



BRIN
BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

PENGUKURAN BAHAN NUKLIR

Erlina Noerpitasari, S.Si. M.Si

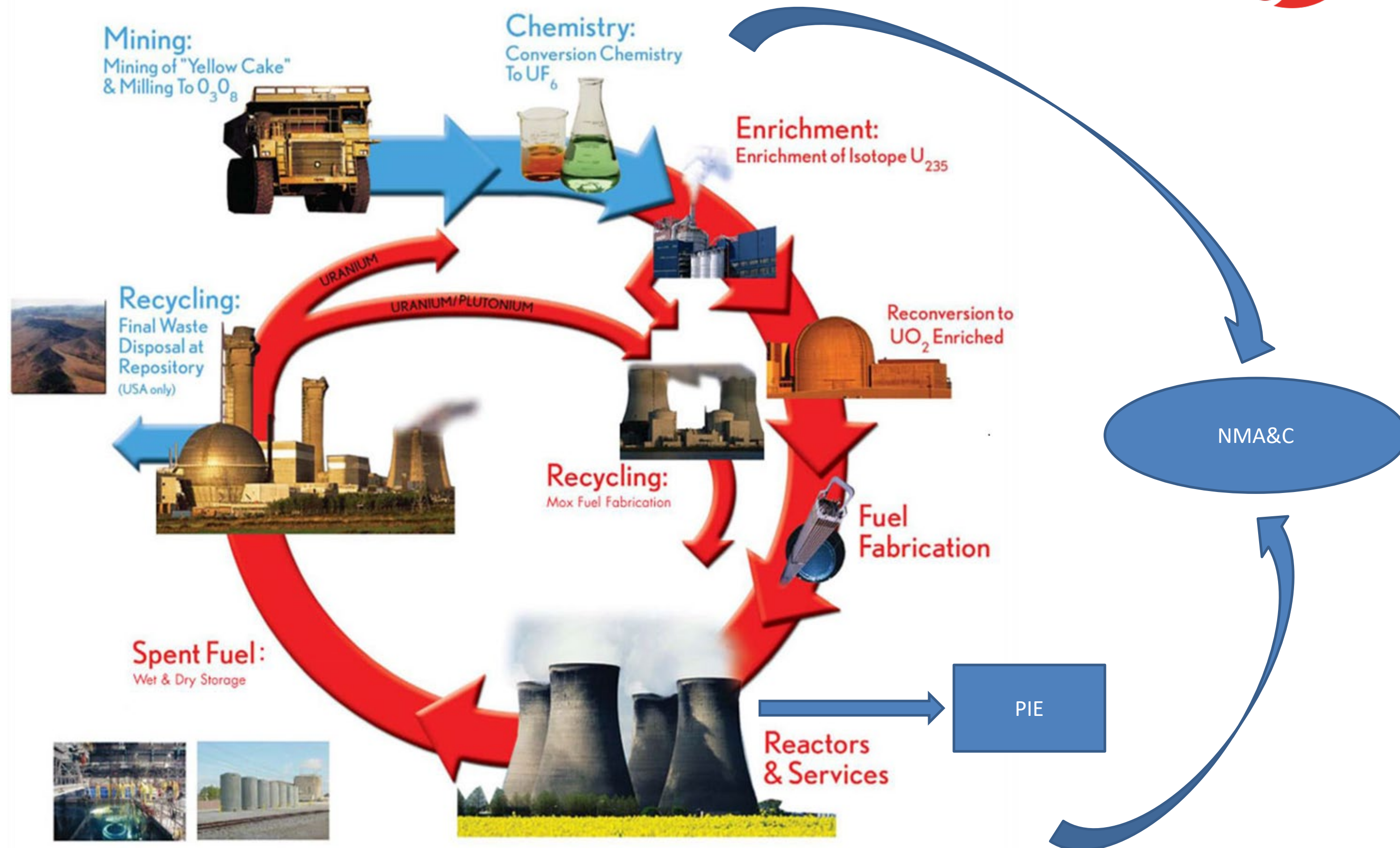
Tujuan Instruksional Umum

Peserta memahami dan mampu menjelaskan tentang metode merusak (*Destructive Assay*) dan metode tidak merusak (*Non Destructive Assay*) yang dapat digunakan untuk melakukan pengukuran bahan nuklir dan mampu melakukan pengukuran bahan nuklir di tempat kerjanya.

Tujuan Instruksional Khusus

- Peserta mampu menjelaskan tentang sifat bahan nuklir.
- Peserta mampu menjelaskan tentang pengukuran merusak dan pengukuran tidak merusak bahan nuklir.
- Peserta mampu menjelaskan tentang teknik pengukuran bahan nuklir.
- Peserta mampu melaksanakan pengukuran bahan nuklir di fasilitasnya.

PENDAHULUAN



Manfaat Pengukuran Bahan Nuklir

Fasilitas

- Kedapatulang BN dalam penggunaannya
- Proses kontrol kegiatan dan produk
- Jaminan kualitas kegiatan dan produk

Negara

- Pertimbangan lingkungan
- Seifgard BN (BAPETEN)

IAEA

- Seifgard Bahan Nuklir (IAEA)

Metode Pengukuran
Tepat

Sesuai dengan Peralatan
SDM

Hasil Analisis

Cepat dan Akurat

Standar SOP

Seifgard BN dikenakan terhadap:

- Bahan yang dapat mengalami pembelahan
- Bahan yang dapat belah: U, Th dan Pu
- Golongan aktinida yang mempunyai beberapa tingkat valensi: U^{+4} dan U^{+6} ; Th^{+2} dan Th^{+4} ; Pu^{+3} dan Pu^{+4}
- Dapat membentuk kompleks dengan asam anorganik maupun organik, seperti asam nitrat dan arsenazo
- Berdasarkan sifat tersebut dapat ditentukan dengan metode *destructive assay* (DA)

DESTRUCTIVE ASSAY(DA)

- Ketelitian tinggi
- Digunakan untuk pengembangan NDA
- Waktu analisis lebih lama dari NDA
- Sampel kecil
- Menghasilkan limbah

U, Pu, Th

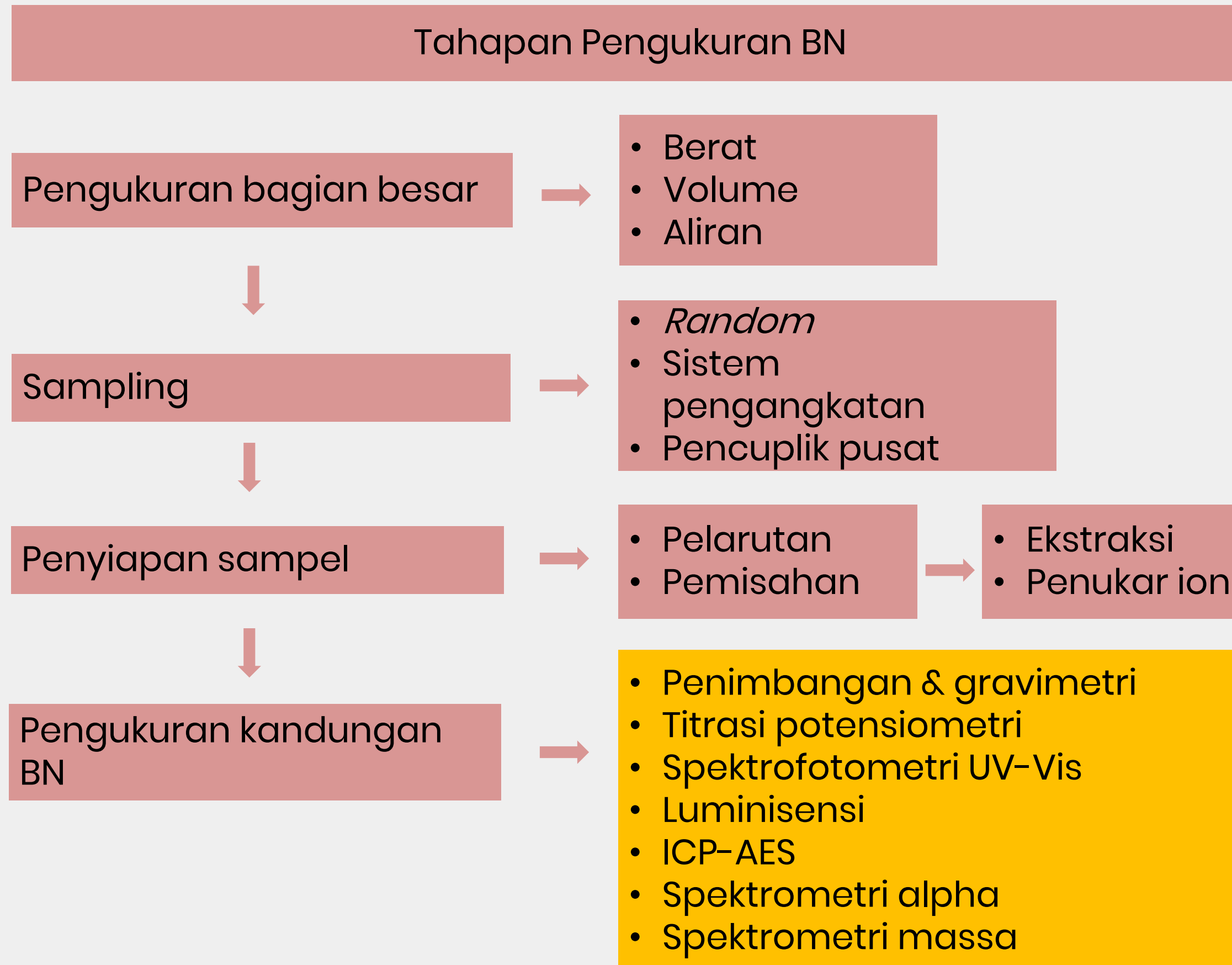
- Inti berat
- Tidak stabil
- Bersifat radioaktif
- Memancarkan radiasi alpha
- Anak luruhnya memancarkan alpha dan beta
- Beberapa peluruhan juga memancarkan radiasi gamma
- Dengan netron dapat mengalami reaksi pembelahan

Berdasarkan sifat tsb, dapat dianalisis secara NDA

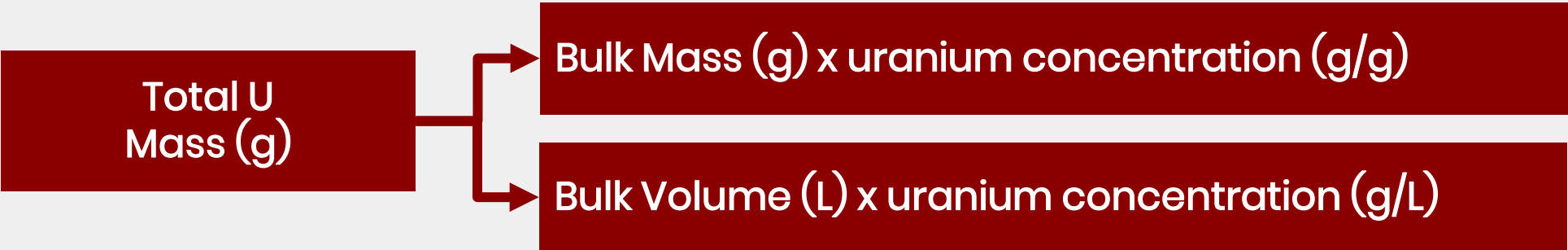
NON DESTRUCTIVE ASSAY(NDA)

- Ketelitian antara 1 s.d. 10%
- Waktu pengukuran 15 s.d. 60 menit
- Memungkinkan untuk mengukur jumlah besar bahan nuklir
- Perlu pembuktian kepresisian relatif pengukuran
- Kalibrasi dengan bahan standar bersertifikat

DESTRUCTIVE ASSAY

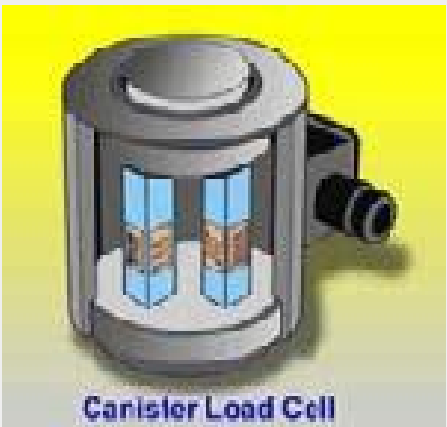


Pengukuran kandungan bahan nuklir dilakukan dgn cara mengukur besaran fisika yg sebanding dgn kandungan bahan nuklir yg ditentukan



PENIMBANGAN BN

- Penimbangan dilakukan terhadap *bulk* BN
- Timbangan dalam keadaan baik
- Timbangan terkalibrasi
- Sesuai dengan range kerja bahan yg ditimbang

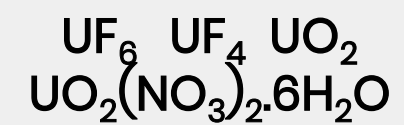


Jenis Timbangan	Strain gauge load cell	Timbangan Elektronik	Timbangan Analitik
Range Penimbangan	1 kg – >100 kg	Bobot ringan s.d 30 kg	s.d. 200 g (menimbang cuplikan)
Kesalahan random (%RSD)	0,1 – 0,01	0,02 – 0,001	0,02 – 0,001
Kesalahan sistematis (%RSD)	2 – 0,01	0,01 – 0,001	0,01 – 0,001

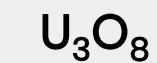


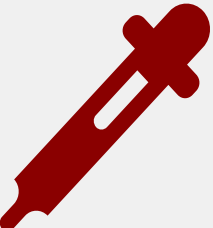
GRAVIMETRI

Metode penentuan uranium 5 – 10 g sampel suatu senyawa yang mengandung uranium dengan total pengotor lebih kecil dari 500 $\mu\text{g/g}$, koreksi pengotor ditentukan dengan ICP-AES/AAS



FURNACE
800 – 900°C





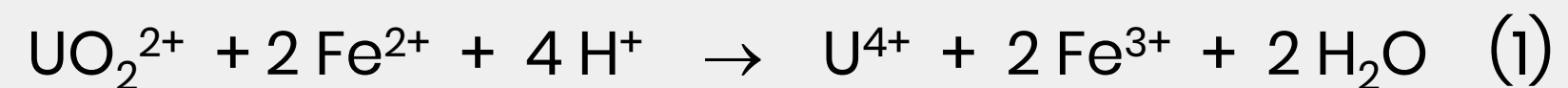
TITRASI POTENSIOMETRI

Metode penentuan kandungan bahan nuklir yg didasarkan pada reaksi redoks:

Metode Davies-Gray

- U(VI) direduksi menjadi U(IV) menggunakan Fe(II) dalam suasana asam fosfat
- Kelebihan ferro dioksidasi oleh asam nitrat dengan adanya katalisator molybdenum
- Kemudian U(IV) dititrasi menggunakan bikromat dengan adanya katalisator vanadium, titik akhir titrasi diamati secara potensiometri menggunakan elektroda platina.

