

- 12(1987), 832.
- [11] T. J. Remillard and G. D. Steel, *Opt. Lett.*, **13**(1988), 30.
- [12] S. S. Yao et al., *Appl. Phys. Lett.*, **46**(1985), 801.
- [13] N. Peyghambarian, R. G. Olbright and D. B. Fluegel, *IEQC Postdeadline Papers*, PD20, (1986).
- [14] D. Cotter, *IEQC Postdeadline Papers*, PD19, (1986), 51.
- [15] E. F. Hilinski, P. A. Lucas and Y. Wang, *J. Chem. Phys.*, **89**(1988), 3435.
- [16] V. S. Dneprovskii et al., *Solid State Commun.*, **81**(1992), 227.
- [17] Y. Wang and W. Mahler, *Opt. Commun.*, **61**(1987), 233.
- [18] Schmitt-Rink, D. S. Chemla, D. A. Miller, *Phys. Rev. B*, **32**(1985), 6601.
- [19] W. J. Blau, D. J. Cardin, *Mod. Phys. Lett. B*, **6**(1992), 1315.

基于加速器的原子物理学*

陆福全 杨福家

(复旦大学物理二系, 上海 200433)

摘要 在简述基于加速器的原子物理学这门分支学科的形成过程和特点的基础上, 介绍它的主要内容和最新成果.

关键词 原子物理学, 加速器, 离子束

Abstract Accelerator based atomic physics is an important branch of atomic physics. A brief introduction to the history and latest developments of accelerator based atomic physics is given.

Key words atomic physics, accelerator, ion beam

基于加速器的原子物理学是物理学中一门新的分支学科. 它利用粒子加速器作为基本实验设备, 研究原子物理问题. 虽然基于加速器的原子物理学这一名词在 70 年代末才正式出现, 但是早在 30 年代初粒子加速器诞生不久, 就有人用它研究原子物理学问题. 当时人们不仅用质子, 而且用重离子研究粒子碰撞引起的原子的电离及随后发出的 X 射线. 但在 30—50 年代, 物理学家主要关心的对象已转向原子核物理. 到了 70 年代, 越来越多的小型加速器的主要研究领域逐步从核物理转向了原子物理^[1]. 1976 年和 1981 年美国科学家先后撰写了数篇报告^[2,3], 明确了“基于加速器的原子物理学”这一概念, 对原子和分子科学中所形成的这个分学科作了较全面的评述. 全美研究理事会在给美国政府的建议书^[4]中也对它的进一步发展提出了设想和建议.

基于加速器的原子物理学之所以得到重

视, 发展迅速, 并且成果显著, 是与它所具有优越性密切相关:

(1) 加速器输出束流中的离子处于孤独状态, 这是理想的实验条件.

(2) 加速器能产生周期表上所有元素原子的任何剥离度的离子. 使用电子束离子阱 (EBIT) 和电子回旋共振 (ECR) 离子源则可产生低能高电荷态离子束.

(3) 离子加速后具有一定向加速度, 在运动方向上发生聚束效应 (velocity bunching), 使能散度降低. 一般几十 keV 的加速电压可使能散度降低 2—3 个量级.

(4) 离子与外束光相互作用或发射光辐射时, 存在多普勒效应. 利用多普勒位移可使光频率与原子跃迁能量匹配. 当离子束与光线共线

* 国家自然科学基金资助项目, 国家教委博士点基金资助项目.

1994 年 11 月 7 日收到.

作用时,将引起最大频移,但此时,多普勒增宽最小,使光谱分辨率大大提高.

(5)加速器都配有磁分析器,可获得同位素纯的离子束,以此可进行同位素原子研究.

(6)由于原子有定向速度,在外磁场中会受到洛伦兹电场.这个电场强度可比实验室中能产生的最大均匀静电场大几个量级.它可用来作电场中的斯塔克效应研究,在拉姆位移测量中可用作斯塔克猝灭电场.

(7)带电粒子与原子核发生共振核反应(包括弹性核散射)时,会对核外电子行为产生一系列影响.可以研究核过程对原子过程的影响,开拓了原子物理研究的一个全新领域.

(8)加速器能产生 μ 子、超子、反质子、相应地可形成 μ 子原子、超子原子和反原子.对它们进行研究既有理论意义,又有实用价值.

