

TEKNIK IRADIASI (KIMIA INTI DAN RADIASI)

Rohadi Awaludin

**Pelatihan Petugas Keahlian Pada Fasilitas Radioisotop dan Radiofarmaka
dari Siklotron Bagi Pegawai Biofarma
10 - 23 Juli 2026**

Direktorat Pengembangan Kompetensi BRIN

BIODATA



Nama : Dr. Rohadi Awaludin

Tanggal lahir : Klaten, 26 Mei 1971

Pekerjaan : Peneliti Ahli Utama Kimia Nuklir di PRTRRB-ORTN BRIN

Email : rohadi.awaludin@brin.go.id

Pendidikan:

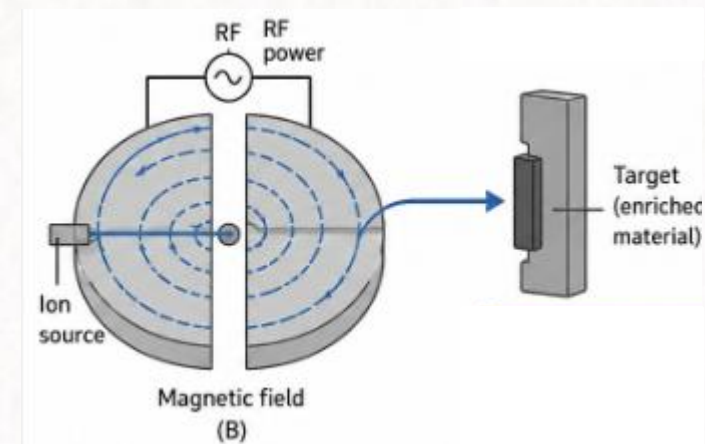
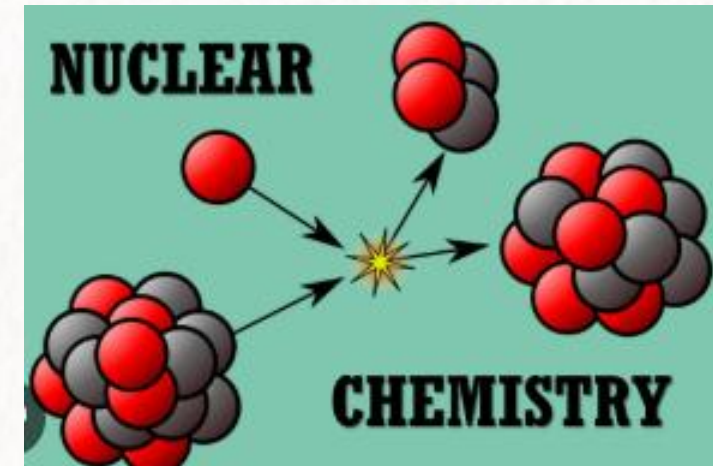
1. S1 di Universitas Kanazawa, Jepang, 1991 – 1995
2. S2 di Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST), Jepang, 1995 – 1997
3. S3 di Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST), Jepang, 1997 – 2000

Riwayat pekerjaan:

1. Peneliti Bidang Radioisotop Badan Tenaga Nuklir Nasional (2001 – 2013)
2. Kepala Bidang Radiofarmaka (2013-2018)
3. Kepala Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka (2018-2021)
4. Kepala Organisasi Riset Tenaga Nuklir (2022 – 2024)
5. Peneliti Ahli Utama (2021 – sekarang)

LATAR BELAKANG

- Proses utama dalam produksi radioisotop menggunakan siklotron adalah **reaksi inti** melalui iradiasi/penembakan partikel bermuatan berenergi tinggi.
- Pemahaman tentang **kimia inti** yang di dalamnya ada reaksi inti / reaksi nuklir sangat diperlukan dalam pengoperasian siklotron untuk produksi radioisotop secara aman, lancar serta menghasilkan produk yang berkualitas.



MANFAAT

- ✓ Sangat diperlukan dalam pengoperasian siklotron untuk produksi radioisotop secara selamat dan lancar.
- ✓ Sangat diperlukan dalam menjaga kualitas produk radioisotop yang dihasilkan
- ✓ Sangat diperlukan dalam melakukan analisis terhadap masalah masalah yang muncul dalam produksi radioisotop menggunakan siklotron sehingga dapat menjaga dan meningkatkan produktivitas.



TUJUAN PEMBELAJARAN

- ✓ Memahami struktur inti atom
- ✓ Memahami radioaktivitas dan peluruhan inti atom
- ✓ Memahami jenis jenis radiasi pengion
- ✓ Memahami jenis jenis reaksi inti
- ✓ Memahami jenis, karakteristik dan contoh reaksi inti produksi radioisotop

POKOK BAHASAN

1. Pendahuluan
2. Struktur Atom
3. Radioaktivitas
4. Reaksi nuklir dan pemanfaatannya
5. Teknik iradiasi siklotron
6. Pengenalan kimia radiasi

1. Pendahuluan: Kimia inti

- Kimia inti (kimia nuklir) adalah cabang ilmu kimia yang mempelajari perubahan inti atom, termasuk stabilitas inti atom dan reaksi nuklir.
- Berbeda dengan kimia biasa yang berfokus pada interaksi elektron di kulit atom, kimia nuklir berkaitan dengan inti atom dan perubahannya.
- Perubahan inti atom dan fenomena yang menyertainya telah dimanfaatkan secara luas di bidang kesehatan, industri, energi , pertanian dan pangan dll.

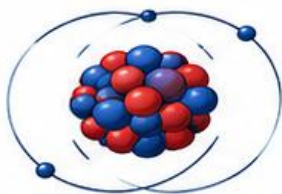
CHEMICAL REACTION	NUCLEAR REACTION
DEFINITION	
The chemical reactions involve the transfer, loss, gain and sharing of electrons and nothing takes place in the nucleus	Nuclear reactions involve the decomposition of the nucleus and have nothing to do with the electrons
CHEMICAL REACTION	NUCLEAR REACTION
REACTION	
Electrons in the atom are responsible for chemical reactions	Nuclear reaction takes place in the atom's nucleus

PERBANDINGAN KIMIA NUKLIR DAN KIMIA BIASA

KIMIA NUKLIR

VS

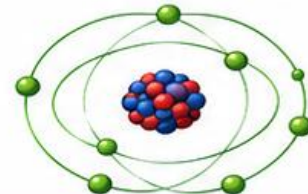
KIMIA BIASA



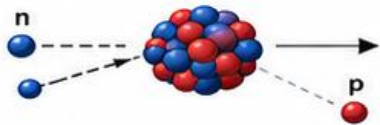
Mempelajari perubahan pada inti atom (reaksi inti) dan sifat serta perilaku unsur radioaktif.



RUANG LINGKUP



Mempelajari perubahan pada elektron di sekitar inti (reaksi kimia) dan sifat serta perilaku zat.



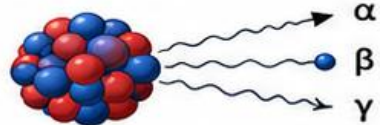
Melibatkan **reaksi inti** seperti peluruhan radioaktif, fisi, fusi, reaksi partikel (n,p; p,n dll).



JENIS REAKSI



Melibatkan **reaksi kimia** seperti pembentukan ikatan, reaksi asam-basa, oksidasi-reduksi, precipitasi, dll.



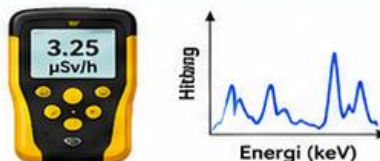
Unsur radioaktif tidak stabil dan mengalami peluruhan spontan dengan memancarkan partikel atau sinar.



STABILITAS ZAT



Unsur umumnya **stabil**; perubahan terjadi hanya jika ada reaktan atau kondisi tertentu.



Analisis melibatkan pengukuran radioaktivitas (aktivitas, waktu paro, spektrum radiasi) dan teknik radiokimia.



METODE ANALISIS



Analisis menggunakan teknik kimia konvensional seperti titrasi, spektroskopi, kromatografi, elektrokimia, dll.



Aplikasi pada produksi radioisotop, penanggalan radiometrik, kedokteran nuklir, energi nuklir, dan penelitian inti atom.



APLIKASI UTAMA



Aplikasi pada industri kimia, farmasi, pangan, material, lingkungan, dan kehidupan sehari-hari.



Membutuhkan fasilitas khusus (siklotron, reaktor nuklir, hot cell), proteksi radiasi, dan keselamatan nuklir yang ketat.



AWAS RADIASI



KESELAMATAN



Menggunakan prosedur keselamatan laboratorium kimia standar.

Intinya: Kimia nuklir berfokus pada inti atom dan radioaktivitas, sedangkan kimia biasa berfokus pada elektron dan ikatan kimia.

