

核理论精选

〔捷克斯洛伐克〕 F. 姜奴西主編

上海科学技术出版社

核 理 論 精 选

〔捷克斯洛伐克〕 F. 姜奴西 主編

万 乙 譯

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是1962年在捷克斯洛伐克举行的原子核理論暑期学校的讲稿。全书分七篇:(1)直接反应,(2)直接反应的色散理論,(3)原子核壳模型和它跟其他核模型的关系,(4)原子核的电磁性质,(5)超导对关联对核性质的影响,(6)原子核的集体性质,(7)核子与輕子間的弱相互作用。

这些論題都是当前原子核理論上发展比較迅速的几个方面。例如用色散关系研究直接反应这理論本身就是一个新的尝试,把基本粒子的色散关系理論方法用到低能核反应中可以得到一些綜合性的結果。又如壳层模型与其他核模型的关系是采用群論方法来把原子核的波函数作适当的分类,从而可以看出有集体模型的轉动带存在。最后象超导对关联对核性质的影响这一問題也是最近两三年来核物理界中議論最多、效果較好的理論工作;这种理論借用了一些場論的方法,吸取了金属超导理論的一些經驗和概念,对 α , β , γ 等的跃迁几率作出了可以和实验符合的結果。

本书可供核物理、原子能、理論物理等专业的科研工作人員、教师、研究生及高年級大学生参考。

3PS 60

SELECTED TOPICS IN NUCLEAR THEORY

F. Janouch

International Atomic Energy Agency

核 理 論 精 选

万 乙 譯

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可証出093号

商务印书館上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本850×1156 1/32 印張16 20/32 排版字數406,000

1966年1月第1版 1966年1月第1次印刷

印數1-1,300

統一書号 13119·682 定价(科六) 2.50元

引 言

这本《核理論精选》是 1962 年 8 月 20 日至 9 月 8 日期間在捷克斯洛伐克低泰曲拉山上由捷克斯洛伐克科学院原子核研究所与国际原子能委员会协作举办的暑期学校中的讲稿。

这些演讲专门讲述理論低能核物理。低能核物理对于尚未建成高能物理实验研究所必需的大型装备的国家当然是很感兴趣的。而且，各国都缺乏专门研究低能物理的理論物理学家。这个暑期学校的一个目的是給青年科学工作者有一个听取低能物理的短期課程并熟悉低能物理方面某些成就的机会。

“核理論精选”这个书名正确地反映了組織这次課程所根据的原则：很显然，在短短几周之内不可能詳細地讲完全部原子核物理，組織者就挑选了这些在近期内进展比較大或发展前途特別好的題目。

現在說几句关于演讲本身的話，这些演讲可粗分为三类。

第一类是直接核反应理論，这理論在最近几年中在研究核結構中起的作用愈来愈重要。

直接核反应(例如削裂及掇拾反应)的一个特征在于原子核的許多自由度中只有少数几个自由度参与这种反应。这一事实使直接核反应的理論处理更有把握。

Austern 教授的演讲說明为什么用直接核反应来研究核結構比較方便，并且有系統地說明扭曲波法及其应用和成就。在最后一节中他討論了直接核反应跟复合核反应之間的关系，和它們各自的独特性质。

色散关系在基本粒子理論研究方面的成功引起人們打算在核

反应的理論,即低能物理的研究中,也应用这种方法。

Shapiro 教授描写了色散方法并且說明怎样把这种方法用到直接核反应上。色散法不用波函数,但只用到反应振幅的某些普遍性质,例如解析性及么正性。用了色散法,除可提供很重要的結果(用最简单的反应振幅表示出各种各样的反应振幅)外,还可以更好地理解已往的象 Butler 的削裂理論的結果。

第二类的演讲是討論原子核模型。由于原子核是一个多粒子系統,而粒子間的力是不完全知道的,因此原子核的理論描述必須以模型表示作为基础。

应用最广泛的一种原子核模型是壳层模型,这种模型是比照原子的电子壳层建立起来的。核子被认为是自由的,且是在核子的某些平均場中运动着的。近年来虽然出现了許多其他的模型,但壳层模型仍是发展最多而且在計算工作中应用最普遍的一种。

