

重离子的新用途

〔苏〕B. C. 巴拉申科夫 著

闵 亚 王树芬 译

黄高年 校

科 学 出 版 社

1 9 8 3

内 容 简 介

本书是一本中级科普读物。作者用浅显的语言，深入浅出地介绍了重离子物理的一些基础知识，发展趋势，在国民经济、科研生产中的新用途。

本书适合于具有中等文化水平的读者阅读，也可供一般科技人员、工程师、高等院校师生阅读和参考。

В. С. Барашеннов

НОВЫЕ ПРОФЕССИИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Москва Атомиздат 1977

重 离 子 的 新 用 途

〔苏〕В. С. 巴拉申科夫 著

闵 亚 王树芬 译

黄高年 校

责任编辑 王玉生 姚平录

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 6 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1983 年 6 月第一次印刷 印张：3 1/4

印数：0001—3,600 字数：61,000

统一书号：13031·2301

本社书号：3147·13—3

定 价：0.45 元

目 录

1. 重离子是什么,有什么用?	1
2. 重离子物理学	7
3. 原子核的“地理学”	11
4. 稳定岛	15
5. 量子电动力学正确吗?	20
6. 离子注入	21
7. 光导	25
8. “磁泡”	30
9. 高温超导	35
10. 辐射肿胀	40
11. 核过滤器	53
12. 真空分层绝热	75
13. 材料表面的研究	78
14. 离子射线照相	80
15. 在医学和生物学中的应用	81
结束语	86
参考文献	90

1. 重离子是什么,有什么用?

读者从中学物理课程中已经清楚地了解到,化学元素,从氢一直到最重的元素,原子都是由处在原子中心的带正电荷的核和围绕着核的电子所组成。由于核的正电荷完全被电子的负电荷所抵销,所以,整个来说,原子是中性的。当原子的电子被全部剥离或者部分剥离的时候,它就带有正电荷了,这时人们把它称为**离子**。现在,通常是把所有质量比氦核(${}^4\text{He}$)质量大的离子都叫作**重离子**。当然,这种定义是很相对的。有些情况下,把氢以外(其中包括电离的氢分子 H_2^+)所有元素的离子都归于重离子。关于我们所谈的究竟是哪些离子,这个问题以后会清楚的,所以,这里就不再细述了。既然,重离子具有电荷,就可以借助于电磁场把它们加速,使它们具有很高的能量。

当原子爆炸时,空气离子产生强烈的相互作用,在五十年代初,当这一现象被证实之后不久,在美国建成了第一台加速氮核的重离子加速器。在依·维·库尔恰托夫的创议和支持下,杜布纳的重离子加速器于1960年建成。该加速器是一台电磁铁的极靴直径为310厘米的回旋加速器(故名Y-300)。该加速器有一个独特的多电荷气体放电离子源,它使用相应的气态元素和化合物,或者采用使固态物质蒸发的方法。

