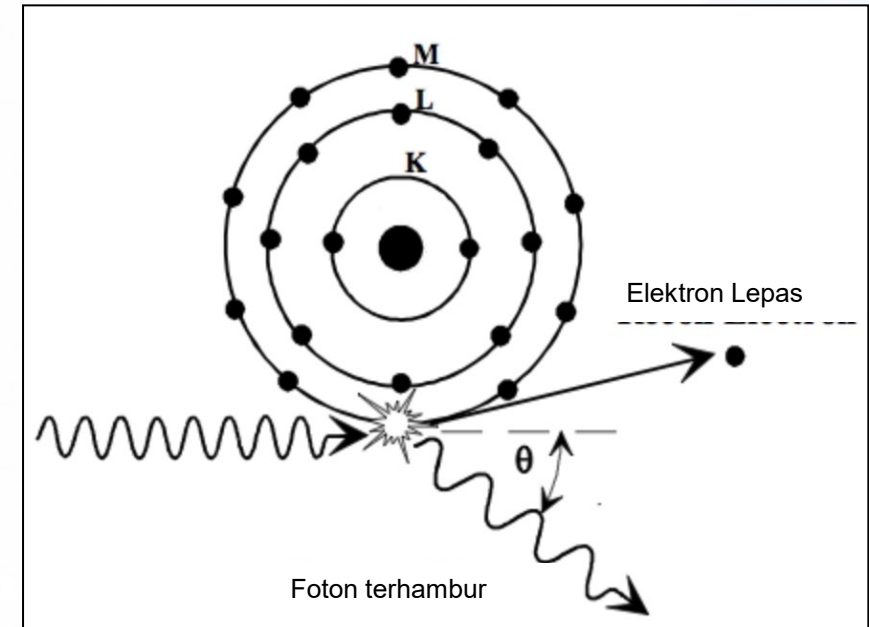
Hamburan Compton

Terjadi pada energi foton sedang
($100 \text{ keV} < E < 1 \text{ MeV}$)

Energi foton mampu melepaskan
elektron di kulit lebih luar

Sebagian energinya diberikan ke elektron

Elektron terlepas dari orbit, foton
gamma dengan energi sisanya terhambur



Interaksi Radiasi Gamma / Sinar-X (5)

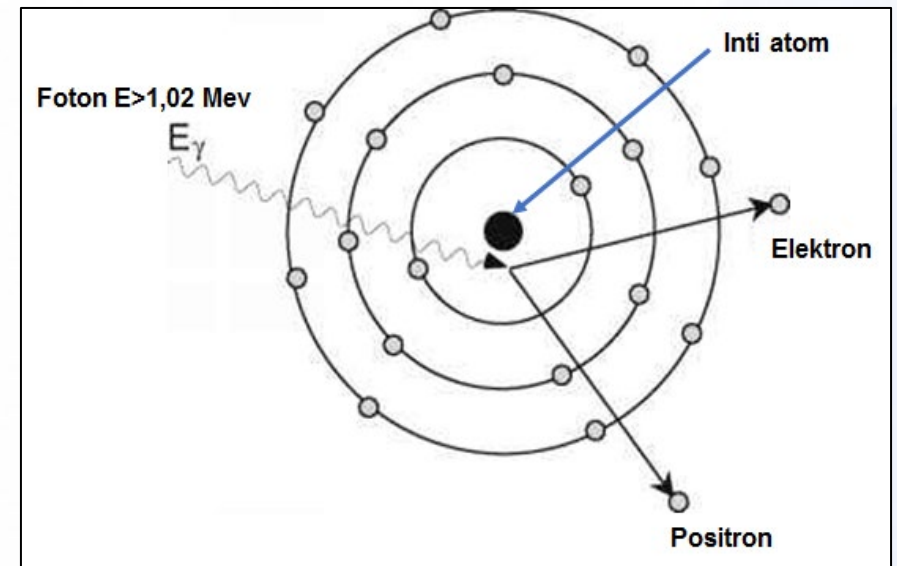
Produksi Pasangan

hanya terjadi bila energi foton lebih besar dari 1,02 MeV.

Ketika foton “sampai” ke dekat inti atom maka foton tersebut akan lenyap dan berubah menjadi sepasang elektron-positron.

$$E_{e^+} + E_{e^-} = h\nu_i - 1.02 \text{ MeV}$$

- E_{e^+} = energi kinetik positron
- E_{e^-} = energi kinetik elektron



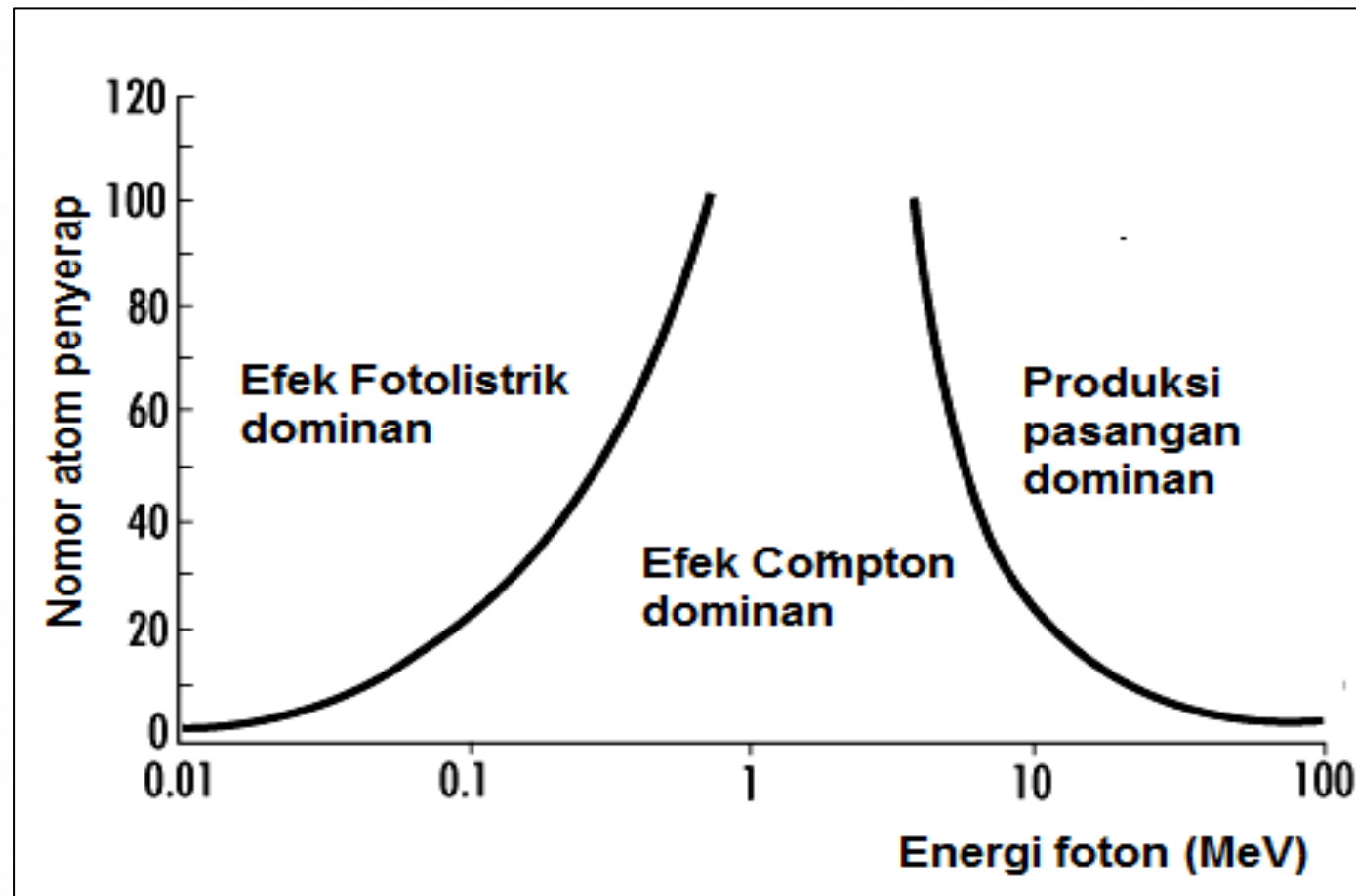
Interaksi Radiasi Gamma / Sinar-X ⁽⁶⁾

Ionisasi Tidak Langsung

Dari EF, EC, PP dihasilkan partikel bermuatan (elektron atau positron) yang berenergi.

Elektron atau positron yang berenergi tersebut dalam pergerakannya akan mengionisasi atom-atom bahan yang dilaluinya

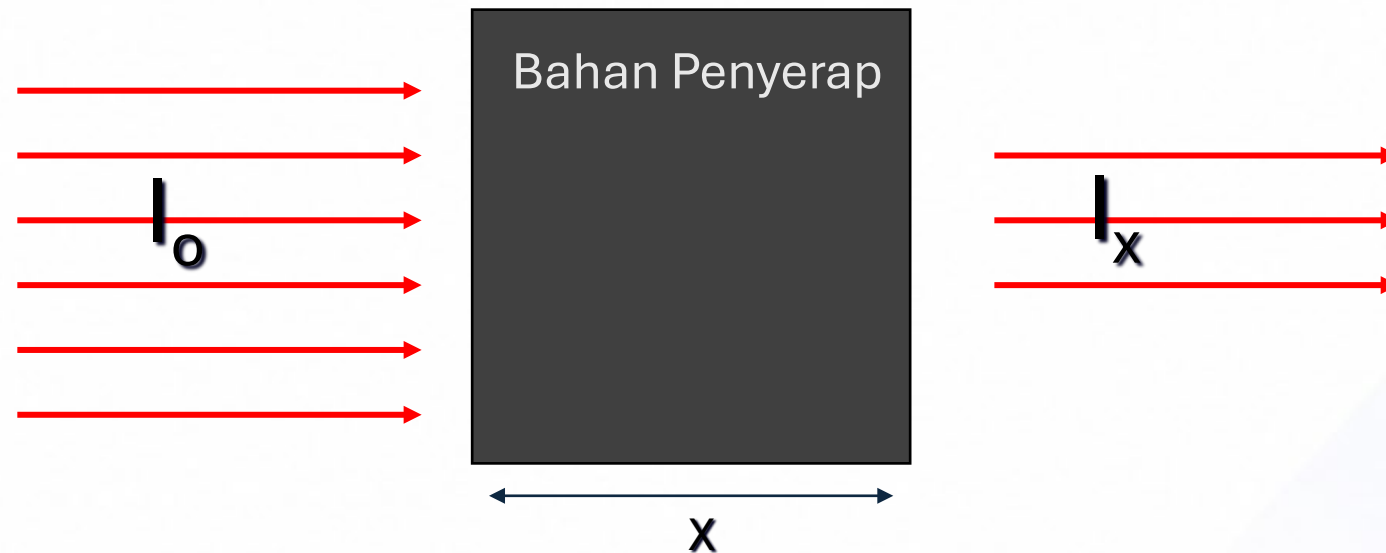
Interaksi Radiasi Gamma / Sinar-X (7)



Pengaruh Nomor atom material dan Energi Radiasi pada interaksi Radiasi Gamma/ Sinar-x Dengan Materi