在 Elliott 教授的演讲中讲到壳层模型的現狀并且討論了壳层模型跟其他核模型的联系。Elliott 教授不仅讲述在任何核理論教科书上都能找到的一般性的壳层模型理論,而且也討論了象多重态及超多重态的理論、不用派生系数来計算輕核性质的方法等人們还知道得不多的問題。多核子系統的波函数采用群論方法来分类。Elliott 教授的演讲中也說明怎样使壳层模型的基本原理(考虑了組态混合)可以得到具有形变核的波函数的一些特性的波函数。

de Shalit 教授讲述了与原子核內电磁跃迁問題密切有关的理論,电磁跃迁的研究曾提供壳层模型的主要根据,并得出原子核激态的重要数据(其能量,核矩,宇称等)。这些数据一般都十分可靠,因为原子核內的电磁相互作用已經十分明确。除了电磁跃迁外,他也討論了其他的象磁矩及电矩等靜态性质,并且說明对于这些值應該作哪些測量才可以在原子核的結構及核子間的作用力方

面得到与模型无关的結論。

Soloviev 教授及 Belyaev 教授讲授了原子核中的对关联的理論。在研究軸对称核及非軸对称核的最早的模型中,形变被唯象地认为是这种理論中的参数。在这些演讲中假定核子在自洽場中运动时带有一些残余互作用。这种残余互作用(成对互作用)可以用类似于在近代超導理論中所用的方法来考虑,超導方法最初是 Bogolyubov 教授提出的,他因为有病不能来参加这个暑期学校,这个方法现在称为原子核的超導模型。

非常有趣的是发现原子核某些十分特殊的性质可以用极其普遍的概念來說明。例如 Belyaev 教授証明金属在极低温下的超導性和原子核的非球形性都是同一个物理規律的結果。

在 Soloviev 教授的演讲中用超導模型來說明中等及重核的基态及低位激态的能量,自旋,宇称等的特征;并用了很大的篇幅讲述用这种模型計算 α , β 及 γ 跃迁几率的方法。

Belyaev 用超導模型来計算原子核中的集体效应,討論了原子核的平衡条件依赖于核中核子数的关系,形变核中的轉动慣量及球形核中振动能級的来源。

在第三类演讲中, Tolhoek 教授讲了核子与輕子間的弱相互作用理論。他有系統地詳細說明了在弱相互作用中发现宇称不守恒以后新建立起来的弱相互作用的近代理論。他詳尽地評述了 β 衰变理論并討論了弱相互作用的 $V-A$ 相互作用,居間玻色子,电子及 μ 介子中微子等一些一般性的問題。

对于 μ 介子核物理的基本原理曾特別加以注意。虽然 μ 介子核物理是处于基本粒子物理及核物理的边界上,原子核中的 μ 介子俘获的實驗及理論研究不仅可以帮助弄清楚各种弱相互作用問題;也可以帮助研究原子核結構本身;因此目前把这个問題包括在核理論的选题中是恰当的。

这里的讲稿是用事先收到的稿件或在暑期学校中实际讲演的

稿件, 加以少量的且不重要的修改而印出来的. 在书中象克莱毕許-高登系数, 球諧函数等符号沒有統一起来, 单位也是各式各样的, 还有其他不統一的地方. 若要完全統一起来, 則稿件必須作相当大的修改, 这会推迟出版時間; 編者希望这方面的缺点对于讀者不致于太不方便, 在物理文献中这种情形是常見的.

在暑期討論会中有个别参加者所宣讀的文章沒有編入在內, 因为它们大多已經或将要在科学期刊上发表.

