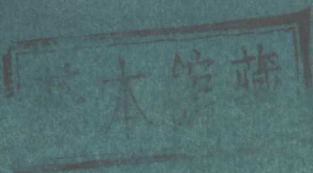


198954



造血与电离放射

人民卫生出版社

31
463

造血与电离放射

A. П. 叶果洛夫 著
B. B. 包契卡廖夫

邢家驊 譯

人民衛生出版社

一九五八年·北京

內 容 提 要

本书詳尽地叙述了射綫(电离放射)对血液系統的作用，包括骨髓、血液等造血器官中各种有形成分的形态、生理和病理的变化；具有鮮明的临床病理特征。

本书共分兩大部分：第一章是电离放射的物理学；第二至第六章論述电离放射对造血的影响。

КРОВЕТВОРЕНИЕ И ИОНИЗИРУЮЩАЯ РАДИАЦИЯ

издание третье

А. П. ЕГОРОВ и В. В. БОЧКАРЕВ

МЕДГИЗ—1955

造 血 与 电 离 放 射

開本：850×1168/32 印張：6 1/4 插頁：4 字數：156千字

邢 家 驪 譯

人 民 衛 生 出 版 社 出 版

(北京書刊出版業營業許可證出字第〇四六號)

• 北京崇文區橫子胡同三十六號 •

人民衛生出版社
長春印刷厂印刷 · 新华书店发行

統一書號：14048·1624

定 價：(9) 1.00 元

1958年9月第1版—第1次印刷

(長春版) 印數：1—1,900

前 言

电离射线具有强的生物学作用。大剂量照射时，它引起所谓的放射病，对人和动物机体有致死的影响。

目前人类已经掌握了获取原子能的方法，因此，应用电离放射于诊断和治疗方面的可能性是显著增大了。

例如，在医学上广泛利用铀射线、镭射线或是代替镭的、以人工获得的放射性同位素的射线作为诊断的方法。在治疗方面，应用外部照射以及将天然或人工放射性物质引入体内的方法。

在技术和工业上已广泛应用各种电离射线来检查产品的质量（探伤器）。因此，遭受电离放射作用的人数不断地在增加。

所以，广大医务界应该了解放射对机体各方面活动的影响。

电离放射，特别是具有强的穿透能力的电离放射，其作用的特点在于损害机体的全部功能，并可能引起很复杂的放射病综合病征。当急性并且严重的损伤时，可以迅速发生各种症状；而在慢性时则症状具有比较隐潜的性质。

远在最早期的关于放射对机体影响的许多研究之中，便已发现血液方面有剧烈的变化。但当时几乎没有发现足够明显的、关于神经系统机能障碍的客观资料。

这种情形使得产生了一些错误的观点，认为神经系统对放射作用具有某种不受损害性或强的抵抗性。实际上，即使目前仍然还有某些学者坚持着这种观点。

祖国的研究家们，特别是在最近阶段，根据巴甫洛夫生理学的主要原则，从实验和临床上清楚地证实了，神经系统在照射后很快便参与病理过程。根据所有的资料，这是机体全部器官和系统的机能障碍中的主导因素。

目前已经不能认为血液系统的损伤是放射病综合病征中的主导因素。但是，血液系统的变化及其在外周血液动态上的反映是机体全身反应的鲜明表现，因此，它们有很大的诊断和预后意义。

已經发表了許多关于放射病綜合病征时血液变化和造血损伤的著作。但是，在文献中有許多不精确和看来矛盾的資料，同时对在造血中樞和外周血液中順序发生的变化也沒有作足够詳細的描述、評定和比較。

写本书的目的就是要将这方面已經公布的研究資料作一个概括。由于血液系統具有各种不同的机能，射綫损伤引起正常造血破坏时所观察到的过程的复杂性，加上文献資料的紛杂，所以說这是一个相当困难的任务。