Tahap-tahap reaksi yang terjadi adalah :



Selanjutnya,



$$\text{Kadar } U \text{ (mg)} = \frac{V_t \times N_t \times BA \times U \times F}{2}$$

V_t = volume titran

N_t = normalitas titran

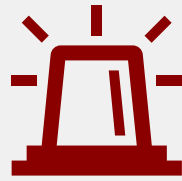
F = faktor koreksi

Penentuan Pu

Plutonium direduksi menjadi Pu(III) dalam elektrolit HCl-asam sulfamat.
Pu(III) dioksidasi menjadi Pu(IV) dengan menggunakan NaH_2PO_4

Ketelitian penentuan dengan metode ini 0,05%
bias antara 0,03 sampai dengan 0,05% RSD

SPEKTROFOTOMETRI & FLUORIMETRI

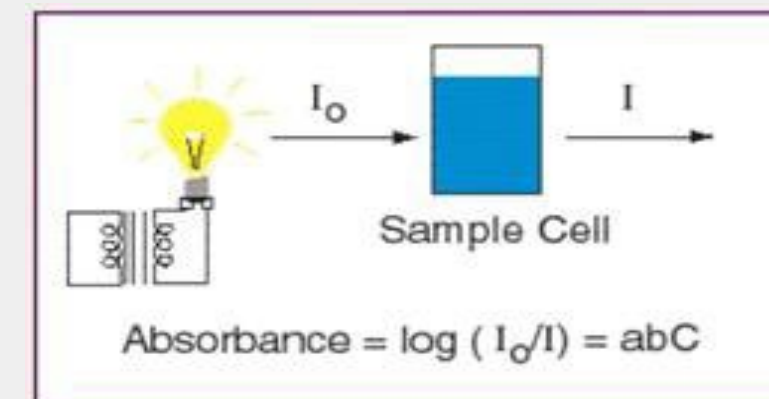


U/Th/Pu + Pengompleks $\longrightarrow$ Senyawa kompleks

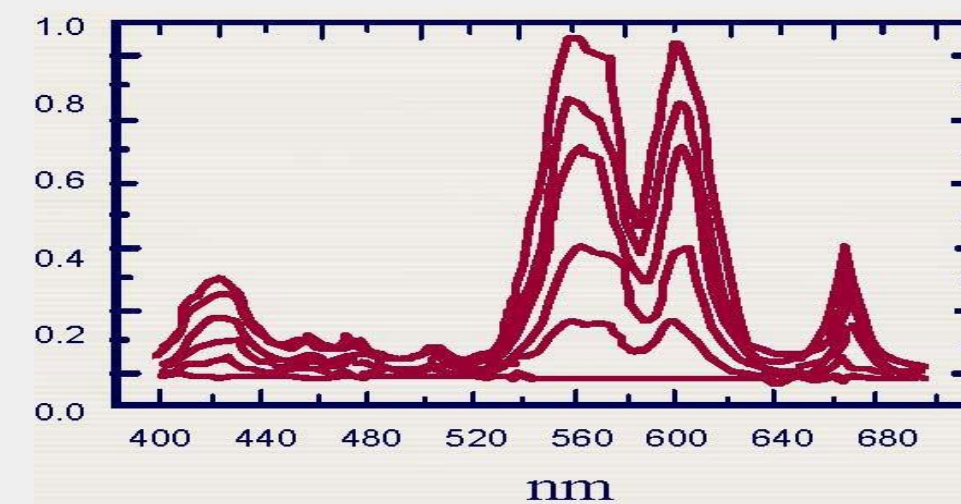
Senyawa organik yg umum digunakan:

Pereaksi	Indeks molar absorbansi
Thiosianat dlm air	3770
Thiosianat dlm aseton	3900
Oxin	3000-6500
Thoronol	16400
Dibenzoilmethane	19000
Arsenazo	22000
1-(2Pyridilazo)-2-napthanol	23000

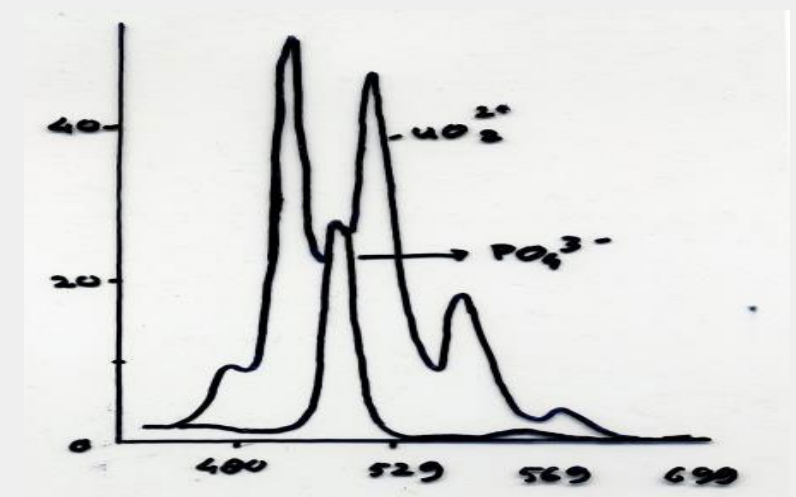
Senyawa anorganik yang umum digunakan: asam nitrat, asam sulfat, asam fosfat



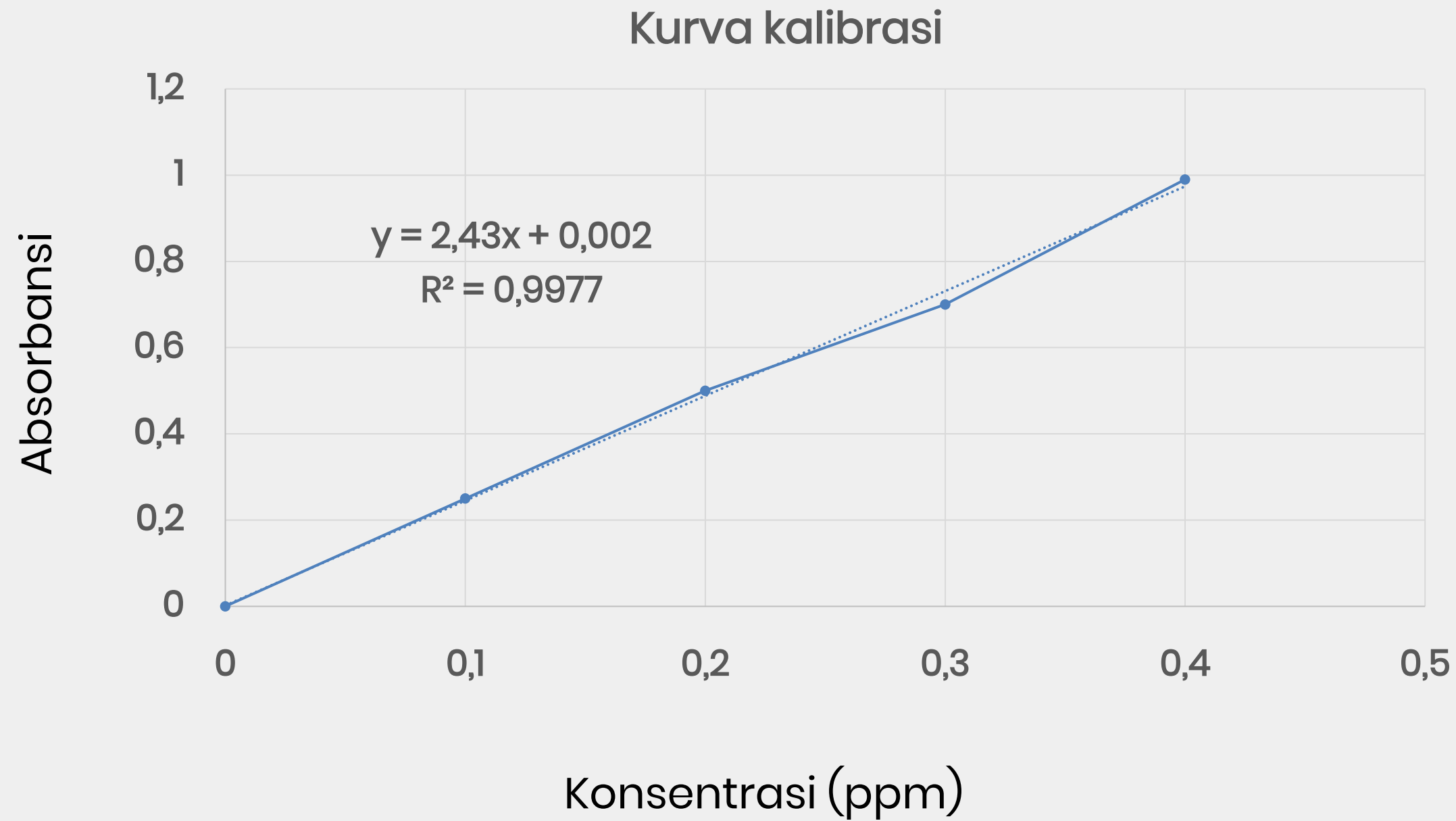
a = absorptivity
b = path length
C = concentration



Spektrum Pu(III) dgn pereaksi 2M HCl



Spektrum fluoresen uranium fosfat

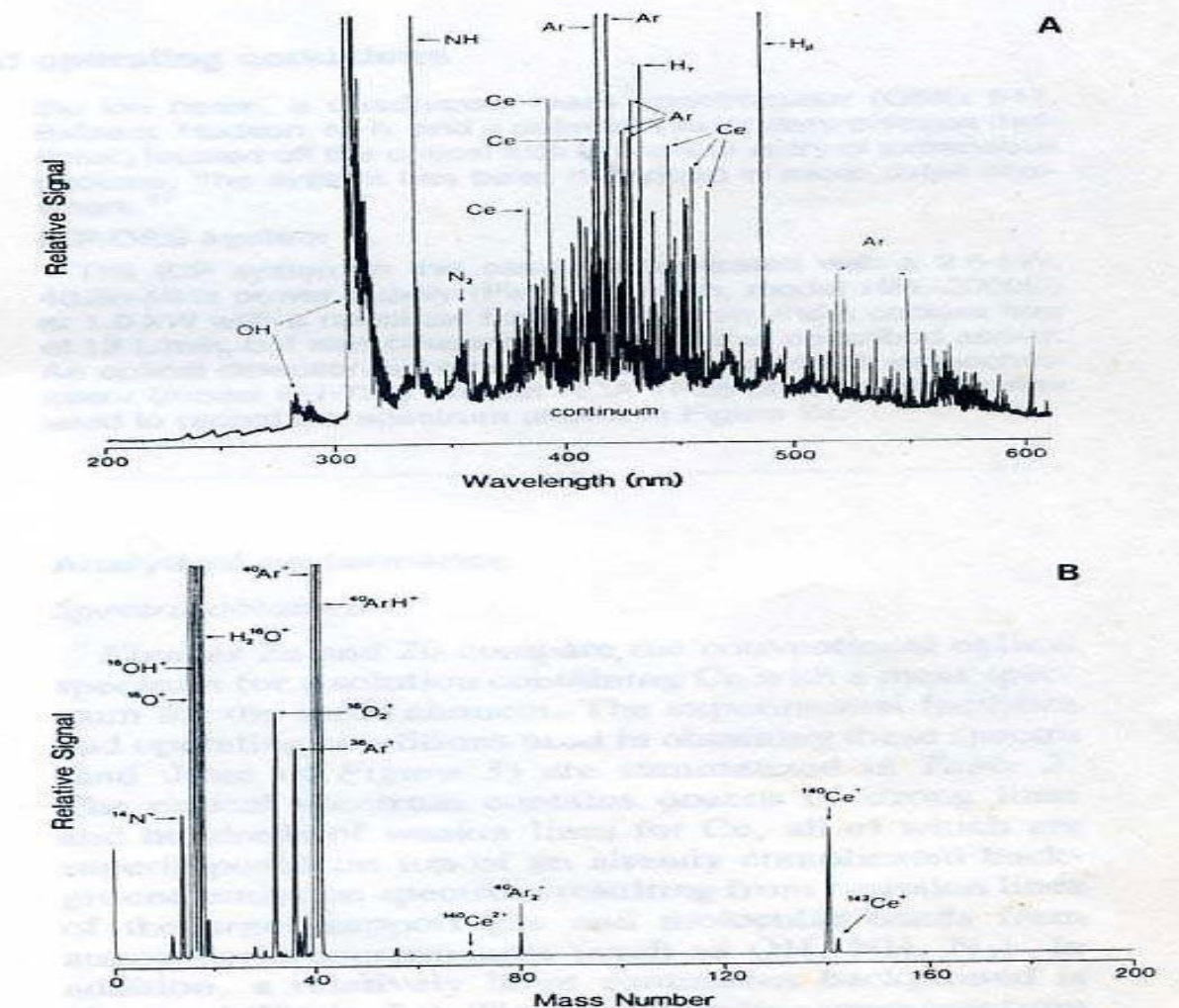
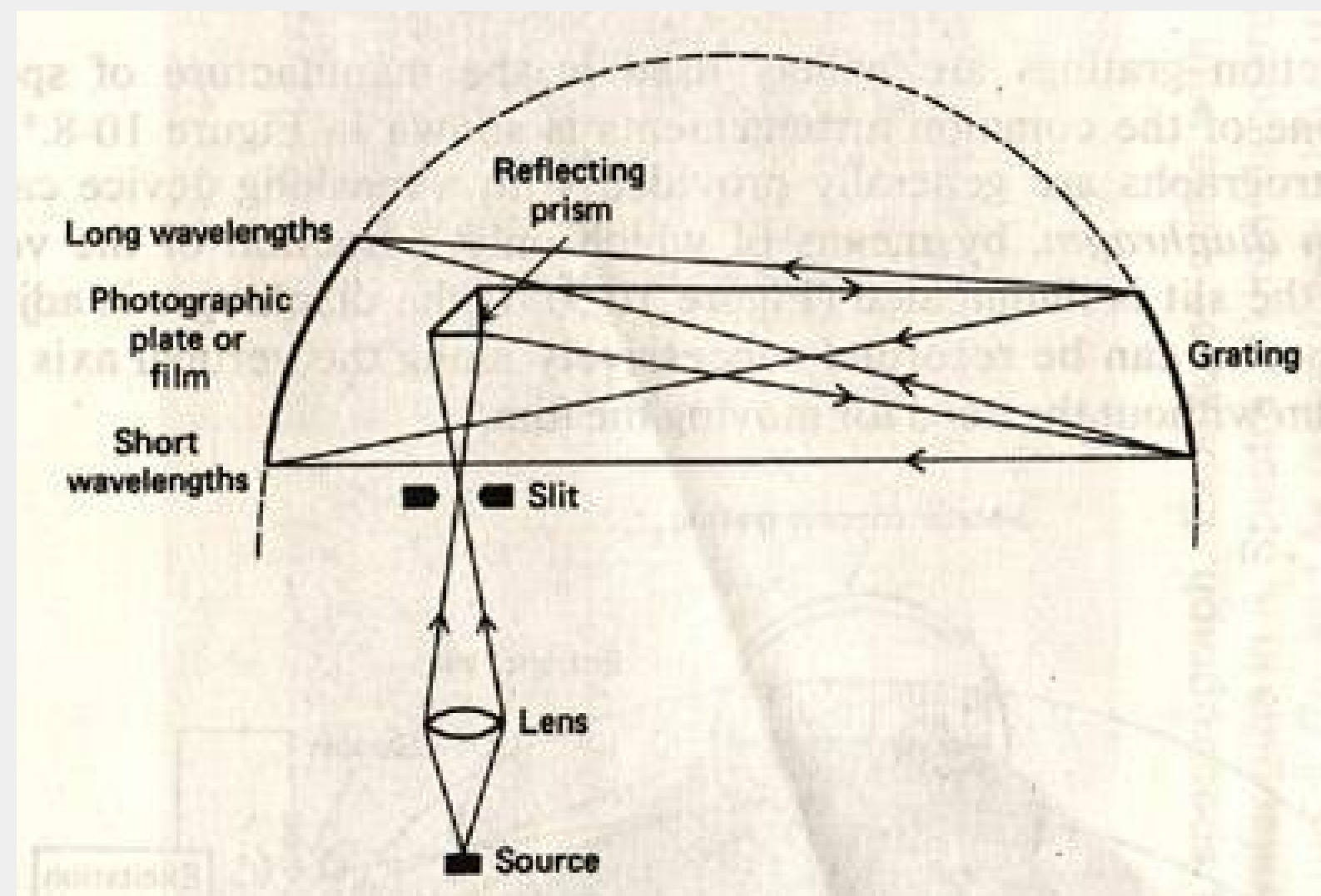


$$\text{Konsentrasi/kadar } (\mu\text{g/g}) = \frac{\text{Kons } (\mu\text{g/ml}) \times \text{Vol(ml)} \times \text{fp}}{\text{Berat (g)}}$$