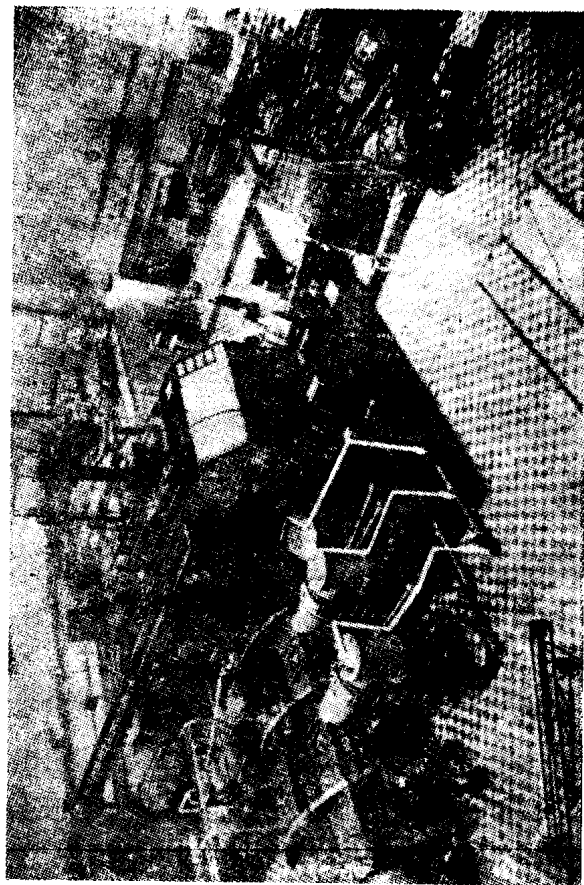


图 1 杜布纳联合原子核研究所的 310 厘米回旋加速器 (Y-300) 的全貌

图的中间是电磁铁(该电磁铁一部分在房间的下层)。左面是两个为 D 盒提供加速电压脉冲的大功率高频系统的圆柱形谐振腔,以及用以形成加速器内高真空的大功率真空泵装置。右面是离子输运管道,偏转磁铁(它把被加速的离子束送往不同的靶子)以及聚焦电磁透镜。

图 1 示出 Y-300 加速器的全貌。图 2 是加速器拆开后的情况,从图上可以看到加速部分(D 形盒)。图 3 展示的是磁极和加速室,被加速的离子就在这个室中作螺旋状“绕转”。

用 Y-300 回旋加速器可以加速锆(在元素周期表中,锆的原子序数 Z 为 32) 以下的所有离子,得到的离子束有较高的强度,离子束的能量是 5—8 兆电子伏/核子,即对组成离子束的每个核子来说,是 $(5-8) \times 10^6$ 电子伏。这样的能量足以使离子克服靶核库仑场的强大斥力,从而与核接近并产生核反应。如果对离子的能量要求不高,那么借助于 Y-300 还可以加速更重的离子。

例如,可以得到大束流的氙离子($Z = 54$)束,能量为 150 兆电子伏,即每个核子为 1.1 兆电子伏。这样的离子不引起核反应。但是,用它去辐照物质时,可以使被照射物的晶格产生严重的损伤,使组成该物质的分子分裂;如果辐照的时间比较长,甚至能够大大地改变该物质的化学成分。从下面的叙述我们将知道,这些效应正是重离子束许多实际应用的基础。

几年以前,杜布纳的联合原子核研究所建成了由两台加速器组成的串级系统。一台是 Y-300 回旋加速器,一台是直径稍小的 Y-200 回旋加速器。在这个系统中,离子可以获得更高的能量。从 Y-300 回旋加速器引出的离子束,沿着一条长 70 米的专门离子输运管道进入第二台加速器,在那里得到进一步加速。利用这种装置,氙离子能够加速到几乎等于 10^9 电子伏的能量,大约相当于每核子 7.5 兆电子伏。



图 2 Y-300 加速器的“打开”状态

图中D盒从加速室内拖出。在两个D盒之间的间隙中,离子被加速。在磁场作用下,离子在每个D盒内作半圆周运动。离子由于多次通过D盒之间的加速间隙而积聚能量,使圆周的半径不断增大。