本书的任务是帮助讀者了解造血的一些基本問題，对象为医生和生物学工作者。

我們认为无須重复叙述血液的正常形态学、发生学的理論、血液的生理学和病理学，因为这些問題在許多著作中均有詳細的說明。

我們的任务中也不包括对电离放射生物学作用机制的各种理論的分析。

我們仅限于叙述和分析由血液新細胞的形成起包括它的发展、轉变为其它类型、成熟、衰老以及最后崩解等形态学变化过程的机制。我們特別注意說明由放射作用引起的造血器官及外周血液內再生和变質以及激活和抑制过程之間的相互关系。

关于放射能的物理特性的主要内容系由 B. B. 包契卡廖夫編写，在該章內包括物理剂量测量和剂量的基本原則、对各种放射能的質和量的估价以及簡短的关于使用放射能时的防护原則。

我們认为，当分析机体对某种刺激作用所起的某种反应的机制时，必須要有科学、客觀的剂量测量和剂量。但是，我們却不得不利用在这方面有缺陷的文献或是完全缺乏这方面材料的文献。这是因为經過准确审查过剂量的文献为数很少。同样，我們也不得不利用对時間因素估計得很不精确的文献，这类文献中沒有說明照射了多少時間及在照射后的什么时候进行了檢查。我們认为，在测量剂量和時間因素方面有缺陷的文献，仍然能够帮助我們来弄清那些至今尚不清楚尚未确定而对于理解在放射的影响下造血过程的变化來說很必要的重要問題，例如在放射的影响下造血

器官和外周血液反应各阶段的发生顺序，其变化的相互制约性和相互依赖性等等。这种血液中樞和外周血液中各系统变化的顺序性和同时性，即使在剂量确定得不很准确的那些文献中，往往也能看得很清楚。

此外，利用这些在剂量方面有缺陷的文献，我們也能比較机体各个系统、細胞发育各个阶段的敏感性，这有巨大的理論和实际意义，特别是在近代的发生学理論方面。

同样，不論剂量如何，仅根据反应的结果和对照照射的最終效应（死亡、复原和其它），便可以确定各种类型反应的预后意义。

我們参考了本国和外国的文献共 2000 篇左右。我們对国外文献中所附的記錄进行了詳細的研究和有批判的分析，因而有时得出了和原作者不一致的結論。例如，仅有少数外国作者发现血色指数增大，但只将它当作是一种存在的事实，而对其意义缺乏分析。許多人則好象沒有注意到而有时甚至完全沒有計算血色指数。

我們曾經多次亲自計算血色指数并且获得了鮮明的关于指数增长的規律性的資料，这是有巨大的原則性意义的。甚至在 1950 年的外国作者的著作中还有类似的錯誤。

某些研究者根据对家兔同一根骨进行多次穿刺所得的结果，作出了关于骨髓反应的結論，但是完全沒有注意到，穿刺本身对骨髓就是强烈的刺激，可以改变对射线作用的反应。粗暴的實驗方法造成了不正确的結論，然而很遺憾，这种錯誤的結論常被无条件地接受。

虽然資料有錯誤以及某些作者对自己的实际材料有估价不足之处，但是仍然可以利用这些資料。因为，对比这些材料可以帮助闡明血液系統对电离放射作用所起的特有的、有規律的反應的发生顺序。

A. 葉果洛夫

目 錄

前 言	1
第一章 什么是电离放射..... (B. B. 包契卡廖夫).....	1
原子的构造和組成部分	1
原子的大小	2
門捷列也夫的元素周期表及电子壳层的构造	2
原子的某些性質	4
化学性質	5
电学性質. 电离	5
原子的放射	6
某些值和單位	8
穿透性电离放射	9
倫琴放射	10
轆致放射	10
标識放射	13
与物質的相互作用. 質的方面	14
倫琴射綫的减弱. 量的方面	15
半价层. 有效波长	16
电离作用	17
放射性	17
放射性射綫	19
人为放射性	21
蛻变常数. 半衰期	26
放射性射綫的某些性質	27
放射性	29
放射的物理剂量	31
射綫源造成的剂量的計算	33
与射綫的量和質有关的生物学作用	35
表面剂量和深部剂量	36
射綫的有害作用和允許剂量	41
对射綫的防护	42

