

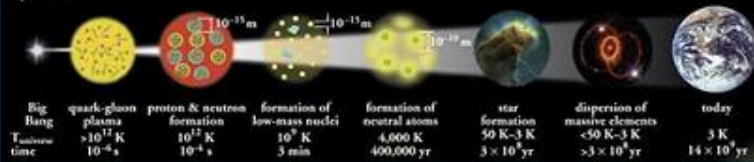
Nuclear Science

Nuclear Science is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as: Why do nucleons stay in the nucleus? What combinations of protons and neutrons are possible? What happens when nuclei are compressed or rapidly rotated? What is the origin of the nuclei found on Earth?

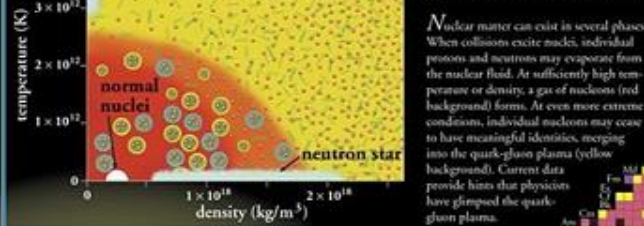
Legend	electron (e^-)	quark	A mass number 14
proton	positron (e^+)	gluon field	Z atomic number 6
neutrino (ν)	antineutrino ($\bar{\nu}$)	photon (γ)	neutron number = $A - Z$

Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about 10^{-35} second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe, $T_{universe}$, cooled to about 10^9 K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, some of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms contracted into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Exploding stars (supernovae) form the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.

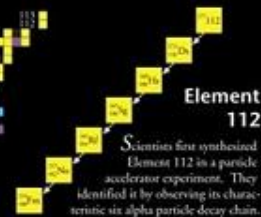


Phases of Nuclear Matter

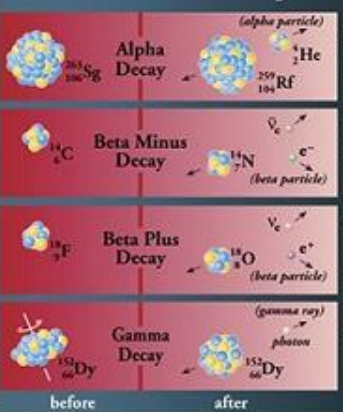


Unstable Nuclei

Stable nuclides form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclides far from this band and study their decays, thereby learning about the extremes of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclides. Nuclear theory predicts that there are at least 4000 more to be discovered with $Z \leq 113$.



Radioactivity

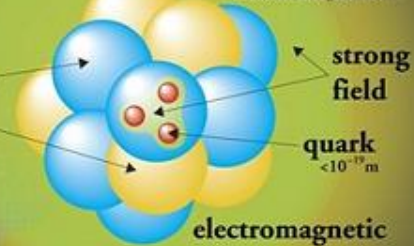


Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a ^4_2He nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino (or a positron and neutrino) or captures an atomic electron and emits a neutrino. A positron is the name for the antiparticle of the electron. Antimatter is composed of antiparticles. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus lowers its internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

The Nucleus

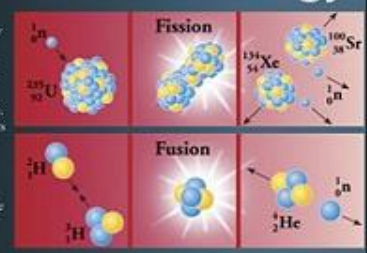
$(1-10) \times 10^{-15}$ m

At the center of the atom is a nucleus formed from nucleons—protons and neutrons. Each nucleon is made from three quarks held together by their strong interactions, which are mediated by gluons. In turn, the nucleus is held together by the strong interactions between the gluon and quark constituents of neighboring nucleons. Nuclear physicists often use the exchange of meson-particles which consist of a quark and an antiquark, such as the pion-to describe interactions among the nucleons.



In an atom, electrons range around the nucleus at distances typically up to 10,000 times the nuclear diameter. If the electron cloud were shown to scale, this chart would cover a small town.

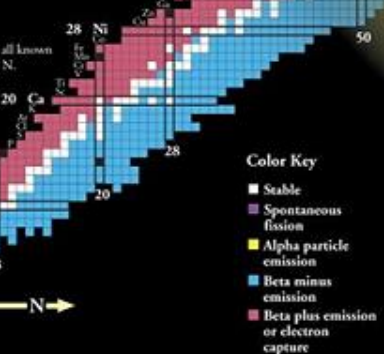
Nuclear Energy



In the early stages of stellar evolution of our sun and other stars, hydrogen fuses to form helium, releasing energy in the form of photons (light) and neutrinos. During the later stages of stellar evolution, more massive nuclei up to and beyond uranium are synthesized by fusion. By measuring the number of neutrinos that come from the Sun, scientists recently have demonstrated that neutrinos must have a mass greater than zero.

Chart of the Nuclides

The Chart of the Nuclides presents in graphic form all known nuclei with atomic number, Z , and neutron number, N . Each nuclide is represented by a box colored according to its predominant decay mode. Magic numbers (N or $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82$ and 126) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major closed shells and show regions of greater nuclear binding energy.



Applications

Radioactive Dating

Naturally occurring radioactive isotopes such as ^{14}C are used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of artifacts found at the site, scientists determined that Stonehenge was built nearly 4,000 years ago.

Space Exploration

Scintimeter used alpha particles to identify chemical elements present in Martian rocks. On Earth, nuclear reactions are used in many areas from criminal investigations to art authentication.

Nuclear Reactors

Nuclear reactors use the fission of ^{235}U or ^{239}Pu nuclei to produce electric power. Reactors and most other nuclear applications generate radioactive waste; disposal of this waste is a subject of current research.

