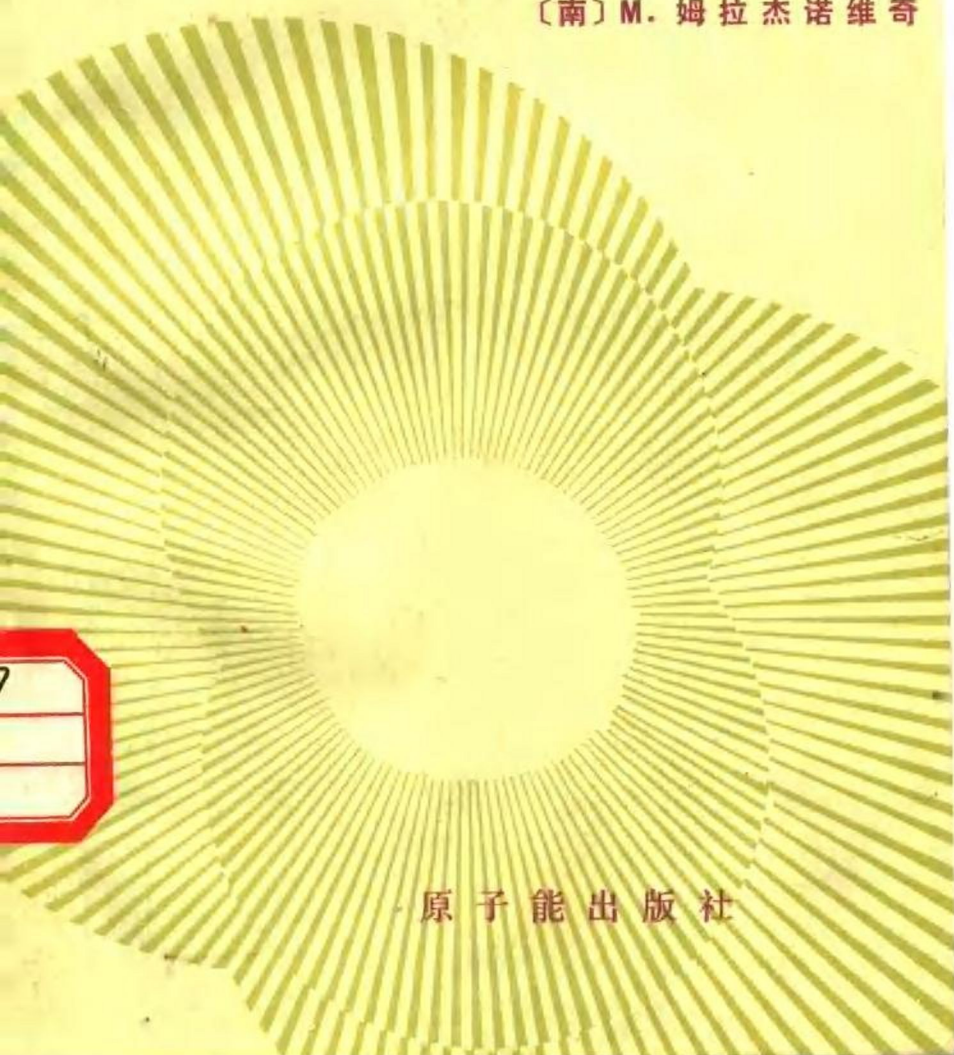


放射性同位素和 辐射物理学导论

〔南〕M. 姆拉杰诺维奇



原子能出版社

放射性同位素和 辐射物理学导论

〔南〕 M. 姆拉杰诺维奇 著

王选廷 刘书田 徐 新 译

张光明 校

原子能出版社

内 容 简 介

本书是以作者多年讲授放射性同位素应用的讲义为基础写成的。首先叙述了物质、放射性和带电粒子的本质,随后较详细地讨论了 α 、 β 、 γ 辐射的穿透问题,如阻止本领、射程、韧致辐射、反散射、光电效应、康普顿效应、电子对的产生等,同时简要讨论了有关放射性测量和剂量分布的问题。

本书简明实用,具有基础工具书的特色。可供在工业、农业、医学、生物、环境等领域中工作的使用放射性同位素的技术人员作为基础参考书,也可供核物理、放射化学、辐射防护、放射生物学等专业的师生参考。

