

放射医学国家重点学科资助高校放射医学系列教材，供医学类专业使用

涂 彧 主 编

放射治疗 物理学



原子能出版社

1.1 绪论

第 1 章 绪论



放射医学国家重点学科资助高校放射医学系列教材,供医学类专业使用

放射治疗物理学

涂 或 主编

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

放射治疗物理学/涂彧主编. —北京:原子能出版社,2010.1

ISBN 978-7-5022-4766-9

I. 放… II. 涂… III. 放射医学:物理学 IV. R811.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 243500 号

内 容 简 介

本书基于我国目前医学物理师人才的缺乏和市场的巨大需求出发,编写了《放射治疗物理学》教材。本书共十五章,第一章至第九章详细介绍了放射治疗物理学、临床放射生物学、放射治疗设备、吸收剂量、射线质的测量原理等基础知识和 X(γ)射线、电子束、近距离治疗剂量学知识;第十章至十五章为物理原理在临床实践中的应用,从临床计划设计的基本原理,临床常用放疗方案至调强适形放射治疗、X(γ)射线立体定向放射治疗、图像引导放射治疗等最新技术进展;从放射治疗的质量保证(QA)和质量控制(QC)到辐射防护等。全书充分体现和反映了近十年肿瘤放射物理学中出现的最新思维和最新概念。

本书可以作为医学类放射治疗物理相关专业的本科教材,亦能作为放射治疗物理师、医师、技术员的专业参考书。

放射治疗物理学

总 编 辑 杨树录

责任编辑 肖 萍

责任校对 徐淑慧 冯莲凤

责任印制 丁怀兰 潘玉玲

印 刷 中国文联印刷厂

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 35.5 字 数 886 千字

版 次 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4766-9 定 价 95.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>

E-mail:atomep123@126.com

发行电话:010-68452845

版权所有 侵权必究

《放射治疗物理学》编委会

主 编 涂 彧

副主编 翟振宇 徐志勇 秦颂兵

秘 书 詹 蔚

编著人员 (按姓氏笔画排序)

刘永明	第二军医大学附属长海医院
孙 亮	苏州大学放射医学与公共卫生学院
李 兵	南京军区总医院
邹丽芬	复旦大学附属眼耳鼻喉科医院
周菊英	苏州大学附属第一医院
姚乃国	苏州大学附属第一医院
秦颂兵	苏州大学附属第一医院
徐志勇	复旦大学附属肿瘤医院
涂 彧	苏州大学放射医学与公共卫生学院
龚 卿	瓦里安医疗系统
詹 蔚	苏州大学附属第一医院
翟振宇	江苏省肿瘤医院

序

放射肿瘤学(Radiation Oncology)是肿瘤学的一个重要的分支学科,它包括临床肿瘤学、肿瘤放射物理学、放射生物学和肿瘤放射技术学四大学科基础,而将四大学科基础运用于肿瘤患者治疗的全过程称为肿瘤放射治疗(Radiation Therapy)。肿瘤放射治疗已成为肿瘤治疗的三大主要治疗手段之一,在我国约有65%~70%的肿瘤患者不同程度上(单纯放疗或配合手术、化疗)需要放射治疗。近年来,随着肿瘤放射物理学和肿瘤放射技术学的进展,计算机技术在放疗中的普及使用,以及医学影像技术的飞速进展,肿瘤放射治疗得到了前所未有的发展,出现了以逆向计划设计(Inverse Planning)等优化算法为理论基础的三维调强适形(IMRT)和三维适形(3DCRT)治疗新技术,使肿瘤放射治疗步入“精确定位、精确计划设计、精确照射”的三精治疗时代。由于IMRT和3DCRT技术能从物理上有效地分割肿瘤(靶区)高剂量和周围危及器官低剂量的辐射剂量分布,使肿瘤放射治疗的常规分次照射逐步走向低分次大分割照射(Hypofractionated Irradiation)为特征的立体定向放射治疗(SRT)成为可能;与此同时,照射中图像引导(IGRT)、剂量引导(DGRT)技术的引入,将有效地确保IMRT和3DCRT技术优越性的实现;随着正电子放射断层扫描(PET)等功能影像技术的引入,将进一步发挥IMRT技术提供的“剂量画笔”功能。

