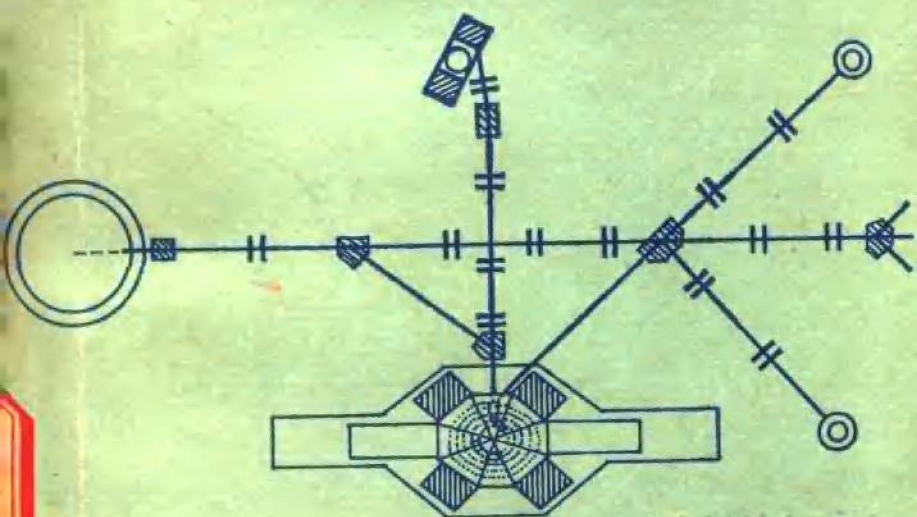


# 重离子物理

ZHONGLIZIWULI



原子能出版社

## 内 容 简 介

本书简要地介绍了原子核研究的前沿学科和边缘学科——重离子物理学。它包括远离 $\beta$ 稳定线核素与人工合成超铀元素的研究、重离子核反应中深部非弹性散射过程、全融合过程以及前平衡发射过程、原子核高自旋态现象、重离子核反应实验设备、核化学方法等。此外，还包括重离子在原子、分子、固体和其他物理学方面的应用。最后还介绍了研究相对论重离子碰撞的简况以及重离子加速器发展的历史和现状。

这是一本中级科技读物，叙述侧重物理图象，力求避免烦琐的数学公式。读者对象是大学物理系师生和广大科技人员。

### 重离子物理

戴光曦 刘建业 徐树威 郭箕第  
顾金南 谢秀君 张敬业

原子能出版社出版  
(北京2108信箱)

国防科委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092  $1/32$ ·印张12 $3/8$ ·字数275千字

1981年6月第一版·1981年6月第一次印刷

印数001—2100·统一书号: 15175·277

定价: 1.80元

## 序 言

重离子物理学是在原子核物理学基础上发展起来的一门综合性的学科，目前它已成为核物理基础研究方面的一个很有生命力的前沿领域。其中，非核重离子物理是采用核手段来研究其他学科的一门十分活跃的边缘学科。

1976年，在西德南部达姆施塔得重离子研究中心建造的一台超级直线重离子加速器开始出束。这台加速器首次可将天然存在的最重的原子核（铀核）加速到单核能  $10\text{MeV}$ 。人们有了这种类型的“全离子”加速器，就可以得到具有足够流强和多种能量范围的束流，这意味着大大提高了当代重离子核物理和非核重离子物理研究的设备水平。

这里所说的重离子不是普通的化学概念，而是专指比氦离子更重的离子。当重离子能量小于靶核的库仑位垒时，它在原子物理、分子物理和固体物理等方面有多方面的应用；当重离子能量在靶核库仑位垒附近时，主要用来研究重离子核物理；当重离子能量处于中能范围时（每个核子能量在  $\text{GeV}$  量级），除用来研究相对论性重离子碰撞外，还可望去解决惯性约束聚变等应用问题。

重离子物理学的发展经历了如下几个阶段。大致在50年代中期，有三个国家（美、苏和瑞典）的四台加速器已可能将碳（C）、氮（N）、氧（O）等重离子加速到库仑位垒的能量，但束流是相当小的。一开始仅仅做一些少数核子转移反

