

原子核物理学

修订本

高 中 生

科学出版社



原子核物理学

(修訂本)

梅鎮岳 著

科学出版社

1966

1366.4. 8

100525

內 容 簡 介

本书是作者根据 1961 年出版的第一版修改补充而成的。全书仍分十二章，前三章分别介绍带电粒子与物质的相互作用、加速器和探测器，第四章讨论原子核的一般特性（电荷、大小、角动量等等），接着以较大篇幅讨论低能核物理的主要课题之一——原子核的放射性（第五、六、七章），第八、九两章叙述核力和核结构模型，它们是目前正在研究和探索的两个重大问题，第十章“原子核反应”是作为低能核物理的另一主要课题来讨论的，最后两章分别讨论中子物理和高能原子核物理。

修订版除了改正第一版中已发现的错误和以新的数据来代替旧的数据以外，还对第八章“核力”和第十章“原子核反应”作了较多的修改和重写，第三、七、十一等章也部分重写过，以便使这些章节的内容更与目前这些方面的状况相适应。此外，第一版的附录“热核反应”，因难以概括这个发展得极其迅速的领域的现状，在这一版中删去了。

本书可作为高等学校原子核物理学方面的教材，亦可供具有一定基础物理知识的读者阅读。

原 子 核 物 理 学

（修 订 本）

梅 鎮 岳 著

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可证出字第 061 号

中华书局上海印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

*

1961 年 8 月 第 一 版	开本：850×1168 1/32
1966 年 1 月 第 二 版	印张：14 15/16
1966 年 1 月第四次印刷	插页：3
精装：851—2,150	字数：395,000
平装：25,911—27,010	

统一书号：13031·2206

本社书号：3353·13—3

定价：[科五] 精装本 2.40 元
平装本 1.90 元

修訂版說明

在这一版中,除了改正第一版中已发现的錯誤,并用較新的数据和图表来代替旧的数据和图表外,还对第八章“核力”和第十章“原子核反应”作了比較多的更动和重写,以便使得本书内容能更适应这些方面的发展現况。此外,在第三章高能加速器部分,第七章无反冲共振散射部分和第十一章的反应堆部分,都重新改写并增加了新的内容。

由于等离子体物理学近年来的迅速发展,原来放在书后作为附录的有关热核反应的介紹已远远不能表达它目前的状况,它最好由別的专著来詳細介紹。因此,决定从本书中删去这一部分。

梅鎮岳 1965年2月



2485/01

第一版序

編写本书的目的是为了給中国科学技术大学近代物理系作基础課教材，并对具有一定物理基础的讀者介紹原子核物理学的基本知識。

在选择本书的内容和范围时，笔者有些躊躇。以前，原子核物理学只是原子物理学的一部分；对于原子核物理学的叙述比較籠統，内容不多。現在，原子核物理学已是一門内容非常丰富的学科；而且与原子核物理学从原子物理学中分出来的情况相类似，原子核物理学本身中的好些部分也都已經相当成熟，达到可以独立成为一門学科的阶段。例如中子物理学，因为它和原子能的应用有联系，尤其是和反应堆物理学密切地联系在一起，近年来由于实践的迫切要求，已經发展成为一門内容很充实的学科。所以目前有一种趋势是在原子核物理学中不讲中子物理学。其他如对于宇宙綫等的情况也类似。在有些原子核物理学教科书或課程中甚至連加速器和射綫探测等也不讲，而把原子核物理学局限于所謂低能原子核物理学的范围内。根据上面所談，这是可以理解的。不过，經過考虑后，笔者最后还是决定把范围定得广一些。这样做，对于各方面要求不一致的讀者可能会方便些，他們可以各自有所取舍。

本书从說明研究原子核物理学的两大基本工具——射綫探测器和带电粒子加速器开始。第一章“射綫和物质的电磁作用”是作为射綫探测所依据的基本原理来叙述的。不难想象，对于这些方面的一般理解会有助于我們对于近代原子核物理学所获得的事实以及数据的分析和整理有一个准确的估价。显然，要进一步深入研究它們，还必须钻研有关的专门著作。