Interaksi Radiasi Gamma / Sinar-X ⁽⁸⁾

Penyerapan Radiasi oleh Materi



$$I_x = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

μ = koefisien serap linier bahan

Interaksi Radiasi Neutron ⁽¹⁾

Interaksi Radiasi Neutron

Tumbukan Elastik

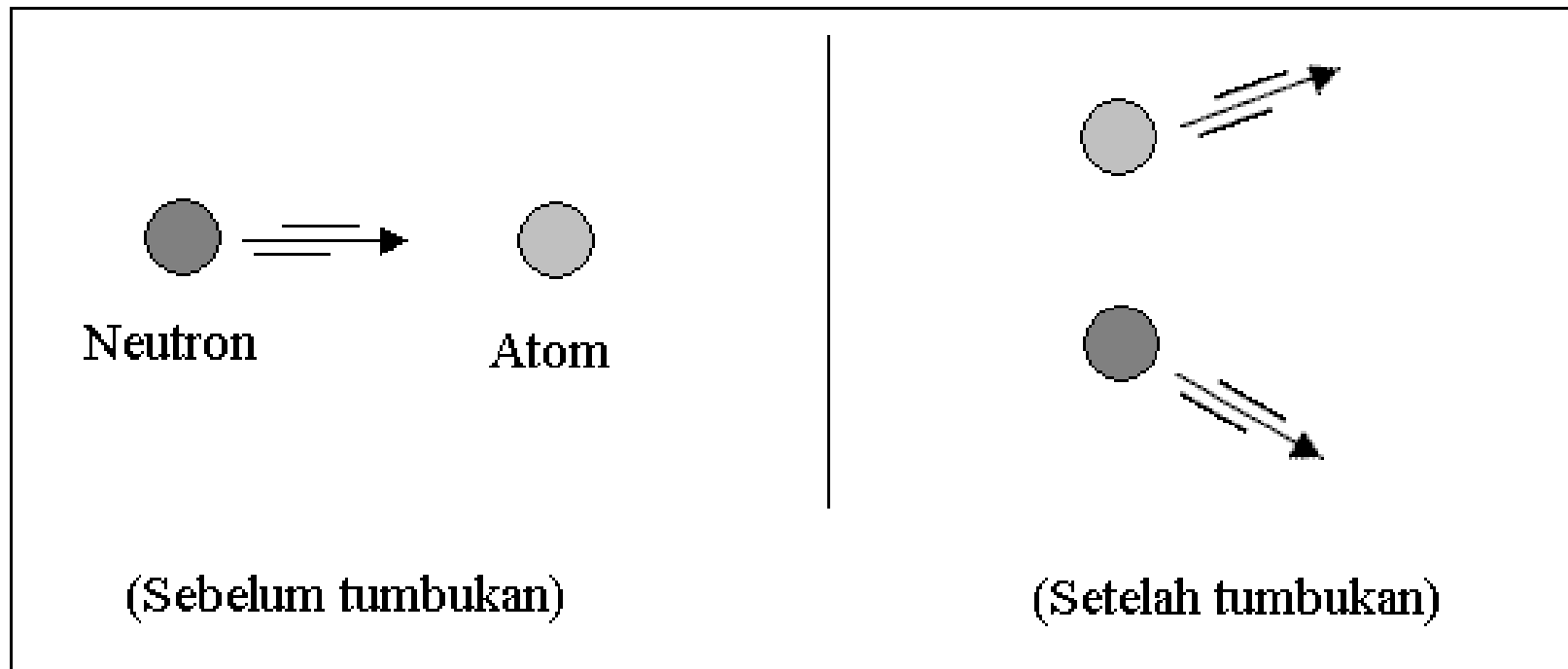
Tumbukan tidak Elastik

Reaksi Inti

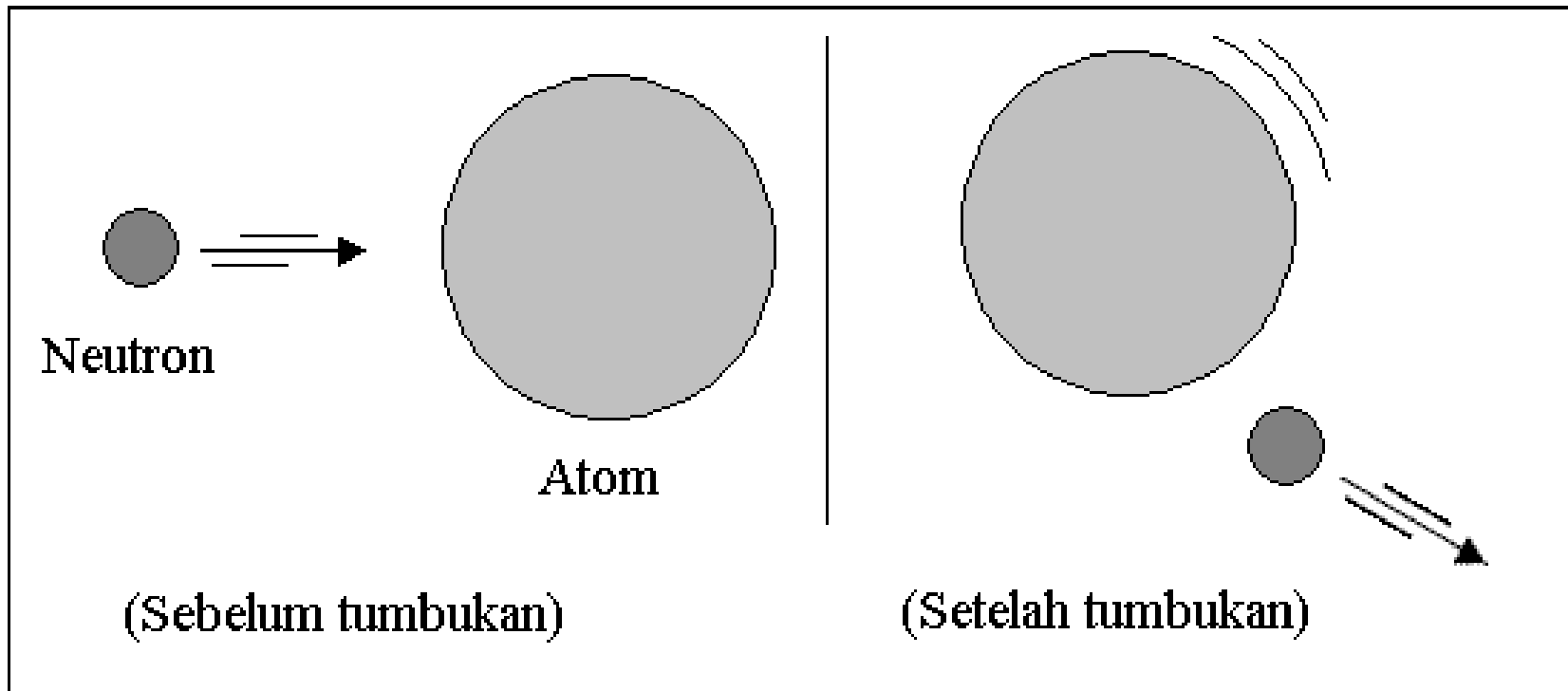
Reaksi Fisi

Interaksi Radiasi Neutron (2)

Tumbukan Elastis

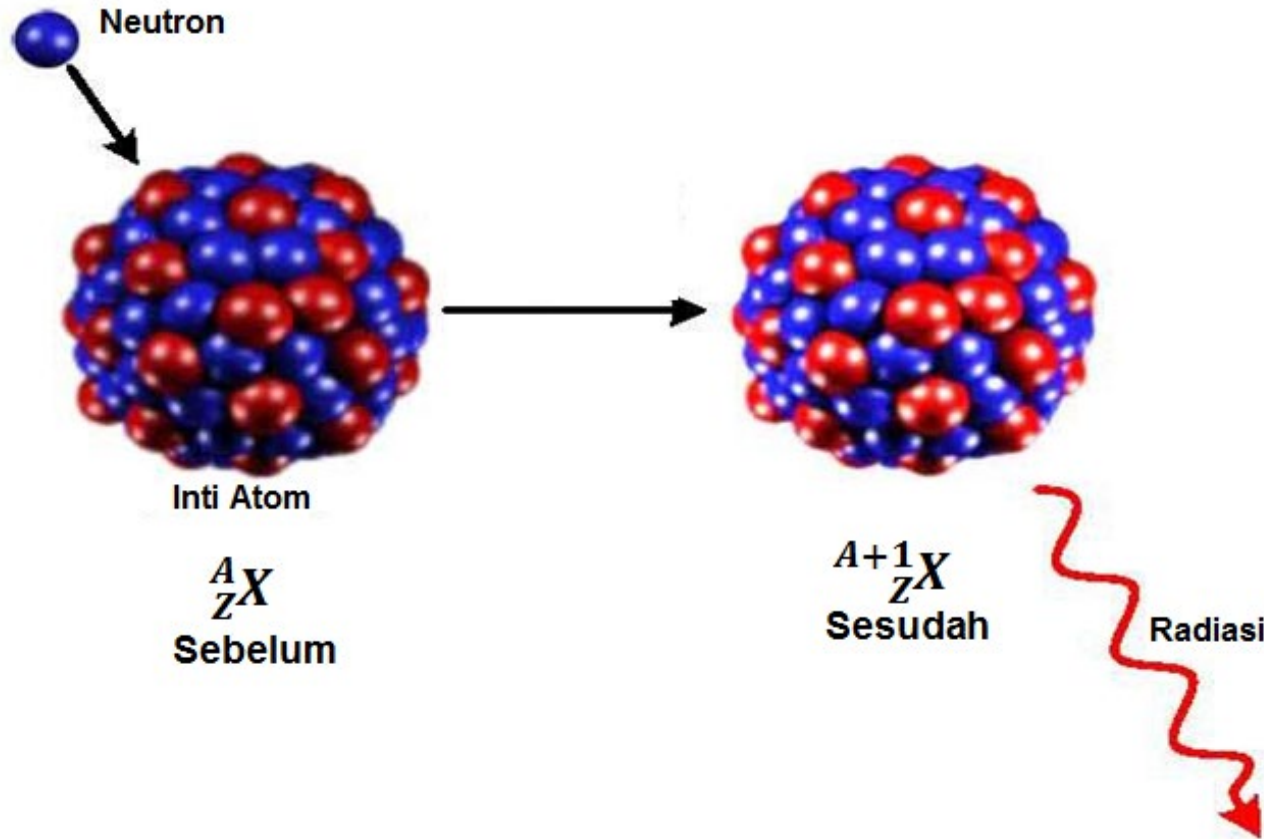


Tumbukan Tak Elastis



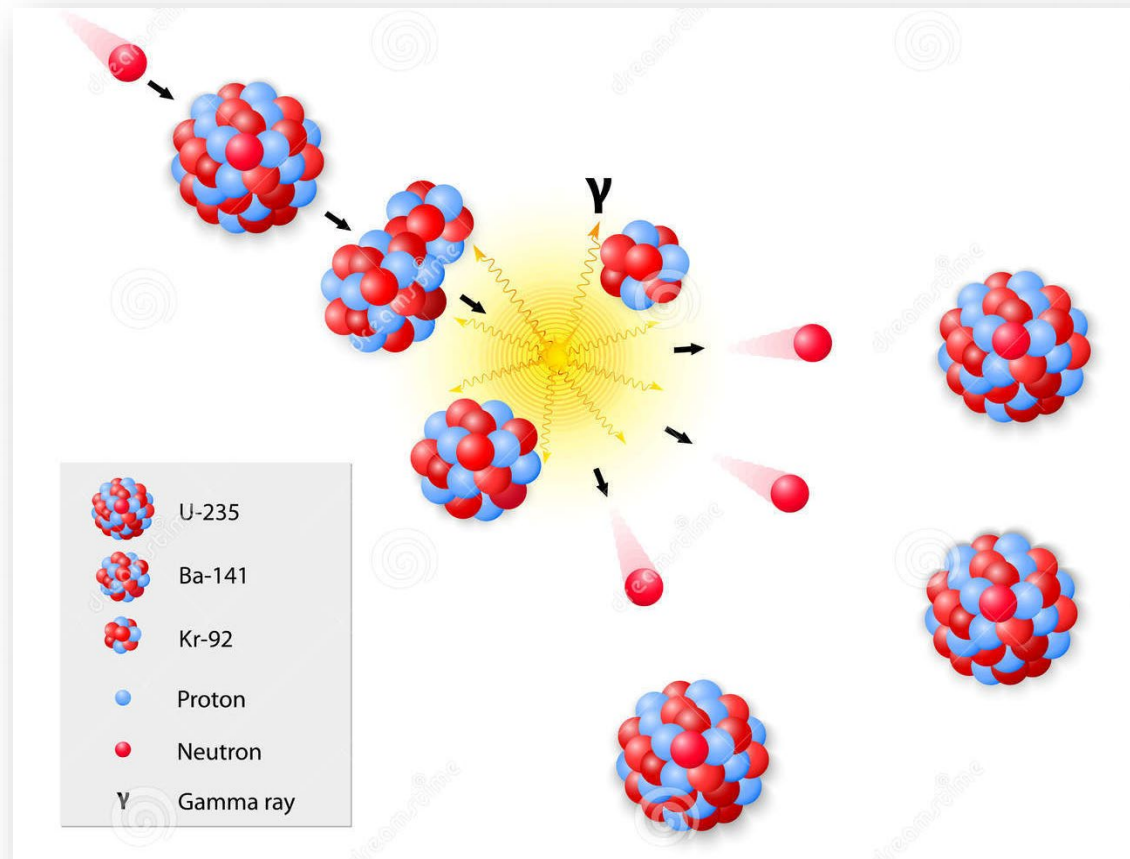
Interaksi Radiasi Neutron (4)

Reaksi Inti



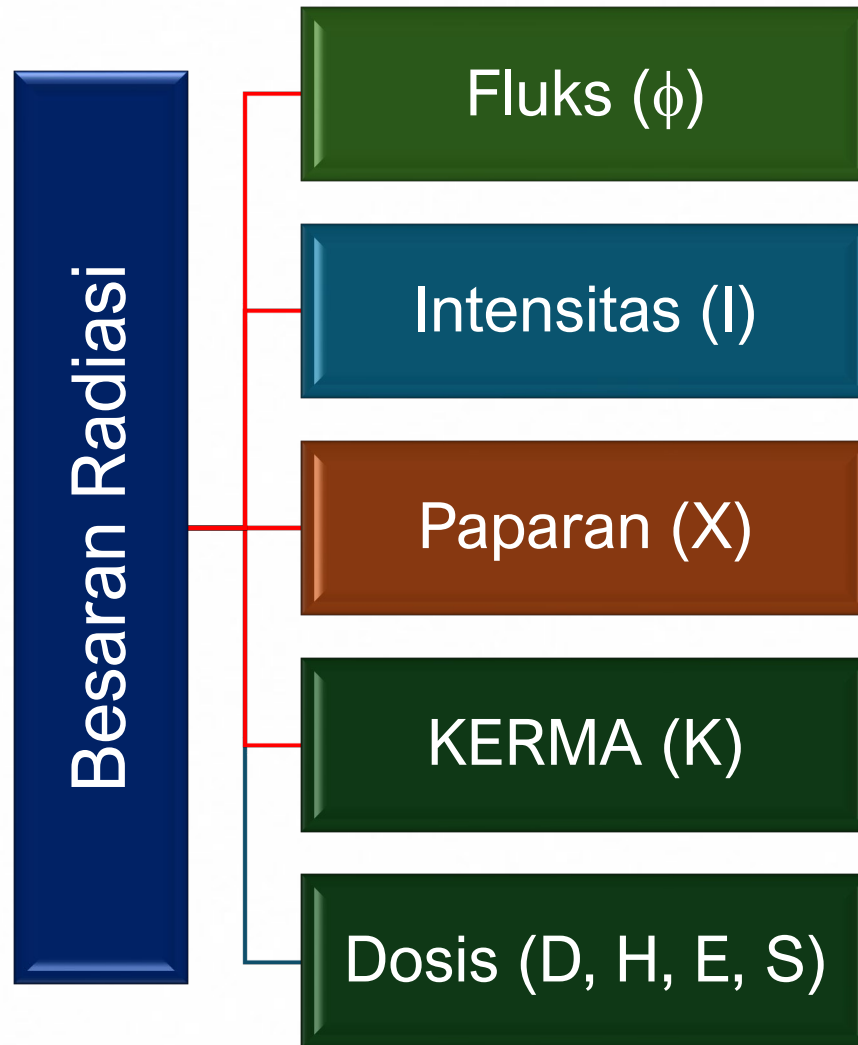
Interaksi Radiasi Neutron (5)

Reaksi Fisi

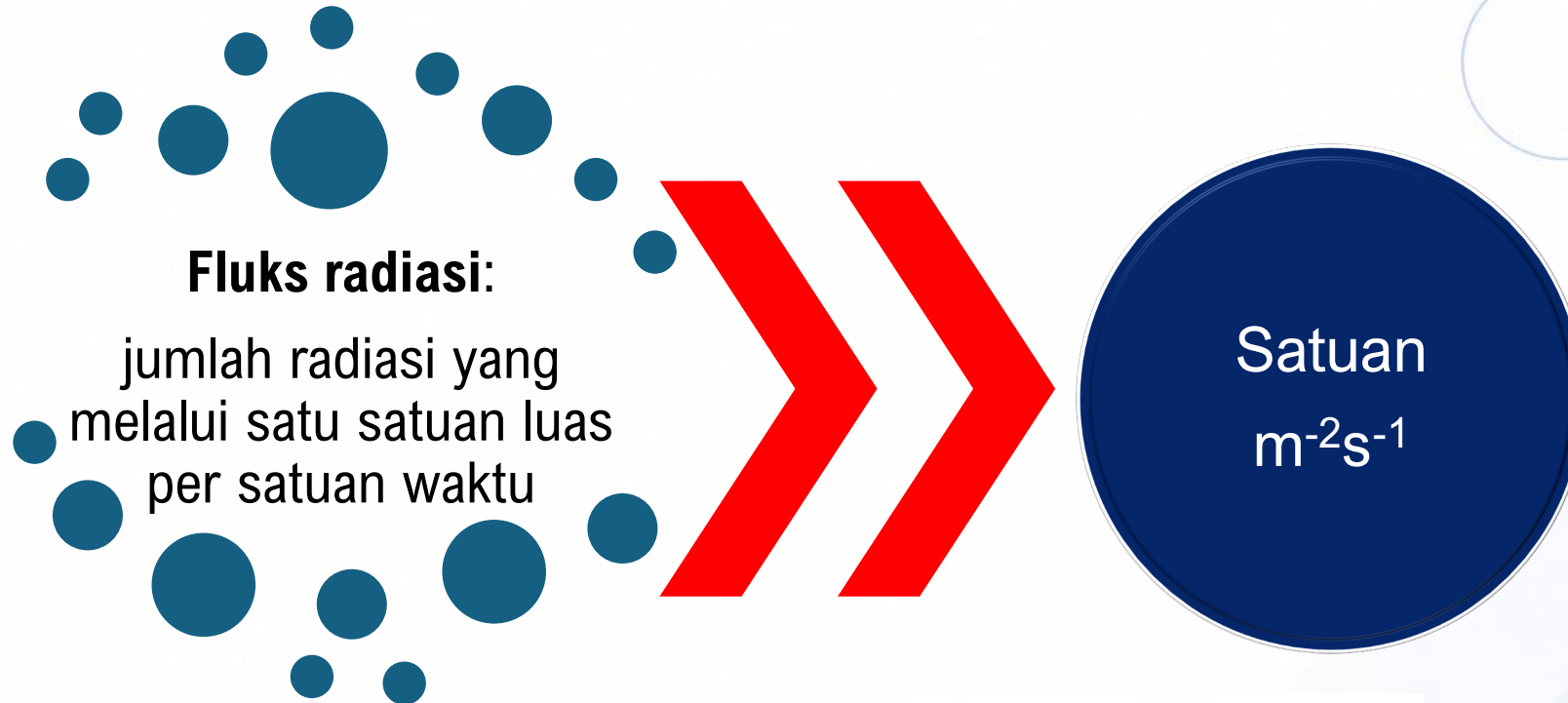


DOSIMETRI

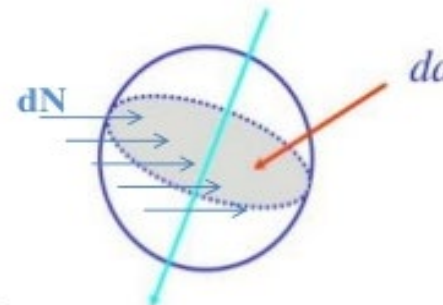
Besaran dan Satuan Radiasi



Fluks (ϕ)



