

各种能量的重离子
能用于基础研究、核聚变
也许可导致各种新发现

重离子物理

HEAVY ION PHYSICS

厉元文

自从有了加速器，科学家们就展开了对于重离子散射的研究。1950年代的加速器能达到的重离子能量尚无法克服核子间的库仑排斥力。当时重离子实验只限制于库仑激发的反应。因此五十年代核子物理的主要方向是：(1) 质子或中子与核子的反应；(2) 核组织的探讨；(3) 多体理论、集模式、壳模式的研究；(4) 核衰变过程的研究等等。到了六十年代末期，人们对核物理已有了相当全面的理解。轻离子(如质子、中子、氘、氚、氦等)与核子的反应可以说同研究核组织配合得相当好。同位自旋相似态(isotopic spin analogue state)的发现则修正了核反应理论。这二三十年之间 Tandem Van de Graff 加速器的进步也促使核物理的研究走向对重离子的深入考察。此外，由于基本粒子物理的研究一步步地趋向于高能量，那些留下来的加速器也提供了对中高能重离子进行研究的工具。

发展和现状

由于加速器及离子源的改良，重离子物理的研究在1970年以后有了巨大的进展。在这一个几乎全新的物理领域里可以研究的课题相当多(见附图一)。在重离子物理的研究方面已达到的成就可以归纳如下：

(1) 弹性散射：库仑力如同一面发散镜，使得重离子散射截面的角分布类似于 Fresnel 衍射。这似乎意味着我们所能得到的不过是核子的几何结构。事实上轻的重离子(如 ^4He , ^6Li , ^{12}C , ^{16}O , ^{28}Si , ^{40}Ca 等)的弹性散射截面却呈现出许多意外的粗略的与精细的结构(gross and fine structure)。这些结构也许和核分子共振态有关。这是当前的一个疑难问题。重离子弹性散射的光位势都满足所谓“亲合定理”(proximity theorem)。这就是说：如果把核子看成液球的话，则当两个液球刚刚接触的时候，这

两个核子的接触表面就消失了。因此两个核子的作用能抵消了表面能。虽然核子不是很大的液球，可是重离子弹性散射的分析支持亲合定理的成立。至于核子间之短距光位势，亲合定理不能应用。理论计算(如折合位势、Hartree-Fock 计算、能量密度法、及液模等)的差异甚多。实验上的测定也十分困难。唯一确知的是 α 与核子光位势。出人意外的是： α 与核子的光位势相当大，而且表面部分的位势不能用习用的 Woods-Saxon 形状因子来表达。此外折合位势也很成功地描述了 α 和核子的作用能。近年来，重离子的后向弹性散射数据都有指向深位势的趋势。

(2) 近弹性散射：基本上，可把对轻离子散射

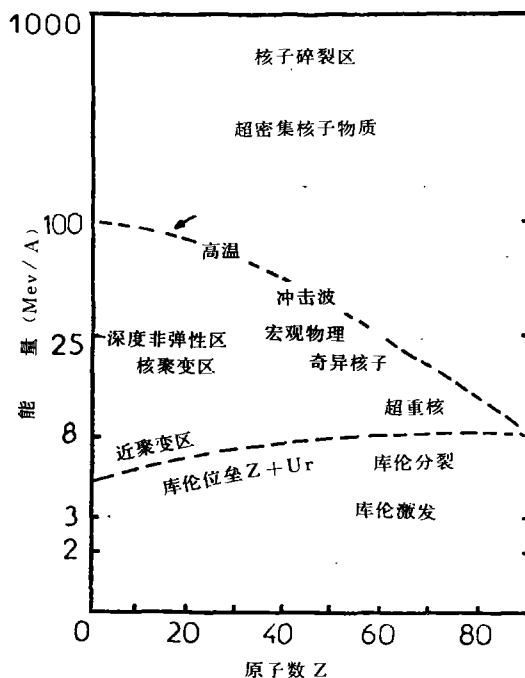


图1 重离子物理研究的各种课题

的经验及理解应用到重离子的研究上去。DWBA的分析有许多成果，但耦合道的计算却相当繁复。理论的研究尚落在实验的后面。轻的重离子的近弹性激发函数 ($\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \text{固定}\theta)$) 也呈现出粗略的与精细的结构。分子共振态也被用来描绘这些现象。这也是一个尚未解决的疑难。许多实验如 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, $\alpha + ^{20}\text{Ne}$, $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$, $^{16}\text{O} + ^{28}\text{Si}$ ……都在探讨分子共振态的意义。

(3) 深度非弹性散射：六十年代，Strutinsky 的壳结构处理方法使得核裂变位垒的计算相当准确。这个发展导致了理论上及实验上对超重核进行研究。到目前为止，超重核还没被发现。可是在寻求超重核的过程中，却发现了“深度非弹性散射”的现象。本来预期大部分的核散射截面在于核融合，而实验上却发现“核子失去了大部分的动能后而仍然保持了入射核子的形象”这种过程占了散射截面的主要部分。由于大部分的动能消失了，核子一定处在激发态或高度自旋态或高度变形态中。可是深度非弹性的机构却是表面的直接反应。也就是说反应时间很短，核子没有达到均衡状态。理论上比较成功的处理方法是：(1) 古典牛顿力学加上磨擦阻力的计算；(2) Fokker - Planck 的扩散方程的计算。这些理论的处理可以解释相当多的实验结果。可是总的说起来，深度非弹性散射的物理机构还没有完全了解。通过精细的实验（如符合测量等），也许可以看出一些新的迹象。