这些优点使基于加速器的原子物理的实验精度比传统原子物理大大提高,并可研究许多传统原子物理无法研究的课题.

基于加速器的原子物理学的内容很多,范围很广,本文简单介绍它的主要内容.

1 束箔光谱学^[5]

当快速离子通过薄箔时,离子受到激发,在随后的退激过程中,将发射各种波长的光线,研究这种光线特性的谱学叫做束箔光谱学,它是基于加速器的原子物理学的一个重要组成部分.它自1963年诞生以来发展迅速,为原子光谱、原子结构的研究,为原子与固体相互作用的研究,提供了大量信息.

束箔相互作用有以下性质和应用:

(1)载能带电粒子在穿过箔后会产生各种各样的电荷态,用束箔方法可产生周期表上所有元素(同位素)原子的任何电荷的离子.

图1给出了传统原子物理和基于加速器的原子物理可研究离子电荷态的情况.可见,传统原子物理仅限于虚线左方的区域,而基于加速器的原子物理则扩大到一个等边直角三角形区域.对高电荷态离子能级进行研究发现了一些新的现象,如低电荷类氢离子的许多禁戒跃迁,在 U^{+91} 类氢离子情况下都开放了.

25卷(1996年)第4期

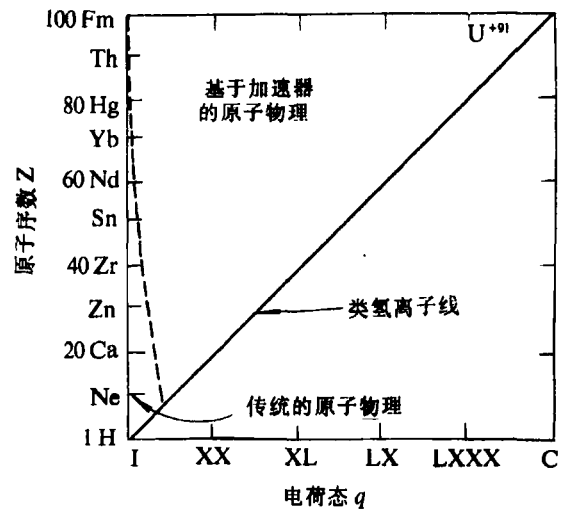


图1 传统的原子物理和基于加速器的原子物理在Z-q空间所占区域大小的比较

(2)束箔相互作用后,离子可处于各种激发态,包括内壳层激发态和里德伯态,利用束箔光谱学观测到了类锂离子的双电子激发.

(3)快离子穿过倾斜箔后,可使原子和原子核的角动量取向,从而可获得极化的原子和原子核束.这些极化束对原子物理和核物理的基础研究和应用研究都十分重要.

(4)由于束箔激发是瞬发的($\sim 10^{-15}$ s),存在一个时间零点,利用飞行时间方法可方便测量能级寿命.

测量寿命时,只需观察离子束发光强度在穿过箔后随距离的变化,在发光强度衰变曲线的半对数图上,由斜率便可确定寿命.

用束箔方法测量高电荷态能级寿命的一种比较先进的数据获取方法是,将计算机多道及位置灵敏探测器相结合,可以在一个波段同时测量到好几个能级的跃迁寿命.

由于束箔方法可研究的电荷态和激发态不受限制,因此它是研究高电荷态、高激发态离子寿命的主要手段.

(5)用光量子拍测定超精细能级:束箔激发相干性好,当受激粒子所在的能级(初态)是两个或两个以上态的叠加时,它们向同一末态跃迁时会产生拍频干涉现象,人们已从理论上确定了量子拍频与时间的极化之间的关系,据此

可研究原子(离子)的精细结构和超精细结构。

图2为测量 $^{15}\text{N}^+$ 的 $2s^2 2p 3p^3 P_2$ 态超精细结构实验中的偏振光的量子拍曲线及相应的极化度随时间的振荡^[6]。由量子拍频可确定超精细分裂距和超精细相互作用常数。

