

重离子阻止本领研究的进展

卢希庭 金长文

(北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 我们从实验和理论两个方面对于阻止本领问题的研究进展进行了评价,并提出了需要解决的问题.

关键词 重离子, 阻止本领, 能量损失, 能量歧离, 原子团簇.

1 引言

入射带电离子在靶物质中穿行时,在靶物质中单位长度上的能量损失,称为靶物质对于入射离子的阻止本领,简称阻止本领.以入射离子的速度 V 来划分,将 $V < V_F$ (V_F 为 Fermi 速度: $\sim 25\text{keV/u}$) 的区域称为低速区,将 $V > 3V_F$ 的区域称为高速区,而将 $V_F < V < 3V_F$ 的区域称为中速区.阻止本领是一个基本的物理参数,它对于核物理、原子物理等基础研究具有十分重要的意义,同时,它又是离子注入等技术的物理基础.

对于阻止本领问题的研究始于本世纪初,主要研究天然放射源放射出的粒子在物质中的能量损失.从50年代开始,随着加速器的商品化,以及硅表面探测器和固态谱仪的出现,对于阻止本领问题有了系统的研究.离子沟道效率、Z1 振荡效应和 Z2 振荡效应的发现,以及对能量损失的物理、化学状态效应的研究,使得对阻止本领问题的实验研究有了长足的发展.

同时,能量损失理论也得到了发展.本世纪初,Bohr 基于经典力学的两体碰撞提出了计算能量损失的 Bohr 理论.30年代,Bethe 和 Bloch 通过量子力学的一级 Born 近似,得到了高速区的电子阻止本领理论(即 Bethe-Bloch 理论);50年代,Firsov 模型及 Lindhard 的介电描述;60年代,Lindhard 等人提出的低速区能量损失的 LSS 理论,80年代,Brand-Kitagawa 提出的有效电荷

理论,以及在此基础上 Ziegler 等人发展起来的 ZBL 半经验理论模型(ZBL 模型)等等,都从不同的角度对能量损失问题进行了研究.

计算机技术的发展,对阻止本领的研究起了很大的推动作用.目前,已有各种关于阻止本领及相关问题(例如离子注入等)的模型计算程序,其中比较流行的是 Ziegler 等人的阻止本领计算及射程模拟的 TRIM 程序.在应用技术中,在没有实验数据存在的地方,TRIM 可给出阻止本领及射程的预言值.

下面将从实验和理论两个方面进一步阐述对阻止本领问题研究的发展概况,发展方向及需要解决的问题.

2 实验研究

2.1 实验方法

到目前为止,测量阻止本领的方法已发展到几十种^[1],但最常用的方法是背散射法和透射法,约有50%的实验数据由透射法得到,约25%的实验数据由背散射法测得.各种实验方法均有独到的优越性,同时也各有其局限性.

背散射法的优点是样品制备比较简单,可测量的能量范围较宽,精度较高,其局限性是只适用于测量较轻离子在较重的单同位素靶中的能量损失.对于重离子在多同位素靶中发生背散射时,将产生“同位素效应”.

透射法的优越性在于利用自撑靶,测量系统简单,可测量的能量范围较宽,精度较高.但

该方法需要制备自撑膜,有些靶材料很难甚至不可能制成自撑膜,这就限制了透射法的使用范围.

另外,比较常用的实验方法还有:反转多普勒线移衰减法(IDSA), γ 共振位移方法等.

以前, γ 共振位移方法只是用来测量质子等轻粒子的阻止本领.1989年,卢希庭等^[2]首次采用该方法测量了重离子F在Al膜中的阻止本领.

卢希庭等^[3,4]建立了一种测量重离子阻止本领的新方法——弹性前冲探测质子法(ERDP).该方法利用样品表面和界面的氢污染,通过测量被重离子前冲出来的质子得到重离子在靶中的能量损失.