Smoke Detectors

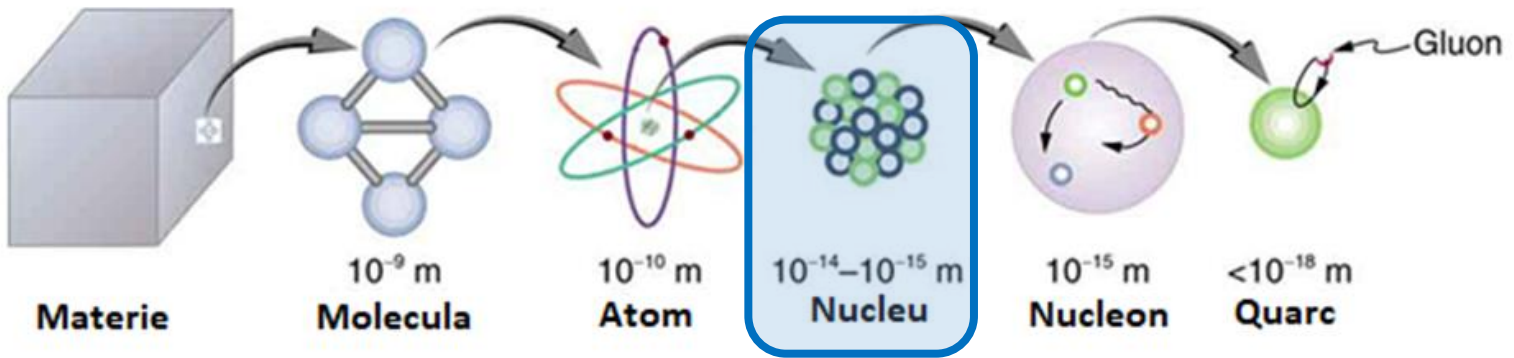
Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter ^{241}Am to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.

Nuclear Medicine

Radioactive isotopes, such as $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{18}F , ^{131}I , and ^{125}I are commonly used in the diagnosis and treatment of disease. Positron emitters such as ^{18}F are used in Positron Emission Tomography (PET) to generate images of brain activity.

Magnetic Resonance Imaging

Magnetic Resonance Imaging (MRI) makes use of atomic transitions involving the magnetic field of a nucleus to study the local chemical environment. This technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.



- Comportamentul fizic al tuturor obiectelor din Univers este determinat de acțiunea a **patru forțe fundamentale: gravitaționale, electromagnetice, slabe și tari**
- Acestea se deosebesc între ele, în principal prin **constanta de cuplaj** și distanța pe care acționează eficient

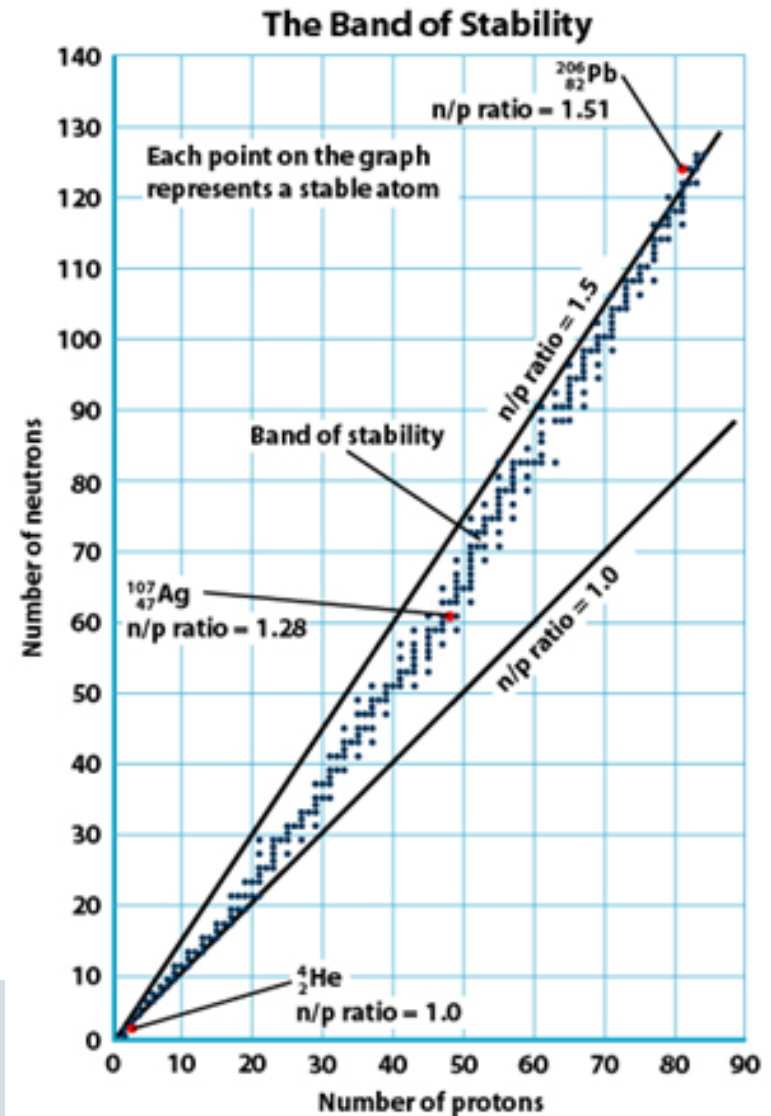
Interacțiunea	Teoria curentă	Tăria (constanta de cuplaj)	Particula de schimb	Raza de acțiune
Gravitațională	Relativitatea Generală	$\alpha_G = 4,6 \cdot 10^{-40}$	graviton	∞
Slabă	Teoria Electroslabă	$\alpha_W = 8,1169 \cdot 10^{-7}$	bosoni Z_0, W^\pm	10^{-18} (m)
Electromagnetică	QED Electrodinamica Cuantică	$\alpha_e = 1/137$	foton	∞
Tare	QCD Cromodinamica Cuantică	$\alpha_S \approx 1$	gluon	$\leq 10^{-15}$ (m)

- **Constanta de cuplaj (parametrul etalon de cuplaj)** – valoare numerică care determină tăria unei forțe dintr-o interacțiune (determină tăria interacțiunii în funcție de energia cinetică).
- **Tăria interacțiunii** din acest tabel reflectă mărimile relative ale diferitelor forțe, care acționează asupra unei perechi de protoni într-un nucleu atomic