为了适应即将进入肿瘤放射治疗事业的本科生的教学需要,苏州大学放射医学与公共卫生学院、苏州大学附属第一医院及华东地区放射治疗同道们集多年来放射治疗教学、临床实践的经验,编写成“放射治疗物理学”。基于我国目前医学物理师人才的缺乏和市场的巨大需求,苏州大学放射医学与公共卫生学院医学物理专业方向的开设,将对缓和我国医学物理人才供求的矛盾、促进我国医学物理学科的发展,具有很重要的现实意义。该书详细论述了放射治疗物

理学基础、辐射剂量及测量、放疗设备、治疗计划设计、调强和三维放疗技术,以及质量保证等内容,编排得当,叙述深入浅出、注重与临床结合。此书不仅可作为放射治疗物理专业方向的本科教材,亦可作为从事肿瘤放射治疗的医学物理师、放疗技师和放射肿瘤医师的专业参考书。

胡逸民

2010年1月22日于北京

前 言

现代肿瘤放射治疗学的发展与肿瘤放射物理学的进展密切相关,近年来随着三维适形放疗、调强放疗、影像引导放疗等技术的迅猛发展和广泛应用,放射治疗物理学在肿瘤放疗中的作用越来越凸显。目前我国高校放射治疗物理师的人才培养还不具规模,参考书籍也不多,适合于本科教学的专业教材还是空白。人才培养的不足,严重影响着现代放疗的开展,还容易引发医疗安全上的潜在危险。为了满足高校放射治疗物理人才培养需要,苏州大学组织了江浙沪地区的在放射治疗物理界有相当影响力的同志们一起编写本教材。

本教材共分十五章,包括放射治疗物理学基础、辐射剂量及测量、放疗设备、治疗计划设计、调强和三维放疗技术、质量保证以及防护等内容,详细论述了肿瘤放射治疗中的各种物理问题,重点放在物理原理应用于临床实践,希望通过对本书的学习能在掌握放射治疗基础理论、基本知识的同时,掌握放射治疗计划设计和放疗方案制订的方法和技巧,能在临床工作中灵活地处理放射治疗中与物理有关的具体问题。本书可以作为医学类放射治疗物理相关专业的本科教材,亦能作为放射治疗物理师、医师、技术员的专业参考书。

本教材在编写过程中各位作者通力合作,得到了中国医学科学院肿瘤医院胡逸民教授的悉心指导,得到了苏州大学以及各参编者单位领导的关心和支持,在此对上述单位和个人表示衷心感谢。在书稿文字校对时苏州大学附属第一医院肿瘤放射治疗科郭建、陈龙等同志出力不少,一并感谢。

由于时间仓促,水平有限,难免坐井观天、挂一漏万,恳请读者批评指正。

编者
2010年1月

目 录

第一章 放射治疗物理学基础	(1)
第一节 原子和原子核性质	(1)
第二节 射线与物质的相互作用	(8)
复习思考题	(32)
参考文献	(32)
第二章 临床放射生物学概论	(34)
第一节 电离辐射对生物体的作用	(34)
第二节 电离辐射的细胞效应	(37)
第三节 电离辐射对肿瘤组织的作用	(47)
第四节 正常组织及器官的放射效应	(50)
第五节 肿瘤放射治疗的基本原则	(55)
第六节 提高肿瘤放射敏感性的措施	(56)
第七节 肿瘤放射治疗中生物剂量等效换算的数学模型	(61)
复习思考题	(66)
参考文献	(66)
第三章 放射治疗设备	(67)
第一节 X 射线治疗机	(67)
第二节 远距离 ⁶⁰ Co 治疗机	(71)
第三节 医用加速器	(81)
第四节 立体定向照射设备	(116)
第五节 远距离控制的近距离治疗机	(121)
第六节 理想放射源条件	(126)

