

## Explanation of the Chart of the Nuclides

### General

In this chart each experimentally observed nuclide is represented by a square containing the symbol of the element and the number of nucleons  $A$ . In the chart the nuclides are arranged such that the proton number  $Z$  is given on the ordinate and the neutron number  $N = A - Z$  on the abscissa.

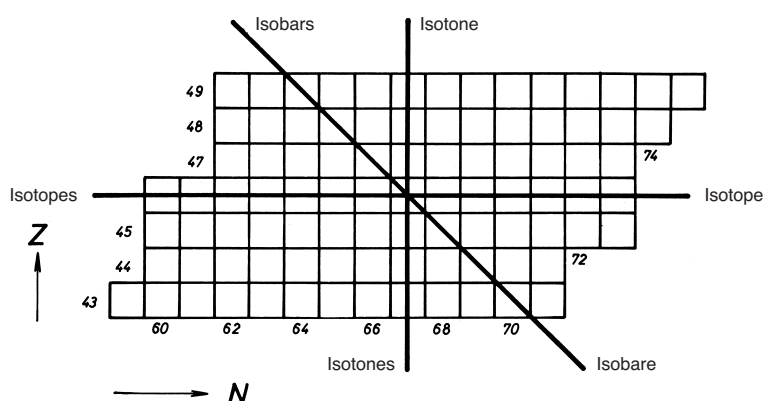
In the present nuclide chart update, the 1998 edition of the Karlsruhe Nuclide Chart was compared to the NUBASE 2003 evaluation [16] to establish a list of nuclides which were not present in the 1998 evaluation. From this list we have selected only nuclides which have been measured experimentally. In particular, nuclides were selected where the half-life or the mass has been determined or the nuclide has been clearly identified. Where a nuclide has been identified but the half-life has not been measured, a detection limit for half-life is given (greater or lower than a value).

Metastable states, which do not undergo  $\alpha$ -, or  $\beta$ -decay, or spontaneous fission, i.e. decay only by gamma emission, are included only if their half-life is larger than 1 s. Where emission of a particle results from a resonance state in unstable nuclides, both the resonance width and corresponding half-life are given using the relations:

$$\Gamma_{c.m.} T_{1/2} \cong \hbar \ln 2, T_{1/2}(\text{s}) \cong 4.562 \times 10^{-22} / \Gamma_{c.m.}(\text{MeV})$$

For mass numbers in the range  $A = 266 - 294$  we have used the latest 2005 (till August 12, 2005) Nuclear Data Sheets revision [17]. For the period not covered by NUBASE, i.e. 2003 until summer 2006, nuclide information has been taken from Nuclear Data Sheets 100–107. In addition, original publications up to summer 2006 were taken into account. A full list of new and updated nuclides in the present chart is given later in this brochure.

Atomic weights of the elements and isotopic abundances have been taken from J. R. De Laeter [18]. For isomers which decay exclusively by spontaneous fission, no decay data is given in the chart. A table of half-lives (all less than 0.1 s), from B. Singh [19], are given in the brochure. Chain yields are from R. W. Mills [20] and neutron cross sections are from N. E. Holden [21].



## Erläuterungen zur Nuklidkarte

### Allgemeines

In dieser Karte wird jedes bisher experimentell nachgewiesene Nuklid anhand eines Quadrats dargestellt, in dem das Elementsymbol und die Nukleonenzahl  $A$  steht. Die Nuklide wurden so auf der Karte angeordnet, dass die zugehörige Protonenzahl  $Z$  auf der Ordinate und die Neutronenzahl  $N = A - Z$  auf der Abszisse liegt.

Für die aktualisierte Fassung der Nuklidkarte wurde die 1998er Ausgabe der Karlsruher Nuklidkarte mit der im Jahre 2003 erfolgten Auswertung von NUBASE [16] verglichen, um eine Liste der Nuklide zu erstellen, die in der Karte von 1998 noch nicht enthalten waren. Aus dieser Liste wurden nur die Nuklide ausgewählt, die experimentell, z. B. durch Messung der Halbwertszeit oder Bestimmung der Massenzahl, eindeutig nachgewiesen wurden. Wurde ein Nuklid nur über die Massenzahl identifiziert, so wird eine Nachweisgrenze für die Halbwertszeit (größer oder kleiner als ein Wert) angegeben.