金长文等首次利用重衬底重离子背散射法方法(HRBS),测量了重离子在多同位素靶中Ag的阻止本领.该方法克服了“同位素效应”,使得用背散射方法测量重离子在多同位素靶中的能量损失成为可行的.

2.2 实验数据的分布

目前,对重离子在金属靶中的阻止本领的实验研究比较多,但实验数据主要集中在较高能区.在高速区,有一些系统的实验数据,而在中、低速区,特别是在阻止本领峰附近,实验数据比较零星,甚至在有些能区段,实验数据几乎是空白.

对于重离子在半导体中的阻止本领,相对来说研究得比较少.近期,K. Arstila等^[5]对于Mg离子在半导体Si、Ge及GaAs中的阻止本领进行了实验研究,这些研究对于辐照损伤和离子注入等的研究是很有意义的.

重离子在化合物中的阻止本领,实验上研究得比较少,到目前为止,我们发现的实验数据有:Raisanen和Rauhala^[6]测量了阻止本领峰值以上能区的Li、B、C、N和O等离子在Mylar、Kapton和Havar等化合物中的阻止本领;金长文等系统地测量了阻止本领峰区以下能区的离子B、C、O在Mylar膜中的阻止本领.

2.3 存在的问题

目前,在实验上需要解决的问题主要有:(1)系统的重离子阻止本领的实验数据,特别是在阻止本领峰区附近及峰区以下的能区,需要系统的实验数据.(2)不同实验方法得到的数据产生差异的问题.由不同的实验方法得到的数据,其差异有时已经超过实验误差本身.(3)实验数据的精度.随着探测系统精密度的提高,以及实验方法的发展,实验数据的精度也随之提高,但实验误差仍然较大.目前实验数据的误差达到(2~5)%.(4)能量歧离.同阻止本领一样,能量歧离也是一个很基本的物理参数,但是到目前为止,关于这方面的研究工作还比较少,对于能量歧离的研究,特别是对于重离子能量歧离的研究,还显得很薄弱.

2.4 其它

近年来,在实验上,对于原子团簇(Cluster)的研究成为一个非常热门的研究课题.研究的内容主要是聚变核反应和原子团簇本身的性质.我们认为,研究原子团簇在物质中的能量损失(阻止本领)也是一个很有意义的研究课题.

3 理论研究

3.1 能量损失理论的发展

最早在理论上研究能量损失问题的是N. Bohr,他研究的出发点是经典力学的两体碰撞,并且将能量损失分为两个部分:弹性能量损失——入射离子与靶原子核的碰撞和非弹性能量损失——入射离子与靶原子核外电子的碰撞.前者称为核能量损失,后者称为电子能量损失.相应地,阻止本领也分为两部分:核阻止本领和电子阻止本领.Bohr将能量损失表示为

$$\begin{aligned} (-dE/dX) &= (-dE/dX)_n + (-dE/dX)_e \\ &= \frac{4\pi Z_1^2 Z_2^2 e^4}{M_2 V} N \ln\left(\frac{2a}{b_n}\right) + \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{m V^2} N \ln\left(\frac{2P_{\max}}{b_e}\right) \\ &\approx \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{m V^2} N Z_2 \ln\left(\frac{2P_{\max}}{2Z_1 e^2 m V^2}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, Z_1 、 Z_2 分别为入射粒子和靶的原子序数, M_2 为靶原子的质量, N 为单位体积内的电子数目, m 为电子质量, b_n 及 b_e 为入射粒子与靶原子及入射粒子与电子碰撞直径, P_{\max} 和 a 为碰撞参

数, V 为入射粒子速度. Bohr 理论的适用范围是高速区. 在 Bohr 公式中, 入射粒子的原子序数出现在 \ln 项的分母中, 物理上解释不了.