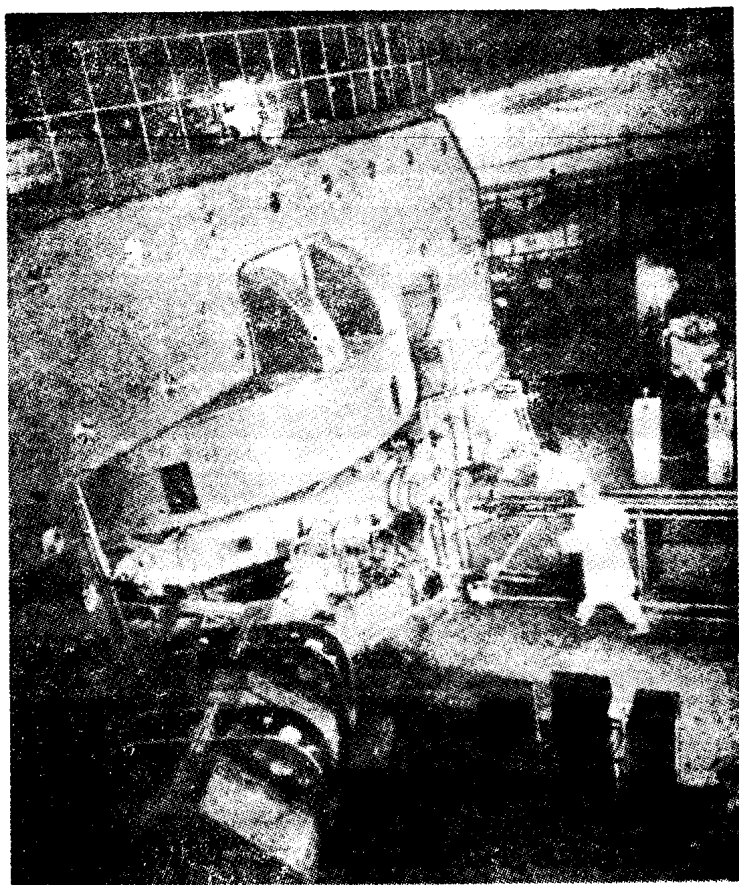


图3 离子束从 $Y-300$ 加速器的引出

真空室放置在电磁极之间，D 盒放在真空室内。左面是离子输运管道，它把已加速的离子束从加速室内引出。也可以利用真空室内的离子束，这时只要把不大的靶子通过专门的真空阀放进室内两 D 盒之间的间隙内。图中正好反映了这种情况。

不久前，位于美国伯克利的劳伦斯实验室完成了一项名为“超级重离子直线加速器”的改建工程。该加速器也可以把氙离子以及更重元素的离子加速到具有很高的能量。该实验室建成了一个加速器的串级系统。它是由“超级重离子直线加速器”和以前用来加速质子的大型加速器“贝伐特朗^①”串接而成的。这样，氮离子以及一些其他元素的离子就能够加速到具有相对论速度，即每个核子大约为 2×10^9 电子伏。就是说，整个氮核的能量大约为 300 亿电子伏。不久前在西德有一台能量更大的直线加速器投入运行了。这台名为“尤尼拉克^②”的加速器能加速门捷列夫周期表中所有元素的离子，其中包括铀离子。

杜布纳的质子同步稳相加速器正被改用来加速重离子。它将可以把离子加速到创记录的相对论性能量，每个核子为 55 亿电子伏。现在已经获得了能量为 110 亿电子伏的氙核束，能量为 220 亿电子伏的氮离子 (α 粒子) 束以及能量大约为 660 亿电子伏的碳离子束。

此外，正在建造几台新的加速器。其中有基辅的一台参数独特的回旋加速器和杜布纳的一台四米回旋加速器 (Y-400)。在西欧正在讨论建造一个由两台大型加速器构成的独特的串级系统。杜布纳计划建造一台 Y-700 巨型回旋加速器等。

① 美国加利福尼亚大学劳伦斯实验室的 62 亿电子伏质子同步加速器。

② 西德的“全粒子直线加速器”。

2. 重离子物理学

是什么原因引起了各国科学家对重离子束有如此浓厚的兴趣呢？首先，这是因为有了重离子束就有可能研究许多原子核以及寿命极短的核系统。而如果不利用重离子的核反应，这些核和核系统就很难得到或者根本不可能得到。当这种高能离子与靶核相碰撞时，可以从“敲下”大块核物质，将核“击碎”。反之，在一定条件下，这种高能离子能够与靶核融合，或者使大块核物质相互嵌入，形成尚不知道的新的核系统。在这方面，重离子特别有效。

