

高等学校试用教材

核物理实验

北京大学
复旦大学 主编

原子能出版社

高等学校试用教材

核物理实验

北京大学
复旦大学 主编

原子能出版社

内 容 简 介

本书共选编了四十一个基础实验，内容包括：放射性测量中的统计学，射线与物质的相互作用，射线探测器，活度、能量、时间测量技术，中子实验技术，核辐射分析技术及其应用。书末附有与实验有关的数据、图表。

本书为原子核物理专业的核物理实验课程的试用教材，也可供其它有关专业的师生和从事核技术应用的人员参考。

高等学校试用教材

核 物 理 实 验

北京大学
复旦大学 主编

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

八九九二〇部队印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $10\frac{3}{4}$ ·字数285千字

1984年11月第一版·1984年11月第一次印刷

印数1—4,000 ·统一书号: 15175·541

定价: 1.35元

前 言

原子核物理是当代一门生气勃勃地发展中的学科，它的发展不仅加深了人们对微观世界的认识，而且推动了科学技术的变革，开辟了核能利用的新时代。现在，核技术已广泛应用于工、农、医等国民经济各个部门，并日益发挥它的重要作用。同时，随着现代科学技术的进步，加速器技术的发展，一些高性能探测器的出现以及计算机在核物理实验中的应用等，原子核物理学不断开拓新的研究领域：如重离子物理、离子束分析技术等。因而，核物理学是一门与其它科学技术紧密相关的实践性很强的实验科学。

为了发展我国的核科学事业，开展核技术在各领域的应用，首要任务是培养训练有素的实验核物理人才。加强实验课程是核物理专业教学中的中心环节。为此我们联合编写了这本核物理基础实验的统编教材。1980年由核工业部教育司主持在上海召开了《核物理实验》教材编写讨论会。会上总结交流了各校核物理实验教学和教材建设的经验，制定了本书的编写大纲并提出了编写要求，确定本书为大学核物理专业和有关专业的试用教材，也可供从事核物理研究、放射性测量及核技术应用等方面工作人员参考。

本书共有41个实验，基本内容如下：

1. 射线与物质相互作用
2. 射线探测技术和测量方法
3. 核技术应用
4. 核数据的获得与处理

每个实验都规定有特定的训练目的，在实验原理、实验方

法、操作技术、数据处理和结果分析等方面各有所侧重，同时保持实验内容有相对的独立性和一定的灵活性。按照现行的教学计划，核物理专业的“核物理实验”课程总学时为80—90学时，每个学生应完成实验10个左右。为了扩大知识面和积累教学经验，本书的实验数多于学生必修的实验数。书中某些实验可作为本科生和研究生选修实验。

现代的核物理实验往往是多种学科实验技术的综合运用，这就要求工作人员有较熟练的实验技巧和扎实的基本功。通过查阅资料、选用仪器、拟订实验步骤、正确操作、观察现象、获得与处理数据以及分析结果等环节，逐步培养学生具有理论联系实际、发现问题、分析问题和解决问题的能力；并在工作中培养严格的科学态度、求实精神、坚韧不拔的工作作风。通过本课程的学习，使学生初步了解核物理的研究方法，加深某些基本理论与概念的理解。

本书是各校多年教学实践的结晶，是共同合作的产物。编者在编写过程中做了总结和提炼的工作。

本书由北京大学夏宗璜、复旦大学张钰蓉主编。参加编写的单位有：

北京大学（实验2、3、6、9、13、15、16、22、23、26、28、40附录2.）

复旦大学（实验8、11、18、20、35、36、37、38、39）

清华大学（实验1、5、10、14、19、24、25）

南京大学（实验30、32、33、34、41）

四川大学（实验4、17、21、29、附录1.）

兰州大学（实验7、27、31）

中国科技大学（实验12）

吉林大学（附录3.）

1982年6月在北京召开了本书的审稿会。参加审稿会的有北京大学、复旦大学、清华大学等单位的同志：陈坚、钱景华、沈

能学、陈迎棠、林琴如、夏宗璜和张钰蓉等。

本书在编写过程中得到了原子能研究所、核工业部北京核仪器厂等单位的大力支持和帮助，编者在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限，错误和不妥之处在所难免，恳切希望读者给予指正。