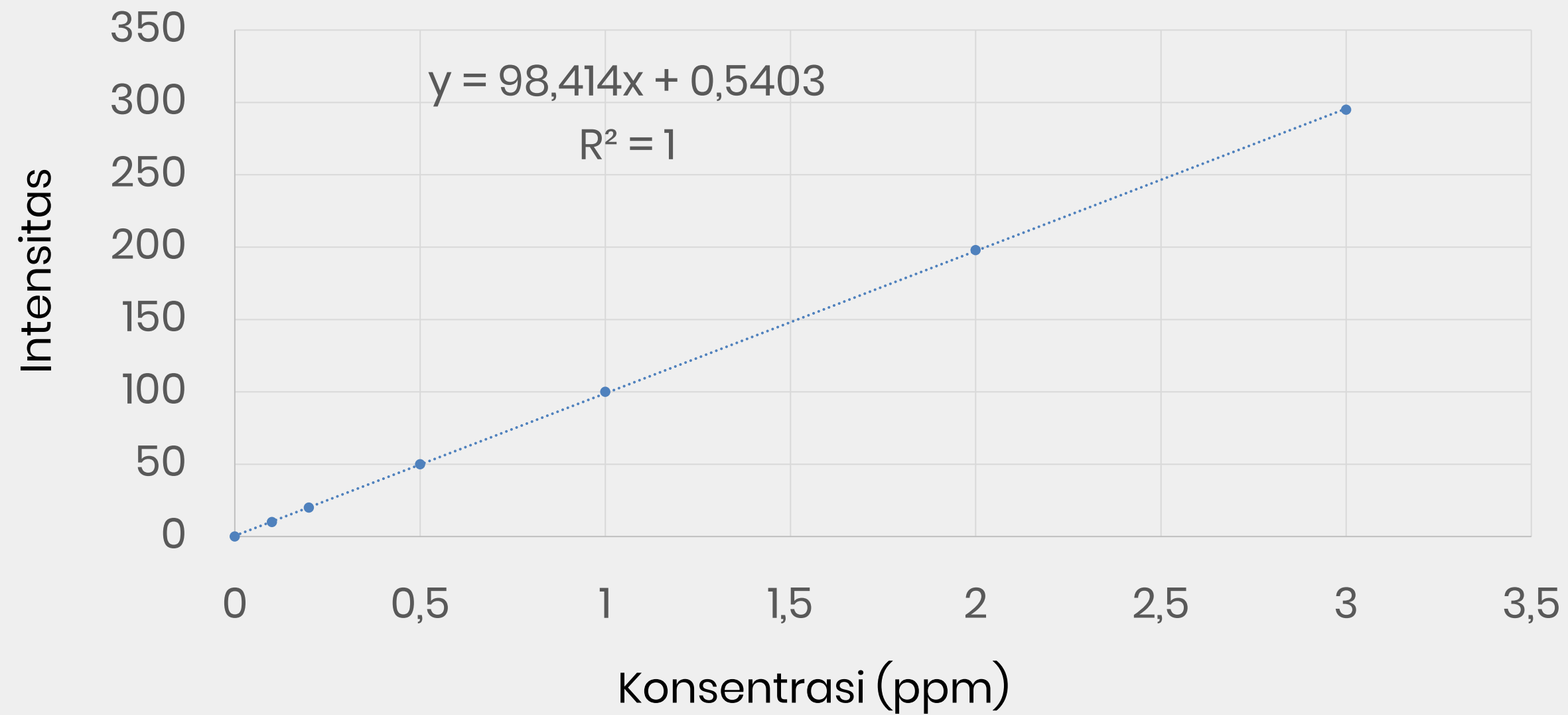
ICP – AES

Metode penentuan kandungan unsur yang didasarkan pada pengukuran intensitas radiasi yang dipancarkan oleh atom-atom yang mengalami deeksitasi. Proses :

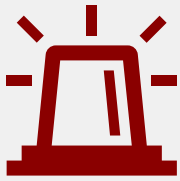
Larutan → Pengkabutan → Atom energi dasar → Eksitasi → Deeksitasi



Kurva kalibrasi



$$\text{Konsentrasi/kadar } (\mu\text{g/g}) = \frac{\text{Kons } (\mu\text{g/ml}) \times \text{Vol(ml)} \times \text{fp}}{\text{Berat (g)}}$$



SPEKTROMETRI ALPHA

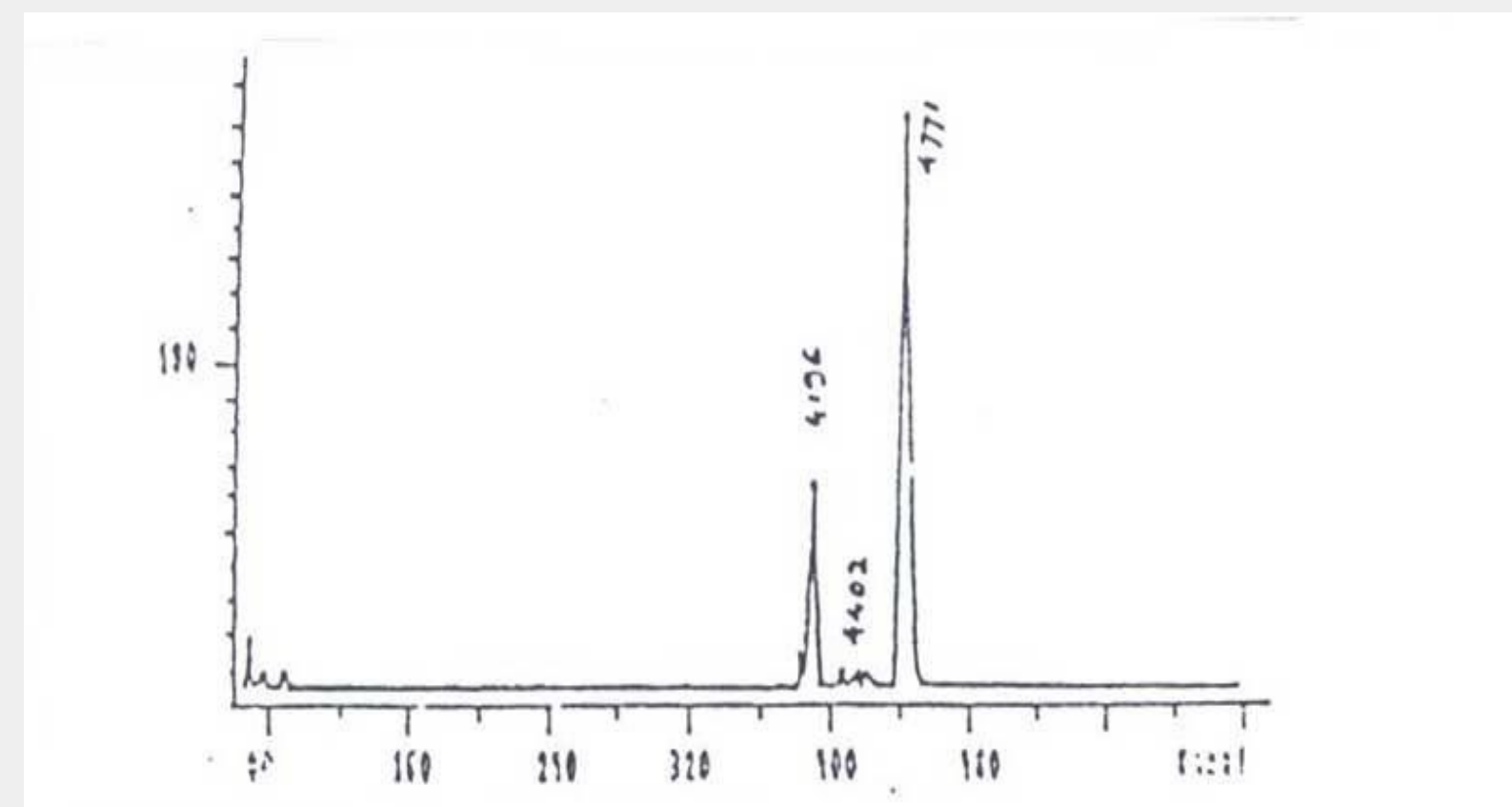
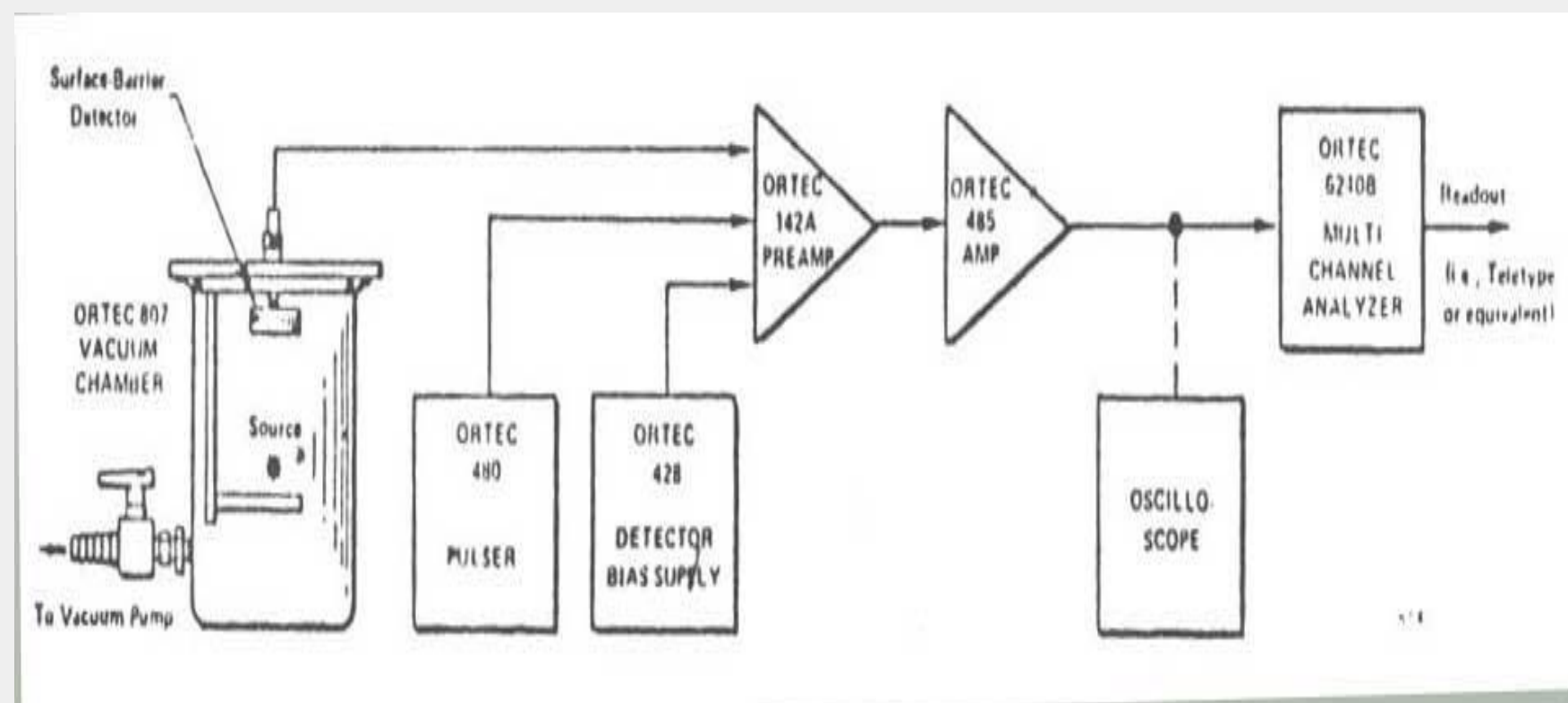
Energi radiasi alpha dan aktivitas jenis isotop uranium

Tahapan pengukuran:

- Sampel harus murni: pemisahan
- cuplikan lapisan tipis: proses Elektrodeposisi
- Detektor *surface barrier*
- Suasana vakum
- Penganalisis salur ganda (MCA)



Nuklida	Energi maksimum (keV)	Aktivitas jenis (Bq/g)
²³³ U	4824; 4783	3,57x10 ⁸
²³⁴ U	4772; 4723	2,31x10 ⁸
²³⁵ U	4402	8,00x10 ⁴
²³⁶ U	4494; 4445	2,39x10 ⁶
²³⁸ U	4205	1,24x10 ⁴
²³⁹ Pu	5135	
²³⁸ Pu	5499	



Kalibrasi spektrometer:

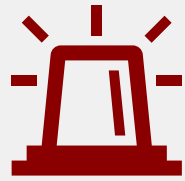
- Kalibrasi energi untuk menentukan alamat nomor salur pada pita energi
- Kalibrasi efisiensi untuk menentukan kesesuaian antara luas puncak dengan tingkat radioaktivitas, menggunakan std
- Komposisi isotopik bahan nuklir ditentukan melalui perhitungan dengan mengubah satuan radioaktivitas ke satuan berat/satuan atom

$$Aktivitas = \frac{cps}{Eff \ det \ x \ Yield}$$

$$N = \frac{A}{\lambda}$$

$$W = \frac{N \ x \ BA}{NA} \ g$$

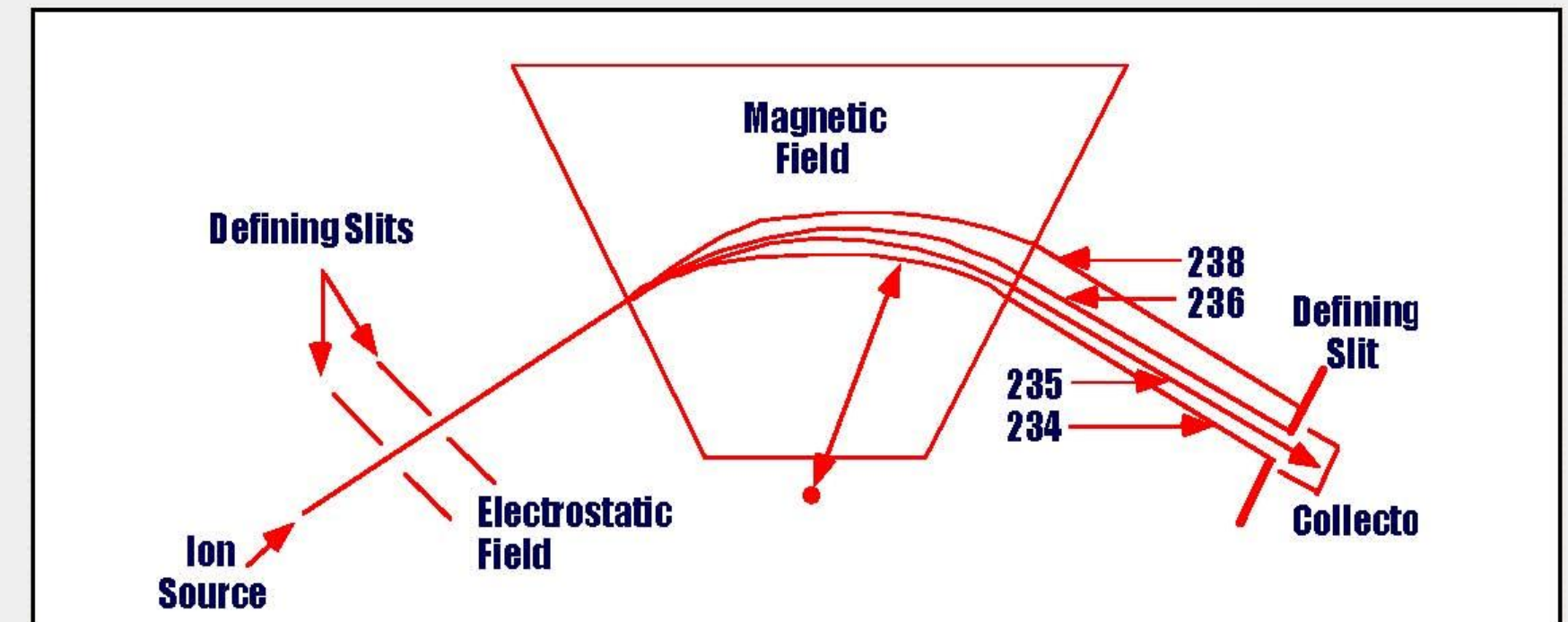
SPEKTROMETRI MASSA



- Metode analisis yaitu dgn menentukan distribusi isotopik
- Penentuan berdasarkan tinggi puncak spektrum hasil analisis
- Dari perhitungan tinggi puncak didapatkan atom distribusi isotopik
- Distribusi berat isotopik dihitung yaitu dgn mengalikan faktor berat isotop pada puncak isotop yg bersangkutan

Prinsip analisis:

- Pengukuran ion dari isotop-isotop dalam sampel
- Ion-ion dibentuk dalam ruang pengion:
 - penumbukan ion
 - penumbukan elektron
 - ionisasi termal dan *inductively coupled plasma*
- Ion dipisahkan berdasarkan massanya oleh medan magnet penganalisis
- Ion-ion yang dideteksi oleh detektor *photomultiplier*



$$\% \text{ atom } ^{235}\text{U} = \frac{I_{235}}{I_{234} + I_{235} + I_{236} + I_{238}} \times 100\%$$

/: Intensitas puncak

- Di samping untuk menghitung distribusi isotopik, metode spektrometri massa juga digunakan untuk penentuan kuantitatif uranium, thorium maupun plutonium total dalam sampel, analisis dilakukan dengan pengenceran isotop (*Isotopic dilution*).
- Analisis ini dilakukan dengan menambahkan isotop dari unsur yang bersangkutan tetapi massa dari isotop tersebut tidak sama dengan massa isotop dalam sampel.
- Isotop yang biasa ditambahkan untuk menganalisis uranium adalah ^{233}U dan untuk penentuan Pu menggunakan ^{244}Pu .

