

核素图册

CHART OF THE NUCLIDES



科学技术文献出版社重庆分社

核素图册

CHART OF THE NUCLIDES

主 编 戴光曦

副 主 编 刘国兴

编 委 戴光曦 刘国兴 杨春祥

周善铸 郑卫汉 林文祝

责任编辑 闵 亚 杨 斌

科学技术文献出版社重庆分社

本 图 简 介

本原子核素图册是以1976年版的核素图的形式,重作数据收集后而编制的。收集了1985年底以前的约2234种核素的最新数据。本图以原子质量数A为主,以原子序数Z和中子数N为辅同时排列出来。每种核素以正六角框图表示。此外,本图还附有 α 、 β 和 γ 放射标准源的数据表,各元素的X射线能量表,元素周期表,元素的密度、熔点、沸点和核科学常用的物理常数表,以供查阅。考虑到使用者便于携带、保存和查阅,故本图采用图册的形式。

本图适用于从事核科学研究和工程技术人员以及核医学人员使用,也可供大专院校的核物理、核化学、放射化学和医学、地学等专业师生参考。

核 素 图 册

戴光曦 主编

科学技术文献出版社重庆分社 出版

重庆市市中区胜利路132号

新华书店重庆发行所 发行

重庆印制二厂 印刷

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 2.5 字数: 7万

1987年6月第一版

1987年6月第一次印刷

科技新书目: 147—304

印数: 1,000

ISBN 7-5023-0101-1/TL·11 统一书号:15176·737

定价: 2.00元

目 录

一、前 言	(2)
二、原子核素图的原理	(3)
三、原子核素图的使用说明	(5)
四、元素周期表	(7)
五、核 素 图	(8)
质量数 $A = 1 \sim 9$	(8)
$= 10 \sim 20$	(9)
$= 21 \sim 31$	(10)
$= 32 \sim 43$	(11)
$= 44 \sim 54$	(12)
$= 55 \sim 66$	(13)
$= 67 \sim 77$	(14)
$= 78 \sim 89$	(15)
$= 90 \sim 100$	(16)
$= 101 \sim 112$	(17)
$= 113 \sim 123$	(18)
$= 124 \sim 135$	(19)
$= 136 \sim 146$	(20)
$= 147 \sim 158$	(21)
$= 159 \sim 169$	(22)
$= 170 \sim 181$	(23)
$= 182 \sim 192$	(24)
$= 193 \sim 204$	(25)
$= 205 \sim 215$	(26)
$= 216 \sim 227$	(27)
$= 228 \sim 238$	(28)
$= 239 \sim 250$	(29)
$= 251 \sim 261$	(30)
$= 262 \sim 266$	(31)
六、附 表	(32)
1. α 射线标准源及能量标准	(32)
2. 电子标准源及其能量标准	(32)
3. γ 射线标准源及其能量标准	(33)
4. 各元素 X 射线能量 E_x 及其相对强度 I_x	(34)
5. 元素的密度、熔点、沸点	(35)
6. 核科学中常用物理常数	(37)
7. 单位换算表	(37)
七、参 考 文 献	(38)
符 号 解 释	(38)

一、前言

本图收集109种元素的2234种核素,并标明它们的简明性质和主要数据。核素又通称同位素,即原子序数 Z 相同、中子数 N 不同的核的种类。本图列出的这两千多种核素中,只有279种是稳定的,其余都是不稳定的放射性核素。在放射性核素中仅一小部分是天然存在的。它们是由长半衰期核素的衰变或自裂变产生的,也有宇宙线在地表物质中产生核反应后的产物。大部分放射性核素是人造的,是核物理与核化学家们在加速器上或原子堆中,甚至核弹地爆中制造出来并测量其性质后作出鉴定的。理论估计,核素可能存在并可被探测鉴明的,总数约六千种,而目前人们只认识其中三分之一多一点。经过科学家们不断努力,每年都在合成一些新的核素,并更新一些已知核素的数据。所以,核素图也就要不断地补充新的核素和更新、丰富已知核素的数据,故须经常增订并出版新版本。

自1976年我国出版核素图以来,除了新增加300多种新核素外,还发现三种新的核衰变方式:即质子直接衰变、重离子直接衰变(目前已发现 ^{14}C 、 ^{24}Ne 的衰变核)和 β 缓发双质子接续衰变。新元素合成从 $Z=106$ 号推进到109号。

自从1896年贝克勒尔发现天然放射性和1911年卢瑟福发现原子核以来,在不到一个世纪内,人类掌握原子核的运动规律并发展一整套核技术,用它为人类造福方面有了长足的进展。核科学已成为一门成熟的、应用十分广泛的学科。

裂变核能源已大规模地用于发电站和核动力船只,更经济、干净且蕴藏量极大的聚变核能源的可控装置,将在二十一世纪面世。那时,人类将彻底摆脱能源危机的阴影。

除能源应用外,放射性核素由于射线对物质作用并使之变异的特征和高度灵敏的探测手段的发明,已广泛用于医、农和工业各部门。例如,医学上的放射性核素的标记示踪诊断、人体器官的功能检测、辐照治疗肿瘤与癌症;此外,还用来制作诸如心脏起搏器等医疗器件的袖珍电源。在农业上,辐照育种、土壤墒情测定、地下水勘探以及农作物在生长期中养分吸收和光合作用机理等研究,也大量使用各种放射性核素与核技术。宇宙线在大气和地表物质中引起原子核反应后生成一些长半衰期的核素,如氚(^3H)、 ^{10}Be 和 ^{14}C 等,它们可被用来断定文物、化石或水源的年代。在工业上,一些放射核测量与分析技术,诸如中子活化分析、离子活化分析、穆斯堡尔效应以及辐照X荧光分析等,提供了超灵敏、快速、准确和无损样品的定量分析手段。这些分析手段还可以用在环境污染监督、医学样品痕量元素分析以及材料科学中去。