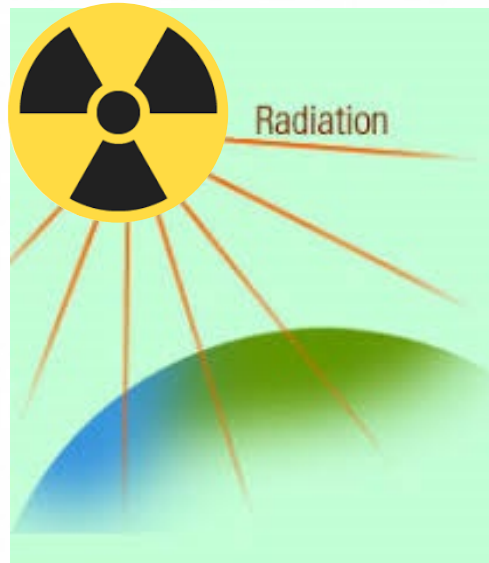
$$\phi = \frac{d\Phi}{dt}$$



Intensitas (I)

- Intensitas radiasi (I) merupakan perkalian antara kuantitas (fluks) dan energi

Satuan $\text{joule.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$



$$I = \phi \times E$$

Paparan Radiasi (1)

- Dalam proteksi radiasi, "**paparan**" berarti tindakan atau kondisi yang menjadi subjek iradiasi oleh radiasi pengion
- Dalam dosimetri, "**paparan**" adalah ukuran radiasi elektromagnetik dan berhubungan dengan jumlah muatan listrik yang dihasilkan oleh sinar-X atau sinar gamma di udara dalam kondisi standar

Paparan Radiasi (2)

Paparan terhadap manusia:

- Dari radiasi alam (kadang disebut “radiasi latar”)
- Dari prosedur medis (diagnosis dan terapi)
- Dari sumber radiasi dan perangkat radiasi
- Dari paparan yang tidak direncanakan (pekerja radiasi dan masyarakat)
- Dari peristiwa jahat yang disengaja
- Dari pekerjaan, yaitu sebagai pekerja radiasi dan perespon atas kedaruratan radiasi

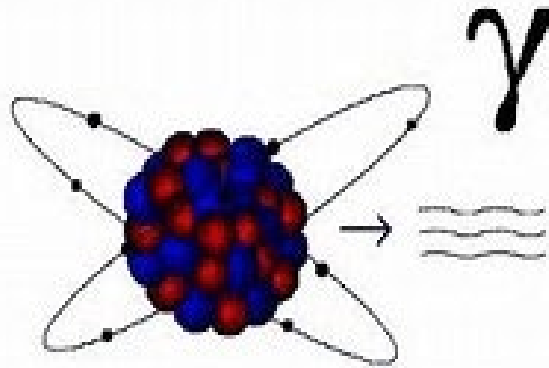
Paparan Radiasi (3)

Pengertian:

- Pasangan ion yang terbentuk per massa udara
- Kondisi STP

Jenis Radiasi

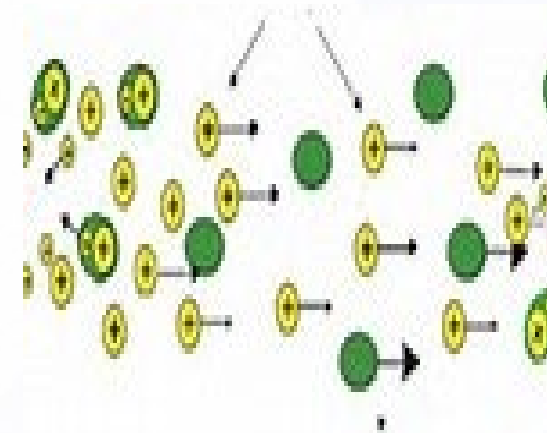
- Gamma (γ) dan Sinar-X



Medium

- Udara

Ionized air particles



Paparan Radiasi (4)

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Satuan Paparan (X)

**Satuan
International
(SI)**

Satuan Lama

Konversi

**Coulomb/kg
(C/Kg)**

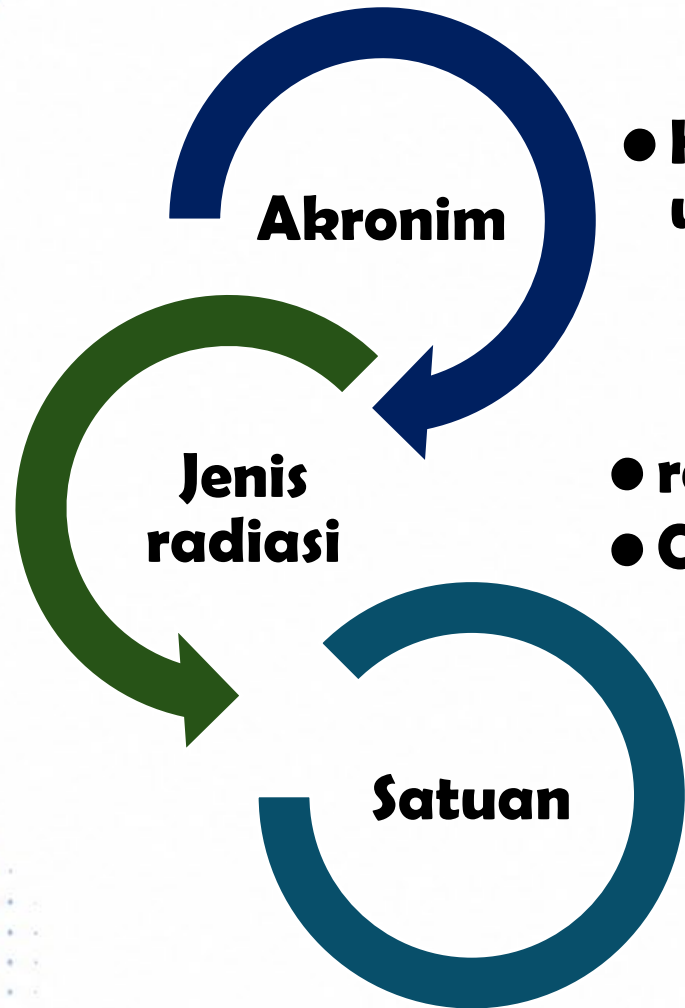
Roentgen (R)

**1 R = $2,58 \times 10^{-4}$
C/kg**

**Laju paparan (\dot{X})
Satuan**

**: paparan per waktu
: C/(kg.jam) atau R/jam**

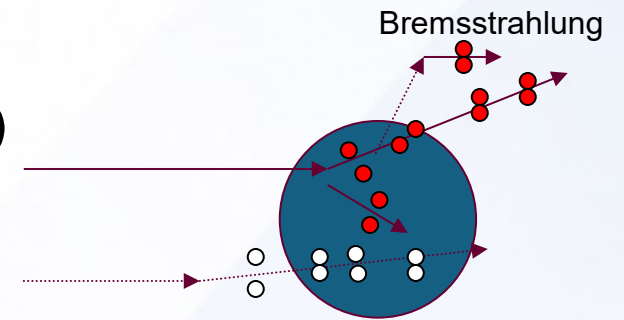
KERMA



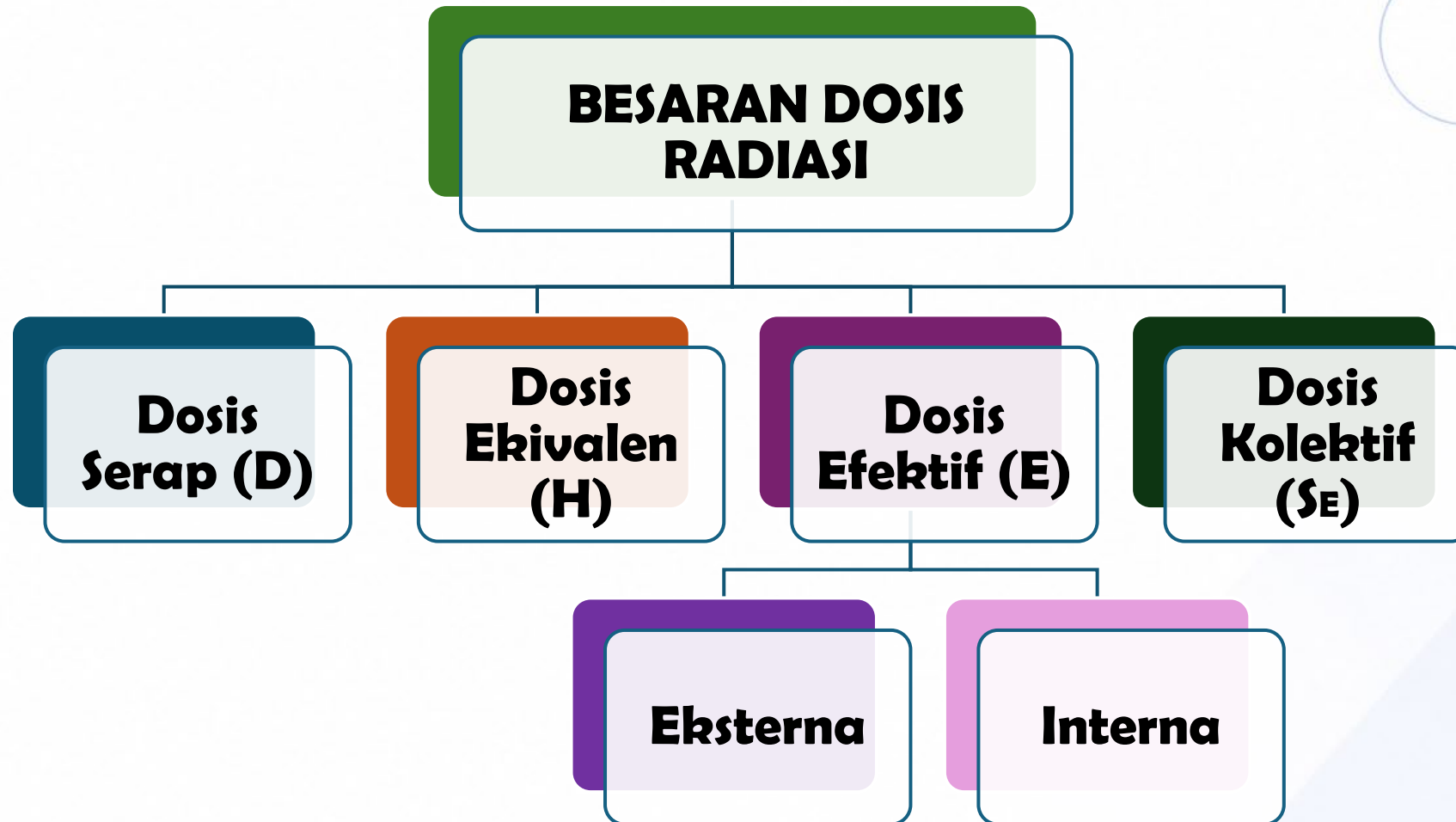
- **Kinetic Energy Released per unit Mass Absorber**

- **radiasi pengion tidak langsung**
- **Contoh: gamma, sinar-X, neutron cepat**

- **Joule/kg atau Gray (Gy)**



Besaran dan Satuan Dosis



Besaran Dosis Serap (D)

Pengertian

Energi rata-rata yang diserap (dE) persatuan massa bahan (dm)



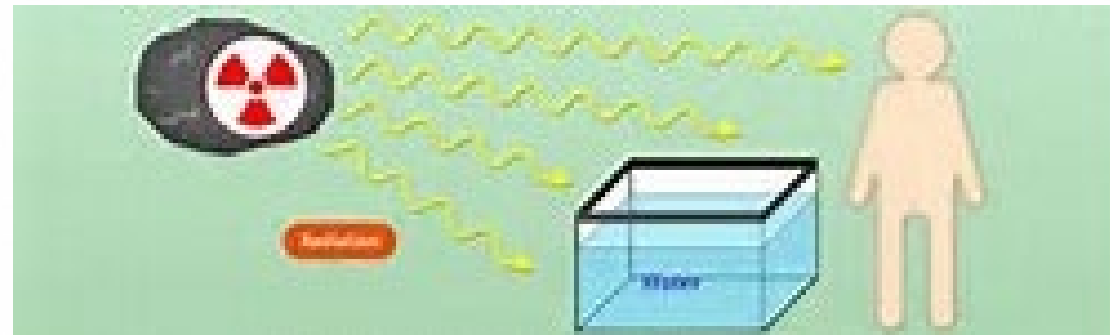
Jenis Radiasi

Semua jenis radiasi



Medium

Semua jenis medium



Dosis Serap ⁽¹⁾

- Jumlah energi yang diberikan ke dalam satuan massa organ atau jaringan disebut dosis yang serap dan dinyatakan dalam satuan gray (Gy)
 - Satu gray sama dengan satu joule energi radiasi yang diberikan kepada satu kilogram massa organ atau jaringan
 - $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 6.24 \times 10^{12} \text{ MeV/kg}$
 - $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
- rad → satuan dosis serap yang juga sering digunakan dulu

Dosis Serap ⁽²⁾

$$D = \frac{dE}{dm}$$

Satuan Dosis Serap (D)