第二章 关于血液对放射能作用的反应的研究历史	46
第三章 血液和造血器官对电离放射作用反应的基本规律	49
白細胞总数	51
血液內各种細胞的变化	55
中性粒細胞的右方推移。分叶过多	60
各种細胞的敏感程度	62
紅細胞。血紅蛋白	63
血色指数	65
网織紅細胞	66
血小板	67
造血器官的反应	70
全身一次强烈照射机体时血液系統反应和损伤的特征	81
孤立照射身体个别区域时血液系統的反应	96
物理和生物化学指标	100
血液凝固性	103
病理性細胞	105
放射性物質(天然放射性物質和放射性同位素)	107
初步的結論	110
第四章 极小剂量的电离放射长期有节律地对造血系統和造血过程作用的影响	113
发生于放射学工作者和倫琴射綫工作者的严重的造血损伤	114
血液系統损伤的动态	114
倫琴射綫作用引起的貧血和白細胞减少	115
鐳射綫作用引起的貧血	116
放射性物質对貧血发展的影响	118
在电离放射影响下发生的白血病	119
粒細胞缺乏症	121
放射治疗引起的造血损伤	121
腹部照射和血液	122
倫琴射綫工作者和放射学工作者血液疾病的統計	123
造血对小剂量放射作用的早期反应	123
确定血象标准的意义	124
关于血液对放射作用反应的早期指标	126
血小板	128

网織紅細胞	128
散射射綫的影响。防护的意义	130
诊断透視以后血液的变化	131
对健康人的实验性照射	131
鐳对血液的影响	132
倫琴射綫和鐳射綫对血液作用的比較	132
人工放射性物質和血液	133
休息的意义	134
血液的物理指标	134
骨髓的形态学变化	135
人体造血的綜合性动态檢查	139
血液檢查的方法和技术的意义	140
小剂量放射对造血影响的实验研究	141
放射性损伤的治疗	146
总的結論	147
第五章 血液系統对电离放射照射机体的反应的机制	151
某些前期反应	152
血液系統的再生亢进和再生低下变化	153
对放射作用的最初形态学反应	155
血液細胞损伤的簡單分类	155
細胞反应的第一阶段	158
細胞反应的第二阶段	159
細胞反应的第三阶段	160
照射时间的意义(時間因素)	160
分叶过多的中性粒細胞的形成机制	162
关于照射时血液系統反应和损伤的神經源性机制	164
放射时的基础代謝和造血	169
身体被照射部分和全身的比例与造血反应的关系	171
造血对电离放射作用反应的某些特征	173
电离放射作用引起的一种特异性造血损伤	176
总的結論	184
第六章 剂量测量和剂量的意义	185
第七章 总结	189

第一章 什麼是電離放射

研究機體對射線作用的反應，很自然，首先要了解作用因素本身的基本特性和善于確定它的性質及測量它的數量。換句話說，對於由射線引起的生物學效应的任何研究、分析和作用結果的對比，以及這些結果的複製等等，均必需要有準確的劑量，亦即要有科學根據的射線劑量測量——以物理單位表示的測量劑量。