第四章“原子核的一般特性”所談到的原子核特性是它的电荷、半徑、质量、角动量、磁矩、多极矩、宇称和統計性质等。这些性质的討論多半从它們对原子和分子的结构和性能的影响来着眼，所以，这方面的原子核物理学研究是与原子物理学和分子物理学的研究有一定的联系的。

原子核物理学离不开放射性和射綫的研究。射綫是放射性原子核和原子核反应所发射的极其灵敏的訊号，它也是探索原子核深处的最可靠的綫索。“放射性、 α 衰变”、“ β 衰变”和“ γ 射綫和原子核能級”等三章，事实上构成本书的主体。在这里有原子核物理学中历史最悠久(只有60年!)的知識，象天然放射性同位素的性质和有关規律等；也有最新近的重要发现，例如在弱相互作用中宇称不守恒的現象。

第八、九两章所談的核力和原子核结构是原子核物理学中所要了解的中心問題。这方面的問題离开真正解决还有一定的距离，但是，近年来的唯象处理已获得不少成果。本书准备概括地介紹一些主要的理論，而且說明它們的局限性。

原子核反应也是原子核物理学中的重要課題之一。因为与原子核反应有关的一些問題，例如加速器和射綫的測量和分析等，都已經在前面談过，所以，除去介紹一些原子核反应的基本概念和如何利用原子核反应来測定原子核能級外，第十章把注意力集中在原子核反应机制的討論上。这个問題虽然长时期停留在复核形成的观点上，可是近年来已有一些新的看法，值得特別介紹。

第十一章和第十二章分别是关于中子和宇宙綫及不稳定基本粒子这两个方面的討論。它們所包括的內容都相当广闊。中子物理学牵涉到各个方面的应用，有极其丰富的內容。宇宙綫和不稳定基本粒子是一門正处在发展高峰的学科，其中很多部分一时都无法肯定下来，即使是比較肯定的部分，也往往在进一步深入研究以后就必须加以重大的改正。所以，在本书的範圍內，对它們只能作出些初步的介紹，內容比較簡略。

在取材方面，笔者力求尽量吸收較新的內容，可是因为限于笔

者的水平和見聞，可能达不到这个要求。希望能在各方面的协助下在以后再版时不断更新。本书虽然經過再三仔細审閱，但限于笔者的水平，书中一定会有錯誤和編排失当的地方，也希望讀者能随时指出，以便再版时更正。

本书虽然没有命名为“实验原子核物理学”，可是它实际上是从一个实验科学研究工作者的观点和要求出发写成的。因此，本书的有些部分可能会显得理論不够完整或是邏輯性不够强。不过，还是希望它能够給予实验工作者以应该有的較为完整的原子核物理学现状的全貌。

考虑到近年来在若干高等学校物理系各专业中已增設了“原子核物理学”課程，为了采用本书作为該課程教材的同志們的方便，經和有关方面商討，对部分原稿作了必要的修改，而且也把內容的一部分印成小字，使采用本书作教材的同志对这些部分可以斟酌取舍。可是，由于受到時間的限制，笔者来不及把本书作重大修改，使它能完全符合作为教材的要求。因此，把本书用作教材时，应该根据具体的学时和教学条件来安排使用的分量。

在本书的編写过程中得到不少同事和朋友的鼓励和帮助，尤其是在审稿、校閱、制图和編排等方面，得到了各方面的大力援助，笔者一并在此表示衷心的感谢。

梅鎮岳 1961年5月

目 录

修訂版說明	iii
第一版序	iv
第一章 射綫和物质的电磁作用	1

带电粒子与物质的电磁作用

§ 1. 带电粒子的电离損失	2
§ 2. 軀致輻射	8
§ 3. 契倫柯夫效应	13
§ 4. 庫侖散射	16
§ 5. 阳电子的湮沒	22

电磁波与物质的作用

§ 6. 光电效应	26
§ 7. 康普頓效应	28
§ 8. 电子偶的产生	33
§ 9. γ 射綫的吸收	35
第二章 射綫的探測	37
§ 10. 气体中的离子和电子	38
§ 11. 电离室	40
§ 12. 正比計数管	44
§ 13. 盖革-弥勒計数管	45
§ 14. 半导体射綫探測器	50
§ 15. 閃爍計数器	51
§ 16. 契倫柯夫計数器	55
§ 17. 火花計数器	56
§ 18. 云室和气泡室	57