**Satuan
International
(SI)**

Satuan Lama

Konversi

**Joule/kg (J/Kg)
Gray (Gy)**

Rad

1 Gy = 100 Rad

**Laju dosis serap (\dot{D})
Satuan**

**: dosis serap per waktu
: Gy/jam atau rad/jam**

Hubungan Dosis Serap dengan Paparan

$$D = f \cdot X$$

D = dosis serap (Rad)

X = paparan (R)

f = faktor konversi (Rad/R)

Untuk medium udara

$$f = 0,877 \text{ rad/R}$$

Bukan udara

$$f = 0,877 \frac{(\mu/\rho)_m}{(\mu/\rho)_u}$$

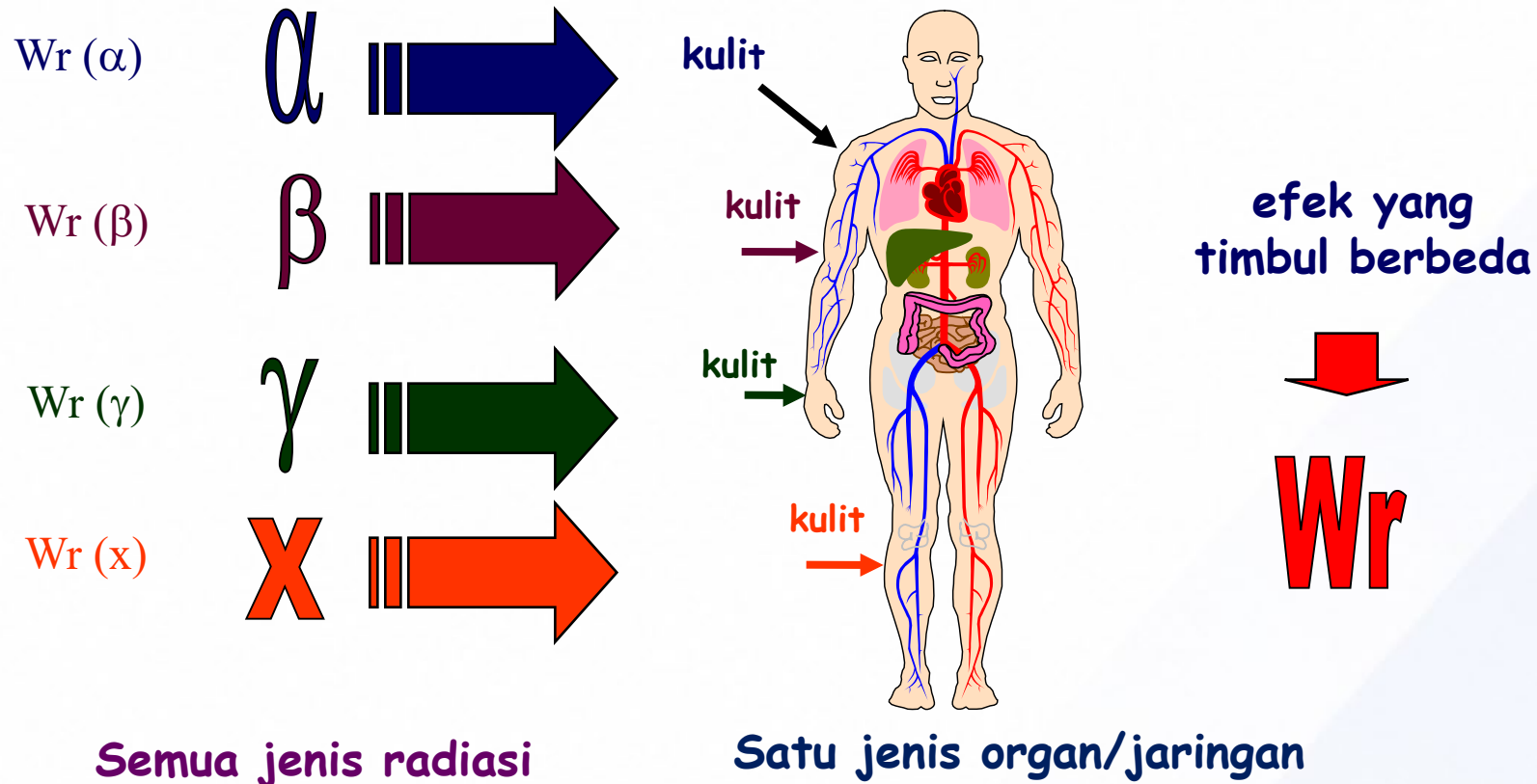
Nilai Faktor Konversi untuk foton dengan berbagai energi

Energi Foton (MeV)	Nilai f dalam Air (rad/R)	Nilai f dalam Otot (rad/R)	Nilai f dalam Tulang Keras (rad/R)
0,010	0,019	0,925	3,55
0,020	0,879	0,927	4,23
0,040	0,879	0,920	4,14
0,060	0,905	0,929	2,91
0,080	0,932	0,940	1,91
0,10	0,949	0,949	1,46
0,50	0,965	0,957	0,925
1,00	0,965	0,957	0,919
2,00	0,965	0,955	0,912
3,00	0,962	0,955	0,929

Dosis Ekuivalen (H)

Pengertian:

Besaran turunan dosis serap yang mempertimbangkan faktor bobot radiasi (W_r)



Faktor Bobot Radiasi ⁽¹⁾

Pengertian

- kemampuan radiasi untuk menimbulkan kerusakan pada organ/jaringan

Istilah lain

- Faktor Kualitas (QF)
- Relative Biological Effectiveness (RBE)

Nilai

- Tergantung jenis dan energi radiasi
- Dikaitkan dengan *Linear Energy Transfer* (LET)
- Menunjukkan daya rusak

Faktor Bobot Radiasi ⁽²⁾

Tabel Nilai faktor bobot berbagai jenis radiasi

Jenis Radiasi	W_r (tanpa satuan)
1. Foton, untuk semua energi	1
2. Elektron dan Muon, semua energi	1
3. Neutron dengan energi:	
a. $E \leq 10 \text{ KeV}$	5
b. $10 \text{ keV} < E \leq 100 \text{ keV}$	10
c. $100 \text{ keV} < E \leq 2 \text{ MeV}$	20
d. $2 \text{ MeV} < E \leq 20 \text{ MeV}$	10
e. $E > 20 \text{ MeV}$	5
4. Proton, selain proton recoil, dengan Energi $> 2 \text{ MeV}$	2
5. Partikel alpha, hasil belah, inti berat	20

Sumber: ICRP Publication No. 103/2007

Satuan Dosis Ekivalen

$$H = \sum (D \times W_r)$$

Satuan Dosis Ekivalen (H)

Satuan
International
(SI)

Satuan Lama

Konversi

Sievert (Sv)

Rem

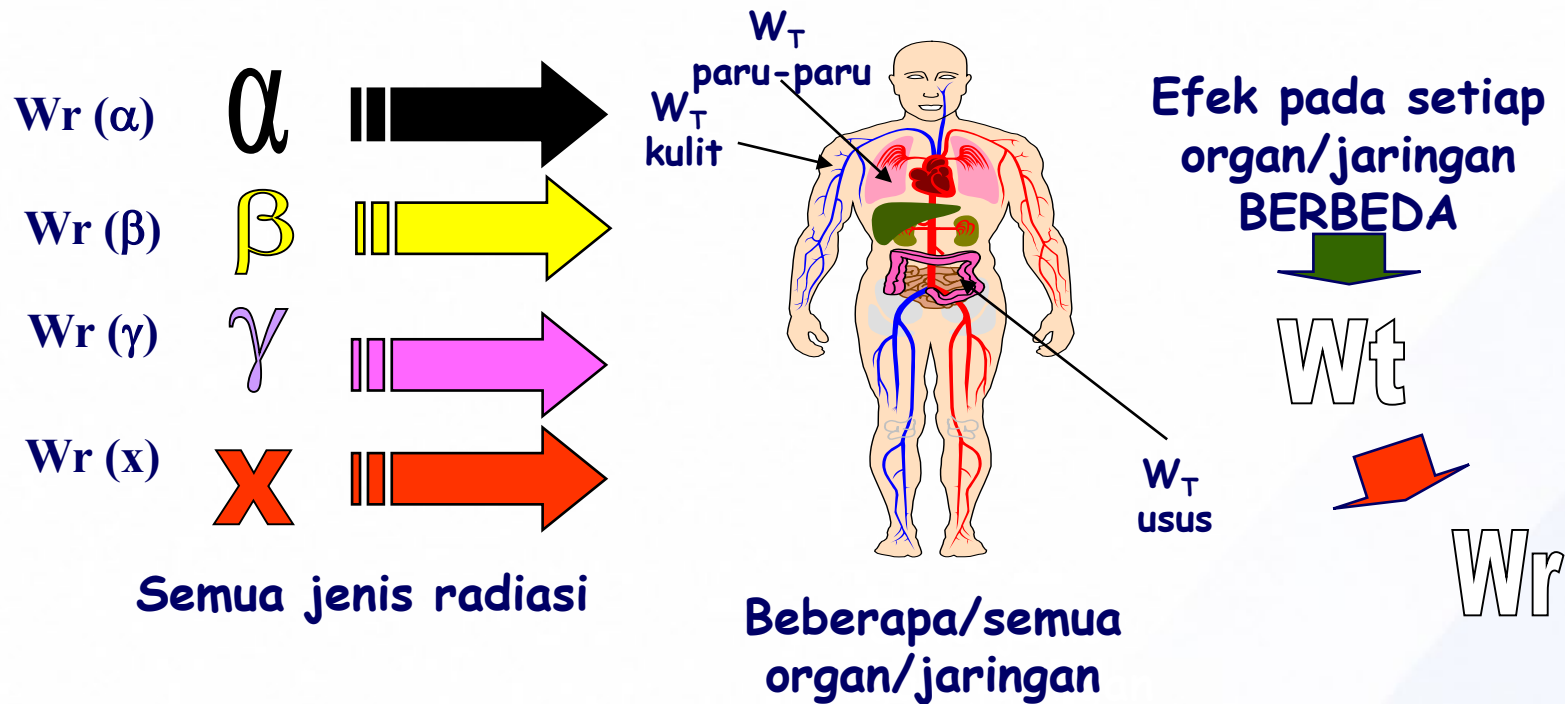
1 Sv = 100 Rem

Laju dosis ekivalen (\dot{H})
Satuan : dosis ekivalen per waktu
: Sv/jam atau rem/jam

Dosis Efektif (E)

Pengertian:

Besaran turunan dosis ekuivalen yang mempertimbangkan faktor bobot organ/jaringan (W_t)



Faktor Bobot Organ/Jaringan ⁽¹⁾

Pengertian

- Perbandingan risiko efek stokastik organ terhadap efek stokastik seluruh tubuh

Nilai

- Sebanding dengan tingkat sensitivitas organ/jaringan
- Semakin sensitif organ, nilai W_t akan semakin besar

Faktor Bobot Organ/Jaringan ⁽²⁾

Tabel Nilai faktor bobot berbagai jenis organ/jaringan

No.	Organ atau Jaringan Tubuh	W_t
1	Gonad	0,08
2	Sumsum tulang (merah), kolon, paru-paru, lambung	0,12
3	Payudara	0,12
4	Bladder, oesophagus, hati, tiroid	0,04
5	Permukaan tulang, kulit	0,01
6	Otak, kelenjar ludah	0,01
7	Jaringan lain ^{***})	0,12
8	Total	1,00

Sumber: ICRP Publication No. 103/2007

Satuan Dosis Efektif

$$E = \sum (H \times W_t)$$

Satuan Dosis Efektif (E)

**Satuan
International
(SI)**

Satuan Lama

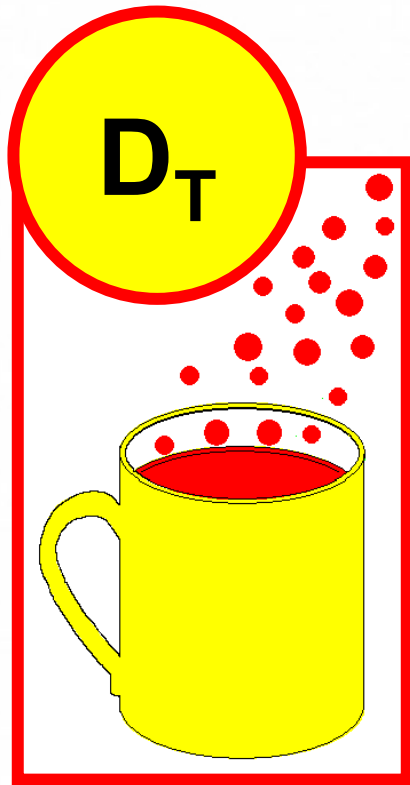
Konversi

Sievert (Sv)

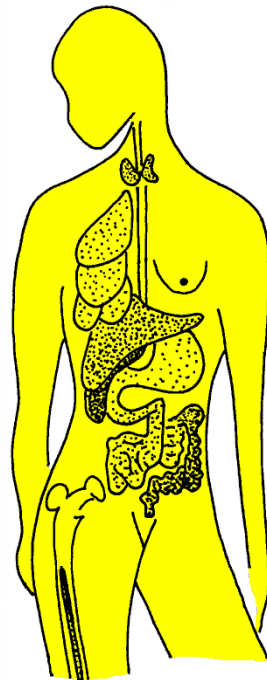
Rem

1 Sv = 100 Rem

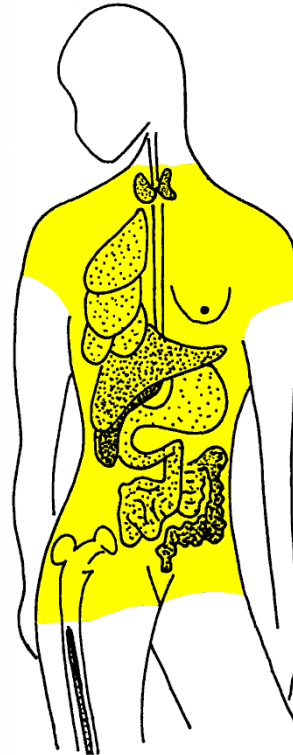
Dosis pada Organ (D_T)