因此，在各章之前，應該先作一個簡短的概論，使不從事物理學或放射學工作的讀者們能夠從中得到一些有關電離放射的物理性質及測量原則的基本知識。

本書內敘述的各種研究主要涉及倫琴射線及鐳射線對機體的作用，因此，我們也着重向讀者說明這一類的電離放射的物理性質、作用及劑量測量。

原子的構造和組成部分

所有元素的原子，由最輕的元素氫到最重的元素鈾，構造皆相同，皆含有相同的組成部分。

原子的全部質量幾乎都集中在它的中央部分；與原子本身的大小相比較，此中央部分的體積很小，帶有正的電荷。原子的這個重而帶有正電荷的部分叫做原子核。

距離原子核很遠的地方有電子圍繞着核旋轉。電子是質量極小的粒子，帶有等於 $4.8 \cdot 10^{-10}$ 靜電單位的負電荷^①。

任何原子的核均都由兩種基本粒子——質子(p)和中子(n)所組成。這兩種粒子總稱為“核子”，即核粒子。

質子和中子具有大約相同的質量 ($1.66 \cdot 10^{-24}$ 克)，為電子質量的1840倍，同時，中子由它的名稱可知，是中性的粒子，不帶有電荷，而質子帶有正的電荷，其大小與電子的電荷相等，但符號相反。

^① 自然界所有電荷中最小的電荷，可稱做電的“原子”，因為任何其他的電荷與電子的電荷相等或者是它的倍數。

因此,核的正电荷取决于其中质子的数目。

同时,在核的周围旋转而组成原子的电子壳层的电子数目则取决于核的正电荷的大小。既然整个原子是中性的,那么核的正电荷的总量应与全部电子壳层上负电荷相等,因此,核内有多少个质子,该原子也就有多少个电子。

原子的大小

谈一下关于原子及其内粒子的大小的概念,对于补充上述关于原子的结构,是有益处的。

最简单的原子是氢原子,它的核由一个质子组成,核的外围有一个电子旋转。质子和电子的大小约为 10^{-13} 厘米,而整个氢原子的大小约为 10^{-8} 厘米^①。

为了更清楚地说明原子的大小,我们假设将氢原子的核放大成别针头大小,那么(假设原子的粗糙模型与太阳系有一定的相似),电子呈微粒状,围绕别针头,在直径为一百公尺的轨道上旋转。应当指出,要想获得这样的模型,需要将原子的大小放大1,000,000,000,000倍。还可以将原子和红细胞的大小进行比较:红细胞的直径约为原子的100,000倍,这说明原子是多么微小。同样还应当指出,从原子核的质量和大小的比较来看,原子核是一种密度极大的物质,约为 10^{14} 克/立方厘米。

門捷列也夫的元素周期表及电子壳层的构造

这样,任何原子都是由重的带正电荷的核及围绕它的由旋转电子形成的电子壳层所组成的;一个元素的原子和另一元素的原子区别仅在于核的电荷和核外围的相应电子数目的不同。

在各种原子内,电子是如何排列,如何形成它们的电子壳层的?电子壳层的构造又有何特点?

我们试用門捷列也夫的元素周期系来回答这些问题。在門捷列也夫的元素周期表(图1)内,元素系按原子核电荷的增长顺序排列,因此,表内元素的排列号数是和核的电荷或它的原子序数 Z

^① 10^{-8} 厘米或0.00000001厘米叫做埃,以符号 $\text{\AA}$ 表示。

相一致的(原子序数决定于核内质子的数目)。

所以,元素在門捷列也夫周期表内的位置就决定了该元素原子内的电子数目。

例如,在表内第1位上的是氢(H),它的核带有等于一个单位的电荷,它有一个电子;在第2位上的是氦(He),它的核有两个电荷,因而有两个电子;在第10位上的是氖(Ne),它有10个电子;諸如类推。最后,在第92位上的是铀(U),它有92个电子圍繞着由92个质子和146个中子组成的重核。在铀以后排列的是超铀元素^①。

同时,电子充填壳层的顺序受一定规律的支配。

电子在原子内运动,因此,它应该具有一定的能量。不过它在原子内不是具有任何大小的能量,而只能具有严格的、一定大小的能量或能阶,并且在每一个能阶上不能有多于一个的电子。

因此,如果我们愿意的话,可以从表内第一个元素起到构造比较复杂的元素,依次地分析原子的电子壳层的构造,那么可以发现,随着元素的原子序数的增长,新的电子逐渐充填更高的能阶(略言之,即电子和原子核的距离愈来愈远)。同时,某些电子(按2个、8个等数目)因为能阶相近,组合在一起而成为一定的电子组,因此同组内的电子与核的距离大致相同;但前后两组的电子在能阶上有显著的差别,因此后一组的电子与核的距离较远。