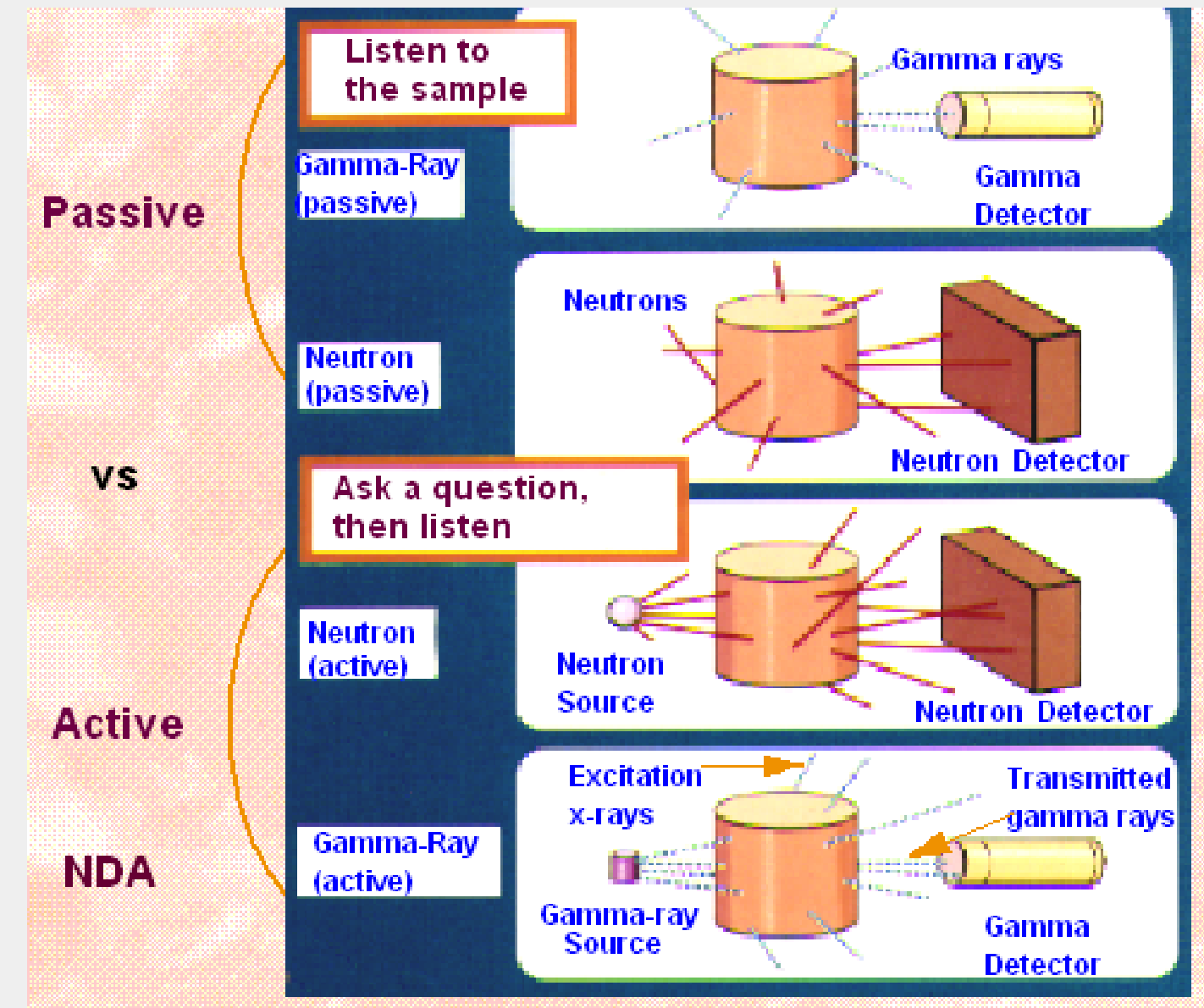
NON DESTRUCTIVE ASSAY

Isotop uranium, plutonium dan merupakan inti radioaktif

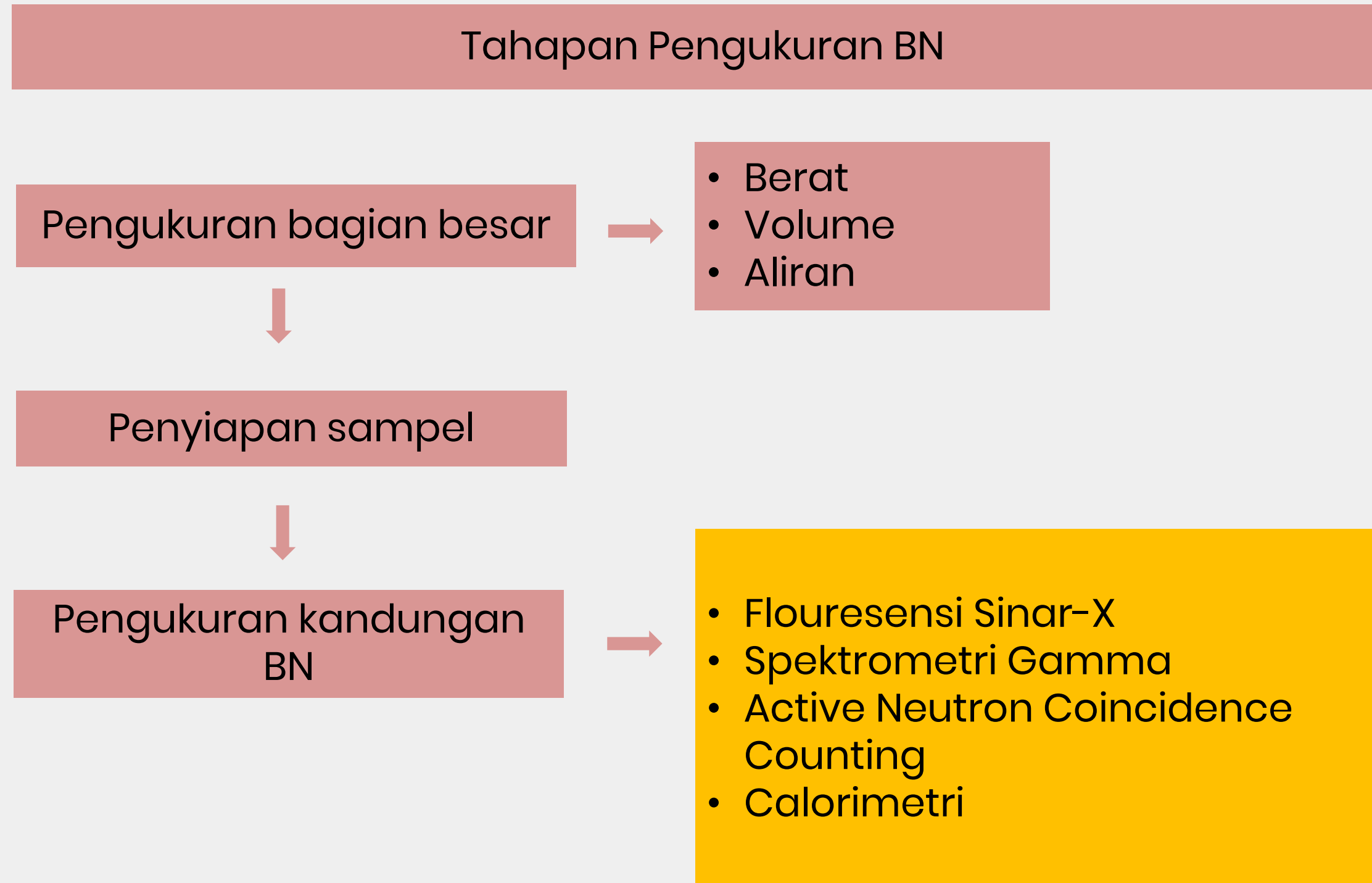
- Pemancar radiasi gamma
- pemancar radiasi alpha & beta
- Pemancar radiasi panas infra-red [dari pancaran α ke bahan matrik]
- Pemancar single neutron [dari (α, n) interaksi matrik, delayed neutrons]
- Pemancar *coincidence neutron* dapat belah [prompt dan delayed fission neutron dan gamma rays]

Pasif NDA : Radiasi yang dipancarkan oleh bahan radioaktif yang diukur

Aktif NDA : Bahan yang diukur diaktifkan dulu oleh sumber pengaktif, sumber yg digunakan sumber neutron dan sumber gamma



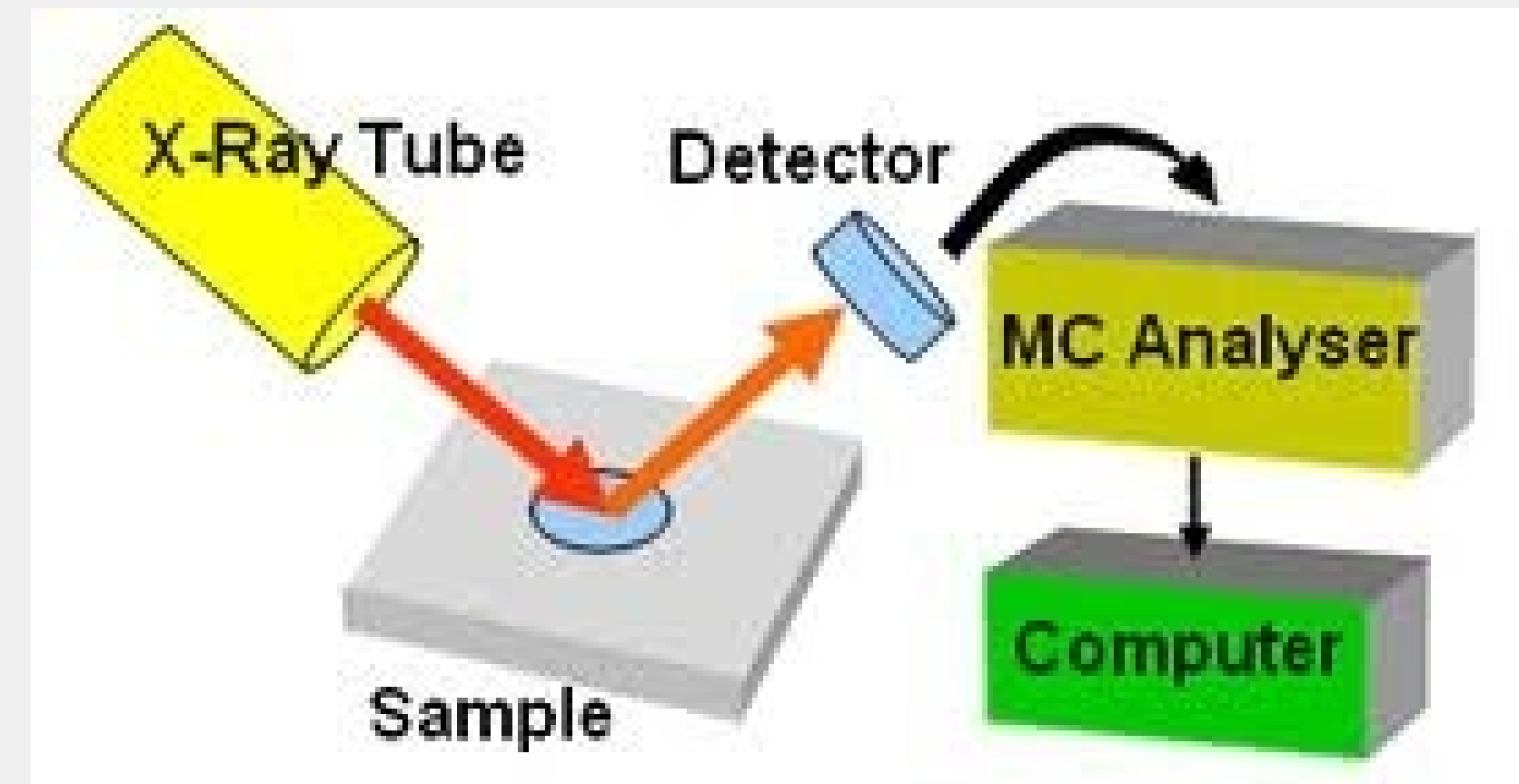
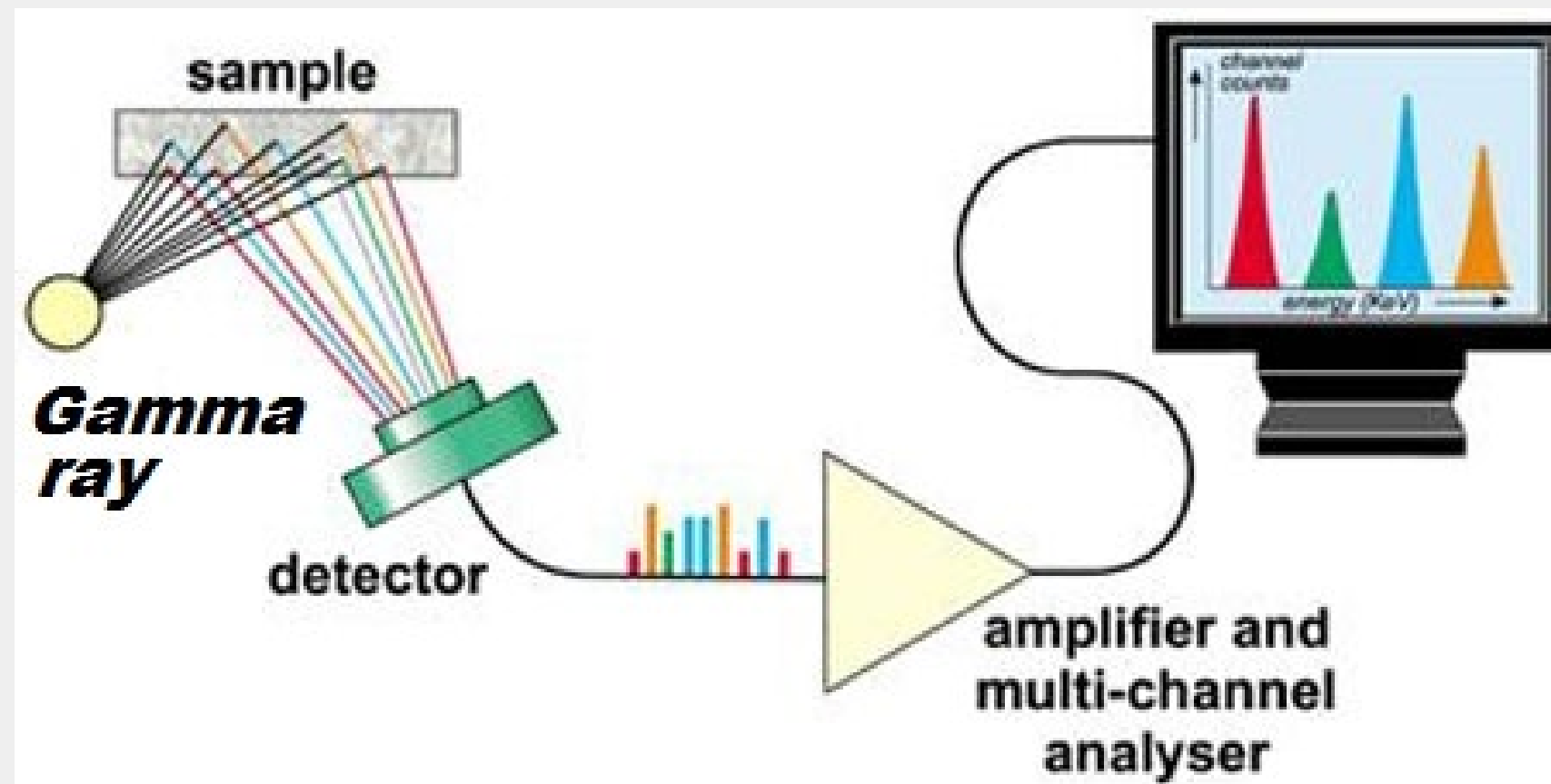
NON DESTRUCTIVE ASSAY