Modern Nuclear Chemistry

Second Edition

Walter D. Loveland
Oregon State University

David J. Morrissey
Michigan State University

Glenn T. Seaborg
University of California, Berkeley

WILEY

Contents

Preface to the Second Edition xv

Preface to the First Edition xvii

1 Introductory Concepts 1

- 1.1 Introduction 1
- 1.2 The Excitement and Relevance of Nuclear Chemistry 2
- 1.3 The Atom 3
- 1.4 Atomic Processes 4
 - 1.4.1 Ionization 5
 - 1.4.2 X-Ray Emission 5
- 1.5 The Nucleus: Nomenclature 7
- 1.6 Properties of the Nucleus 8
- 1.7 Survey of Nuclear Decay Types 9
- 1.8 Modern Physical Concepts Needed in Nuclear Chemistry
 - 1.8.1 Elementary Mechanics 13
 - 1.8.2 Relativistic Mechanics 14
 - 1.8.3 de Broglie Wavelength: Wave-Particle Duality 16
 - 1.8.4 Heisenberg Uncertainty Principle 18
 - 1.8.5 Units and Conversion Factors 19
- Problems 19
- Bibliography 21

2 Nuclear Properties 25

- 2.1 Nuclear Masses 25
- 2.2 Terminology 28
- 2.3 Binding Energy Per Nucleon 29
- 2.4 Separation Energy Systematics 31
- 2.5 Abundance Systematics 32
- 2.6 Semiempirical Mass Equation 33
- 2.7 Nuclear Sizes and Shapes 39
- 2.8 Quantum Mechanical Properties 43

- 6 **Nuclear Structure** 125
 - 6.1 Introduction 125
 - 6.2 Nuclear Potentials 127
 - 6.3 Schematic Shell Model 129
 - 6.4 Independent Particle Model 141
 - 6.5 Collective Model 143
 - 6.6 Nilsson Model 149
 - 6.7 Fermi Gas Model 152
- Problems 161
- Bibliography 164

7 α -Decay 167

- 7.1 Introduction 167
- 7.2 Energetics of α Decay 169
- 7.3 Theory of α Decay 173
- 7.4 Hindrance Factors 182
- 7.5 Heavy Particle Radioactivity 183
- 7.6 Proton Radioactivity 185
- Problems 186
- Bibliography 188

8 β -Decay 191

- 8.1 Introduction 191
- 8.2 Neutrino Hypothesis 192
- 8.3 Derivation of the Spectral Shape 196
- 8.4 Kurie Plots 199
- 8.5 β Decay Rate Constant 200
- 8.6 Electron Capture Decay 206
- 8.7 Parity Nonconservation 207
- 8.8 Neutrinos Again 208
- 8.9 β -Delayed Radioactivities 209
- 8.10 Double β Decay 211
- Problems 213
- Bibliography 214

9 γ -Ray Decay 217

- 9.1 Introduction 217
- 9.2 Energetics of γ -Ray Decay 218
- 9.3 Classification of Decay Types 220
- 9.4 Electromagnetic Transition Rates 223

EVOLUSI MODEL ATOM

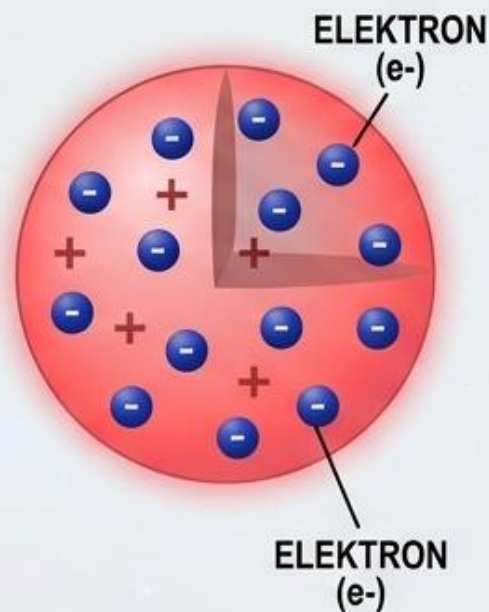
MODEL ATOM DALTON (1803)

Partikel tak terbagi, solid,
berbentuk bola.



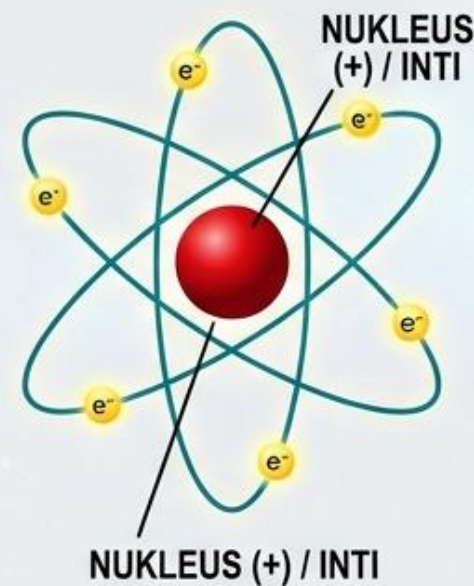
MODEL ATOM THOMSON (1897)

“Model Roti Kismis”.
Muatan negatif (elektron)
tersebar dalam “awan” positif.



MODEL ATOM RUTHERFORD (1911)

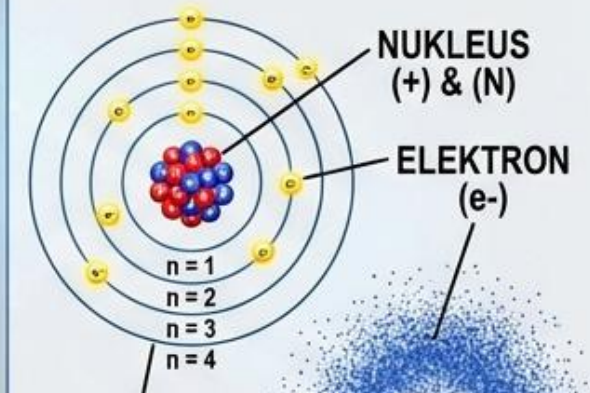
Inti atom (*nucleus*) padat, bermuatan positif, dikelilingi elektron yang bergerak.



MODEL ATOM BOHR & MEKANIKA KUANTUM (1913-Sekarang)

Bohr: Orbit energi terkuantitas (kulit atom).

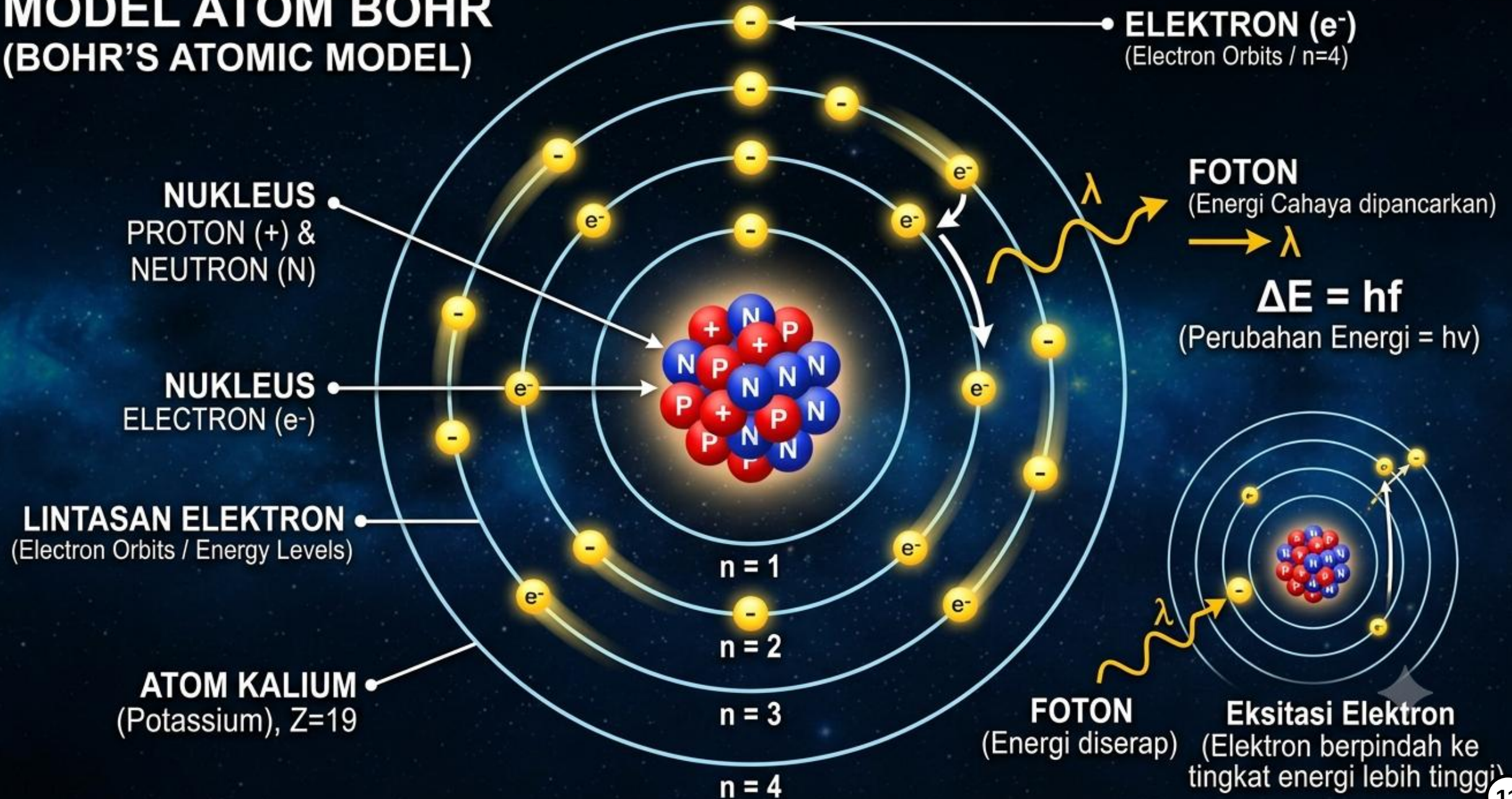
Kuantum: Probabilitas keberadaan elektron (awan elektron).



