核反应堆理论

G. I. 贝尔
S. 格拉斯登 著

原子能出版社

核 反 应 堆 理 论

G。I .贝尔
S。格拉斯登 著

千 里 译
黄 祖 洽 校

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书从中子输运方程入手，深入系统地介绍了核反应堆的物理理论。

全书共分十章，前五章介绍了中子输运方程的推导及求解的各种方法，其他几章分别介绍了伴方程和微扰理论、中子热化、共振吸收以及反应堆动力学。物理概念阐述得比较严谨，数学处理比较精练。

本书可供核反应堆理论工作者参考，也可供高等院校有关专业师生阅读。

核 反 应 堆 理 论

G.I.贝尔 S.格拉斯登 著

千 里 译

黄 祖 洽 校

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16 · 印张 $28^5/_8$ · 字数 677 千字

1979 年 8 月北京第一版 · 1979 年 8 月北京第一次印刷

印数001－5300 · 定价：4.10元

统一书号：15175·139

说　　明

承担本书各章翻译的同志有：姚增华（第一、九章）、王承基（第二章）、吴坤炳和刘志坤（第三章）、沈仲卿（第四章）、王英明（第五章）、蔡剑平（第六章）、孟希哲（第七章）、盛维兰（第八章）、周振年（第十章）。孟希哲同志对全书作了初校。编辑部收稿后，又请下列同志作了复校：姚增华（第二、三、四、六章）、施贵勤（第五章）、蒲富库（第七章）、陈仁济（第八章）、阮可强（第十章）。最后请黄祖洽同志对全书作了总校。

前　　言

本书的目的是阐明通常用于预言核反应堆内中子行为的主要物理概念和数学方法。力图避免既不会明显地增加物理上的理解，也不用于实际反应堆设计研究的复杂数学推导。因此，在某些可能的情况下略去了冗长的推导而只给出结论，同时给出有关的参考文献。

本书大致是自成体系的，可以作为物理学家、数学家及工程师使用的反应堆理论的引论。我们假定读者对下列一些专题是熟悉的：裂变过程、中子截面、中子慢化及中子扩散。因此，应由一本更初级的核反应堆理论教科书提供必要的基础。当然也需要有一定的数学知识。最好有应用矢量分析、偏微分方程、本征值问题以及拉普拉斯变换和傅里叶变换的经验，尽管对于理解一些基本原理来说，它们并不是必需的。某些应用于本书的专门数学方法在附录中阐述，在另一些情况下，则在参考文献中给出主要著作。

G．I．贝尔

S．格拉斯登

1970年10月

目　　录

第一章　中子输运方程

1.1　输运方程的推导

1.1a　引　　言

核反应堆的行为是由系统内中子的空间、能量、时间分布决定的，反应堆理论的中心问题之一就是预言这一分布。这一点原则上可以由求解中子输运方程做到。这个方程常常称为玻耳兹曼方程，因为它和L·玻耳兹曼关于气体分子运动论的表达式类似。在本章中，导出了中子输运方程的各种形式，并讨论其解的某些一般性质。

把适当表述中子（与物质）相互作用几率的整套截面及系统内材料的几何布置一起代入输运方程中，应该可以求解中子分布问题。用适当的计算方法，例如蒙特卡罗法，应该可以得出数值解。但实践证明这是行不通的。首先，截面及其随中子能量的变化十分复杂，还没有完全弄清；其次，反应堆内材料的几何布置太复杂，即使应用计算机，也不可能在合理的时间内求解输运方程。无论如何，除去最简单的情况外，求解中子输运方程太困难，必须使用方程的近似式。在本章末概述了这些近似，并在本书中给予详细的处理。

在推导输运方程之前，将定义一些描述中子输运问题所必需的特定量，并给出统一的符号。将会看到，这些符号在某些方面与初等反应堆理论中所采用的不同，这通常是由于在中子输运理论中引入了一些额外变量的结果。然而，熟悉本书所使用的符号并没有很大的困难。