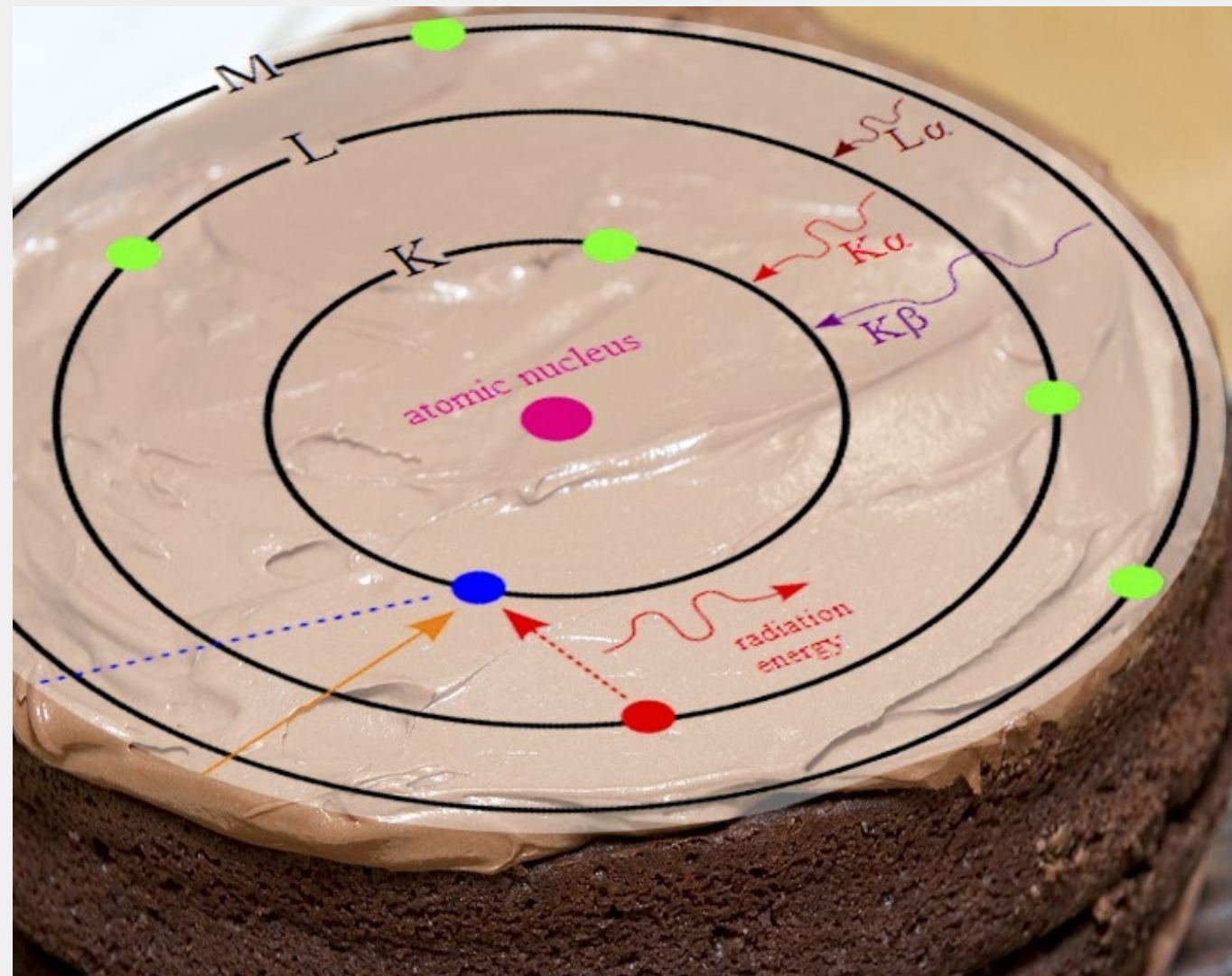


Floresensi sinar-x

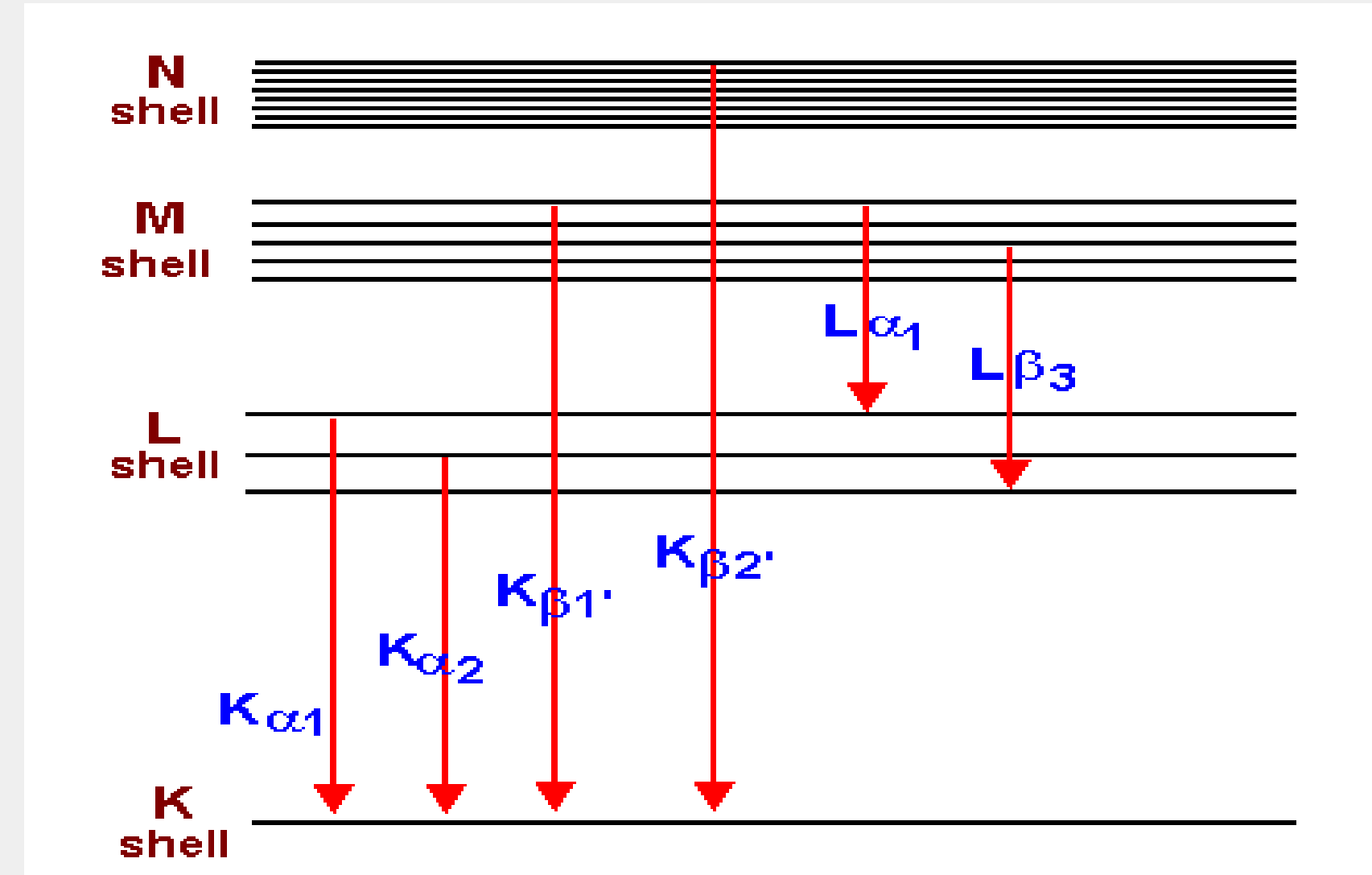
- Teknik Analisis unsur dengan metode perpendaran sinar-x atau dengan istilah populernya analisis unsur dengan XRF saat ini dipergunakan di segala bidang analisis

Energi sinar-X karakteristik terjadi akibat proses perpindahan elektron dari orbit yang lebih luar ke orbit elektron yang lebih dalam dikarenakan tereksitasi energi radiasi yang berupa gelombang elektromagnetik .





- $K\alpha_1$ transisi elektron dari kulit L3 ke K
- $K\alpha_2$ transisi elektron dari kulit L2 ke K
- $K\beta_1$ transisi elektron dari kulit M ke K
- $K\beta_2$ transisi elektron dari kulit N ke K
- $L\alpha_1$ transisi elektron dari kulit M5 ke L3
- $L\beta_3$ transisi elektron dari kulit M3 ke L1
- dan seterusnya



Besarnya energi sinar-X karakteristik yang dihasilkan tergantung dari selisih energi ikat elektron yang menggantikan:

$$K\alpha_1 = \text{Energi ikat Elektron(K)} - \text{Energi ikat elektron}(L_{III})$$

$$K\beta_1 = \text{Energi ikat Elektron(K)} - \text{Energi ikat elektron}(M_{III})$$

Dalam analisis kuantitatif untuk analisis unsur metode ini akurasi tergantung:

- Bentuk matrik standar dan sampel
- Bahan matrik standar dan sampel
- Jenis standar dan sampel
- Sumber pengekstasi yang digunakan
- Perangkat lunak analisis (XRF Modern)

Sumber pengekstasi yang dapat digunakan:

- Sumber gamma energi rendah
- Tabung pesawat sinar-x

Tabel energy

ENERGY-DISPERSIVE XRF
EXCITATION AND FILTER GUIDE

Key to Periodic Table

ATOMIC NUMBER

47

K

L

Symbol

ELEMENT NAME

107.87

Symbol

ELEMENT NAME

107.87

Atomic Weight

22.104

2.984

24.987

3.151

25.517

3.528

K α wtd. avg. (keV)

K β wtd. avg. (keV)

K abs. edge (keV)

L α 1 (keV)

L β 1 (keV)

L β 1 abs. edge (keV)

Color Code

Condition Name

Optimized Atmosphere

Low Z a

Low Z b

Low Z c

Mid Z a

Mid Z b

Mid Z c

High Z a

High Z b

Vacuum (solids) / He (liquids)

Vacuum (solids) / He (liquids)

Air

Air

Air

Air

Air

Air

1	H	2	He
3	Li	4	Be
11	Na	12	Mg
19	K	20	Ca
27	Co	28	Ni
35	Br	36	Kr
43	Tc	44	Ru
51	Sb	52	Te
59	Pr	60	Nd
67	Dy	68	Ho
75	Re	76	Os
83	Bi	84	Po
91	Pa	92	U
99	Es	100	Fm