以上列举的放射性核素和核技术在国民经济中的应用项目是极不完全的。但是,可以看出,这些应用把核物理、核化学、放射化学等基础学科和工、农、医等部门紧密地联系起来了。因此,对于原子核素基本的数据不仅是核科学专业人员所关心的,也是国民经济各部门中凡从事与放射性技术有关的人员所共同关心的。当前,我国核技术正在从专业研究单位和高等院校向国民经济各技术部门扩散、技术转让,以形成新的生产力的阶段。本核素图册正是顺应这一形势产生的。

本图是以1976年原子能出版社出版的核素(挂)图⁽¹⁾的形式,并以近年来各国出版的核素图^(2,3)与编评的新的核数据^(4,5),进行编制的。考虑到查阅、携带和保存的方便,本图采用图册形式出版。

本图能与广大读者见面,主要是得到中国科学院近代物理所领导的支持和资助。在本图的编制过程中得到该所贾豫京同志的大力协助,在此表示衷心感谢。

二、原子核素图的原理

原子核由 Z 个质子和 N 个中子所组成。 Z 决定原子的化学性质，所以通常用同位素来称呼各核素。从原子核物理观点来看，中子与质子是核子处于不同的态：即带电态为质子；中性态为中子。核中总的核子数 A ($A = N + Z$)，又称质量数，是描述核素的重要参数。核内质子变成中子或相反，称为 β 衰变，它不改变质量数 A ，即在同量异位素之间进行。为了同时能把核素按 A 、 Z 和 N 的次序排列起来，本图选择使用正六角形的格子来代表一种核素。正六角形格子有三个方向，分别在水平方向、左斜 60° 方向和右斜 60° 方向。它们分别排列着 A 、 N 和 Z 。换句话说，同量异位素是由一垂直排列的格子所组成，而同中子素由右斜 60° 的格子和同位素 则是由左斜 60° 的格子所组成。

现在来看由垂直一系列格子所组成的同量异位素，对于每个这样的 A 列，上方的核素是缺中子的核素，它将以 β^+ 衰变或电子俘获(E.C)使核内质子变成中子，而朝下进格。这样衰变结果将使核素的 N/Z 比值逐渐变大。 A 列下方的核素是丰中子核素，它们将以 β^- 衰变，朝上进格，使 N/Z 值变小。在 A 列的中部区存在一个或两个稳定核素，它们对应的结合能在给定 A 下是最小的。把这些不同的稳定核联接起来，而构成 β 稳定线。从位能或结合能来看，稳定核组成 β 稳定谷。按照格林经验公式，位于稳定谷中的核素，其 Z 与 A 的关系为：

$$Z = \frac{A}{1.98 + 0.015 A^{2/3}}$$

另外，奇 A 列仅一个 β 稳定核；偶 A 列则有时存在两个稳定核，并且在这两个稳定核之间有一个可同时具有 β^- 与 β^+ (或E.C)衰变的放射性核素 (它的 N 与 Z 都是奇数)。这是由于 N 与 Z 数若为偶时，结合能变低，即结合能存在配对的对能项。对于奇 A 列， β 衰变过程中， N 与 Z 之一总是奇数，对能项影响不大；而对偶 A 列的 β 衰变，会从奇-奇核变成偶-偶核，对能项影响就大了，故出现上述现象。

要合成新的核素，就是对 A 列的上下两头进行延伸。这时人造出的新核素，具有的结合能更低，即核子结合较松散的、更缺 (或更丰) 中子的核素。这是当前核物理与核化学家们的一项重要研究课题。这叫远离 β 稳定线核素的拓广，或叫边缘核 (又称额外核) 的人工合成与性质研究。

大量实验证明，当原子核中的 N 或 Z 等于2, 8, 20, 28, 50, 82和126时，原子核较邻近的核素稳定些。这就是原子核的壳层效应。这些数称作壳层数或幻数。在本核素图中，幻数是用加重的轮廓线勾划出来的。在中子幻数线与质子幻数线相交处，形成双幻核，如， ${}^{16}_8\text{O}_8$ 、 ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$ 都是双幻核。

为了对核素的衰变与射线发射有一个全面了解，在此我们将衰变过程分为初级过程与次级过程。在表1中，列出目前已知的各类衰变过程。例如， β 衰变是初级过程。但 β 衰变后若未达到子核的基态，而是在激发态上，则还将发生 γ 衰变的次级过程。这时激发态将以发射 γ 射线达到基态。又如， β^+ 衰变，正电子湮灭会出射511KeV的 γ 射线。比较更清楚的是缓发粒子的衰变。在 β 衰变后，若达到子核的激发态，在这态上对粒子束缚是非稳定的，则将发射这种粒子 (如中子、质子或 α 粒子)。这种缓发粒子发射是次级过程，其缓发时间决定于相关的 β 衰变的半衰期。本核素图中用括号来表示，如(P)、(n)和(α)分别表示缓发质子、中子和 α 粒子。

从表 1 可见，目前核素衰变方式比早年的 α 、 β 、 γ 三种放射性的概念要丰富多了。近年来发现了 β^+ /E.C. 后缓发双质子的衰变方式；还发现了基态核素的质子直接衰变(如 ^{151}Lu 与 ^{147}Tm 核素)，以及重离子直接衰变的天然放射性(如 $^{223, 224}\text{Ra}$ 放射 ^{14}C ，和 ^{232}U 放射 ^{24}Ne)等。这些新衰变方式的发现基于两个原因：一个是在研究合成远离 β 稳定线核素时，已接近核子下滴线。如 ^{151}Lu 是十分缺中子的核，它对于质子束缚已是不稳定的(即去掉一个质子会放出能量 $=0$)。因此，与 α 衰变类似。这个质子将会穿过库仑势垒而衰变出来。合成 ^{151}Lu 是困难的，何况其半衰期仅85毫秒。所以没有现代的在束快速探测手段是不可能被发现的；另一个原因是，现代技术提高了人们在强本底下探测稀有事件的能力。例如：重离子直接衰变的测定。从结合能计算表明，一些重核对于 ^{14}C 、 ^{24}Ne 的束缚是不稳定的，有可能发生衰变。但是过去没能发现，主要是这些核同时存在很强的 α 粒子放射性