第七节 模拟定位设备·····	(126)
第八节 体位固定装置·····	(146)
第九节 放射治疗局域网络·····	(150)
复习思考题·····	(157)
参考文献·····	(157)
第四章 辐射剂量学的基本概念 ·····	(159)
第一节 辐射剂量学基本定义·····	(159)
第二节 各辐射量之间的关系·····	(162)
第三节 空腔理论·····	(166)
复习思考题·····	(171)
参考文献·····	(171)
第五章 射线的测量 ·····	(172)
第一节 电离室·····	(172)
第二节 热释光剂量计·····	(183)
第三节 胶片剂量计·····	(187)
第四节 半导体剂量仪·····	(189)
第五节 聚合物凝胶立体剂量计·····	(193)
第六节 场效应管·····	(197)
第七节 剂量的标定·····	(200)
复习思考题·····	(224)
参考文献·····	(224)
第六章 光子照射剂量学 ·····	(225)
第一节 原射线与散射线·····	(225)
第二节 平方反比定律·····	(226)
第三节 百分深度剂量·····	(226)
第四节 射野输出因子和模体散射因子·····	(233)
第五节 组织空气比·····	(236)
第六节 组织最大比·····	(241)

第七节 等剂量线·····	(243)
第八节 组织等效材料·····	(248)
第九节 人体曲面修正·····	(252)
第十节 不均匀组织(骨、肺)校正·····	(253)
第十一节 楔形野剂量学·····	(256)
第十二节 不规则野剂量学·····	(261)
第十三节 临床剂量计算·····	(264)
复习思考题·····	(267)
参考文献·····	(268)
第七章 电子线照射剂量学 ·····	(269)
第一节 电子线中心轴深度剂量分布·····	(269)
第二节 电子线剂量学参数·····	(274)
第三节 电子线的一般照射技术·····	(279)
第四节 电子线的特殊照射技术·····	(287)
复习思考题·····	(300)
参考文献·····	(300)
第八章 近距离放射治疗剂量学 ·····	(301)
第一节 近距离放疗概述·····	(301)
第二节 近距离放疗的剂量计算·····	(309)
第三节 近距离放疗的临床应用和剂量体系·····	(322)
第四节 后装治疗的临床应用·····	(328)
复习思考题·····	(331)
参考文献·····	(331)
第九章 中子近距离照射剂量学 ·····	(333)
第一节 铀中子与钷中子相对生物学效应·····	(333)
第二节 铀中子治疗技术·····	(340)
第三节 铀中子治疗的剂量分布·····	(343)
第四节 中子的防护·····	(347)

复习思考题·····	(350)
参考文献·····	(350)
第十章 临床常用放疗方案 ·····	(352)
第一节 放疗临床对剂量学的要求·····	(352)
第二节 照射技术和射野设计原理·····	(353)
第三节 临床常见肿瘤放射治疗方案·····	(370)
复习思考题·····	(386)
参考文献·····	(387)
第十一章 治疗计划系统和治疗计划评估 ·····	(388)
第一节 治疗计划系统概念和历史简介·····	(388)
第二节 外照射靶区剂量学规定·····	(392)
第三节 TPS 中的图像和图像处理技术·····	(399)
第四节 治疗计划设计过程·····	(408)
第五节 近距离放射治疗剂量算法·····	(417)
第六节 外照射剂量计算算法·····	(427)
第七节 治疗计划系统的设计和体系结构·····	(437)
第八节 治疗计划系统的验收·····	(443)
第九节 治疗计划系统的质量保证·····	(448)
复习思考题·····	(449)
参考文献·····	(449)
第十二章 三维适形放射治疗及调强放射治疗 ·····	(451)
第一节 三维适形放疗的发展过程·····	(451)
第二节 3DCRT 工作流程、计划工具·····	(452)
第三节 立体定向放射外科和立体定向放射治疗·····	(461)
第四节 调强放射治疗·····	(464)
第五节 调强放射治疗的临床应用举例·····	(483)
复习思考题·····	(492)
参考文献·····	(492)

第十三章 放射治疗的质量保证和质量控制	(493)
第一节 QA 和 QC 的目的及重要性	(493)
第二节 放射治疗对剂量准确度的要求	(494)
第三节 外照射治疗物理质量保证内容	(498)
第四节 治疗计划系统的 QA 和 QC	(506)
第五节 近距离治疗 QA 内容	(517)
第六节 QA、QC 的管理要求	(518)
复习思考题	(519)
参考文献	(520)
第十四章 发展中的图像引导放射治疗	(521)
第一节 图像引导放射治疗	(521)
第二节 剂量引导放疗和循变放疗	(529)
复习思考题	(532)
参考文献	(533)
第十五章 放射防护	(534)
第一节 电离辐射的生物效应	(534)
第二节 放射防护目的与标准	(539)
第三节 外照射防护基本措施	(542)
第四节 医用电离辐射防护	(544)
复习思考题	(555)
参考文献	(555)