M. MLADJENOVIC
RADIOISOTOPE AND RADIATION PHYSICS
AN INTRODUCTION
ACADEMIC PRESS, INC., 1973

放射性同位素和辐射物理学导论

〔南〕M. 姆拉杰诺维奇 著
王选廷 刘书田 徐 新 译
张光明 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

89920部队印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 8.5 · 字数 190 千字
1986年6月北京第一版·1986年6月北京第一次印刷
印数1—2000 · 统一书号: 15175 · 625
定价: 1.75元

译者的话

近年来，随着核技术和辐射源在工业、农业、医学、生物、环境等领域的广泛应用，使用放射性同位素的工作者迫切需要一本综合性的基础参考书。它应该充分反映核物理和保健物理分支学科中有关辐射性质的最重要的基础内容，但同时又区别于一般性的核物理导论和保健物理基础教材。我们觉得“Radioisotope and Radiation Physics—An Introduction”一书较为适合目前这方面的需要，因此我们翻译了这本书，以期对有关专业的技术人员在了解和掌握辐射与物质相互作用的基本特性上有所裨益。

本书内容简明扼要，叙述深入浅出、通俗易懂，实用性、综合性较强。书中叙述重视建立物理图象，避免了繁琐的数学推导。书末附有各章小结及主要公式，因此，本书兼有教材和基础工具书的特色。原书曾被译成英文和日文出版，本书是根据1973年英文版翻译的。

原书中一些公式、图注方面的错误，以及一些明显的印刷错误，我们在翻译中都参照有关文献资料作了校正。书中若干有关同位素的数据表格翻译时都换用了最新数据。尽管我们尽了很大努力，但限于译者的水平，错误之处仍然难免，欢迎读者批评指正。

本书各章的译者为：王选廷（第一章、第二章、第三章）；刘书田（第四章、第五章、第六章）；徐新（前言、第七章、各章的附录）。徐新同志对全书公式做了校正，并对一些数据表格作了必要的补充。

贾桂华同志帮助清抄了全部译稿，译者在此表示感谢。

译者 1983年8月于北京

目 录

前 言	1
第一章 引论	3
1.1 准确度和误差	4
1.2 机械类比：刚性小球	6
1.3 截面	10
1.4 结合能	12
1.5 质能等价性	15
1.6 能量单位	15
第二章 物质	17
2.1 基本粒子	17
2.2 反粒子	18
2.3 力和相互作用	19
2.4 电子	21
2.5 核子	27
2.6 原子核	29
2.7 原子	35
2.8 分子	40
2.9 固体	43
第三章 放射性辐射	49
3.1 核衰变辐射源	49
3.2 放射性辐射的性质和分类	77

第四章 带电粒子	86
4.1 碰撞	86
4.2 能量损失	95
4.3 穿透过程	107
参考文献	113
第五章 α 粒子	114
5.1 α 粒子径迹的性质	114
5.2 阻止本领	116
5.3 相对阻止本领	119
5.4 射程	120
5.5 比电离	125
5.6 α 粒子束的加宽现象	127
参考文献	129
第六章 电子	130
6.1 电子径迹的性质	130
6.2 韧致辐射	132
6.3 平均能量损失—— $-dE/dx$	139
6.4 相对阻止本领	144
6.5 最可几能量损失	146
6.6 电子的反散射	148
6.7 比电离	161
6.8 射程	162
6.9 在薄箔中的散射	176
6.10 连续辐射穿透箔片时的能谱变化	179
6.11 空间剂量分布	179

参考文献	183
第七章 γ辐射	185
7.1 光电效应	186
7.2 康普顿效应	194
7.3 电子对的产生	202
7.4 三种效应基本性质的总结	206
7.5 窄束的穿透过程	209
7.6 宽束	233
参考文献	244
附录	插页1
第二章附录 物质	插页1
第三章附录 放射性衰变	插页2
第四章附录 带电粒子的穿透过程	245
第五章附录 α 粒子的穿透	248
第六章附录 β 粒子的穿透	251
第七章附录 γ 射线的穿透过程	257
一般参考文献	261

前 言

本书是以作者在贝尔格莱德B.基德里奇核科学研究所组织的放射性同位素应用短训班授课的讲义为基础写成的。该短训班每期学时为六周，十八年来，每年举办六期。所以这些讲义作者已经反复讲授过六十多次。以深入浅出、简授多益为宗旨，讲义的内容一直在不断改进。最初，讲义包含为物理学家们所深爱的比较深奥的数学推导。但是后来，为了使那些在从事医学、农业等科学研究工作之前仅学过一年物理的学员也能接受，这一点只好改变了。