MODEL BOHR (Orbit Terkuantitas)

MODEL MEKANIKA Kuantum

MODEL ATOM BOHR (BOHR'S ATOMIC MODEL)

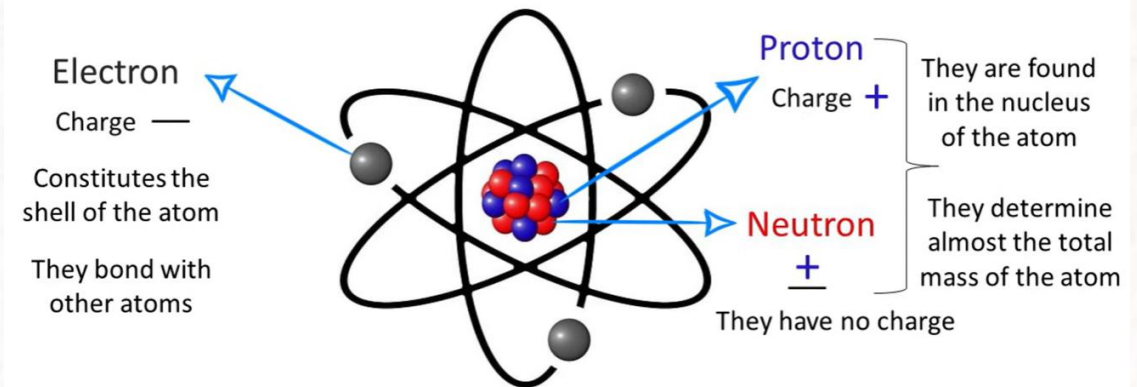


2. Struktur atom

- Atom tersusun dari inti atom dan elektron yang mengelilinginya.
- Inti atom tersusun dari proton yang bermuatan positif dan neutron yang netral (tidak bermuatan)
- Isotop adalah atom atom dengan jumlah proton yang sama namun jumlah neutron berbeda. Misalnya H-1, H-2 dan H-3
- Radioisotop adalah isotop yang memancarkan radiasi.

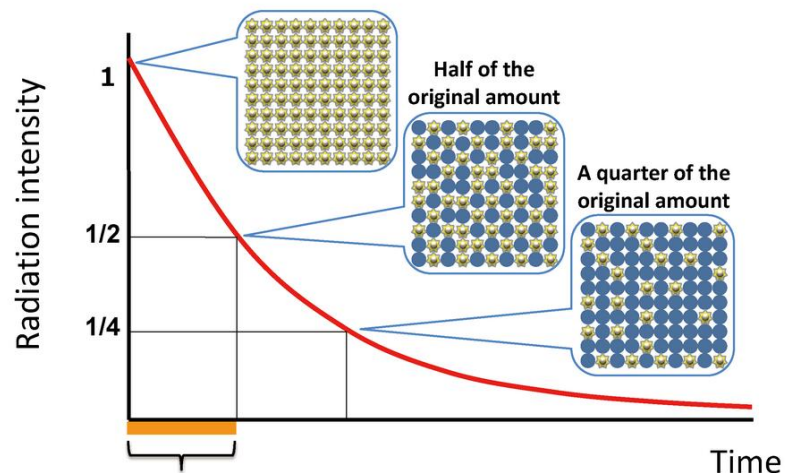
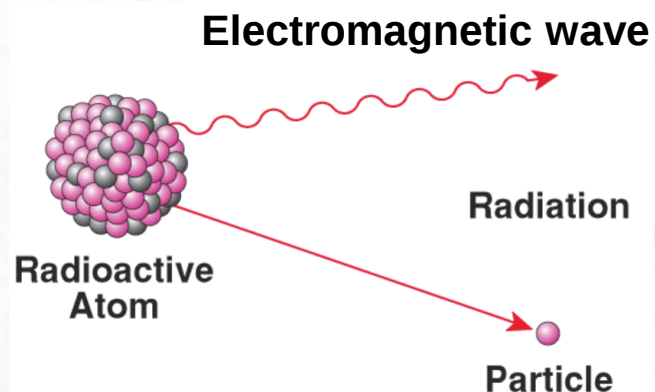
Subatomic Particles

As a particle smaller than the atom



Keterangan:
X = lambang unsur
A = nomor massa;
Z = nomor atom

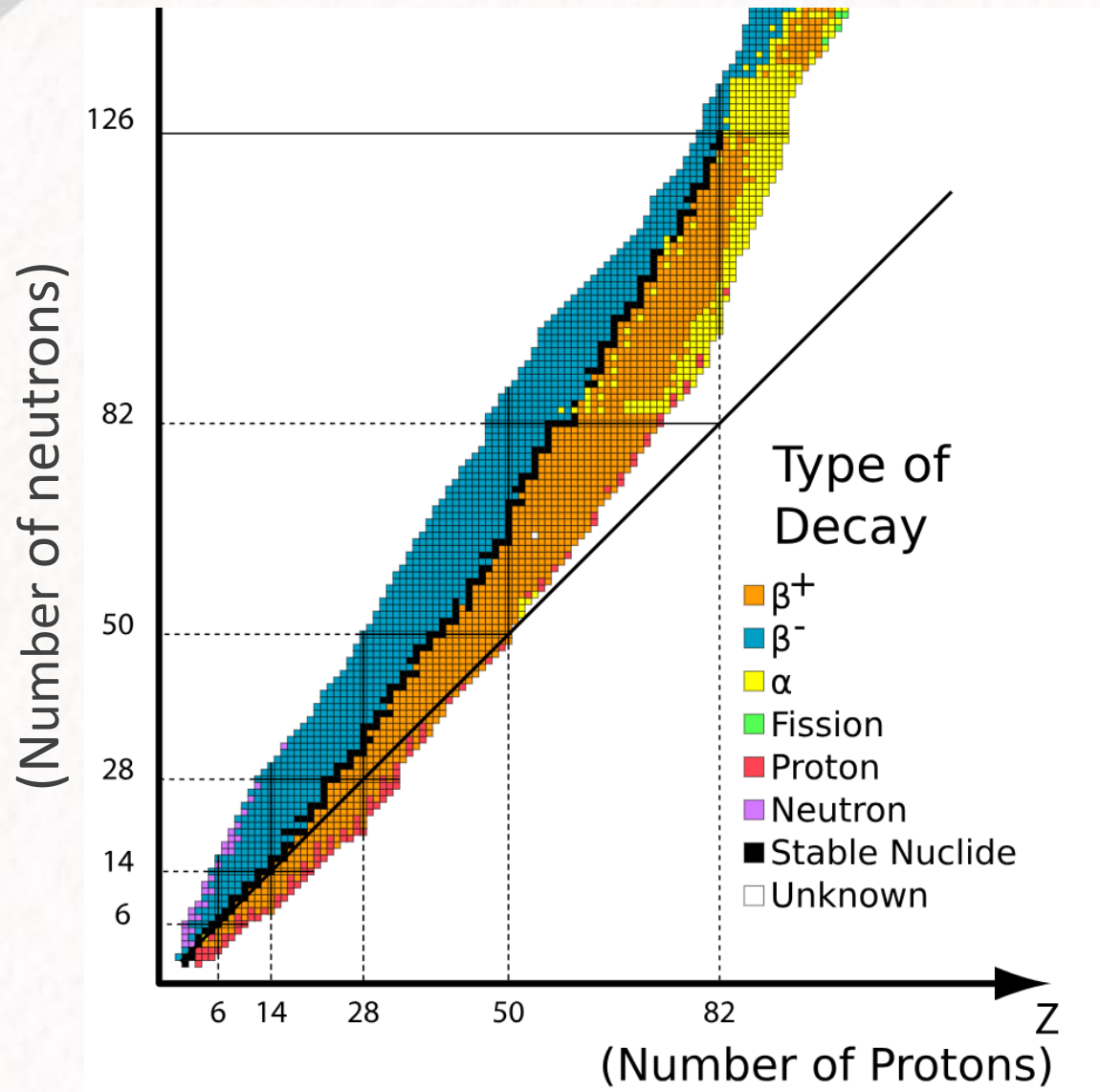
3. Radioaktivitas



Time required for the amount of the radionuclides to reduce to half = (physical) half-life