编 者

1983年1月

目 录

前言

一、放射性测量中的统计学

实验1. 核衰变的统计规律	1
实验2. 验证距离平方反比律	9

二、射线与物质的相互作用

实验3. α 粒子的能量损失	17
实验4. β 射线的吸收	25
实验5. γ 射线的吸收	32
实验6. X 射线吸收和特征谱测量	39
实验7. 卢瑟福散射	46
实验8. 康普顿散射	51

三、射线探测器

实验9. 电流电离室	58
实验10. G-M 计数器	64
实验11. 正比计数器	71
实验12. 多丝正比室	77
实验13. NaI(Tl) 闪烁谱仪	87
实验14. 半导体 α 谱仪	96
实验15. Ge(Li) γ 谱仪	104
实验16. Si(Li) X 射线谱仪	110
实验17. 热释光剂量仪	116

四、活度、能量、时间测量技术

实验18. 小立体角法测量 β 源活度	124
实验19. 符合法测量放射源活度	133

实验20. 弱 β 放射性比度测量..... 141

实验21. β 能谱的测量..... 147

实验22. 反符合法提高 γ 谱的峰康比..... 155

实验23. 逆矩阵法解析 γ 谱..... 161

实验24. 放射性核素半衰期测量 167

实验25. 延迟符合法测量核激发态寿命 175

实验26. 多道时间谱仪 183

实验27. γ - γ 方向角关联 190

五、中子实验技术

实验28. 用 BF₃ 正比计数管探测慢中子..... 197

实验29. 热中子活化法测量⁵¹V 的俘获截面..... 205

实验30. 快中子全截面的测量... 210

实验31. 快中子活化法分析钢中的含氧量 217

实验32. 热中子扩散长度的测量 225

实验33. 中子减速长度的测量 231

实验34. Am-Be 中子源的剂量测量 238

六、核辐射分析技术及其应用

实验35. ¹⁹F(p, $\alpha\gamma$)¹⁶O 反应的激发曲线..... 244

实验36. 源激发 X 射线荧光分析 251

实验37. 环境样品的 PIXE 分析..... 260

实验38. 背散射法测薄膜厚度和杂质浓度 269

实验39. 共振核反应法的应用 279

实验40. 正电子在物质中的湮没寿命 287

实验41. 穆斯堡尔谱仪 295

附录1. α 、 β 粒子能量与射程关系表..... 304

附录2. 特征 X射线能量及吸收限..... 306

附录3. 常用放射性核素衰变纲图..... 312

实验 1 核衰变的统计规律

实验目的

1. 了解并验证原子核衰变及放射性计数的统计性。
2. 了解统计误差的意义，掌握计算统计误差的方法。
3. 学习检验测量数据的分布类型的方法。

内容

1. 在相同条件下，对某放射源进行重复测量，画出放射性计数的频率直方图，并与理论分布曲线作比较。
2. 在相同条件下，对本底进行重复测量，画出本底计数的频率分布图，并与理论分布图作比较。
3. 用 χ^2 检验法检验放射性计数的统计分布类型。

原理

在重复的放射性测量中，即使保持完全相同的实验条件（例如放射源的半衰期足够长，在实验时间内可以认为其活度基本上没有变化；源与计数管的相对位置始终保持不变；每次测量时间不变；测量仪器足够精确，不会产生其它的附加误差等等），每次的测量结果并不完全相同，而是围绕着其平均值上下涨落，有时甚至有很大的差别。这种现象就叫做放射性计数的统计性。放射性计数的这种统计性反映了放射性原子核衰变本身固有的特性，与使用的测量仪器及技术无关。

