

中子物理研究及应用

应阳君[†]

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100094)

摘要 文章介绍了中子物理研究的发展历程,简述了中子输运方程及其近似解法,阐明了动态系统中子物理研究的特殊性,然后概述了中国核参数和中子输运研究的发展和近况,并讨论了中子物理中有待深入的研究课题.

关键词 中子物理学,输运理论,核参数

Neutron physics and its applications

YING Yang-Jun[†]

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract The development of neutron physics and the transport equation is described, and the difference between dynamical nuclear systems and normal static nuclear reactors pointed out. The history of China's studies on nuclear constants and transport equation computation is reviewed, and some topics that need to be investigated in further detail are discussed.

Keywords neutron physics, transport theory, nuclear constant

1 中子物理研究的发展背景

中子物理学是核科学工程的中心学科,与原子核物理研究相关的许多实际领域,都是和中子的应用分不开的.

在 19 世纪末,英国物理学家汤姆孙(J. J. Thomson)发现电子;1895 年,德国物理学家贝可勒尔(H. Becquerel)发现了铀放射性;1898 年,居里夫妇(P. & M. Curie)发现放射性元素钋,1902 年又发现放射性元素镭;1905 年,爱因斯坦提出质能转换公式 $E=mc^2$;1914 年,英国物理学家卢瑟福实验确定氢原子核是一个正电荷单元,称为质子;1932 年 2 月,英国物理学家查得威克(J. Chadwick)发现了中子;德国的海森伯(W. Heisenberg)和苏联的伊万宁科(Д. Д. Иваненко)分别独立提出原子核是由质子和中子所组成的假设,得到了一系列实验事实的支持.许多人把发现中子的年代作为原子核物理诞生的年代.1934 年法国的约里奥-居里夫妇(F&I. Joliot-Curie)用 α 粒子轰击原子核,发现人工放射性.

1938 年,德国科学家哈恩(O. Hahn)和他的助手斯特拉斯曼用中子轰击铀原子,发现了核裂变现

象.奥地利女物理学家迈特纳(L. Meitner)和她的外甥弗里什(O. R. Frish)计算出一个铀核裂变约放出 200MeV 的能量.

核能应用的关键是在核裂变放出能量的同时是否放出足够数量的中子,使裂变反应能接连不断地进行而形成链式反应.1942 年 12 月 2 日,世界上第一座核反应堆在美国芝加哥大学成功启动,从此人类开始了原子能利用的新纪元.1945 年 7 月 16 日第一枚原子弹在新墨西哥州的阿拉莫戈多空军基地试验成功;1958 年我国建成第一座研究性重水反应堆;1964 年 10 月,我国成功爆炸第一颗原子弹;1967 年 6 月成功爆炸第一颗氢弹.二次大战以后,核反应堆、核武器的出现使中子输运理论受到重视,很多人都研究这方面的问题,使中子输运理论得到飞速发展.

由于电中性,中子和物质相互作用主要靠中子和物质原子的原子核相互作用.按中子与核发生作用后是否还存在,可以把中子与核的反应分为:散射(弹性、非弹性)、吸收(包括 (n, α) 、 (n, p) 、 (n, γ) 、

2009-05-08 收到初稿,2009-06-05 收到修改稿

[†] Email:ying_yangjun@iapcm.ac.cn

(n, f) … 等反应道) 两类. 在中子探测领域, 又常按所引起的电离反应分为 4 种方式: 核反应、弹性散射(核反冲)、核裂变和活化^[1].

2 中子输运及其方程描述

大量的中子在核反应堆燃料元件中的扩散是一种典型的输运现象. 所谓输运现象并不是指个别粒子的运动, 而是在个别粒子运动的基础上一群粒子的运动行为. 输运理论就是研究粒子输运所表现出的非平衡状态的性质的^[2].

