

里，作为欧洲共同体的重要研究成果之一，所测得的 H_3 分子的复合离解几率决定了“宇宙射线电离几率 ζ ”^[6-10]， $\zeta = k_e n(e) n(H_3^+) / n(H_2)$ ，这里 k_e 为 H_3 分子的复合离解几率， $n(e)$ 为电子数密度。 $n(H_3^+)$ 和 $n(H_2)$ 分别为 H_3^+ 和 H_2 的密度。由 ζ 的数值可以推知宇宙射线的能谱分布，从而获得宇宙演化的直接信息(图 1)。

以瑞典斯德哥尔摩大学物理系 Larsson 教授的研究小组为代表的一批研究组，包括，海德堡马普核物理研究所、阿胡思大学、维也纳技术大学、里昂大学、美国哥伦比亚天体物理实验室、美国佛罗里达大学和伊利诺斯大学等研究小组，一直活跃在分子复合离解研究的前沿。他们研究了一系列对化学、天体物理、大气物理和等离子体物理有重要意义的分子离子的复合离解过程，研究了分子振动激发态的特性，测量了复合离解截面和不同反应道的分支比，研究了同位素效应对复合离解过程的影响。他们的这些结果对理解星体演化、行星电离层内部的化学物理过程和等离子体过程起到了重要的作用。

随着研究工作的不断深入，人们越来越关注对理论研究有重要意义的质量数大于 70 的复杂分子的复合离解过程，比如目前广受关注的 $x \geq 2$ 的 $C_x H_y^+$ 分子的 C—C 键断裂机制^[1, 11]，测量各个反应道的分支比；提高对天体演化研究有重要意义的质量数为 50 左右的分子离子复合离解研究的分辨率，获得天体物理研究所急需的精细物理信息；研究生物分子离子和团簇离子的复合离解，等等。但由于磁刚度的限制，目前所能研究的分子离子质量数小于 70，且能量不够高，严重制约了实验分辨；而对于质量数为 50 左右的分子离子，其测量分辨还远不能满足要求。因此，存储环的磁刚度成为了制约分子物理研究继续深入和拓展的瓶颈^[12]，提高磁刚度成为进一步广泛、深入研究分子离子复合离解的关键。

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)是“九五”国家重大科学工程^[13]，已于 2007 年建成出束，2008 年通过国家验收。它是一个集加速、累积、冷却、储存、内靶实验及高分辨测量于一体的多功能实验装置。它由主环 CSRm(周长 161 m，磁刚度 12.1 Tm)和实验环 CSRc(周长 128.8 m，磁刚度 9.4 Tm)构成，能够提供多种类、高品质、宽

能量范围(10—1100 MeV/u)的全剥离重离子束和放射性束。实验环可用作高分辨质量谱仪。HIRFL-CSR 的科学目标是：为我国在强子物质相互作用、极端条件下原子核性质，特别是放射性束物理、高离化态高 Z 原子物理、高能量密度物理(重离子驱动惯性约束核聚变新能源前期研究)等基础研究方面，以及重离子束在生命科学(如重离子治癌)、材料科学和航天科学等应用研究方面，实现跨越式发展取得一批具有国际先进水平的成果，提供先进的研究条件，从而促进我国相关战略技术的发展，使我国在重离子物理及其交叉学科国际前沿领域的激烈竞争中继续占有一席之地。

在 HIRFL-CSR 实验环建设一条分子离子注入线，将为 HIRFL-CSR 系统开辟一个全新的研究领域——分子离子复合离解研究。与现有用于分子离子复合离解研究的储存环相比，HIRFL-CSR 实验环将以高出 6.7 倍磁刚度的优势，成为世界上磁刚度最高的用于分子离子复合离解研究的重离子冷却储存环，可扩展所能研究的分子离子的种类，显著提高能量分辨，拓展人类对天体演化链的认识。

2 分子离子注入线的总体方案

本工作拟在 HIRFL-CSR 实验环上增建一条分子离子注入线，并进行相关改造，将实验环建设成可兼顾现有物理实验和大分子物理研究的综合性研究平台。在建成的大分子物理研究平台上，可进行分子离子复合离解研究，特别是质量数大于 70 的复杂分子复合离解过程的研究，并促进复杂分子体系复合离解过程的理论发展，从而拓展人类对天体演化链的认识。