应方面的实验工作，但却招来了不少非议。这是因为用重离子转移反应研究核谱不如轻离子简便、有效。于是，在一些核物理学家和核化学家的建议之下，重离子束很快被用于合成超铀元素实验。1959年瑞典小组声称合成了102号元素，1961年美国伯克利小组声称合成了103号元素。由于当时束流强度太小，检测技术的灵敏度不高所以后来经过重复实验证明都是错误的。真正成功地合成超铀元素始于六十年代中期，此后，先后合成了102、103、104、105号元素。近年来已经合成了106、107号元素，但在数据和方法方面都有所争议。超铀元素的合成应当看成是重离子核物理与核化学的一大功绩。

对在超铀元素的合成中出现的一些新现象的研究也促进了重离子物理的发展。例如，在合成104号元素中发现了 $^{242m}\text{Am}$ 的裂变同质异能态，它的半衰期是14毫秒。过去裂变理论是单纯建立在液滴模型的基础上的，用这种理论根本无法解释这种现象。后来，有人提出了壳修正方法，把液滴模型理论与原子核的壳结构效应结合起来了。对于许多重铀系元素，根据壳修正方法可以通过计算获得裂变双峰位垒，从而合理地说明了裂变同质异能态存在的原因。同时，也把建立在液滴模型基础上的原子核基态质量计算的精度提高了一个数量级。这样，人们就有可能对于一些未知的原子核的基态稳定性作出有意义的预言。1969年，理论核物理学家利用壳修正方法，经过复杂的计算预言在 $Z=110-116$ 、 $N=184$ 附近存在半衰期较长的幻核，通常称为超重核稳定岛。在这个理论预言的推动下，法国、苏联、美国先后在1970年左右组装了三台新的重离子加速器。但事与愿违，虽然利用这些

加速器对各种最佳“靶-炮弹”组合的建议都试过了,但最后连一个超重核都没有合成出来。十年来,探索超重核的确遇到许多困难,但在重离子核物理的其他方面却获得了可喜的成就。例如,1971年人们通过 $\alpha$ 粒子反应发现冷旋(Yrast)线附近高自旋态的转动惯量存在回弯现象之后,就用重离子核反应获得了更大量的实验资料,从而推动了理论工作深入地发展。这就把原子核的转动惯量与原子核内核子本征态和原子核的形变在高自旋的状态下连系起来了。1973年实验发现重离子碰撞中存在着很强的动能阻尼,这被称之为深部非弹性碰撞。研究该过程中动能、质量、中子质子比、角动量等各种物理量的弛豫过程是目前一个很热门的课题。同时人们还发现了重离子反应中存在着多种方式的非平衡的轻粒子发射。1977年,实验还发现了在更高自旋的情况下,中子数在84—90范围附近存在一个同质异能岛,被称之为陷阱态。目前,人们正从实验和理论两方面对这种现象进行深入地探索。

与轻离子核反应相比,重离子核反应可以产生更大的动能、角动量、质量、电荷传递。所以人们有可能借以获得更加远离 $\beta$ 稳定线的新核素和更高原子序数的超铀元素,同时也可以将反应余核激发到很高的激发能和很高的自旋态(比如激发到几十或近百个左右)。除此之外,由于大标度的核物质重叠、强的动能耗散,所以在重离子反应中明显地暴露出各种物理量的分配从非平衡状态逐步过渡到平衡态的弛豫过程。因此,重离子核反应突出了核的非平衡态过程。

和轻粒子相比,重离子与原子、分子、固体和生物等比原子核更高的物质层次有更强烈的电磁相互作用,有更大的

能量堆积密度。同时，利用全粒子加速器可以在更宽的范围内选择重离子的种类与能量。所以，非核重离子物理成了一门十分活跃的边缘科学。

重离子核反应开放道很多，实验中需要探测的粒子种类及其相关的物理量也大为增加。所以，需要进行多参数的关联测量。比如，关联测量各种出射粒子的动能、能损率、飞行时间、 $B_0$ 值、角动量和极化度等，以确定其角分布、能谱、自旋、质量、电荷等物理量。这种测量的复杂性迫使人们不得不把过去轻离子反应的各种技术，甚至连裂变物理、中子物理和 $\gamma, \beta, \alpha$ 衰变的各种测量技术也统统综合起来利用。因此，重离子核物理对核探测技术的发展也起了很大的推动作用。

我国研究重离子物理始于七十年代初期，因考虑到一般物理学界对这门科学还比较陌生，所以我们决定写这本书，向读者简要地介绍近年来重离子物理发展的几个重要方面，即远离 $\beta$ 稳定性核素与新元素合成（第一章）、重离子核反应机理（第二、三章）、关于高自旋态问题（第四章）、重离子核物理与核化学实验设备与方法（第五、六章）、重离子在其他学科中的应用（第七章）、相对论重离子碰撞简介（第八章）以及重离子加速器（第九章）。