1.1b　定义及符号

中子作为点粒子

在输运理论中，中子被看作一个点粒子。意思是：中子可用其位置和速度完全描述。由于中子的约化波长比宏观尺寸和中子平均自由程小，点描述看来是合理的。

按照德布罗意方程，一粒子的约化波长$\lambda\!\!\!^{-}$由下式给出：

$$\lambda\!\!\!^{-}=\frac{\hbar}{p},$$

式中$\hbar$是2π除普朗克常数，p是粒子的动量。对于中子，这个式子取如下的形式

$$\lambda\!\!\!^{-}=\frac{4.55\times10^{-10}}{\sqrt{E}}\text{厘米},$$

式中E是以电子伏为单位的中子能量。即使能量低到0.01电子伏的中子，$\lambda\!\!\!^{-}$也只有4.55×10^{-9}厘米，仍比固体中原子间距几乎小一个数量级，而比宏观尺寸和平均自由程要小几个数量级。因此，把中子的位置看成是一个可以精确决定的量是适当的。

事实上，可以精确地确定中子的位置和速度（或动量）而不违背海森伯测不准关系

$\Delta x \Delta p \simeq \hbar$。如果可以容许位置的不确定量 Δx 是 10^{-4} 厘米，那么动量不确定量所相当的能量不确定量可以略去不计，即

$$\Delta E \simeq 10^{-5}\sqrt{E},$$

式中 ΔE 和 E 均以电子伏为单位[1]。

对于能量非常低的中子，波长变得很长，中子当然不能定位。这时，本书所作对中子的输运处理无效，需要用量子力学阐述[2]。这个问题在反应堆物理中没有实际意义，因为能量太低，以致通常的点粒子描述会引起严重误差的中子，其数目是可以忽略不计的。而且即使在任意低的中子能量下，输运方程通常也还当成是成立的，尽管在这些情况下其解与物理事实的关系是不确定的。

中子有自旋和磁矩，这会导致极化而影响中子输运。但在 § 1.4b 中会看到，在大多数实际情况下这一效应是很小的。如果必要，可以对散射截面作小的修正来近似考虑这个效应。

因此，目前将把中子当作一个点粒子，具有由矢量 $\mathbf{r}$ 描述的位置及由矢量 $\mathbf{v}$ 描述的速度。速度矢量通常表示成

$$\mathbf{v} = v\mathbf{\Omega},$$

式中 $v(=|\mathbf{v}|)$ 是中子速率，即速度的（标量）大小；$\mathbf{\Omega}$ 是运动方向的单位矢量，与 $\mathbf{v}$ 同向。

通常，在极坐标系统中规定单位矢量 $\mathbf{\Omega}$ 是很方便的，如图1.1所示用极角 θ 及方位角 φ 来表示。因此，$\mathbf{\Omega}$ 的笛卡儿坐标是

$$\Omega_x = \sin\theta\cos\varphi$$
$$\Omega_y = \sin\theta\sin\varphi$$
$$\Omega_z = \cos\theta.$$

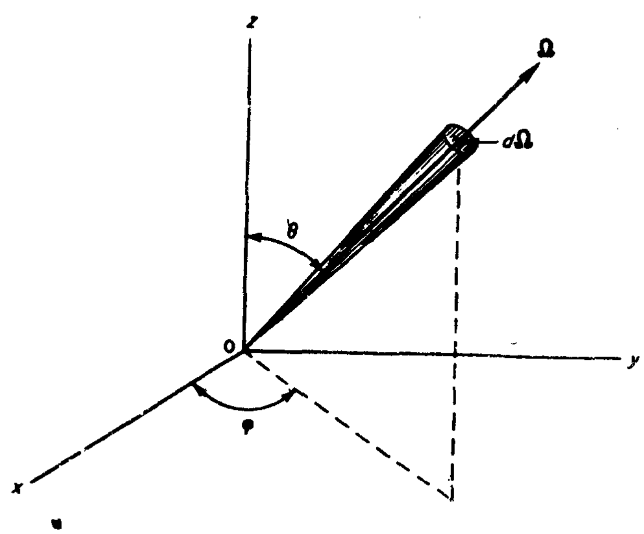

图 1.1　极坐标

中子密度及通量

为了描述中子密度的分布，在本书中引入一个称为中子角密度的量。它表示成

$$\text{角密度} = N(\mathbf{r}, \mathbf{\Omega}, E, t)\quad, \tag{1.1}$$