

第2版



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国高职高专卫生部规划教材
供医学影像技术专业用

放射物理与防护

主 编 王鹏程

副主编 马 彦 刘东华



人民卫生出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

全国高职高专卫生部规划教材

供医学影像技术专业用

放射物理与防护

(第2版)

主 编 王鹏程

副主编 马 彦 刘东华

编 者 (以姓氏笔画为序)

马 彦 (辽宁中医药大学)

王晓艳 (泰山医学院)


王鹏程 (泰山医学院)

吉 强 (天津医科大学)

刘东华 (新乡医学院)

李迅茹 (北京卫生学校)

谢银勋 (黄石理工学院)

 人民卫生出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

放射物理与防护/王鹏程主编. —2版. —北京: 人民卫生出版社, 2009. 5

ISBN 978-7-117-11365-6

I. 放… II. 王… III. ①放射医学: 物理学-高等学校: 技术学校-教材②放射医学-辐射防护-高等学校: 技术学校-教材 IV. R811.1 R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 038580 号

本书本印次封底贴有防伪标, 请注意识别。

放射物理与防护 第 2 版

主 编: 王鹏程

出版发行: 人民卫生出版社(中继线 010-67616688)

地 址: 北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼

邮 编: 100078

网 址: <http://www.pmph.com>

E - mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-67605754 010-65264830

印 刷: 北京人卫印刷厂

经 销: 新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 12.25

字 数: 286 千字

版 次: 2002 年 8 月第 1 版 2009 年 5 月第 2 版第 4 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-11365-6/R·11366

定 价: 20.00 元

版权所有, 侵权必究, 打击盗版举报电话: 010-87613394

(凡属印装质量问题请与本社销售部联系退换)

出版说明

全国高职高专医学影像技术专业卫生部规划教材第一轮于2002年8月出版,共8种。第二轮教材共10种,是在上轮教材使用5年的基础上,经过认真调研、论证,结合高职高专的教学特点进行修订的。

第二轮教材修订的原则,是以专业培养目标为导向,以职业技能培养为根本,力求体现高职高专教育的特色,内容以“必需,够用”为度,特别强调基本技能的培养,力求将相关内容写细、写透,使学生毕业后能独立、正确处理与专业相关的临床常见实际问题。

依据目前高职院校实际开设的课程以及课时数,第二轮教材将原有的《医学影像诊断学》拆分为《医学影像诊断学》、《超声诊断学》、《核医学》;增设了《介入放射学基础》;删减了《医学影像设备管理》,将其内容并入《医学影像设备学》中。为了增强学习效果,《医学影像检查技术》、《超声诊断学》、《介入放射学基础》、《医学影像成像原理》教材配了视听内容丰富的光盘。

第二轮教材的主编和编者是来自全国各地高职高专教学一线的专家学者。在卫生部教材办公室和全国高职高专相关医学类教材评审委员会的组织和指导下,对编写内容的科学性、适用性进行了反复修改,对教材的体例和形式也进行了规范,并列出了学习要求,以便于师生在教学中参考。

教材目录

影像电子学基础(第2版)	主编	朱小芳
	副主编	郭树怀
* 医学影像检查技术(第2版,配盘)	主编	袁聿德 陈本佳
	副主编	伍建林 徐建国
医学影像诊断学(第2版)	主审	祁吉
	主编	王兴武
	副主编	夏瑞明 赵汉英 唐陶富
超声诊断学(第1版,配盘)	主审	胡兵
	主编	周进祝
	副主编	谭文
核医学(第1版)	主编	韩建奎 王荣福
	副主编	李思进 刘兴党
介入放射学基础(第1版,配盘)	主编	刘作勤
	副主编	刘筠
放射治疗技术(第2版)	主编	韩俊庆 王力军
	副主编	王平 殷国生
* 放射物理与防护(第2版)	主编	王鹏程
	副主编	马彦 刘东华
医学影像设备学(第2版)	主编	黄祥国
	副主编	樊先茂 张佐成
* 医学影像成像原理(第2版,配盘)	主编	李月卿 李萌
	副主编	杨立辉