重核及缺中子侧的一些中量核都存在着 α 粒子衰变。 α 粒子即氦核(^4He)是两个中子和两个质子紧密结合的核素，结合能为28.3MeV。 α 衰变核素对于 α 粒子的束缚，在能量上是不稳定的，但是由于 α 粒子必需穿过很高的库仑位垒后才与母核分开，因此有一定的半衰期。 α 衰变是最早是从天然存在的三个 α 衰变链中发现的。这三个 α 衰变链的鼻祖分别为 ^{232}Th 、 ^{238}U 和 ^{235}U ，依次被称作钍系、铀系和锕系。由于历史原因，核化学家对这三个系的成员都给了一些历史名称。这些历史名称目前仍在使用，所以本图也相应地标了出来。如RaA就是 ^{218}Po 核素的历史名称，它与镭无关；ThC'是 ^{212}Po ，ThC''是 ^{208}Tl ，它们与钍无关。为了醒目，本核素图用黄色来标志 α 衰变核素。对本图来说， α 衰变时，母核水平地跨过两个格子将到达子核。

与 α 衰变相竞争的主要过程之一，是自发裂变，或自裂变(用S.F表示)。这时原子核自动分裂成两块差不多大小的碎片核素。这些碎片核由于是丰中子核，所以还要经过 β^- 衰变。对于超铀元素的核素，大都存在自裂变。例如， ^{252}Cf ， α 衰变占97%，自裂变占3%；而且每次自裂变平均放出3.78个中子。所以，一微克 ^{252}Cf ，每秒可放出 2.34×10^6 个中子来，可做强中子源来使用。在中子活化分析与医用同位素生产中 ^{252}Cf 是很有用的核素。

表 1 核 素 衰 变 方 式 分 类⁽¹⁾

方 式 过 程	γ 衰 变	β 衰 变		核 子 或 核 子 团 衰 变			自 发 裂 变
初 级 过 程	同核异能态跃迁，IT，发射 γ 射线；质子直接衰变*	β^+ 衰变或电子俘获 β^+ ，或E.C. 发射正电子	β^- 衰变 β^- ，发射电子	质子直接衰变，P， 发射质子	α 粒子衰变， α ， 发射 α 粒子	直接衰变， ^{14}C ， ^{24}Ne ， 发射 ^{14}C 核或 ^{24}Ne 核	自动分裂S.F.， 发射轻、重两碎片及2—4个中子。
次 级 过 程		(1) β^+ 的湮灭 γ 辐射，511KeV (2) β^+ /E.C.后缓发：质子(p)， α 粒子，(α)和双质子，(pp). (3) β^+ /E.C.后子核退激的级联 γ 射线发射	(1) β^- 后缓发中子，(n)或 α 粒子(α) (2) β^- 后子核退激的级联 γ 射线发射	发射质子 后子核的退退激 γ 射线发射	发射 α 粒子 后子核的退激 γ 射线发射		裂片的 β^- 衰变及其相关的次级过程，即可能有 β^- ，(n)，(α)以及 γ 发射

* 目前观测到的唯一事例是 $^{53\text{m}}\text{Co}$ 的质子直接发射；另有形状同核异能态裂变如 $^{242\text{m}}\text{Am}$ (14mS)

[1]表中希腊字母读音： γ —伽玛， β —贝他， α —阿尔法

三、原子核素图的使用说明

本图中一种核素占有一个正六角形格子。这些六角形格子按 A 、 Z 、 N 的大小依次排成此核素图。这样,每一垂直列形成相同 A 的同量异位素;斜上 30° 的串格,形成相同 N 的同中子素;斜下 30° 的串格,形成相同 Z 的同位素。这在图1中表示了出来。

对于 A 列,上方为缺中子核素,多以 β^+ /E.C.衰变,朝下进格;而下方为丰中子核素,将以 β^- 衰变朝上进格。在 A 列中部则存在 β 稳定核素。

对于每一个 Z 列,用一专用粗线六角格子打头,作为元素标志,注明 Z 值(原子序数)、元素符号和中文名称。例如图2显示了 $Z = 92$ 的铀的同位素列的元素标志。

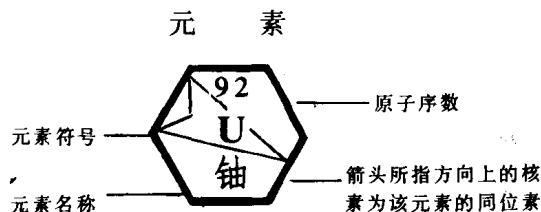
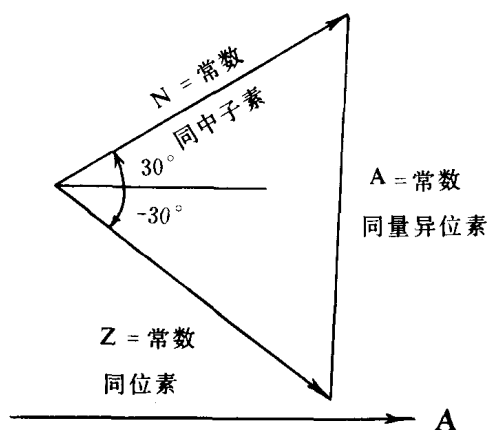