本书由七位同志分头编写，各章分配如下：序言（戴光曦、徐树威）、第一章（顾金南）、第二章（刘建业）、第三章（徐树威）、第四章和第八章（张敬业）、第五章和第七章（戴光曦）、第六章（谢秀君）、第九章（郭箕第）。由于我们水平有限，选材不一定十分准确，有些重要的研究方向有可能忽视，有些非核物理方面的阐述可能不很确切，希望广大读者提出

宝贵意见，以待有机会再版时改正。

本书插图系王晓秋、徐国俊和王家杰三同志在百忙中抽空精心描绘的，在此我们深表谢意。

作者

1979年7月于兰州

# 目 录

## 序言

## 第一章 远离稳定性核的研究、拓广和探索 ..... ( 1 )

### §1.1 核对衰变和裂变的不稳定性的研究 ..... ( 4 )

#### 1.1.1. 核的液滴结合能和稳定性 ..... ( 5 )

#### 1.1.2. $\beta$ 缓发粒子发射 ..... ( 7 )

#### 1.1.3. 裂变物理的新发展 ..... ( 15 )

### §1.2 远离 $\beta$ 稳定线核的研究和拓广 ..... ( 20 )

#### 1.2.1. 形变壳模型 ..... ( 20 )

#### 1.2.2. 远离 $\beta$ 稳定线的球形闭壳核 ..... ( 23 )

#### 1.2.3. 远离稳定性的形变闭壳核 ..... ( 24 )

#### 1.2.4. 形状共存现象 ..... ( 28 )

#### 1.2.5. 转变区核 ..... ( 33 )

### §1.3 超重核的探索 ..... ( 35 )

#### 1.3.1. 存在超重核的理论预言 ..... ( 35 )

#### 1.3.2. 用重离子反应合成超重核的探索 ..... ( 42 )

#### 1.3.3. 反常核 ..... ( 45 )

### 参考文献 ..... ( 48 )

## 第二章 重离子深度非弹性碰撞..... ( 50 )

### §2.1 重离子核碰撞过程中的宏观性质及其经典描述..... ( 52 )

### §2.2 重离子核碰撞过程中弛豫现象的理论描述 ..... ( 61 )

### §2.3 重离子深度非弹性碰撞中各种宏观物理量 的弛豫过程 ..... ( 64 )

#### 2.3.1. 动能耗散过程 ..... ( 66 )

#### 2.3.2. 质量或电荷转移问题 ..... ( 80 )

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| 2.3.3. 角动量转移过程 .....      | ( 88 )  |
| 2.3.4. 中子过剩自由度的弛豫问题 ..... | ( 102 ) |
| 2.3.5. 角分布 .....          | ( 107 ) |
| 2.3.6. 轻粒子发射 .....        | ( 112 ) |
| 2.3.7. 小结 .....           | ( 112 ) |
| 参考文献 .....                | ( 117 ) |

### 第三章 重离子碰撞过程中的全熔合反应和轻

|                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| 粒子发射.....                       | ( 119 ) |
| §3.1 入射道的临界角动量及其限制条件 .....      | ( 119 ) |
| 3.1.1. 熔合位垒 .....               | ( 120 ) |
| 3.1.2. 入射道的临界角动量 .....          | ( 121 ) |
| 3.1.3. 临界距离 .....               | ( 122 ) |
| 3.1.4. 格拉斯-莫泽耳理论和经典动力学理论 .....  | ( 124 ) |
| 3.1.5. 很重系统或高能情况下可能的限制条件 .....  | ( 130 ) |
| §3.2 处于高角动量态、高激发态的复合核衰变 .....   | ( 132 ) |
| 3.2.1. 蒸发轻粒子 .....              | ( 132 ) |
| 3.2.2. 由裂变道退激 .....             | ( 136 ) |
| 3.2.3. $\gamma$ 退激 .....        | ( 141 ) |
| §3.3 几个有待深入研究的问题 .....          | ( 141 ) |
| 3.3.1. “熔合窗” .....              | ( 142 ) |
| 3.3.2. 振荡结构 .....               | ( 143 ) |
| 3.3.3. “壳效应” .....              | ( 143 ) |
| 3.3.4. 区分对称裂变的来源 .....          | ( 144 ) |
| §3.4 轻粒子发射 .....                | ( 144 ) |
| 3.4.1. 单举实验 .....               | ( 146 ) |
| 3.4.2. 碎片-碎片关联实验 .....          | ( 150 ) |
| 3.4.3. 轻粒子-碎片关联实验 .....         | ( 153 ) |
| 3.4.4. 轻粒子- $\gamma$ 关联实验 ..... | ( 159 ) |
| 参考文献 .....                      | ( 161 ) |