Principles of EDXRF

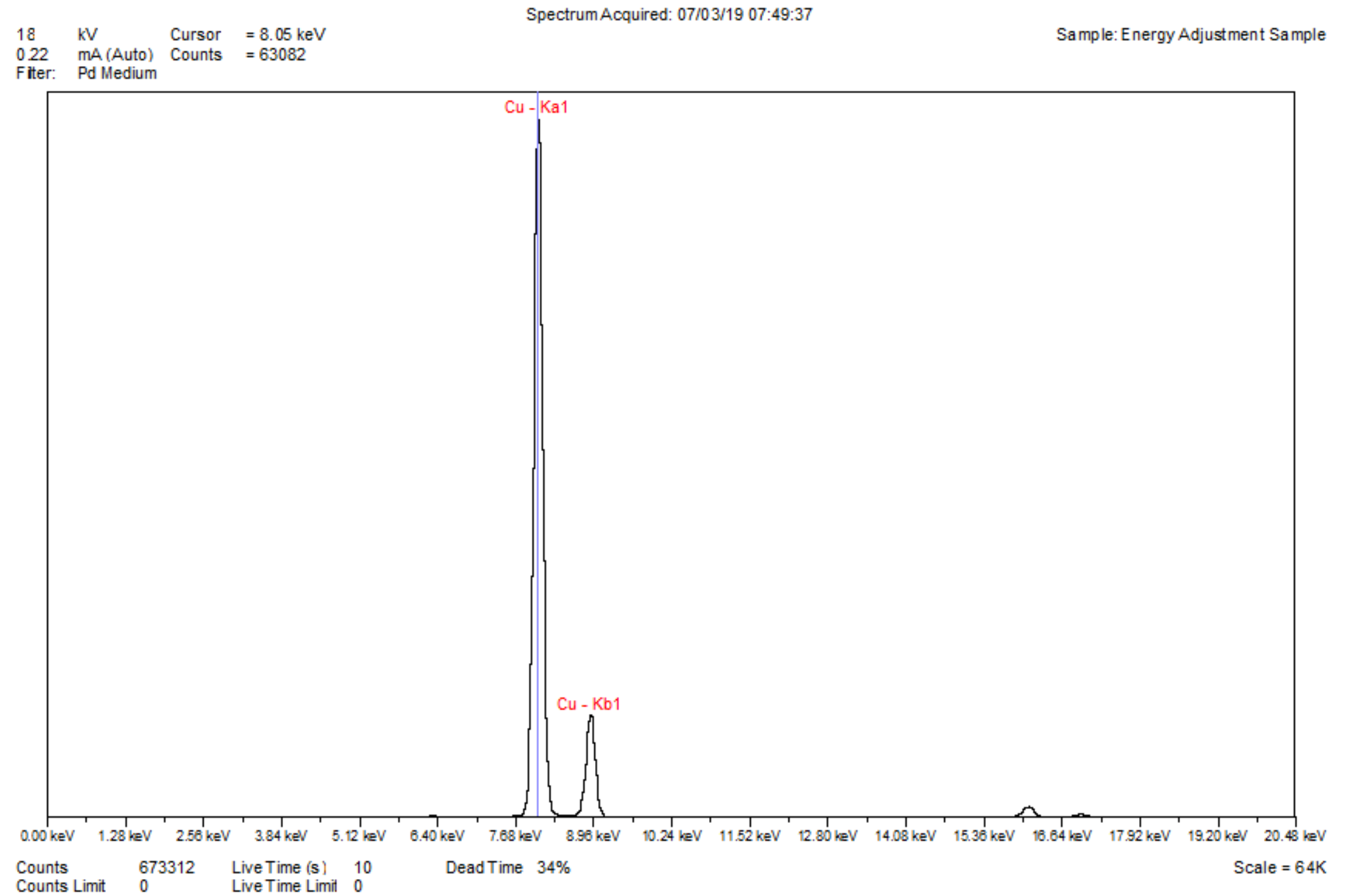
Inside the Spectrometer

Inside the Detector

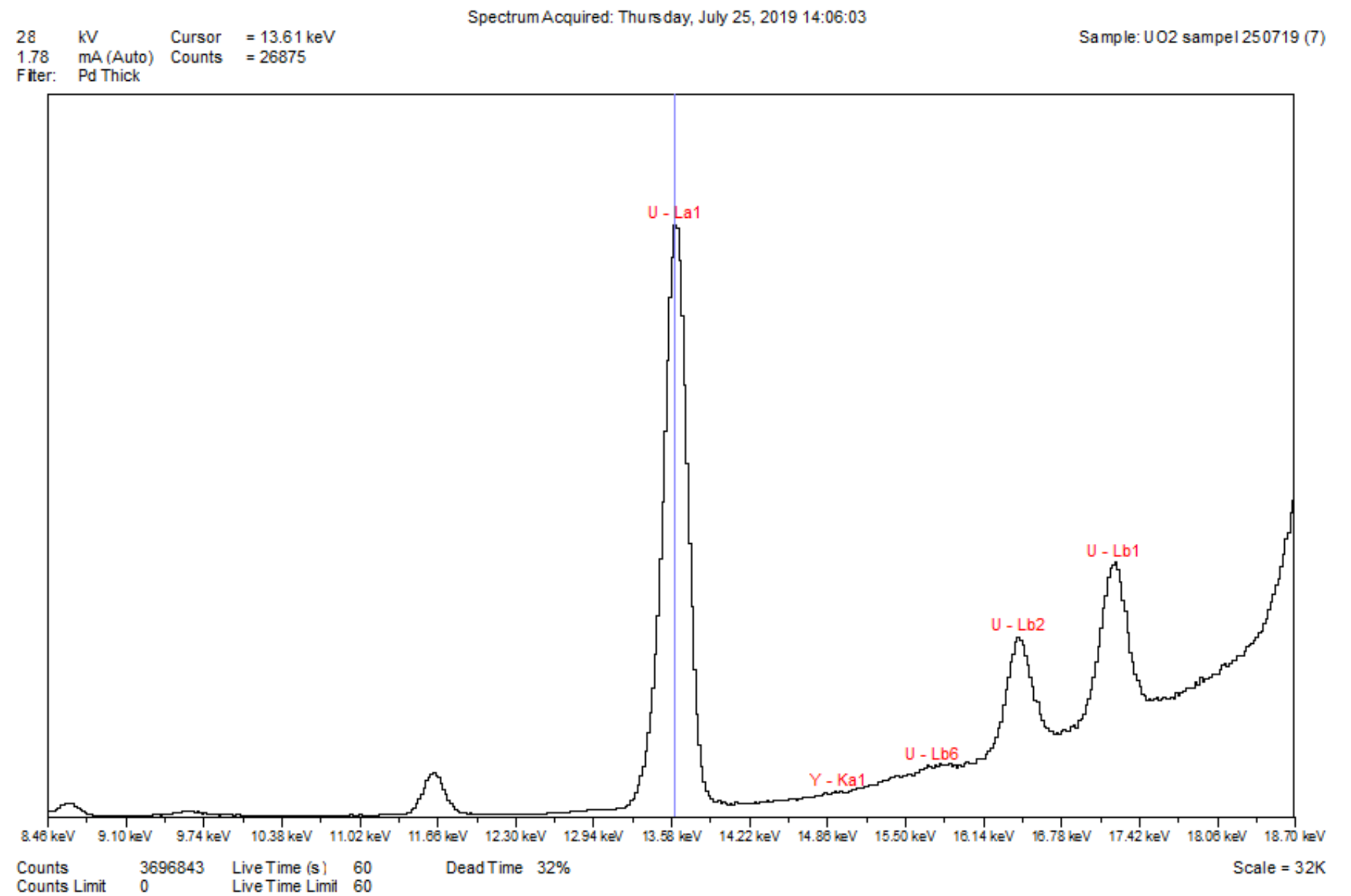
Example of Multi-Filter Analysis of NIST Standard 1645

92	L	L
U		
URANIUM		
238.03		
97.14	13.613	
111.79	17.218	
115.59	20.943	

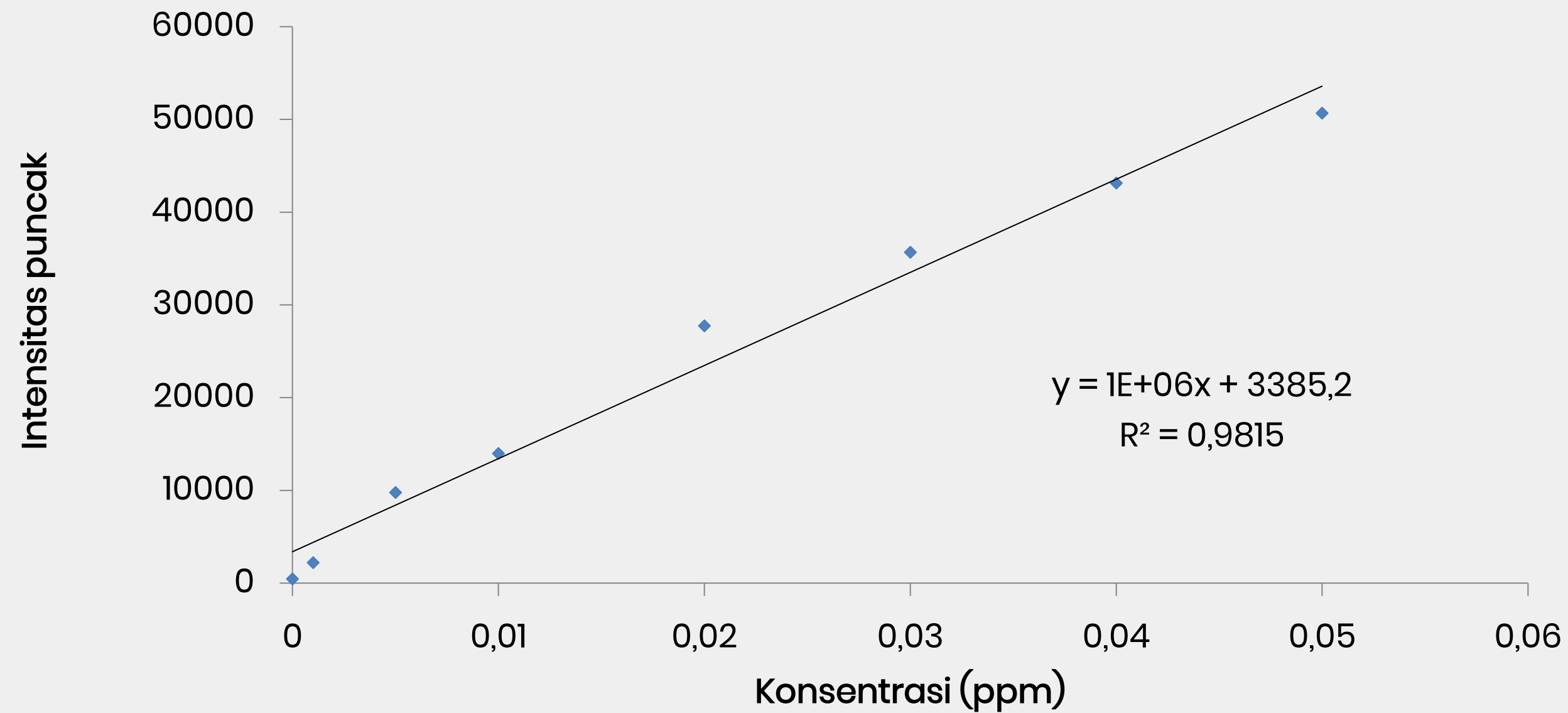
Kalibrasi energi
Energi sinar-X unsur Cu:
8,041 keV($K\alpha$);
8,907 keV ($K\beta$)



Spektrum uranium



Kurva Kalibrasi Uranium



Dari persamaan kalibrasi konsentrasi:

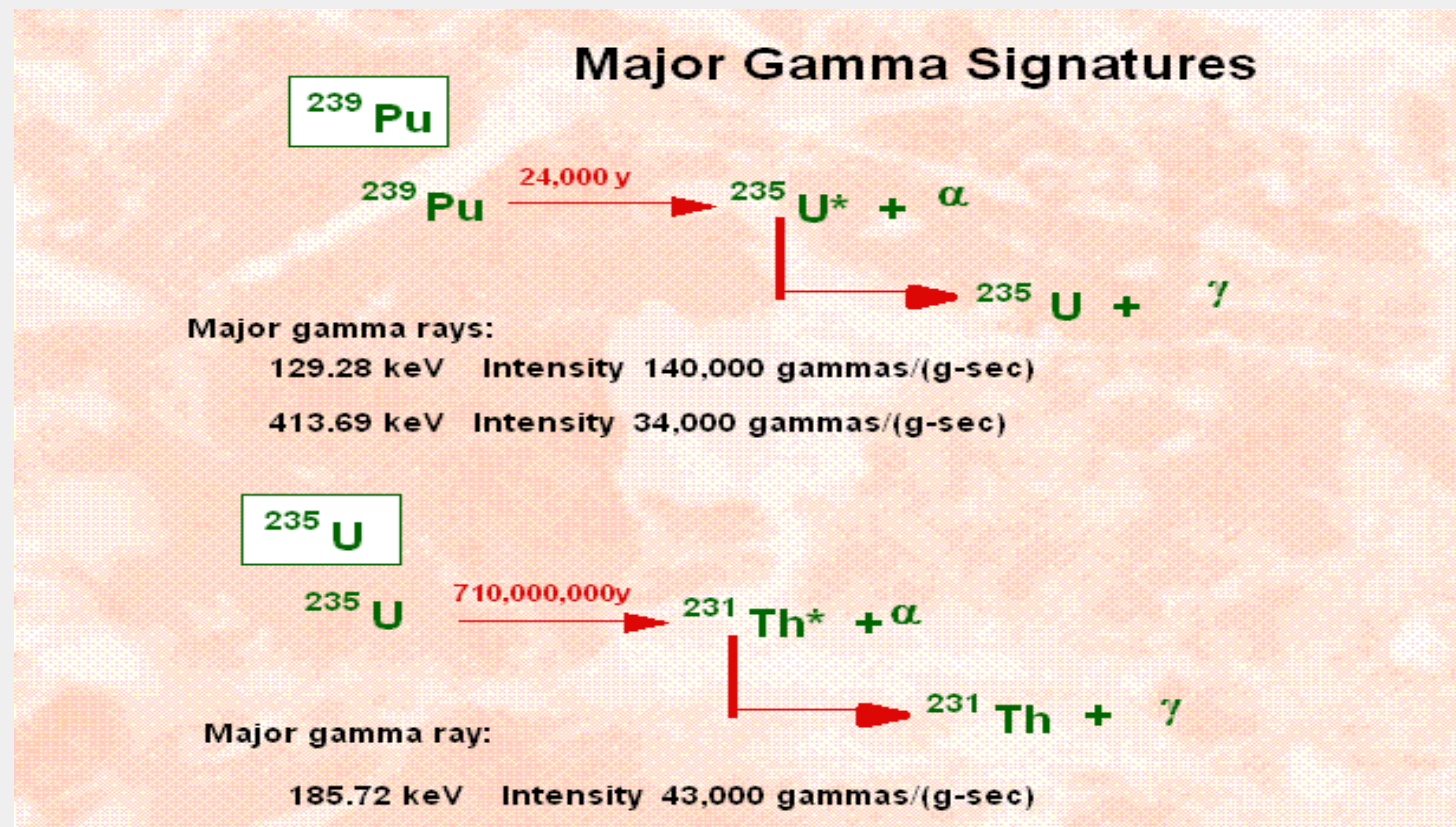
$$Y = Ax + B$$

Y : adalah cacahan (area, untuk sampel yang konsentrasinya tidak diketahui)

Spektrometri gamma

Uranium, plutonium dan thorium termasuk dalam logam berat dan isotopnya merupakan inti radioaktif. Inti atom atom tersebut meluruh dengan memancarkan radiasi partikel alpha dan beberapa diantaranya peluruhan tersebut diikuti dengan pemancaran radiasi gamma

- Seluruh partikel alpha, sinar gamma dan elektron konversi internal yang dihasilkan dari peluruhan mempunyai energi diskrit dan karakteristik, oleh sebab itu pengukuran bahan nuklir tersebut dapat dilakukan dengan mengukur radiasi yang dipancarkan.
- Berdasarkan sifat peluruhan uranium, maka analisis bahan nuklir uranium dan plutonium dapat dilakukan dengan cara radiometri, yaitu dengan cara mengukur radioaktivitas isotop uranium atau melalui pengukuran radioaktivitas anak luruh atau hasil belah uranium-235.
- Pengukuran ini dilakukan dengan cara mengukur radiasi gamma dari isotop uranium atau mengukur radiasi gamma radionuklida yang bersangkutan dengan uranium.



Tanda sinar gamma dari U dan Pu yg digunakan dalam NDA

Beberapa sinar gamma dari bahan nuklir dapat digunakan untuk menentukan massa isotop dari bahan nuklir yang menghasilkannya. Karena sifat dari sinar gamma (intensitasnya, kemampuan menembus, dan bebas pengaruh) maka sinar gamma sering digunakan dibandingkan dengan metode lainnya. Adapun tanda sinar gamma hasil peluruhan spontan bahan nuklir yang digunakan untuk NDA ditunjukkan dalam tabel:

Isotop	Energy (keV)
U-234	120,9
U-235	143,8 185,7
U-238	766,4c 1001,0c
Pu-238	152,7 766,4
Pu-239	129,3 413,7

Dalam proses peluruhan inti, jumlah inti tidak stabil dinyatakan sebagai fungsi eksponen terhadap waktu :

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

N : jumlah suatu inti tidak stabil pada waktu t

N_0 : jumlah inti di atas apda waktu $t = 0$

λ : tetapan peluruhan, parameter karakteristik eksponensial

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$$

Sedang laju peluruhannya dinyatakan dalam persamaan :

$$R = (1,32 \times 10^{10}) / (A \cdot T_{1/2})$$

R : laju peluruhan per detik per gram

$T_{1/2}$: waktu paruh dalam tahun

- Penghitungan dalam pengukuran kuantitatif uranium menggunakan metode ini ditentukan dengan mengukur intensitas radiasi pada energi yang bersangkutan, yang dinyatakan dalam net area per waktu pencacahan (cps).
- Bila net area per waktu pencacahan sampel dinyatakan sebagai cps sampel dan standar mengandung isotop uranium beraktivitas A_{std} adalah (cps)std, maka untuk menghitung kandungan uranium dalam sampel didasarkan pada penggunaan rumus di bawah ini :