* 为普通高等教育“十一五”国家级规划教材

前 言

放射物理与防护是医学影像技术专业的专业基础课之一,其教学任务是为后续专业课程及继续教育奠定必要的知识基础。教材内容涉及放射物理学基础、辐射剂量学基础以及放射防护的基本标准与知识。

放射物理与防护首轮教材由卫生部教材办公室规划,自2002年出版以来已经使用了近7年,期间国内开展医学影像技术职业教育的高职院校大量增加,由于各高职院校在招生生源上的差异,各校在校生基础知识掌握程度相差很大,且各校教学条件也参差不齐,加之首版教材在知识衔接及前后章节排列上存有瑕疵,学生对首版教材部分章节的教学内容学习掌握有一定难度,各校老师对使用首版教材提出了不少中肯的修订意见与建议。

根据医学影像技术发展对放射物理与防护专业基础知识的要求,特别是考虑到高等职业技术教育的特点,我们对首版教材进行了重新修订。较之首版教材,本轮教材在以下方面进行了调整与修订:

1. 为便于学生掌握知识重点,在每章开始都明确了学习目标,在每章结尾对本章知识进行小结,并列出一部分思考题,帮助学生理解、掌握重点知识。
2. 将基础知识的教学与后续专业知识有机融合,使学生在专业基础知识时更有兴趣,同时也能够使专业基础知识与专业知识更好衔接。如第一章中在介绍了原子结构及核结构后,增加一节磁共振医学应用。第二章中增加了核医学中放射性核素生产制备及核医学临床应用两节内容。第五章中增加X线的临床应用一节,通过讲解X线的临床应用使学生理解射线在物质中的衰减规律与X线成像的关系。
3. 考虑当前医学影像技术专业对从业人员职业技能要求的提高,在第七章放射线的测量一章中增加了第四节医用诊断X线检查技术的辐射剂量学评价,重点介绍开展医学影像技术剂量学评价,及所涉及的有关辐射量的概念及其测量方法,引发学生开展医学影像技术临床科研兴趣,为今后开展临床研究做基础铺垫。
4. 将2002年以来国家新近颁布的有关放射防护标准、法规,以及国际相关机构发表的关于医疗照射的辐射防护概念进行了更新。
5. 考虑到放射物理与防护课程是学生入校后所接触的首门与专业相关的基础课程,

为加深其对 X 线了解,增加 X 线特性的验证实验一项。

本教材建议教学 54 学时,理论授课 44 学时,实验教学 10 学时。

本教材在卫生部教材办公室规划基础上,2006 年又被教育部确定为“十一五”国家级规划教材。在修订过程中,我们采纳了很多院校同行对首版教材使用所提意见与建议,但是由于编者水平所限,书中难免尚存缺点与不足,恳请使用本教材的师生及阅读本书的同行提出宝贵意见以便下次修订、完善。

编 者

2009 年 2 月

目 录

第一章 物质的结构	1
第一节 原子结构	1
一、揭示原子结构的实验基础	1
二、玻尔的原子模型	4
三、原子核外的电子结构	7
第二节 原子核结构	9
一、原子核组成	9
二、原子核结合能	9
三、原子核能级	11
四、原子核自旋与核磁矩	11
第三节 磁共振	12
一、核磁矩在静磁场中的进动	12
二、磁共振现象	13
三、核自旋弛豫	15
第四节 磁共振现象的医学应用	16
一、磁共振波谱分析技术	16
二、磁共振成像技术	17
第二章 核转变	19
第一节 放射性核素衰变类型	19
一、 α 衰变	19
二、 β 衰变	20
三、 γ 衰变和内转换	21
第二节 原子核的衰变规律	22
一、衰变规律	22
二、衰变平衡	24
第三节 医用放射性核素的生产与制备	26
一、放射治疗常用放射性核素及其生产	26
二、核医学常用放射性核素及其产生	27