- **Radioaktivitas** adalah fenomena di mana inti atom yang tidak stabil (radioisotop) memancarkan radiasi berupa partikel atau gelombang elektromagnetik untuk mencapai kestabilan.
- Setiap radioisotop memiliki waktu paruh tertentu, tidak dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti suhu, tekanan dll.
- Ada radioisotop alam (U-238, Ra-226, K-40, C-14 dll) dan ada radioisotop buatan (F-18, Mo-99, Tc-99m, I-131, Lu-177 dll)

Source: <https://www.newworldencyclopedia.org/>

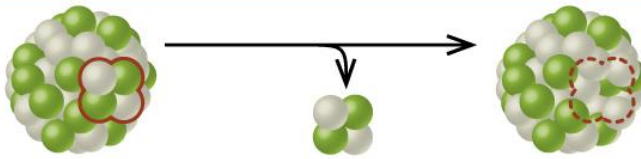
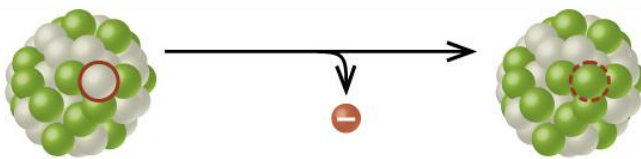
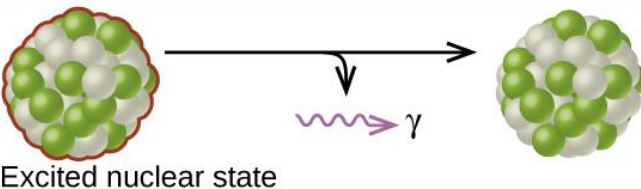
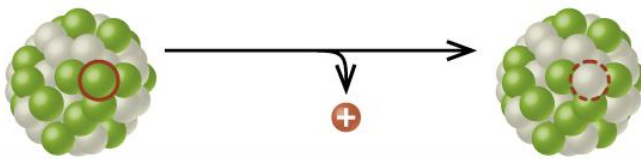
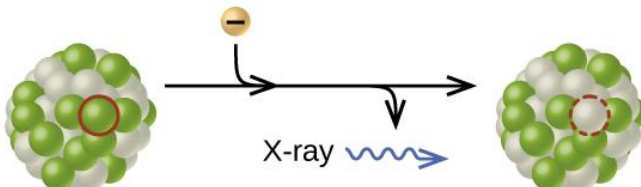


kestabilan inti atom

- ✓ Proton dan neutron dalam inti atom saling terikat oleh gaya nuklir kuat, yang mengatasi tolakan elektrostatis antar proton.
- ✓ Inti atom akan stabil jika perbandingan neutron dan proton memiliki nilai tertentu.
- ✓ Nuklida yang diluar pita kestabilan inti atom (kelebihan proton atau kelebihan neutron) maka akan meluruh mendekati ke pita kestabilan tersebut.

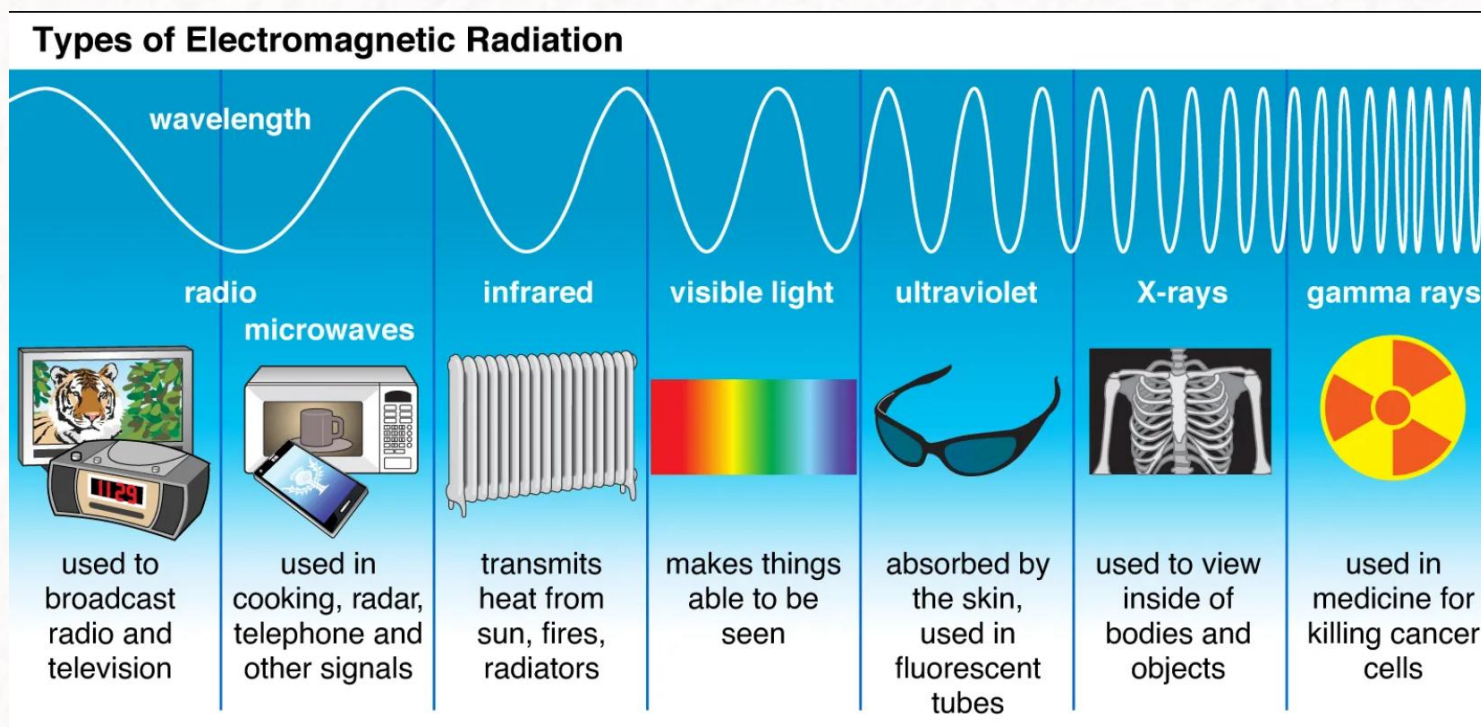
Radioaktivitas (2)

Jenis jenis peluruhan inti atom

Type	Nuclear equation	Representation	Change in mass/atomic numbers
Alpha decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}Y$		A: decrease by 4 Z: decrease by 2
Beta decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^{A}_{Z+1}Y$		A: unchanged Z: increase by 1
Gamma decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_0\gamma + {}^A_ZY$	 Excited nuclear state	A: unchanged Z: unchanged
Positron emission	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{+1}e + {}^{A}_{Z-1}Y$		A: unchanged Z: decrease by 1
Electron capture	${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \gamma$	 X-ray	A: unchanged Z: decrease by 1

Source: <https://wou.edu/chemistry/courses/online-chemistry-textbooks/>

Gelombang elektromagnetik



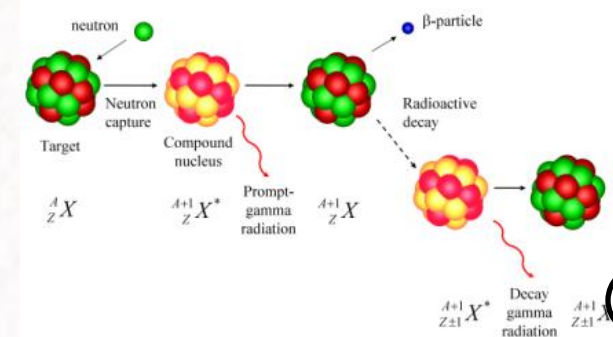
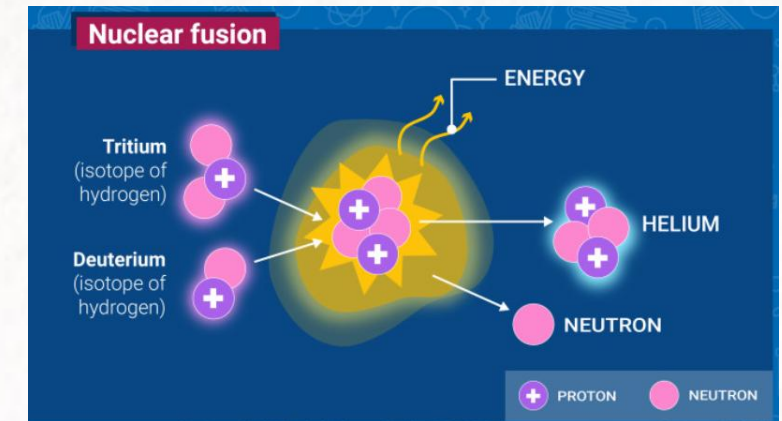
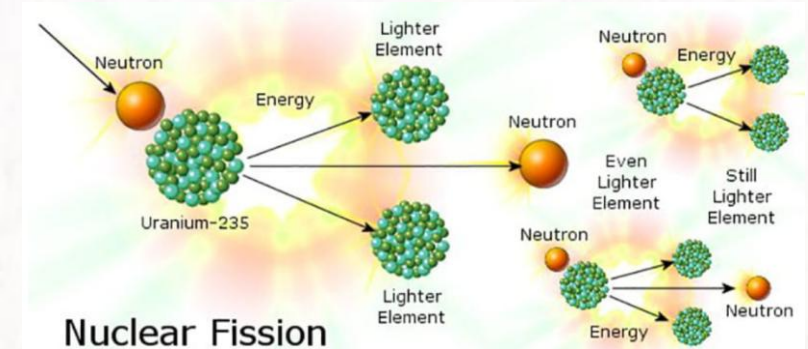
Sumber: <https://cdn.britannica.com/>