对于粒子的输运过程, 记 $n = n(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ 为粒子的相空间密度, 则 $n(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3 r d^3 v$ 表示在 t 时刻在 \mathbf{r} 附近 $d^3 r$ 内, \mathbf{v} 附近 $d^3 v$ 内的可几粒子数. 输运方程在考虑环境外力 \mathbf{F} 贡献情况下可一般地表示为

$$\frac{dn}{dt} = \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_{\text{coll}} + \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_{\text{source}} = \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_{\text{coll}} + S(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t), \quad (1)$$

式中

$$\frac{dn}{dt} = \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right) + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial n}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m} \cdot \frac{\partial n}{\partial \mathbf{v}},$$

其中碰撞项 $\left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_{\text{coll}}$ 定义为

$$\left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_{\text{coll}} = \int d^3 v' v' \Sigma(\mathbf{r}, \mathbf{v}' \rightarrow \mathbf{v}) n(\mathbf{r}, \mathbf{v}', t) - v \Sigma(\mathbf{r}, \mathbf{v}) n(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t), \quad (2)$$

式中第一项是“进帐”, 表示在 \mathbf{r} 处发生碰撞, 粒子速度由 \mathbf{v}' 变为 \mathbf{v} 的粒子数; 第二项是“出帐”, 表示速度为 \mathbf{v} 的粒子在 \mathbf{r} 处发生碰撞而损失的粒子数. 式中 $\Sigma(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ 是宏观截面, 它表示 \mathbf{r} 处速度为 \mathbf{v} 的粒子走单位长度引起碰撞的概率; $\Sigma(\mathbf{r}, \mathbf{v}' \rightarrow \mathbf{v})$ 表示 \mathbf{r} 处速度为 \mathbf{v}' 的粒子走单位长度经受碰撞并放出速度为 \mathbf{v} 的次级粒子的概率.

定义: $\varphi = \varphi(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = v n(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ = 中子角通量 ($\varphi d\mathbf{r} d\mathbf{v}$ 表示单位时间内 $d\mathbf{r} d\mathbf{v}$ 中中子飞行路程的总长度). 则中子输运方程为

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla \varphi + \Sigma_t \varphi = \int_0^\infty dE' \int d\Omega' \cdot \Sigma_s(E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \varphi(E', \Omega') + S, \quad (3)$$

式中源项为

$$S = S_{\text{外}} + S_{\text{f}},$$

$S_{\text{f}} = \frac{\chi(E)}{4\pi} \int_0^\infty dE' \int d\Omega' v(E') \Sigma_f(E') \varphi(E', \Omega', t)$ 为裂变中子源.

解中子输运方程, 需要给出如下条件:

(1) 描述中子与核相互作用几率的中子参数, 包括中子反应截面、次级中子能量分布和角度分布; (2) 系统的几何形状和尺寸; (3) 系统中各核材料的配置和密度分布.

有了这些条件, 问题原则上可以求解, 但实际求解仍是很困难的, 因为: 第一, 中子核反应截面及其随能量的变化是非常复杂的; 第二, 中子与核发生反应发射出的次级中子随能量和角度的分布很复杂甚至是相互关联的; 第三, 系统中核材料的配置和分布往往也是相当复杂的.

求解输运方程的目的是为了得出 $n(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$, 从而给出有关粒子分布特性的信息. 但是由于输运方程是一个微分积分方程, 包含 7 个自变量: $\mathbf{r}, \mathbf{v}, t$; 而且积分核复杂, 其中 $\Sigma(\mathbf{r}, \mathbf{v}' \rightarrow \mathbf{v})$ 函数的形式比较复杂, 若积分核与分布函数 $n(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ 有关, 则还会引起非线性. 这样输运方程就会成为一个多变量非线性积分微分方程. 为了求解中子输运方程, 必须对方程所涉及到的各种物理因素作简化和近似. 通常所作的简化和近似处理有: 简化处理次级中子随角度变化的输运近似; 简化处理中子截面随能量变化的多群近似; 简化处理中子通量随角度变化的扩散近似或 P_N 近似. 扩散近似等价于 1 阶的球谐近似 (P_1), 在非均匀介质和中子通量密度各向异性比较严重的系统中, 它的误差比较大. 更高阶的球谐方法, 对于多维复杂几何情况, 将变得非常复杂和困难. 为此, 在用数值方法求解中子输运方程时, 更多采用离散纵标 (S_N) 方法和积分输运(碰撞概率)方法等.