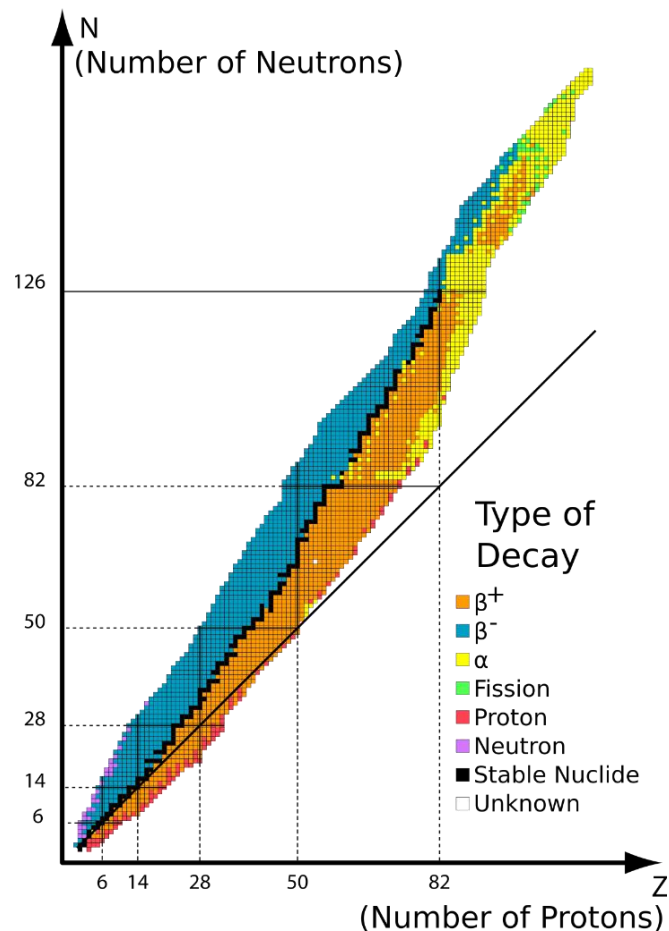
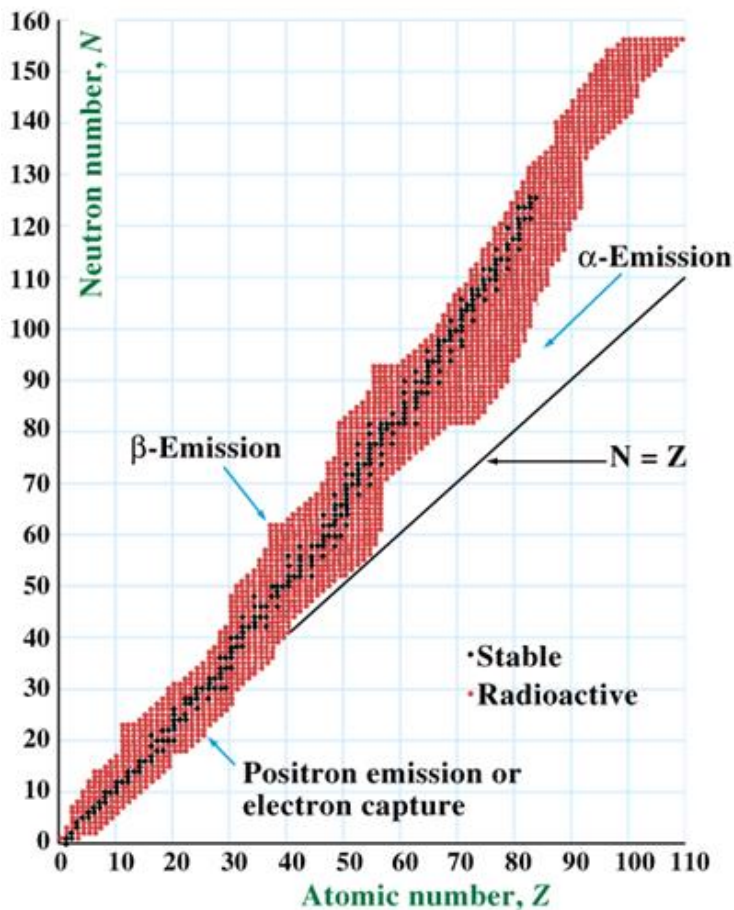
STABILITATEA NUCLEARĂ

- Nucleul conține protoni și neutroni (nucleoni) între care se exercită forța nucleară puternică (interacțiune tare)
- Atomii stabili au un raport între numărul de neutroni / protoni de aproximativ 1: 1
- Pe măsură ce numărul atomic crește, este necesară existența mai multor neutroni pentru a menține protonii împreună
- Raportul dintre numărul de neutroni/protoni pentru atomii stabili crește la 1,5: 1

- Factori principali ai stabilității nucleare:
 - ✓ raportul neutron / proton
 - ✓ numărul total de nucleoni din nucleu

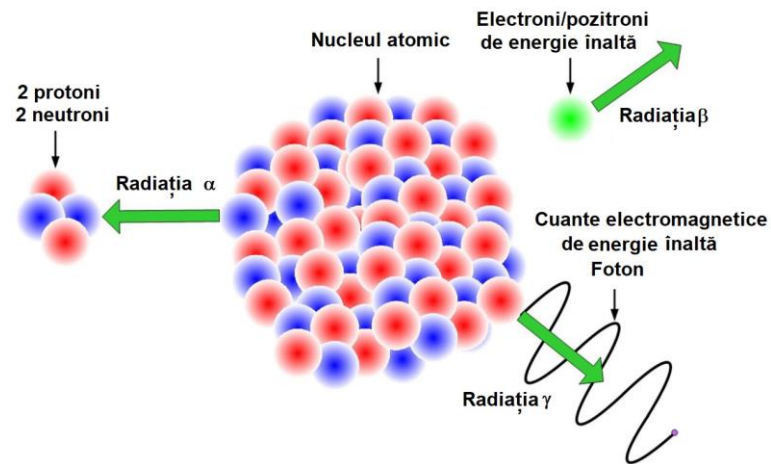
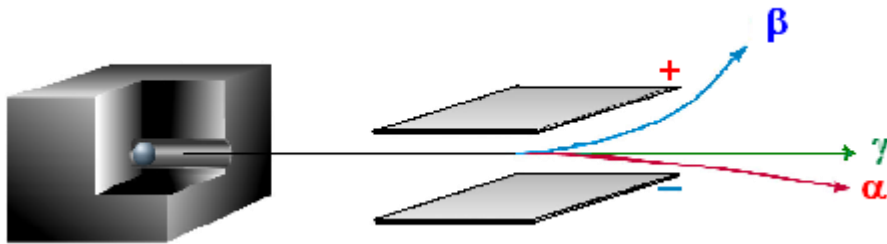


- Reprezentarea numărului protoni și neutron arată ca nucleele stabile se găsesc în „banda de stabilitate”
- Izotopii care sunt în afara benzii de stabilitate (radioizotopi) vor suferi transformări nucleare pentru a deveni mai stabili
- Toate elementele cu numărul atomic (Z) mai mare decât 83 sunt **radioactive**



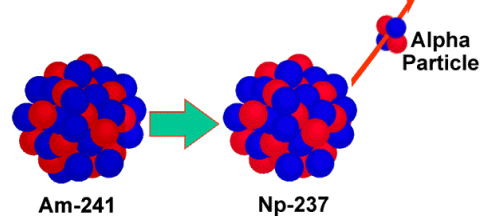
CARACTERIZAREA GENERALĂ A RADIOACTIVITĂȚII