Gelombang elektromagnetik memiliki spektrum yang luas. Di dalamnya terdapat **sinar-X** dan **sinar gamma** yang merupakan radiasi pengion.

4. Reaksi nuklir dan pemanfaatannya

Jenis-jenis reaksi nuklir

1. **Peluruhan inti atom** → diagnosis dan terapi bidang kesehatan, sterilisasi alkes, perunut radioaktif dan sumber radiasi di industry, pemuliaan tanaman, pengawetan pangan dll
2. **Fisi** (pembelahan inti berat U-235, Pu-239, U-233) → PLTN dan **produksi radioisotop**.
3. **Fusi** (penggabungan inti ringan) → matahari dan bintang.
4. **Penangkapan neutron** (**produksi radioisotop** menggunakan reactor nuklir)
5. **Transmutasi** (perubahan unsur) → neutron transmutation doping (silicon doping Si diubah menjadi P), **Produksi radioisotop menggunakan siklotron**
6. **Photonuclear** (reaksi nuklir oleh sinar gamma) → produksi radioisotop melalui reaksi (γ, n)
7. **Reaksi spalasi** (pecahnya inti atom karena partikel energi sangat tinggi) → sumber netron, **produksi radioisotop**.



Contoh produksi radioisotop menggunakan reaktor

No	Radioisotop	Waku paruh	Reaksi nuklir
1	Mo-99 (fisi dan aktivasi netron)	66 jam	$^{235}\text{U}(n,f)^{99}\text{Mo}$ $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$
2	Iodine-131 (I-131)	8.0 hari	$^{130}\text{Te}(n,\gamma)^{131}\text{Te} \rightarrow ^{131}\text{I}$
3	Samarium-153	46.3 jam	$^{152}\text{Sm}(n,\gamma)^{153}\text{Sm}$
4	Lutetium-177	6.7 hari	$^{176}\text{Lu}(n,\gamma)^{177}\text{Lu}$ $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$
5	Phosphorus-32 (P-32)	14.3 hari	$^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$
6	Gold-198 (Au-198)	2.7 hari	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$
7	Irridium-192 (Ir-192)	73.8 hari	$^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir}$
8	Iodine-125 (I-125)	59.5 hari	$^{124}\text{Xe}(n,\gamma)^{125}\text{Xe} \rightarrow ^{125}\text{I}$

Contoh produksi Radioisotop menggunakan siklotron

Radionuclide	Half-life	Reaction	Energy (MeV)
Tc-99m	6.0 h	$^{100}\text{Mo}(p, 2n)$	30
I-123	13.1 h	$^{124}\text{Xe}(p, 2n)^{123}\text{Cs}$	27
		$^{124}\text{Xe}(p, pn)^{123}\text{Xe}$	
		$^{124}\text{Xe}(p, 2pn)^{123}\text{I}$	
		$^{123}\text{Te}(p, n)^{123}\text{I}$	15
		$^{124}\text{Te}(p, 2n)^{123}\text{I}$	25
Tl-201	73.1 h	$^{203}\text{Tl}(p, 3n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$	29
C-11	20.3 min	$^{14}\text{N}(p, \alpha)$	11–19
		$^{11}\text{B}(p, n)$	10
F-18	110 min	$^{18}\text{O}(p, n)$	15
		$^{20}\text{Ne}(d, \alpha)$	14
		$^{\text{nat}}\text{Ne}(p, X)$	40
Cu-64	12.7 h	$^{64}\text{Ni}(p, n)$	15
		$^{68}\text{Zn}(p, \alpha n)$	30
		$^{\text{nat}}\text{Zn}(d, \alpha xn)$	19
		$^{\text{nat}}\text{Zn}(d, 2pxn)$	19
I-124	4.14 d	$^{124}\text{Te}(p, n)$	13
		$^{125}\text{Te}(p, 2n)$	25

Reaksi-reaksi nuklir untuk produksi F-18

Nuclear reaction	Useful energy range (MeV)	Natural abundance (%)	References
$^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$	14–4	0.2	[2.18.1]
$^{16}\text{O}({}^3\text{He}, \text{p})^{18}\text{F}$	15–1	99.7	[2.18.2]
$^{16}\text{O}({}^3\text{He}, \text{n})^{18}\text{Ne}: {}^{18}\text{F}$	40–15	99.7	[2.18.3]
$^{16}\text{O}(\alpha, \text{np})^{18}\text{F}$	40–20	99.7	[2.18.4]
$^{16}\text{O}(\alpha, 2\text{n})^{18}\text{Ne}: {}^{18}\text{F}$	52–10	99.7	[2.18.5]
$^{20}\text{Ne}(\text{d}, \alpha)^{18}\text{F}$	15–0	90.5	[2.18.6]
$^{20}\text{Ne}(\text{p}, 2\text{pn})^{18}\text{F}$	40–30	90.5	[2.18.7, 2.18.8]
$^{20}\text{Ne}({}^3\text{He}, \alpha\text{p})^{18}\text{F}$	40–10	90.5	[2.18.9]

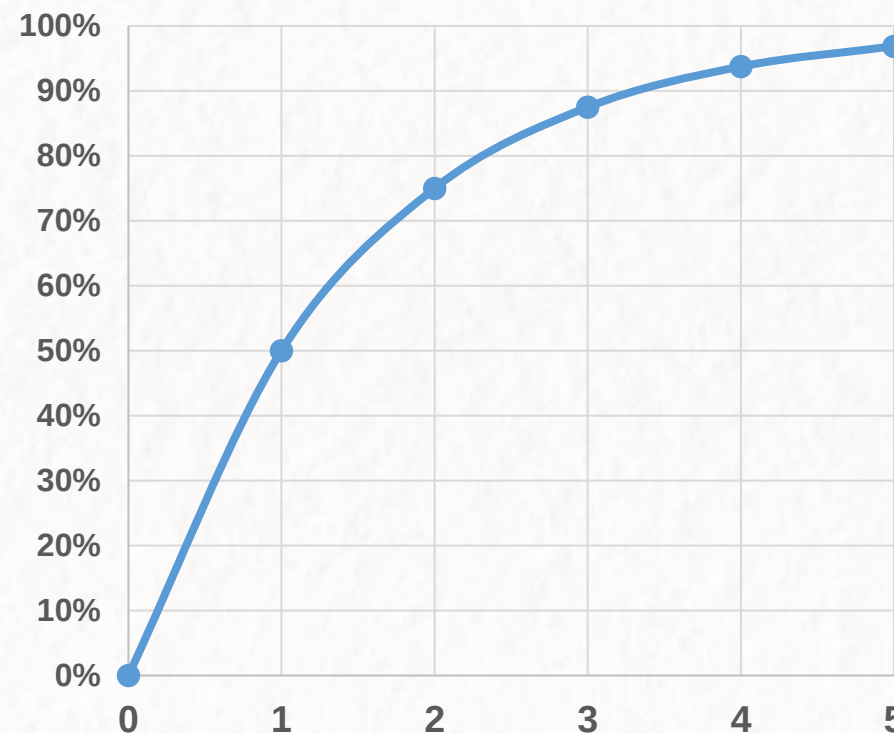
- ❖ Ada beberapa reaksi nuklir untuk produksi F-18. Untk saat ini, reaksi paling atas dinilai paling optimal untuk produksi rutin
- ❖ Seiring dengan kemajuan teknologi, sangat mungkin ada reaksi lain yang lebih optimal / ekonomis.