3 动态系统研究中的中子物理

核爆炸系统的物理过程非常复杂, 对它的研究涉及核物理、中子物理、凝聚态物理、计算物理、爆轰波与冲击波物理、辐射输运理论、等离子体物理和流体力学等众多学科. 其核心是使处于次临界状态的裂变材料迅速地转变为超临界状态, 并在预定时刻提供一定数量的点火中子的条件下, 引发链式裂变反应而产生核爆炸. 典型的内爆型核爆炸装置的物理过程, 大体可分为高能炸药爆轰、内爆、裂变燃烧、助爆燃烧、辐射流、次级内爆、燃烧和爆炸、效应等几个阶段^[3]. 通常与核反应相关阶段的“总体方程”由辐射流体力学的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程和描述介质物性的状态方程构成. 其中能量方程中要计入核反应放能和辐射输运的贡献. 为了准确计算核反应及其核能的释放, 必须准确计算

系统中子通量场的分布,以及中子与不同种类介质的各种反应。

核爆炸装置研究和设计涉及到一些与普通反应堆设计不同的中子学问题,主要有中子与 γ 耦合输运问题、流体运动对中子输运的影响等。

在早期的研究工作中,由于计算机条件的限制,对于核反应过程中所释放的 γ 射线能量,都假定在其释放出来的地方就地沉积。事实上 γ 射线作为一种特殊的粒子(往往也称为 γ 光子),可以在介质中迁移,它的平均自由程是有限的,认为其就地沉积,是一种粗略近似,它会在一定程度上影响系统不同的材料层的流体力学过程。

在反应堆及一般核系统中,中子与核相互作用时,认为核子处于静止状态,中子以其自身的速度与静止的核子碰撞,并发生核反应。但在核爆炸系统中,介质粒子飞散的速度有时会超过中子的速度,因而假定粒子处于静止状态是不正确的。在中子与核相互作用时,应考虑两者的相对速度,即要严格考虑核子本身运动的影响,否则会造成不能接受的计算误差。以前在爆炸装置模型计算中采用的一种近似处理方法,是假定中子除具有按自己的动能对应的运动速度外,还具有随周围介质一起运动的速度。这样的简化处理,解决了中子不能泄漏出系统、造成核装置裂变放能无限制增长的不合理现象。不过这种“近似考虑核运动影响”的方程,仍存在着尚未预知的误差。

4 核参数研究

核参数描述中子与各种核的作用性质,是中子物理学工程应用研究的重要基础。

上世纪 60 年代初,实验数据和理论数据极为有限,我国通过开展低能核反应简化模型理论及运动学规律的探讨与应用研究,补充了中子反应伴生 γ 光子多重性及能谱的理论计算、中子弹性散射角分布计算,在此基础上,初步编撰形成了有自己特色的基本核数据手册,包括基础热核反应率数表、衰变常数手册、常用核中子截面及角分布数表等。这种条件下给出的数据,误差是比较大的。鉴于当时的计算能力非常局限,主要靠计算尺、手摇计算器、电动计算器,仅有的电子管计算机计算速度为每秒几百次。核工程设计中子学计算,采用三群扩散。面对包含裂变介质和吸收介质以及中子的能谱范围很宽的精细系统,直接采用三群扩散及相应的群参数,计算误差在

30%以上。为了满足工程设计的需要,依据有限的积分实验结果,对制作出的扩散参数进行了较大幅度的人为调整。

比较全面系统地研究低能核反应模型理论计算问题,始于 70 年代中期。通过对两体及少体崩裂反应与裂变动力学局部问题研究,建立了相应的综合核模型的物理方案与系列相关专用程序,补充计算制作了若干评价所缺的核素中子截面及能谱数据,为 70 年代末期以后多群参数的改进研制提供了微观核数据资料和数据评价、参数制作的理论方法。

70 年代末期,微观核数据、积分量的积累有了一定的增加。计算机条件也有了改善,国内有了每秒百万次计算速度的机器,对参数的精度也提出了更高的要求。我们应用并发展了评价核数据库技术,研制完成了一套完整的制作和加工核数据的软件系统(JXQ 程序和 NGCPS 程序系统),这种软件系统属国内首创,在当时亦属国际领先。该软件程序系统受到国际同行的重视。该程序类似于现今国际上通用的 NJOY 程序。它将所有积分量的实验值和实验误差,微观核参数的实验值及实验误差,同时作为限制条件,通过在实验误差范围之内调整微观参数,对核数据进行调整,做到能算准的积分量最多而调整的幅度最小。通过 7—8 年的边使用边完善,我们完成了几套多群参数的制作,还专门制作了适应聚变高能中子输运计算的参数,并得到了成功应用。