利用重离子核反应也可以研究与目前已知的宇宙中最强电场有关的现象。当离子与靶核碰撞时，会形成具有很大角动量的重核系统。在这种系统中，核力、强电场和相当大的离心作用的特殊结合会产生大量的各种各样的核反应，以及各种各样的量子过程。

所有这些有趣的现象，正是战后年代发展起来的物理学新领域——重离子物理学所要研究的内容。

譬如说，重离子物理学是一个独特的“试验场地”，这里可以“设计”新的原子核并研究它们的性质，以及与它们有关的各种过程。这里所展示的可能性是那么诱人和那么令人寄予希望，以致著名的理论家奥格·博尔在评价核物理的发展前景时发表了一种看法：在未来的十年内，核物理主要就是重离子物理。对他的这个见解，人们很难不表赞同。

然而，利用重离子束来研究新的和带根本性的现象在科学上的重大意义仅仅是重离子物理学的一个方面。而另一方面，就是重离子束的广泛的实际应用方面的重要性并不亚于前者。常有这样的情况，最初是纯粹为了科学目的而建立起来的方法，后来却成为解决重大的技术问题和国民经济课题的非常有效的手段。重离子研究也就是这样一个情况。

当质量大、电荷量也大的重离子穿越物质的时候，会大大改变晶格的性质。组成晶格的部分原子会出现移位或者被打出来；同时，损失了能量，停顿下来的离子会形成新的原子。此外，离子打入，或者按现在的说法是离子注入，使我们能够按预定计划改变被照射物质的化学成分。既然物质的性质是由它的化学成分和晶格结构决定的，所以利用专门挑选的离子束实际上可以影响被照射物质的任何物理化学性质（图4）。

用磁透镜可以把离子束聚成直径小到总共只有几微米、象针那么细的射线。

所有这些良好的特性就是重离子束的多种实际应用的基础。可以毫不夸张地说，重离子束实际应用的前景，现在大致处于光束技术——激光在10—15年前那样的局面。然而，如果说激光束主要是通过局部强烈加热而对物质起作用，那么离子束的作用方式就更多种多样了。离子越重，它对物质的辐射作用愈强，这一点可以从图5清楚地看出来。该图用显影法显示出照像乳胶层的辐照损伤。重离子对其他的有机材料和无机材料也具有类似的辐照损伤性质。