Metastabile Zustände, die ausschließlich durch Emission von Gammastrahlen in den Grundzustand desselben Nuklids zerfallen und nicht durch Teilchenzerfall oder Spontanspaltung, sind nur aufgenommen, wenn ihre Halbwertszeit größer als 1 s ist. Erfolgt eine Partikelemission aus einem Resonanzzustand eines instabilen Nuklids, so werden sowohl die Resonanzbreite als auch die zugehörige Halbwertszeit unter Verwendung der nachstehenden Beziehung angegeben:

$$\Gamma_{c.m.} T_{1/2} \cong \hbar \ln 2, T_{1/2}(\text{s}) \cong 4.562 \times 10^{-22} / \Gamma_{c.m.}(\text{MeV})$$

Für Nuklide der Massenzahlen  $A = 266$  bis 294 haben wir die Daten den Nuclear Data Sheets (Stand: 12. August 2005) [17] entnommen. Für den von NUBASE nicht erfassten Zeitraum von 2003 bis Sommer 2006 wurden die Nuklidinformationen aus den Nuclear Data Sheets 100 bis 107 bezogen. Zudem wurde die Originalliteratur bis Mitte 2006 berücksichtigt. Eine komplette Liste der neuen und aktualisierten Nuklide, die in die vorliegende Karte aufgenommen wurden, befindet sich am Ende dieser Broschüre.

Die Atomgewichte der Elemente und die Häufigkeiten von Isotopen wurden J. R. De Laeter [18] entnommen. Für Isomere, die ausschließlich durch Spontanspaltung zerfallen, gibt die Karte keine Zerfallsdaten an. Die Broschüre enthält jedoch eine Tabelle mit den Halbwertszeiten (alle unter 0.1 s), zusammengestellt von B. Singh [19]. Isobarenausbeuten stammen von R. W. Mills [20], die Wirkungsquerschnitte für thermische Neutronen wurden einer Zusammenstellung von N. E. Holden entnommen [21].

- [16] G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot and A.H. Wapstra, The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties, Nuclear Physics A, 2003, 729, 3 (2003).
- [17] M. Gupta and T. W. Burrows, Nuclear Data Sheets 106, 251 (2005).
- [18] J. R. De Laeter, J. K. Bohlke, P. De Bièvre, H. Hidaka, H. S. Peiser, K. J. R. Rosman, and P. D. P. Taylor, Atomic Weights of the Elements: Review 2000, Pure & Appl. Chem., 75, 683 (2003).
- [19] B. Singh, R. Zywina, and R. Firestone, Table of Superdeformed Nuclear Bands and Fission Isomers, 3rd Edition, Nuclear Data Sheets 97, 241 (2002).
- [20] A. Koning, R. Forrest, M. Kellett, R. Mills, H. Henriksson, Y. Rugama "JEFF Report 2.1: The JEFF-3.1 Nuclear Data Library". OECD/NEA Report to be published. See also R. W. Mills "Fission Product Yield Evaluation", Thesis, 1995, The University of Birmingham, UK.
- [21] N. E. Holden, Neutron Scattering and Absorption Properties, Handbook of Chemistry and Physics on CD-ROM, version 2006, 11-185, Ed. D.R. Lide, CRC Press, Boca Raton, Florida.

**Decay Modes: Colour and Symbols**

Stable nuclide

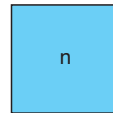
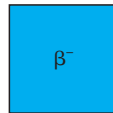
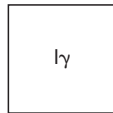
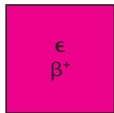
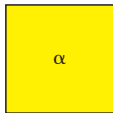
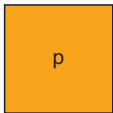


Primordial radionuclides, i.e. those formed in the build-up of terrestrial matter and still present today.

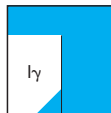


Decay modes are represented by specific colours.