30 年代, Bethe 和 Bloch 通过量子力学的一级 Born 近似, 推导了高速区的电子阻止本领表达式(即 Bethe-Bloch 理论), 其基本形式为

$$\left(-\frac{dE}{dX}\right)_e = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{mV^2} NZ_2 \ln\left(\frac{2mV^2}{I}\right) \quad (2)$$

其中, I 为原子的平均电离势. Bethe-Bloch 公式的适用范围是: $\sim 1\text{MeV/u}$ 至 $\sim 2\text{GeV/u}$. 此后, 很多研究工作致力于对 Bethe-Bloch 理论进行高阶效应的修正, 即所谓“Z 效应”. Bethe-Bloch 理论是直到目前为止被普遍采用的高速区能量损失理论.

60 年代, Lindhard 等人提出了低速区能量损失的 LSS 理论, 它集阻止本领和射程于一身, 是目前被普遍接受的能量损失理论之一.

80 年代, Brandt 和 Kitagawa^[7] 提出了计算离子在靶中的有效电荷理论(即 BK 理论), J. F. Ziegler 等人^[8] 在 BK 理论的基础上, 通过现存的阻止本领实验数据, 给出了计算重离子阻止本领的半经验理论—ZBL 理论. ZBL 理论在目前应用中被普遍采用.

本世纪初, Bragg 提出离子在化合物中的阻止本领为离子在组成化合物的单质靶中的阻止本领之和, 即 Bragg 法则

$$S(A_n, B_m) = nS(A) + mS(B) \quad (3)$$

其中 n 和 m 分别为成分 A 和成分 B 的相对贡献. 以后的实验发现, 与 Bragg 法则存在偏差, 并对 Bragg 法则进行了修正.

80 年代, Ziegler 等^[9] 基于 Bragg 法则, 并且考虑到化学键的修正, 提出了计算化合物阻止本领的 CAB(Cores and Bonds)半经验理论. 其基本表达式为

$$S(Z_1) = (\gamma Z_1)^2 [\Sigma \text{ Cores} + \Sigma \text{ Bonds}] \quad (4)$$

近年来, Sigmund、Oddershede 及 Subin 等人对能量损失理论也做了大量的研究工作. Thaiwata 在系统评价阻止本领的实验数据时发现, 阻止本领与靶的状态有关, 及离子在同一种靶元素中, 在靶为气体状态时的阻止本领比其在固态中的

值要大, 即阻止本领的状态效应.

90 年代, 对于原子团簇(Cluster)的阻止本领进行了一些研究, 例如, Shulga^[10] 研究了 Cu 原子团簇(Copper Cluster)在 Cu 中的阻止本领, 并且给出了两个原子团簇与靶原子相互作用的模型. 我们认为, 对于原子团簇在材料中阻止本领的研究, 对于能量损失理论的发展具有十分重要的意义.

3.2 理论发展需要解决的问题

目前, 理论上需要解决的问题主要有: (1) 中、低速区的能量损失理论. 到目前为止, 在阻止本领峰附近还没有明确的理论. 主要问题是有效电荷的问题不清楚. (2) 有效电荷问题. 目前关于有效电荷问题的研究主要是基于 BK 理论, 而 BK 理论本身是一个参数化的表述, 没有从根本上解决有效电荷的问题. (3) Bethe-Bloch 理论的高阶效应修正问题. Bethe-Bloch 理论本身是一个微观理论, 但是对于理论的修正则多基于实验数据. 因此, Bethe-Bloch 理论还有待于进一步的发展. (4) 能量歧离理论. Bohr、Lindhard-Scharff 和 Chu 等人曾研究了轻粒子的能量歧离问题, 但是对重离子的能量歧离问题研究得比较少.

4 结束语

我们从理论和实验两个方面对重离子阻止本领的研究进展进行了介绍. 我们认为, 虽然对阻止本领问题的研究已经有了近一个世纪的历史, 但其根本问题并没有解决. 阻止本领作为一个基本的物理参数, 对它的研究, 无论是对于理论的发展, 还是对于核技术的应用, 都是具有十分重要意义的.