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| 第四章 关于高自旋态问题 .....          | ( 163 ) |
| §4.1 简单的历史回顾.....           | ( 163 ) |
| §4.2 近十年来的一些发展 .....        | ( 164 ) |
| 4.2.1. 回弯现象 .....           | ( 165 ) |
| 4.2.2. 机理 .....             | ( 169 ) |
| 4.2.3. 判据 .....             | ( 172 ) |
| 4.2.4. 超高自旋态和陷阱态的大略图象 ..... | ( 180 ) |
| 参考文献 .....                  | ( 185 ) |

|                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| 第五章 重离子核物理实验设备.....               | ( 186 ) |
| §5.1 快速脱束测量装置 .....               | ( 190 ) |
| 5.1.1. 气体喷射技术 .....               | ( 191 ) |
| 5.1.2. 电磁速度选择器 .....              | ( 196 ) |
| 5.1.3. 在线同位素分离器 .....             | ( 198 ) |
| §5.2 核反应中碎片质量、电荷与动能谱的测量 .....     | ( 202 ) |
| 5.2.1. $\Delta E$ - $E$ 型探测器..... | ( 205 ) |
| 5.2.2. 飞行时间测量 .....               | ( 206 ) |
| 5.2.3. 大型精密磁谱仪 .....              | ( 209 ) |
| 5.2.4. 多粒子符合谱仪 .....              | ( 213 ) |
| §5.3 角动量与自旋的极化测量 .....            | ( 217 ) |
| 5.3.1. $\gamma$ 多重性实验装置 .....     | ( 217 ) |
| 5.3.2. 反应余核或出射核的极化测量装置 .....      | ( 222 ) |
| §5.4 原子核核态的寿命测量 .....             | ( 228 ) |
| 5.4.1. 柱塞装置 .....                 | ( 229 ) |
| 5.4.2. 单晶阻塞效应作复合核寿命测量 .....       | ( 232 ) |
| 参考文献 .....                        | ( 235 ) |

|                        |         |
|------------------------|---------|
| 第六章 重离子核化学方法 .....     | ( 237 ) |
| §6.1 核化学在重离子合成超铀元素和超重元 |         |

|                                |             |
|--------------------------------|-------------|
| 素中的作用 .....                    | ( 238 )     |
| §6.2 核化学在重离子裂变中的作用 .....       | ( 243 )     |
| §6.3 核化学方法 .....               | ( 247 )     |
| 6.3.1. 氦气嘴转移技术在核化学中的应用 .....   | ( 248 )     |
| 6.3.2. 放射化学法 .....             | ( 250 )     |
| 参考文献 .....                     | ( 269 )     |
| <br>第七章 重离子在其他学科中的应用 .....     | <br>( 272 ) |
| §7.1 束箔光谱学 .....               | ( 274 )     |
| 7.1.1. 原子、离子光谱的测量 .....        | ( 276 )     |
| 7.1.2. 兰姆线移的测量 .....           | ( 277 )     |
| 7.1.3. 能级寿命测量 .....            | ( 278 )     |
| 7.1.4. 原子光谱精细结构和超精细结构测量 .....  | ( 279 )     |
| §7.2 重离子束引发可控聚变反应 .....        | ( 283 )     |
| 7.2.1. 重离子束与其他引发束的比较 .....     | ( 284 )     |
| 7.2.2. 进一步研究的课题 .....          | ( 285 )     |
| §7.3 重离子束与原子、分子的作用 .....       | ( 289 )     |
| 7.3.1. 研究原子内壳层的结构 .....        | ( 290 )     |
| 7.3.2. 研究分子的结构 .....           | ( 292 )     |
| 7.3.3. 超重准原子与真空衰变正负电子对 .....   | ( 296 )     |
| §7.4 重离子束与固体的作用 .....          | ( 301 )     |
| 7.4.1. 表面物理研究 .....            | ( 302 )     |
| 7.4.2. 辐射损伤和模拟试验 .....         | ( 307 )     |
| 7.4.3. 重离子注入半导体材料 .....        | ( 311 )     |
| 7.4.4. 单晶体中的沟道效应 .....         | ( 314 )     |
| §7.5 重离子射线在生物研究与医学上的应用 .....   | ( 320 )     |
| 7.5.1. 重离子射线的软组织造影术及示踪应用 ..... | ( 321 )     |
| 7.5.2. 重离子射线治疗肿瘤与癌症 .....      | ( 322 )     |
| 参考文献 .....                     | ( 324 )     |