图2 同位素列的元素标志

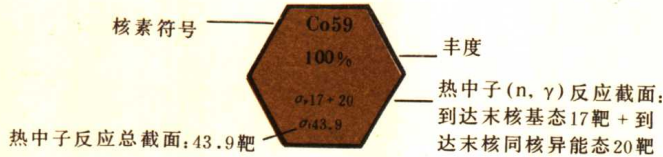
图1 本核素图中 A 、 N 、 $Z =$ 常数下,核素排列方向

本核素图的图例

说明

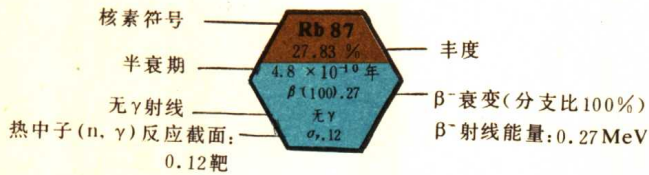
1. 丰度系指稳定核素或长寿命核素在其所在天然元素中所占的原子百分数。
2. 分支比系指每一百个核发生衰变时,按该种衰变方式进行衰变的核的平均个数。
3. α 射线一般列出最强两组的能量值,按强度次序排列,并尽可能列出最强组的强度。强度系指每一百个核衰变时放出该组 α 粒子的平均个数。
4. β 射线一般列出最强两组的能量值,按强度次序排列。所列能量值均系该组 β 能谱的端点能量。所列 β 射线按测量值或按 γ 线能级平衡后给出的值。
5. 除同核异能跃迁外,所列 γ 射线系指核素衰变到子核激发态后退激发时所放出的 γ 射线。一般列出三条最强线,按强度次序排列,并尽可能列出最强线的强度。强度系指每一百个核衰变时,放出该 γ 射线的平均数目。
6. 缓发粒子系指该核素衰变到子核激发态后放出的粒子,尽可能列出其总强度和最强两组粒子的能量值,以强度次序排列。总强度系指每一百个核衰变时,放出的平均粒子数。

稳定核素

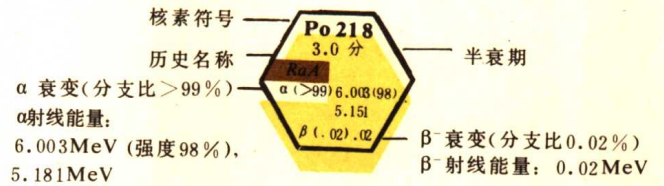


- 丰度是该核素在天然元素中所占的原子百分比
- 热中子截面: σ_{γ} 为 (n, γ) 反应 (又称辐射俘获) 截面, σ_p 为 (n, p) 反应截面, σ_{α} 为 (n, α)、 σ_f 为 (n, f) 截面, σ_a 为吸收截面, σ_t 反应总截面。

天然放射性核素

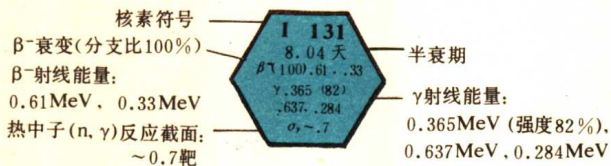


天然放射系成员



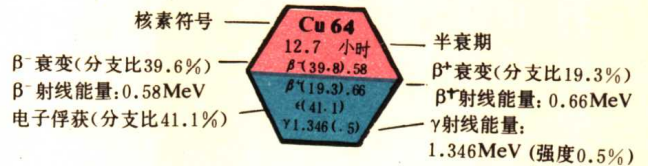
人造放射性核素

(单一衰变方式)



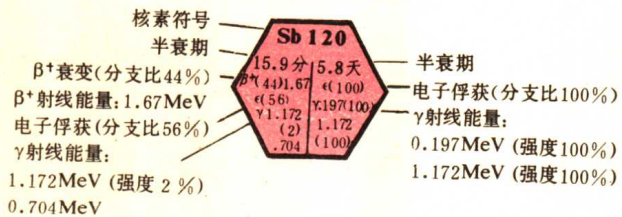
人造放射性核素

(两种或两种以上衰变方式)



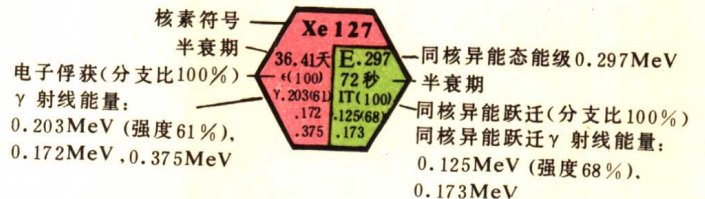
人造放射性核素

(何者为基态不确定)



具有同核异能态的核素

(只选列半衰期 ≥ 0.1 秒的同核异能素)