每期短训班分配给讲授“射线与物质相互作用”的时间仅五小时，这勉强只够作非常基础的介绍。因此，对于一个要求严格的学生来说，这只能是进一步学习的开端。本书的目的则是帮助他们进一步深入学习。所以，作者将原来讲授五小时的基础讲义大为扩充之后，又加进了一些材料，以便给出关于射线穿过物质这一过程的较为完整的图象。主要目的是帮助读者运用专业手册的定量数据。

本书在内容的编排上承袭了作者与多届不同的学员交谈中发展起来的思路。有些读者可能觉得引言一章中关于经典类比的部分太浅，他们可以略过这一部分，省出时间用于学习费因曼(Feynman)图和虚粒子部分；另一些读者将不会认为读引言一章是白费时间，他们宁愿略去与量子电动力学有关的一切内容。由于学生们的多次建议，本书特别编排

了总结各章内容的附录，目的是帮助学员掌握各种过程的物理图象的重要方面。

关于物质和射线的两章，是从核物理和原子物理中选录的，为的是帮助读者理解粒子与原子体系之间的碰撞现象。这两部份不能代表核物理或原子物理的教程。

有关 α ， β ， γ 射线穿透问题的三章，不是一律总括了现有的资料的。与深浅程度相当的其它书籍相比，本书 β 粒子的穿透一章包括了较多的关于韧致辐射，尤其是关于反散射的内容。在这些领域中已经做了许多工作，但尚未能被编入供非专家阅读的书籍中。

乌戈·法诺 (Ugo Fano) 的《放射物理学原理》一书给了作者很大的启示，并为作者最初的讲稿提供了样板。法诺的书的表述方法是独一无二的，所以，虽然经过了近二十年，仍旧得到高度评价，被推荐为初学者的教科书。

本书与作者在贝尔格莱德所用的讲义的中间形式是作者在东京日本原子能研究所放射性同位素学校授课的讲义。作者深深感谢木村 (Kimura) 教授和村上 (Murakami) 博士，是他们鼓励作者把讲稿写出来，并努力使之在《放射性同位素学校教科书》第一卷上刊出 (东京, 1959)。

作者感谢B.基德里奇研究所的支持，并向负责绘图的尼古拉·斯戈鲁潘 (Nikola Skorupan) 致谢。

作者还要感谢他的妻子奥尔加 (Olga) ——贝尔格莱德放射性同位素学校前校长，是她鼓励作者写出了那些讲义和本书，对书稿做了认真严格的审阅、评论，并提出建议。

第一章 引 论

每一个辐射实验实质上都是射线穿过物质的过程。让我们来看看测量 α 粒子这样一个最简单的实验例子。设实验系统仅由放射源和探测器组成（图1.1），放射性物质以很薄的薄层沉积在放射源托片上。但是，即使这薄层的厚度不足1微米，也还比原子的半径大 10^4 倍。因此 α 粒子在离开原子核后可能要穿过 10^2 — 10^3 原子层才能射出放射源薄层。在这个过程中， α 粒子要与放射性物质层中的原子碰撞，损失一小部分能量。当 α 粒子在放射源和探测器之间运动时，它要穿过在常压下每立方厘米含有 2.7×10^{19} 个分子的空气，与空气分子的多次碰撞又使它损失能量。最后， α 粒子到达探测器，在那里失去它剩余的能量，俘获两个电子，转变成稳定的氦原子。由此可见，从离开原子核那一瞬间到“ α 状态”终止