- **Radioactivitate** - fenomenul de emisie de radiații de către unele substanțe numite substanțe radioactive.
- Procesul constă în emisia a trei tipuri de radiații: α , β și γ

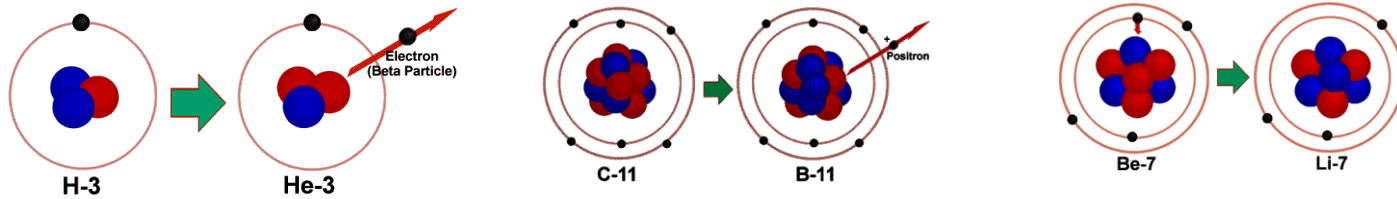


- **Radiațiile** reprezintă cuante de energie aflate în mișcare și care pot fi:
 - ✓ de natură **electromagnetică** - cuantele de schimb sunt **fotonii** cu masă de repaus nulă și care se deplasează cu viteza luminii
 - ✓ de natură **corpusculară** – cuantele de schimb sunt **particule** cu masa de repaus diferită de zero (neutroni, protoni, electroni, mezoni, etc.), aflate în mișcare cu energii cinetice dependente de procesul care le-au generat (dezintegrări, fisiune nucleară, acceleratoare de particule)
- O serie de elemente sunt radioactive în mod intrinsec (**radioactivitate naturală**) iar alte elemente pot deveni radioactive ca urmare a unor procese de interacțiune cu radiațiile corpusculare (α , β , **nuclee grele**, etc.) sau cu radiațiile γ (**radioactivitatea artificială**)

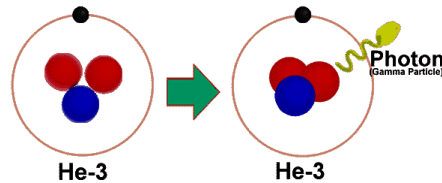
- **Radioactivitatea α** - emisia de către unele nuclee radioactive a unor structuri compacte de doi protoni și doi neutroni (nuclee de heliu)



- **Radioactivitatea β** - emisie de electroni (β^-), pozitroni (β^+) și captura de electroni (e_K)



- **Radioactivitatea γ** - emisie spontană de radiații electromagnetice de energie înaltă (γ)



- ☐ **Caracterizarea radioactivității** - cunoașterea unor proprietăți de cinetica dezintegrării sau a formării radioizotopilor precum și obținerea unor legi și mărimi specifice:

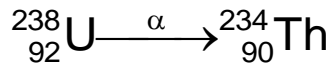
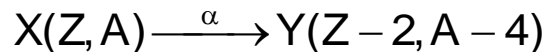
- *legea deplasării radioactive*
- *legea de dezintegrare radioactivă*
- *legea de acumulare radioactivă*
- *timpul de înjumătățire*
- *viața medie*
- *activitatea*

Legea deplasării radioactive

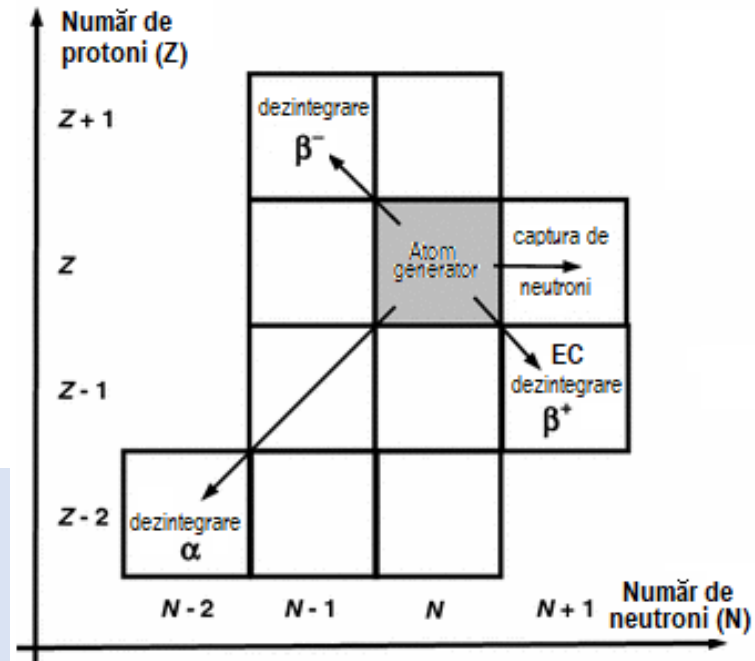
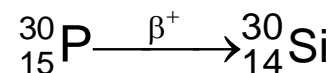
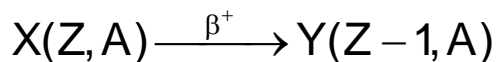
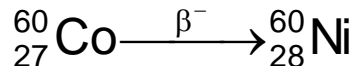
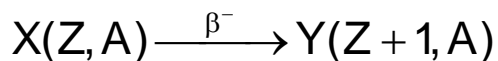
➤ Un element care se dezintegrează prin emisia unei radiații α sau β se transformă în alt element cu proprietăți fizico-chimice diferite.

*Legea de mai numește și legea lui **Fajans și Soddy** (Frederick Soddy și Kazimierz Fajans - 1913)*

✓ Prin emisia unei particule α de către un element, se formează un alt element situat în tabelul periodic cu două poziții la stânga, iar numărul de masă se micșorează cu patru unități atomice de masă:



✓ Prin emisia β^- se formează un element situat în tabelul periodic cu o poziție la dreapta, iar prin emisia unei particule β^+ se formează un element situat cu o poziție la stânga. În ambele cazuri, numărul de masă rămâne același, însă proprietățile chimice sunt diferite - *nucleee izobare*



Legea dezintegrării radioactive

➤ Formularea matematică a evoluției unui element radioactiv

➤ Probabilitatea de dezintegrare în intervalul de timp, a unui element radioactiv, este aceeași pentru toate nucleele (N) aceleiași specii și este independentă de influențele exterioare

$$-\frac{dN(t)}{dt} \propto N(t) \quad \text{sau} \quad -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t) \quad (1)$$

✓ constanta de proporționalitate λ , poartă numele de constantă de dezintegrare

$$\lambda = -\frac{1}{N(t)} \frac{dN(t)}{dt} = -\frac{1}{dt} \frac{dN(t)}{N(t)} \quad (2)$$

(Fracțiunea din masa elementului radioactiv, dezintegrat în unitatea de timp)

Din (1) $\frac{dN(t)}{N} = -\lambda dt$ prin integrare $\int \frac{dN(t)}{N} = -\int \lambda dt \Rightarrow \ln N = -\lambda t + C$ (3)

➤ Constanta de integrare se determină din condiția ca la momentul $t=0$, $N=N_0$ de unde rezultă $C = \ln N_0$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (4)$$

➤ Prin trecerea la forma exponențială, se obține legea de variație a numărului de nuclee radioactive în timp (*legea dezintegrării radioactive*) în care N_0 este numărul inițial de nuclee (la momentul $t=0$).