第一章 放射治疗物理学基础

放射治疗已有一百多年的历史,它是利用电离辐射线治疗恶性肿瘤的一种方法,随着科学技术发展而呈加速发展状态,目前已成为癌症治疗中的最重要手段之一。我国约有70%以上、美国有50%以上的癌症需用放射治疗。放射治疗几乎可用于所有的癌症治疗,对许多癌症病人而言,放射治疗是唯一必须用的治疗方法。

放射治疗技术的诞生和进步与物理学尤其是核物理的发展密切相关,因此,有关核物理的一些基础知识,例如原子结构、能级、射线与物质的相互作用以及放射性同位素的性质等对于放疗工作的开展和相关研究必不可少。

第一节 原子和原子核性质

原子是构成物体的微小单位,其大小是 10^{-10} m数量级。卢瑟福(E Rutherford)1911年用 α 粒子束轰击金属薄膜,发现存在大角度 α 粒子散射。通过对实验结果的理论分析,确定原子中存在一个带正电的核心,此即原子核(nucleus)。原子核的尺寸在 10^{-15} cm的数量级,仅是原子大小的万分之一,质量却占整个原子质量的99.9%以上。由于原子整体上呈中性,因此原子核的电量必定与核外的电子总电量相等,符号相反。

原子核由中子(neutron)和质子(proton)组成,质子和中子统称为核子(nucleon)。不同的原子核所含的核子数目不同,核子数也称为原子核的质量数 A (mass number),等于原子序数 Z (atomic number,即原子核的质子数)与原子核中子数 N 之和。中子不带电,质子电荷量与电子电荷量相等,都为—个电荷单位 e ,不同的是质子带正电荷,而电子带负电荷。—个原子核的总电荷为 Ze 。

—个原子的基本特征可以用符号 ${}_Z^AX$ 表示,其中 X 是元素符号, Z 是原子序数, A 是原子的质量数,也是原子核内的核子数。

—、—些基本概念

核素(nuclide):任何特定中子数与质子数,及特定的能态(—般为基态)的原子核。

放射性核素(radionuclide):指那些不稳定的、能够自发地发射粒子(射线)或自发裂变的核素。核素示意图如图1-1所示。

同位素(isotopes):质子数 Z 相同,中子数 N 不同的核素互为同位素。如氧的三种天然同位素 ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O ,其天然含量的百分比即同位素的丰度分别为 $\rho=99.756\%$ 、 0.039% 、 0.205% 。

同质异能素(isomer):中子数与质子数都相同,但能态不同的核素,如 ^{99}Tc 与 $^{99}\text{Tc}^m$ 。所谓能态是指自旋与能级。原子核受激发可以处在基态之上的不同的激发态,而激发态则

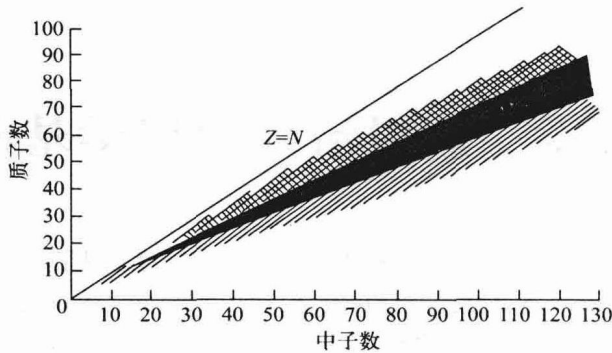


图 1-1 核素示意图

称为同质异能态,其寿命处在皮秒(10^{-12} s)与年之间。长寿命的同质异能态习惯称为亚稳态(metastable states),并以 m 标记,如 $^{99}\text{Tc}^m$ 与 $^{87}\text{Sr}^m$ 。 $^{87}\text{Sr}^m$ 的半衰期为 2.81 h,它为 ^{87}Sr 的同质异能素。同质异能素广泛应用于医学影像诊断。

