

其本館藏
北京石油學院講義

251820

油矿地球物理

第二卷

苏联 Г.А.車列明斯基教授著

石油工业出版社

北 京 石 油 学 院 讲 义

油 矿 地 球 物 理

第 二 卷

苏联 Г.А. 車列明斯基教授著

北京石油学院地球物理教研室译

石 油 工 業 出 版 社

內 容 提 要

本書介紹了有关放射性理論的基本知識， γ -射綫、中子同物質的相互作用，引起核反应的原理；介紹了地球內部構造、地球的热状态、岩石的放射性質。

書中对用以观察、測量放射性射綫的电离箱、計数器，以及如何观察、測量作了詳細的介紹；对測井法的原理、如何应用 γ - γ 法、放射性同位素进行測井，如何进行資料整理、解釋等作了詳細介紹。

本書可供 地球物理專業院校师生學習、參考用，也可供油矿、煤矿及其他地球物理專業工程技術人員參考。

統一書号：15037·692

油 矿 地 球 物 理

НЕФТЕПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОФИЗИКА

第 二 卷

根据北京石油学院苏联 Г. А. 車列明斯基教授 (Г. А. ЧЕРЕМЕНОВИЧ)

譯文稿翻譯

石油工業出版社出版 (地址：北京六條坑石油工業局內)

北京市書刊出版登記證出字第053号

石油工業出版社印刷厂印刷 新华書店發行

850×1168毫米开本 * 印張9 $\frac{1}{2}$ * 223千字 * 印1—3,000册

1959年7月北京第1版第1次印刷

定价(10)1.65元

目 录

緒論	1
----------	---

第一部分 放射性測井法的理論基础

第 一 章 基本知識	6
§ 1 原子及原子核的構造	6
§ 2 同位素和異位素	8
第 二 章 自然放射性	11
§ 3 α -粒子	11
§ 4 β -粒子	15
§ 5 γ -射綫	19
§ 6 放射性衰变的規律	23
§ 7 放射性蜕变	30
§ 8 放射系(族)	32
§ 9 放射性的單位	38
第 三 章 γ -射綫与物質的相互作用	39
§ 10 γ -射綫的光电吸收現象(光电效应)	40
§ 11 γ -射綫的康普頓散射及电子对的形成	43
§ 12 γ -射綫的吸收系数	49
第 四 章 核反应	51
§ 13 帶电粒子引起的核反应	52
§ 14 中子引起的核反应	54
§ 15 有效截面和全截面	56
第 五 章 在油矿地球物理中使用的中子源	61
§ 16 弱中子源	61
§ 17 强中子源	67
第 六 章 中子与物質的相互作用	70

§ 18 彈性散射	71
§ 19 中子的俘获	76
§ 20 中子引起的活化	79
第七章 中子的減速	84
§ 21 能量大于一电子伏特的中子的減速	85
§ 22 能量約等于及小于 1 电子伏特时中子的減速	99
第八章 中子的空間分布	102
§ 23 基本原理	102
§ 24 在無限介質中的点狀中子源	111

第二部分 观察和測量放射性射綫的方法

第九章 电离箱	122
§ 25 基本原理	122
§ 26 电离箱的近似計算	126
第十章 脉冲計数器	130
§ 27 基本原理	130
§ 28 正比計数器	134
§ 29 自持气体放电的不自灭計数器的放电机构	140
§ 30 自灭計数器	142
§ 31 自灭計数器的脉冲形状、休止时期、恢复時間 和其他参数	144
§ 32 鹵素計数器	149
§ 33 γ -射綫計数器	150
第十一章 閃爍計数器	152
§ 34 基本原理	152
§ 35 无机閃爍体	160
§ 36 有机閃爍体	163

第三部分 地球的放射性、地热状态

岩石的放射性質及中子性質

第十二章 地球内部的構造	168
---------------------------	-----

§ 37 关于地壳形成的假說	169
§ 38 地球的構造	171
§ 39 地壳的構造	175
第十三章 地球的放射性及其热状态和岩石的中子性質	177
§ 40 地球各物質圈和火成岩的放射性	177
§ 41 沉积岩的放射性	184
§ 42 泥質及碳酸質岩石的放射性	190
§ 43 碎屑岩的放射性	194
§ 44 水的放射性	195
§ 45 地球的放射性及其热状态	205
§ 46 岩石的中子性質	210