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| 第八章 关于相对论重离子反应的简单介绍 .....      | ( 325 ) |
| §8.1 开展相对论重离子反应研究的意义 .....     | ( 325 ) |
| 8.1.1. 核冲击波 .....              | ( 325 ) |
| 8.1.2. 核物质的相变 .....            | ( 327 ) |
| 8.1.3. 作为强子的多体体系的核 .....       | ( 328 ) |
| 8.1.4. 把核看成是层子的复合系统 .....      | ( 329 ) |
| 8.1.5. 利用相对论重离子束实现惯性约束聚变 ..... | ( 331 ) |
| §8.2 一些实验结果及其初步理论解释 .....      | ( 332 ) |
| §8.3 各国筹建相对论重离子加速器的概况 .....    | ( 336 ) |
| 参考文献 .....                     | ( 338 ) |
| 第九章 重离子加速器 .....               | ( 339 ) |
| §9.1 重离子加速器的某些基本考虑 .....       | ( 341 ) |
| 9.1.1. 重离子加速器的主要特性参数 .....     | ( 341 ) |
| 9.1.2. 表征重离子加速器的主要参数 .....     | ( 342 ) |
| 9.1.3. 加速重离子所遇到的一些特殊问题 .....   | ( 343 ) |
| §9.2 重离子加速器的类型 .....           | ( 346 ) |
| 9.2.1. 静电加速器 .....             | ( 349 ) |
| 9.2.2. 重离子直线加速器 .....          | ( 358 ) |
| 9.2.3. 等时性回旋加速器 .....          | ( 365 ) |
| 9.2.4. 超导回旋加速器 .....           | ( 368 ) |
| 9.2.5. 重离子同步加速器 .....          | ( 369 ) |
| §9.3 重离子加速器的重要部件 .....         | ( 370 ) |
| 9.3.1. 重离子加速器的离子源 .....        | ( 371 ) |
| 9.3.2. 加速器的控制系统 .....          | ( 375 ) |
| 9.3.3. 束流输运系统 .....            | ( 377 ) |
| §9.4 重离子加速器的今后展望 .....         | ( 378 ) |
| 参考文献 .....                     | ( 380 ) |

# 第一章 远离稳定性核的研究、拓广和探索

今天，化学元素周期表已填到了 107 号元素，原子核也达到了 2000 多种。人类认识化学元素和原子核的性质已经经历了一个漫长而曲折的过程。

1911 年，原子核方被发现。这一发现为阐明原子结构提供了一条具有决定意义的线索，并很快导致量子力学的建立。但核的内部结构并没有被揭示出来。只是后来才知道，早期发现的核的  $\alpha$ 、 $\beta$  及  $\gamma$  衰变是强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用三者的体现。

上世纪末和本世纪初，人们逐步认识了天然放射现象和天然存在的稳定核。1932 年发现中子，并认识到了核是由中子和质子组成的，1934 年发现了人工放射性，1938 年发现了裂变现象。随之，提出了核的模型理论，这就是将核比拟为液滴的液滴模型<sup>[1]</sup>，用来解释裂变现象和复合核反应等。

1949 年，梅逸 (Mayer) 等<sup>[2]</sup>总结了大量原子核的低激发态实验结果，看到了并解释了核内的幻数，这就是有名的壳模型。

到五十年代初期，玻尔和莫特逊 (Bohr, Mottlson)<sup>[3]</sup>提出了集体模型，尼尔逊 (Nilsson) 等提出了形变壳模型<sup>[4]</sup>，用来解释核内的集体运动——转动和振动现象。五十年代后期，又引入和发展了核子成对关联理论。

这些，正是轻离子加速器(还有反应堆)上的研究成果，主要是 $\beta$ 稳定线附近及其两边不远的核性质的研究成果。

现在，我们正处在原子核研究领域可能大发展的门口。重离子束使我们可以在相当新的条件下研究核物质；而中能探针正为研究核结构提供具有新的高分辨率水平的显微镜，这可能使人们对核的认识来一个新的飞跃。