就当前的可能性而言，使用重离子束可以成功地改变材



图 4 离子束上的测量装置

用转向磁铁可以将被加速的离子束从中央离子输运管道转输往四个离子管道——支管道中的任何一个。实验结束后,束流被输往另一个离子管

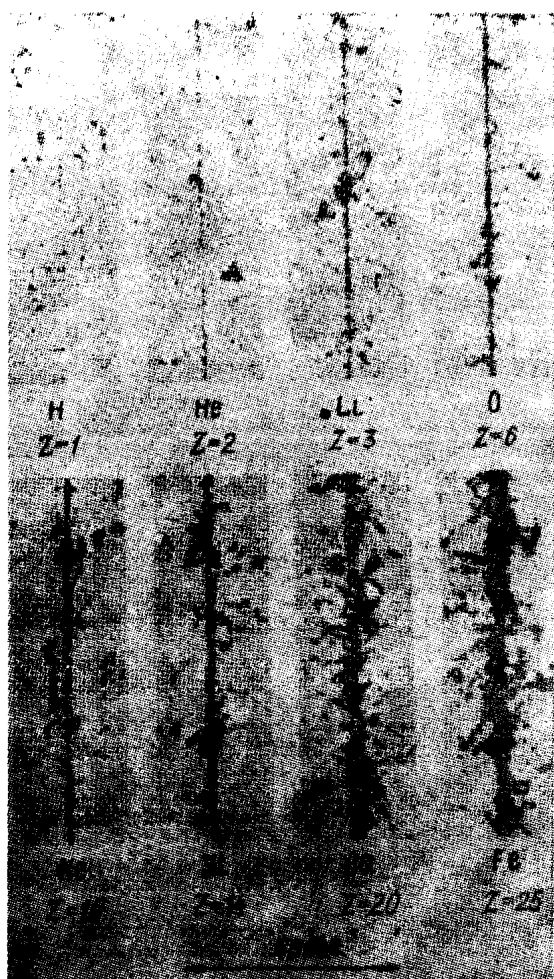


图5 由质子、 α 粒子和更重的离子所引起的照像
乳胶层辐射损伤的显微照片

料表面以及深达几十个微米处（对生物组织要深得多，见下面）的性质。建造能提供足够强束流的高能加速器（在不久的

将来,这大概不会有任何原则上的困难),离子就能在物质中有更长的射程,也就能影响被辐照材料的更深的内层。以重离子束应用为基础的“精细的核技术”将使科学和技术各种不同部门所用的方法发生真正的革命。

在下面的章节里,我们将研究重离子物理的一些基本问题,并将叙述重离子束在解决重大的科学技术和国民经济课题中的应用。

3. 原子核的“地理学”

如果假定从卢瑟福关于元素放射性衰变的第一批著名实验算起,核物理已有七十年左右的历史了。然而,我们对原子核“地理学”仍然不甚了了。为了确信这一点,我们注意到,例如,当用高能铀离子或钍离子照射铀靶时,能形成六千多种同位素。这比至今核物理中已一般地研究过的所有稳定的和放射性同位素的数目要超过几倍。正如美国的一位主要重离子物理学专家阿·布朗姆利很形象地指出的那样,要利用已积累的知识进行外推来预言各种各样原子核的性质,就好比“一孔之见”那样,难以完善地论述该事物的全貌。

图6中给出了原子核“地理图”,图上标出了稳定性同位素的中心区及其周围尚未研究的宽广区域。该区域内原子系统的寿命还是足够长的,以致可以把它们看作是原子核。用各种衰变确定的这个区域的界线,目前只能非常粗略地划出。可能发现,界限所通过的地点实在完全不是我们预言的地点。