人类已经发现近 3 000 多种核素,天然的有 300 多个,其余 2 600 多个核素都是人工合成的放射性核素。天然核素中稳定核素占 270 多个,放射性核素 30 多个。近十年中国科学院近代物理研究所等研究所共合成出 10 余个新核素。至 2003 年底,人类共发现天然的与人工合成的元素为 118 种,一般来说,发现或合成新元素的难度与科学意义都远高于新核素。

二、原子核的大小和质量

原子核的形状基本上为球形或近球形,通常用核半径来表示原子核的大小。原子核的半径在 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ cm 数量级之间,常以费米(fm)度量, $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ 。

由 α 粒子散射实验发现,在粒子能量足够高的情况下,它与原子核的作用不仅有库仑排斥作用,当距离接近时还有很强的吸引力——核力。核子之间存在一种不同于电磁作用和万有引力的一种强相互作用,即核力。核力的特点是:短程力、饱和性、吸引力(排斥力)与强相互作用。原子核的核力作用半径称为核半径。大多数稳定核的中子数多于质子数,因此核半径实际上是中子分布半径。实验表明,核半径与质量数 A 之间的关系可由经验公式表示:

$$R = r_0 A^{1/3} = (1.40 \pm 0.10) A^{1/3} \text{ fm} \quad (1-1)$$

式中, r_0 为参数。平常也会用到电荷分布半径。原子核内电荷分布半径实质上是质子分布半径。实验总结出电荷分布半径与质量数 A 之间的关系为:

$$R = r_0 A^{1/3} = (1.20 \pm 0.30) A^{1/3} \text{ fm} \quad (1-2)$$

核半径正比于 $A^{1/3}$,因此原子核的体积近似地与 A 成正比,即每个核子所占据的体积近似为一常量,由此推算出原子核的数密度为 $10^{38}/\text{cm}^3$,而密度为 $1.66 \times 10^{14} \text{ g}/\text{cm}^3$ 。每立方厘米的核物质重达亿吨,其密度之大由此可见一斑。

原子核的质量也无法直接测量,通常都是通过测定原子质量来推知原子核的质量。原子的质量很微小,通常不以克(g)或千克(kg)做单位,而是采用原子质量单位(amu, atomic

mass unit), 并记作 u 。一个原子质量单位定义为一个 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 。原子质量单位 (atomic mass unit) 与国际制单位 g 的关系为:

$$1 u = \frac{12}{N_A} \frac{1}{12} = \frac{1}{6.022142 \times 10^{23}} g = 1.6605387 \times 10^{-24} g \quad (1-3)$$

式中, N_A 为阿伏伽德罗常数。核物理中通常用电子伏特 (eV) 作为能量单位。1 eV 是一个电子在真空中通过 1 V 电位差所获得的动能。1 eV = $1.60217646 \times 10^{-19}$ J。千电子伏特 (keV)、兆电子伏特 (MeV) 和吉电子伏特 (GeV) 等也是常用的能量单位。这样 $1 u = 931.494013 \text{ MeV}/c^2$ 。另外, 简便起见也常用能量单位表示质量, 如 $1 u = 931.494013 \text{ MeV}$ 。这样, 中子与质子的质量分别为 939.565330 MeV 和 938.271998 MeV , 中子的质量略大于质子的质量。电子的质量 0.510998902 MeV , 约为中子或质子质量的 $1/1800$ 。

三、原子核结合能

原子核的质量并不等于所有的中子质量与质子质量之和, 总是小于组成它的核子的质量之和。如 ^4He 核的质量比组成它的两个质子和中子质量之和要小。这是由于核力作用的结果。当若干自由质子和中子形成一个原子核时, 由于核力的相互作用将释放一部分能量, 这一能量称作结合能 (binding energy)。一般以小写字母 m 表示原子核的质量, 大写字母 M 表示原子质量, B 表示原子核的结合能。原子核质量与结合能之间的关系为:

$$m = Zm_p + Nm_n - B/c^2 \quad (1-4)$$

考虑到原子的结合能远远小于原子核的结合能, 可以忽略不计。原子质量则表示为:

$$M = Nm_n + Zm_p + Zm_e - B/c^2 \quad (1-5)$$

原子核的质量总是小于组成它的所有核子的质量之和。组成原子核 X 的 Z 个质子与 N 个中子的质量之和与该原子核质量之差称为该原子核的质量亏损 (atomic defect):

$$\Delta m(^A_Z X) = Zm_p + Nm_n - m(^A_Z X) \quad (1-6)$$

式中, $m(^A_Z X)$ 为质量数为 A 、原子序数为 Z 的核的质量, 也可记为 $m(Z, A)$, X 代表元素的化学符号。通常以 $M(Z, A)$ 或 $M(^A_Z X)$ 表示核素 $^A_Z X$ 的原子质量。原子的质量为:

$$M(Z, A) = m(Z, A) + Zm_e - B_e(Z)/c^2 \quad (1-7)$$

式中, $B_e(Z)$ 是 Z 号元素的电子结合能, 与核的质量相比是一个小量。在计算质量亏损时, 可用原子质量 $M(^A_Z X)$ 代替核质量。

^4He 核即 α 粒子质量比组成它的 2 个中子和 2 个质子的质量总和要少 28.30 MeV , 意味着两个质子和两个中子形成一个氦核时要释放出 28.30 MeV 的能量。反过来, 若将 ^4He 核拆成自由的核子, 为了克服核子之间的相互作用就必须至少用 28.30 MeV 的能量对体系做功 (表 1-1)。

表 1-1 部分核素的质量亏损和原子质量

核素	A	$\Delta m(^A_Z X)/\text{MeV}$	$M(^A_Z X)/u$
n	1	8.071	1.008665
^1H	1	7.289	1.007825
^2H	2	13.136	2.01402

续表

核素	A	$\Delta m(^A_Z X)/\text{MeV}$	$M(^A_Z X)/u$
^3H	3	14.950	3.016 049
^4He	4	28.30	4.002 603
^6Li	6	14.087	6.015 123
^{14}N	14	2.863	14.003 074
^{56}Fe	56	-60.604	55.934 940
^{208}Pb	208	-21.759	207.976 641

原子核的结合能与质量亏损之间的关系为：

$$B(Z, A) = \Delta M(Z, A)c^2 \quad (1-8)$$

此即爱因斯坦质能关系。质能关系揭示了质量与能量是统一的，能够相互转换。质能关系奠定了人类利用核能的科学基础，核武器、核电站，还有其他形式的核能利用由此应运而生。

原子核的平均结合能反映出原子核结合的紧密程度。比结合能定义为原子核每个核子的平均结合能，即：

$$\epsilon(^A_Z X) = B(^A_Z X)/A \quad (1-9)$$

比结合能 ϵ 的单位是 MeV/Nu, Nu 代表核子。比结合能也可以理解为原子核拆散成自由核子时，外界需要对每个核子所做的最小的平均功。比结合能小说明核子之间结合较疏松，原子核稳定性差；大则核子之间结合较紧密，原子核稳定性高。比结合能随质量数的变化见图 1-2。

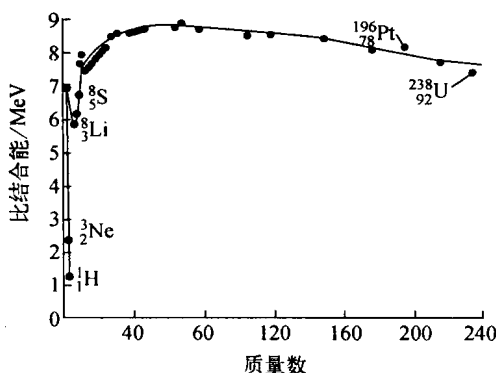


图 1-2 比结合能随质量数的变化

从比结合能曲线发现，随着质量数变化，结合能曲线两头低中间高，中等质量的核素的平均结合能比轻核与重核都大。比结合能曲线在开始时有起伏，质量数 A 在 30 以后比结合能曲线光滑， A 在 50~150 范围的中等质量核的比结合能较大（约 8 MeV），原子核结合比较紧密。很轻的核与很重的核 ($A > 200$) 结合得比较疏松。

当结合能小的核通过核反应变成结合能大的核时，即当结合得比较疏松的核变到结合