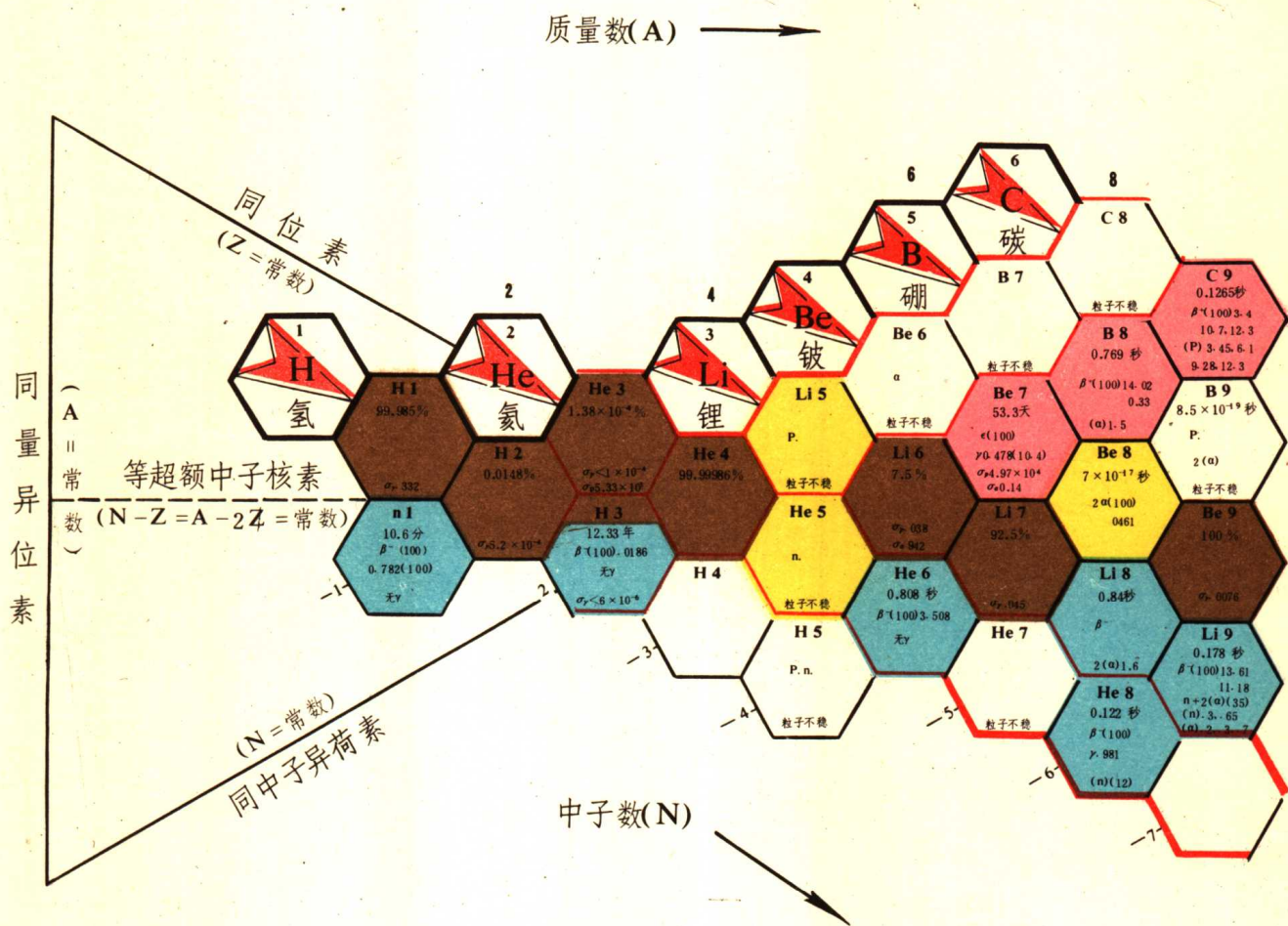


元素周期表

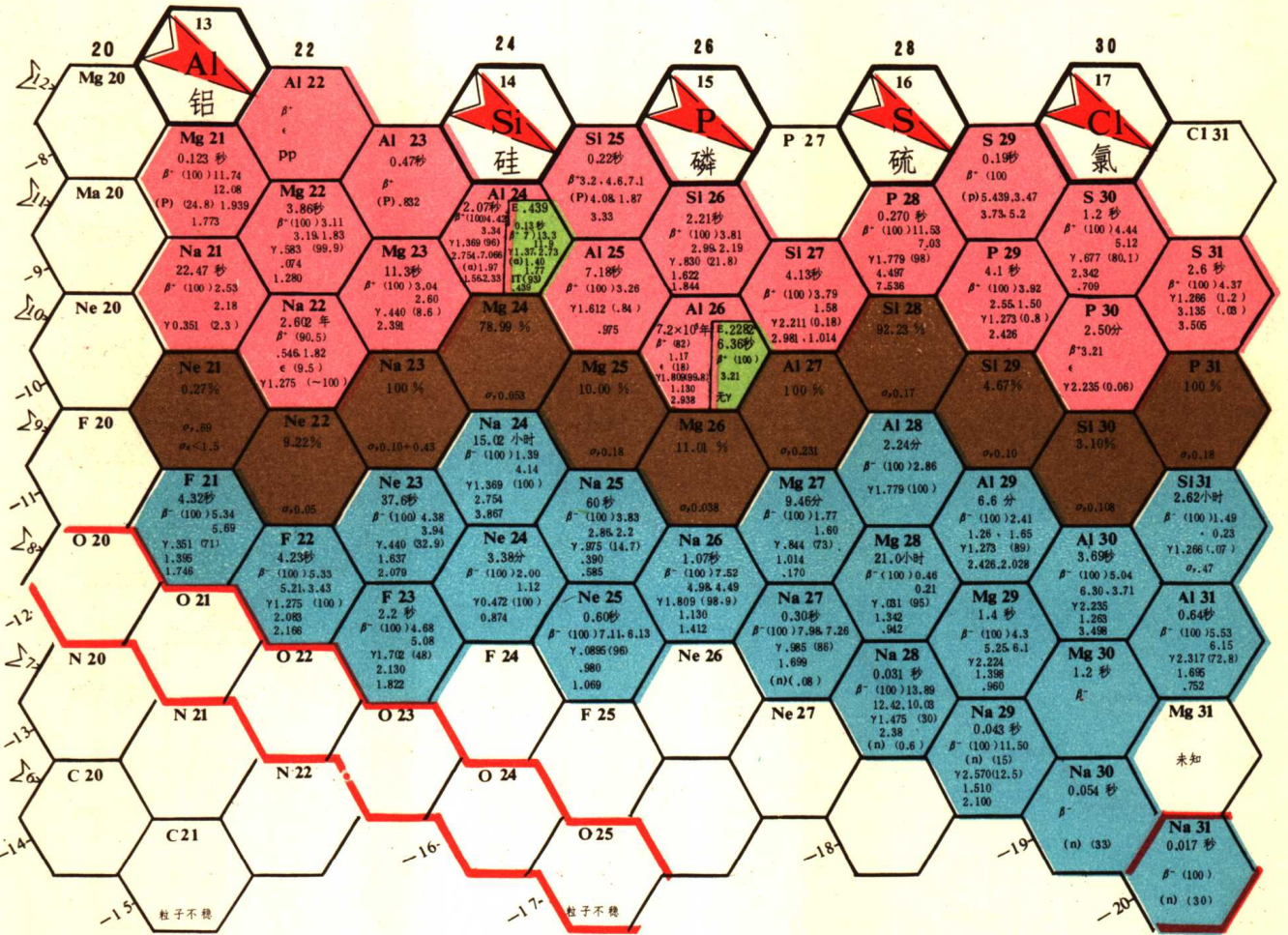
周期	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0族	电子层数	族数
1	1 H 氢 1.0079 1s ¹															He 氦 4.00260 1s ²	1	2
2	3 Li 锂 6.941 2s ² 2p ¹	4 Be 铍 9.01218 2s ²														Ne 氖 20.179 2s ² 2p ⁶	2	8
3	11 Na 钠 22.98977 3s ¹	12 Mg 镁 24.305 3s ²														Ar 氩 39.948 3s ² 3p ⁶	3	8
4	19 K 钾 39.0983 4s ¹	20 Ca 钙 40.08 4s ²														Kr 氪 83.80 4s ² 4p ⁶	4	18
5	37 Rb 铷 85.4678 5s ¹	38 Sr 锶 87.62 5s ²														Xe 氙 131.29 5s ² 5p ⁶	5	18
6	55 Cs 铯 132.9054 6s ¹	56 Ba 钡 137.33 6s ²														Rn 氡 222 6s ² 6p ⁶	6	18
7	87 Fr 钫 223 7s ¹	88 Ra 镭 226.0254 7s ²																