1. 核衰变的统计规律

放射性原子核衰变的统计分布可以根据数理统计分布的理论

来推导。放射性原子核衰变的过程是一个相互独立彼此无关的过程,即每一个原子核的衰变是完全独立的,和别的原子核是否衰变没有关系,而且哪一个原子核先衰变,哪一个原子核后衰变也纯属偶然的,并无一定的次序,因此放射性原子核的衰变可以看成是一种伯努里试验问题。设在 $t=0$ 时,放射性原子核的总数是 N_0 ,在 t 时间内将有一部分核发生了衰变。已知任何一个核在 t 时间内衰变的概率为 $p=(1-e^{-\lambda t})$,不衰变的概率为 $q=1-p=e^{-\lambda t}$, λ 是该放射性原子核的衰变常数。利用二项式分布可以得到在 t 时间内有 n 个核发生衰变的概率 $P(n)$ 为

$$P(n)=\frac{N_0!}{(N_0-n)!n!}(1-e^{-\lambda t})^n(e^{-\lambda t})^{N_0-n} \quad (1)$$

在 t 时间内,衰变掉的粒子平均数为

$$m=N_0p=N_0(1-e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

其相应的均方根差为

$$\sigma=\sqrt{N_0pq}=\sqrt{m(1-p)}=(me^{-\lambda t})^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

假如 $\lambda t \ll 1$,即时间 t 远比半衰期小,这时 σ 可简化为

$$\sigma=\sqrt{m} \quad (4)$$

N_0 总是一个很大的数目,而且如果满足 $\lambda t \ll 1$,则二项式分布可以简化为泊松分布,因为在二项式分布中, N_0 不小于100,而且 p 不大于0.01的情况下,泊松分布能很好的近似于二项式分布,此时

$$P(n)=\frac{m^n}{n!}e^{-m} \quad (5)$$

在泊松分布中, n 的取值范围为所有的正整数(0, 1, 2, 3...),并且在 $n=m$ 附近时, $P(n)$ 有一极大值,当 m 较小时,分布是不对称的, m 较大时,分布渐趋近于对称。当 $m \geq 20$ 时,泊松分布一般就可用正态(高斯)分布来代替。

$$P(n)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{\frac{-(n-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

式中 $\sigma^2=m$, $P(n)$ 是在 n 处的概率密度值。

现在我们分析在放射性测量中, 计数值的统计分布。原子核衰变的统计现象服从的泊松分布和正态分布也适用于计数的统计分布, 因此, 只需将分布公式中的放射性核的衰变数 n 改换成计数 N , 将衰变掉粒子的平均数 m 改换成计数的平均值 M 就可以了。

$$P(N)=\frac{M^N}{N!}e^{-M} \tag{7}$$

$$P(N)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{\frac{-(N-M)^2}{2\sigma^2}} \tag{8}$$

式中 $\sigma^2=M$, 当 M 值较大时, 由于 N 值出现在 M 值附近的概率较大, σ^2 可用某一次计数值 N 来近似, 所以 $\sigma^2\approx N$ 。

由于核衰变的统计性, 我们在相同条件下作重复测量时, 每次测量结果并不相同, 有大有小, 围绕着平均计数值 M 有一个涨落, 其涨落大小可以用均方根差 $\sigma=\sqrt{M}\approx\sqrt{N}$ 来表示。

由 (8) 式可以看出, 正态分布决定于平均值 M 及均方根差 σ 这两个参数, 它对称于 $N=M$, 见图 1。对于 $M=0, \sigma=1$, 这种分布称为标准正态分布。一般的概率统计书^[3]上给出的正态分布数值表都是对应于标准正态分布的。

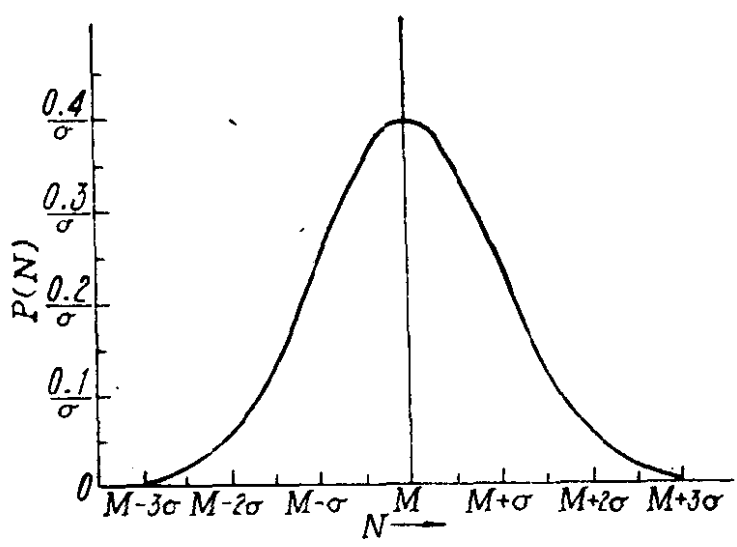


图 1 正态分布图

计数值处于 $N - N + dN$ 内的概率为

$$P(N)dN = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(N-M)^2}{2\sigma^2}} dN$$