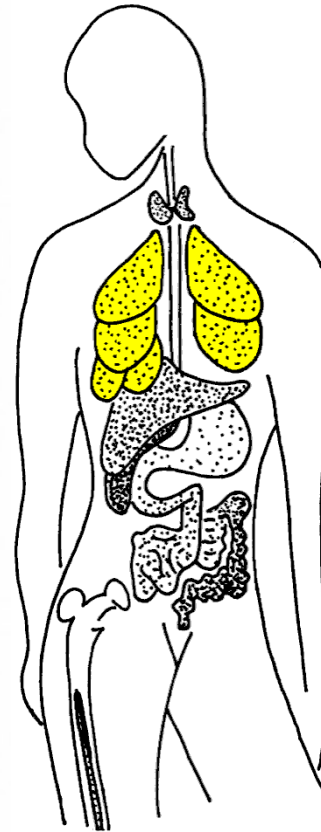
Dosis organ



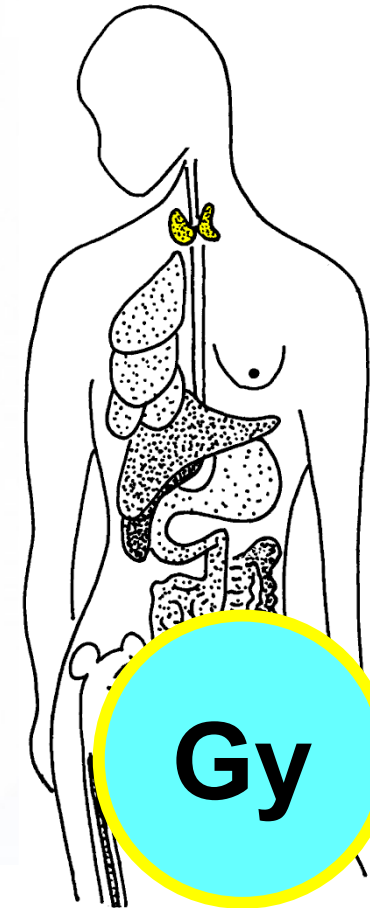
Dosis seluruh tubuh



Dosis badan/ tubuh



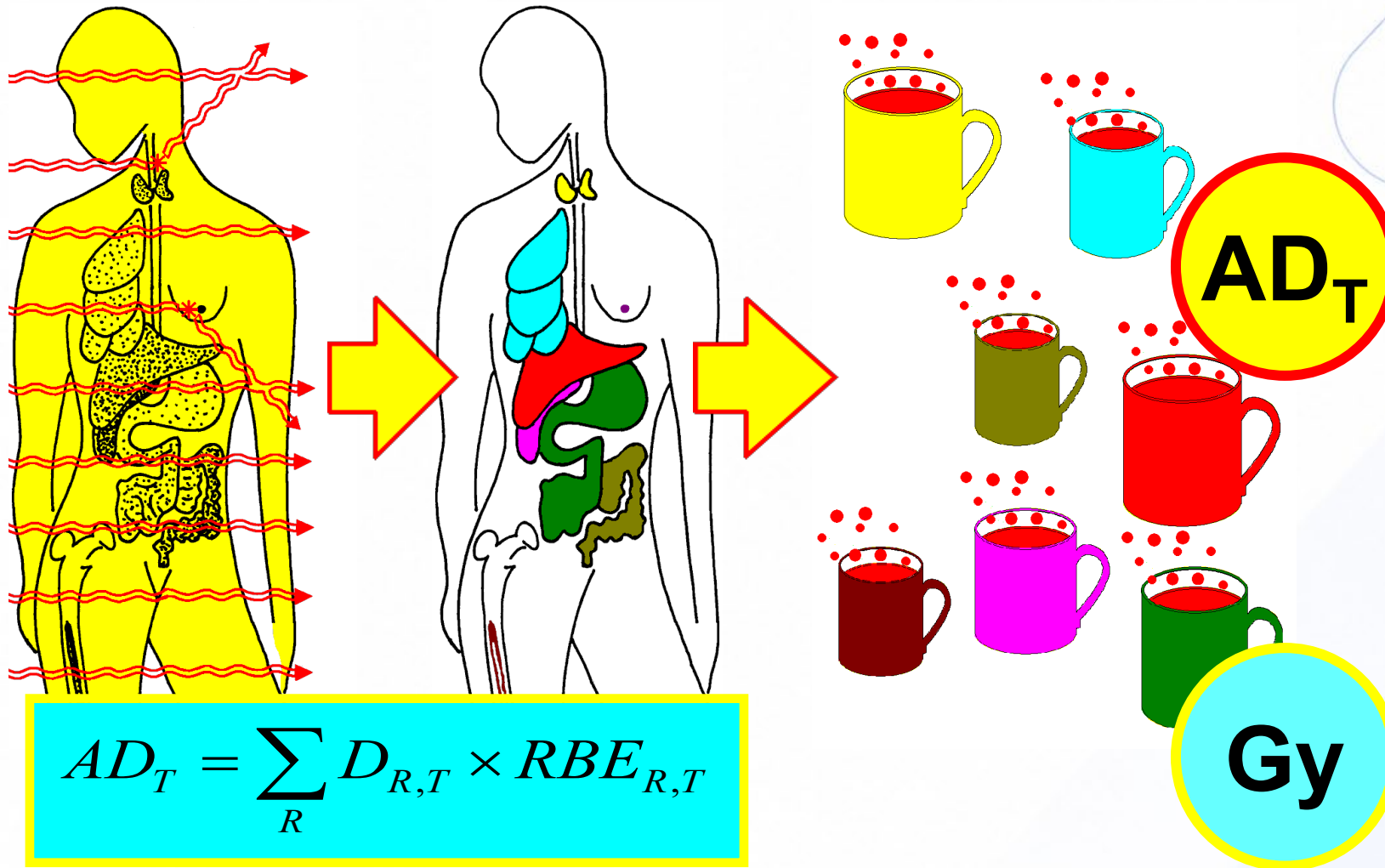
Dosis paru-paru



Dosis tiroid

Courtesy: IAEA

Dosis Serap pada Organ atau Jaringan

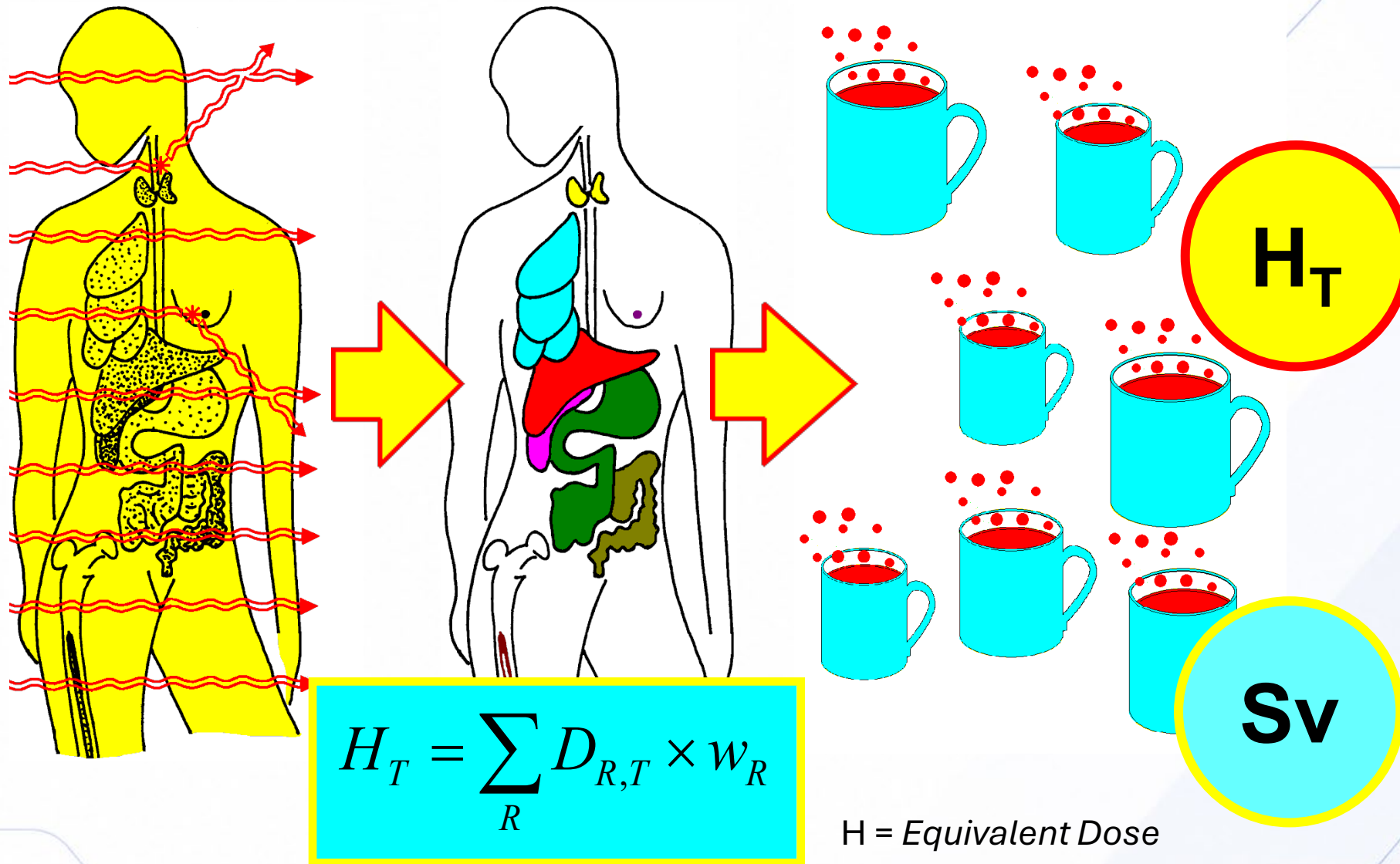


AD = Absorbed Dose

RBE = Relative Biological Effectiveness

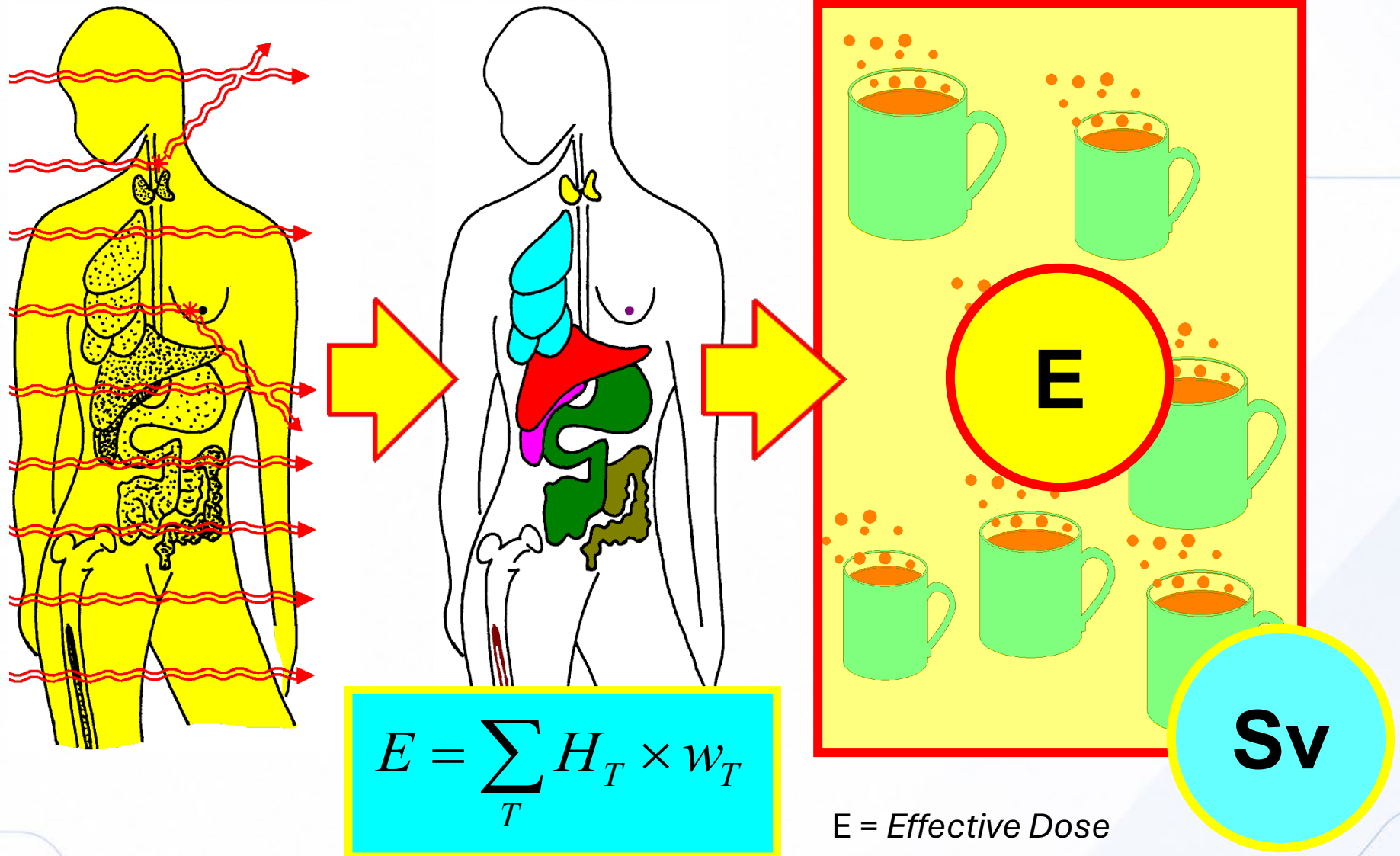
Courtesy: IAEA

Dosis Ekivalen pada Organ atau Jaringan



Courtesy: IAEA

Dosis Efektif



Courtesy: IAEA

Rangkuman Besaran & Satuan Dosimetri

Paparan (X)

- dQ/dm
- C/kg (SI), Roentgen (R)
- $1 R = 2,58 \times 10^{-4} C/kg$

Dosis Serap (D)

- dE/dm
- J/kg atau Gy (SI), Rad
- $1 Gy = 100 rad$

Dosis Ekuivalen (H)

- Sv (SI), rem
- $1 Sv = 100 rem$

Dosis Efektif (E)

- Sv (SI), rem
- $1 Sv = 100 rem$

Dosis Kolektif (S_E)

berhubungan dengan dosis yang diterima oleh suatu populasi (p)

dapat dinyatakan dalam dosis ekuivalen (H) atau dosis efektif (E)