到 20 世纪末,随着实验技术的发展,国际上核参数的研究水平已大有提高,公开发表的各种基础核数据也比 20 世纪 70 代要精细全面得多,也有了比较规范的由微观参数制作多群参数的工具程序,我们全面更新了核工程计算用的多群参数系统。目前核参数系统的精度,估计可达 1.5% 的水平。上述 1.5% 的精度水平,一方面是由微观数据及制作参数本身造成的,另一方面也包括积分检验实验中对物质质量及组分等认识的偏差。这一问题需要在今后继续开展深入的定量研究。

进入新世纪以来,我们在中子核反应数据研究领域,发展了核结构与核反应的理论方法,增强了缺乏实验数据能区理论计算的可靠性,提高了关键反应道截面数据的质量。该方法反映了国际先进水平,明显改善计算值与实验数据的符合程度,使数据整体质量提高。这方面的进展为 20MeV 以上高能中子数据计算及不稳定核参数计算提供了适用的计算方法和软件工具(见图 1),开始在高能中子数据库建设中发挥作用。

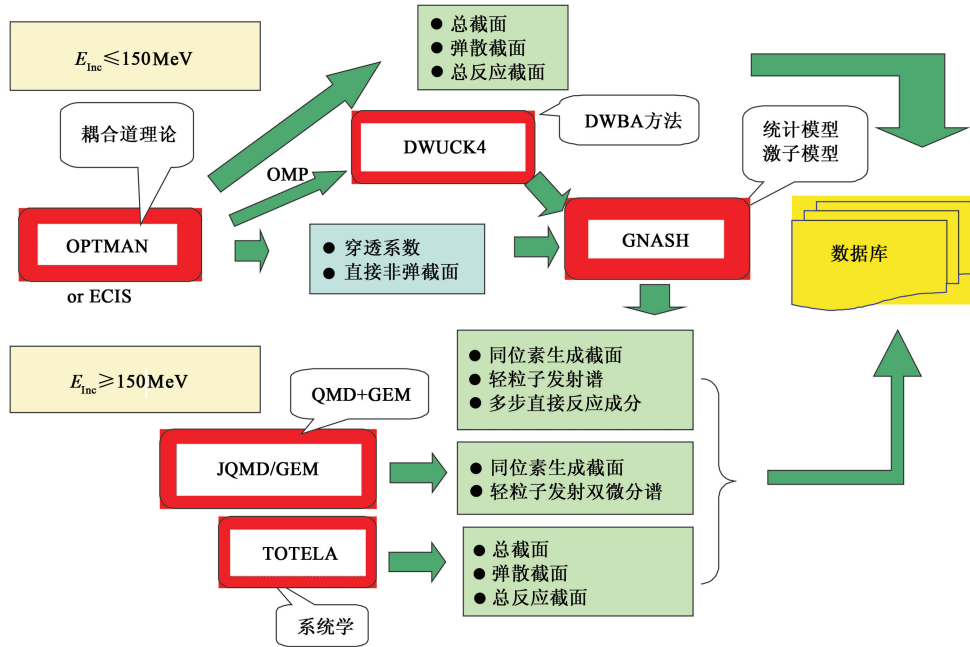


图1 中高能核数据计算评价程序系统

5 粒子输运理论和计算方法

上世纪 60 年代到 70 年代初期,实现了同带核燃料辐射流体动力学相耦合的非定常一维几何中子输运数值模拟,差分数值解有两种处理形式:一种是相应于扩散及改进扩散处理;另一种是卡尔逊型 S_N 普通输运近似处理.用少群扩散方法计算,无论从计算所用的方程和参数的群数,以及原始参数的误差都很大,通过实践摸索,我们得到了调整群参数来弥补整体误差的经验方法和参数调整幅度.

当计算机条件有了一定改善之后,计算方法的研究有两个方向,以提高总体计算中中子学计算的精度:一个是改进扩散方程,另一个是用输运方程计算代替扩散方程计算.在扩散方程的改进方面主要研究了:(1)用变分方法导出的扩散方程;(2)渐近扩散方程;(3)限流的改进扩散方程.通过这方面的研究,中子学计算精度得到了大幅度提高,使扩散方程的中子学计算接近了输运计算的水平.