为了计算方便, 需作如下的变量置换 (称标准化), 令

$$z = \frac{N-M}{\sigma} = \frac{\Delta}{\sigma}$$

则

$$\begin{aligned} P(N)dN &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} d\Delta \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \end{aligned}$$

而 $\int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ 称为正态分布概率积分, 此积分的数值表在

《原子核物理实验方法》下册^[2]中的附录上可以查到。

如果我们对某一放射源进行多次重复测量, 得到一组数据, 其平均值为 $\bar{N}$, 那末计数值 N 落在 $\bar{N} \pm \sigma$ (即 $\bar{N} \pm \sqrt{\bar{N}}$) 范围内的概率为

$$\int_{\bar{N}-\sigma}^{\bar{N}+\sigma} P(N)dN = \int_{\bar{N}-\sqrt{\bar{N}}}^{\bar{N}+\sqrt{\bar{N}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(N-\bar{N})^2}{2\sigma^2}} dN$$

用变量 $z = \frac{N-\bar{N}}{\sigma}$ 来置换之, 并查表^[2], 上式即为

$$\int_{-1}^{+1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = 0.683$$

这就是说, 在某实验条件下进行单次测量, 如果计数值为 N_1 , (N_1 来自一个正态分布总体), 那末我们可以说 N_1 落在 $\bar{N} \pm \sqrt{\bar{N}}$ (即 $\bar{N} \pm \sigma$) 范围内的概率为 68.3%, 或者反过来说, 在 $N_1 \pm \sqrt{\bar{N}}$ 范围内包含真值的概率是 68.3%。实质上, 从正态分布的特点来看, 由于出现概率较大的计数值与平均值 $\bar{N}$ 的偏差较小, 所

以我们可以用 $\sqrt{N_1}$ 来代替 $\sqrt{N}$ 。对于单次测量值 N_1 ，可以近似地说，在 $N_1 \pm \sqrt{N_1}$ 范围内包含真值的概率是68.3%，这样用单次测量值就大体上确定了真值所在的范围，这种由于放射性衰变的统计性而引起的误差，叫做统计误差。放射性统计涨落服从正态分布，所以用均方根差（也称标准误差） $\sigma = \sqrt{N}$ 来表示。当采用标准误差表示放射性的单次测量值 N_1 时，则可以表示为 $N_1 \pm \sigma = N_1 \pm \sqrt{N} \approx N_1 \pm \sqrt{N_1}$ 。用数理统计的术语来说，将68.3%称为“置信概率”（或叫做“置信度”），相应的“置信区间”即为 $N \pm \sigma$ ，而当置信区间取为 $N \pm 2\sigma$ 、 $N \pm 3\sigma$ 时，相应的置信概率则为95.5%和99.7%。

2. χ^2 检验法

放射性衰变是否符合于正态分布或泊松分布，由一组数据的频率直方图或频率分布图与理论正态分布或泊松分布作比较，可以得到一个感性的认识，而 χ^2 检验法则提供一种较精确的判别准则。它的基本思想是比较被测对象应有的一种理论分布和实测数据分布之间的差异，然后从某种概率意义上来说明这种差异是否显著。如果差异显著，说明测量数据有问题，反之，则认为差异在某种概率意义上不显著，测量数据正常。

设对某一放射源进行重复测量得到了 K 个数值，对他们进行分组，分组序号用 j 表示， $j=1, 2, 3 \dots h$ ，令

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^h \frac{(f_i - f'_i)^2}{f'_i}$$