Dosis kolektif

Persamaan
$$S_E = p \times E$$

**Satuan: Sievert.orang
(man.Sv)**

Penggunaan Dosis Kolektif

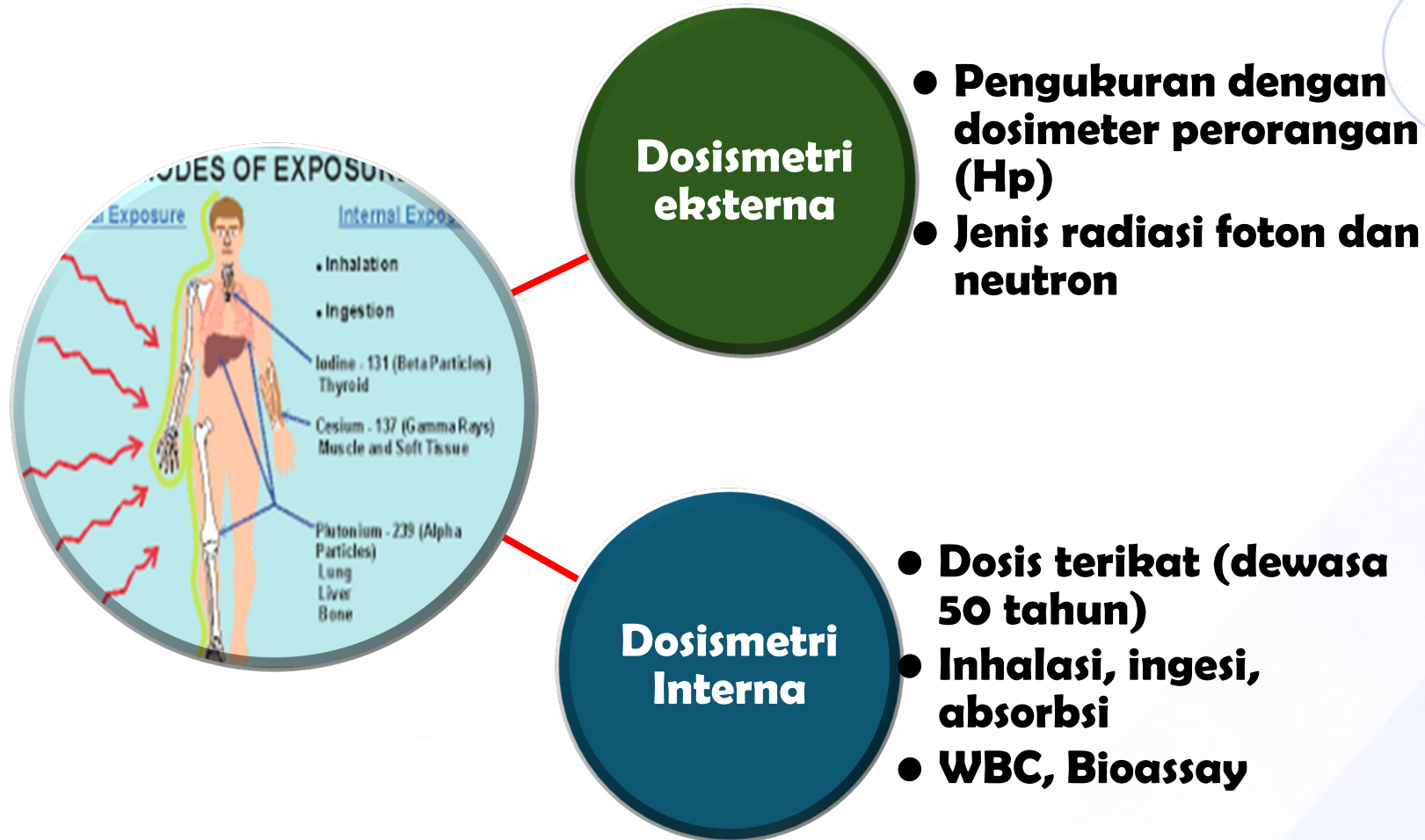


memperkirakan jumlah orang dalam populasi yang mungkin terkena efek stokastik

$$N = f \times w_t \times S_E$$

- N** : jumlah orang yang mungkin terkena efek stokastik
- f** : faktor risiko
- w_t** : faktor bobot organ
- S_E** : dosis kolektif

Dosimetri Eksterna dan Interna



Dosimetri Eksterna (Radiasi Gamma)

**Kondisi: Jarak pengukuran
10 kali lebih besar dari
dimensi sumber**

**Sumber
titik**



**Faktor
gamma**

**laju paparan pada jarak 1 meter
dari sumber radiasi gamma
berbentuk titik dengan aktivitas
sebesar 1 Curie**

Dosimetri Eksterna (Radiasi Gamma dan Sinar-X)

Laju paparan pada jarak r meter dari sumber radiasi

$$\dot{X} = \Gamma \frac{A}{r^2}$$

Radiasi Gamma

**Faktor gamma bergantung jenis radionuklida
Kuantitas radiasi bergantung aktivitas (A)**

$$\dot{X} \cong k \cdot \frac{I}{r^2}$$

Sinar-X

**Nilai konstanta bergantung kV dan karakteristik pesawat sinar-X
Kuantitas radiasi bergantung arus (I)**

Faktor Gamma dan Konstanta Laju Dosis

Radioisotop	Energi (MeV)	Γ (R.m²/Ci.jam)	H (μSv.m²/MBq.jam)
Na-22	1,275	1,19	0,327
Na-24	1,369 2,754	1,82	0,486
Co-60	1,173 1,333	1,30	0,347
I-131	0,364	0,22	0,0648
Cs-137	0,662	0,34	0,0910
Ir-192	0,317 0,468	0,48	0,138
Au-198	0,416	0,24	0,0683

Sumber : JRIA (Japan Radioisotop Association), ICRU 1985

Dosimetri Eksterna (Neutron)

$$\dot{H} = \frac{\phi}{f}$$

Perhitungan dosis neutron berdasarkan pada:

- **Tampang lintang**
- **fraksi penyerahan energi neutron**

• \dot{H} : **Laju dosis ekuivalen ($\mu\text{Sv/jam}$)**

ϕ : **Fluks neutron ($\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)**

f : **faktor konversi ($\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}/ \mu\text{Sv.jam}^{-1}$)**

Faktor Konversi Fluks Neutron

Energi neutron (MeV)	Faktor Konversi (f) ($\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)/($\mu\text{Sv.jam}^{-1}$)
$2,5 \times 10^{-8}$ (termal)	26
1×10^{-7}	24
1×10^{-6}	22
1×10^{-5}	23
1×10^{-4}	24
1×10^{-3}	27
1	0,85
2	0,70
5	0,68
10	0,68
20	0,65

Sumber : Akhadi, Dasar proteksi Radiasi, Juni 2000.

Dosimetri Interna (1)

$$D(t) = \int_0^t \dot{D} dt$$

Dosis terikat:

dosis yang diterima seseorang akibat terdepositnya zat radioaktif di dalam tubuh

Dewasa : 50 tahun

Anak-anak : 70 tahun

Dipengaruhi oleh:

- **aktivitas,**
- **jenis radionuklida yang masuk ke dalam tubuh**
- **metabolisme tubuh**

Dosimetri Interna (2)

$$\lambda_{eff} = \lambda_f + \lambda_b$$

- **Waktu paro biologi:** waktu yang diperlukan radionuklida agar aktivitasnya menjadi setengah dari aktivitas mula-mula melalui proses ekskresi tubuh
- **konstanta peluruhan efektif (λ_{eff}):** merupakan kombinasi antara waktu paruh fisik dan waktu paruh biologi

Dosimetri Interna ⁽³⁾

Waktu paro efektif, fisik dan biologi untuk beberapa radionuklida

Radionuklida	T_f	T_b	T_{ef}
I-131	8 hari	138 hari	7,6 hari
Sr-90	28,8 tahun	50 tahun	18,27 tahun
Cs-137	30 tahun	70 hari	70 hari
Ir-192	74 hari	8 hari	7,2 hari

Efek Radiasi

Efek Stokastik

- Tidak mengenal dosis ambang
- Timbul setelah melalui masa tenang yang lama
- Tingkat keparahan tidak bergantung pada dosis
- Tidak ada penyembuhan spontan
- Kanker, leukimia

Efek Deterministik

- Memiliki dosis ambang
- Timbul beberapa saat setelah terpapar radiasi
- Tingkat keparahan bergantung pada dosis radiasi
- Adanya penyembuhan spontan
- Luka bakar, sterilitas, katarak

PENGUKURAN RADIASI

Prinsip Pengukuran Radiasi ⁽¹⁾

Alat Ukur Radiasi

Alat yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur:

Kuantitas

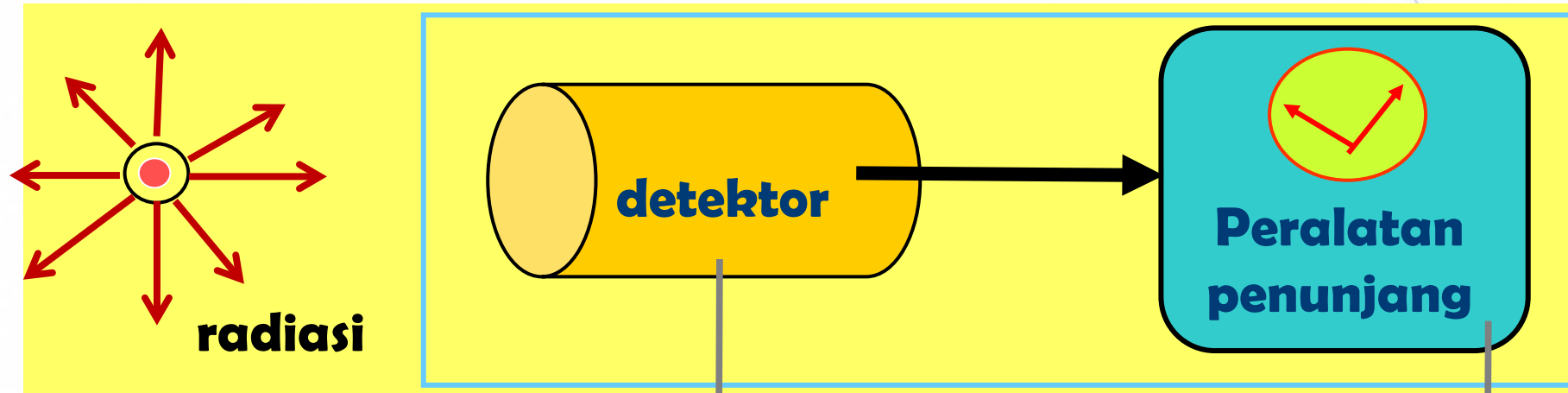
Energi

Intensitas

Dosis Radiasi

Prinsip Pengukuran Radiasi (2)

Alat Ukur Radiasi



- Bahan yang **dapat berinteraksi** dengan radiasi,
- berfungsi **mengubah energi radiasi** menjadi bentuk energi lain yang **lebih mudah diamati**

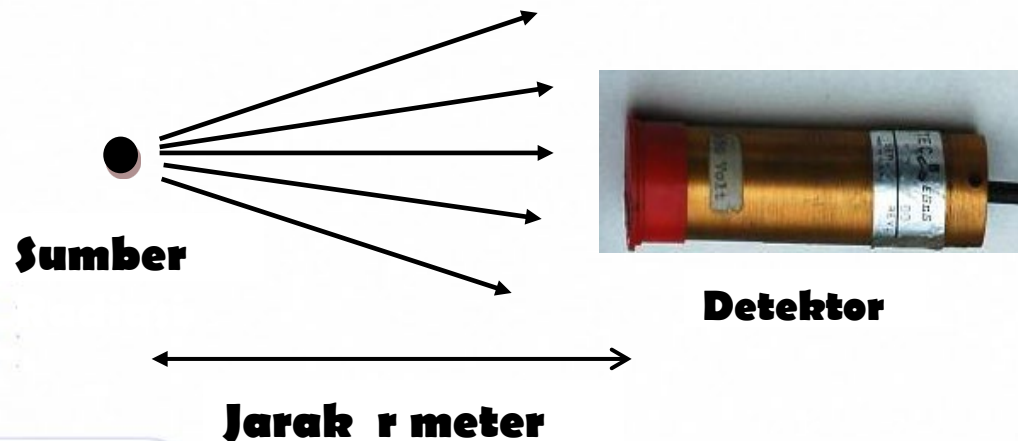
- peralatan elektronik,
- berfungsi untuk **mengubah tanggapan detektor** tersebut menjadi suatu **informasi yang dapat diamati oleh indera manusia**
- diolah lebih lanjut menjadi informasi yang berarti.

Prinsip Pengukuran Radiasi ⁽³⁾

Kuantitas Radiasi

banyaknya radiasi per satuan waktu per satuan luas, pada suatu titik pengukuran

merupakan sebagian dari radiasi yang dipancarkan oleh sumber



$$\Phi = \frac{A \cdot p}{4\pi \cdot r^2}$$

Prinsip Pengukuran Radiasi (4)

Energi

kekuatan dari setiap radiasi yang dipancarkan

bergantung pada jenis radionuklida atau kV

1 eV: energi elektron yang bergerak melalui beda potensial 1 V

Jenis Radionuklida	Energi (keV)	Probabilitas (p,%)
Am-241	59,5	35
Cs-137	662	85
Co-60	1173	100
	1332	100

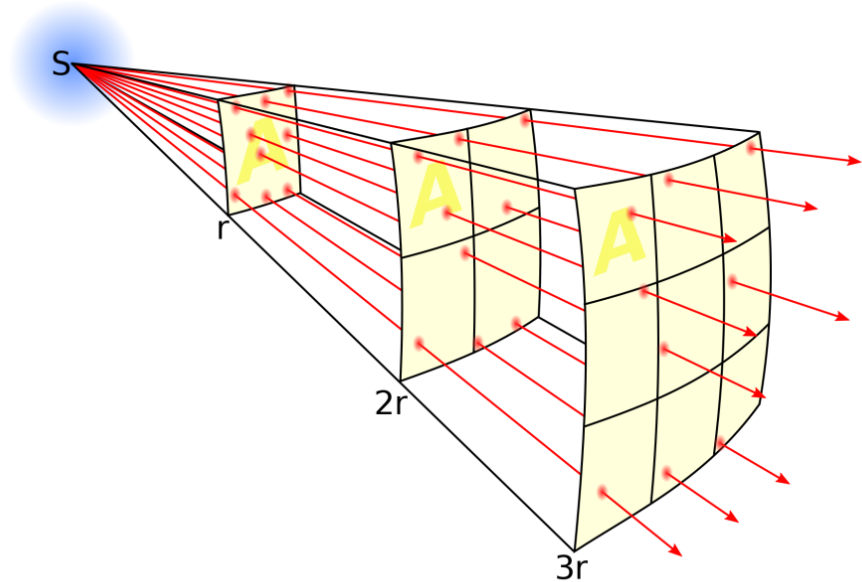
Prinsip Pengukuran Radiasi ⁽⁵⁾

Intensitas

Jumlah energi radiasi per satuan luas per satuan waktu

Hasil perkalian kuantitas dengan energi

$$I = \Phi \cdot E$$



Prinsip Pengukuran Radiasi ⁽⁶⁾

Dosis Radiasi

jumlah energi radiasi yang diserap atau diterima oleh materi

Satuan: rad, Gray, rem, Sievert

Prinsip Pengukuran Radiasi (7)

Penggunaan Alat Ukur Radiasi



Alat ukur proteksi radiasi

- Mengukur intensitas atau dosis radiasi untuk keperluan keselamatan
- Dasar untuk melakukan tindakan tertentu



Sistem Pencacah

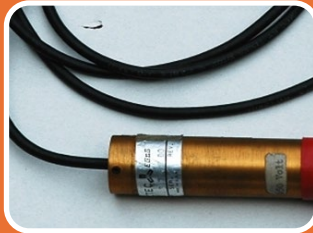
- mengukur kuantitas atau spektrum energi radiasi
- keperluan aplikasi atau penelitian

Prinsip Pengukuran Radiasi ⁽⁸⁾

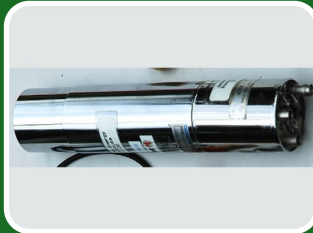
Mekanisme Deteksi

Mekanisme Deteksi	Contoh Detektor
Proses Ionisasi	GM
Proses Sintilasi	NaI(Tl)
Proses Termoluminisensi	TLD
Efek Pemanasan	Kalorimeter
Reaksi Kimia	Film Badge
Perubahan Biologi	Dosimeter Biologi

