

卒業論文発表会

2月2日, 2015年, 福井大学工学部物理工学科

原子核のアルファ崩壊系列

物理工学科 松岡弘和

研究の目的

原子核の α 崩壊系列の時間発展を計算し、その計算結果をグラフ化し、それぞれの系列の核種分布の振る舞いの特徴を調べる。

特に、放射平衡と呼ばれる現象が起きるかどうかの条件を論じる。

α 崩壊とは

放射性崩壊のひとつで、原子核が α 線 (${}^4\text{He}$ の原子核) を放出して別種の原子核に変化することで、反応式で表せば下式のようなになる。



A : 質量数

Z : 原子番号 (陽子の個数)

N : 中性子数

X, Y : 元素記号

- α 崩壊系列中には質量数が4だけ異なる核種が含まれる
- 途中に β 崩壊が起き、**Z**と**N**が β 安定線に近い比率になるように調整される

α 崩壊系列の簡単な例題

原子核 A, B, C, D, E が $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ の経路で崩壊する崩壊系列を考える。
半減期は（単位は秒）

$$T_{\frac{1}{2}}(A) = 10^7,$$

$$T_{\frac{1}{2}}(B) = 10^2,$$

$$T_{\frac{1}{2}}(C) = 10^0,$$

$$T_{\frac{1}{2}}(D) = 10^4,$$

$$T_{\frac{1}{2}}(E) = \infty \text{ (安定核)}$$

と設定する。

重要な物理量

半減期	$T_{1/2}$	$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$	放射性崩壊により、原子核の個数が半分に減るのに要する時間
寿命	$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$	$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$	$\frac{1}{e}$ に減るのに要する時間
崩壊定数	$\lambda = \frac{1}{\tau}$	$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$	原子核が単位時間あたりに崩壊する確率
放射能の量	$D = \lambda N(t)$		放射性物質中の1秒間に崩壊する原子核の個数。単位はベクレル (Bq)