第四节 放射性核素的临床应用	28
一、放射性核素在肿瘤放射治疗中的应用	28
二、放射性核素在核医学检查中的应用	29
第三章 X线的产生	31
第一节 X线的发现	31
第二节 X线的本质与特性	32
一、X线的本质	32
二、X线的基本特性	33
第三节 X线的产生条件及装置	34
一、X线的产生条件	34
二、X线的产生装置	34
第四节 X线的产生原理	35
一、电子与物质的相互作用	35
二、两种X线的产生原理	36
第五节 X线的量与质	42
一、概念及其表示方法	42
二、影响X线量与质的因素	43
第六节 X线的产生效率	45
第七节 X线强度的空间分布	46
一、薄靶周围X线强度的空间分布	46
二、厚靶周围X线强度的空间分布	47
第四章 X(或γ)射线与物质的相互作用	49
第一节 概述	49
一、X线与物质相互作用的几率	49
二、射线的衰减	50
三、能量转移和吸收	52
第二节 X线与物质相互作用的主要过程	53
一、光电效应	53
二、康普顿效应	56
三、电子对效应	59
第三节 X线与物质相互作用的其他过程	60
一、相干散射	60
二、光核作用	60
第四节 各种作用发生的相对几率	61
一、X线引发效应总结	61
二、 Z 和 $h\nu$ 与三种基本作用的关系	61
三、在诊断放射学中各种基本作用发生的相对几率	62

第五章 X(或 γ)射线在物质中的衰减	63
第一节 单能 X 线在物质中的衰减规律	63
一、窄束 X 线在物质中的衰减规律	63
二、宽束 X 线在物质中的衰减规律	65
第二节 连续 X 线在物质中的衰减规律	66
一、连续 X 线在物质中的衰减特点	66
二、影响 X 线衰减的因素	68
三、X 线的滤过	69
第三节 诊断放射学中 X 线的衰减	71
一、人体的构成元素和组织密度	72
二、X 线通过人体的衰减规律	72
第四节 X 线的临床应用	74
一、常规 X 线摄影技术	74
二、数字化 X 线成像技术	74
三、介入放射技术	75
四、计算机断层成像技术	76
五、利用 X 线的肿瘤放射治疗技术	76
第六章 常用的辐射量和单位	78
第一节 描述电离辐射的常用辐射量和单位	78
一、描述辐射场性质的量	79
二、照射量	80
三、比释动能	81
四、吸收剂量	82
五、吸收剂量、比释动能及照射量之间的关系和区别	83
第二节 辐射防护中使用的辐射量和单位	86
一、当量剂量	86
二、有效剂量	87
三、集体当量剂量和集体有效剂量	89
四、待积当量剂量和待积有效剂量	90
第七章 放射线的测量	92
第一节 照射量的测量	92
一、自由空气电离室(标准电离室)	93
二、实用型电离室	94
三、电离电荷测量电流	95
第二节 吸收剂量的测量	95
一、吸收剂量的基本测量法	95
二、电离室测量法	96

三、吸收剂量的其他测量方法	100
第三节 射线质的测定	102
一、400kV 以下 X 线质的测定	102
二、高能 X 线能量的测定	102
三、高能电子束能量的测定	103
第四节 医用诊断 X 线检查技术的辐射剂量学评价	103
第八章 放射治疗剂量学	106
第一节 放射治疗剂量学基本概念	106
一、放射治疗常用的放射源及照射方式	106
二、放射治疗物理学有关的名词	107
三、射线中心轴上百分深度剂量	108
四、射线中心轴上组织空气比	110
五、组织最大剂量比	111
第二节 放射治疗剂量计算实例	112
第三节 近距离放射治疗剂量学	113
一、辐射源	114
二、放射源周围的剂量分布	114
三、腔内治疗剂量学	116
四、组织间治疗剂量学	117
第九章 放射线对人体的影响	118
第一节 放射线的生物学效应	118
一、辐射生物效应分类	119
二、胎儿出生前受照效应	123
三、皮肤效应	123
第二节 影响放射损伤的因素	125
一、与电离辐射有关的因素	125
二、与机体有关的因素	126
三、环境因素	127
第十章 放射防护法规与标准	128
第一节 放射防护法规	128
第二节 放射防护标准	129
一、标准的概念	129
二、放射防护基本标准的制定	129
三、ICRP1990 年建议书内容介绍	130
四、IBSS 限值	132
五、我国放射防护基本标准内容介绍	133