Jenis Detektor Radiasi (1)



Detektor isian gas



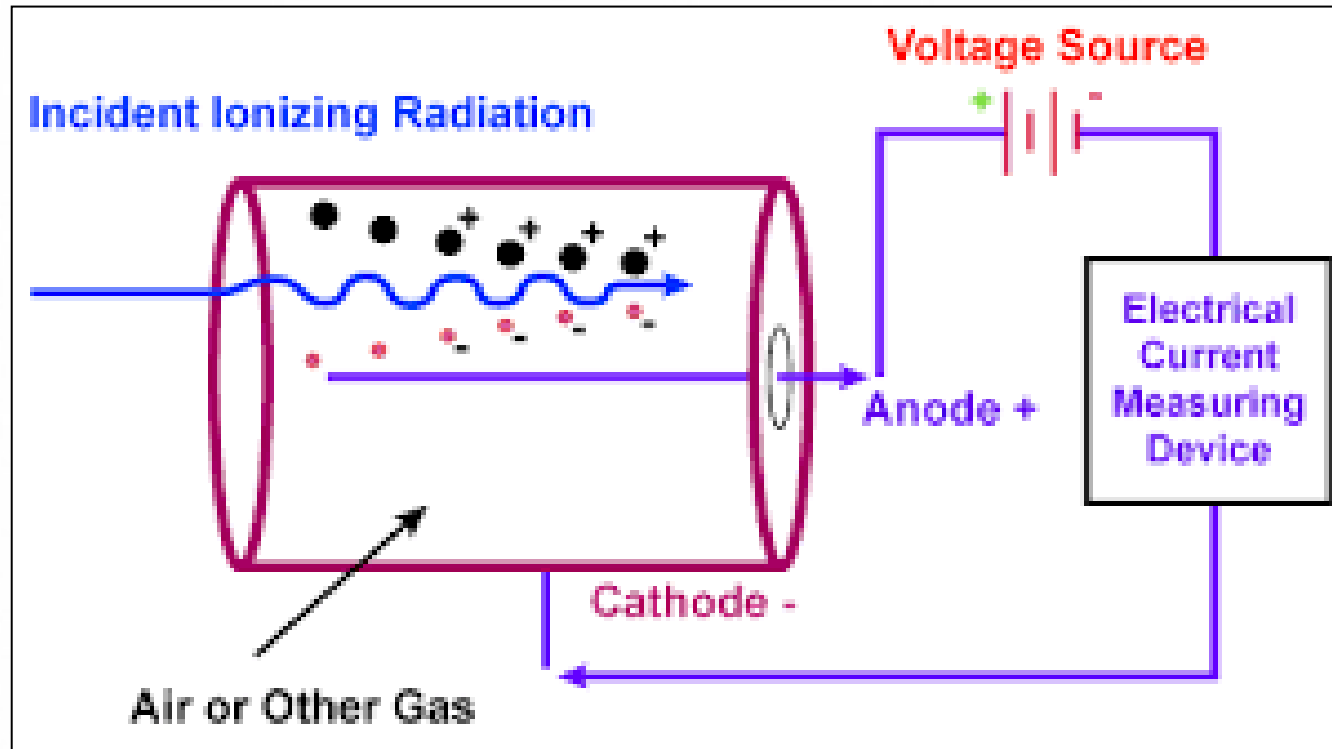
Detektor sintilasi



Detektor semikonduktor

Jenis Detektor Radiasi (2)

Detektor Isian Gas



Proses ionisasi: terbentuknya ion positif dan negatif

Jenis Detektor Radiasi (3)

Detektor Isian Gas



Jenis Detektor Radiasi ⁽³⁾

Detektor Isian Gas

Jenis Detektor Isian Gas

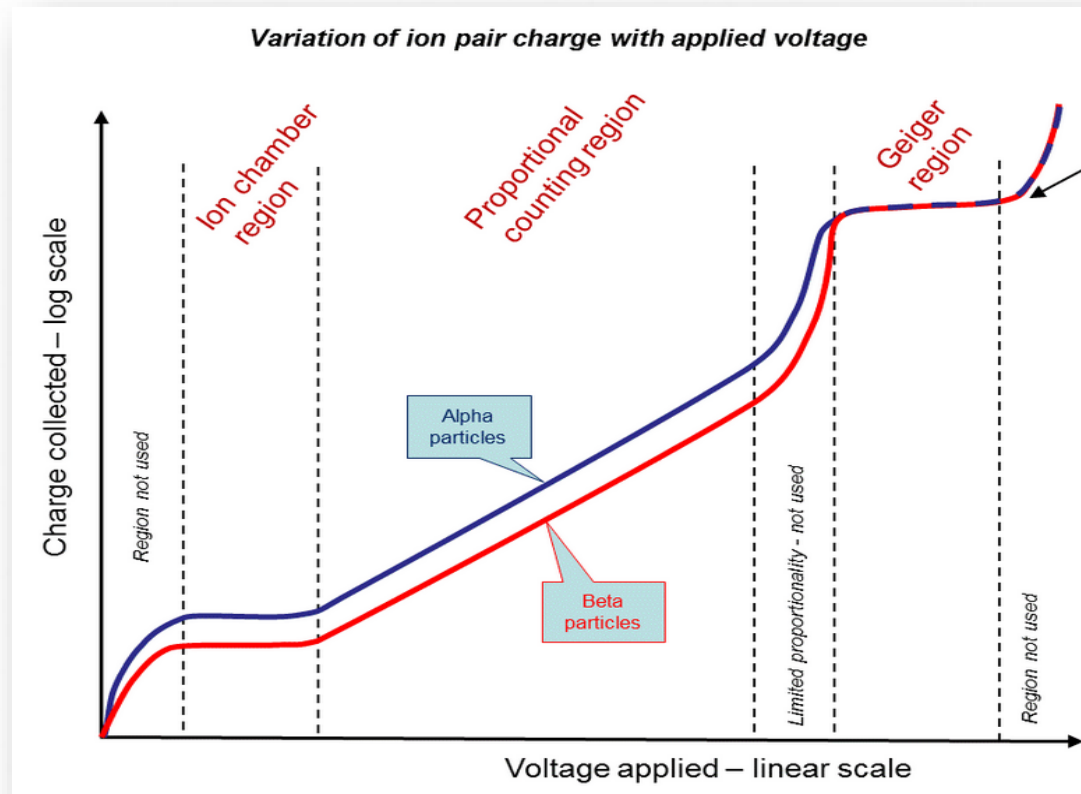
Detektor Kamar Ionisasi

Detektor Proporsional

Detektor Geiger Muller

Jenis Detektor Radiasi (4)

Detektor Isian Gas



Karakteristik jumlah ion terhadap perubahan tegangan kerja detektor

Jenis Detektor Radiasi ⁽⁵⁾

Detektor Isian Gas

Karakteristik

Konstruksi sangat sederhana

Effisiensi rendah

Jenis Radiasi yang dapat diukur

Alpha
(window sangat tipis)

Beta

Gamma/Sinar-X

Neutron (BF₃ atau He-3)

Jenis Detektor Radiasi ⁽⁶⁾

Detektor Sintilasi

Material Sintilator

Berbentuk padat atau cair

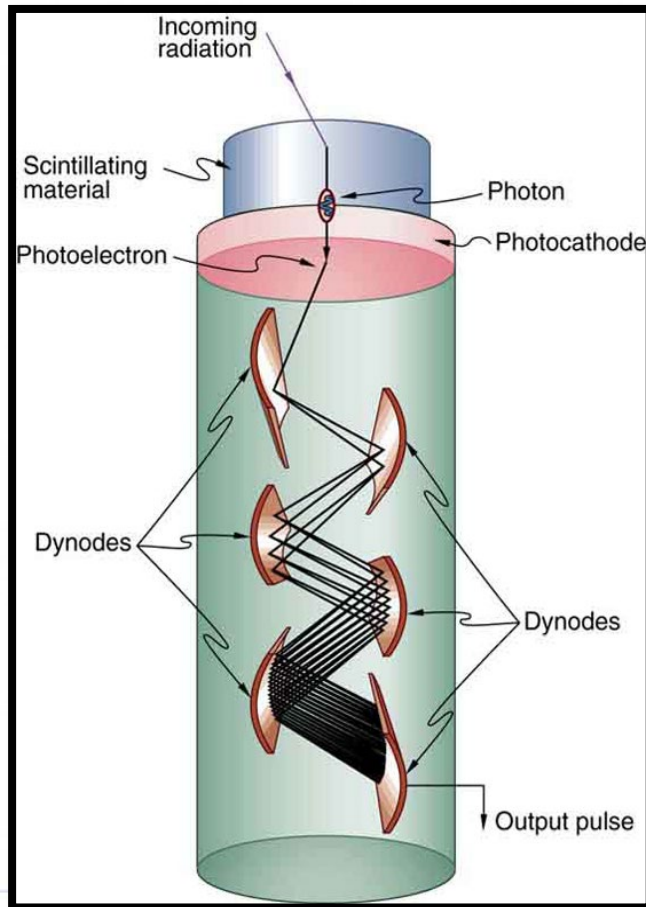
menghasilkan percikan cahaya bila dikenai radiasi pengion

Photomultiplier

mengubah percikan cahaya menjadi pulsa listrik

Jenis Detektor Radiasi (7)

Detektor Sintilasi



Radiasi mengenai bahan sintilator

Timbul percikan cahaya

Foton cahaya mengenai fotokatoda

Fotokatoda memancarkan elektron

Elektron difokuskan ke arah dynode

Elektron digandakan

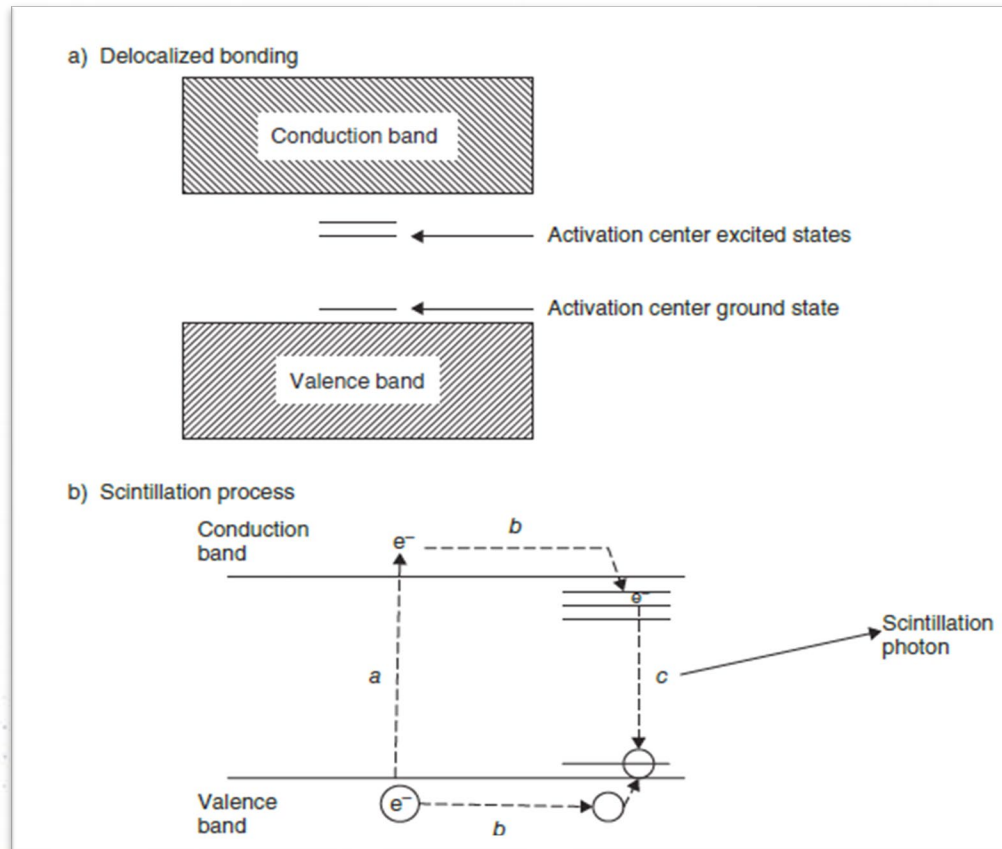
Elektron mengenai anoda

Timbul arus/pulsa

Ditampilkan pada alat peraga

Jenis Detektor Radiasi (8)

Detektor Sintilasi



Electron pada pita valensi menyerap energi radiasi

Elektron pindah ke pita konduksi

Elektron kembali ke pita valensi melalui pita energi aktivator

radiasi yang dipancarkannya berupa sinar tampak

Jenis Detektor Radiasi ⁽⁹⁾

Detektor Sintilasi

Karakteristik

Effisiensi tinggi dan respon sangat cepat

Konstruksi rumit

Jenis Sintilator

Nal(Tl) : gamma, sinar-X

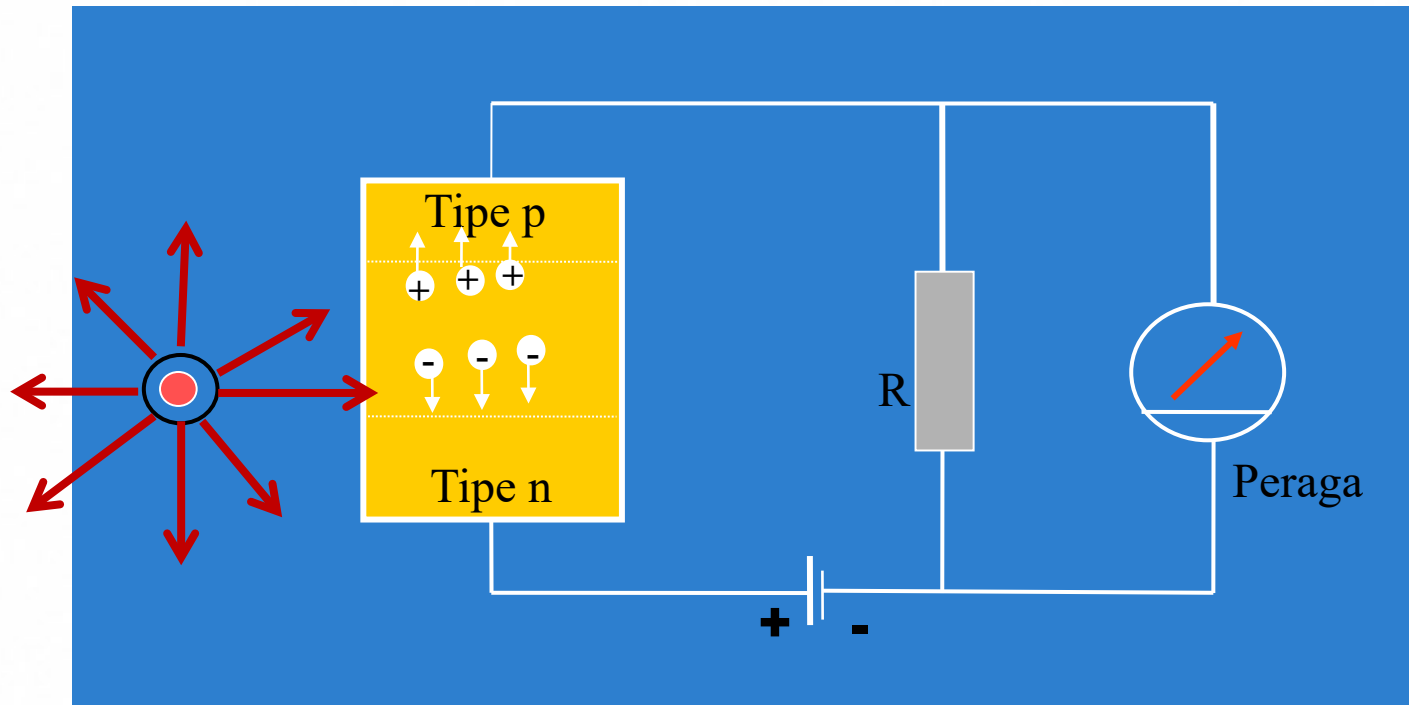
Zn S (Ag): alpha, beta

Lil (Eu): neutron

Sintilator cair: beta energi dan aktivitas rendah

Jenis Detektor Radiasi (10)