§ 19. 照相底板和原子核乳胶	62
§ 20. 电子学线路	64
第三章 加速器	72
§ 21. 离子源	73
§ 22. 高压倍加器	77
§ 23. 静电加速器	79
§ 24. 直线加速器	82
§ 25. 回旋加速器	87
§ 26. 同步回旋加速器	91
§ 27. 电子感应加速器	93
§ 28. 同步稳相加速器	97
第四章 原子核的一般特性	102
§ 29. 原子核的电荷	102
§ 30. 原子核的半径	104
§ 31. 原子核的质量	109
§ 32. 原子核的角动量和磁矩	130
§ 33. 原子核的电四极矩	157
§ 34. 原子核的字称	159
§ 35. 原子核的统计性质	160
第五章 放射性, α 衰变	162
§ 36. 放射性衰变	164
§ 37. 天然放射性原子核	169
§ 38. α 衰变的规律	177
§ 39. α 粒子能量的测定	185
§ 40. α 射线的能谱	194
第六章 β 衰变	198
§ 41. β 衰变能量的图解和衰变的种类	199
§ 42. β 谱仪	202
§ 43. 中微子	211
§ 44. β 衰变中的守恒原则	216
§ 45. β 衰变的规律	224
第七章 γ 射线和原子核能级	232

§ 46. γ 射綫能量的測定	233
§ 47. γ 衰变規律	245
§ 48. 短寿命 γ 衰变的測定	256
§ 49. 內轉換	261
§ 50. 級联 γ 射綫的角关联	266
第八章 核力	272
§ 51. 同位旋和核力的交換特性	273
§ 52. 氘核	276
§ 53. 核子-核子散射	281
§ 54. 高能核子-核子散射	289
§ 55. 核力的介子場理論	294
第九章 低能原子核結構模型	298
§ 56. 液滴模型和裂变	299
§ 57. 壳层模型	311
§ 58. 集体运动模型	320
第十章 原子核反应	329
§ 59. 原子核反应的一些基本概念和能量关系	330
§ 60. 原子核反应截面	335
§ 61. 复核和共振	344
§ 62. 統計模型和光学模型	351
§ 63. 削裂反应和掇拾反应	354
§ 64. 庫侖激发	358
§ 65. 原子核反应的机制	361
§ 66. 高能原子核反应	365
§ 67. 原子核反应和原子核能級	369
第十一章 中子	375
§ 68. 中子的特性	376
§ 69. 中子源	381
§ 70. 中子探測	397
§ 71. 中子能譜仪	403
§ 72. 中子和原子核的反应	409
§ 73. 中子和成块物质的作用	414

第十二章 宇宙綫和不穩定粒子	425
§ 74. 在地磁場中的带电宇宙綫粒子	426
§ 75. 初級宇宙綫	433
§ 76. 高能核子-核子作用、核子-原子核作用和电磁作用	443
§ 77. 宇宙綫的次級射綫	448
§ 78. 不穩定的基本粒子	454
常用原子常数表	462
参考書籍	463
人名对照表	465
內容索引	467

第 一 章

射綫和物质的电磁作用

在原子核物理学研究的过程中，我們时常需要对各种原子核衰变或反应中发射出的射綫进行探测和分析，来了解原子核及与其有关的規律和現象。这些射綫大致可以分为三类：(1)由带电粒子組成的射綫，例如，由阳电子或阴电子組成的 β 射綫，由氮原子核組成的 α 射綫等；(2)由电磁波組成的 γ 射綫和X射綫；(3)由中性粒子(如中子或中微子等)組成的射綫。中性粒子的探测原理将分別在后面有关章节中討論。由带电粒子組成的射綫和电磁波的探测基本上是根据它們和物质的电磁作用。下面我們把带电粒子和电磁波同物质的电磁作用分开来討論。