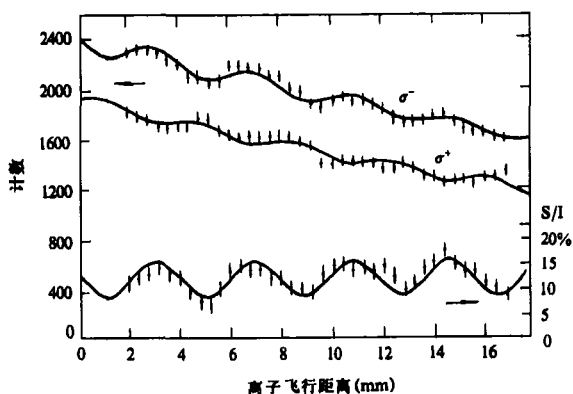


图2 $^{15}\text{N}^+$ 离子超精细能级跃迁的量子拍曲线

2 共线快离子激光光谱学

共线快离子激光光谱学是用波长可调的染料激光器产生的激光束和加速器产生的单能离子束在同一轴线上相互作用,使离子共振激发到待研究能级,以研究重离子的能级特性.它是70年代中期在束箔光谱学和原子束激光光谱学基础上发展起来的一种新型光谱学。

它有以下几个特点:

(1)选择激发,激光可以只将原子选择性地激发到所感兴趣的能级上去,而其他方式使很多能级同时受激,由此发生的级联衰变就会影响能级特性的测量,特别会使寿命的测量值比实际值要大。

(2)光谱分辨率高.聚束效应使离子束能散度变小,这样离子束与激光共线相互作用时分辨率比传统(线性)光谱学提高2—3个量级,达到1MHz。

(3)时间分辨率高.利用“多普勒开关”技术可实现0.1ns级脉冲共振激发,能级寿命测量精度可达0.1%。

(4)灵敏度高.由于一方面光激发截面很

大,为 $10^{-8} - 10^{-9} \text{cm}^2$,另一方面多普勒增宽与自然线宽接近,所有原子可同时被激发,因此,共线快离子激光光谱学的灵敏度比传统光谱学提高几个量级。

应用共线快离子激光光谱学可研究原子的能级、寿命、同位素位移、超精细结构等.由于具有上述特点,共线快离子激光光谱学是研究能级十分密集的重元素原子的能级特性的主要方法,它与在线同位素分离器相结合,是研究短寿命同位素核性质的重要手段。

图3为我们测得Nd II 570.2nm线不同同位素的光谱线^[7].在普通光谱仪中已挤在一起的同位素谱线,这里却可以清晰地分开(分辨率为 10^{-4}).由同位素移位的定量数据还可以测定原子核的电荷半径以及能级的组态混合比。

Texas A&M大学的Church等测定了Ca II $4p^2 P_{3/2}$ 和 $^2P_{1/2}$ 能级的寿命,精度达0.3%^[8],为研究碱金属原子结构中的宇称不守恒效应创造了条件。

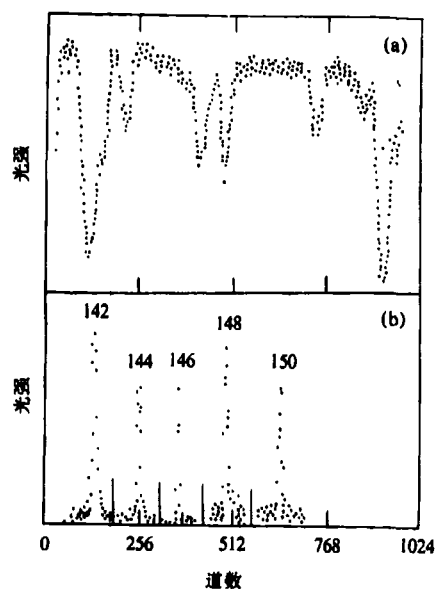


图3 激光扫描多道谱

(a)碘分子吸收谱

(b)质量为 $^{142} - ^{150}\text{Nd}$ 的偶同位素的共振激发曲线

3 拉姆位移

半个世纪以前发现的著名的氢原子拉姆位移,导致了量子电动力学的蓬勃发展.拉姆位移的实验和量子电动力学理论互相促进地发展着.直到目前为止,绝大部分实验都是研究类氢离子的 $n=1$ 和 $n=2$ 能级, $Z>2$ 原子的高 n 能级未见报道.核自旋为 0 的类氢离子的第一激发态(由自旋-轨道相互作用引起)的精细结构能级分裂 ΔE ,可由相对论量子力学精确计算

出.根据狄拉克理论, $2S_{1/2}$ 和 $2P_{1/2}$ 有相同的 J ,应简并,但实验上发现 $2S_{1/2}$ 能量比 $2P_{1/2}$ 要高,这就是著名的 $n=2$ 的拉姆位移(S_2).早期实验上往往测量 $E-S_2$.