第四部分 放射性测井方法

第十四章 确定由各种形式的源产生的 γ -射綫

强度的理論基础	213
§ 47 点源	213
§ 48 綫狀源	213
§ 49 桿狀源	215
§ 50 薄的放射性層	218
§ 51 井壁为 γ -射綫源	222
§ 52 無限的放射性介質	227
§ 53 考虑洞穴的影响及确定岩石中放射性元素的含量	229
§ 54 放射性地層	232

第十五章 γ 法資料的整理及解釋的特点

§ 55 放射性測量时的統計誤差	237
§ 56 基值的影响	239
§ 57 放射性测井法曲綫記錄的特点	241
§ 58 进行放射性测井时的誤差	242
§ 59 确定由時間常数 τ 和测井速度引起的誤差	245

第十六章 以絕對單位記錄 γ 法测井曲綫

§ 60 基本原理	246
§ 61 用点状校准器确定仪器刻度	249
§ 62 用柱状校准器确定仪器刻度	250
第十七章 γ 法的应用	254
§ 63 根据 γ 法曲线确定井的地質剖面的岩石特性	254
§ 64 根据 γ 法曲线确定岩石中放射性元素的含量	257
第十八章 γ - γ 法及选择 γ - γ 法	261
§ 65 方法的理論基础	262
§ 66 方法的特点	266
§ 67 γ - γ 法的应用	269
§ 68 选择 γ - γ 法	273
第十九章 放射性同位素法	277
§ 69 基本原理	277
§ 70 划分井的地質剖面及估計岩層的渗透率	280
§ 71 确定地層的吸收能力	283
§ 72 确定套管的破裂位置、吸收地層及管外液流	286
§ 73 測定套管外水泥返回高度及水泥环的厚度	289
§ 74 檢查地層的水力压裂	290
§ 75 确定射孔深度	293

緒 論

“非電法測井”課程，是油礦地球物理的主要課程之一。這門課程包括應用岩石非電性質的所有方法，即磁性、放射性法、熱法、機械法、氣測法、螢光法，以及其他測井方法。每一種方法又包括以相應的岩石性質為基礎的一套方法。因此，“非電法測井”課程包括應用所有豐富多采的岩石非電性質的不同方法。

目前，還沒有適合石油學院地球物理測井法專業“非電法測井課程”教學大綱的教科書。考慮到最近十年來放射性測井、磁測井及其他非電法測井科學的蓬勃發展，1947年蘇聯國家燃料技術出版社出版的B.H.達赫諾夫的“礦場地球物理”教科書已嫌陳旧。

1952年蘇聯國家燃料技術出版社出版的B.H.達赫諾夫和Д.И.德雅科諾夫的“熱測井”，1954年蘇聯國家燃料技術出版社出版的A.A.卡爾蔡夫，З.А.達巴薩蘭斯基等著的“油氣田的地球化學普查和勘探法”中第六章“油氣測井”，1955年蘇聯國家燃料技術出版社出版的B.H.達赫諾夫著的教學參考書“地球物理測井資料的解釋”等都是B.H.達赫諾夫著的教科書“礦場地球物理”的重要補充。這樣，在這門課程中有关熱測井、氣測井、螢光測井部份，以及部分機械測井都有了系統的材料。但這門課程的其他部份系統的文獻還是相當差的。有关課程的這些部份僅是在各種雜誌上和其他出版刊物上發表了許多闡述個別問題的報告和文章。

考慮到上述情況，並注意到講課的時間不多，以及聽課者的願望，在整个豐富的非電法測井法的材料中我們不得不集中精力來講述磁法和放射性法。為了講述的方便，磁法測井，我們已經在“電法測井的理論與解釋”課程中講過了。

在蘇聯，是在石油學院和石油系的教學計劃和“地球物理測井

法”專業教學大綱所規定的專門的系統的基本課的基礎上，講述非電法測井課程的各個部分。講述這門課程要應用大量的、多種多樣的有關課程的知識。例如，講述放射性測井法部分時，要應用原子物理學、統計物理學、氣體放電物理學、無線電技術、核子地質學及其他地質知識。在講述這門課程時，為了更加完善地闡明現象和過程的實質，我們需要對該課程以外的某些問題給予適當的注意。