其中 h 代表分组数， f_i 表示各组的实际观测次数， f'_i 为根据理论分布计算得到的各组理论次数。求理论次数的方法是：从正态分布概率积分数值表上查出各区间的概率，再将它乘以总次数。

可以证明， χ^2 统计量近似地服从 χ^2 分布，且其自由度是 $h-1-1$ ，这里 1 是在计算理论次数时所用的参数个数。对于正态分布，自由度为 $h-3$ ，对于泊松分布，自由度为 $h-2$ 。

统计量 χ^2 可以用来衡量实测分布与理论分布之间有无明显的差异。使用 χ^2 检验时，要求总次数不小于50，以及任一组的理论次数不小于5（最好在10以上），否则可以将组适当地合并以增加 f_i 。比较的方法是先选取一个任意给定的小概率 α ，称为显著性水平，查出对应的 χ^2_α 值（在参考资料[2]的附录中有此表），比较计算量 χ^2 和 χ^2_α 的大小来判断拒绝或接受理论分布。这种判断是在某一显著性水平 α 上得出来的。例如对于某一服从泊松分布的数据，其计数平均值为3.87，计算统计量 $\chi^2=13$ ，自由度是9，如取显著性水平 $\alpha=0.05$ 时，查表得到 $\chi^2_\alpha=16.919$ ，因实测得到 $\chi^2=13<\chi^2_\alpha=16.919$ ，所以认为此组数据服从泊松分布。

装置

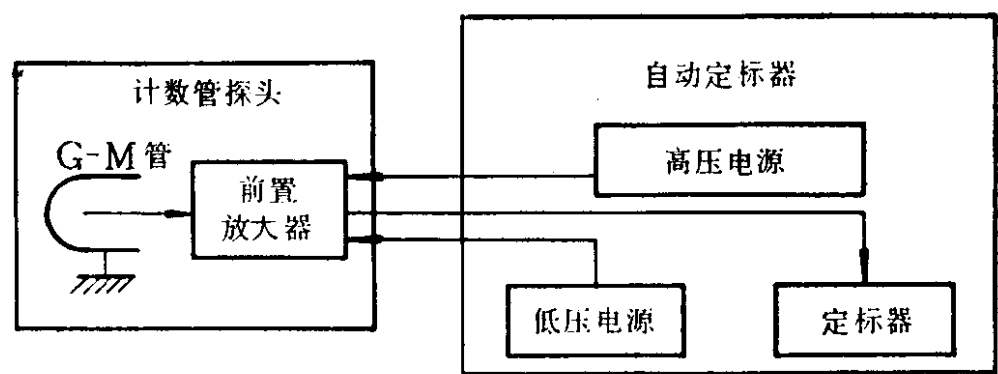


图2 实验方框图

- 计数管探头, FJ-365, 1个;
- G-M计数管, J-104, 1支;
- 自动定标器, FH-408, 1台;
- γ 放射源, ^{60}Co 或 ^{137}Cs , 1个。

步骤

1. 按方框图连接各仪器设备，并用自动定标器的自检信号检验仪器是否处于正常工作状态。

2. 测量计数管坪曲线, 选择计数管的合适工作电压、合适的计数率等实验条件, 重复进行至少 100 次以上的独立测量, 并算出这组数据的平均值。

3. 测量本底分布, 测量次数为 100 次以上, 并算出其平均值。

结果分析及数据处理

1. 作频率直方图

把一组测量数据按一定区间分组, 统计测量结果出现在各区间内的次数 k_i 或频率 $k_i/\text{总次数}(K)$, 以次数 k_i 或频率 k_i/K 作为纵坐标, 以测量值为横坐标, 这样作出的图形在统计上称为频率直方图, 见图 3。频率直方图可以形象地表明数据的分布状