每一个电子组就形成一个所谓的电子壳层,而根据其到核的距离,一般以字母K、L、M、N、O、P和Q来表示。

据此,在門捷列也夫的周期表内,元素分布在8个列和7个行(周期)内,行(周期)的序号表示该原子电子壳层的数目,列的序号表示价电子亦即(除了某些例外以外)离核最远的外层内电子的数目。

例如,氢($Z=1$)有1个电子,排列在离核最近的K层。而后是氦($Z=2$),它有2个电子,均充填在K层上。锂($Z=3$)有3个电

^① 数年前人工获得了一些放射性元素,在周期表上位于铀的后面,叫做超铀元素。它们的原子序数分别为93、94、95、96、97和98,它们的相应名称为镎(Np)、钷(Pu)、镅(Am)、锔(Cm)、锫(Bk)、锎(Cf)。

子,其中两个位于K层,一个位于外面的L层。一直到在第10位上的氖,也是2个电子排列在K层,其余的8个电子形成L层。由第11个元素钠起,电子开始充填在M层上,一直至氩的原子,将M层填满为止,等等。这样,随着原子序数的增长,8个电子壳层逐渐均被充填^①,但是,最后一层未充填完毕,于超铀元素处中断。

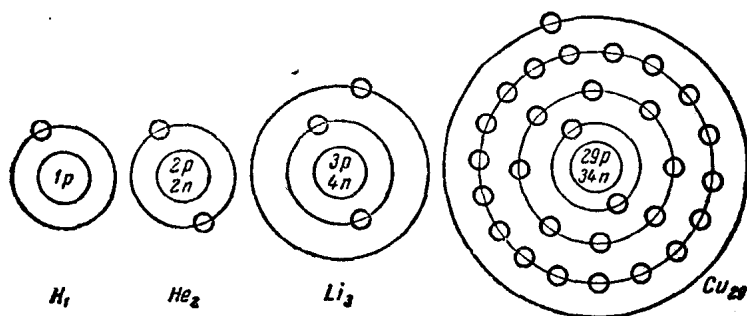


图2 氢(H)、氦(He)、锂(Li)和铜(Cu)的原子结构示意图。

图中表明核内质子和中子的数目,以字母 p 和 n 代表。元素符号右下角的数字表示其核内质子的数目,亦即其壳层上电子的数目。

图2表示某些元素电子壳层构造的示意图。

由上面举的例子可知,位于第一直立列内的元素都有一个外层电子,这符合于它们共同的金属特性。同样地,其它元素的化学性质在每一个横行(周期)内呈周期重复。

原子的某些性质

我们不准非常详细地叙述原子的特性,但想指出,原子的最重要的特性与其核的电荷,亦即原子序数 Z 有最密切的关系。以上我们已经肯定,原子序数完全决定电子壳层的构造——其内电子的数目及排列,因而也就决定了原子的许多最重要的物理化学特性。下面就简述其中的某些特性。

电子距离核愈远,它与核的联系也愈弱,因此,外层电子最容易遭受外来的作用。例如,当两个原子相互靠近时,它们的外层电

^① 某些电子数目多的原子为例外,它们的内层电子尚未充填完毕时,外层即开始充填电子,例如稀土族元素就是这样。

子就最先相互发生作用。外层电子主要决定元素的化学本性及其化学性质，它们还与原子的某些物理性质、特别是光学性质有关，因此，外层电子常称做“价电子”或“光电子”。

化学性质

当最外面的电子壳层上有 8 个电子时，这种电子壳层的构造是完备的，最稳定的。具有完整的、8 个外层电子的原子(气体——氮、氖、氩、氪、氙和氡)，其化学性质是不活泼的，即既不力求获得新的电子，也不放出自己的电子，因此，它们称做惰性气体。