第一部分 放射性測井法的理論基礎

放射性測井綜合方法，是以最近几十年来在原子物理学方面、其他科学和技术方面所获得的巨大成就的基础上，产生和发展起来的。所有放射性測井的各种方法都是以利用原子能、研究岩石中自然放射过程，以及人工放射过程为基础的。使用放射性測井法是从始于 γ 法。該法是根据測量井內岩石自然 γ -射綫来研究地質剖面的。

1933年，苏联地球物理学家Г.В. 格尔史科夫、А.Г. 格拉瑪科夫、В.А. 史派克和Л. М. 庫尔巴托夫首次提出和創造了 γ -法(簡写ГМ或ГК-Гамма-кароттаж)。最初在苏联，以后在其他国家，其中包括美国(1940年)，有效地試驗了 γ -法，成为順利应用这个方法の开端。

中子 γ -法(НГМ或НГК-Нейтронно-гамма-кароттаж)是放射性綜合測井法的进一步發展。这个方法是从1941年В. 邦切尔科尔提出来的，他是根据岩石元素的原子核俘获中子时产生的 γ -射綫来研究地質剖面的。接着这个方法，于1942年，А.И. 扎巴洛夫斯基、Г.В. 格尔史科夫和Л.П. 巴雷士金森科試驗了測量慢中子密度的方法(ННМ或ННК)。自1950年起，美国順利地使用着这个方法。1946年，А.А. 科尔日夫建議研究岩石被中子照射后的次生放射性。人工活性(НА)法为研究在自然成層条件下确定岩石化学成份和矿物成份的方法開了远景。次年，О.А. 巴尔苏科夫、Д.Ф. 別斯派洛夫、Г.Р. 高尔别克、Л.С. 帕拉克、Г.И. 斯托梁洛夫等人所开始的工作，保証了創造使用一个或两个纜芯的測量深井中自然的和輻射的 γ -射綫的各种仪器。Ф.А. 阿列克塞也夫、О.А. 巴尔苏科夫、В.Н. 达赫諾夫、Н.К. 庫哈連科、А.И. 霍林、Ю.С. 史天列維奇等人的工作，应

該認為是放射性法發展的進一階段。他們研究了詳細測量地質剖面的方法和儀器，以便根據中子 γ -法、井下光譜法、中子中子法、同位素法和人工活性法的資料，確定下套管井中的油水接觸面。

最近幾年以來，B.M. 扎巴洛內茨、A.A. 科爾日夫、A.A. 木黑爾、A.B. 奧包連斯基和石油地球物理管理局的大部分生產工作者創造了使用放射性同位素來研究油井技術情況的方法。Ю.П. 布拉士維奇（蘇聯烏發）、A.П. 奧奇庫爾、M.M. 索克洛夫（全蘇勘探地球物理研究所）、Ю.А. 古林（巴什吉利亞石油地球物理托辣斯）等人創造了中子 γ -法的理論基礎。

最近幾年來，在蘇聯研究了M. M. 索克洛夫提出的 γ - γ -法（ГГМ）。這個方法是測量井內由 γ -射線源造成的并被岩石散射的 γ -射線強度。這個方法可以求得井的地質剖面的密度特性。Ю.П. 布拉士維奇、Г. М. 握斯科包依尼科夫、П.П. 傑也夫、A.П. 奧奇庫爾、H.И. 科布蘭諾夫等人的工作結果，研究出來了可以測定岩石密度的 γ - γ -測井法的理論、方法和儀器。

蘇聯在發展放射性測井法的事業中，各學院、研究所（莫斯科石油學院、石油工業部地球物理勘探法科學研究所、全蘇勘探地球物理研究所、蘇聯科學院烏拉爾分院、蘇聯科學院石油研究所等）的學者和蘇聯石油工業部石油地球物理管理局的許多生產單位的緊密合作起了很大的作用。這樣集中大部分工作人員，在有充足經費的條件下，是順利地迅速地解決放射性測井綜合方法的理論、方法、儀器及解釋問題的保證。

放射性測井法在現有的技術條件下可以解決下列一些問題：

- 1) 劃分下套管及未下套管的井身地質剖面；
- 2) 分出滲透層；
- 3) 確定岩石密度及弱泥質地層的孔隙率；
- 4) 分析岩石的基本成份；
- 5) 對比井的剖面；