$$A_{sampel} = \frac{(Cps)_{sampel}}{(Cps)_{std}} \times A_{std}$$

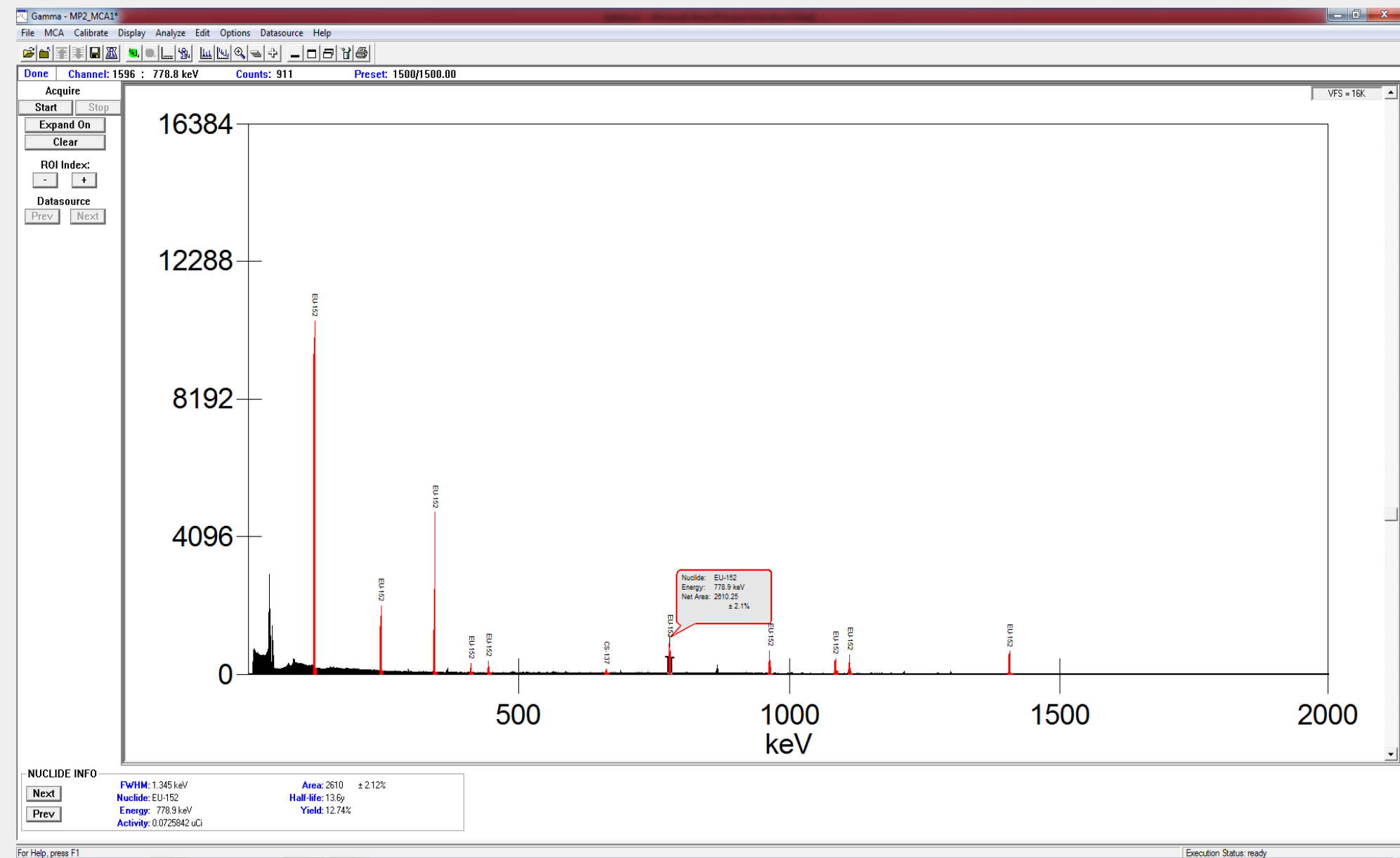
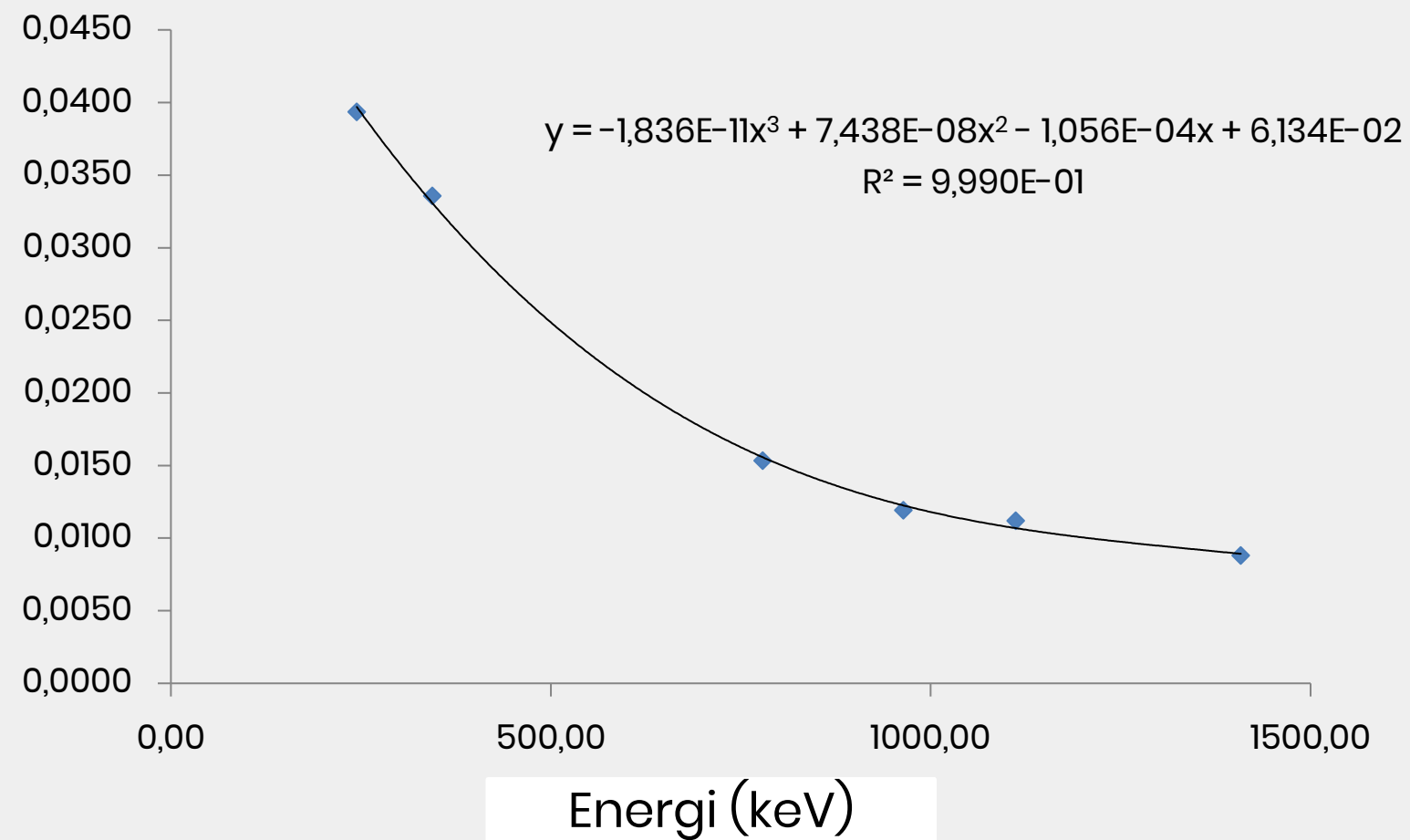
$$A_{sampel} = \frac{(Cps)_{sampel}}{Eff \times Yi}$$

- Kandungan isotop U (g) adalah:

$$W = N \times BA/NA$$

$$N = A / \lambda$$

Kurva efisiensi isotop Eu-152



Berdasarkan persamaan di atas dapat diturunkan menjadi persamaan perbandingan isotop uranium-235 terhadap isotop uranium-238, sehingga persamaan tersebut menjadi :

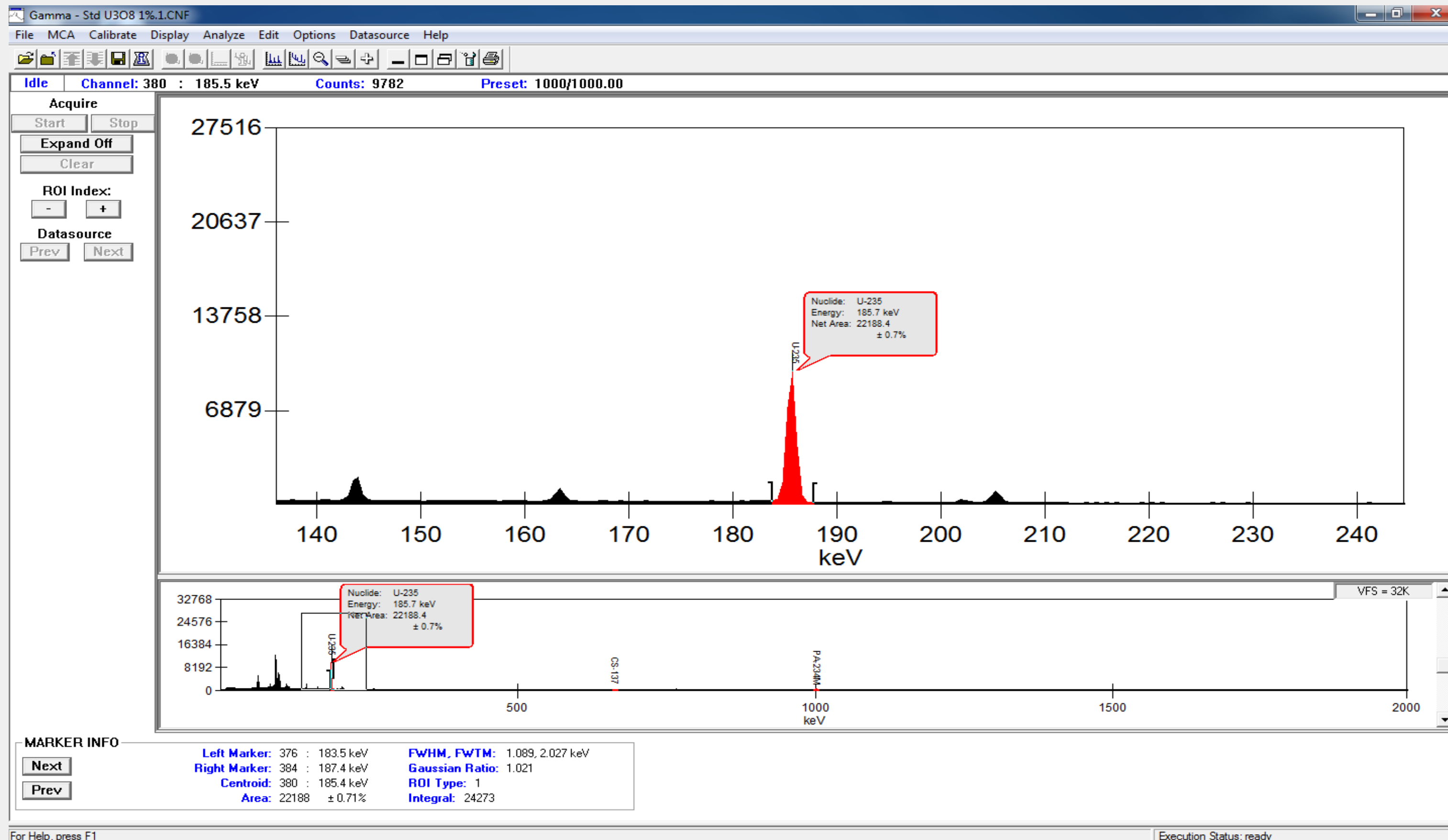
$$\{(N)_{U-235/U-238}\}_{\text{sampel}} = \frac{\{(Cps)_{U-235/U-238}\}_{\text{std}}}{\{(Cps)_{U-235/U-238}\}_{\text{std}}} \times \{(N)_{U-235/U-238}\}_{\text{std}}$$

$$A_{\text{sampel}} = \frac{(Cps)_{\text{sampel}}}{Eff \times Yi}$$

Dimana, $\{(N)_{U-235/U-238}\}_{\text{std}}$
Perbandingan atom U-235/U-238



Spektrum standar U_3O_8 (U-235 1%)



Pengukuran Neutron

Pengukuran neutron secara NDA berdasarkan pada:

- Neutron dari pembelahan spontan digunakan untuk penentuan plutonium total dan deret isotop plutonium

$$^{240}\text{P}_{\text{Ueff}} = 2,52(^{238}\text{Pu}) + ^{240}\text{Pu} + 1,68(^{242}\text{Pu})$$

Neutron yang dipancarkan adalah multiplet antara 0 sampai dengan 8

- Pembelahan tumbukan neutron sebagai tanda untuk bahan dapat belah plutonium dan uranium. Pancaran neutron yang terjadi antara 0 sampai dengan 8 Burst. Neutron emisi yang dipancarkan tergantung pada geometri dan densitas sampel.
- Daya tembus neutron yang besar digunakan pada *essay* dalam jumlah besar secara cepat pada sampel padat
- Data neutron dapat diperoleh secara cepat guna menginformasikan tentang isotop sampel

Adapun sumber neutron yang digunakan dalam NDA berasal dari :

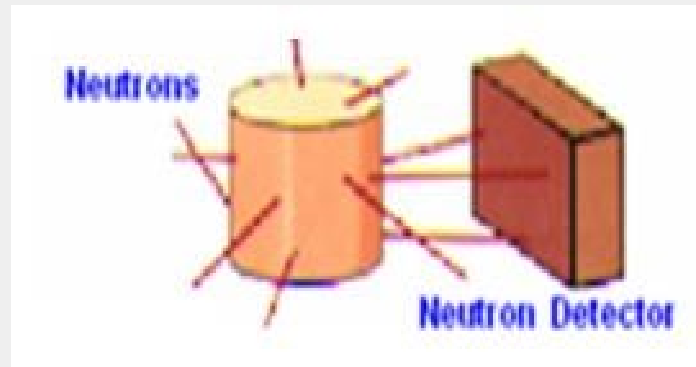
- Pembelahan spontan dari isotop plutonium
- Tumbukan pembelahan yang berasal dari reaksi pembelahan uranium-235 atau plutonium-239.
- Reaksi (α, n) dalam neutron yang dihasilkan dari reaksi ini mempunyai energi random tergantung pada komposisi sampel

Teknik Pengukuran Neutron

- Metode *passive neutron assay* (tidak menggunakan sumber)
- Metode *active neutron assay* (menggunakan sumber)

Metode *passive neutron assay*

Neutron yang dipancarkan secara spontan oleh sampel langsung dideteksi oleh detektor



- Jumlah neutron yang terdeteksi oleh detektor dari sampel dibandingkan dengan jumlah neutron hasil pendeteksian bahan standar yang telah diketahui kandungannya.
- Metode ini umumnya digunakan untuk pengukuran plutonium total atau isotop plutonium.

Dasar pendeteksian isotop dapat belah:

- **Based on detection of fissile isotopes**
- **Spontaneous Fission**

<u>Isotope</u>	<u>SF Neutrons/g-s</u>
^{238}U	0.011
^{238}Pu	2,500
^{240}Pu	1,100
^{242}Pu	1,700
^{244}Cm	11,000,000

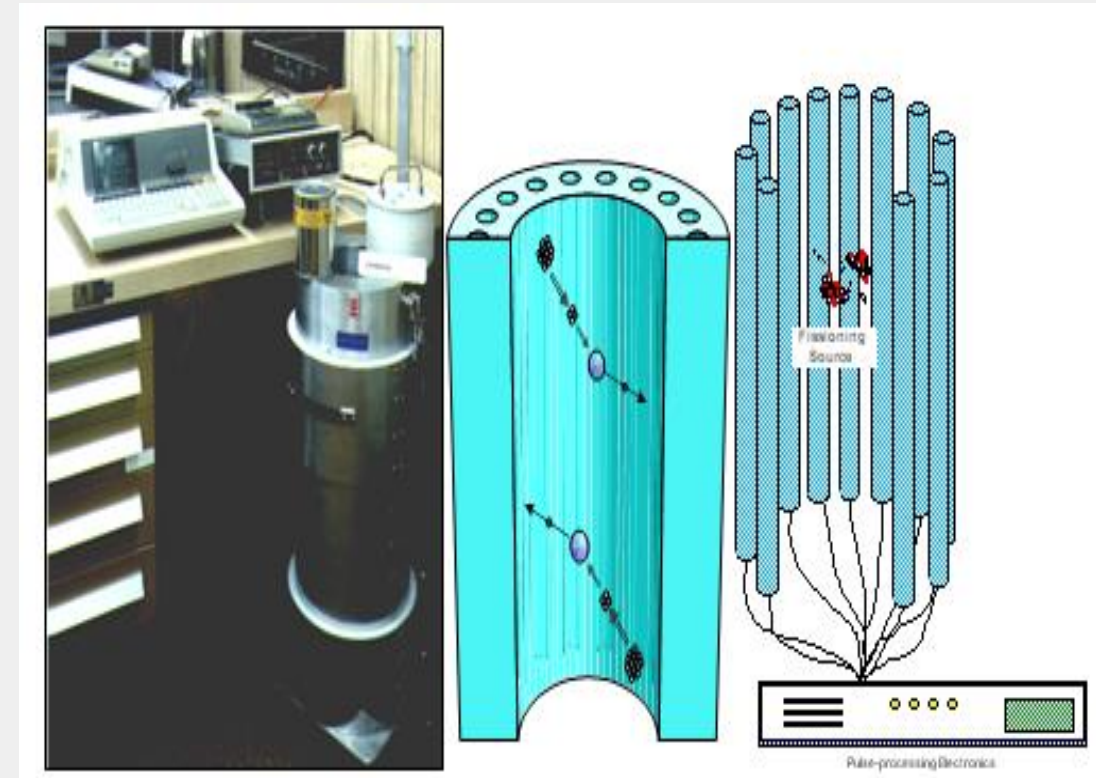
- **(α ,n) Neutrons**

<u>Material</u>	<u>Neutrons/g-s</u>
^{240}Pu Oxide	170
^{240}Pu Fluoride	16,000

- **Singles Counting (S.F. + α ,n)**
- **Coincidence Counting (S.F.)**

Pencacah *passive neutron coincidence*.