$2P_{3/2} \rightarrow 1S_{1/2}$ ($Ly\alpha_1$) 和 $2P_{1/2} \rightarrow 1S_{1/2}$ ($Ly\alpha_2$) 都是 $E1$ 允许跃迁,跃迁能量可由狄拉克理论精确计算,但实验上发现光子能量略低于计算值,这一差值就是 $1S$ 的拉姆位移值(S_1).

已有许多小组研究了类氢离子的 S_2 .图 4 为用共线快离子激光光谱学测量 S^{15+} 的 S_2 的实验装置^[9].

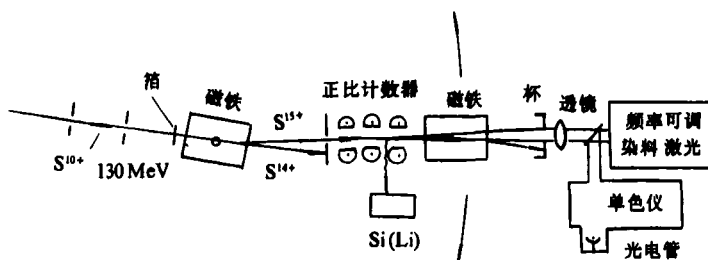


图 4 共线几何下用激光共振方法测量 S^{15+} 的 S_2 的实验示意图

由串列加速器引出能量为 130MeV 的 S^{10+} 离子,穿过 $200\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚碳箔后进入磁分离器,将类氢离子 S^{15+} 分离后导入相互作用区,染料激光器产生的光束由透镜引入与离子共线相互作用.

在离子束静止坐标系内,当激光光子能量等于 $\Delta E - S_2$ 时,处于亚稳态 $2S_{1/2}$ 的 S^{15+} 离子被泵到 $2P_{1/2}$ 能级,然后通过 $E1$ 允许跃迁很快退激到基态.用 $\text{Si}(\text{Li})$ 探测器测量 $Ly\alpha_2$ 的 X 射线,因此在激光频率扫描时,在 $\text{Si}(\text{Li})$ 计数曲线中出现一共振峰.

对类氢离子 $1S_{1/2}$ 能级的拉姆位移则要晚些,因为 $1S_{1/2}$ 电子的自能与 Z^4 有关,对于低电荷态类氢离子,按目前的实验条件难以观察.随着基于加速器的原子物理学的发展,1983 年开始已有人测量了不少元素的 $1S_{1/2}$ 拉姆位移,和 $n=2$ 的情况相反, Z 越小实验越困难.

目前测量 $1S_{1/2}$ 拉姆位移的基本方法是用弯晶谱仪极为精密地测量 $2P_{3/2} - 1S_{1/2}$ ($Ly\alpha_1$)

和 $2P_{1/2} - 1S_{1/2}$ ($Ly\alpha_2$) 的 X 射线波长,然后由狄拉克理论计算 $n=2 \rightarrow n=1$ 的能量(因为类氢原子的波函数和能级可用相对论量子力学精确计算),两者的差值即为 $1S_{1/2}$ 的拉姆位移值.

4 双电子复合

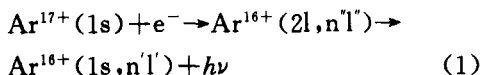
原了碰撞,即原子(离子)和各种粒子碰撞是基于加速器的原子物理的一个重要的研究领域.碰撞导致电离、激发或重组.

双电子复合实际上是俄歇过程的逆过程,这里以单电荷离子的简单情况为例来加以说明.当入射电子以初动能 $\Delta E - \epsilon$ 接近离子 A^+ 时,它被俘获进入里德伯态(nl),能量为 $-\epsilon$,所释放的能量用于使处于基态的电子激发到 $(nl)^*$ 能级,这就形成了一个处于双电子激发的中性原子.

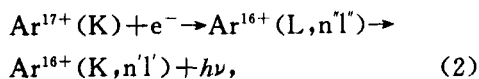
双电子复合是高温等离子体中电子复合的主要过程,因此它对受控聚变反应和太阳晕研

究极为重要,此外在大气物理研究中有实际价值.