- p: Proton decay
- $\alpha$ : Alpha decay
- $\epsilon$ : Electron capture
- $\beta^+$ : Positron decay
- $I_\gamma$ : Isomeric transition
- $\beta^-$ : Negatron decay
- sf: Spontaneous fission
- ce: Cluster emission e.g. C 14, Ne 20
- n: Neutron emission



The data given in the left part apply to the metastable state, those in the right part to the ground state.  $I_\gamma$  denotes  $\gamma$ -quanta due to the decay to the ground state of the same nuclide (isomeric decay).



Die Angaben in der linken Spalte gelten für den metastabilen, die in der rechten Spalte für den Grundzustand,  $I_\gamma$  kennzeichnet  $\gamma$ -Quanten, die beim Zerfall in den Grundzustand desselben Nuklids auftreten (Isomerenzerfall).

The assignment of decay properties to the metastable or ground state is uncertain.



Die Zuordnung der Zerfallsdaten zum metastabilen bzw. Grundzustand ist unsicher.

One or more short-lived states, for which only decay via spontaneous fission has been observed (spontaneously fissioning isomers) are indicated by a vertical green bar.



Ein oder mehrere kurzlebige Isomere, die ausschließlich durch Spontanspaltung zerfallen, sind durch einen senkrechten grünen Balken gekennzeichnet.

Emission of  $\gamma$ -quanta; they are always listed together with the respective parent nuclide.

$\gamma$

Emission von  $\gamma$ -Quanten; sie sind stets beim jeweiligen Mutternuklid aufgeführt.

Emission of the specified particles or spontaneous fission from an excited level of the daughter nuclide, populated via  $\beta$ -decay (" $\beta$ -delayed particle emission or fission").

$\beta_x p$ ;  $\beta_x n$ ;  
 $\beta d$ ;  $\beta t$ ;  
 $\beta_x \alpha$ ;  $\beta sf$

Emission der jeweils angeführten Teilchen oder Spontanspaltung aus einem angeregten Zustand des Tochter-nuklids, der durch  $\beta$ -Zerfall bevölkert wird („ $\beta$ -verzögerte Teilchenemission oder Spaltung“).

Simultaneous emission of two  $\beta$ -particles ("double  $\beta$ -decay", e.g. Te 130  $\rightarrow$  Xe 130).

$2\beta^-$

Gleichzeitige Emission zweier  $\beta$ -Teilchen („doppelter  $\beta$ -Zerfall“, z. B. Te 130  $\rightarrow$  Xe 130).

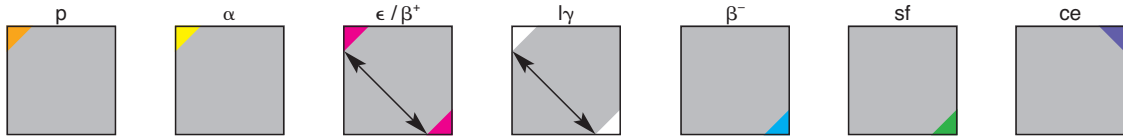
Emission of the specified particles from a particle-unstable nuclide. Simultaneous emission of two particles is indicated only, if one-particle-emission is excluded for energetical reasons ( e.g. Be 6  $\rightarrow$  2p).

p; n  
2p; 2 $\alpha$

Emission der jeweils angeführten Teilchen aus einem teilcheninstabilen Nuklid. Die gleichzeitige Emission von zwei Teilchen ist nur dann aufgeführt, wenn die Emission eines einzelnen Teilchens aus energetischen Gründen nicht möglich ist (z. B. Be 6  $\rightarrow$  2p).

### Multiple Decay Modes and Branching Ratios

The branching ratios of the decay modes are indicated by 3 different sizes of the coloured sections and by the sequence of the symbols. Pure decay modes are indicated by a single colour (e.g. see previous section). Mixed decay modes are indicated by the use of coloured triangles. A small coloured triangle in the top left or bottom right indicates a branching ratio for this mode of  $\leq 5\%$  (conversely, the major mode has a branching ratio of  $\geq 95\%$ ) as shown in the figure. The small triangles representing proton or alpha emission are always on the top left corner (first two boxes). The triangles for  $\beta^-$  emission or spontaneous fission are always at the bottom right. Triangles representing  $\epsilon/\beta^+$  or  $\gamma$  may be at the top left or bottom right depending on the major mode. For  $\epsilon/\beta^+$ , the red triangle is at the bottom right if the main mode is alpha or proton emission. Otherwise, the red triangle is at the top left corner. For isomer transition  $\gamma$ , the white triangle is at the bottom right if the main mode is  $\alpha$ - or  $p$ - emission or  $\epsilon/\beta^+$ , otherwise it is at the top left corner. Cluster emission is always indicated with a small triangle in the top right corner. Hence the location of the small triangles is as follows:

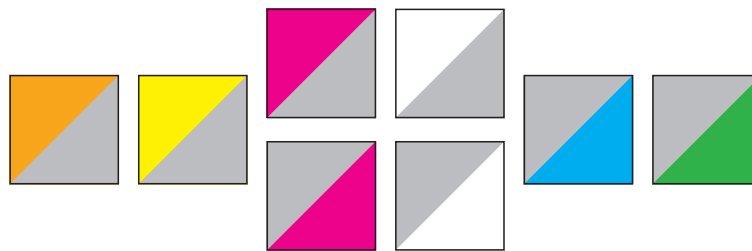


If the branching ratio of the minor mode is in the range 5 – 50% (implying a branching ratio for the major mode in the range 50 – 95%), the box is divided into two by a diagonal connection the lower left and top right corners. The location of the large triangles is similar to that described above.

### Mehrfache Zerfallsarten und Verzweungsverhältnisse

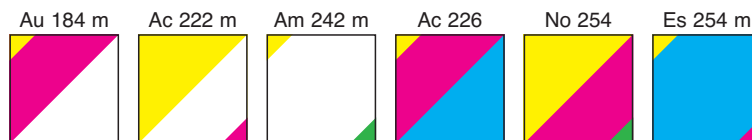
Die Verzweungsverhältnisse der Zerfallsarten werden durch verschiedene Größen der Farbflächen sowie durch die Reihenfolge der Symbole angezeigt. Unverzweigte Zerfallsarten werden anhand einer einzigen Farbe wiedergegeben (siehe den vorherigen Abschnitt). Verzweigungen werden durch die Verwendung farbiger Dreiecke symbolisiert. Wie aus der Abbildung hervorgeht, gibt ein kleines farbiges Dreieck oben links oder unten rechts ein Verzweungsverhältnis von  $\leq 5\%$  für diese Zerfallsart an (umgekehrt weist die Hauptzerfallsart ein Verzweungsverhältnis von  $\geq 95\%$  auf). Die kleinen Dreiecke, die eine Emission von Protonen oder Alphateilchen repräsentieren, befinden sich stets in der oberen linken Ecke (die ersten beiden Kästchen), die für  $\beta^-$ -Emission oder Spontanspaltung immer unten rechts. Dreiecke, die  $\epsilon/\beta^+$ - oder  $\gamma$ -Emission repräsentieren, befinden sich, je nach der vorliegenden Hauptzerfallsart, entweder oben links oder unten rechts. Ist die Hauptzerfallsart  $\alpha$ - oder  $p$ - Emission so erscheint die rote Ecke unten rechts, bei anderen Hauptzerfallsarten oben links. Die weiße Ecke für Isomerenzerfall befindet sich in der oberen linken Ecke wenn die Hauptzerfallsart  $\beta^-$ -Zerfall oder Spontanspaltung ist, sonst in der unteren rechten Ecke. Cluster-Emissionen werden stets durch ein kleines Dreieck in der oberen rechten Ecke gekennzeichnet. Somit zeigt sich die Lage der kleinen Dreiecke wie folgt:

Liegt das Verzweungsverhältnis der untergeordneten Zerfallsart in einem Bereich zwischen 5 und 50% (das der Hauptzerfallsart somit im Bereich 50 – 95%), so wird das Kästchen mittels einer diagonalen Linie unterteilt, welche die untere linke Ecke mit der oberen rechten verbindet. Hinsichtlich der Lage der großen Dreiecke verhält es sich wie oben beschrieben.