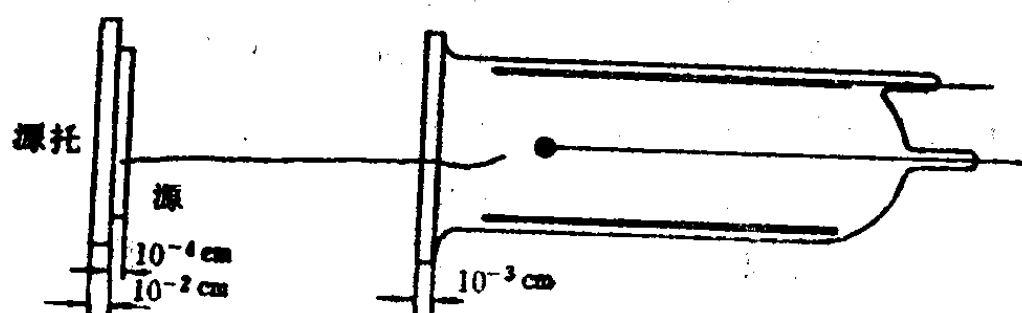


图1.1 α 粒子从放射源到探测器的路径源托片、放射性物质层和盖革管窗的厚度未按比例画，但注明了真实数值。

而转变成氦原子， α 粒子接连不断地与它沿途所遇到的原子碰撞。在分析这样一个实验得出的数据时，我们应该考虑 α 粒子经过的全部路径。

射线的探测是依据射线穿过探测介质时引起的效应来实现的。例如，在盖革计数管或电离室这类气体探测器中，射线使探测器中的气体电离产生离子，再通过电场对所产生离子的作用就可对射线进行探测。

射线，尤其是穿透性能很强的 γ 射线，不仅会穿过实验装置，而且会及于实验工作人员。为了避免损害人体的健康，就必须知道防护各种射线的适宜方法。

因此，从放射源，探测器，到辐射防护屏，通盘实验我们都必不可免地要与射线穿过物质的过程打交道。

一个辐射实验工作者，能否透彻分析射线穿过物质时产生的各种效应，是其专业水平高低的标志。

1.1 准确度和误差

我们对射线与物质相互作用过程的认识是随着整个物理学的发展而发展的。有些辐射过程，经典物理学连给予近似描述都做不到。为了解释电磁辐射与物质的相互作用过程所作的努力，在否定不恰当的经典解释和创立量子物理学方面起了特别重要的作用。这只要看下面的事实就可以明白了，先后有四届诺贝尔奖金授予了与三个基本效应的研究有关的人，一届因对光电效应的解释授予了爱因斯坦；一届因对电子-光子散射效应(康普顿效应)的研究授予了康普顿；一届因预言了电子对产生授予了狄拉克；一届因发现了电子对授予了安德森(Anderson)和内德迈耶(Neddermeyer)。

在本书刚一开头，先来讨论一下理论和实验的准确度问

题是有好处的，因为它将影响到考察射线与物质相互作用的方法。

理论预言的准确性可能取决于三个因素：物理学定律，所研究体系的模型以及使用的计算方法。早在量子力学创立之前，波尔就已经应用经典的电动力学和量子物理的基本假设，计算了带电粒子穿过物质时的能量损失。但是，用这种方法只能得出一个近似的能耗图象，因为它所依据的原理是不适当的。由于量子电动力学的创立，导出了一些精确的基本定律。然而，这些定律的应用可能是很复杂的，因此，仍需经常应用一些近似的模型。对于一定范围的特性参数值，这类模型有时能较好地近似真实的体系；但当这些参数值增加或减小时，这些模型就不够精确了。以用于处理粒子之间碰撞的玻恩（Born）近似方法为例：当粒子的原子序数低而能量较高时，玻恩近似方法就比较精确。在模型的基础上得出公式以后，还要由给定的参数计算其数值，这种计算有时很复杂，以致在计算中还要用近似方法，但这只不过是个数学技术问题了，而且，通常在计算上多花一些时间就可以提高准确度。自从有了快速电子计算机，这已经不再是严重的问题了。

一个实验原则上可能包括好几种效应，其出现几率也可能彼此很不相同。不管研究的是带电粒子还是光子，通常在给定的条件（辐射能量、吸收物种类、几何条件等）下，某些效应将占优势，而其它效应几乎可以不去管它。为了使某些效应能够观察到，常需要调整实验条件及使用特殊的实验设备。如果应用适当的装置，就可以比较准确地测定比较强的效应。

在一个实验中出现的所有效应是否都要考虑？是否要给予绝对完满的描述？回答是不必。初看起来，严密的科学理论当臻于完满无缺。但实际上，严密的科学之所以被称为严密，除了其它方面之外，还因为它考虑了由于实验测量的特性及所用理论模型的缺陷所造成的不可避免的不确定性。由于放射性辐射的统计特性，实验的误差是不可避免的。例如，如果在同样的条件下对同一射线强度作两次测量，会得到两个不同的数值。用增加被测粒子数的办法可以减小误差，这就需要比较强的放射源，或者延长测量时间。在射线强度的测量中，误差很少小于1%，有时可能比1%大得多。本节开始时所说的理论计算的不准确度也是这样的数量级。这些误差，对于“完满无缺”构成了自然的限制。如果对一个较强的效应理论计算的误差为百分之几，那么小于其百分之一的效应就不值得考虑了，因为它的贡献在误差范围内，因而不能被观察到。因此，很小的效应可以不加考虑。可以说，没有一个辐射实验是不忽略一些效应的。