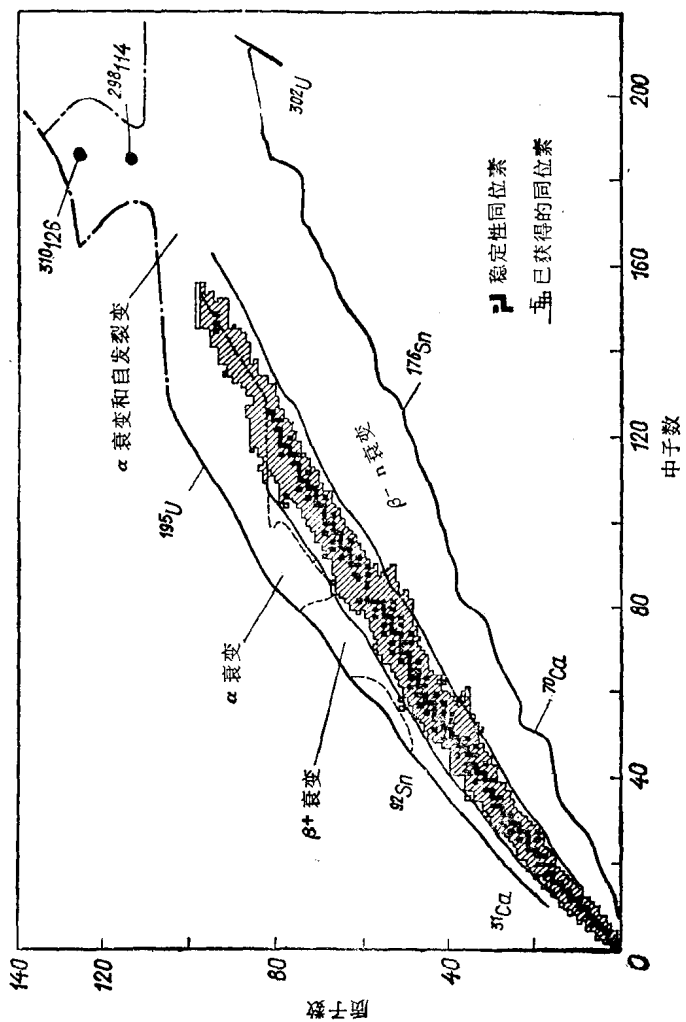


图 6 原子核地图

例如，根据现有的一些明确的理论基础可以预期，在具有大量中子的原子核区内也可能存在相对稳定的同位素——中子滴，它大大低于图 6 所标出的界限。

从许多中子实验中清楚地了解到，两个中子之间的作用力不足以形成结合态。然而，这并不意味着，在自然界中就不可能存在由大量中子组成的稳定性系统。譬如，氢原子不会形成双原子分子，但它们却可能联合成宏观的液氢滴。

并不排除在密度很高的状态下所产生的集体的、作用力程非常短的核力，有可能使中子系统具有稳定性。这样的条件可能在高能离子与重核靶相碰撞时产生。

关于假设的中子滴的性质，现在很难说出任何什么确切的东西，但有一点是无需怀疑的——这些性质在许多方面将完全不同于至今我们曾经遇到过的那些性质。在实用方面，这样的液滴可以用来作为保存中子的特殊容器。

对超铀重核 ($Z > 92$) 区，现在还研究得很不够，目前它几乎完全是一片空白。重离子反应使我们能够深入到这种在许多方面还很神秘、看来用其他方法还达不到的区域。在该区域内可以研究超重元素和由几百个核子所组成的短寿命核系统的性质。至今在物理实验中还从来没有触及这样的强相互作用粒子的巨大量子系统。在研究这些核系统的动力学性质和统计性质时，我们可能会遇到原理上是新的自然规律。用重离子轰击重靶核时所形成的多核子系统可能具有大的角动量以及我们非常不习惯的形状，例如哑铃状或圆环状。这时，哑铃的一个球好像在沿着另一个球的表面“滑动”，而当一个

非常快的轻核从较重的靶核中心打出大量核子时，就可能形成圆环状；也可能形成空心的“气泡”形状。研究大而且快速旋转的核物质块时，可以产生这样一种概念，这种概念可以帮助我们联想到使我们难以想像的中子星和其他天体中的物质是怎样活动的。

著名的美籍中国物理学家李政道和苏联理论家阿·勃·米格达尔提出了一个有趣的假说：原子核的地图，除图6中所画出的以外，还有一个相当于核物质超密状态的“层次”。他们认为，既然固体可以有各种晶态（例如，石墨和金刚石是碳的不同晶态），那么原子核也可以有密度不同和其他性质不同的稳定状态。理论指出，当密度很大时，由质子和中子组成的均匀核物质将变成不稳定的；这时，可能形成质子和中子的密度呈周期性变化的某种结构。我们可以作一个形象化的比喻：这时，该核子系统好像发生了凝聚，变成分立而密实的凝块，因而这个核物质似乎是由“液态”变成了“固态”。以交换某些类型的重介子为条件的核子间的相互作用，在一定的情况下，看来可能保证核子结合得很紧密的状态的存在。当飞来的高能离子穿过靶核，增大核物质的密度，并产生各种介子的级联，那么就可以期望，在高速重离子的碰撞中可能会发现形成异常密实的反常核。

这样的超核在自然界是否存在？目前还没有肯定的答案。我们在这方面的知识还非常少。然而，仅仅这种令人惊异的核物质存在的可能性本身就已经引起了人们极其丰富的想象。