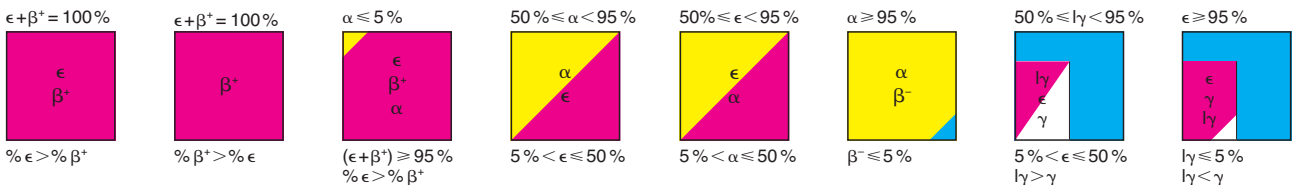
In some cases, three decay modes are possible. Some examples are shown below.

In einigen Fällen sind drei Zerfallsarten möglich. Nachstehend werden einige Beispiele aufgeführt.



Examples:

Beispiele:



The symbols for the particle emitting decay modes are arranged according to branching ratio with the highest branching ratio first, followed by  $\gamma$ -quanta and conversion electrons. The data for the isomeric decay have been arranged corresponding to the branching ratio of the decay mode.  $\beta$ -delayed particles or fission ( $\beta_n$ ,  $\beta_p$ ,  $\beta_{sf}$ ) precede or follow the  $\gamma$ -quanta according to the relative intensities. For a given type of radiation the sequence of the energies corresponds to the relative intensities (in decreasing order) of the respective radiation. In case of  $\beta$ -decay a slightly different rule is used (see below).

Points indicate further transitions of the same type with lower intensities.

Energies are given in keV for  $\gamma$ -quanta, in MeV for all kinds of particles. A radiation symbol without energy value indicates that the radiation occurs but the energy has not been measured.

Endpoint energy of the most probable  $\beta$ -transition. In case further transitions with higher energies exist, the second number corresponds to the highest endpoint energy observed.

$\beta$ -transitions with known energies, for which the sum of their abundances is less than 1%.

Electron capture is specified only, if it is more probable than  $\beta^+$ -decay.

Particle energies listed according to decreasing probabilities of the respective transitions. At least one energy is given, even if the abundance of the most prominent group is less than 1%.

Energies of the strongest  $\gamma$ -quanta arranged in order of decreasing intensities. Intensities less than 1% are given in brackets.

$\gamma$ -Energies followed by an asterisk denote transitions after  $\beta$ -delayed particle emission.

Several  $\gamma$ -quanta of unknown intensities within the energy interval 291-1319 keV.

Conversion electrons are specified only if they are more probable than the  $\gamma$ -quanta. Energies are not quoted.

### Cross Sections

All cross sections are given in barn ( $10^{-24} \text{ cm}^2$ ) and refer to reactions with thermal neutrons (0.0253 eV).

Cross section for the  $(n, \gamma)$  reaction. If two values are given, the first refers to the formation of the product nucleus in the metastable, the second to the formation in the ground state.

Fission cross section

$(n, p)$  cross section

$(n, \alpha)$  cross section

Absorption cross section

### Additional Symbols and Abbreviations

Chain yield (%) for the thermal neutron fission of U 235 (above) and Pu 239 (below) the arrowed line.

Nuclides with a closed neutron or proton shell are characterized by heavy vertical or horizontal lines.

The symbols "m" and/or "g" indicate that the metastable and/or ground state of the daughter nuclide is populated, respectively. The symbols are presented in order of decreasing probability. Branches with probabilities less than 5% are not shown. Subscripts on "m", e.g.  $m_1$ ,  $m_2$ , are used to denote different metastable states (with  $m_2$  being a higher energy state than  $m_1$ ).

Data or assignment uncertain.

Nanosecond, microsecond, millisecond, second, minute, hour, day, year.

...

$\beta^+$  2.7...  
 $\beta^-$  1.2; 1.9...

$\beta^-$ ...  
 $\beta^+$ ...