Aktivitas hasil reaksi nuklir

Rumus umum aktivitas radioisotop hasil reaksi nuklir:

$$A = R \cdot (1 - e^{-\lambda t})$$

- A = Aktivitas radioisotop (**Bq**)
- R = Laju produksi radioisotop (**atom radioaktif per detik**)
- λ = Konstanta peluruhan ($\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$)
- t = Waktu irradiasi (**detik**)
- $T_{1/2}$ = Waktu paruh radioisotop



Aktivitas radioisotop yang dihasilkan sebagai fungsi waktu paruh radioisotop. 100% adalah aktivitas maksimum. Ini penting untuk menentukan lama waktu iradiasi

In the simplest case, where the cross-section is assumed to be constant, the rate of production is given by:

$$R = n_T I \sigma$$

The cross-section is always a function of energy, as has been shown in the previous section. If we use this more exact expression, then the equation becomes:

$$R = n_T I \int_{E_s}^{E_0} \frac{\sigma(E)}{dE/dx} dE$$

where

- R is the number of nuclei formed per second;
- n_T is the target thickness in nuclei/cm²;
- I is the incident particle flux per second and is related to the beam current;
- σ is the reaction cross-section, or probability of interaction, expressed in cm² and is a function of energy;
- E is the energy of the incident particles;

Reaction cross section

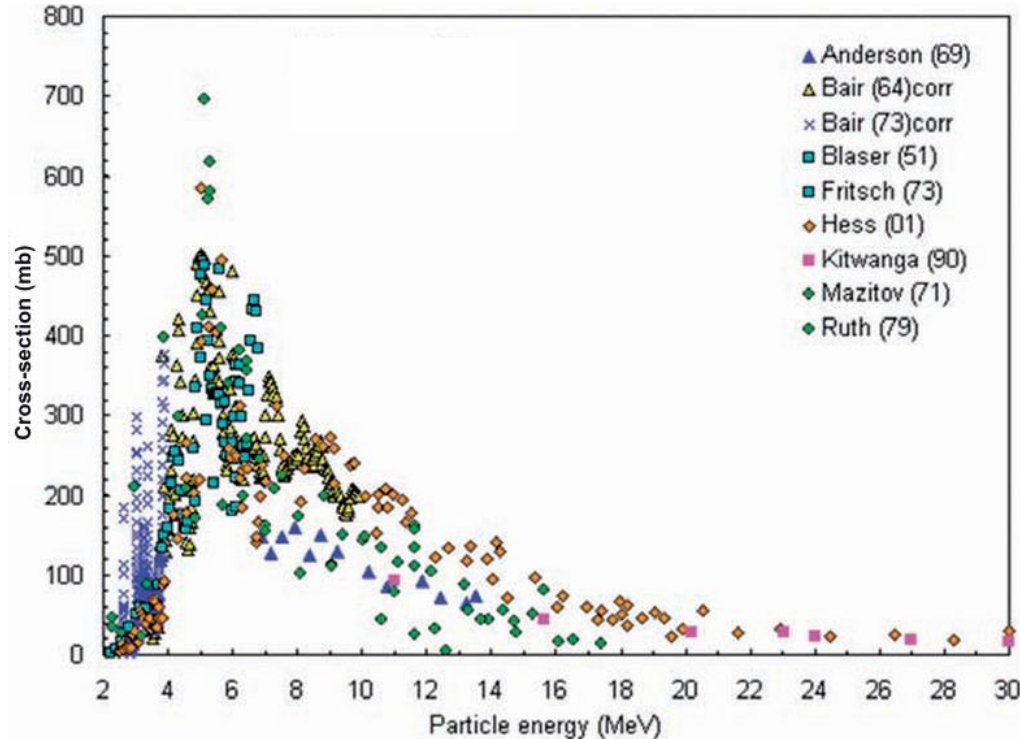


FIG. 2.18.1. Excitation function for the $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$ reaction.

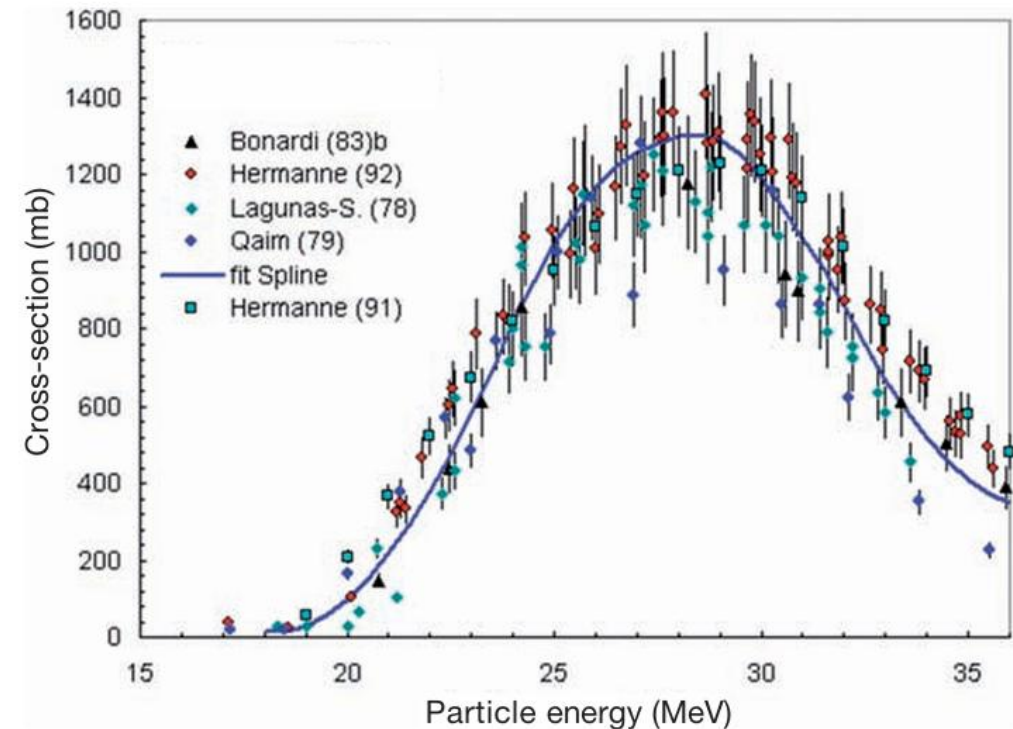
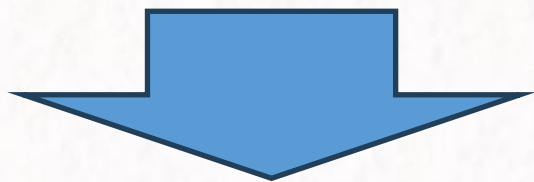


FIG. 2.40.1. Excitation function for the $^{203}\text{Tl}(p, 3n)^{201}\text{Pb}$ reaction.

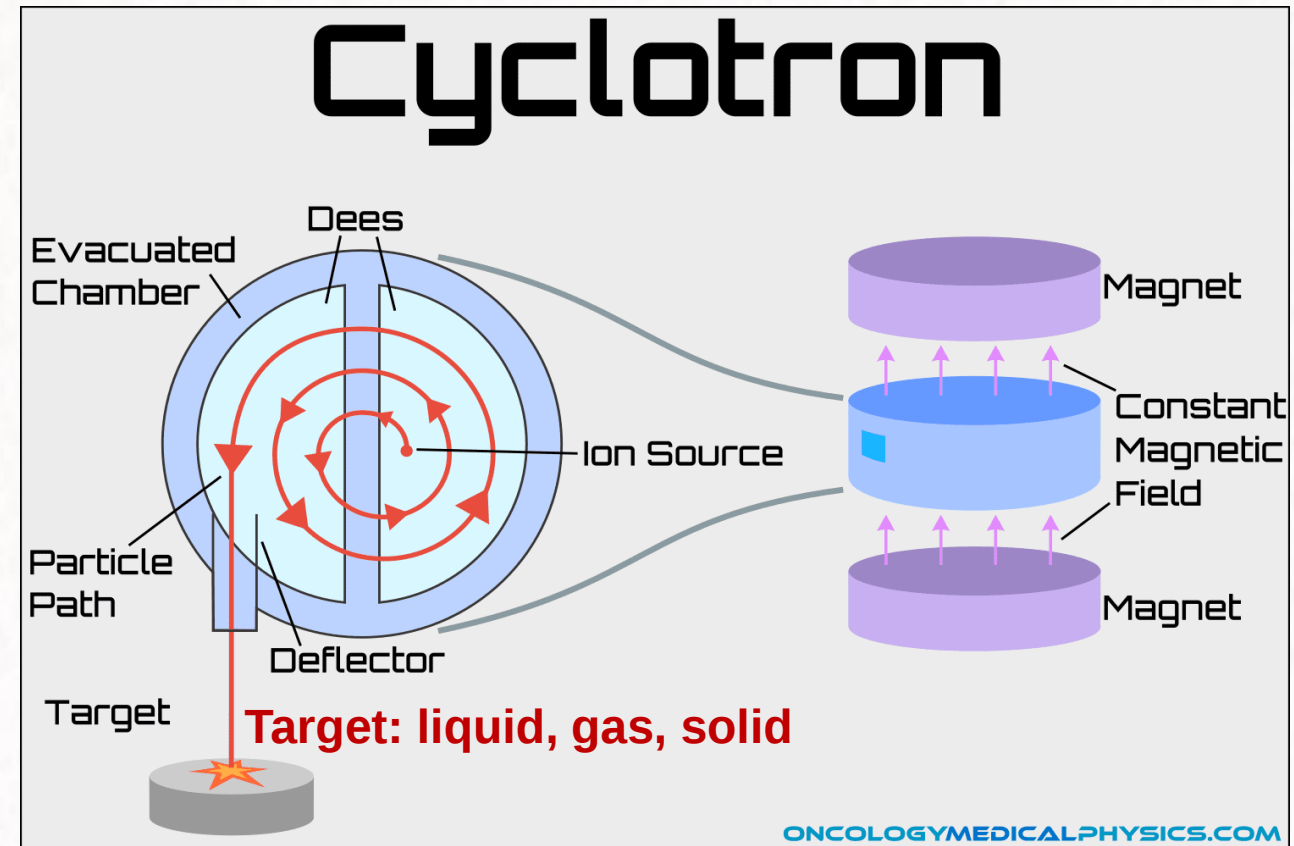
- ❖ Reaction cross section merupakan fungsi dari energi partikel. Ada reaksi yang dapat dilakukan pada energi rendah (misalnya $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$ dan ada yang memerlukan energi tinggi (misalnya $^{203}\text{Tl}(p, 3n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$). Ini penting dalam pemilihan siklotron (energi partikel yang dihasilkan).