在下面的讨论中，我们将经常考虑忽略某些效应的可能性，以1%为准确度限，我们将忽略那些贡献低一个或几个量级（即小于0.1%）的效应。

1.2 机械类比：刚性小球

在研究射线与物质之前，最好先来看一下它们相互作用过程的最简单的机械类比，由此我们将可以看出哪些物理量起着最重要的作用，这将使我们能够在考察物质和射线的性质时只研究那些必不可少的物理量。

在射线与物质相互作用的大量实验中，总是存在下列几项要素：

- (1) 来自放射源的射线束；
- (2) 射线穿过并与其发生数种相互作用的物质；
- (3) 射线探测器。

前两者总是要有的，探测器则可以没有，或只临时用于控制。

如果用刚性小球代替粒子，辐射过程可以怎样描述呢？请看图1.2。

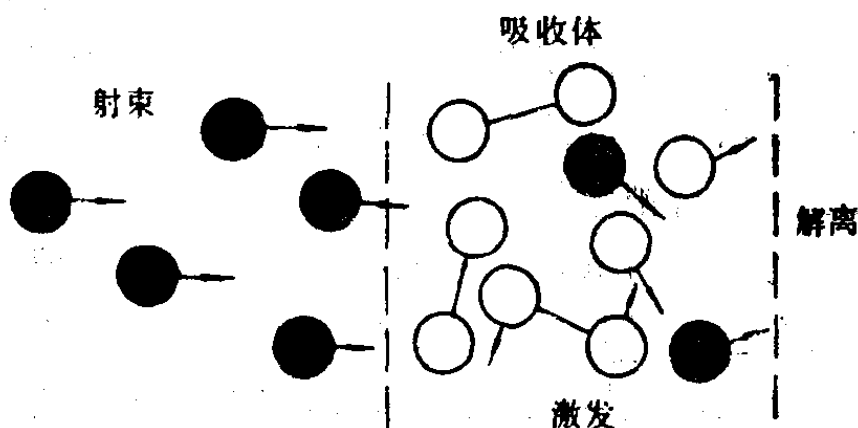


图1.2 一束小球穿过两两相联的小球组合体组成的吸收物的假想过程

碰撞时小球组合体可能吸收入射粒子的能量，但仍保持键合状态，这相当于激发过程；小球组合体也可能吸收更多的能量，那相当于电离或离解过程。

射线束中小球的特性可用它的质量、速度、运动方向和动能来描述。设射线束是近似平行的，并由同种小球组成，因此，质量相同。射线束最重要的特性之一是它的动能，它是整个过程的能量基础。

射束穿过的物质有时叫做吸收体或靶，假定吸收体也是由小球组成的，这些质量和大小不同的小球结合成小球组合体，就像原子结合成分子一样。我们可以假定这些小球处于静止状态，因为在常温下，原子的动能只有射线粒子动能的

万分之一至千万分之一，相比之下可以忽略不计。射束中的小球——我们叫它入射粒子——在通过吸收体时，与吸收体中的小球多次碰撞，每次碰撞的轻重取决于它是打在靶球的中心还是擦边而过。中心碰撞通常叫做对头碰，在对头碰时入射粒子和靶的相互作用最强。

碰撞过程包括三个效应：

(1) 能量传递 入射粒子把能量传给处于静止状态的受撞靶球。在对头碰中能量传递最多，当入射粒子运动方向与靶球中心距离增大时，能量的传递随之减少。能量的传递还取决于入射粒子与靶球的相对质量。

(2) 入射粒子的偏转 碰撞导致入射粒子的偏转。最大的偏转发生在对头碰时。偏转的程度也同样取决于入射粒子和靶球的质量比，入射粒子质量越大，它被偏转的角度越小。偏转还与入射粒子的动能成反比。