最近,美国 LLNL 实验室 Dewitt 等人和 Texas A&M 大学的 Church 合作,用电子束离子阱方法,通过测双电子激发(DR 中间态)退激时的 X 射线谱而获得 DR 截面^[9],实验分辨率均十分高.其 DR 反应式为



或写成



其中对 $n'l'$,实验上已测到 n' 从 2→6,即 L,M,N,O,P.理论计算时考虑了 $2 \leq n' \leq 14$ 和 $l' < 3$ 的贡献.

DR 截面测量结果如图 5 所示.

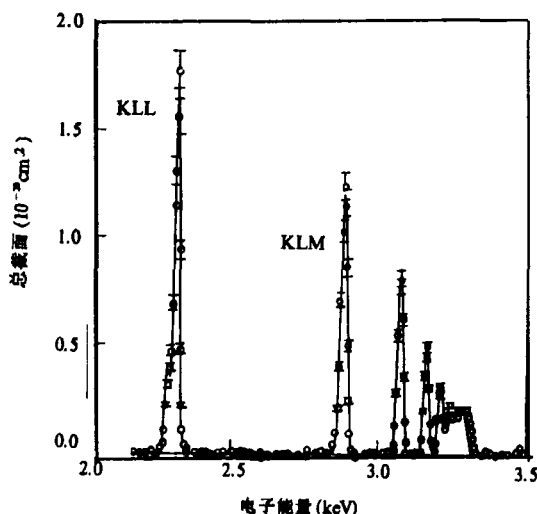


图 5 实验测到的类氩氩离子的 DR 截面

随着电子能量改变,DR 总截面也出现一系列共振峰.图上峰位的命名,例如 KLM,其中 K 表示碰撞前离子基态为 1s,即 $\text{Ar}^{17+}(K)$,L 表示该电子激发到 L 层,即 $\text{Ar}^{16+}(2l)$,M 表示衰变末态一个电子所处的里德伯态.实验相对分辨率优于 1%,截面误差为 6%.这是有关 DR 截面测量中精度最高的实验之一.

DR 过程研究方法另一个新进展是采用离子存储环,以增加有效的离子束密度(离子束在

存储环中反复回转运动,极大地增加了和电子的碰撞几率).东京大学原子核研究所用这一方法测量了 $^3\text{He}^+$, $\Delta n=1$ 的 DR 截面^[11].

5 离子与原子碰撞时核过程对原子过程的影响——核效应

这里讨论的核效应既不是指核的电荷对原子能级粗结构的影响,也不是指原子核的自旋、电四极矩引起的超精细结构,这些都是与时间无关的稳态过程.这里要讨论的核效应是指与时间有关的过程,即原子发生共振核反应一个很短的持续时间对原子结构所产生的影响.

早在 60 年代初,许多物理学家从理论上指出,质子和离子加速器不仅可分别无关地研究离子与原子碰撞时出现的原子物理和核物理问题,而且可使实验测量进入一个新的领域;两种类型同时发生,而且相互影响.原子核反应对原子行为影响的两个最重要的物理机制是:(1)能量守恒;(2)核反应产生的附加相移,经典概念即为核反应的持续时间(对轻核和中等核反应为 10^{-15} — 10^{-19} s,对重核反应为 10^{-18} — 10^{-21} s).由于效应小,本底大,做这类实验是极困难的.

70 年代末,由于加速器技术的完善(能产生高品质束流)和探测器技术的发展,测量核效应的实验开始活跃起来.

轻核和中等重核反应的孤立的共振为研究原子激发过程的核效应提供了最为方便的途径.实验上测量这些效应有以下方面:

5.1 (p,p)弹射共振对 K 壳层电离的影响

第一个证明核共振散射对 K 空穴产生几率有影响的实验是由 Blair 等人于 1978 年完成的.在 $^{58}\text{Ni}(p,p)^{58}\text{Ni}$ 反应中,当 $E_p=3.15\text{MeV}$ 时,发生核弹散共振,同时观察到 K 壳层电离几率 P_K 有明显变化.目前精度最高的实验是斯坦福大学一个研究小组完成的^[12],他们观察了 $^{138}\text{Ba}(p,p)^{138}\text{Ba}$ 共振核反应($\Gamma=69\text{keV}$)附近的 K 电离的尖锐变化.