5. Teknik iradiasi siklotron

Siklotron adalah akselerator partikel untuk mempercepat partikel bermuatan (proton atau ion) ke energi tinggi dalam lintasan melingkar dengan menggunakan medan magnet dan medan listrik bolak-balik.



Iradiasi proton atau ion berenergi tinggi



source: <https://oncologymedicalphysics.com/>

Teknik iradiasi siklotron (2)



- ❖ Sebuah mesin siklotron dapat digunakan untuk iradiasi di beberapa beam port.

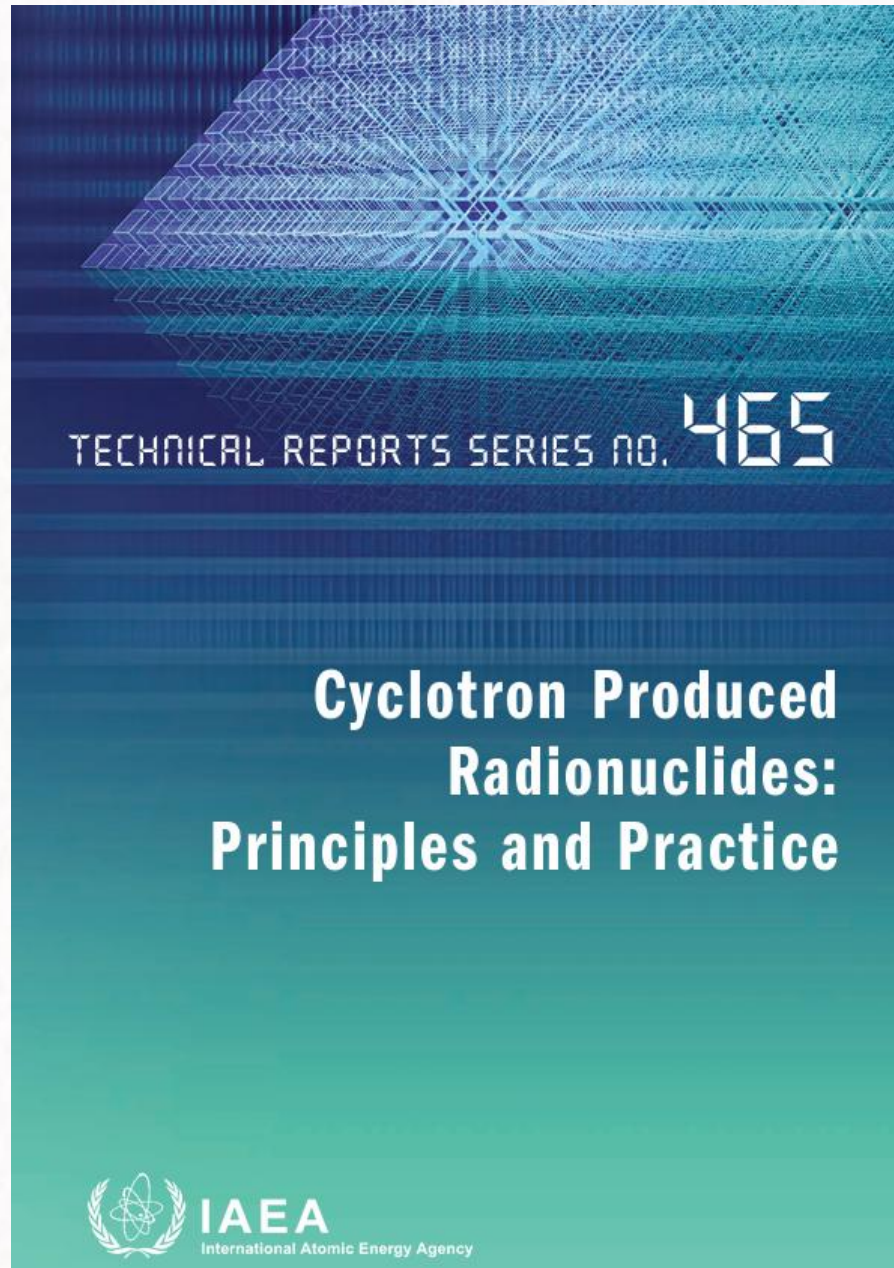
PEMILIHAN SIKLOTRON

Dalam memilih siklotron, berikut adalah diantara yang perlu dipastikan sesuai dengan rencana pemanfaatan:

-  1. Energi Partikel (Beam Energy)
-  2. Arus Berkas (Beam Current)
-  3. Jenis Partikel
-  4. Jumlah Port Ekstraksi (Beam Line)
-  5. Sistem Pendinginan
-  6. Sistem keselamatan radiasi



Pustaka penting (1)



CONTENTS

CHAPTER 1: INTRODUCTION	1
1.1. Scope of the book	1
1.2. Uses of accelerator produced radioisotopes	2
1.3. Accelerators	2
1.4. Theory of radioisotope production	3
1.5. Targetry	4
1.6. Target preparation and irradiation	4
1.7. Target processing and material recovery	5
1.8. Future trends	5
References to Chapter 1	5
CHAPTER 2: USES OF ACCELERATOR PRODUCED RADIOISOTOPES	7
2.1. Introduction	7
2.2. Radioisotope/radionuclide production	9
2.2.1. Specific activity	9
2.3. Radioactive tracers	11
2.4. Medical applications	13
2.4.1. Historical background	13
2.4.2. Radionuclides for imaging	14
2.4.3. Radionuclides for therapy	18
2.5. Radiopharmaceuticals	19
2.6. Industrial applications	20
2.6.1. Material processing and quality control	21
2.6.2. Instruments using radioisotopes	21
2.6.3. Consumer products and services	21
2.7. Environmental/biological applications	22
2.7.1. Agricultural applications	22
2.7.2. Insect control	23
2.7.3. Plant physiology	23
2.7.4. Water resources	23
2.8. Basic chemical and physical science background	24
2.9. Summary	25
References to Chapter 2	28

Pustaka penting (2)

TECHNICAL REPORTS SERIES NO. 468

Cyclotron Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods

CONTENTS

CHAPTER 1. PRINCIPLES OF PRODUCTION OF RADIOISOTOPES USING CYCLOTRONS

1.1. INTRODUCTION	1
1.2. CYCLOTRONS FOR RADIOISOTOPE PRODUCTION	2
1.3. NUCLEAR REACTIONS	4
1.3.1. Coulomb barrier	5
1.3.2. Q value	5
1.3.3. Nuclear reaction cross-section	8
1.4. CALCULATION OF RADIOISOTOPE YIELD	8
1.4.1. Saturation factor	11
1.4.2. Nomenclature	13
1.5. CYCLOTRON TARGETRY	14
1.6. LABORATORY FACILITIES FOR RADIOISOTOPE PRODUCTION	15
1.6.1. Laboratory design	15
1.6.2. Airflow	16
1.6.3. Radiation level gradient	16
1.6.4. Workflow	17
1.7. PACKAGES AND TRANSPORTATION OF RADIOISOTOPES	18
1.8. CONCLUSION	20
REFERENCES TO CHAPTER 1	20