在输运方程计算方面,为了提高输运方程的计算速度,我们研究了输运理论计算的加速问题,其主要内容有:(1)输运计算的粗网格再平衡加速方法;(2)输运计算的细网格再平衡加速方法;(3)扩散综合加速方法.同时我们还解决了输运计算程序研制的一系列实际问题,使核工程设计中的中子的输运计算逐步代替了扩散计算.在国家高技术研究发

展计划中,我们为能源领域混合堆专题研制了包括核参数的制作与调整,自屏效应计算,中子学的一维、二维、三维计算软件的程序系统 BNDPS.

粒子输运数值模拟的蒙特卡罗(MC)方法与应用研究,也是从 60 年代开始的.从概率论和数理统计出发,研究了 MC 方法的严格数学描述,以中子、光子在介质中微观碰撞规律的参数化描述为基础,同时探讨了运用粒子输运问题 MC 跟踪时的主要降低方差技巧,在 1965 年前后,基本上研制成一维及简单二维模型下多群 MC 方法计算定态中子输运本征值问题及中子场空间分布的基本软件;1966 年初还研制成一维动态介质下中子输运数值模拟计算软件.这两项成果为当时提供了先进的精密计算工具.在近三十年的时间内,我院的 MC 方法研究、程序编制能力全国领先,包括用 MC 方法计算临界质量和 α 本征值,计算本底中子核反应的专门程序等.

90 年代初,启动精确计算程序软件攻关,历经多年努力,完成了二维 S_N 动态输运计算程序、三维 MC 输运与动态流场半耦合计算程序.

近年来,在中子物理学相关模拟计算配合临界堆实验进行理论分析中,我们提出了“虚产生法”处理次临界系统 α 本征值计算的技术方案,提高了实际计算的适应能力.在对脉冲堆实验的理论研究中,我们考虑各向异性散射的影响,在中子不死绝概率的差分计算软件中实现了各向异性 S_N 处理.弱中

子场随机特性及引发持续裂变链几率的理论研究取得进展,并开始应用于中子物理实验的理论分析.考虑中子-中子散射中子输运方程的 MC 计算方法和程序的研究取得进展,得到了一些初步结果.

我们研究了严格考虑介质流体运动的一维球几何中子输运方程及其相关的 S_N 计算方法,并在一维程序中得到实现;定量研究了上述再分配效应对特定核工程问题的影响,分析了其中的物理机制和规律,为评价核工程应用中子输运物理建模的精确性提供了直接和定量的依据.

6 中子物理研究今后的发展

尽管在过去几十年的核工程应用研究中,中子物理学取得了巨大的成就和进展,但由于高能量密度条件下核反应与辐射流体力学相耦合,物理现象和过程太多、太复杂,要建立精密的科学认识,必须经过十分艰巨的努力.

另外,随着新形势下核工程应用的需要,还会不断会对中子物理学和输运理论研究提出新问题.目前已经看到的如:输运理论描写大量粒子运动的统计性质,对于粒子数涨落不可忽略的脉冲堆爆发脉冲

概率分布问题,需要探索新的模拟计算方法,进行细致研究;核系统中由于材料成分不准确引起的数值模拟微扰或核材料衰变等缓变因素对系统中中子学性能影响的分析,对中子学研究的物理建模和数值模拟手段也提出了新的挑战;裂变聚变相关物理问题研究还需要扩展中子能量,对参数和计算都提出新的要求;实际工程问题的进一步研究迫切需要发展比较实用的二维、三维动态系统的输运计算程序.因此中子物理学研究,不论是参数还是程序和计算方法,还有很多工作需要继续努力.

致谢 本文的准备得到刘恭梁、刘成安、张本爱和黄正丰研究员等多位专家的宝贵建议,图 1 由孙伟力研究员提供.对此作者表示衷心感谢.

参考文献

- [1] 杨福家,王炎森,陆福全.原子核物理.上海:复旦大学出版社,1993[Yang F G, Wang Y S, Lu F Q. Nuclear Physics, Shanghai: Fudan University Press, 1993 (in Chinese)]
- [2] 黄祖洽.输运理论.应用物理与计算数学研究所,1983
- [3] 胡思得.核能的军事应用.中国工程物理研究院科技创新论坛文集.科学城,2001