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

➤ Întrucât λ variază în limite foarte largi, această ecuație poate fi aplicată atât proceselor de dezintegrare foarte rapidă cât și proceselor de dezintegrare foarte lente

OBS

- Experimental, se determină rata de numărare dată de un detector, în funcție de timp.
- **Rata de numărare** a unui detector R , este egală cu rata de dezintegrare a nucleelor radioactive din sursă, înmulțită cu o constantă dependentă de eficacitatea de măsurare

$$R = \varepsilon \Lambda = \varepsilon \left(-\frac{dN(t)}{dt} \right) = \varepsilon \lambda N(t) \quad (6)$$

în care ε este eficacitatea de detecție

- ✓ Înlocuind (1) în (6) se obține:

$$R = R_0 e^{-\lambda t}$$

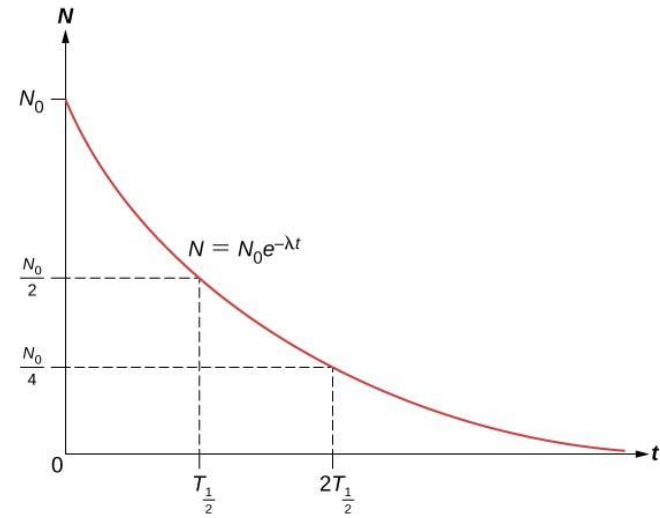
în care R este rata de numărare la momentul t datorată sursei radioactive, iar R_0 este rata de numărare la momentul $t=0$.

- Rata de numărare într-un sistem de detecție este în mod obișnuit, dată ca număr de impulsuri per secundă (cps), număr de impulsuri per minut, etc și diferă de rata de dezintegrare (dezintegrări per minut, *dpm*, dezintegrări per secundă, *dps*, etc.) printr-un factor reprezentând eficacitatea de detecție, ε ; (*dpm*) $\varepsilon = (\text{cpm})$.

Timpul de înjumătățire

- Timpul după care numărul de nuclee dezintegrate scade la jumătate din numărul inițial ($N=N_0/2$), poartă numele de *timp de înjumătățire* $T_{1/2}$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$



- Este o caracteristică fiecărui element radioactiv variază într-un domeniu de la mai puțin de 10^{-6} secunde până la 10^{10} ani.

Viața medie

- *Timpul mediu de viață* τ - raportul dintre suma vieților tuturor nucleelor radioactive și numărul inițial al acestora

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t dN}{\int_0^{\infty} dN} \Rightarrow \tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t N_0 \lambda e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

- *Timpul mediu de viață* este o mărime cu semnificație fizică corelată cu *lărgimea liniei spectrale*

$$\Delta E = \frac{\hbar}{\tau} = \frac{0.658 \times 10^{-15} \text{ eV}}{\tau(\text{sec})}$$

Activitatea

- Se definește activitatea unei probe radioactive ca viteza de scădere a numărului de nuclee în timp

$$\Lambda(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t)$$

- Variația în timp a activității unei surse radioactive, se obține plecând de la legea de variație în timp a numărului de nuclee dintr-o sursă radioactivă:

$$\Lambda(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \Lambda_0 e^{-\lambda t}$$

$$\Lambda_0 = \lambda N_0 \quad \text{activitatea inițială a sursei} \quad \Lambda_0 = \lambda \frac{m}{A} N_A = 4.18 \times 10^{23} \frac{1}{T_{\frac{1}{2}}} \frac{m}{A}$$

- ✓ Prin logaritmare se obține legătura dintre activitate și constanta de dezintegrare sau de timpul de înjumătățire:

$$\ln \frac{\Lambda}{\Lambda_0} = -\lambda t = -0.693 \frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$$

- ✓ Această expresie se mai poate scrie folosind logaritmul în baza 10

$$\lg \frac{\Lambda}{\Lambda_0} = -0.30 \frac{t}{T_{1/2}}$$

- Reprezentarea grafică a funcției $\lg \frac{\Lambda}{\Lambda_0} = f(t)$ este o dreaptă și permite o evaluare ușoară a variației activității în timp a activității unei probe

➤ Unitatea de măsură a activității este *Bequerel (Bq)*:

$$1 \text{ Bq} = \frac{1 \text{ dez.}}{\text{sec.}}$$

➤ O mărime utilizată frecvent este *Curie (Ci)*

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

➤ Cantitatea de radiații emise de o substanță radioactivă este dependentă de masa sa, și se utilizează noțiunea de *activitate per unitate de masă* (activitatea specifică)

$$\Lambda_s = \frac{\Lambda}{m} \left[\frac{\text{Ci}}{\text{g}} \right]$$

Nuclid	T _{1/2} (min)	Mod de dezintegrare	Activitatea specifică maxima
C-11	20.4	100% β ⁺	9220 Ci/μmol (341 TBq/μmol)
N-13	9.98	100% β ⁺	18900 Ci/μmol (700 TBq/μmol)
O-15	2.03	100% β ⁺	91730 Ci/μmol (3394 TBq/μmol)
F-18	109.8	97% β ⁺	1710 Ci/μmol (63.4 TBq/μmol)
Cu-62	9.74	99.7% β ⁺	19310 Ci/μmol (714 TBq/μmol)
Ga-67	4696.8	100% ε	40 Ci/μmol (1.5 TBq/μmol)
Ga-68	68.0	89% β ⁺	2766 Ci/μmol (102 TBq/μmol)
Br-75	96.0	75.5% β ⁺	1960 Ci/μmol (73 TBq/μmol)
Rb-82	1.25	95.5% β ⁺	150400 Ci/μmol (5565 TBq/μmol)
In-111	4048.8	100% ε	46 Ci/μmole (1.7 TBq/μmol)
I-122	3.62	75.8% β ⁺	51950 Ci/μmol (1922 TBq/μmol)
I-123	793.4	100% ε	237 Ci/μmol (8.8 TBq/μmol)
I-124	6019.2	23.3% β ⁺	31 Ci/μmol (1.15 TBq/μmol)
Tl-201	4374.7	100% ε	42.6 Ci/μmol (1.58 TBq/μmol)