F. 姜奴西 (F. Janouch)

目 录

引言

I. 直接反应 1

N. Austern

引言 1

1. 波包 4

2. 扭曲波 10

3. 零程近似——定性結果——表面反应 15

4. 极点——高能 30

5. 絕热理論——折衷法 36

6. 耦合道 47

7. 光譜学：相干性，亲态关系 54

8. 交换及反冲效应 65

9. DI 及 CN 間的关系 70

参考文献 78

II. 直接核反应的色散理論 80

I. S. Shapiro

1. 引言 80

1.1 旧理論的难局 80

1.2 直接核反应的特色 82

1.3 振幅的解析性及費曼图 83

1.4 振幅奇点和核反应的类型 86

1.5 急需解决的問題 89

2. 費曼图的奇点 90

2.1 一些数学定理 90

2.2 两个例子 93

2.3 么正条件 96

2.4 极点图 98

2.5 变数 s, t 和 u	101
2.6 相对于变数 s, t, u 的振幅极点	103
3. 费曼图的奇点(續)	105
3.1 二粒子中間态	105
3.2 二粒子中間态的費曼图	106
3.3 費曼积分	107
3.4 費曼积分奇点的某些性质	111
4. 三角图	113
4.1 三角图振幅	113
4.2 某些核反应的三角奇点的位置	117
4.3 結束語	120
第四章的附录: 根据么正条件推导三角图振幅	122
5. 直接核过程的振幅頂部	127
5.1 頂部的定义	127
5.2 在单粒子模型中的頂部	129
5.3 頂部奇点	132
5.4 約化頂部	137
6. 敲出反应	143
6.1 运动学問題	143
6.2 奇点的运动	144
6.3 复杂粒子的敲出	146
7. 初态及末态中的相互作用	152
7.1 扭曲波法	152
7.2 考虑了初态及末态中的相互作用的图	153
7.3 Omnes-Muskhelishvili 方程	155
7.4 Omnes-Muskhelishvili 方程的解	159
参考文献	162
III. 原子核壳模型和它跟其他核模型的关系	164
J. P. Elliott	
1. 壳模型計算引論	164
2. 群論的应用	168
2.1 对称群 S_k	171
2.2 么正群	176

3. 多体波函数的分类	181
3.1 多重态及超多重态	181
3.2 l^k 组态	185
3.3 j^k 组态	189
3.4 组态混合	195
4. U_3 群和轉动的出現	199
4.1 U_3 分类	200
4.2 U_3 分类与壳层模型本征函数的比較	202
4.3 四极矩力	203
4.4 笛卡儿基	205
4.5 投影积分	207
4.6 四极矩	210
4.7 中心力矩陣元	211
4.8 中心力公式的討論	215
5. 在 ds 壳层核中的应用	218
5.1 Mg^{24} 的譜	218
5.2 偶偶核的偶宇称能級	219
5.3 偶偶核的奇宇称能級	220
5.4 奇- A 核	223
6. 結束語	226
附录	229
参考文献	230
IV. 原子核的电磁性质	232
A. de-Shalit	
导言	232
1. 原子核的波函数	234
2. 电流算符	235
3. 中心場近似	237
4. 广义矩	239
5. 例—质子 $f_{1/2}$ 壳层	241
6. 多极矩的改正	249
7. 磁偶极	252
8. 在奇- A 核中的芯激发	254

9. 磁矩的一般定理	256
10. 各种矩的比较	259
参考文献	262
V. 超导对关联对于核性质的影响	263
V. G. Soloviev	
导言	263
1. 新的变分原理作为哈德雷-福克法的推广	263
2. 原子核中的核子对关联	268
2.1 基本近似	268
2.2 存在中子-质子对关联应有的条件	271
2.3 中等核及重核的超流性质	275
3. 超流核模型	278
3.1 立出超流核模型的方程	278
3.2 奇- A 核的对偶能及单粒子能级	281
3.3 计算精确度的研究及参数的选择	285
3.4 阻塞效应	293
4. 对关联对 α , β , γ 跃迁几率的影响	299
4.1 对关联对 α 衰变时率的影响	299
4.2 β 跃迁几率的超流校正及附加分类法	305
4.3 γ 跃迁几率的超流校正	310
5. 强形变核的基态及激态的性质	311
5.1 奇- A 核的基态及激态的性质	311
5.2 偶偶核激态的两准粒子性	317
参考文献	323
VI. 原子核集体性质的一些问题	325
S. T. Belyaev	
1. 导言及基本方程	325
1.1 导言	325
1.2 考察对关联的方法	326
1.3 广义哈德雷-福克法的基本方程	329
1.4 微扰论	331
1.5 时间有关的自洽场	334
2. 原子核的平衡形状	335

2.1 本問題的系統表述	335
2.2 核子-核子間相互作用的选择	336
2.3 規定平衡形变的方程	338
2.4 一些一般性的結論	339
2.5 小形变区	340
2.6 大形变区 ($\delta R/R \gg \Delta/\mathcal{E}_F$)	343
2.7 从球形核到形变核的相变	346
3. γ -变形核是否存在?	348
3.1 諧振子模型的計算	348
3.2 改进的諧振子模型	352
3.3 有两类核子的系統	355
4. 变形核的轉动. 轉动慣量	358
4.1 本問題的系統表述	358
4.2 轉动慣量的一般算式	359
4.3 基本項 $\mathcal{T}^{(1)}$ 的估計	360
4.4 流体力学极限和度規不变性	362
4.5 $\mathcal{T}^{(2)}$ 項的估計	364
5. 变形核的振动	365
5.1 有四极短相互作用的模型	365
5.2 度規不变的对偶相互作用的效应	370
5.3 結果的判断性分析	373
6. 核子-核子間相互作用的結構. 球形核的振动	374
6.1 在有一定角动量的对偶态中相互作用势的展开式	374
6.2 在漸近近似中展开系数之間的关系	377
6.3 結果的簡短总结及推广	380
6.4 球形核的振动	382
参考文献	384
VII. 核子与輕子間的弱相互作用	386
H. A. Tolhoek	
1. 导言	386
2. 四費米子相互作用的一般性质: 二分量中微子理論	387
2.1 CPT 定理	388
2.2 空間反映 P 的变换	389