$\epsilon$

$\alpha$  3.75; 4.43...  
p 1.56  
 $\beta_p$  4.5

$\gamma$  815, 1711...  
 $\gamma$  (1340)

$\gamma$  815\*

$\gamma$  291-1319

$e^-$

An erster Stelle stehen die Symbole für die Zerfallsarten, bei denen Teilchen emittiert werden, geordnet nach abnehmender Häufigkeit, gefolgt von den  $\gamma$ -Quanten und Konversionselektronen. Der Isomerenzerfall ist seiner Häufigkeit entsprechend eingeordnet.  $\beta$ -verzögerte Teilchenemission oder Spaltung ( $\beta_n$ ,  $\beta_p$ ,  $\beta_{sf}$ ) ist je nach ihrer Häufigkeit vor oder nach den  $\gamma$ -Quanten aufgeführt.

Für einen bestimmten Strahlungstyp sind die Energiewerte nach abnehmenden relativen Intensitäten geordnet. Für den  $\beta$ -Zerfall wird eine etwas abgeänderte Regelung verwendet (siehe unten).

Punkte weisen auf weitere gleichartige Übergänge mit geringerer Intensität hin.

Energien sind für  $\gamma$ -Quanten in keV, für Teilchenstrahlung in MeV angegeben. Ein Strahlungssymbol ohne Energieangabe deutet an, daß die Strahlung auftritt, ihre Energie aber nicht gemessen wurde.

Endpunktsenergie des häufigsten  $\beta$ -Übergangs. Falls es weitere Übergänge mit höherer Energie gibt, ist außerdem als zweiter Wert die höchste beobachtete Endpunktsenergie angegeben.

$\beta$ -Übergänge bekannter Energie, für die die Summe ihrer Häufigkeiten kleiner als 1 % ist.

Elektroneneinfang ist nur angegeben, wenn er wahrscheinlicher ist als der  $\beta^+$ -Zerfall.

Teilchenenergien, nach abnehmender Häufigkeit der jeweiligen Übergänge geordnet. Es ist mindestens eine Energie angegeben, auch wenn die Wahrscheinlichkeit für den häufigsten Übergang kleiner als 1% ist.

Energien der häufigsten  $\gamma$ -Quanten in der Reihenfolge abnehmender Häufigkeiten. Für Intensitäten unter 1% sind die Energiewerte in Klammern angegeben.

$\gamma$ -Energien mit einem Stern bezeichnen Übergänge nach  $\beta$ -verzögerter Teilchenemission.

Mehrere  $\gamma$ -Quanten unbekannter Häufigkeiten im Energieintervall 291-1319 keV.

Konversionselektronen sind nur angegeben, wenn sie häufiger sind als die  $\gamma$ -Quanten. Energien sind nicht angegeben.

### Wirkungsquerschnitte

Alle Wirkungsquerschnitte sind in barn ( $10^{-24} \text{ cm}^2$ ) angegeben und gelten für Reaktionen mit thermischen Neutronen (0.0253 eV).

Wirkungsquerschnitt für die  $(n, \gamma)$ -Reaktion. Sind zwei Werte angegeben, so bezieht sich der erste auf die Bildung des Produktkerns im metastabilen, der zweite auf die Bildung im Grundzustand.

Spaltquerschnitt

$(n, p)$ -Wirkungsquerschnitt

$(n, \alpha)$ -Wirkungsquerschnitt

Absorptionsquerschnitt

### Weitere Symbole und Abkürzungen

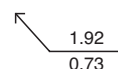
Isobarenausbeute (%) bei der Spaltung von U 235 (oben) und Pu 239 (unten) mit thermischen Neutronen.

Nuklide mit abgeschlossener Neutronen- oder Protonenschale sind durch verstärkte horizontale oder vertikale Begrenzungslinien gekennzeichnet.

Die Symbole „m“, „ $m_1$ “, „ $m_2$ “ und/oder „g“ weisen darauf hin, dass ein metastabiler und/oder der Grundzustand des Tochternuclids bevölkert wird, wobei  $m_2$  einen höheren Energiezustand als  $m_1$  bezeichnet. Die Symbole sind in der Reihenfolge abnehmender Häufigkeit aufgeführt. Zerfallswahrscheinlichkeiten unter 5% sind nicht angezeigt.

Daten oder Zuordnung unsicher.

Nanosekunde, Mikrosekunde, Millisekunde, Sekunde, Minute, Stunde, Tag, Jahr.



m; g

?