例題の崩壊過程を表す微分方程式

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A$$

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B$$

$$\frac{dN_C}{dt} = \lambda_B N_B - \lambda_C N_C$$

$$\frac{dN_D}{dt} = \lambda_C N_C - \lambda_D N_D$$

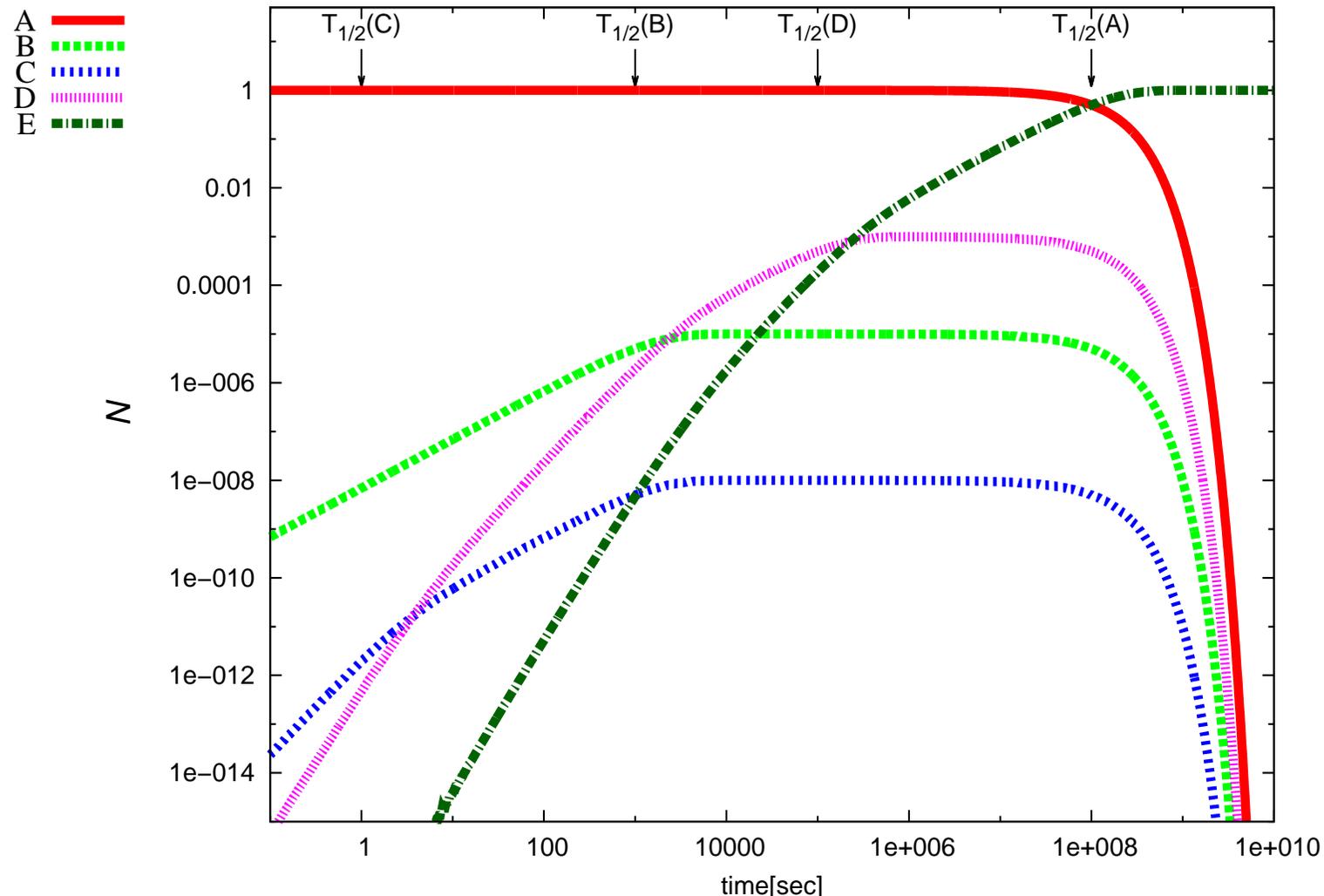
$$\frac{dN_E}{dt} = \lambda_D N_D$$

上式は定数係数連立一階線形常微分方程式なので一般解を求めることができる。

例題の解

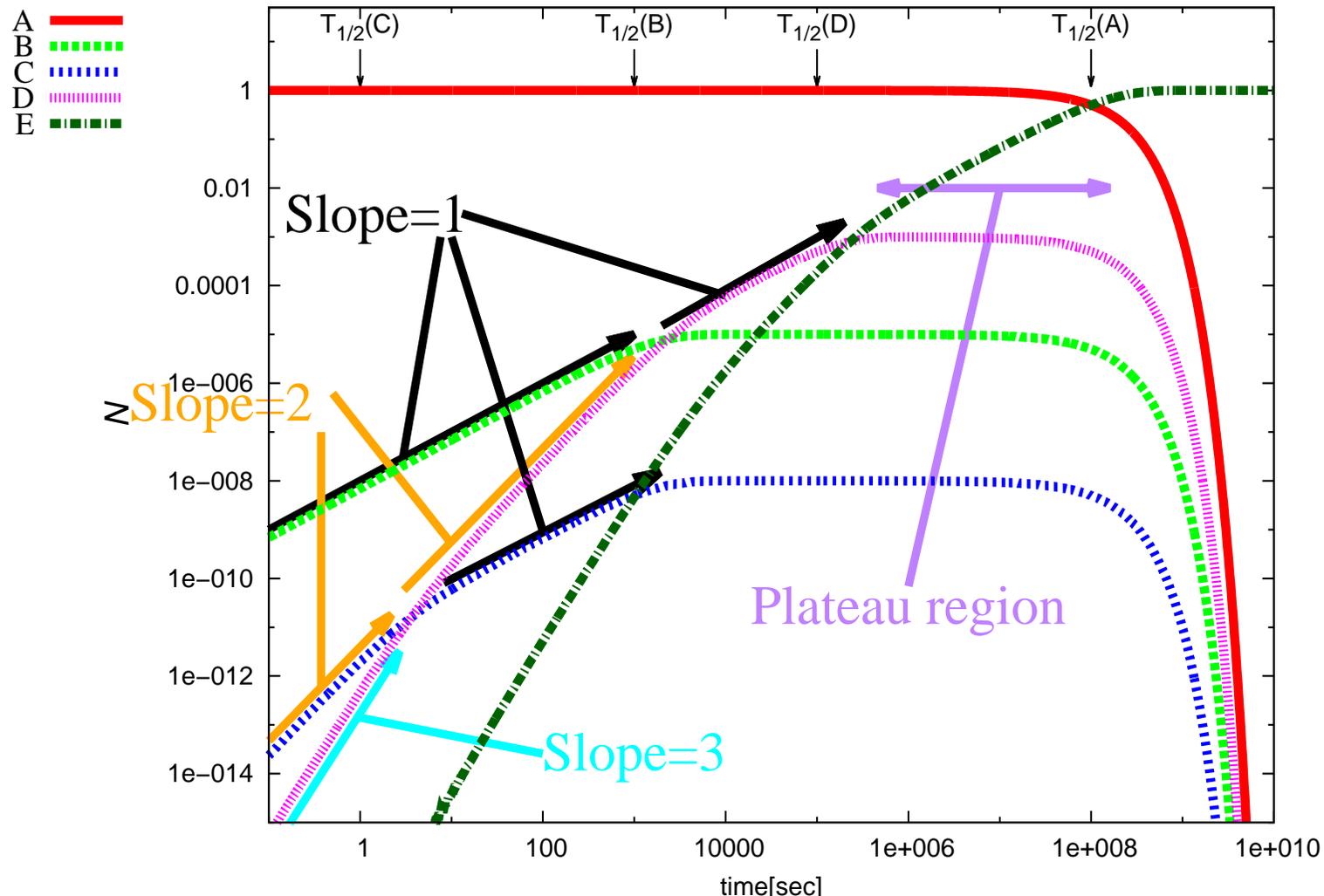
$N_A \sim N_E$ の時間発展のグラフを下に示す。

ただし、核の個数は、時刻ゼロにおける起点の核の個数を1に規格化している。



放射平衡と放射平衡に至るまでの過渡過程

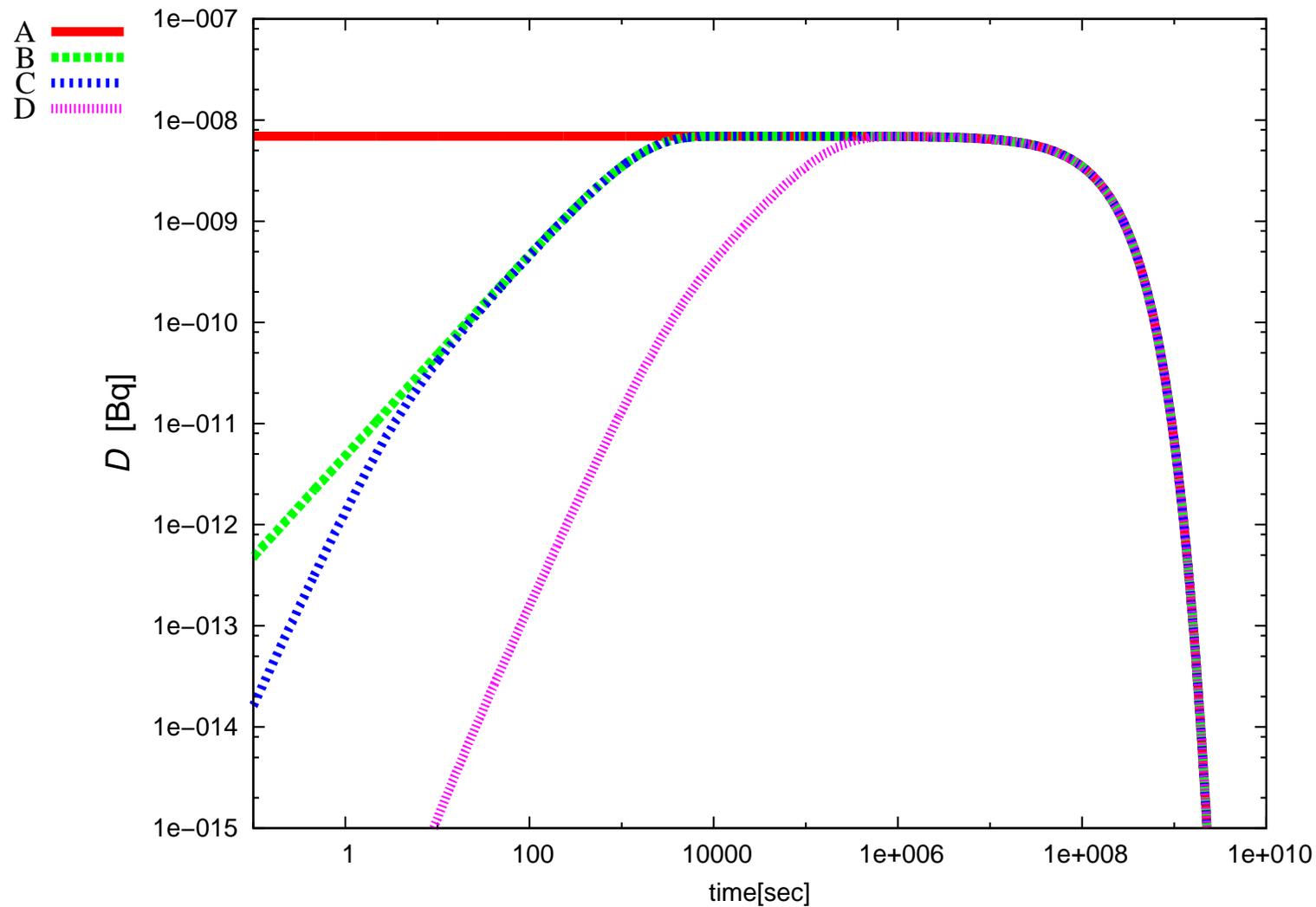
放射平衡とは、親核と娘核の量的な関係が時間的にほぼ一定の割合で推移する状態



例題を放射能の量で描き直すと...

y軸を放射能の量として示す。

Eは安定核であるので除外してある。



崩壊経路に分岐がある場合

崩壊経路が途中で複数の経路に分岐する場合は半減期に加えて分岐比のデータが必要になる。分岐する場合については、卒業論文中で下記の2つの場合の解について詳しく論じた（本発表では省略）。