(4) 其他如核融合，(HI, xn) 等反应可以研究复合核及高度自旋态的结构。集体转移的核反应也可以研究一些奇异核子 (exotic nucleus)。这些核子 N/Z 的比率大于 3。正在不断地积累实验数据。相信理论发展不久也会跟上的。

对其他学科的影响

以上，我们只简略地叙述一部分重离子的核物理，而略去了高能重离子的反应。这一方面的发展尚未看出能获得什么知识。讨论重离子物理的展望，不能不提到重离子与其他学科的关系。我们以下简略地分几个方面作讨论。

(1) 原子物理：重离子推动了许多原子物理的研究，如类氢原子态能级的研究、Lamb位移的测定等。此外重离子碰撞时，轨道电子可能处在一个有巨大静电场的环境里 ($Z \cdot \alpha > 1$)，电子能级轨道的衰变情况等将是十分有趣的问题。这些实验直接或间接地鉴定量子电动力学的准确性。

(2) 固态物理：能量范围在 10~1000 keV 的重离子可以被用来注入单晶体以完成集成电路。这个方法也许在实用上还有困难，因为用重离子轰击后的单晶体常呈现出晶体破坏，错位等现象。可是从另外一个角度来看，晶体错位及修补却是固态物理目前的重要研究课题之一。

(3) 等离子物理：世界能源的缺乏常引起经济

的恐慌。新能源的发现及应用是世界各国科学家研究的目标。在所有可能的能源中，太阳能及核聚变能可以说是最乾净而且是取之不尽、用之不竭的。但是太阳能的收集常受到天气、光电池的成本等限制（新的构想如太空站收集太阳能的方法则不受到天气及区域大小的限制）。核聚变则利用海水中存量相当多的氘、氚，聚合成氦而放出能量。世界各国花了相当大的经费在研究核聚变。但是要使高温 ($\geq 10^8 \text{ }^\circ\text{K}$)、高密度的等离子体保持足够长的时间 (即满足 $n\tau \geq 10^{14} \text{ sec/cc}$) 是很困难的。其中的一个构想是利用激光四面八方地压缩等离子体团，以期达到核熔合的临界密度。虽然激光的效率不高 (通常 $\leq 10\%$)，但这方法还是很可能成功的。也有人建议可以用重离子代替激光来压缩加热等离子体团。重离子加速器的效率则有 50% 左右。这方面的实验正在尝试之中。

各国重离子研究状况简介

1. 实验 静电加速器 (又称 Van de Graaff 加速器)：这是最常用的重离子加速器。Van de Graaff 得到的离子品质十分良好，能量范围相当局限。因此这方面的研究着重于轻重离子低能范围的探讨。Van de Graaff 的加速器比较常见。几乎每个国家都有许多个。最近美国加州理工学院、Argonne 美国国家研究所及纽约州立大学石溪分部在 Van de Graaff 的后面加上一节直线加速器，来增加离子能量。

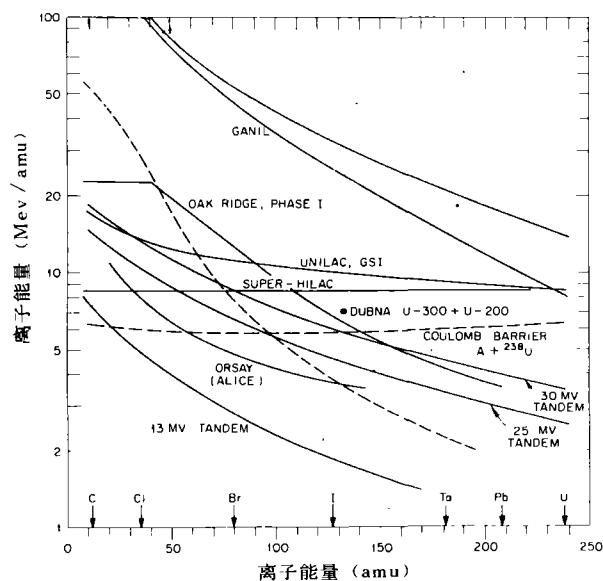


图2 加速器性能比较

回旋加速器 (Cyclotron 加速器)：这是一个正在发展的领域，美国的 Michigan 州立大学及橡树园国家研究所、法国的 GANIL 及德国 GSI 以及中国兰州核子研究所也许会成为将来中能 (20 MeV/A ~ 200 MeV/A) 重离子研究中心。

美国加州柏克莱的 HILAC 自成一格，利用高能物理留下来的加速器，可以将重离子加速到 200 MeV/A—

先锋11号在1974年12月2日经过木星后，借木星之引力，经五年光景，旅行了30亿公里，终于来到在望远镜中最美丽的天体——土星附近。9月1日它通过了光环到达离土星94,200公里的近拱点（peria-pasis），给太空工作者带来可贵的资料。