- Există nuclee radioactive care se dezintegrează concomitent pe mai multe căi, care corespund tranzițiilor care au loc în nucleu, fiecare tranziție “ k ” fiind caracterizată de o constantă de dezintegrare λ_k
- Se definește *activitatea parțială* a unei surse radioactive corespunzătoare unei anumite tranziții “ k ”

$$\Lambda_k(t) = \left(-\frac{dN(t)}{dt} \right)_k = \lambda_k N(t)$$

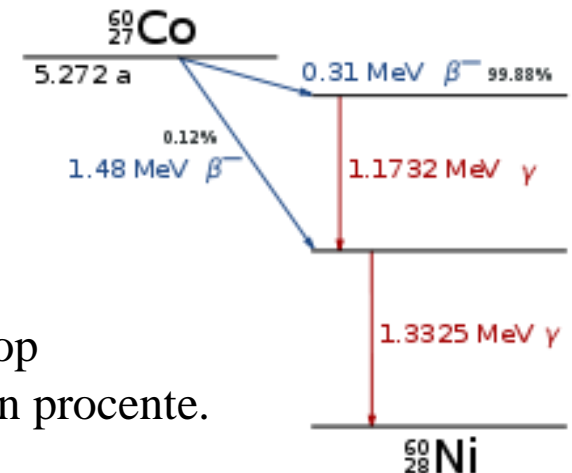
- *Activitatea totală* a sursei fiind dată de suma *activităților parțiale*:

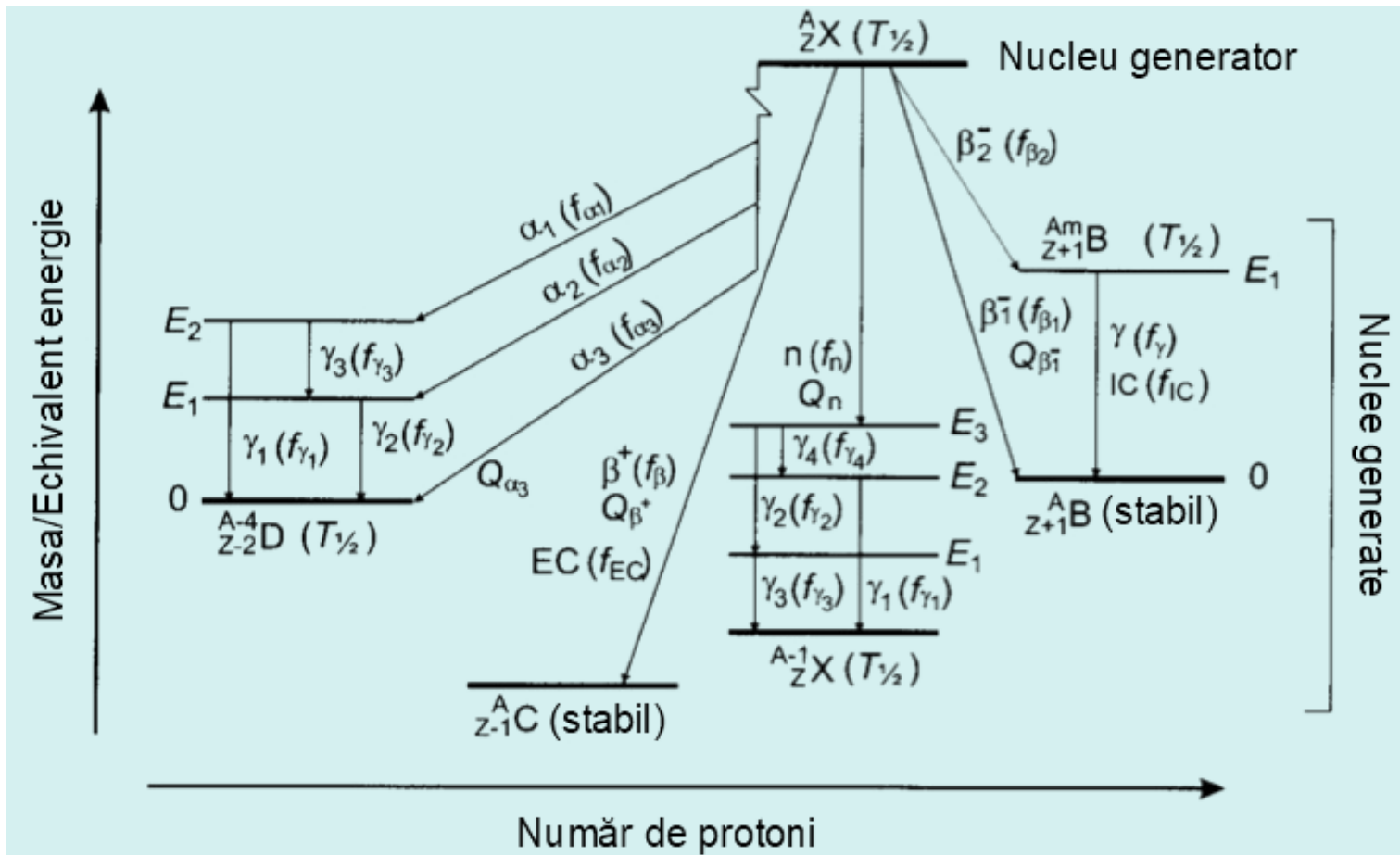
$$\Lambda(t) = \sum_k \Lambda_k = N(t) \sum_k \lambda_k = N(t) \lambda$$

- Se definește intensitatea unei tranziții radioactive, ca raportul dintre activitatea sursei datorate unei anumite tranziții și activitatea totală a sursei