所有其他的原子，通过放出“多余的”电子或结合“不足的”电子，以求形成与惰性气体相同的稳定的电子壳层。例如，氧 O_8 ，在里面的 K 层上有 2 个电子，外面的 L 层上有 6 个电子，它易于与在 K 层上只有 1 个电子的两个氢原子相结合，形成牢固的化合物——水的分子 H_2O 。外层由 7 个电子组成的氟 F_9 ，也易于与一个氢原子结合，形成氟化氢分子(图 3)。

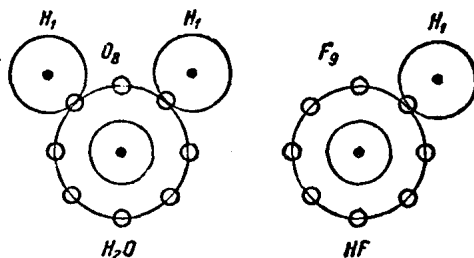


图 3 水(H_2O)和氟化氢(HF)分子结构示意图。

电学性质。电离

如果原子遭到足够强的外来作用(例如，与某种荷电粒子相碰撞，紫外线、X射线等等对原子的作用)，结果可以使得一个或数个电子脱出电子壳层，或全部由原子内被逐出。这种过程叫做原子的电离。这表示原子在带电方面已经不是中性的，而是带有一或更多的电荷，即成为阳离子。

由以前所述可知，下列元素的原子，如锂、钠、镁等最容易放出

自己的外层电子,轉变为阳离子,而外层电子“不足”的原子,如氧、氟、硫等,則相反,能夺取自由电子,而获得多余的負电荷,成为阴离子。

應該指出,丢失或是結合一个或数个电子并不改变化学元素的本性,因为,經過一定時間以后,核的周圍重新出現不足的电子或是失去过剩的电子,从而原子恢复到与以前完全相同的状态。

但是,外层电子数目的改变使原子获得某些新的性質。在阳离子或阴离子附近,总是有其它原子或离子存在;这样,如果一个原子被打出了一个电子因而具有附加(“离子”)价,为要补充失去的电子,它就可以与其他原子或离子形成化合物,这种化合物与該原子在普通状态下和它們形成的化合物有所区别。这种性質在电离放射的原发生物学反应机制中有一定的意义。應該特別強調指出这种情况:即由于电离,原子变成离子而成为电荷的携带者,这一事实本身就决定了对电离放射进行客观的剂量测量的途径和方法。

前面已經講过,在电离放射中,我們主要对X射綫和鐳射綫感到兴趣。但是在逕直介紹它們以前,我們再談一下一种与原子的电子壳层有关的特性——即原子的放射能力。

原子的放射

这样,我們知道,如果有足够强的外力作用于原子,則可以克服电子与核的結合力量,使原子电离。

但是,如果外力作用不够强大,則不足以使电子由原子內脫出,不过它仍然能够将某些附加的能量傳遞給电子,使电子由正常状态轉为“激发”状态(譬如被逐至距核較远的位置上)。

然而,原子的这种激发状态,即当原子具有不为它所特有的、过剩的能量时,不可能保持稳定,經過一定時間以后,原子要恢复正常(稳定)状态。当发生这种轉变时,原子即以一定的光能形式——电磁放射量子的形式,将过剩的、与激发能量相等的能量放出。

当电子由被外界物理因素所引起的激发状态轉变为通常的、

穩定的狀態時，或是當內層電子被外層電子逐出而發生位移時，這種原子的放射也同樣表現為放出各種不同的電磁波，即我們能夠觀察到的可視光綫、紫外綫及所謂的標識倫琴射綫。

這些射綫的發生及物理性質具有完全相同的基礎。它們都是電磁波，它們以單獨的組或量子的形式被放出（和被吸收），在空間根據波的規律（與光相同）以大約在真空中每秒 30 公里的速度傳播。