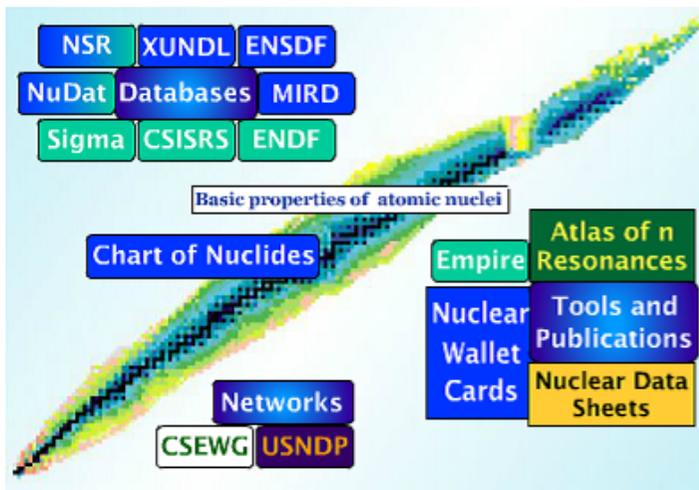
- 親核の崩壊先が2つに分岐する場合
- 親核が複数の経路を経て同一の娘核に崩壊する場合

計算に用いるデータ

米国立核データセンター (National Nuclear Data Center)

ウェブサイト url: <http://www.nndc.bnl.gov>

- サイト内のデータを用いる
- 利用するデータの種類
 - 半減期
 - 崩壊の分岐比



Blizzard 2015

Possible interruptions in service Jan 26-28 due to blizzard.

Covariance Workshop

USNDP-CSEWG 2014 Presentations

ND2013 Proceedings

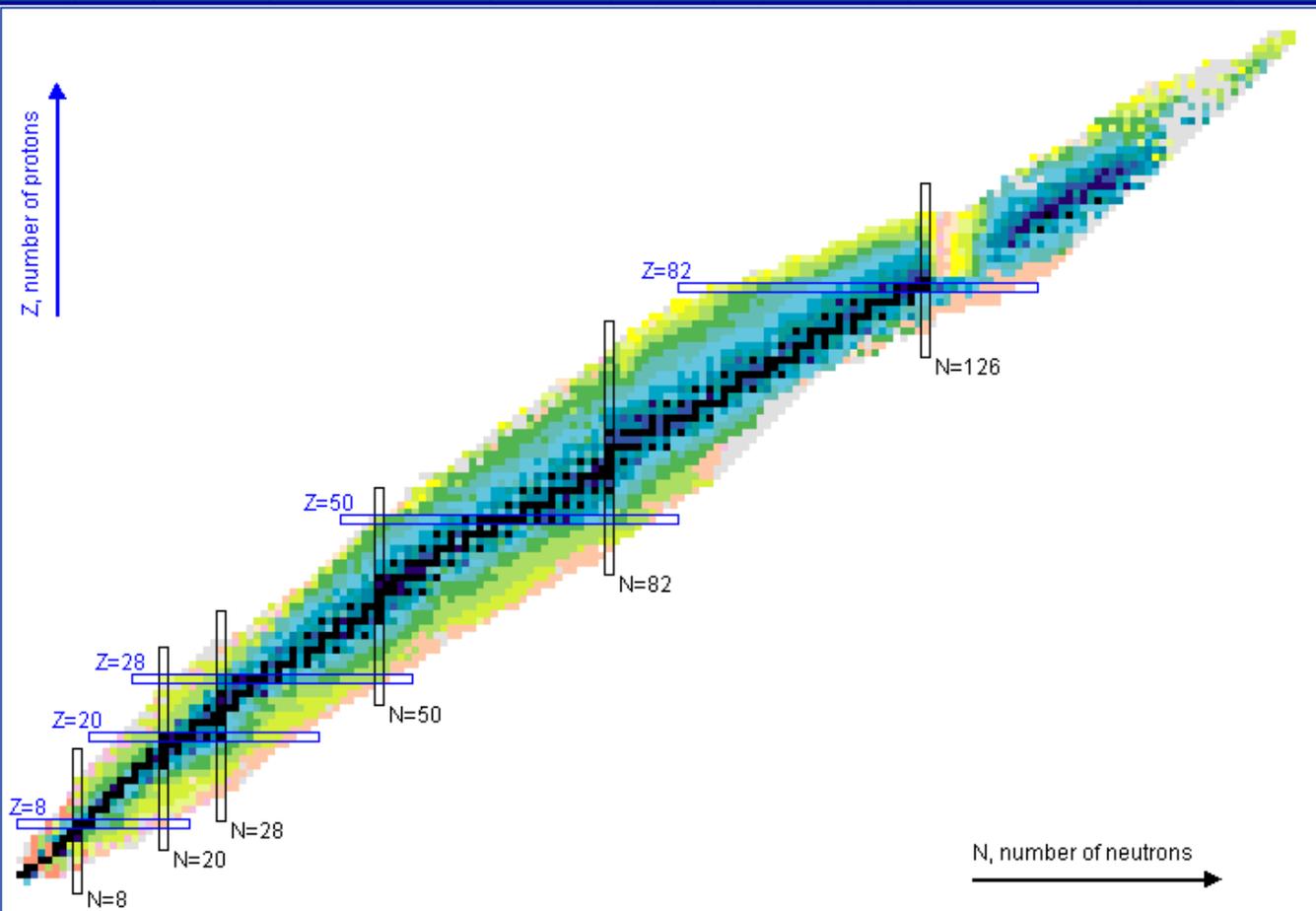
Main	Structure & Decay	Reactions	Bibliography	Networks & Links	Publications	Meetings
AMDC Atomic Mass Data Center, Q-value Calculator	Atlas of Neutron Resonances Parameters & thermal values	CapGam Thermal Neutron Capture γ -rays	Chart of Nuclides Basic properties of atomic nuclei			
Covariances of Neutron Reactions	CSEWG Cross Section Evaluation Working Group	CSISRS alias EXFOR Nuclear reaction experimental data	Empire Nuclear reaction model code system, Reference paper			
ENDF Evaluated Nuclear (reaction) Data File, Sigma	ENSDF Evaluated Nuclear Structure Data File	IRDF International Reactor Dosimetry File	MIRD Medical Internal Radiation Dose			
NMMSS & DoE NMIRDC Safeguards & inventory decay data standards	NSR Nuclear Science References	Nuclear Data Sheets Nuclear structure & decay data journal, Special Issues on reaction data	Nuclear Wallet Cards Ground & isomeric states properties, Homeland Security version			
NucRates MACS & Astro-physical reaction rates	NuDat Nuclear structure & decay Data	USNDP U.S. Nuclear Data Program	USNDP/CSEWG GForge Collaboration Server			
XUNDL Experimental Un-evaluated Nuclear Data List						



Chart of Nuclides

Click on a nucleus for information

Color code	Half-life	Decay Mode	Q_{β^-}	Q_{EC}	Q_{β^+}	S_n	S_p	Q_{α}	S_{2n}	S_{2p}	$Q_{2\beta^-}$	Q_{2EC}	Q_{ECp}
Q_{β^-n}	BE/A	(BE-LDM Fit)/A	$E_{1st\ ex. st.}$	E_{2+}	E_{3-}	E_{4+}	E_{4+}/E_{2+}	β_2	$B(E2)_{42}/B(E2)_{20}$	$\sigma(n,\gamma)$	$\sigma(n,F)$	235U FY	239Pu FY



Interactive Chart of Nuclides
Click on a nucleus to obtain information

Tooltips
On
Off

Zoom
1
2
3
4
5
6
7

Uncertainty
NDS
Standard

Screen Size
Narrow
Wide

Nucleus

Seconds

> 10+15	10-01
10+10	10-02
10+07	10-03
10+05	10-04
10+04	10-05
10+03	10-06
10+02	10-07
10+01	10-15
10+00	< 10-15
unknown	

Search options:
Levels and Gammas
Nuclear Wallet Cards
Decay Radiation

[Help - Glossary](#)

This site is better seen using the latest version of internet browsers.