元素符号
红色标注
放射性元素
原子量
原子序数
元素名称
注：构型
人造元素
外围电子的构型
括号指可能的构型

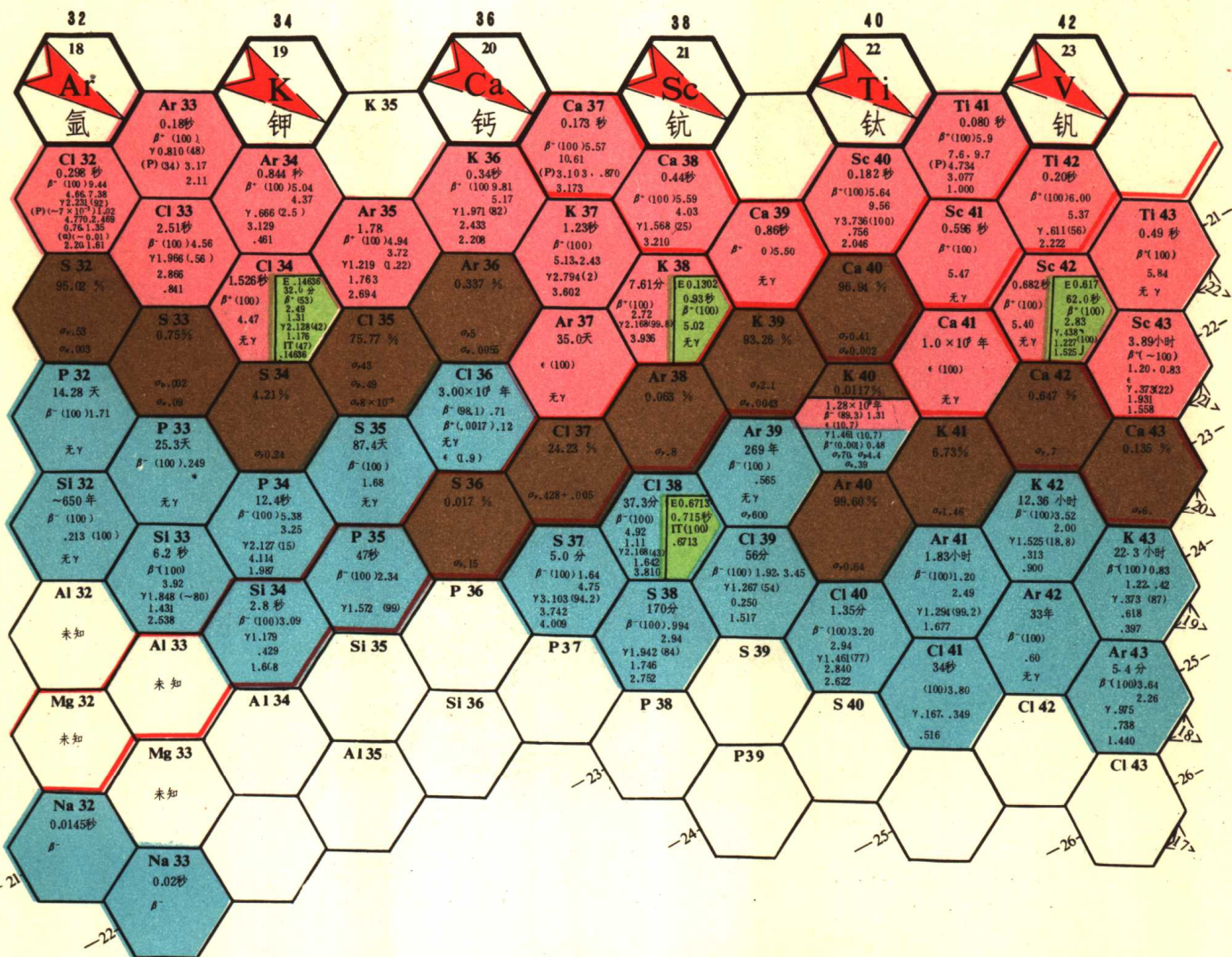
71 Lu 镧 174.967 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ²	70 Yb 镱 173.04 4f ¹⁴ 6s ²	69 Tm 铥 168.9342 4f ¹³ 6s ²	68 Er 铒 167.26 4f ¹⁴ 6s ²	67 Ho 钬 164.9304 4f ¹⁴ 6s ²	66 Dy 镝 162.50 4f ¹⁴ 6s ²	65 Tb 铽 158.9254 4f ¹⁴ 6s ²	64 Gd 钆 157.25 4f ⁷ 5d ¹ 6s ²	63 Eu 铕 151.96 4f ⁷ 6s ²	62 Sm 钐 150.36 4f ⁶ 6s ²	61 Pm 钷 144.9128 4f ⁵ 6s ²	60 Nd 钕 144.24 4f ⁴ 6s ²	59 Pr 镨 140.9077 4f ³ 6s ²	58 Ce 铈 140.12 4f ¹ 5d ¹ 6s ²	57 La 镧 138.9055 5d ¹ 6s ²
103 Lr 铹 (5f ¹⁴ 7s ²)	102 No 锘 (5f ¹⁴ 7s ²)	101 Md 镆 (5f ¹⁴ 7s ²)	100 Fm 钔 5f ¹⁴ 7s ²	99 Es 铀 5f ¹⁴ 7s ²	98 Cf 锔 5f ¹⁴ 7s ²	97 Bk 锫 5f ¹⁴ 7s ²	96 Cm 锔 5f ¹⁴ 7s ²	95 Am 镅 5f ⁷ 7s ²	94 Pu 钚 5f ⁶ 7s ²	93 Np 镎 5f ⁶ 7s ²	92 U 铀 5f ³ 6d ¹ 7s ²	91 Pa 镤 5f ² 6d ¹ 7s ²	90 Th 钍 232.0381 6d ² 7s ²	89 Ac 锕 227.0278 6d ¹ 7s ²