(3) 靶的反冲和状态变化 入射粒子分给靶球的能量可以产生两种效应：反冲和状态变化。一部分能量总是变成靶球的反冲动能。如果吸收物中每两个小球互相键接在一起，那么，即使只有其中之一受到入射粒子撞击，两个小球也都会反冲。如果撞击足够重，两球之间的键可能被撞断，组合体就可能解体；如果撞击未能使之断键，就可能使受撞的组合体旋转，其旋转能量可以认为是组合体内能的一部分，这时组合体的内能比受撞前静止状态时变大了，因此，我们说组合体跃迁进入了一个激发态。由此可见，只有一部分能量传递变成了反冲能，其余部分可能消耗在改变组合体的状态上，即使组合体激发或离解。

在穿过靶的过程中，射束中的任何一个小球都会经历多

次碰撞，总的效应可以用它总动能的减小 ΔE 和总偏转角 $\Delta\theta$ 来说明。因为每个小球的碰撞情况是统计性质的，所以，射束中两个小球将不大可能具有完全相同的 ΔE 和 $\Delta\theta$ 值。其统计性质反映在如下事实上：两个入射球碰撞情况和路程都相同的几率是很小的。每个小球所经历的碰撞次数也很可能是不相同的。因此，要使用平均值和几率这些统计概念。例如，假定射束中的所有粒子具有相同的能量，那么，射束的能量损失就可以用平均能量损失值 $\overline{\Delta E}$ 来定义。 $\overline{\Delta E}$ 是把全部粒子的能量损失加起来再除以粒子数得到的，即

$$\overline{\Delta E} = (\Delta E_1 + \Delta E_2 + \dots + \Delta E_n)/n$$

理论计算应可算出每一能量损失的几率，因此，也就可以预言平均能量损失值。

既然射束中各小球将具有不同的总偏转角，那么，射束穿过吸收体后将会变宽。个别小球甚至可能原路返回，或者损失全部能量而留在吸收体中。

让我们总结一下射线束穿过吸收物质这一过程的效应：

a. 射束损失能量，速度减慢；射束粒子改变运动方向，射束变宽；一些射束粒子留在吸收体中。

b. 吸收体获得能量，表现为反冲和组合体状态的改变，后者即激发或离解。

这些效应取决于下述因素：

(1)射束粒子的动能；

(2)射束粒子和吸收粒子的质量；

(3)吸收体中组合体内的键合强度；

(4)组合体的大小和几何形状。

这样，我们就引入了若干将在以后的讨论中起重要作用

的概念。还有一个更基本的要素——力，这里还要讲一讲。在上面的例子中，小球仅在它们接触时才发生相互作用。我们将要考察的粒子，如 α 粒子和 β 粒子，是具有长程力的粒子。在长程力的情况下，能量传递不一定需要接触，碰撞的概念扩展了。在非接触碰撞中，粒子大小所起的作用比在接触碰撞中要小。这时粒子的大小在一定限度上被力程这一概念所代替，这将在2.2节中讨论。

以上所讲的经典的模拟是不完全恰当的，因为它忽略了微观粒子运动的波动性方面。在波动力学中，入射体的大小被波长等概念所代替，波长是代表一个粒子定域的量（见3.2.1节）。此外，波动力学理论中采用“事件的几率”这一概念。

1.3 截面

刚球类比方法也可用来说明粒子碰撞物理中常用的另一个概念，就是表示碰撞几率的截面。

首先，让我们看一个最简单的情况，一个粒子穿过非常薄的吸收薄片，假想这个薄片薄得只是一个单原子层。我们

用字母 A 表示这个薄片的面积。

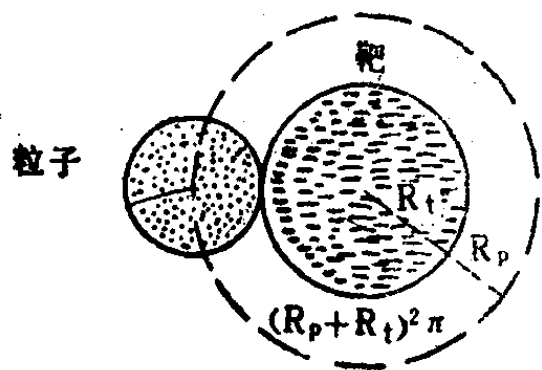


图 1.3 两个小球间碰撞的截面

入射粒子与吸收体粒子碰撞的几率取决于 A 中吸收体粒子所占据的面积。吸收体的每个粒子在 A 中占据的面积就是它的截面，等于它半径的平方乘以 π 。如果入射粒子与靶粒

子的中心距离小于它们的半径之和，就会发生碰撞(图1.3)。

所以，有效的碰撞面积等于