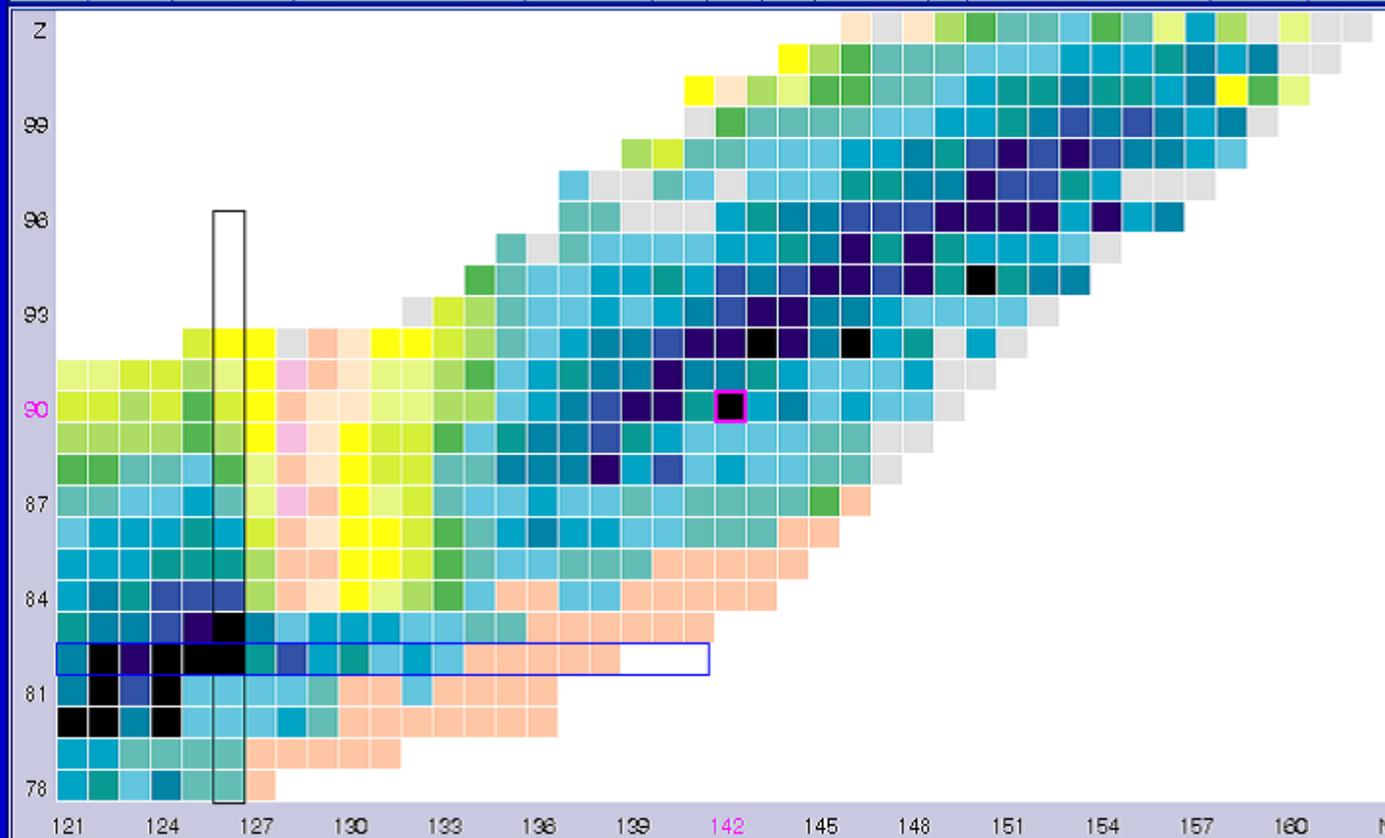
Database Manager and Web Programming: Alejandro Sonzogni, NNDC, Brookhaven National Laboratory, sonzogni@bnl.gov
Data Source: National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, based on ENSDF and the Nuclear Wallet Cards.



Chart of Nuclides

Click on a nucleus for information

Color code	Half-life	Decay Mode	Q _{β-}	Q _{EC}	Q _{β+}	S _n	S _p	Q _α	S _{2n}	S _{2p}	Q _{2β-}	Q _{2EC}	Q _{ECp}
Q _{β-n}	BE/A	(BE-LDM Fit)/A	E _{1st ex. st.}	E ₂₊	E ₃₋	E ₄₊	E _{4+/E₂₊}	β ₂	B(E ₂) ₄₂ /B(E ₂) ₂₀	σ(n,γ)	σ(n,F)	235U FY	239Pu FY



Tooltips
 On
 Off

Zoom: 1, 2, 3, **4**, 5, 6, 7

Uncertainty: **NDS**, Standard

Screen Size: **Narrow**, Wide

Nucleus: go

Seconds

> 10+15	10-01
10+10	10-02
10+07	10-03
10+05	10-04
10+04	10-05
10+03	10-06
10+02	10-07
10+01	10-15
10+00	< 10-15
unknown	

Ground and isomeric state information for ²³²₉₀Th

E(level) (MeV)	Jπ	Δ(MeV)	T _{1/2}	Abundance	Decay Modes
0.0	0+	35.4526	1.40E10 y 1	100%	α : 100.00 % SF : 1.1E-9 %

A list of levels, a level scheme and decay radiation information are available

Search options:

[Levels and Gammas](#)
[Nuclear Wallet Cards](#)
[Decay Radiation](#)

[Help - Glossary](#)

長寿命核種を起点とする α 崩壊系列

α 崩壊系列は質量数が4だけ異なる核種が連なって作られるので、以下の4種類が存在する。

- トリウム系列 (質量数 : $4n$)

$$\text{半減期 : } T_{\frac{1}{2}} = 1.40 \times 10^{10} \text{ year} \quad \text{起点 : } {}^{232}\text{Th}$$

- ネプツニウム系列 (質量数 : $4n+1$)

$$\text{半減期 : } T_{\frac{1}{2}} = 2.14 \times 10^6 \text{ year} \quad \text{起点 : } {}^{237}\text{Np}$$

- ウラン系列 (質量数 : $4n+2$)

$$\text{半減期 : } T_{\frac{1}{2}} = 4.468 \times 10^9 \text{ year} \quad \text{起点 : } {}^{238}\text{U}$$