重离子炮弹的应用，重离子物理的发展，是60年代和70年代核物理的前沿之一。超铀元素的先后合成，超重元素的探索，裂变同质异能态的发现，高角动量自由度的开拓，千百种远离 $\beta$ 稳定线核的合成，大块核物质的相互作用等，都是重离子物理研究的成果。今后，它还可能开拓更广阔的前景。

应用重离子炮弹的更大规划是探索核物质的稳定性与中子数、质子数及形变参数的关系（参看图1.1）。

令人鼓舞的前景是，可能存在质量数远大于迄今已达到的亚稳核岛<sup>[5]</sup>——超重核岛，可能合成新核4000—5000种，为现有核的两倍到三倍。

我们知道，若以中子数（N）、质子数（Z）为坐标轴作图，如图1.1<sup>[6a]</sup>，则稳定核（黑方块）和其邻近的长寿命放射性核组成“半岛”，而通过稳定核中心向上延伸的曲线为 $\beta$ 稳定线（未画出）。稳定核为300种左右，已有核为2000多种<sup>[7]</sup>，滴线（ $S_n, S_p=0$ ）内包含的核（包括超重核）约6000—7000种。图中圆圈为形变区，黑圆为球形壳核和形变壳核。此图集中反映了原子核的稳定性与N、Z及形变的关系。