大分子研究平台的建设内容包括：分子离子注入线、实验探测系统和实验环改造，具体建设内容见表 1。分子离子注入线包括分子离子源、高压平台、磁铁及电源、Glaser 透镜及电源、三圆筒透镜及电源、加速管、束诊元件和真空系统，以及中性粒子探测系统。为满足分子离子的注入和环内物理实验的要求，需要增加一台新的凸轨磁铁 Bumper 和一台能提供横向温度极低的高品质电子束的专用电子内靶装置，并对注入点真空室和实验环束诊系统作必要改造。

为满足 CSRc 的注入条件，需要对分子离子进行预加速。由于分子离子的质量数较大，经过计算

表明,采用一台 320 kV 的高压平台分子离子源作为预加速系统即可,从而使得分子离子注入线大为简化。另外,还必须考虑足够的真空过渡区。离子源引出孔径为 $\phi 7$, 发散角 30 mrad, 最大引出电压 20 kV; 三圆筒静电透镜最大电压 15 kV, 中间圆筒电极长 75 mm, 直径 80 mm, 圆筒间距 12 mm; 加速管长 600 mm, 最大电压 320 kV; 共用 7 台孔径 $\phi 80$ mm、长度 400 mm 的四极透镜, 一台 17.1° 、半径 1 m 的偏转磁铁匹配注入实验环。分子离子源及引出系统的真空度一般在 10^{-7} mb 量级, 而实验环的真空度在 10^{-11} mb 量级, 分子注入线必须进行全线烘烤, 以顺利实现从 10^{-7} mb 向 10^{-11} mb 真空的过渡。

CSRe 的注入磁刚度下限为 0.5 Tm, 对质量数为 40 的分子离子, 所需的注入能量是 7.32 keV/u, 该能量可以通过一个 300 kV 的高压平台预加速系统达到。

3 技术方案

CSRe 分子离子研究平台由离子源、320 kV 高压平台、注入线、CSRe 注入系统和专用电子内靶组成。其中离子源、320 kV 高压平台、注入线和专用电子内靶是新设计建造的。CSRe 注入系统将采用原有的结构, 但要根据分子离子的注入特点和参数要求进行新的注入设计, 并对一些设备进行的改造。下面分别阐述总体注入方案和相关的子系统。

3.1 分子离子注入 CSRe 的物理设计

现有设计的 CSRe 单圈注入系统由 4 个嵌在弯转处的凸轨线圈、快脉冲踢轨磁铁(KICKER)和切割磁铁组成(元件参数见表 1)。在注入中, 4 个凸轨线圈将束流轨道凸起, 靠近切割磁铁。注入束流在下游经快脉冲 KICKER 的踢击, 跟环内束流重合。

从分子离子源引出的带单位正电荷的分子离子, 经 320 kV 高压平台加速为 0.002—0.005 MeV/u 后注入 CSRe, 表 2 给出了分子离子的注入参数。注入 CSRe 的分子离子的回旋周期为 100—250 μ s, 要求单圈注入中凸轨平顶时间约为 100—250 μ s, 而 CSRe 目前注入系统中 KICKER 的平顶时间约为 0.4—0.8 μ s, 远远小于分子离子注入所需时间, 因此必须对 CSRe 现有的注入系统进行重新设计。但是, 新的注入系统不能影响 CSRe 现有

的注入系统, 同时要尽可能利用现有的注入设备。

表 1 CSRe 注入元件参数

部件名称	参量	指标
二极铁线圈	数量	4
	偏转角度	12 mrad
	最大磁场	0.0429 T
	上升(下降时间)	80 ms
切割磁铁	数量	1
	偏转角度	145 mrad
	最大磁场	0.84 T
	有效长度	1600 mm
	总长度	1800 mm
	孔径	65 mm \times 50 mm
	厚度	18 mm
踢轨磁铁 (KICKER)	弯曲半径	11200 mm
	单元数	3
	偏转角度	1.4 mrad
	最大场强	0.032 T
	有效长度	370 mm
	总长	540 mm
	孔径	(150+150) mm \times 70 mm
	上升时间	<100 ns
	平顶时间	0.4—0.8 μ s

表 2 分子离子注入基本参数

参量	指标
束流种类	大分子离子(A=40—180)
束流能量	8 keV/u (A=40), 2 keV/u (A=180)
离子数	10^{11-13} ion/s, 0.2—1 μ A
束流发射度	$\leq 5 \pi$ mm \cdot mrad
动量分散	$\approx 10^{-3}$
回旋周期	100—250 μ s