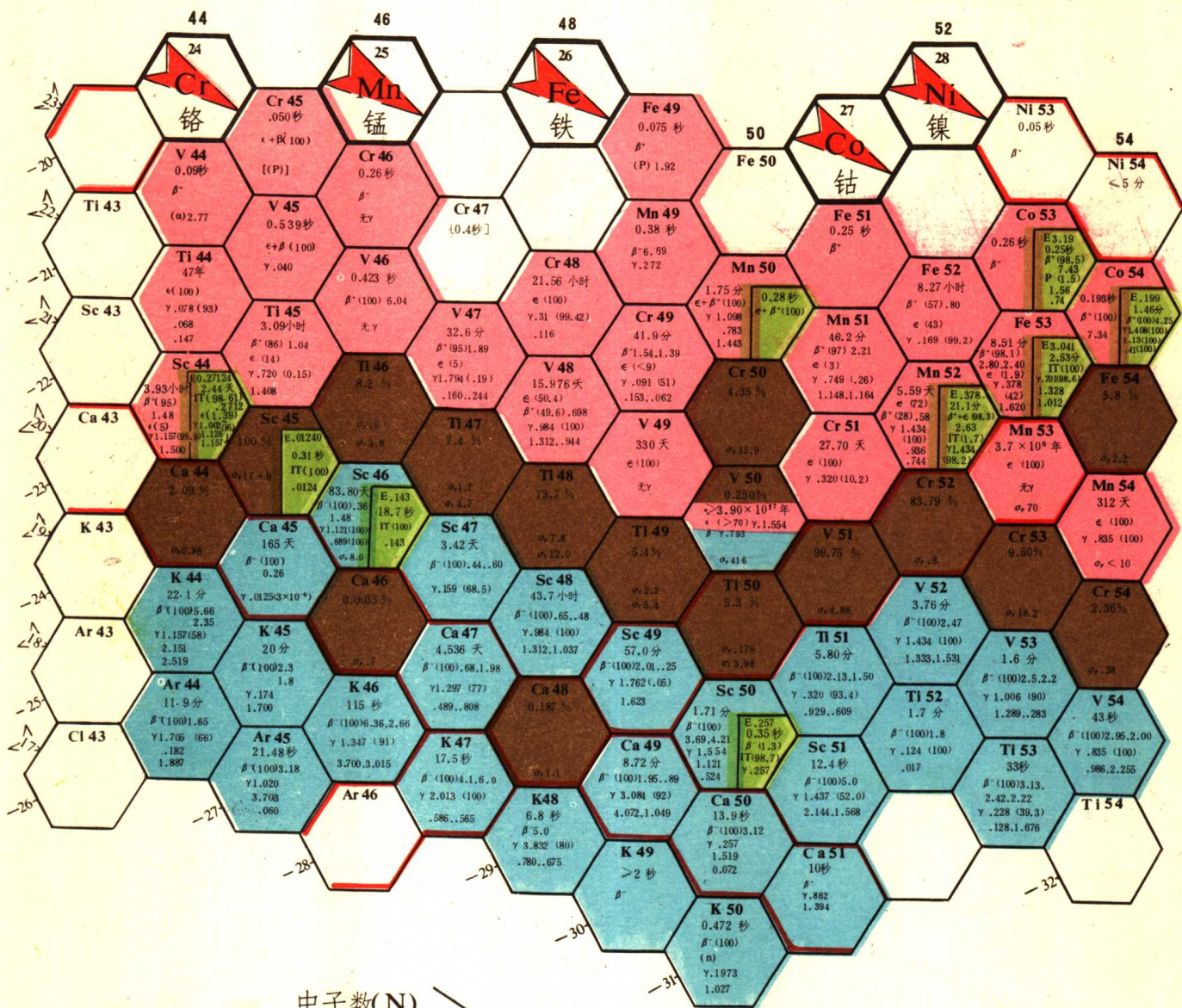
质量数(A) —————→



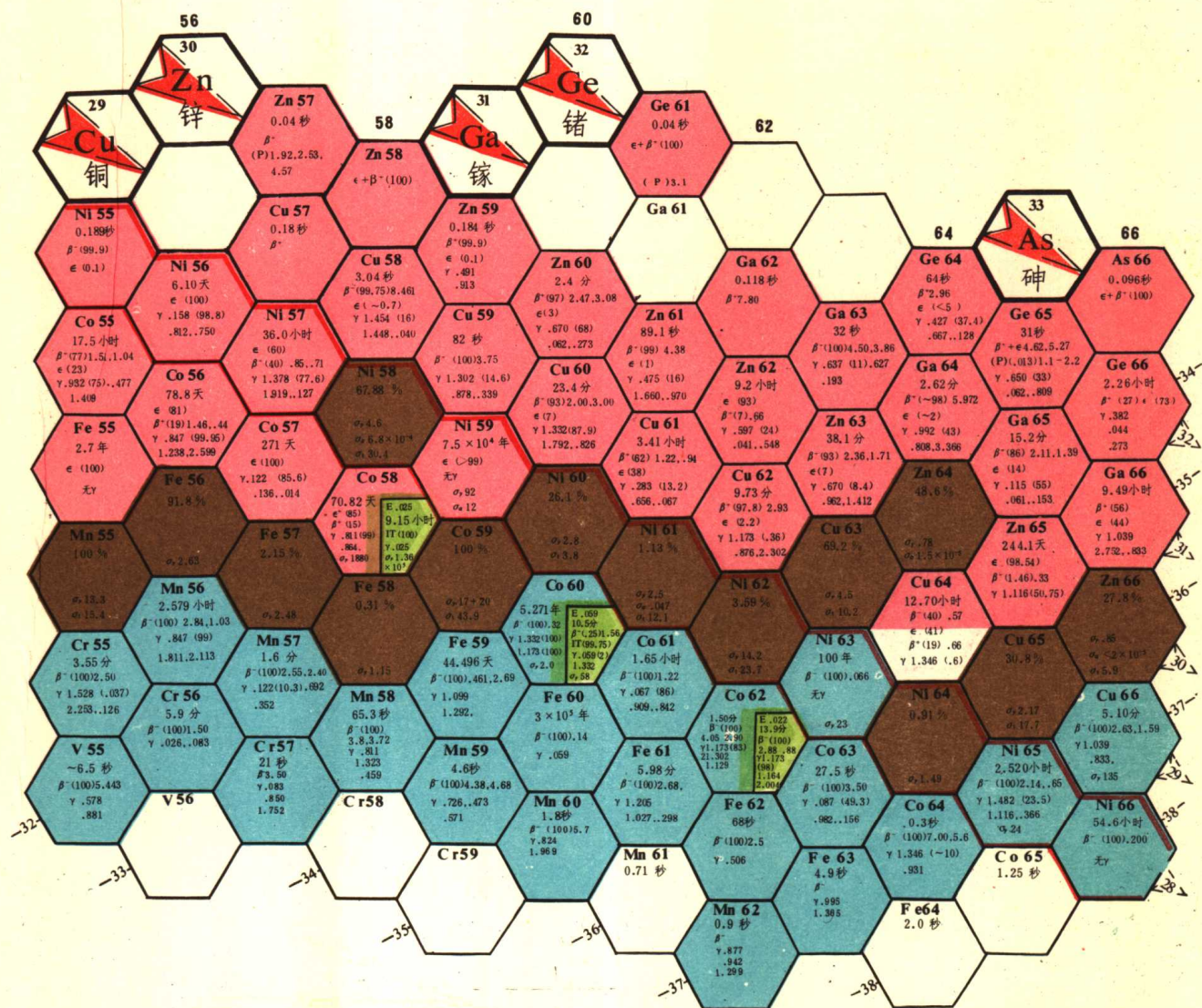
中子数(N) —————→