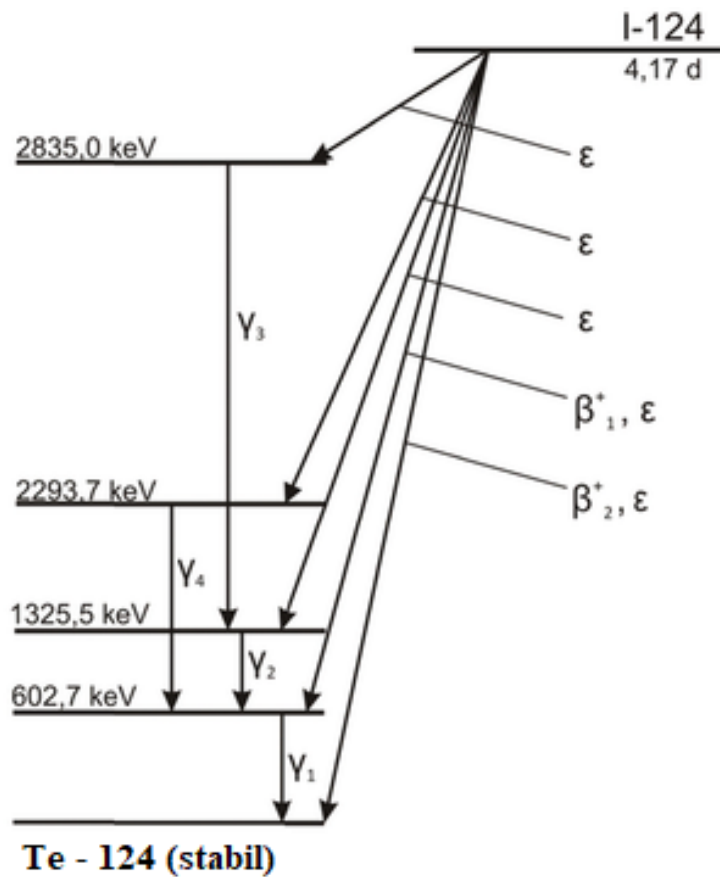
$$i = \frac{\Lambda_{ki}}{\Lambda} = \frac{\lambda_k}{\lambda}$$

- Intensitatea unei tranziții este o mărime specifică fiecărui izotop radioactiv și este dată în schemele de dezintegrare exprimată în procente.





Schema generală a procesului de dezintegrare

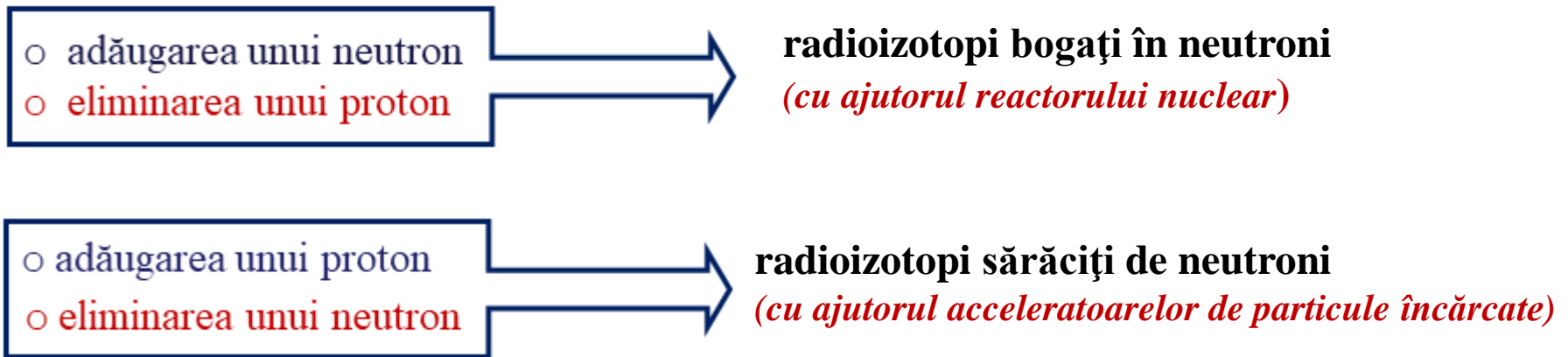


Tranzitia	Energia [KeV]	Probabilitatea [%]
β^+_{1}	1534.9*	11.7
β^+_{2}	2137.6*	10.8
γ_1	602.7	63.0
γ_2	722.8	10.4
γ_3	1509.5	3.1
γ_4	1691.0	10.9
X	27.2	16.7
X	27.5	31.0
ϵ	865.9	11.4
ϵ	2556.9	25.1
ϵ	3159.6	24.1

Schema de dezintegrare a I-124

Radioactivitatea artificială. Legea de acumulare radioactivă

- Fenomenul de radioactivitate este un rezultat al perturbațiilor care apar în bilanțul dintre numărul de neutroni și protoni din nucleu-poate fi realizat prin unul dintre următoarele procese nucleare (radioactivitate artificială):



$q(t)$ - viteza cu care se formează radioizotopii în urma reacțiilor nucleare

$v(t)$ - viteza lor de dezintegrare

$$v(t) = \frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t)$$

- variația numărului de radioizotopi va fi

$$\frac{dN(t)}{dt} = q(t) + v(t) \quad (1) \quad \text{sau} \quad \frac{dN(t)}{dt} + \lambda N(t) = q(t) \quad (2)$$

- ✓ ecuație diferențială neomogenă de ordinul I cu coeficienți constanți
- ✓ soluția este de tipul $N(t) = C(t)e^{-\lambda t}$ (3)

✓ prin derivare conduce la

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{dC(t)}{dt} e^{-\lambda t} - \lambda C(t) e^{-\lambda t} \quad (4)$$

✓ Introducând relațiile (3) și (4) în ecuația (2) rezultă

$$\frac{dC(t)}{dt} e^{-\lambda t} - \cancel{\lambda C(t) e^{-\lambda t}} + \cancel{\lambda C(t) e^{-\lambda t}} = q(t) \implies \frac{dC(t)}{dt} = q(t) e^{\lambda t}$$

prin integrare $C(t) = \frac{q(t)}{\lambda} e^{\lambda t} + C_1$

✓ Prin urmare soluția ecuației (2) va fi

$$N(t) = \left(\frac{q(t)}{\lambda} e^{\lambda t} + C_1 \right) e^{-\lambda t} = \frac{q(t)}{\lambda} + C_1 e^{-\lambda t}$$