我们研究了 $^{56}\text{Fe}(p,p)^{56}\text{Fe}$ 共振散射对 K 电离几率的影响^[13].用 Anholt 的理论对 K 电

物理

离在共振时的几率进行了计算,结果和实验符合得很好.在 2.52MeV 时的共振峰宽度仅为 1.4keV.

5.2 质子和原子核共振碰撞时的电子俘获

质子和核发生弹性散射的同时,引起靶原子电离,电子被出射质子所俘获.1986年,Horsdal 等人成功地观察到 $p^{+20}\text{Ne}$ 在 $E_p = 1.955\text{MeV}$ 附近的核弹性散射时总的电子俘获几率的共振效应.

6 原子碰撞动力学

6.1 离子碰撞中的电荷交换

加速器产生的高电荷态快离子和原子碰撞可用于研究原子结构和光谱中许多新的物理问题.碰撞本身的动力学机制,也引起了广泛重视,其中一个重要方面是电荷交换(电荷的单次和多重俘获和转移)过程.美国橡树岭国家实验室一个小组对碘和铀的高电荷态离子和氦气相互作用进行了系统研究^[14],获得了电荷俘获和转移截面与入射粒子电荷态以及能量的关系.实验结果和以 Bohr-Lindhard 半经典模型为框架的理论计算符合较好.

橡树岭国家实验室另一个小组用串列加速器产生的 23MeV $\text{Cl}^{5+,8+,10+}$ 离子穿过 Ar 气室,在 90° 方向得到多种电荷态的低能反冲 Ar 离子,并用飞行时间方法测量了 Ar 离子电荷态分布^[15].

6.2 离子的碰撞电离和激发

离子的电子碰撞电离和激发截面研究是原子碰撞动力学的一个重要方面,它不仅有学术上的意义,而且在大气物理、聚变研究等领域有实际应用.目前国际上这一领域的研究很活跃.

在国内,复旦大学加速器实验室与中国科学院物理研究所也已开展这方面的实验与理论研究,北京应用物理和计算数学研究所则在电子碰撞激发理论方面开展研究,现都取得一定进展^[16].

6.3 单能中性原子束

对中性原子的研究,传统原子物理是使用

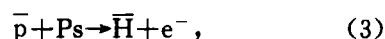
气室和超声原子束的方法.由于原子速度的麦克斯韦分布,能散度很大,因而发射和吸收光谱的多普勒增宽效应很大,光谱分辨率会受到一定的限制,而使用加速器产生的单能离子束,俘获电子后就能产生单能的中性束.

另一种有效的方法是由加速器产生同一种原子的、相同能量的正负离子束,使它们合并在一起,在飞行一段路径后相互中性化,最后获得中性束.

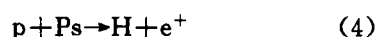
6.4 特殊原子的研究

80年代末始,特殊原子一个令人瞩目的研究方向是试图在实验室环境下人工合成反氢原子,即由一个正电子和一个反质子组成的氢原子.对反氢原子的结构和光谱研究可能会产生新的物理学研究领域.从实用角度看,反物质将是比原子能强大得多的超级能源.

丹麦 Aarhus 大学的 B. Deutch 和英国大学学院及美国 Los Alamos 的一些科学家组成的联合研究小组,为制造反氢原子而建立了一个实验装置^[17],其基本思想是用反质子俘获正电子素 Ps 中的正电子 e^+ 而形成反氢原子 H,其反应式为



而目前的模拟实验所用的反应为



6.5 C_{60} 和氢分子碰撞时解离散片的质谱研究

1985年美国 Rice 大学的 Smalley 小组发现球状结构的 C_{60} 大分子团簇后,引起了人们极大的兴趣.1990年后由于用碳棒放电法可大量制备,对其基本性质的研究正在多个方面进行.丹麦 Aarhus 大学的 Hveplund 用加速器产生的 C_{60} 离子束和 H_2 分子碰撞,研究其解离时碎片的质量分布.发现碎片中碳原子数都是偶数,分量分布为指数衰减形.我们发现电子碰撞 C_{60} 的解离碎片质谱也是指数分布^[18],与 J. Lindhard 的理论预示一致.