要合成并进而研究这些核，无疑是十分艰巨的，因为它们的寿命很短。至于超重核，还有产生截面极小的困难，且其性质除了理论所预言的以外，一无所知。

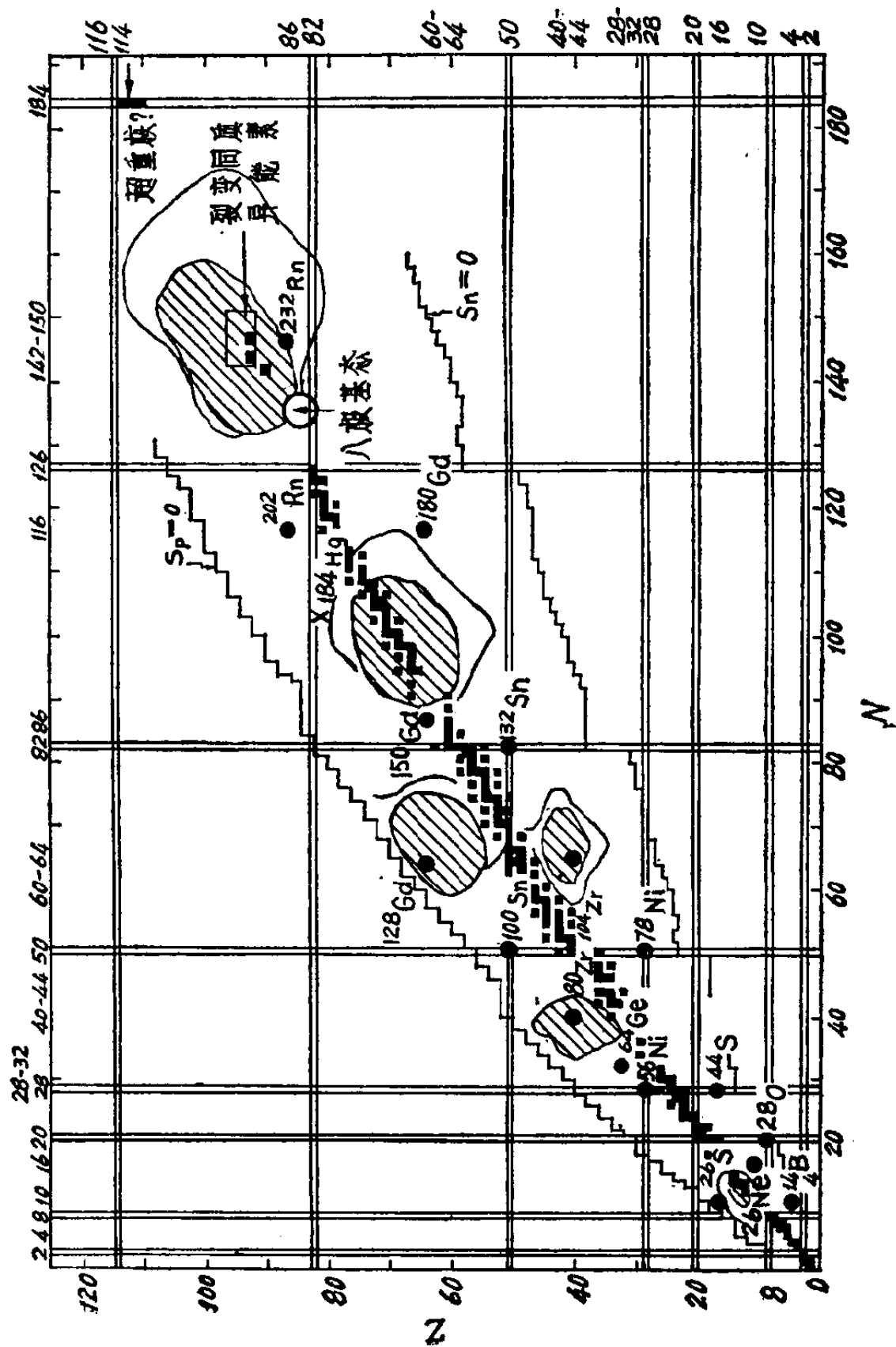


图1.1核素图

本章只是就图 1.1 所及，分别叙述主要与重离子物理有关的远离稳定性核的研究、拓广和探索，对低激发态（包括基态）、低角动量态情况下核对  $N$ 、 $Z$  及形变的稳定性问题作简要的介绍。

## §1.1 核对衰变和裂变的不稳定性的研究

最早对核的研究是从观测放射现象—— $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  衰变开始的。研究放射衰变和裂变现象可以获得核的内部结构的很多信息。特别对远离  $\beta$  稳定线核，已经出现并还可能出现一些新的衰变方式。所以这是研究核素的重要途径之一，当然人工放射性还有广泛的应用。裂变的发现对人们的认识和社会发展的影响，已是众所周知的。

在合成远离  $\beta$  稳定线核中，发现了一些新的衰变现象。首先是在裂变产生的丰中子核中发现了  $\beta$  缓发中子发射；过了十二年，才在重离子反应合成的很多远离  $\beta$  稳定线核中发现  $\beta$  缓发质子发射、 $\beta$  缓发  $\alpha$  发射。当人工合成核素向重核方向拓广时，发现了裂变同质异能素， $\beta$  缓发裂变。可以预言，随着新核素的大量合成，可能还会有新的衰变方式被发现，从而深化人们对核性质的认识。

在重核铀附近，一般存在  $\beta$  衰变、或  $\alpha$  衰变、或自裂变 (SF)，自裂变甚至可能成为主要的衰变方式。对超重核，理论预言的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、SF 三种衰变的竞争，参看图 1.19。一般说来，在上述三种衰变之后，新核仍处于激发态者，需通过  $\gamma$  衰变退激到基态。所以，这三种衰变方式通常都伴随有  $\gamma$  衰变。

### 1.1.1. 核的液滴结合能和稳定性

几十年来的实践告诉我们，核对  $N$ 、 $Z$  的稳定性问题，可用液滴模型及其结合能公式将它的轮廓勾画出来。

在核内，由于核力的存在，核并不等于它所包含的中子、质子的质量和，而有能量的变化，这通常叫做原子质量亏损或核的结合能：

$$B_I = Zm_H + (A - Z)m_N - M \quad (1.1)$$

$m_H$ 、 $m_N$  和  $M$  分别为氢原子、中子和核的实验质量。

在缺乏关于核力的完整理论时，可以依据核力的短程性及其饱和性等，将核比拟为液滴来导出结合能的半经验公式，即核的液滴结合能公式：

$$B_L = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 \frac{(N - Z)^2}{A} - a_4 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \delta(A, Z) \quad (1.2)$$

当用 MeV 为单位时，这些参数定出为<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} a_1 &= 15.753 \\ a_2 &= 17.804 \\ a_3 &= 26.192 \\ a_4 &= 0.7103 \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} 33.6 A^{-3/4} & \text{奇奇核} \\ 0 & \text{奇A核} \\ -33.6 A^{-3/4} & \text{偶偶核} \end{cases} \quad (1.4)$$

这里  $A = N + Z$ ，式 (1.2) 中各项分别为体积能、表面能、对称能、库仑能和成对能项或奇偶质量差项。

下面我们简略地讨论核的稳定性。