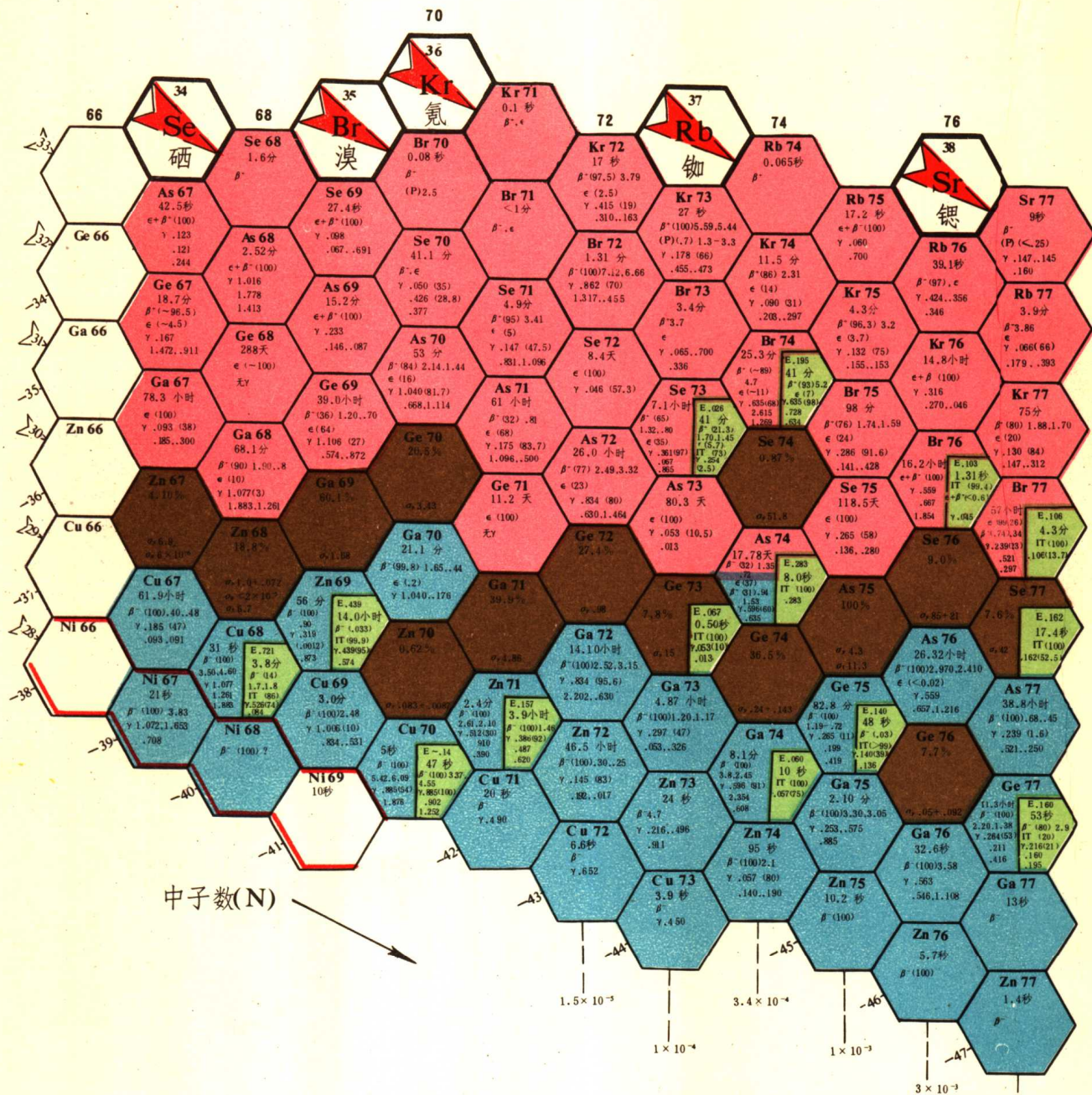
质量数(A) →



中子数(N) ↘



质量数(A) →



铀-235 热中子诱发裂变的裂变产物链产额 (%)