2.3	時間反演 T 的变换	390
2.4	电荷共轭 C 的变换	391
2.5	Pauli-Pursey 变换及在 C, P 和 T 下的不变性的条件	392
2.6	二分量中微子理論	394
3.	β 放射性	396
3.1	引言	396
3.2	β 放射性的“經典”現象	397
3.3	从定向核发射的 β 射綫的方向分布	406
3.4	β, γ 圆偏振关联	413
3.5	在 β 发射中发出的电子的极化	417
3.6	β 放射性的一些公式的总结	423
3.7	β 放射性的实验情况	428
4.	μ 介子衰变	431
5.	普适四费米子相互作用: 对于普适 $V-A$ 相互作用的一种建議	434
6.	守恒矢量流的理論: β 衰变中的赝标量	442
6.1	守恒矢量流假設	442
6.2	守恒矢量流理論的实验証据	446
6.3	軸矢量流	451
6.4	β 衰变中的赝标量	452
7.	μ 介子俘获	455
7.1	引言	455
7.2	μ 介子俘获的耦合常数: 一种有效哈密頓	459
7.3	閉合近似法在統計模型中的应用	468
7.4	总俘获时率的壳层模型計算	475
7.5	在氫中的 μ 介子俘获	478
7.6	π 介子衰变为电子和衰变为 μ 介子的比較	480
7.7	μ 介子俘获中的超精細結構效应及同位素效应	480
7.8	C^{12} 的部分 μ 介子俘获时率	484
7.9	O^{16} 的部分跃迁及赝标量相互作用	486
7.10	反冲核及出射中子的角分布	487
7.11	放射性的 μ 介子俘获: 能譜, 光子的方向分布; 光子的圆偏振 [60, 97, 98, 99]	488
8.	中微子过程; 中間矢量玻色子的假設; 有没有两种中微子存在?	490

8.1 奇异性 S 有变化的 III 类及 IV 类过程的推广	493
8.2 中間矢量玻色子的假設	494
8.3 μ 介子的 γ 衰变	498
8.4 布魯克海文实验室的实验	500
附录 I 狄拉克方程及狄拉克矩陣的符号	502
附录 II 場算符及波函数在立出四費米子相互作用的公式时的用 法	507
附录 III 投影算符 D	508
附录 IV 核子及 π 介子的同位旋	509
参考文献	511

I. 直接反应

N. Austern

导 言

为了一致地陈述一个观点起见，这些演讲只讲直接反应标准理论的基本原理及其详细的发展情况。讨论的内容是这些理论的状况，实际计算所用的技术，和其可能的发展方向。

一个反应中的直接相互作用（以后简称为 DI）是只牵涉到一个原子核的许多自由度中少数几个自由度的相互作用。事实上在一个反应中必须牵涉到的最少的自由度是描写初始道及终末道所需的自由度，而 DI 的研究只典型地考虑这些自由度，不考虑其他的自由度。由于这种简单的情形，DI 理论可以进行得十分详细。

DI 过程只考虑一个问题中的一部分波函数。其他部分是跟许多自由度的复杂的激发有关的，因而产生复合核（以后简称为 CN）效应。在一种既有 DI 效应又有 CN 效应的反应中，如果能够有系统地把 DI 效应及 CN 效应分开，那是十分重要的，但是目前还没有合适的方法。目前盛行的工作反而着重于研究其中以 DI 效应为主而 CN 效应差不多可以被忘掉的那些反应和末态。所研究的 DI 截面比弹性散射截面常常大得多。

为什么 DI 效应总是很强，这跟核结构有密切关系。对于入射及出射粒子都是核子的反应，这个问题的解答可以从使独立粒子模型是好的近似的核性质中找到。两个核子间的力的吸引部分是比较弱的且是长程的，并且主要用来建立起一个平均一体势阱。