- Digunakan untuk bahan nuklir dengan metode *passive neutron assay*.
- Pengukuran ini menggunakan detektor neutron ^3He yang mengelilingi sampel yang akan ditentukan kandungan bahan dapat belah
- Pancaran *prompt* neutron dari pembelahan dideteksi sebagai *coincidence neutrons*.
- Metode ini didesain untuk penentuan plutonium, dapat merespon massa isotop (contoh: $^{238}, ^{240}, ^{242} \text{Pu}$).
- Akurasi :
0.3% – 4% untuk Pu oksida dan Pu metal
2%-4% untuk Pu *scrap* dan limbah



Metode *active neutron assay*

Pengukuran dgn metode ini membutuhkan sumber neutron, sumber yg biasa digunakan:

Uses source to induce fissions in sample

Isotopic neutron sources:

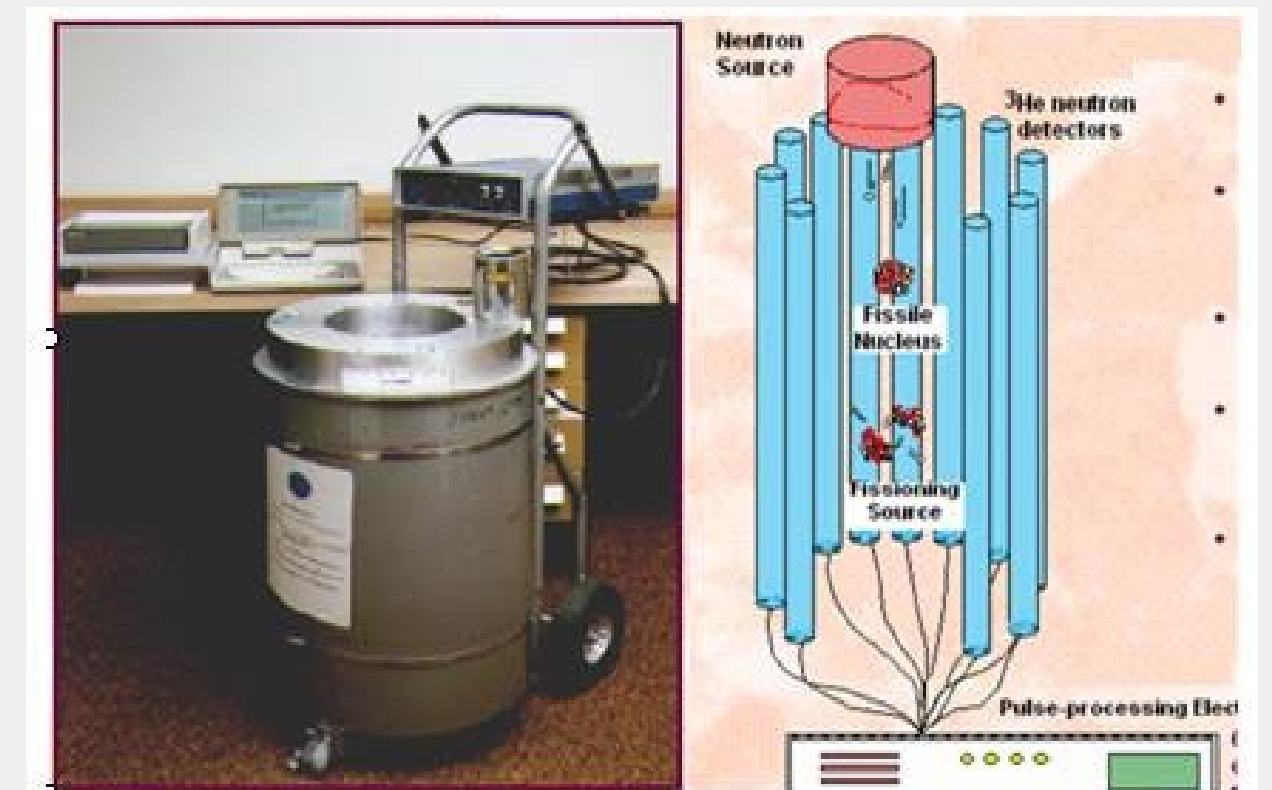
<u>Source</u>	<u><E(n)></u>	<u>n/s</u>	<u>Type</u>
²⁴¹ Am-Li (α ,n)	0.5 MeV	>100,000	random
²⁵² Cf (sf)	2 MeV	>1,000,000,000	coincidence (sf)
¹²⁴ Sb-Be (γ ,n)	23 keV	>100,000,000	random

(sf) = spontaneous fission

Methods for discriminating against source neutrons:

- Coincidence
- Time-delayed
- Energy
- Shielding

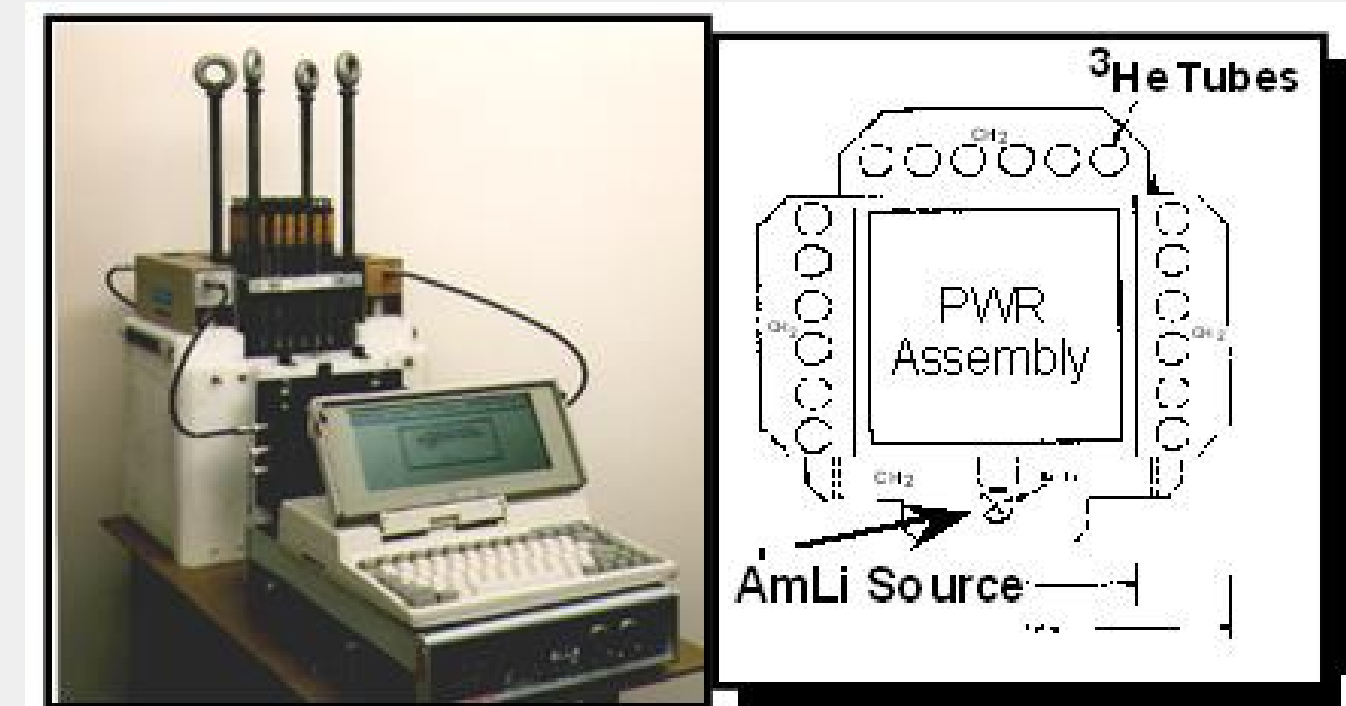
- ***Active Neutron Coincidence Counters*** merupakan salah satu alat yang digunakan untuk pengukuran dengan metode aktif NDA.
- Sebagai sumber neutron untuk *induce* pembelahan menggunakan AmLi. Pengukuran didasarkan pada pencacahan neutron *coincidence* dari *induced* pembelahan.
- Pertama dibutuhkan untuk menentukan uranium dan dalam pengembangannya untuk isotop dapat belah (contoh ^{235}U dan ^{239}Pu).
- Cacah latar yang tinggi dalam penentuan dengan metode ini akan menyebabkan sensitifitasnya berkurang, untuk memperbaiki hasil pengukurannya, pengukuran dilakukan dengan membandingkannya melalui pencacahan pasif pada sumber yang digunakan.
- Akurasi 1%-5%, 1000 detik pada pengukuran kuantitas (kg) untuk HEU pelet.
- HEU *scrap* dan limbah, dengan akurasi 5%-25%.
- Akurasi 5%-10% untuk pengukuran LEU oksida
- Akurasi 10%-50% untuk LEU scrap dan limbah, dengan waktu pengukuran 1000 detik.



Alat Active neutron coincidence counter

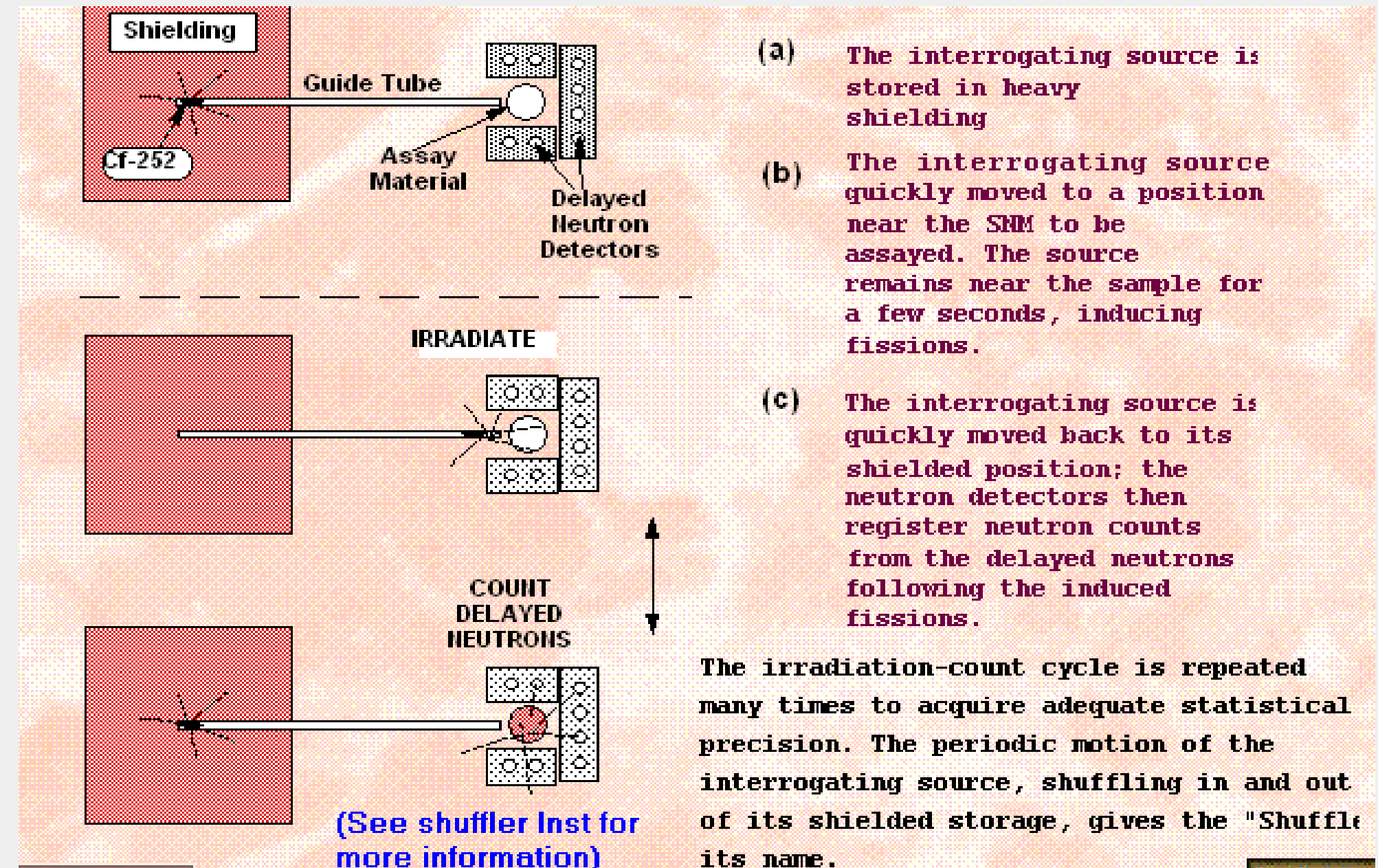
Active Neutron Coincidence Collar(UNCL)

- Merupakan alat pengukuran bahan nuklir dengan menggunakan metode aktif neutron **dengan sumber AmLi**
- Alat ini efektif digunakan untuk penentuan massa bahan dapat belah per unit panjang
- Akurasi pengukuran 2% s.d. 4% , dengan waktu cacah 1000 detik



The Shuffler Assay

- Alat ini menggunakan sumber Cf-252, pengukuran berlangsung bila neutron dari sumber dipaparkan ke arah sampel.
- Sumber neutron (Cf-252) digerakkan secara cepat (*shuffled*) antara *shielding*, daerah penyimpanan dan suatu massa dapat belah, neutron dari sumber bereaksi dengan bahan dapat belah
- Menyebabkan pembelahan pada massa dapat belah dan melepaskan *delayed neutron*.
- *Delayed neutron* dipancarkan dari hasil pembelahan diukur selama sumber Cf-252 di antara shielding



Kalorimetri

- Pengukuran dengan metode ini didasarkan dari pengukuran panas yang dihasilkan dari interaksi radiasi alpha dengan materi
- Pengukuran ini merupakan gabungan antara data pengukuran panas dengan data penentuan isotop menggunakan gamma spektrometer atau mass spektrometer.

$$G = \frac{P}{P_{eff}} \quad P_{eff} = \sum R_i \times P_i$$

Dimana: G = Massa sampel (gram)

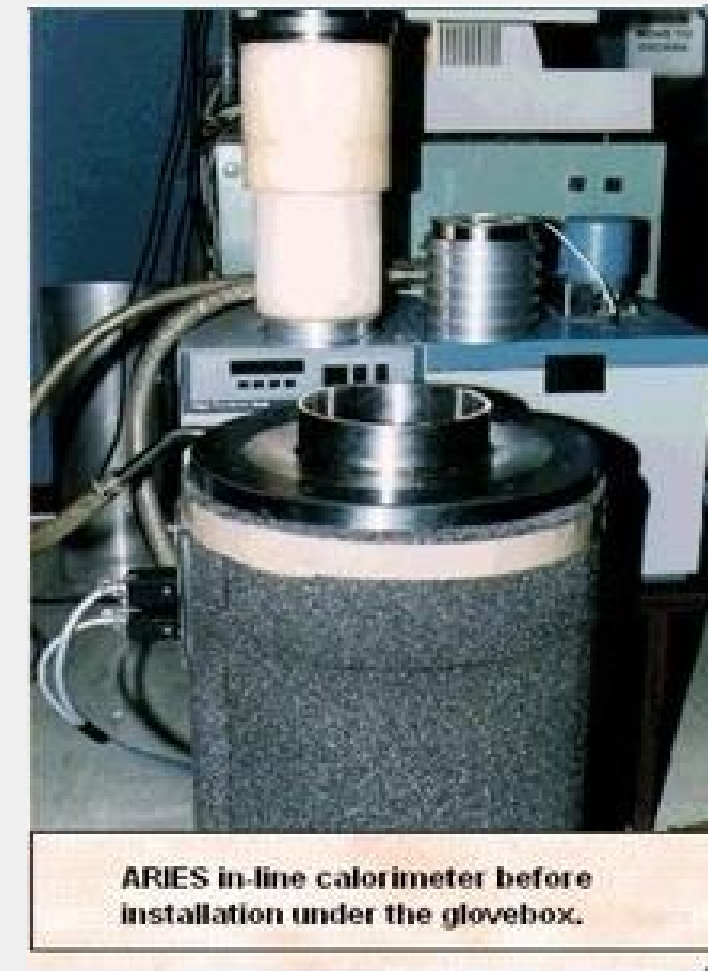
P = Power (watt)

P_{eff} = Power efektif (watt/gram)

R_i = Rasio massa isotop i

P_i = Spesifik power isotop i (watt/gram)

- Metode ini mampu untuk penentuan Pu oksida dan logam uranium di atas 10 kg sampel HEU (*high enriched uranium*)
- Presisi 0,5% s.d. 0,1%, ketelitian ini sangat tergantung dari matrik yang diukur.
- Perlu diketahui isotopiknya untuk pengubahan tenaga ke massa bahan
- Isotop ditentukan dengan gamma NDA atau dengan kimia DA





Terima Kasih