6) 确定水-油和气-油接触面的位置。如果天然气处于气态时，则可以求出气-油接触面；

7) 研究液体和天然气从一口井到另一口井沿地層运移情况；

8) 检查固井质量和确定泥漿漏失位置；

9) 确定压裂帶的深度、厚度及裂縫的方向；

10) 控制射孔和井壁取心时的深度，以及解决其他問題。

放射性测井法，在研究地質剖面时，有效地补充了电法的資料，可以更有把握地划分地質剖面，分出生产層及估計其含油气飽和率。在井內充滿高矿化泥漿的条件下，研究由交互的白云岩、不同石灰岩（孔穴的、礁狀的等）与水化学沉积層組成的地質剖面时，放射性测井能給予特別巨大的帮助。放射性测井法的主要优点是可以在下套管的和未下套管的充滿石油、油基泥漿及鹽溶液的井中，以及在干井中，測定岩層。这些方法的主要缺点是测井速度低（200—300 公尺/小时）。若能使用同时可以測量几个数值的仪器即等于提高了测速。

現在，烏克蘭共和国科学院机械和自动化研究所，研究同时量測四个放射性参数的單芯四綫式仪器。使用这种仪器可提高测井效率及总速度。

放射性测井綜合方法是新的綜合方法。自从这个綜合方法的出現和使用时起，虽然作了許多改进，但是，这个綜合方法应用的可能性还远远沒有挖掘淨尽。

鑑于最近十年来科学和技术的蓬勃發展，以放射性方法解决油矿地球物理的基本任务（在井的碳酸岩剖面和砂-泥岩剖面中划分渗透的生产地層，以及估計地層中石油和天然气的含量），条件是具备的。

第一章 基本知識

为了清楚地說明放射性測井法的實質，先講述一些原子物理的知識。

§ 1 原子及原子核的構造

所有的岩石皆由彼此以不同方法連系着的具有不同組合的化学元素的原子組成。每个原子都具有复杂的構造，由更簡單的基本粒子(电子、質子、中子、中微子，等等)所組成。不同元素的原子構造不同。但是所有的原子具有某些共同的特征。根据現代的概念，原子由原子核組成，在核的周圍有电子沿着閉合的軌道旋轉。电子的軌道分成几層，而組成电子層。这些層从原子核逐層向外，以字母 K 、 L 、 M 、 N 、 O ……来表示。每一層可能包含不同数目的电子，但是不超过某一固定的数目。例如，在 K 層中不超过两个电子。在 L 电子層中，在完全佈滿电子时，不超过 8 个电子。在 M 、 N 、 O 層中，相应地不超过 18、32、18 个电子。

在所有的基本粒子中，每个原子中的最輕的粒子是电子，它的質量等于 9.1×10^{-28} 克，負电荷等于 $4.803 \times 10^{-10} CGSE$ 或 1.6×10^{-19} 庫侖。原子的大小約为 10^{-8} 厘米，而原子核的大小約为 10^{-13} 厘米，原子核的大小比原子小很多。由此可見，原子核是一个極微不足道的物質塊。原子核和电子具有符号相反的电荷，原子核具有正电荷，电子具有負电荷。如果以快中子轟击原子，或以光或热激發原子来給某一原子的电子層以附加能量时，則原子的电子層的能量將是跳躍式地增加。在这种情况下，原子从一种量子状态过渡到另一种“高級”状态。在相反的情况下，当原子的电子層过渡到能量較小的状态(“低”量子状态)时，原子能够放出部分輻射能(光量子)。

这时，輻射頻率 γ 可由下式求出：

$$h\gamma = \Delta E,$$

式中 h ——普蘭克常数，等于 6.625×10^{-27} 尔格·秒； ΔE ——原子的电子層的两个能状态之差。

电子从較高的电子層过渡到同一原子的較低的电子層中的空余位置时，則發生放射。这个放射决定于兩層之能差。

任一物質的原子核由小的基本粒子組成，这些粒子有时称为核子(圖 1)。核子有兩種存在形式——帶正电荷的粒子称为質子，中性的粒子称为中子。帶电的氫原子核就是質子，其电荷等于电子的电荷，但符号相反。質子的質量等于 1.7×10^{-14} 克或 1.00812 原子質量單位。一个原子質量單位等于 O^{16} 同位素質量的 1/16，这个單位用字母 a.e.m (атомная единица массы) 表示。質子的重量为靜止电子的 1836 倍。中子是最小的物質粒子，不帶电，質量等于 1.0089 a.e.m。中子和質子由作用于这些粒子之間的特殊的原子核力維持在原子核內。原子核的基本性質是电荷和質量。每一个原子核帶有等于核質子数的正电荷 Z 。 Z 值相应地等于門德列也夫週期表中的元素的原子序数(圖 2)。