带电粒子与物质的电磁作用

如果不考虑带电粒子深入到物质中原子核的核力場范围以内的情形，那么，带电粒子与物质的作用主要是与物质中的原子核和电子起电磁作用。这种作用使运动着的带电粒子改变方向和损失能量。前者就是庫侖散射。带电粒子损失能量的情形随它的速度的大小而有所不同。在速度不很大时，带电粒子损失的能量主要是用于激发物质中的电子。如果电子被激发到連續能級的区域，就发生物质中分子或原子的电离。不論物质中电子被激发的程度如何，带电粒子的这种能量损失方式都通称为电离損失。当电子能量很大时，它的能量损失主要是由于它在原子核庫侖場中改变速度而产生軋致輻射。此外，快速带电粒子还能产生契倫柯夫輻射。这种效应所引起的能量損失很小，可是我們还是能利用这种效应来对粒子进行探测。还有一种上面沒有提到的带电粒子与物

质的作用，这就是满足狄拉克方程的粒子与它的反粒子产生湮没辐射。我們在本章里所要談到的是阳电子和物质中的阴电子湮没而产生电磁波的例子。下面是各种情形的詳細說明。

§ 1. 带电粒子的电离損失

玻尔公式 假設一个电荷为 Ze ，质量为 M 和速度为 v 的带电粒子在离质量为 m 的电子的距离为 b 的地方經過，我們要計算它所給予电子的能量，并由此推出它在单位长度内所損失的能量。

如果入射的带电粒子的速度比物质中电子的速度大得多，我們可以假定电子是自由电子，并且在碰撞开始时是靜止的，而在碰撞的过程中动得不多，于是，我們可以在电子的初始位置上計算带电粒子对于电子的庫侖作用。

当带电粒子經過电子附近时，它对电子的庫侖作用力 $\mathbf{F}$ 要改变方向。由于在 A 的左方（图 1.1）每一个点上 $\mathbf{F}$ 的平行于带电粒子运动方向的分力 $F_{\parallel}$ 所产生的向前的冲量和它在 A 的右方相应的点上所产生的向后的冲量相抵銷，所以冲量 $\int F_{\parallel} dt$ 是零。因此，我們只需考虑 $\mathbf{F}$ 的垂直于运动方向的分力 $F_{\perp}$ 所产生的冲量。

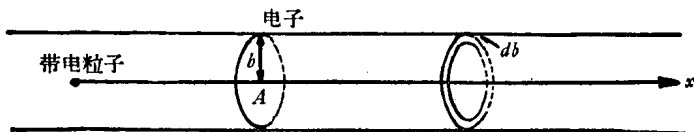


图 1.1 带电粒子与电子的庫侖作用

設想一个以带电粒子运动方向为軸綫、半徑为 b 的圓柱面，上面所談到的电子就处在这个面上。假設 $\mathbf{E}$ 是带电粒子所产生的靜电場强度，根据高斯定理，

$$\int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp} 2\pi b dx = 4\pi Ze. \quad (1.1)$$

这里 $E_{\perp}$ 是靜电場强度垂直于带电粒子运动方向的分量。从方程 (1.1) 可以得到

$$\int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp} dx = \frac{2Ze}{b}. \quad (1.2)$$

要知道在电子所在的地点上 $E_{\perp}$ 随时间的变化，可以设想把带电粒子固定，而观察电子在圆柱面上以速度 v 运动的一个点上 $E_{\perp}$ 的变化。我們可以有

$$\int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp}(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp}(x) \frac{dx}{v} = \frac{1}{v} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp}(x) dx = \frac{2Ze}{vb}. \quad (1.3)$$

电子所受到的垂直于带电粒子运动方向的冲量是

$$I_{\perp} = \int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp} e dt = \frac{2Ze^2}{vb} = p,$$