6.6 固体中原子碰撞

快离子束与固体中原子分子碰撞是基于加速器原子物理的一个重要研究领域.这里仅介绍快离子引起固体溅射领域研究中的一个令人

惊异的最新成就^[19].

当快离子轰击固体时,像牛胰岛素和 C₆₀球这样极端复杂的大分子可以整体被击出.图6形象地画出了这一物理过程.这一现象已被用于研究对生命过程有重要影响的 DNA 分子的链断裂位置.

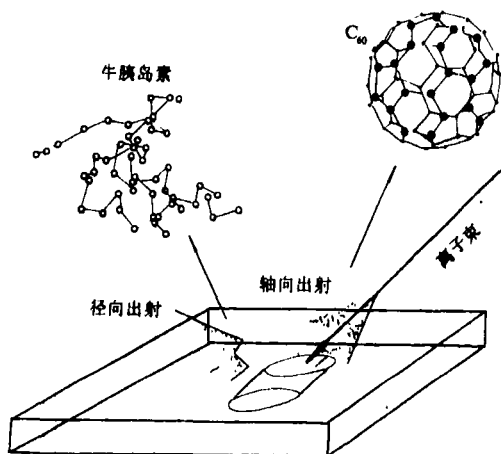


图6 加速器产生的高能重离子能从固体中击出完整的大分子

参 考 文 献

[1] 杨福家,科学,39-1(1987),27.

- [2] B. Craseman, Report of the Ad Doc Panel on Accelerator-Related Atomic Physics Reserch, NAS, Washinton D. C. , (1976).
- [3] W. E. Meyerhof, Report of the Workshop on accelerator-Based Atomic & Molecular Science, Univ. of Connecticut, (1981).
- [4] 美国物理学评述委员会著,伍列尧、陈凌冰译,原子分子物理与光学——90年代物理学,科学出版社, (1993).
- [5] 叶慧、杨福家,物理学进展,2-1(1982),18.
- [6] F. Q. Lu, J. Y. Tang, B. I. Deutch, *Phys. Rev. C*, **25** (1982), 1476.
- [7] Shu Wei, Lu Fuquan, Wu Songmao et al. , *Phys. Rev. A*, **44** (1991), 1843; *Phys. Rev. A*, **43** (1991), 1451.
- [8] J. Jin and D. Church, *Phys. Rev. Lett.* , **10** (1993), 3213.
- [9] H. W. Kugel and D. E. Murnik, *Rep. Prog. Phys.* , **40** (1970), 297.
- [10] D. R. Dewitt, D. Schneider, M. W. Clark et al. , *Phys. Rev. A*, **44** (1991), 7185.
- [11] T. Tanab et al. , *Phys. Rev. A*, **45** (1992), 276.
- [12] D. W. Spooner et al. , *Phys. Rev. Lett.* , **58** (1987), 341.
- [13] Zhang Chengteng, Xu Junshan, Guo Zhendi et al. , *Chin. Phys. Lett.* , **6** (1989), 4.
- [14] S. Datz et al. , *Phys. Rev. A*, **41** (1990), 3559.
- [15] J. C. Levin et al. , ORNL-6508, (1988).
- [16] 施伟、方渡飞、陆福全等,复旦学报, **33** (1994), 27.
- [17] L. Andersen, M. Charlton, B. I. Deutch et al. , Annual Report, Institute of Phys. , Aarhus Univ. , Denmark, (1990), 36.
- [18] 高海滨等,物理学报, **42** (1993), 1910.
- [19] R. E. Johnson and Bo U. R. Sundqvist, *Physics Today*, **45-3** (1992), 28.

宽温区磁致冷机工质材料的优化*

戴 闻

(中国科学院低温技术实验中心,北京 100080)

摘 要 评述了在室温以下的整个低温温区磁致冷机工质材料的研究进展,其中包括为扩展有效致冷温区而设计的复合铁磁材料,新近发展迅速的纳米磁致冷材料,在 H₂ 液化器中适用的稀土金属间化合物,以及纯 4f 族合金等.评价了各种工质材料的性能.通过对磁致冷 H₂ 液化器的焓分析,给出了工质材料的优化判据.

关键词 磁致冷,磁致冷材料,磁热效应

* 国家自然科学基金资助项目.

1994年11月21日收到初稿,1994年12月16日收到修改稿.