CHAPTER 2. PHYSICAL CHARACTERISTICS AND PRODUCTION DETAILS OF ISOTOPES

2.1. ACTINIUM-225	24
2.2. ARSENIC-73	28
2.3. ARSENIC-74	31
2.4. ASTATINE-211	33

2.9. BROMINE-77	58
2.10. CADMIUM-109	62
2.11. CARBON-11	66
2.12. CHLORINE-34m	71
2.13. COBALT-55	76
2.14. COBALT-57	82
2.15. COPPER-61	88
2.16. COPPER-64	92
2.17. COPPER-67	100
2.18. FLUORINE-18	106
2.19. GALLIUM-67	116
2.20. GERMANIUM-68	122
2.21. INDIUM-110	131
2.22. INDIUM-111	137
2.23. INDIUM-114m	144
2.24. IODINE-120g	147
2.25. IODINE-121	152
2.26. IODINE-123	155
2.27. IODINE-124	167
2.28. IRON-52	175
2.29. IRON-55	179
2.30. RUBIDIUM-81/KRYPTON-81m GENERATOR SYSTEM	182
2.31. LEAD-201	187
2.32. LEAD-203	188
2.33. MERCURY-195m	191
2.34. NITROGEN-13	196
2.35. OXYGEN-15	203
2.36. PALLADIUM-103	209
2.37. SODIUM-22	216
2.38. STRONTIUM-82/RUBIDIUM-82 GENERATOR SYSTEM	222
2.39. TECHNETIUM-94m	227
2.40. THALLIUM-201	230
2.41. TUNGSTEN-178	235
2.42. VANADIUM-48	237
2.43. XENON-122	239

6. Kimia Radiasi

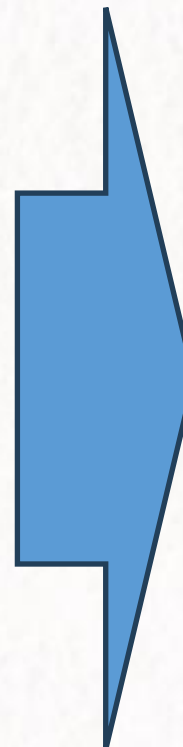
Radiasi Energi Tinggi

Gelombang elektromagnetik

1. Sinar-X
2. Sinar Gamma

Partikel

1. Netron (n)
2. Elektron (e)
3. Proton (p)
4. Deuteron (d)
5. Alpha (α)
6. dll



Kimia Nuklir: Perubahan pada inti atom

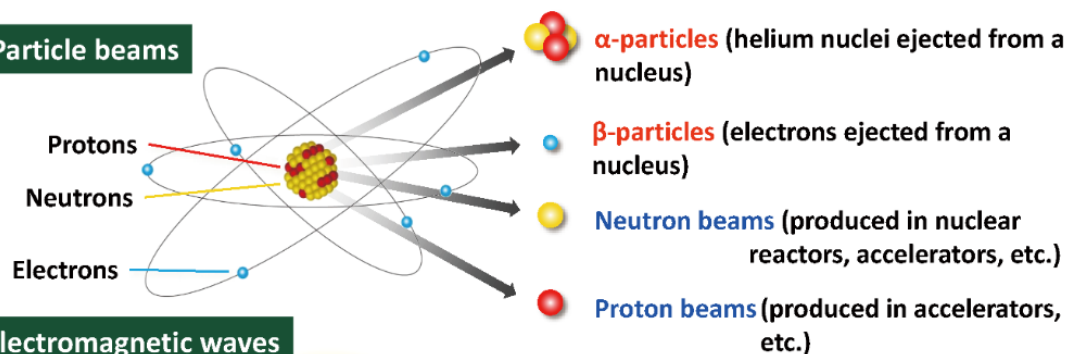
Kimia Radiasi:
Perubahan pada kulit atom (elektron)

Kimia Radiasi

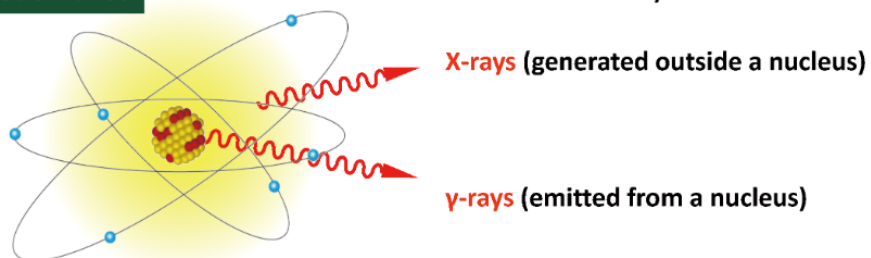
Radiation Types of Ionizing Radiation

Ionizing radiation Radiation that causes ionization

Particle beams



Electromagnetic waves



Perubahan fisika



Perubahan kimia (ikatan kimia dan konfigurasi elektron)



Perubahan biologi



Manfaat & risiko

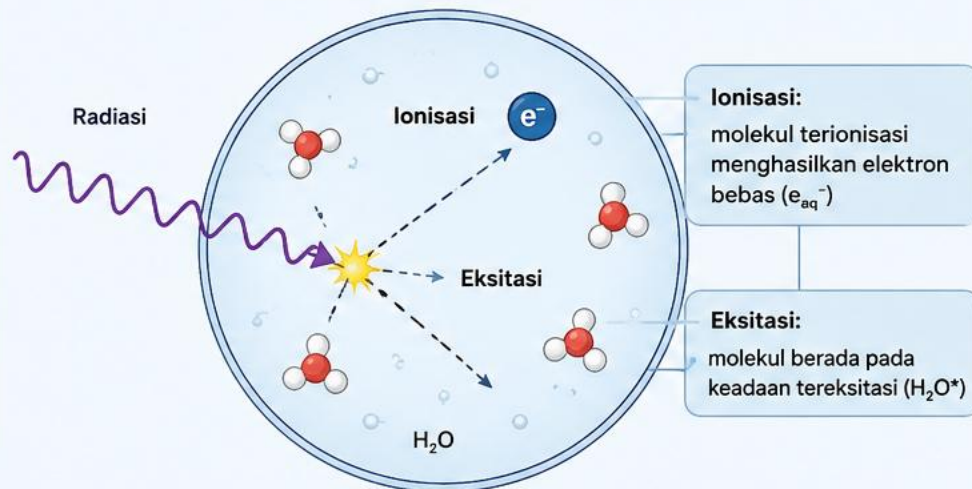
KIMIA RADIASI

Interaksi Radiasi dengan Materi dan Pembentukan Spesi Reaktif

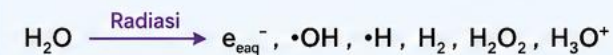
1. SUMBER RADIASI

-  Sinar gamma (γ) dari radioisotop
-  Partikel beta (β) dari radioisotop
-  Neutron dari reaktor
-  Sinar-X dari mesin X-ray

2. INTERAKSI RADIASI DENGAN MATERI



3. RADIOLISIS AIR (Contoh)

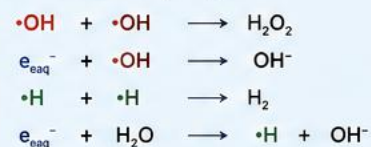


Spesi Primer

- e_{aq}^- : elektron terhidrasi (pereduktor kuat)
- $\cdot OH$: radikal hidroksil (pengoksidasi kuat)
- $\cdot H$: atom hidrogen (pereduktor kuat)
- H_2 : hidrogen molekuler
- H_2O_2 : hidrogen peroksida
- H_3O^+ : ion hidronium

4. REAKSI LANJUTAN (Spesi Sekunder)

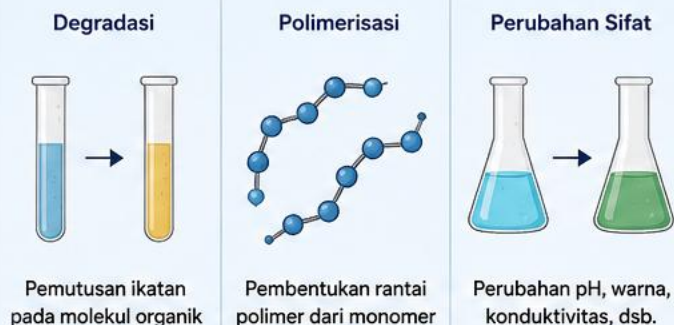
Reaksi antara spesi primer



Reaksi dengan zat terlarut (RH)



5. EFEK KIMIA RADIASI



6. APLIKASI KIMIA RADIASI



KETERANGAN SIMBOL

-  Radiasi
-  Elektron
-  Molekul Air
-  Energi yang diserap
-  Elektron terhidrasi
- $\cdot OH$ Radikal hidroksil
-  Atom hidrogen

Terima kasih



B.J. Habibie Building
Jl. M.H. Thamrin 8, Jakarta 10340, Indonesia



www.brin.go.id



Brin Indonesia



@brin_indonesia



@brin.indonesia



Bridging Sciences
Empowering Talents

@dpk brin