Detektor Semikonduktor



Skema kerja detektor semikonduktor

Jenis Detektor Radiasi (11)

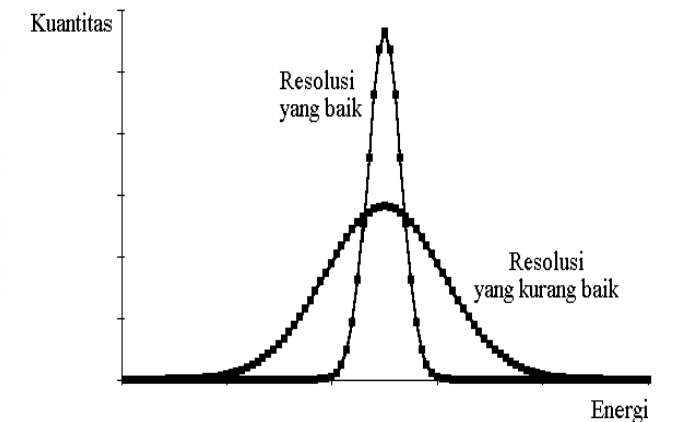
Detektor Semikonduktor

Karakteristik

- Resolusi tinggi
- Kontruksi rumit dan mudah rusak

Jenis Detektor Semikonduktor

- Jenis Detektor Semikonduktor :
- HPGe untuk radiasi gamma
- SiLi untuk radiasi Sinar-X (energi rendah)
- Sawar muka (*surface barrier*) untuk alpha / beta

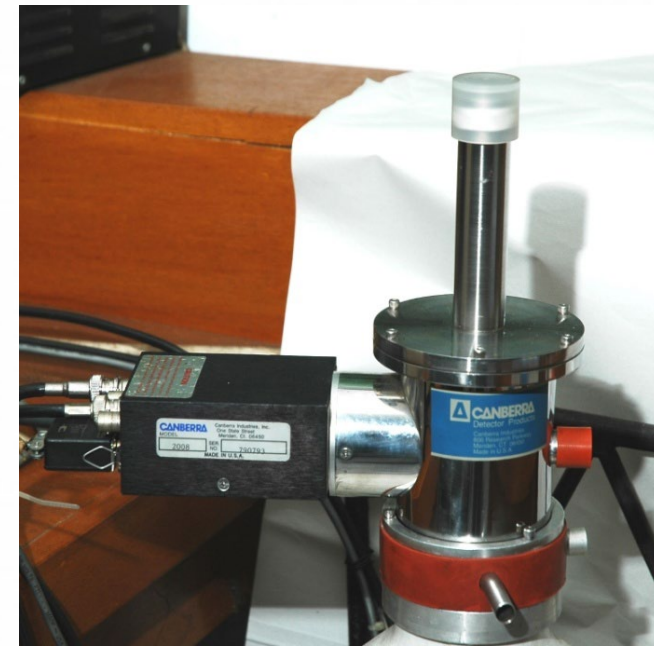


Jenis Detektor Radiasi (12)

Detektor Semikonduktor



HPGe



SiLi

Jenis Detektor Radiasi (13)

Karakteristik Detektor

Detektor	Proses Interaksi	Karakteristik
Isian Gas	Ionisasi	Konstruksi sederhana Efisiensi terendah Resolusi rendah GM tidak dapat membedakan energi
Sintilasi	Eksitasi – Sintilasi	Efisiensi tinggi Respons cepat Kontruksi rumit Resolusi terendah
Semikonduktor	Ionisasi	Resolusi tertinggi Konstruksi rumit Efisiensi lebih rendah dari sintilasi

Sistem Pencacah ⁽¹⁾

Kegunaan

Proteksi Radiasi

- Mengukur sampel dari dalam tubuh
- Mendeteksi ada tidaknya zat radiaktif
- Mendeteksi posisi, jenis dan aktivitas radionuklida

Aplikasi dan penelitian

- Mengukur kuantitas
- Spektrum energi

Sistem Pencacah ⁽²⁾

Jenis Pencacah Radiasi

Sistem Pencacah Integral

Mengukur Kuantitas radiasi tanpa memperhatikan energi radiasinya

Sistem Pencacah Diferensial

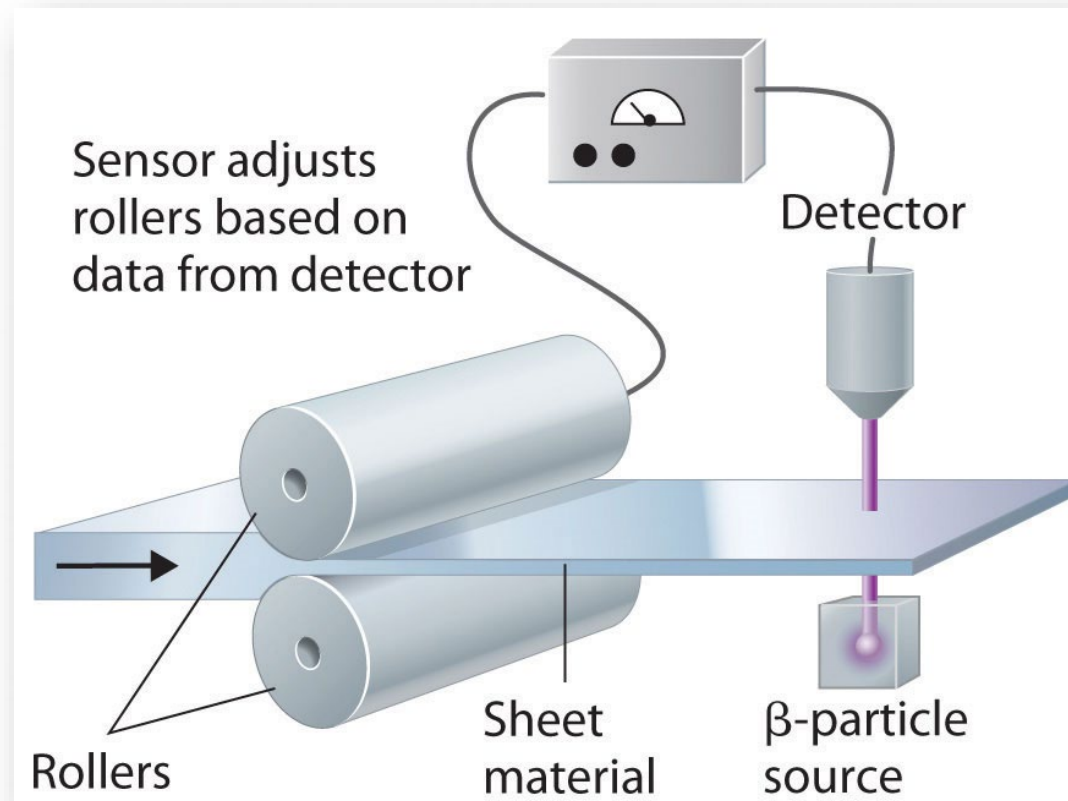
Mengukur kuantitas radiasi dalam selang energi radiasi tertentu

Sistem Spektroskopi

Mengukur distribusi energi radiasi yang dipancarkan oleh suatu sumber

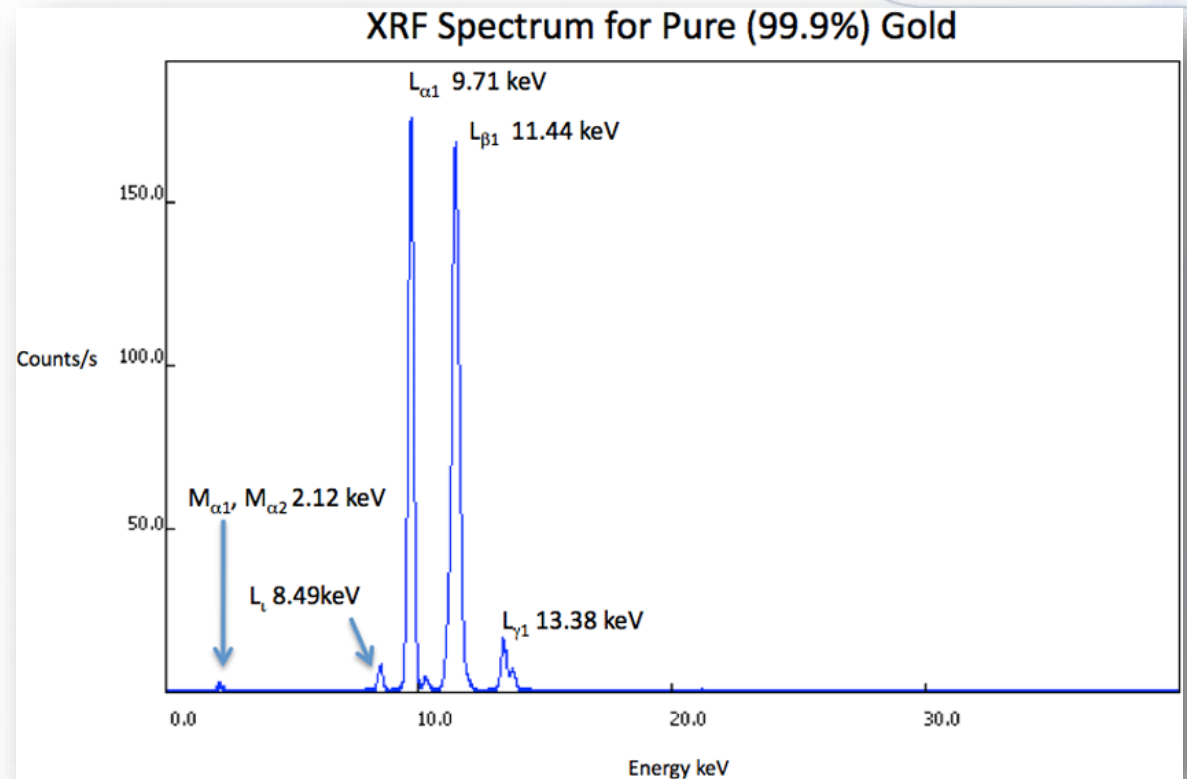
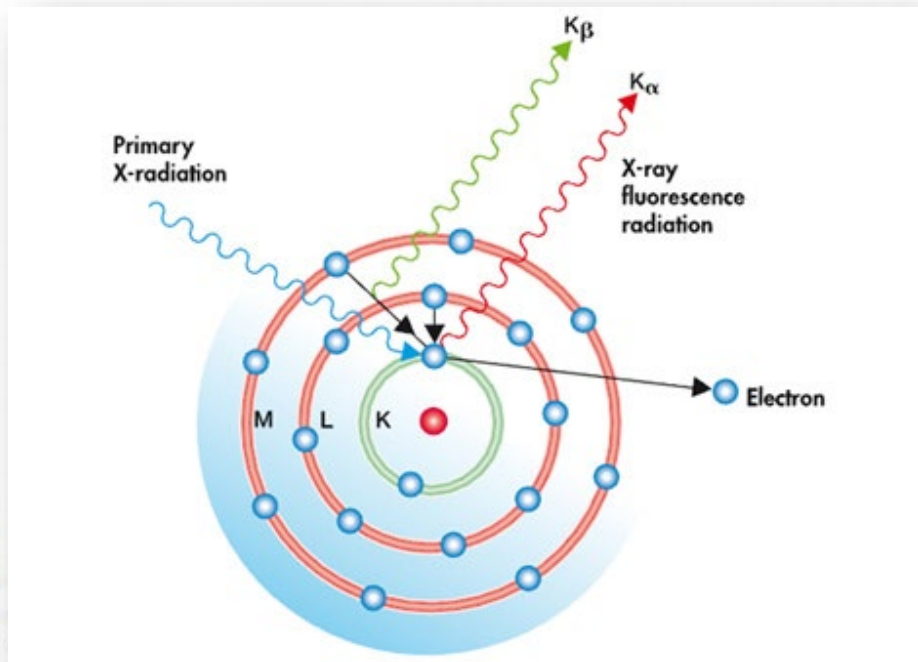
Sistem Pencacah ⁽³⁾

Contoh Aplikasi Sistem Pencacah



Sistem Pencacah (4)

Contoh Spektrum Energi Radiasi



Sistem Pencacah ⁽⁵⁾

Aspek Pencacahan Radiasi

Laju cacah (R_u)

jumlah cacah persatuan waktu

kuantitas radiasi yang memasuki detektor

aktivitas sumber radiasi

$$R = \frac{C}{\Delta t}$$

Sistem Pencacah ⁽⁶⁾

Aspek Pencacahan Radiasi

Laju cacah latar belakang (R_{bg})

nilai laju cacah yang ditampilkan oleh sistem pencacah walaupun tidak ada sumber radiasi

berasal dari radiasi alam di sekeliling detektor

Laju cacah sumber (R_s)

$$R_s = R_u - R_{bg}$$

- R_{bg} = Laju cacah latar belakang
- R_s = laju cacah sumber radiasi yang diukur

Sistem Pencacah ⁽⁷⁾

Aspek Pencacahan Radiasi

Efisiensi η

nilai yang menunjukkan korelasi antara laju cacah sumber (R_s) dan aktivitas sumber radiasi (A)

$$\eta = \frac{R}{A.p}$$

H= efisiensi sistem pencacah

A = aktivitas (Bq)

p = probabilitas pancaran radiasi

R = Laju cacah

Alat Ukur Proteksi Radiasi

Klasifikasi



Monitor Area

- Mengukur laju dosis di suatu area
- Permanen (Fixed), Portable (Surveimeter)



Monitor Kontaminasi

- Mengukur tingkat Kontaminasi Udara, Permukaan dan Perorangan



Dosimeter Perorangan

- Mengukur jumlah dosis yang diterima seseorang
- Dosimeter saku, Film Badge, TLD/RPLD



Terima Kasih

Atas Perhatian Anda



Bridging Sciences
Empowering Talents

@dpk brin