这里 p 是电子所得到的动量，一个电子所得到的能量是

$$\frac{p^2}{2m} = \frac{2Z^2e^4}{mv^2b^2}. \quad (1.4)$$

在离带电粒子运动方向距离为 b 和 $b+db$ 之間单位长度內的碰撞数等于半径为 b 和 $b+db$ (图 1.1) 的两个圆柱面所夹的层內每单位长度所包含的电子数，如果单位体积內的电子数是 n ，这个数就是 $2\pi n b db$ 。在每单位长度內交給这些电子的能量是

$$\frac{4\pi Z^2e^4n}{mv^2} \frac{db}{b}. \quad (1.5)$$

从 $b_{\text{最小}}$ 到 $b_{\text{最大}}$ 的范围內总的能量損失可以把 (1.5) 积分而得到：

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z^2e^4n}{mv^2} \ln \frac{b_{\text{最大}}}{b_{\text{最小}}}. \quad (1.6)$$

現在我們需要把 $b_{\text{最大}}$ 和 $b_{\text{最小}}$ 确定下来。

$b_{\text{最大}}$ 的确定 作用于电子的力是以脉冲形式出現的。不考虑相对論性的改正时，脉冲所占时间是 $t=b/v$ 。如果 $1/t$ 比电子在原子中的振动頻率 ν 要小得多，这时电子便不会吸收能量，或是說，电子跃迁到較高能級的几率很小。

当带电粒子的速度相当大时，我們必須考虑到相对論性的改正。由于这个改正，脉冲的寬度要减小， t 改正为 $(b/v)\sqrt{1-\beta^2}$ (这里 $\beta=v/c$ ， c 为光速)。因为带电粒子作用于电子的电場也要同时加以改正， $E_{\perp}$ 要增加一个 $1/\sqrt{1-\beta^2}$ 的因子。脉冲的积分

面积基本上是电场强度和脉冲时间的乘积的函数，所以脉冲的积分大小不变，只是它被削尖了。

我們把在脉冲积分范围内要求 $1/\nu > t \approx \left(\frac{b}{v}\right)\sqrt{1-\beta^2}$ 作为确定 $b_{\text{最大}}$ 的条件，或是說

$$b_{\text{最大}} = \frac{v}{\nu\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (1.7)$$

这里 $\bar{\nu}$ 是电子在物质中的振动频率的平均值。

$b_{\text{最小}}$ 的确定 从經典力学的观点看来，带电粒子与电子作对心碰撞时，电子所能得到的能量最大。那时电子所获得的速度是 $2v$ ，所以它得到的动能是 $\frac{1}{2} m (2v)^2$ 。这样看来，每次碰撞中的能量的轉移不能超过 $2mv^2$ 。另一方面，根据(1.4)，每次碰撞中电子所得到的能量是 $\frac{2Z^2e^4}{mv^2b^2}$ 。所以 $b_{\text{最小}}$ 应由方程

$$\frac{2Z^2e^4}{mv^2b_{\text{最小}}^2} = 2mv^2 \quad (1.8)$$

来决定，也就是說，

$$b_{\text{最小}} = \frac{Ze^2}{mv^2}. \quad (1.9)$$

假設 λ 是从入射粒子的观点看来电子的德布罗意波长。如果入射粒子的庫侖場在 λ 这一段距离内变化相当大，我們就需用量子力学的方法来考虑这个問題。在随着入射粒子一起运动的坐标系内（对于重的入射粒子而言，这几乎就是质量中心系統），假如电子的軌道运动速度比 v 小得很多，电子的速度就大約等于 v ，它的动量是 $mv/\sqrt{1-\beta^2}$ 。所以

$$\lambda = \frac{\hbar\sqrt{1-\beta^2}}{mv}. \quad (1.10)$$

只有 $b > \lambda$ 的情形才有意义。所以，从量子力学的角度来看，

$$b_{\text{最小}} \approx \frac{\hbar\sqrt{1-\beta^2}}{mv}. \quad (1.11)$$

我們需要比較(1.9)和(1.11)兩式中所定的 $b_{\text{最小}}$ ，並採用其中較大的一个。對於 $b_{\text{最大}} > b_{\text{最小}}$ 情形的 v 值，(1.11)所定的 $b_{\text{最小}}$ 要大一些。這樣，我們就得到

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z^2 e^4 n}{mv^2} \ln \frac{mv^2}{\hbar\nu(1-\beta^2)}. \quad (1.12)$$