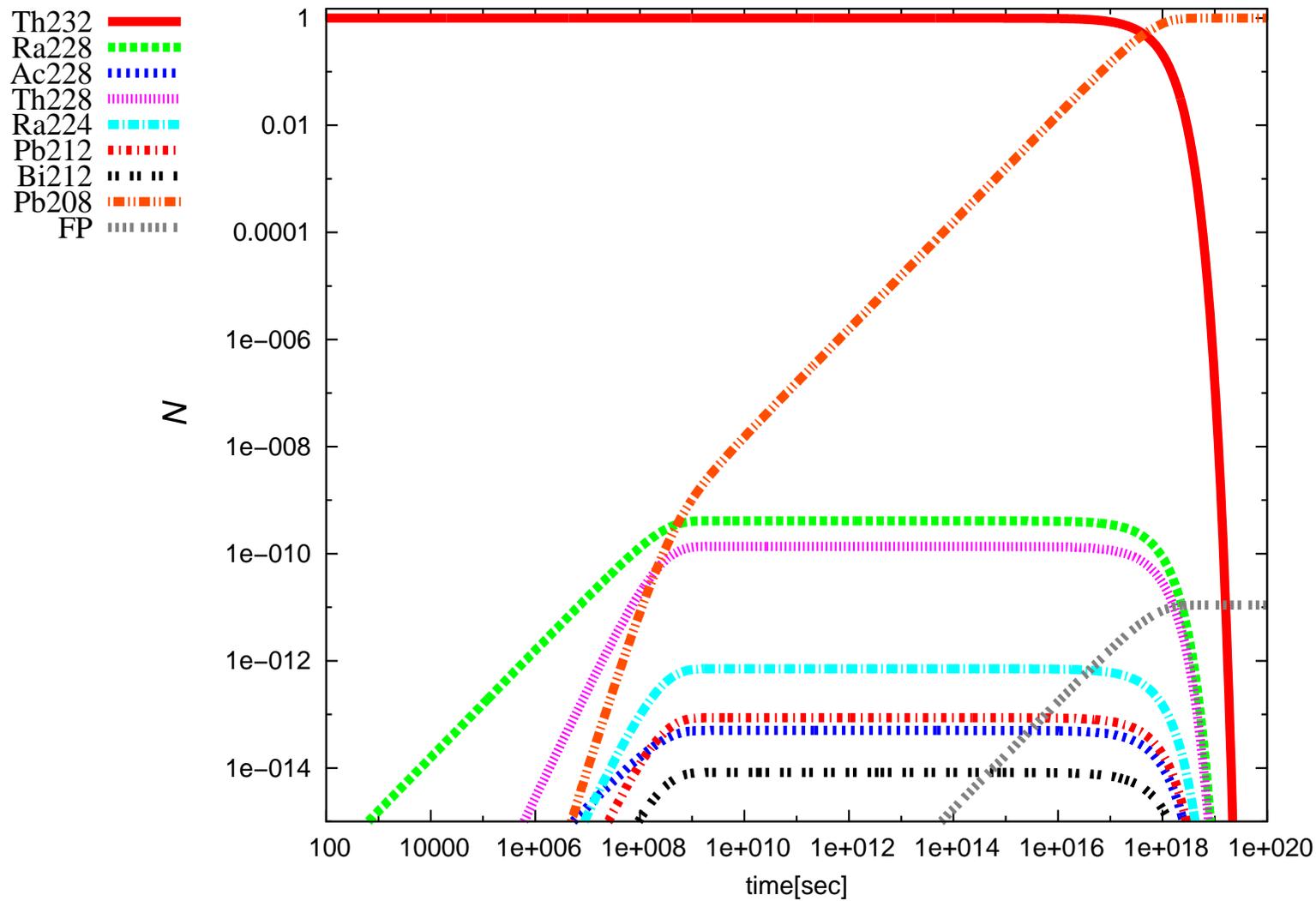
- アクチニウム系列 (質量数 : $4n+3$)

$$\text{半減期 : } T_{\frac{1}{2}} = 7.038 \times 10^8 \text{ year} \quad \text{起点 : } {}^{235}\text{U}$$