参 考 文 献

- 1 Powers D. Nucl. Instr. and Methods, 1989, B40~41: 350
- 2 Lu Xiting, et al. Nucl. Instr. and Methods, 1989, B36: 350
- 3 Lu Xiting, et al. Nucl. Instr. and Methods, 1991, B58: 280
- 4 Jin Changwan, et al. Chinese Phys. Lett., 1991, 8: 615
- 5 Arstila K, et al. Phys. Rev., 1991, B43(13): 967
- 6 Raisanen J, Rauhala E. Phys. Rev., 1990, B41: 3951
- 7 Brandt W, Kitagawa M. Phys. Rev., 1982, B25: 5631

- 8 Ziegler J F, et al. "Stopping Powers of Heavy Ions in Solids", Pergamon Press, 1985, B35 : 215
10 Shulga V I. Nucl. Instr. and Methods, 1991, B58 : 422
- 9 Ziegler J F, Manoyan J M. Nucl. Instr. and Methods, 1988, 1991, B58 : 422

Progress of Study on Heavy-ion Stopping Power

Lu Xiting Jin Changwen

(*Department of Technique physics, Beijing University, Beijing 100871*)

Abstract A review of study progress on HI stopping power from experimental and theoretical research is given. Problems to be solved are put forward.

Key Words HI, stopping power, energy loss, energy straggling, atomic cluster.

全国核医学电子学会议在华侨大学举行

第五届全国核医学电子学学术交流会议于 1993 年 11 月 9 至 13 日在福建泉州华侨大学召开。中国医学科学院, 中国原子能研究院, 北京、西安核仪器厂、高能物理所, 航天局二院, 北京大学技术物理系, 清华工程物理系, 中国、西安、上海、河南医科大学, 福建、山西医学院, 福建省医院, 华侨大学, 北京、广州军区、海军总医院, 天津市北方半导体公司等 37 个单位 45 位教授、专家参加了会议。这次会议是继 1991 年黄山会议以后, 我国核医学界从事核物理、核医学、计算机技术和核医学仪器的广大科技工作者的又一次聚会。两年多来, 我国在该领域取得了重大的进步与发展, 如单光子发射计算机断层(SPECT)研制已列入“八五”国家攻关项目, 组织国内有关单位进行国产化攻坚战。 γ 照相机和 γ 照相机图像处理系统, 也在国产化的轨道上稳

步前进。在 γ 照相机、SPECT 机的质量控制和模型研制方面, 我国的工作也受到了国际原子能机构(IAEA)的重视, 在我国举办了两届学习班。在放免仪、功能仪、骨密度计及活度计等研制与应用中也有了可喜的结果。正电子发射计算机断层(PET)扫描在研制和应用上, 都显示出很广阔的前景。

我国每年进口核医学仪器的花费数以亿元计。专家们希望引进单位, 能向我国专家及时咨询和加强信息交流, 防止上当受骗。

这次会议经专家审核, 出版了会议论文选集。这些论文从深度、广度上集中反映了我国核医学电子学及核医学两年多来的发展。

(福建省核物理学会 柯文供稿)

我国第一条放射性核次级束流线建成

本刊讯 中国原子能科学研究院的研究人员, 在串列加速器国家实验室的一台端电压为 13MV 的串列加速器上, 已经取得了一系列重要科研成果, 其中包括大洋底铁锰结核痕量 ^{10}Be 的加速器质谱分析、航天用大规模集成电路单粒子效应模拟和反常快中子飞行时间谱仪等, 在我国核物理研究领域发挥了重要

作用。最近, 他们又在这台加速器上建成了我国第一条放射性核次级束流线。到 11 月 20 日, 他们已在这条束流线上首次成功地获得 ^{11}C 和 ^{17}F 放射性束。这一成果的取得, 大大拓宽了我国核物理研究的广度和深度, 必将为我国核物理基础研究增添新的活力, 从而也使我国进入这一研究领域的国际前沿。