質子数目相同(电荷相同)但中子数目不同的元素实际上具有相同的化学性質。

核的質量是其組成部分的質子 Z 和中子 N 之和。用整数来表示的这个和称为質量数，以字母 A 表示之。

$$A = Z + N.$$

在核子物理学中，应用以下的符号，在元素符号的右上角标以

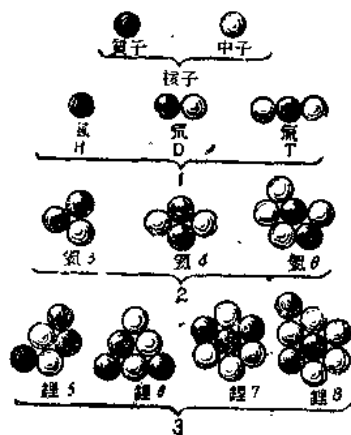


圖 1 輕元素的原子核

質量數，在左下角標以序數。例如， ${}^7_{14}\text{N}$ 代表氮的原子或原子核，其質量數(質子和中子數)等於14，序數(核的電荷)等於7。元素的質量數從1(質子或中子)到238(鈾)。在化學元素中，缺少質量數5和8。原子核的質量不是完全準確地等於核內的質子和中子質量之和。如果以 m_p 表示質子的質量，以 m_n 表示中子的質量，則核的質量等於：

$$M = Zm_p + (A - Z)m_n - \Delta M$$

核的質量減小 ΔM ，是由於質子和中子結合在原子核內時分離出能量所致。根據近代的概念，系統中質量的變化，應與其能量的變化相適應，即：

$$\Delta E = \Delta M \cdot C^2$$

式中 C ——真空中的光速，等於 $3 \cdot 10^{10}$ 厘米/秒。

ΔE 值稱為核子結合能。這個能量等於將原子核分解成其基本組成粒子(質子和中子)時所消耗的能量。在核子物理學中，能量用電子伏特來表示。一電子伏特就是帶一個電子的電荷的粒子通過一伏特的電位差以後所獲得的能量。電子伏特值(eg)很小，因此經常使用等於電子伏特一千倍和一百萬倍的單位——千電子伏特 ($1\text{keg} = 10^3\text{eg}$) 和百萬電子伏特 ($1\text{Meg} = 10^6\text{eg}$)。

能量單位之間的關係

表 1

	1 百萬電子伏特	1 尔 格	1 卡
1 百萬電子伏特	1	1.602×10^{-6}	3.827×10^{-27}
1 尔 格	6.24×10^5	1	2.39×10^{-8}
1 卡	2.6×10^{18}	4.18×10^7	1

§ 2 同位素和異位素

質子數相同但中子數不同的原子核稱為同位素。電荷不同但粒

子数相同的原子核称为同位素(圖3)。元素的同位素分成稳定同位素和放射性同位素。

如果在縱坐标軸上表示中子数($A-Z$),而在横坐标軸上表示質子数 Z ,則在这样的坐标系中,同位素分佈在相当狹窄的帶内,

有时这个帶被称为稳定帶(圖4)。研究在圖4上所示的規律,

可以作出以下的結論:

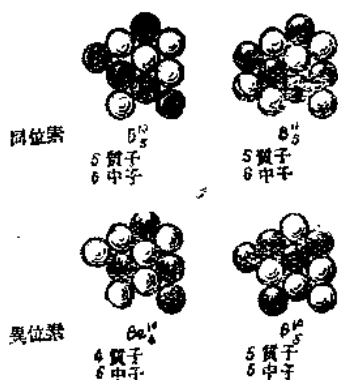


圖3 同位素和異位素的原子核

1)同位素的数目向元素週期表中心的方向增加,向週期表末尾的方向減小。

2) Z 等于偶数的元素比 Z 等于奇数的元素有数目較多的同位素。

3)根据質量数被4除的可除性,可以將所有的同位素分成四种类型($4n$ 、 $4n+1$ 、 $4n+2$ 和 $4n+3$)。

4)在地壳中,質量数被4除尽的同位素(O^{16} 、 Mg^{24} 、 Si^{28} 等)分佈最广。

5)在輕元素的区域内,質量数 A 大約等于 Z 的2倍左右。这些元素的原子核包含有相同数目的質子和中子,稳定性最大,能量最小。

6)在核内中子的相对数目随同位素的質量数的增加而增加。对放射性的重元素說来,中子数近似地等于質子数 Z 的1.5倍。

在核内,質子数大于某一固定数目时,同号帶电粒子的相互排斥力随質子数目的增加而增加。这迫使原子核向稳定状态过渡,即增加核内的中子数,以便以作用在質子中子之間的核心力补偿質子間的电学排斥力。因此,中子数目相当大的原子核,是較稳定的。

随時間自發地(無外部作用)变成其他元素的同位素叫作放射性

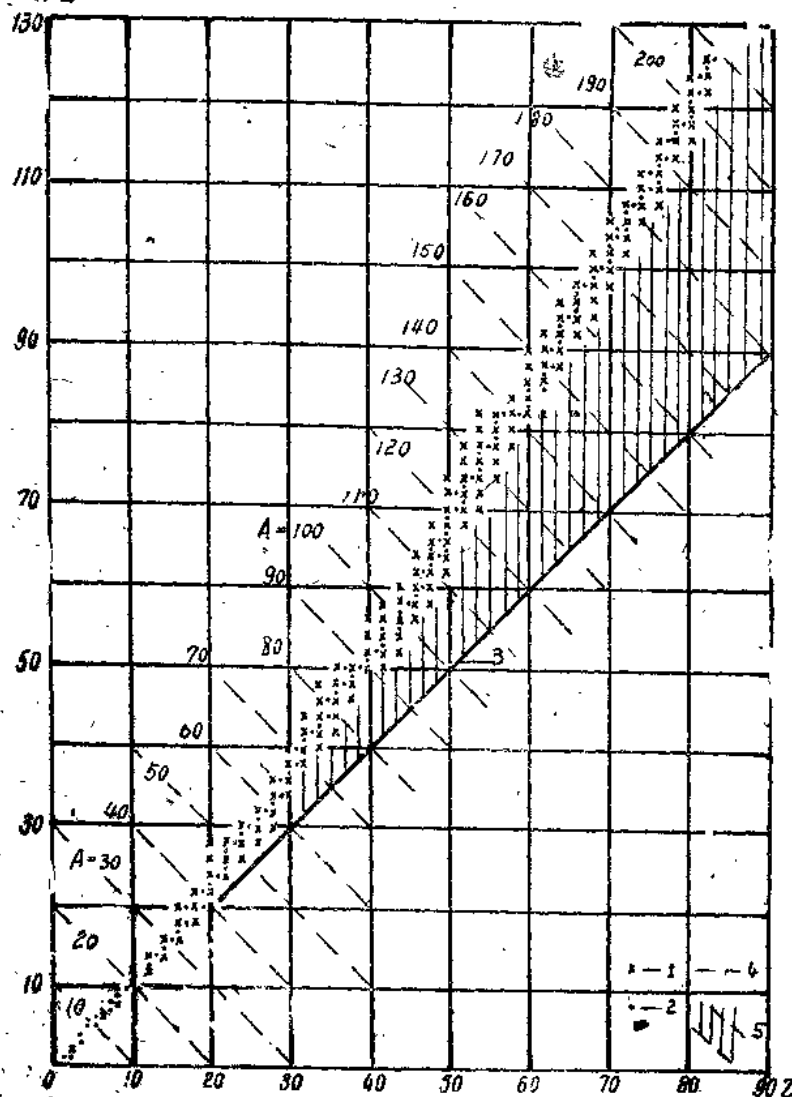


圖 4 自然同位素的中子-質子圖

1—質子和中子數等于偶數的同位素；2—質子和中子數等于奇數的同位素；3—中子和質子的等數($N=Z$)綫；4—連接質量數($N+Z$)相同但門捷列夫序數不同的點的異位素綫；5—中子數超過質子數的區域。