長寿命核種を起点とする α 崩壊系列の時間変化1

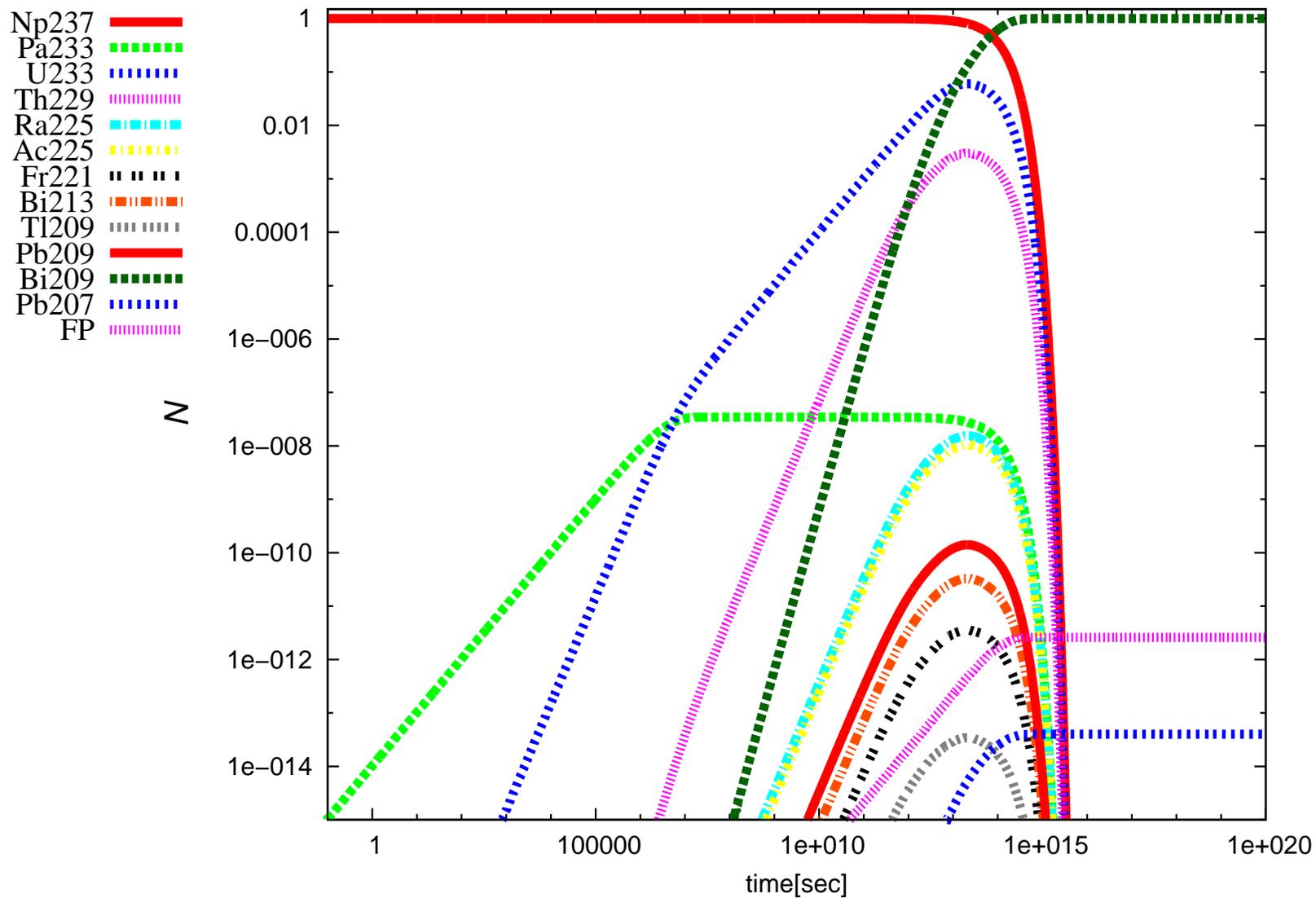
放射平衡のプラトー領域を示す例として、トリウム系列を示す。

ウラン系列とアクチニウム系列についても、同様に放射平衡のプラトー領域を示す。



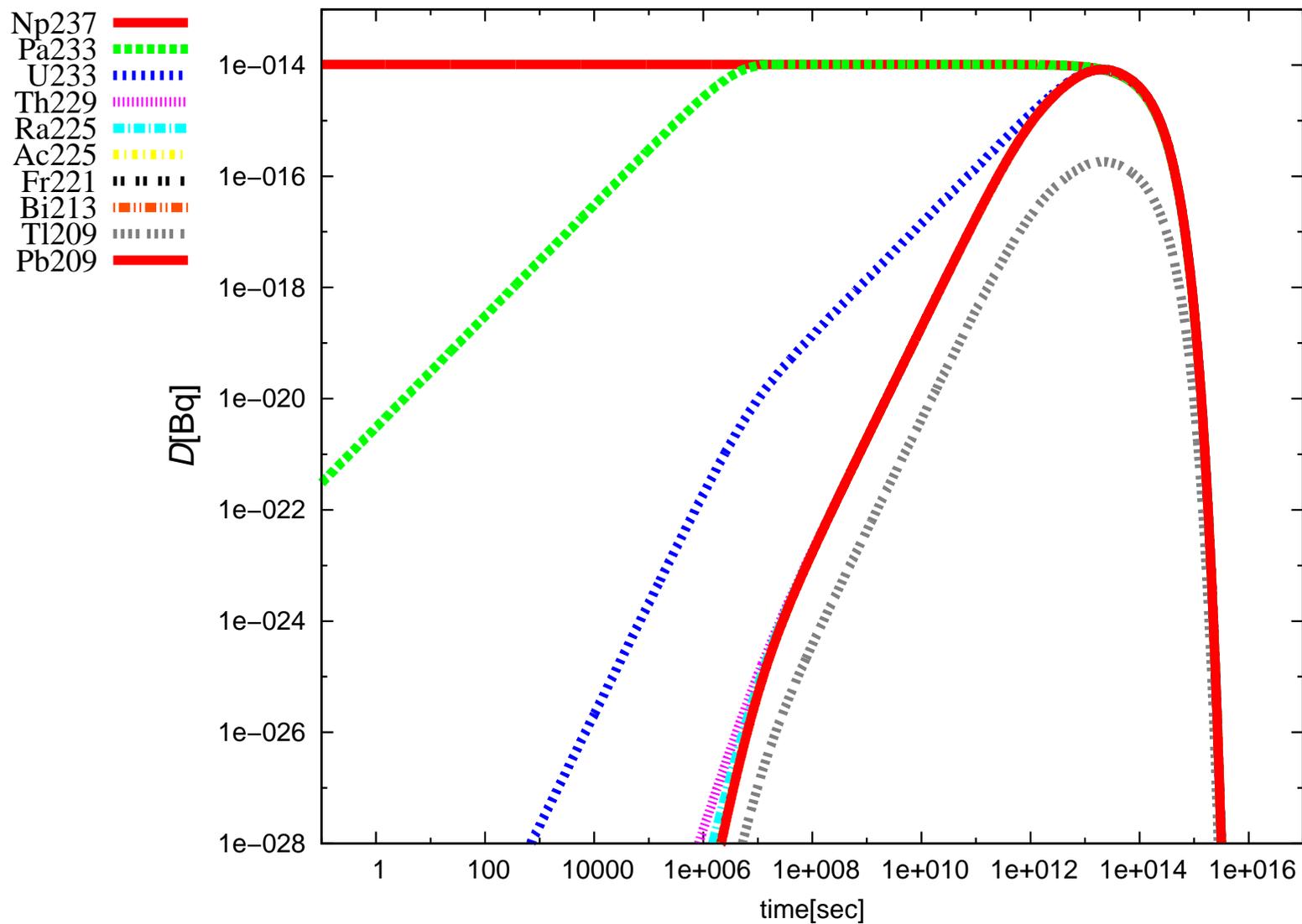
長寿命核種を起点とする α 崩壊系列の時間変化2

放射平衡のプラトー領域がみられない例として、ネプツニウム系列を示す。



放射能の量で表した場合。

安定核である ^{209}Bi , ^{207}Pb , FP(fission product) は除外している。



短寿命な超重核を起点とする α 崩壊系列

非常に重い短寿命な核種である以下の2種類についての α 崩壊系列の計算を行った。

- 起点： ^{278}Uut (ウンウトリウム：2004年に日本の理化学研究所で発見された)

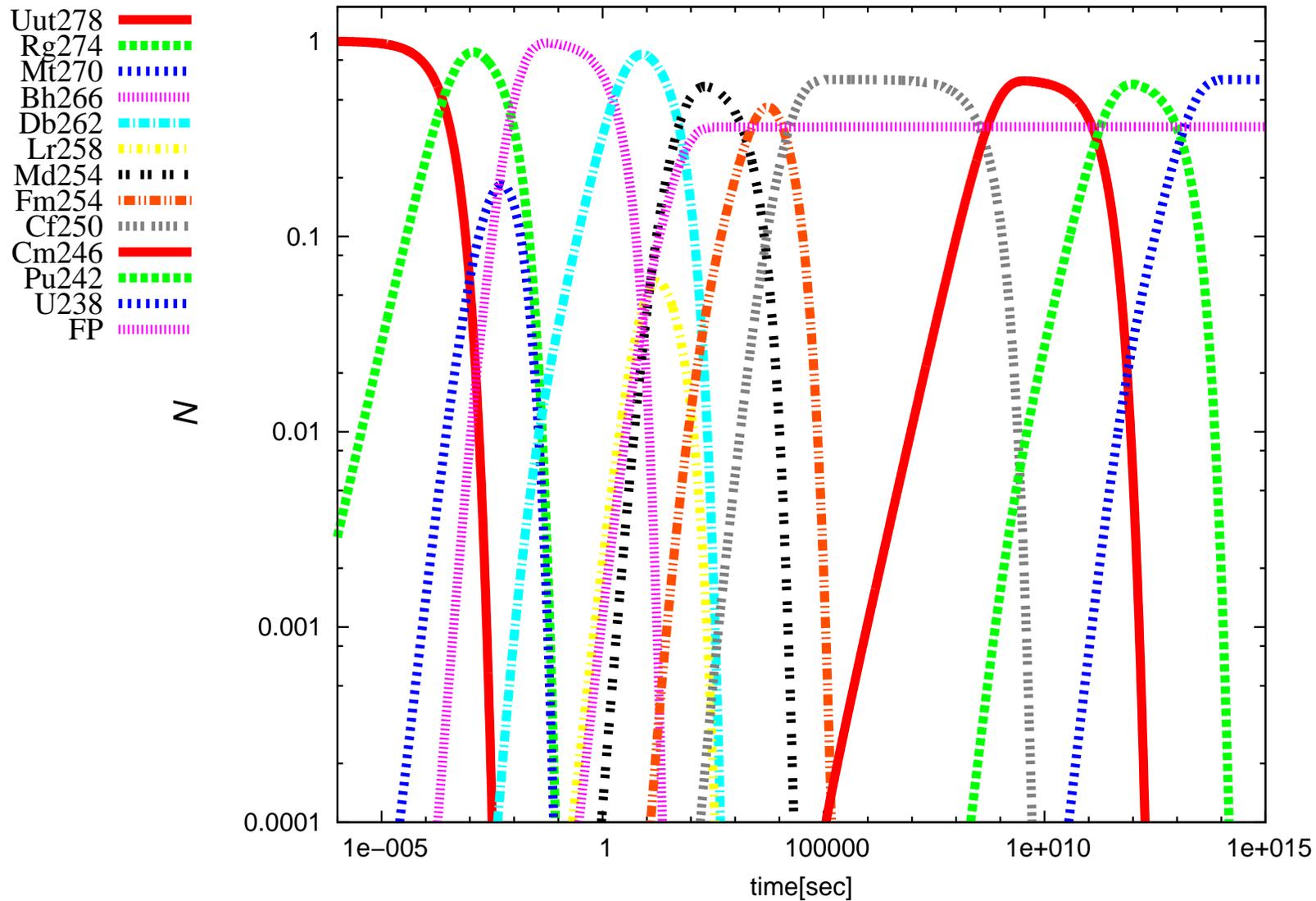
$$\text{半減期：} T_{\frac{1}{2}} = 0.24\text{ms}$$