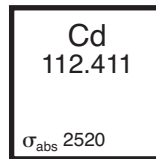
ns,  $\mu$ s, ms, s,  
m, h, d, a

## Arrangement of Symbols and Data

### Elements

symbol of the element  
standard atomic weight based on C 12 = 12

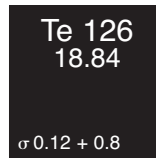
absorption cross section for thermal neutrons (barn)



### Stable Nuclides

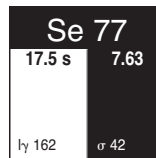
symbol of the element, number of nucleons  
abundance in naturally occurring element (atom %)

(n,  $\gamma$ )-cross sections for the formation of the metastable and the ground state of Te 127 by thermal neutrons (barn)



symbol of the element, number of nucleons  
left hand side: half-life of metastable state;  
 $\gamma$ -energy (keV) of the isomeric transition

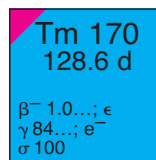
right hand side: abundance in the natural element (atom %)  
(n,  $\gamma$ )-cross section for the thermal neutrons (barn)



### Unstable Nuclides

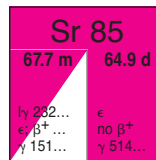
symbol of the element, number of nucleons  
half-life

modes of decay, endpoint energy of  $\beta^-$  radiation (MeV)  
 $\gamma$ -energy (keV), conversion electrons,  
(n,  $\gamma$ )-cross section (barn)

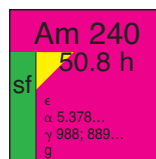


symbol of the element, number of nucleons  
half-lives

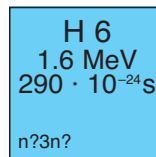
both states decay by electron capture; the metastable state decays to the ground state with a branching ratio for Iy in the range 50% – 95%



symbol of the element, number of nucleons  
left hand side: spontaneous fission isomer,  $T < 0.1$  s  
right hand side: decay data of the ground state.  
"g" indicates that the daughter Pu 240g is formed to at least 95%; a population of Pu 240m up to 5% cannot be excluded.



where emission of a particle results from a resonance state in an unstable nucleus, both the resonance width  $\Gamma$  (MeV) and the half-life  $T_{1/2}$  are given



## Anordnung der Symbole und Daten

### Elemente

Elementsymbol  
Standard-Atomgewicht bezogen auf C 12 = 12

Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen (barn)

### Stabile Nuklide

Elementsymbol und Nukleonenzahl  
Häufigkeit im natürlichen Element (Atom %)

(n,  $\gamma$ )-Querschnitt für die Bildung des metastabilen und des Grundzustandes des Te 127 mit thermischen Neutronen (barn)

Elementsymbol und Nukleonenzahl  
linke Spalte: Halbwertszeit des metastabilen Zustands;  
 $\gamma$ -Energie des Isomerenübergangs (keV)

rechte Spalte: Häufigkeit im natürlichen Element (Atom %)  
(n,  $\gamma$ )-Querschnitt für thermische Neutronen (barn)

### Instabile Nuklide

Elementsymbol und Nukleonenzahl  
Halbwertszeit

Zerfallsarten und Maximalenergie der  $\beta$ -Strahlung (MeV)  
 $\gamma$ -Energie (keV), Konversionselektronen,  
(n,  $\gamma$ )-Querschnitt (barn)

Elementsymbol und Nukleonenzahl  
Halbwertszeiten

Beide Zustände zerfallen durch Elektroneneinfang; der metastabile Zustand fällt auf den Grundzustand zurück, wobei das Verzweungsverhältnis für Iy in einem Bereich von 50% – 95% liegt.

Elementsymbol und Nukleonenzahl  
linke Spalte: Spontanspaltendes Isomer,  $T < 0.1$  s  
rechte Spalte: Zerfallsdaten des Grundzustandes.  
„g“ bedeutet, daß die Tochter Pu 240g mindestens zu 95% gebildet wird; eine Populierung des Pu 240m bis zu 5% ist nicht ausgeschlossen.

Wenn die Emission eines Partikels aus einem Resonanzzustand eines instabilen Kerns resultiert, werden sowohl die Resonanzbreite  $\Gamma$  (MeV) und die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  angegeben