第三节 放射防护标准与法规的贯彻实施	136
一、放射工作单位自主管理	136
二、卫生行政部门监督管理	137
第十一章 放射线的屏蔽防护	139
第一节 外照射防护的基本方法	139
一、时间防护	139
二、距离防护	140
三、屏蔽防护	140
第二节 屏蔽材料	140
一、对屏蔽材料的要求	140
二、常用屏蔽防护材料	140
第三节 射线屏蔽厚度的确定方法	142
一、确定屏蔽厚度的依据	142
二、屏蔽厚度的计算	143
第十二章 医疗照射的辐射防护	150
第一节 医用诊断 X 线的防护	150
一、防护原则	150
二、诊断 X 线机防护性能的要求	151
三、放射防护设施	152
四、医用 X 线诊断防护安全操作要求	153
五、妇女 X 线检查的防护	154
六、儿童 X 线检查的防护	156
第二节 肿瘤放射治疗的放射防护	157
一、医用 X 线治疗机的防护	157
二、医用 γ 照射远距离治疗的防护	158
三、外照射放射治疗中对患者的防护	159
第三节 核医学检查的辐射防护	160
一、临床核医学场所的放射防护要求	160
二、放射性药物操作的放射防护要求	160
三、临床核医学治疗的放射防护要求	161
第四节 放射防护监测	161
一、场所放射防护监测	162
二、个人剂量监测	162
第十三章 医疗照射的辐射防护管理	165
第一节 放射防护管理机构	165
第二节 放射性工作申请许可制度	165

第一章

物质的结构

学习目标

1. 掌握卢瑟福的 α 粒子散射实验的现象及重要意义;玻尔理论的基本假设;原子核结构;
2. 熟悉核外电子结构;
3. 了解核磁矩在外磁场中的进动;磁共振现象及核自旋弛豫;磁共振现象的医学应用。

第一节 原子结构

一、揭示原子结构的实验基础

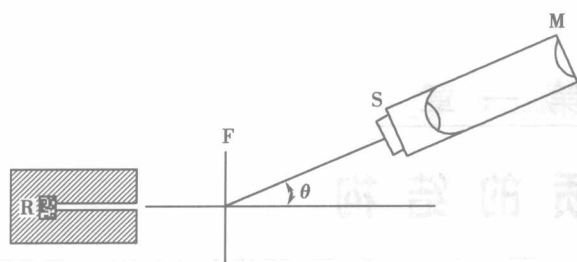
在 20 世纪初,从实验事实已经知道电子是一切原子的组成部分。但物质通常是中性的,足见原子中还有带正电的部分。又从电子荷质比(e/m)的测量知道电子的质量比整个原子的质量要小得多,当时已经知道一个电子的质量差不多是氢原子质量的两千分之一。这些实验结果和当时的经典理论是考虑原子结构模型的基础。

(一) α 粒子的散射实验

α 粒子是放射性物体中发射出来的快速粒子,它具有氦原子一样的质量,是电子质量的 7300 倍,它带两个单位的正电荷。后来证明它就是氦原子核。

汤姆逊在 1904 年提出过一个原子结构模型,为了验证这个模型,卢瑟福等人进行了 α 粒子散射实验,在 1909 年观察到一个重要现象,就是 α 粒子受铂的薄膜散射时,绝大多数只有 $2^\circ \sim 3^\circ$ 的偏转,但有 $1/8000$ 的 α 粒子偏转大于 90° ,其中有接近 180° 的。