重粒子的电离損失 推导方程(1.12)的方法是相當粗略的。用精確的計算法，我們可以得到重粒子的能量損失的公式為

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{电离}} = \frac{4\pi Z^2 e^4 n}{mv^2} \left(\ln \frac{2mv^2}{\bar{I}(1-\beta^2)} - \beta^2 \right). \quad (1.13)$$

這裡 $\bar{I}$ 是一定物質中電子的平均電離勢能。除了氫或氦等簡單的原子外， $\bar{I}$ 值的理論計算是很複雜的。對於純元素，大致有如下的關係：

$$\bar{I} \approx CZ. \quad (1.14)$$

對於輕元素， $C \approx 11.5$ 電子伏¹⁾；對於重元素， $C \approx 8.8$ 電子伏。對於鋁， $\bar{I}$ 的實驗值已有過多次的測定，它的數值大約是 160 電子伏。

電子的電離損失 公式(1.13)不能用於入射粒子為電子的情形，因為在推导這個公式時假定入射粒子在與物質中電子作用後不偏轉。事實上，在每次碰撞時，入射粒子都受到橫向的反沖，反沖的數值大致和物質中電子所得到的動量相等。如果入射粒子是電子，就不應該忽略由於這個反沖而引起的橫向速度。其次，如果電子與電子相互作用，那麼，相同粒子間的交換現象也必須考慮進去。經過這些改正後，電子的電離損失公式應該是

$$\begin{aligned} \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{电离}} = & \frac{2\pi e^4 n}{mv^2} \left[\ln \frac{mv^2 T}{2\bar{I}^2(1-\beta^2)} - \right. \\ & \left. - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 \right], \quad (1.15) \end{aligned}$$

1) 電子伏是原子核物理中常用的一種能量單位，它等於一個帶單位電荷 e 的粒子通過電勢差為 1 伏的電場時所獲得的能量。1 電子伏 $= 1.60210 \times 10^{-12}$ 爾格。常用的衍生單位還有千電子伏 ($= 10^3$ 電子伏)、兆電子伏 ($= 10^6$ 電子伏) 和千兆電子伏 ($= 10^9$ 電子伏)。

这里 T 是电子的相对论性能。

各种重粒子的电离损失 对于各种不同的入射粒子，除因子 Z^2 外，电离损失只是粒子速度 v 的函数。事实上， $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{电离}}$ 可以写成

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{电离}} = Z^2 f(v). \quad (1.16)$$

如果某一电荷为 $Z_1 e$ ，质量为 M_1 的粒子在一定物质中的电离损失作为能量的函数是已知的，则另一个电荷为 $Z_2 e$ ，质量为 M_2 的粒子在这一物质中的电离损失作为它的能量的函数可用下述方法求得：把原来的能量值乘上因子 M_2/M_1 作为新的能量值，再把原来相应的 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{电离}}$ 值乘上因子 Z_2^2/Z_1^2 作为新的相应数值。

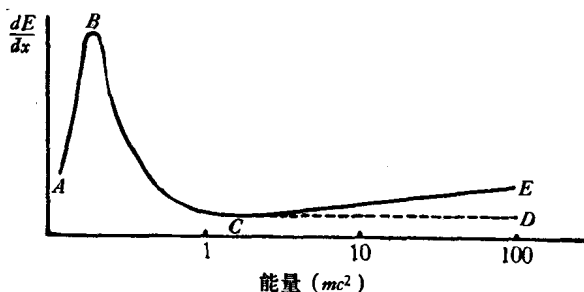


图 1.2 电离损失与能量的关系

方程(1.16)中所表示的 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{电离}}$ 随着 v 或能量的变化可在图 1.2 中看到。曲线的 BCD 部分表示函数 $1/v^2$ 的变化。当能量很大时， v 接近于光速，变化很少。不过，那时 $\ln[v^2/(1-\beta^2)]$ 这一项要改变，所以，当 v 接近于光速时，曲线从 C 到 E 是上升的，这样，就在 C 处形成一个极小值。这就是所谓最小电离损失的地方。这时入射粒子的能量大约是它的静止能量的 3 倍。在 C 附近，对应于每一个 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{电离}}$ 值，有两个能量值，因此，单靠电离