- 起点： ^{294}Uuo (ウンウンオクチウム：2002年にロシアのドゥブナ研究所で発見された)

$$\text{半減期：} T_{\frac{1}{2}} = 0.89\text{ms}$$

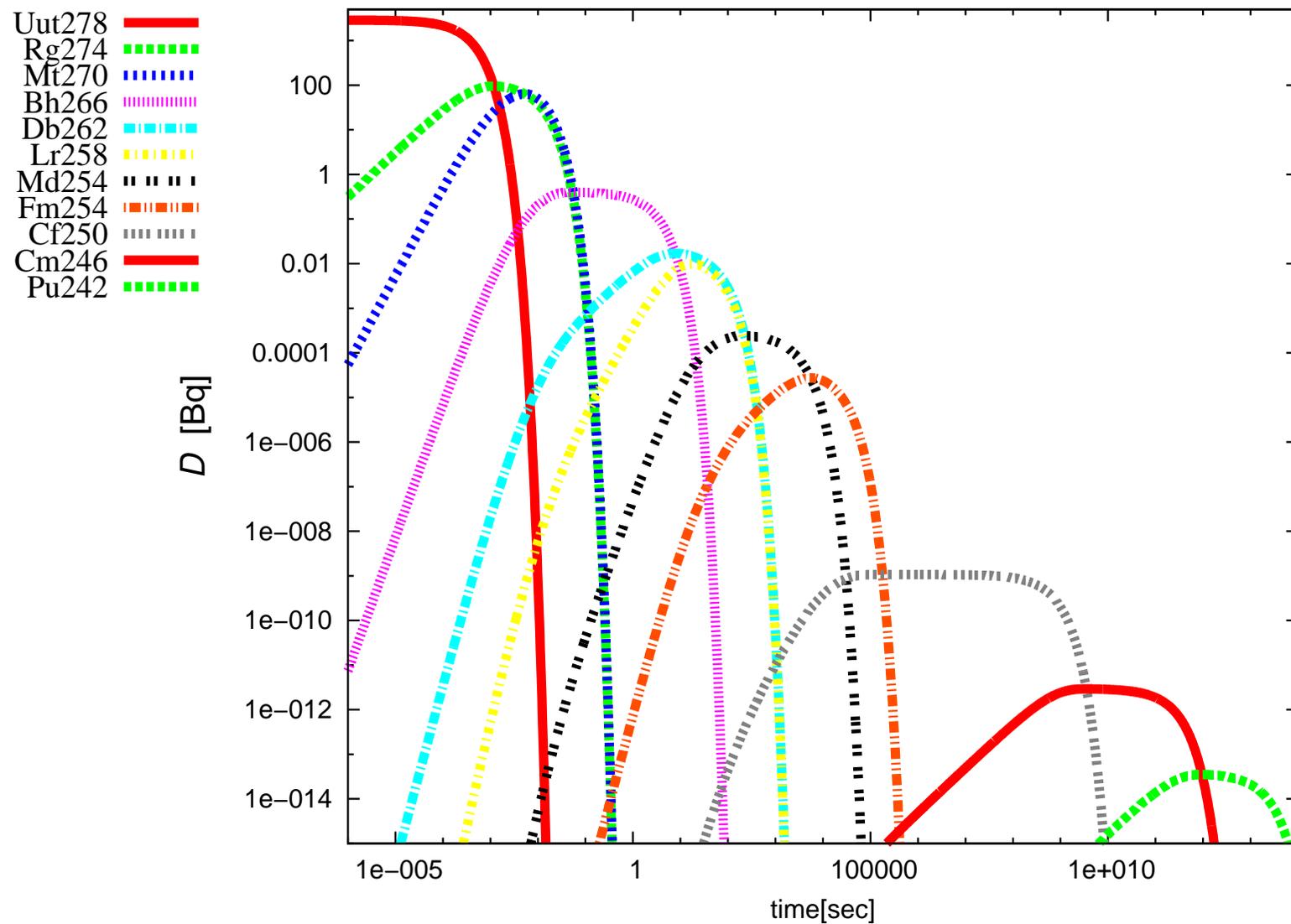
短寿命な超重核を起点とする α 崩壊系列の時間変化1

^{278}Uut を起点とする崩壊系列の時間変化を示す。



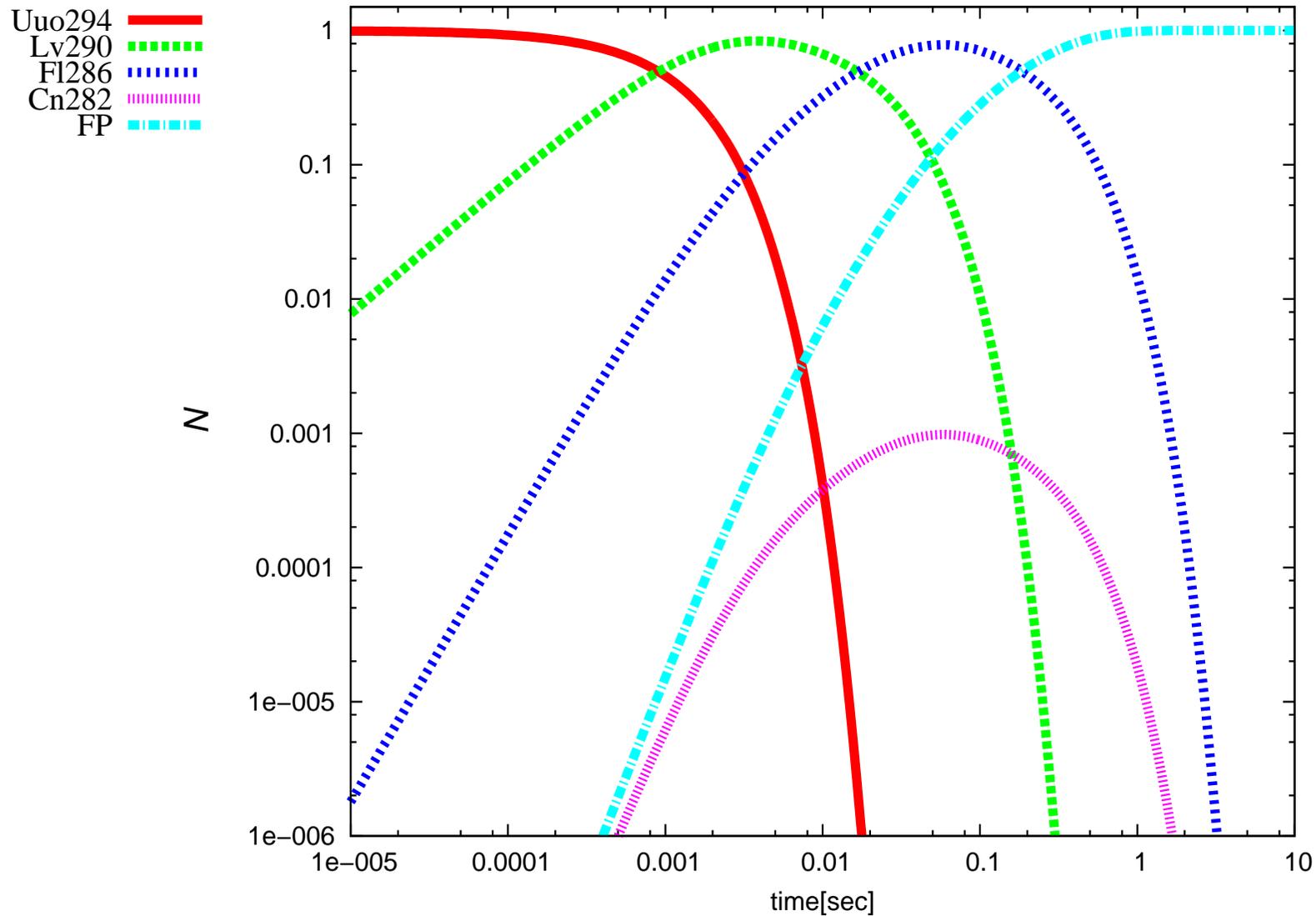
放射能の量で表した場合。

長寿命である ^{238}U と FP(fission product) は除外している。



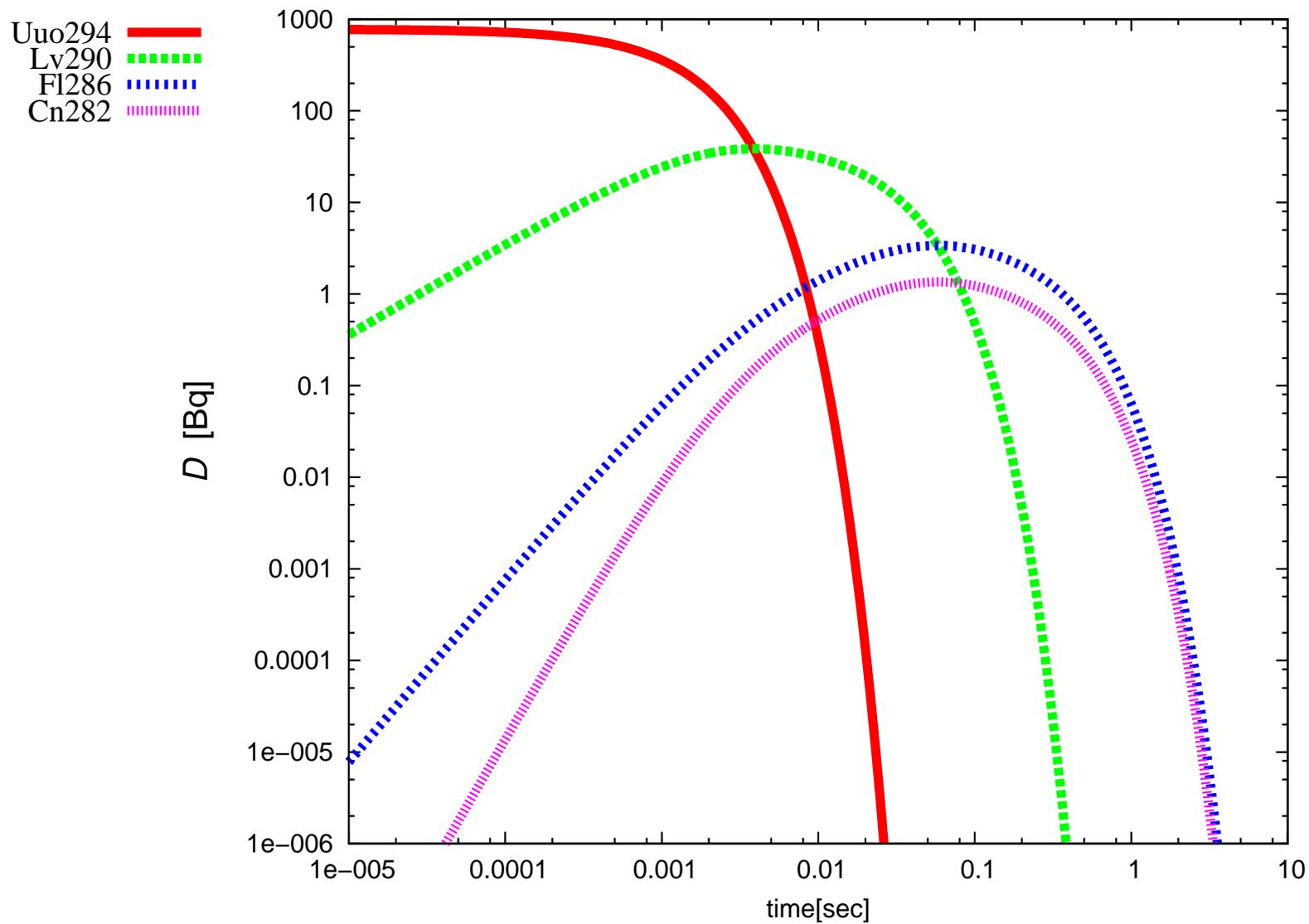
短寿命な超重核を起点とする α 崩壊系列の時間変化2

^{294}Uuo を起点とする崩壊系列の時間変化を示す。



放射能の量で表した場合。

FP(fission product)は除外している。



まとめ

1. α 崩壊系列の放射平衡およびそれに至る前の過渡過程について論じた。
2. 崩壊系列中のほかの核種と比較して、半減期が圧倒的に長い核を起点とする崩壊については放射平衡のプラトー領域（核種の個数がほぼ一定値を取り続ける領域）が現れることが確認できた。
3. ネプツニウム系列については、通常の放射平衡に付随してみられるプラトー領域がほとんど出現しないことがわかった。
4. 半減期のごく短い超重核を起点とする崩壊を2例調べたが、わずかな核種を除き放射平衡を起こさないことがわかった。