由此可知，這些射綫僅在波長 λ 和電磁振蕩頻率 ν （即每秒的振蕩數）方面相互區別。原子放出的射綫的頻率，僅取決於當原子內的電子由激發狀態轉變為正常狀態時能量的差別（或是起始和最終能量值的差別）。激發能愈大，或是一般說來，當電子由高能階轉變為較低的能階時，能量的差別愈大，原子放出的射綫的頻率也愈大。

假設當電子由激發狀態轉變為固定狀態時，其能量的變化即放出的能量值等於 $E_1 - E_2$ ，則放出的光綫（或其它電磁放射）的頻率可用下列公式表示：

$$\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$$

此處 h 有固定的大小，叫做普朗克常數，等於 $6.65 \cdot 10^{-27}$ 爾格·秒。

$h \cdot \nu$ 的大小就是由原子放出的光能（電磁振蕩能）部分，稱為光量子或是電磁放射量子。

因此，根據名稱來區分各種電磁射綫是帶有某種條件性而沒有明顯界限的^①。實質上，它們的區分與射綫的量的特性有關，亦即與波長，或等言之，與這種或那種射綫的振蕩頻率有關。

這是量的區別。但是它們同時也使這些射綫在質的特征方面具有許多區別，即這些射綫在物理特性上，首先是它們與物質相互作用的特性和過程上均有所不同。

^① 例如，如果將這些射綫按波長減少的刻度排列，則可發現，短的紫外綫波區域被長的 X 綫波覆蓋。況且，這種或那種名稱僅取決於得到這些波的方法不同而已，在重迭的區域內它們的性質完全相同。同樣，倫琴射綫和 γ -射綫等等光譜的一部分也互相重迭。

因此，下面我們簡短地講一下射綫的量的特性并援引某些值和單位。

某些值和單位

量子的值，或是电磁射綫的能量，如上所述，与放出的射綫的振蕩頻率成正比，即：

$$E = h\nu \text{ 尔格,}$$

同时，这个式中的比例系数是普郎克常数， h 的值以尔格·秒表示，頻率以秒⁻¹ ($\frac{1}{\text{秒}}$) 表示，射綫量子的值以尔格表示。

由这个很重要的式，通过射綫的波长 λ ，可以容易地得到表示該射綫量子的值的公式。因为：

$$c = \lambda\nu \text{ (厘米/秒) 和 } \nu = \frac{c}{\lambda} \text{ (秒}^{-1}\text{),}$$

此处 c —光速，等于 $3 \cdot 10^{10}$ 厘米/秒， λ —波长，以厘米表示，那么，将 ν 代入前面的公式，則得到：

$$E = h \frac{c}{\lambda} \text{ 尔格,}$$

由此可見，射綫量子的值也与射綫的波长成反比。

这些式也决定了射綫能量的放出与傳播之間的关系。

但是，用波长(厘米)和能量(尔格)的絕對單位在实用上不方便，因为这两个单位对我们所需的数值来讲，是太大了。

实际上，例如，对于眼睛最敏感的可視光綫光譜的黃綠色部分的波长等于百万分之 55 厘米 ($\frac{55}{1000000} = 55 \cdot 10^{-6}$)，至于紫外綫的波长仅为此数的数分之一，而倫琴射綫的波长仅为此数的数十、数百乃至数千分之一。这样波长的光量子的能量只等于：

$$E = h \frac{c}{\lambda} = 6.55 \cdot 10^{-27} \cdot \frac{3 \cdot 10^{10}}{55 \cdot 10^{-6}} = 3.57 \cdot 10^{-12} \text{ 尔格}$$

因此，上述射綫的波长以埃来測量 ($1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ 厘米)①，而在原子物理学上一般用“电子伏特”(эВ)作为測量能量的單位。

① 波長同样也用毫微米(mμ)表示 ($1 \text{ 毫微米} = 10^{-7}$ 厘米 = 10 埃)，对于更短或“硬”的射綫，还用等于 10^{-11} 厘米的 X 單位来表示。