土星因离地球较远，很多特徵都不能用望远镜观测得到。先锋11号主要的任务是：土星有无很强的磁场与辐射带？到底光环是什么东西组成的？性质如何？土卫1是怎样一个卫星？

先锋11号发现土星磁场很弱，比想像的要弱多了，只有0.22高斯，但是它的偶极磁轴与土星的自转轴重合，这是太阳系各行星中唯一的。带电粒子全被光环与卫星带走，所以先锋11号经过光环时，发现带电粒子大量减少。先锋11号又发现等离子并不沿着磁力线上下运动，而是被磁场的转动牵制着，等离子中心在离土星180,000公里与360,000公里之间为何集中在那儿？科学家仍无理想的答案。

光环是土星最突出的标志，自从惠更斯发现光环后，地面的观测把光环分成A、B、C、D和E五道。A、B、C三道都非常显著，D和E两道则很不显著。先锋11号十分清晰地看到了A、B、C光环，但却不见D、E光环。然而在A环外3500公里处发现F光环。A与F的分界被命名为先锋环缝（Pioneer Division）。（先锋11号接近土星时的照片请看封三图7。）

先锋11号到达土星时，经历了两个考验。首先，它要顺利通过光环不遭损伤。第二，它要把观测结果，

经过离太阳只有几度的直线传递到地球来。这两个考验都成功地通过了。大家都兴奋地等待它把土卫1的观测传递回来。因为土卫1又名泰坦（Titan），是太阳系最大的卫星，而且拥有浓厚的大气层，但通讯问题发生了，大多数的记录，都混起来了，甚至很多根本就丧失了。又因为美国太空总署忘记通知苏联：他们与先锋11号的通讯频率，结果被苏联人造卫星无意干扰。因为这样我们对土卫1的观测，可以说是失败了。照片上只看到一个充满气体的球形。

虽然先锋11号，并没有什么惊世骇俗的发现，但是它为航行1号和航行2号做出了准备工作。后二者的仪器远胜先锋11号。例如，每秒的传讯率就比先锋11号（每秒1024次）高十几倍，航行1号将于1980年11月12日到达土星，航行2号将于1981年8月25日到达土星。然后，将借土星引力，继续往外飞行，预计1986年1月25日可到天王星附近。再借天王星之引力，于1989年8月29日访问海王星，这都是后话了。但是，全世界的太空科学工作者以及对此有兴趣的人们，无不拭目以待这些日子的来临。

本文取材：

- (1) 科学杂志 (Science) 1979年6月1日、7月6号
- (2) 天空与望远镜 (Sky & Telescope) 1979年2月3月4月、7月、9月、11月号
- (3) 科学新闻 (Science News) 1979年6月9日、7月21日、10月6日
- (4) 美国空间总署1979年发表的新闻稿件与照片。

• 上接60页 •

10Gev/A。其他如宇宙线和感光乳剂里面重离子的作用，可以研究能量达 10^3 Gev/A 的重离子的碰撞实验。

2. 理论 重离子的理论十分繁复。还没有一个理论十分完美和令人满意。几个十分活跃的研究所如德国 Heidelberg、Munich 和 Berlin、法国 Orsay、英国 Oxford、美国 Berkeley、Oak Ridge、Brookhaven 等。研究的课题也不一而足，如深度非弹性、近弹性、核聚变和裂变、高度自旋态等，甚至于 TDHF (Time dependent Hartree-Fock) 的计算。可以说，到现在为止，还没有一个令人满意的重离子理论。

展 望

以上我们概括地介绍了重离子物理研究的情况。归纳起来，在核物理方面：(1) 低能如 $E \approx V_c \sim 3V_c$ 轻的重离子散射尚有许多值得研究的课题。对离子分子态，复合核等问题，没有完全了解。实验方面还需要改进准确度、分析力、符合测量以及推广到后向。

这类实验只要有 10~20 MV 的 Tandem 就可以进行。虽然这类的实验并不容易，却可以获得许多新的了解。这些研究对星球进化演变过程也十分重要的。(2) 中能重离子的散射，需要系统地作符合测量的实验。这方面的实验可以引导理论去找出核子统计过程的机构。在应用上来说，需要低能的重离子如 10~1000keV 的范围。新方法的引进也许可以导致原子、固态及等离子态物理方面有新的发现。由于重离子物理还相当年青，许多核物理实验室的方向都着重于重离子实验。四十年来，用质子、中子和电子等同核子的反应，核物理已获得相当大的进展。有人却用刻薄的话来形容重离子说：“重离子散射可以学到什么呢？还不如拿两个大雪球互相轰击来得清楚而简便”。过去十年内我们已经从重离子实验及理论的研究这一门几乎是全新的学科中获得了许多宝贵的知识。其结果已提供了对这刻薄话的最好答覆。相信若能进一步提高实验精密度我们将可以对自然界的奥秘作更深一层的了解。更何况重离子的应用方面目前还没有开始呢！