➤ Constanta C , se determină din condițiile inițiale; la momentul inițial, $t=0$, numărul de nuclee radioactive este $N=0$

$$0 = \frac{q(t)}{\lambda} + C_1 \implies C_1 = -\frac{q(t)}{\lambda}$$

deci **legea de acumulare radioactivă** este dată de:

$$N(t) = \frac{q(t)}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

➤ constituie o măsură a formării surselor radioactive artificiale prin reacții nucleare

- Viteza de formare a radioizotopilor $q(t)$ este legată de natura reacției nucleare care are loc între particulele fascicolului incident și țintă
- Pentru o masă m de izotopi stabili caracterizați de numărul de masă A , un debit al fluxului de particule incidente φ și o secțiunea eficace de interacție σ , atunci viteza de formare a radioizotopilor va fi:

$$q(t) = \frac{m}{A} N_A \varphi \sigma$$

- Prin urmare, legea de formare a radioizotopilor artificiali este dată de

$$N(t) = \frac{m}{A} N_A \frac{\varphi \sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad N_A \text{ este numărul lui Avogadro}$$

- După încetarea iradierii, nucleele formate se dezintegrează după legea de dezintegrare, astfel că, după o anumită perioadă de timp τ de la încetarea iradierii (*timpul de răcire* al sursei), numărul de nuclee radioactive va fi:

$$N(t) = \frac{m}{A} N_A \frac{\varphi \sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda \tau}$$

- Această relație, stă atât la baza evaluării activității surselor radioactive obținute în instalațiile de iradiere (**radioactivitate indusă**)

- Activitatea unei surse obținute prin activarea unei cantități m dintr-o probă, măsurată după un timp de răcire τ , va fi:

$$\Lambda(t) = \frac{m}{A} N_A \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda \tau}$$

- Dacă abundența izotopică a elementului activat din probă este f , atunci, numărul de nuclee activate (prin urmare și activitatea) trebuie ponderat cu această fracțiune.
- Practic, în producerea radioizotopilor se determină *rata de producere a unui radioizotop (P) prin reacții nucleare* (activitatea generată într-un gram de substanță țintă (t) într-un timp de iradiere de o oră)

$$R_{tP} = N_t \sigma_{tP} \phi [1 - e^{-\lambda_P T}] \left[\frac{\text{Ci}}{\text{gram.ora}} \right] \quad T=3600 \text{ s}$$

$$\sigma_{tp} = \frac{\int_0^{\infty} \phi(E) \sigma_{tp}(E) dE}{\int_0^{\infty} \phi(E) dE}$$

Secțiunea eficientă ponderată de fluxul de particule $\Phi(E)$ corespunzător fiecărui nucleu țintă și produs de reacție p

$$N_t = \frac{N_A}{A_t} \left[\frac{\text{atomi}}{\text{gram}} \right]$$

Densitatea atomică a materialului țintă cu N_A numărul lui Avogadro și A_t masa atomică a elementului țintă.

❖ *Radioactivitatea naturală provine din radioelementele produse în stele miliarde de ani în urmă*

- Când s-a format Pământul, aproximativ în urmă cu 5 miliarde de ani, materia era formată din atomi **stabili** și **instabili**
- În acest interval de timp majoritatea atomilor instabili s-au dezintegrat prin emisii radioactive și au sfârșit prin atingerea stabilității.
- Există totuși în mod natural atomi radioactivi:
 - radioizotopii caracterizați printr-un timp de înjumătățire foarte lung precum **Uraniu-238** (4,5 miliarde de ani), **Thoriu-232**, (14 miliarde ani) și **Potasiu-40** (1,3 miliarde de ani) care nu au avut suficient timp pentru a se dezintegra complet de când au fost creați.
 - descendenții radioactivi ai acestora, cum ar fi **Radiu-226**, care este în mod constant regenerat după dezintegrarea Uraniului-238. **Radiu-226** se transformă lent într-un gaz, **Radon-222**, care este el însuși radioactiv;
 - radioizotopii creați prin acțiunea radiațiilor cosmice cu anumite nuclee atomice, de exemplu **Carbon -14**, care se formează constant în atmosferă
- Radioizotopii naturali sunt prezenți pe întreaga planetă:
 - ✓ Atmosferă (Carbon-14, Radon-222)
 - ✓ Scoarța terestră (Uraniu-238 și Uraniu-235, Radiu-226, etc.)
 - ✓ Alimentație (Potasiu-40)

Radionuclizi din mediu

Nuclid	Timpul de înjumătățire (ani)	Origine
Tritiu	12.43	N+A
Beriliu-7	0.097	N
Beriliu-10	1.6×10^6	N
Carbon-14	5730	N+A
Siliciu-32	140	N
Clor-36	3.01×10^5	N+A
Argon-39	269	N
Kripton-85	10.76	A
Kripton-81	2.1×10^5	N
Iod-129	1.57×10^7	N+A
Potasiu-40	1.31×10^9	N
Rubidiu-87	4.88×10^{10}	N
Cesiu-137	30.1	A

Radionuclizi din dezintegrările seriilor Uraniului și Toriului

Nuclid	Timpul de înjumătățire (ani)	Origine
Uraniu-238	4.47×10^9	N
Uraniu-235	7.13×10^8	N
Uraniu-234	2.48×10^5	N
Protactiu-231	3.43×10^4	N
Toriu-230	7.52×10^4	N
Radiu-226	1602	N
Radiu-228	5.75	N
Radon-222	1.04×10^{-2}	N
Radon-220	1.76×10^{-6}	N
Plumb-201	22.3	N

N- Natural (dezintegrarea radionuclizilor primordiali produși în nucleosinteza stelară, interacțiunea radiației cosmice cu atomii din atmosferă și/sau din scoța terestră)

A – Antropogenic (explozii nucleare în atmosferă sau subterane, industria nucleară, medicina, nucleară, etc.)

N+A – contribuții semnificative din surse naturale sau antropogenice

Radioizotopii din corpul uman

Nuclid	Timpul de înjumătățire (ani)	Masa radioizotopului în corpul uman (g)	Masa elementului în corpul uman (g)	Activitatea din corpul uman (Bq)
Potasiu-40	1.26×10^9	0.0165	140	4 340
Carbon-14	5 730	1.6×10^{-8}	16 000	3 080
Rubidiu- 87	4.9×10^{10}	0.19	0.7	600
Plumb- 210	22.3	5.4×10^{-10}	0.12	15
Tritiu (^3H)	12.43	2×10^{-14}	7 000	7
Uraniu -238	4.46×10^9	1×10^{-4}	1×10^{-4}	3 - 5
Radiu -228	5.76	4.6×10^{-14}	3.6×10^{-11}	5
Radiu -226	1,620	3.6×10^{-11}	3.6×10^{-11}	3