α 粒子散射实验所用仪器的布置大致见图 1-1。R 为被一铅块包围的 α 粒子源,发射的 α 粒子经一细的通道后,形成一束射线,打在铂的薄膜 F 上。有一放大镜 M,带着一片荧光屏 S,可以转到不同的方向对散射的 α 粒子进行观察。荧光屏是玻璃片上涂荧光物硫化锌制成的,使用时把有硫化锌的一面向着散射物 F。当被散射的 α 粒子打在荧光屏上,就会发出微弱的闪光。通过放大镜观察闪光就可记下某一时间内在某个 θ 方向散射的 α 粒子数。为了避免 α 粒子与空气分子的碰撞,从 α 粒子源到荧光屏这段路程是在真

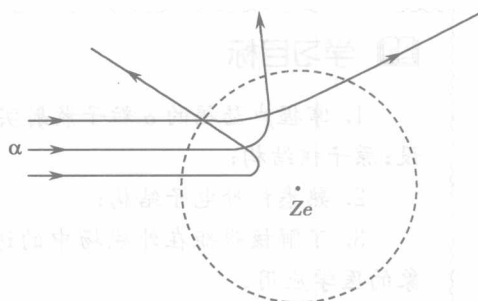
图 1-1 观测 α 粒子散射的仪器装置示意图

不同了,此时正电体很小, α 粒子进了原子区域,但还在正电体之外,整个正电体对它起作用。因此受正电体的作用力为:

$$F = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

式中, e 为电子的电量; Z 为原子序数; ϵ_0 为真空中的介电常数; r 为 α 粒子与正电体的距离。

由于正电体很小,所以 r 可以很小,因而所受的力可以很大,因此就能产生大角散射,见图 1-2。卢瑟福还提出了可以由实验验证的理论。按他的理论,从实验观察到的散射角可以推算正电体的大小为 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ 米,而原子半径是 10^{-10} 米,所以称为原子核(atomic nucleus)。他提出的原子模型因而称为核式模型。

图 1-2 α 粒子在原子核式模型中的散射

(二) 氢原子光谱的实验规律

原子的核式模型建立,只肯定了原子核的存在,但还不知道原子核外边的电子的具体情况,需要进一步研究。在这方面的发展中,光谱的观察提供了很多资料,这些资料是关于原子核外结构知识的重要源泉。

光谱是电磁辐射(不论在可见区或在可见区以外)的波长成分和强度分布的记录;有时只是波长成分的记录。用光谱仪可以把光按波长展开,把不同成分的强度记录下来,或把按波长展开后的光谱摄成相片,后一种光谱仪称为摄谱仪。光谱仪用棱镜或光栅作为分光器,有各种不同的设计。例如图 1-3 是一种棱镜摄谱仪的示意图。光源 I 所发的光经透镜 L_3 会聚在摄谱仪的光缝 S 上,一部分进入摄谱仪,经会聚透镜 L_1 后,成为平行光线,落在三棱镜的一个面上,穿过三棱镜后,不同波长的光线以不同的偏转角射出,经过透镜 L_2 再成为会聚光线。不同波长的光线会聚在相片 P 上的不同点,在 P 上形成一系列的 S 的实像。S 是一条窄缝,所以这些实像是细线。摄成的光谱相片,可以进行测

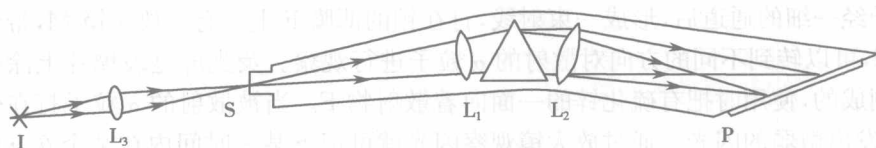


图 1-3 棱镜摄谱仪示意图

量。谱线的位置决定于波长,可以把一个已知波长的光谱和待测的光谱并排地摄在相片上,测出两光谱的谱线的位置,进行比较,从而测定各线的波长。从相片上谱线的浓度也可以定出光谱各成分的强度。

原子光谱是原子发射的电磁辐射(包括红外区,可见光区和紫外区)的强度随着波长的分布。从氢气放电管可以获得氢原子光谱,见图 1-4。人们早就发现氢原子光谱在可见区和近紫外区有好多条谱线,构成一个很有规律的系统。谱线的间隔和强度都向着短波方向递减。