在一級近似中,这种阱在負能时得出独立粒子壳模型的能級,而在正能时則得出光学模形的彈性散射.在二級近似中,核子間有相互作用,因而能級会分裂或在連續区中跃迁到其他状态.于是大多数的 CN 激发跟基态重迭很厉害,因此激发很弱.过渡到 CN 是逐漸地进行的.另外一种情形,跟基态处在同样壳层模型組态的低激发态則一有作用就可以被激发.由于它們位置低,它們对于粒子发射有大的衰变寬度.于是出現强的 DI 跃迁.这种跃迁的研究是壳层模型在連續区中自然的推广.跃迁到低激发态的 DI 跃迁倾向于純跃迁,因为通往 CN 跃迁的大部分通量已在密得多的高能的末态中用去.在 DI 計算中可以用光学势阱的虛項代表通往 CN 跃迁的通量.(可惜这种虛項平常用得不太确当.)

用氘核,氚核, α 粒子等組合轰击粒子引起的核反应中,在原子核內独立粒子运动不是最主要的方面.在这些情形中 CN 激发比較强.但是产物核的低态仍不是由 CN 方式来的,且跟入射道重迭很厉害.这些状态有相当部分被入射波中的高角动量分波所激发,这种高角动量分波受到它們的角动量(通过离心力势垒)的屏蔽作用使不能太快地进入到 CN 方式中.这样的情况我們称之为表面反应.表面反应中最容易发生有一个或两个核子傳送的重排碰撞(rearrangement collision).

轰击能提高,DI 跃迁相对于 CN 激发更加强大,这是因为发射粒子的过程比形成激发态的过程更为迅速.不問轰击粒子性质如何都是这样的.

CN 理論假定反应系統处于一种完全平衡的状态,激发的能量是統計地分布于全部可以分布的能級上的.显然,DI 理論所假設的是另一个极端.人們也可設想一些中間的情况,这里原子核是逐漸地趋向于完全平衡的状态的. Izumo^[1] 最近根据壳层模型提出这样的理論,他假定原子核在沒有发展到所有粒子都达到完全 CN 平衡之前,在最外面主壳层中的核子常會出現一种部分平

衡状态。可能在出现这种效应时，那连接最外层及内层的矩阵元，至少在能量取平均值时确实是很小的。

总的说来，我依照通常的办法集中注意 DI 式的反应，而忽略了 CN 式的反应。这意味着所进行的分析只限于在某些能量范围内的某些核反应。我不想规定这种理论所适用的范围，我只是说当我们遇到 DI 理论可以很好起作用的时候实验上可以看得很清楚。DI 及 CN 互相竞争的情形现在还处理得不怎样好。这个问题以后还要详细讨论。

这里可以略为谈谈使残核处在较高状态的一些反应。因而我们要研究一下从这种反应中发出的粒子的连续谱。用 14 Mev 中子的 (n, n') 反应常属于这种类型。显然，在这些反应中因为混合着 DI 及 CN 两种方式，所以会产生连续谱。显然也很难想象从实验上怎样可以把这两种方式的比例定出来。探测仪器只能定出进入某一末态的粒子通量，但不能定出波函数的自由度的数目。实验工作者常采用一种很粗糙的观念来解决这个问题，因为 DI 截面倾向于集中在前半球中，因此可以从截面分为前后对称或前后不对称来区别 CN 或 DI 部分。事实上，在 DI 中，截面峰平常确是在向前方向，因为入射的轰击粒子只跟靶核的一小部分起作用。于是在反应中的动量交换倾向于入射粒子动量的数量级，或小于入射粒子动量。但是 DI 截面在后半球中并不就等于零，而且有时很大。此外，即使在 DI 角分布中大家知道的小角度的向前峰也并不带走了全部的 DI 通量，大部分通量是在 90° 散射角附近。由于这种理由，实验工作者通常所采取的办法必然低估了连续谱中的 DI 部分。他们估计混进 5% 到 10%；正确的数字可能是 10% 到 20%。这个问题是困难的。我要指出的是有可能作改进的分析。有可能用一些更可靠的新技术来计算 DI 角分布，以便对所述的情形中得到一套典型的 DI 曲线，并且从这些曲线单独估计 DI 部分的平均的前后不对称性。这时候，在连续谱中 CN 部分既然肯定