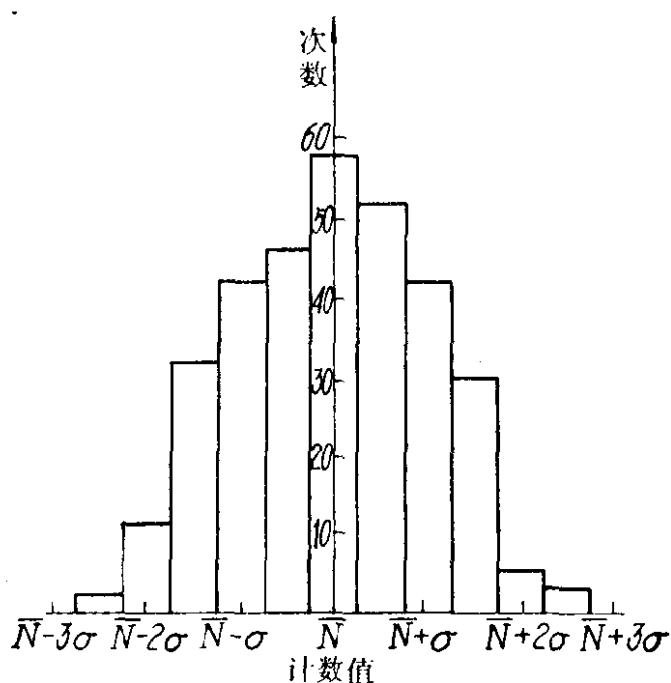


图 3 频率直方图

况。为了便于与理论分布曲线作比较, 建议在作频率直方图时, 将平均值置于组中央来分组, 组距为 $\frac{\sigma}{2}$, 这样各组的分界点是

$$N \pm \frac{1}{4}\sigma, N \pm \frac{3}{4}\sigma, N \pm \frac{5}{4}\sigma, \dots$$

而各组的中间值为

$$N, N \pm \frac{1}{2}\sigma, N \pm \sigma, \dots$$

2. 配制相应的理论正态分布曲线。
3. 计算测量数据落在 $N \pm \sigma$ 、 $N \pm 2\sigma$ 、 $N \pm 3\sigma$ 范围内的频率。
4. 分别用单次测量值和平均值来表示测到的放射源的计数值。
5. 对此组数据进行 χ^2 检验。
6. 作出本底的实验频率分布及其对应的理论分布图，并对此作 χ^2 检验，以单次测量值表示本底的计数值。

思考题

1. 什么是放射性原子核衰变的统计性？它服从什么规律？
2. σ 的物理意义是什么？以单次测量值 N 来表示放射性测量值时，为什么是 $N \pm \sqrt{N}$ ，其物理意义是什么？
3. 为什么说以多次测量结果的平均值来表示放射性测量值时，其精确度要比单次测量值高？

参 考 资 料

- 【1】复旦大学、清华大学、北京大学合编，原子核物理实验方法（上册），第一章，原子能出版社，1981年。
- 【2】复旦大学、清华大学、北京大学合编，原子核物理实验方法（下册），附录 2，原子能出版社，1982 年。
- 【3】林少宫，基础概率与数理统计，第五章及附录，人民教育出版社，1978 年。
- 【4】W. J. Price, Nuclear Radiation Detection, Chapter 3, 2ed., McGraw-Hill Inc., New York, 1964.

（陈迎棠 编）

实验2 验证距离平方反比律

实验目的

1. 学会根据实验精度要求选择测量时间。
2. 学会运用线性最小二乘法拟合实验数据，验证距离平方反比律。

内容

1. 改变探测器与放射源之间的距离，测量各相应位置之计数率，获取一定精度要求的实验数据。
2. 用等精度线性最小二乘法处理实验数据，验证 γ 射线强度随距离的变化规律——平方反比律。

原理

在放射性测量中，为得到一定精度的实验数据，必须根据放射源及本底计数率的实际情况，结合某些客观条件（如探测器效率及测量时间的限制），确定适当的测量方案；为了得到可靠的实验结果，还需要进行数据分析和处理。我们将通过本实验作有关的基本训练。

1. γ 射线强度随距离的变化关系——平方反比律

设有一点源（指源的线度与源到观测点的距离相比很小），向各方向均匀地发射 γ 光子。若单位时间发射的光子数为 N_0 ，则在以点源为球心，以 R 为半径的球面上，单位时间内将有 N_0 个光子穿过（设空间内无辐射之吸收与散射等）。因此，在离源 R 处，单位时间、单位面积上通过的 γ 光子数为：