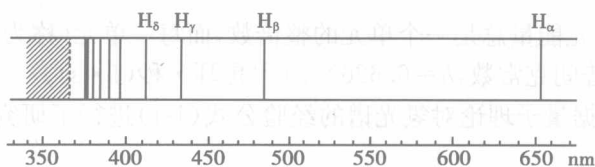


图 1-4 氢原子光谱的巴耳末线系及其系限外的连续光谱

在 1885 年从某些星体的光谱中观察到的氢光谱线已达 14 条。这年巴耳末发现这些谱线的波长可以纳入下列简单的关系中

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

式中,常数 $B = 364.56$ 纳米(nm)。后人称这个公式为巴耳末公式,它所表达的一组谱线称作巴耳末系。

如果令 $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$, $\tilde{\nu}$ 称波数,巴耳末公式可改列如下:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{B} \frac{n^2 - 4}{n^2} = \frac{4}{B} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

或
$$\tilde{\nu} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

式中,常数 $R_H = \frac{4}{B}$, 称里德伯常数。从氢光谱的更精密测量获得

$$R_H = 1.0967758 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

氢原子光谱的其他谱线系,也先后被发现,一个在紫外区,由赖曼发现;还有三个在红外区,分别由帕邢、布喇开、普丰特发现。这些谱线系也可用一个通式表达为:

$$\tilde{\nu} = R_H \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1-1)$$

式中, $k = 1, 2, 3, \dots$; 对每一个 $k, n = k + 1, k + 2, k + 3, \dots$, 构成一个谱线系。

上述各式虽然都是由实验得出的经验公式,但这些公式都准确地描述了原子光谱的规律性,这也说明原子光谱反映了原子内部结构的规律性。所以氢原子光谱的实验规律成了探索原子结构的重要资料,它对于原子结构理论的发展起了很大的作用。

二、玻尔原子模型

自从 1911 年原子的核式结构证明后,人们了解到半径大约为 10^{-10} 米的原子中有一个带正电的核,它的半径是 10^{-15} 米的数量级。但原子是中性的,从而推想原子核之外必定还有带负电的结构,这样就很自然想到有带负电的电子围绕着原子核运动,电子活动区域的半径应该是 10^{-10} 米的数量级。在这样一个原子模型的基础上玻尔在 1913 年发展了氢原子的理论。

(一) 玻尔假设

按照量子理论,光能量总是一个单元的整倍数,而每一单元(称为光子)是 $h\nu$, 这里 ν 是光的频率, h 为普朗克常数, $h=6.626 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒(J·s)。

1913 年玻尔根据量子理论对氢光谱的经验公式(1-1)进行了研究。用 hc 乘以(1-1)式就得到

$$hc\tilde{\nu} = h\nu = \frac{hcR_H}{k^2} - \frac{hcR_H}{n^2} \quad (1-2)$$

上式显出清楚的物理意义。左边是发出光的能量,右边两项也必然是能量,而且应该是原子辐射前后的能量之差。如果原子在辐射前的能量是 E_2 , 经辐射,它的能量变成 E_1 ($E_1 < E_2$), 那么放出的能量:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1-3)$$

如果原子的能量仍采用负值,用上式与(1-2)式比较可以得到这样一个简单的关系:

$$E = -\frac{hcR_H}{n^2} \quad (1-4)$$

n 是整数,上式所代表的原子能量只能具有一系列的一定数值,这些数值是彼此分隔的,不能连续变化。

考虑电子在原子核外做圆周运动的情况。由于氢核的质量是电子质量的 1836 倍,所以在运动过程中,可近似认为原子核不动。电子绕原子核运动的向心力为原子核对电子的库仑引力,即

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} \quad (1-5)$$

式中, m 为电子的质量; v 为电子的速度。由此可得电子的动能:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2r}$$

(1-1)体系的势能:

$$U = K - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$

式中, K 是 $r = \infty$ 时的势能,它的数值可以随意选定。如果把 $r = \infty$ 时的势能定为零。那么

$$U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$