图 2 给出了 CSRe 注入段的元件分布图。新注入方案中, 将在 BPM(BD42Pxy1) 的地方安装一台凸轨磁铁 Bumper(见图 2 中左下角), 踢击注入分子离子束流的轨道, 使其在下游位置跟凸轨重合。增加了新的注入 Bumper 磁铁后, CSRe 分子离子注入系统将由 1 个切割磁铁、4 个凸轨线圈和 1 个 Bumper 磁铁组成。在注入分子离子的过程中, 先由 4 个凸轨线圈将分子离子束轨道凸起, 使其靠近切割磁铁, 从注入线来的分子离子束由切割磁铁偏转注入环中, 注入分子离子束在下游经 Bumper 踢击, 跟环内束流重合。表 3 给出了分子离子注入 CSRe 的基本参数, 图 3 给出了分子离子注入轨道

分布，图 4 给出了分子离子注入 CSRe 凸轨时水平束流包络，图 5 给出了分子离子注入 CSRe 凸轨时

垂直束流包络，表 4 给出了 CSRe 注入分子离子时的元件参数。

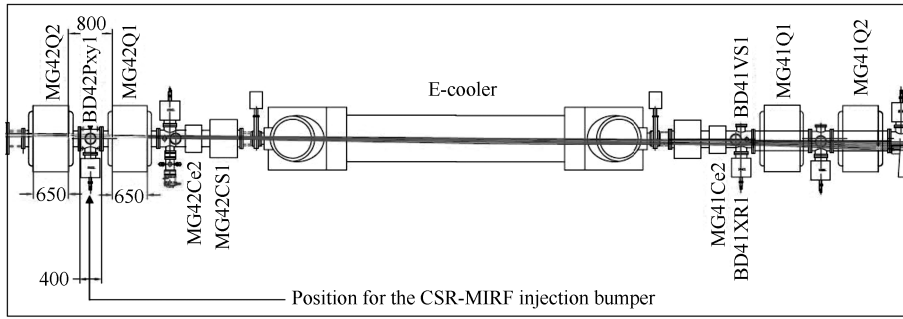


图 2 CSRe 注入直线段的元件分布

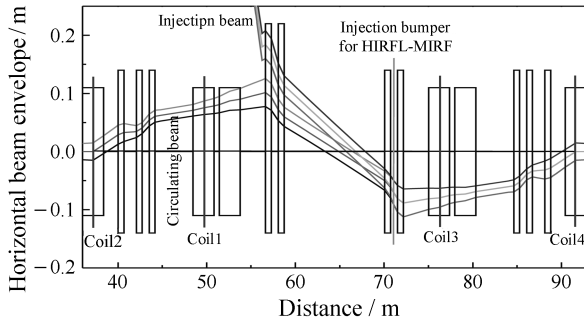


图 3 分子离子注入 CSRe 时的轨道分布

表 4 CSRe 注入分子离子时的元件参数

部件名称	参量	指标
二极铁线圈		同表 2
切割磁铁		同表 2
凸轨磁铁	单元数	1
Bumper	偏转角度	3—5 mrad
	最大场强	0.025 T
	有效长度	350 mm
	总长	500 mm
	孔径	(150+150) mm × 70 mm
	下降时间	<100 μs
	平顶时间	100—250 μs

表 3 分子离子注入 CSRe 时的基本参数

	Septum	Coil1	Coil2	Coil3	Coil4	Bumper
参量 / mrad	145	-0.1	-8.0	1.6	8.4	3.5

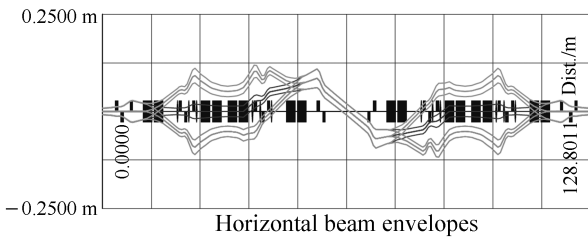


图 4 分子离子注入 CSRe 凸轨时的水平束流包络

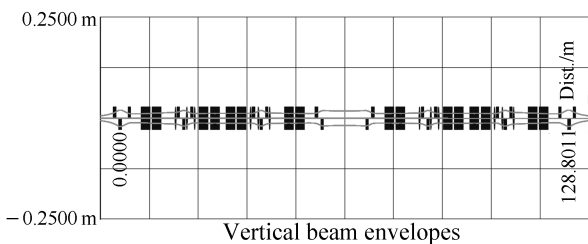


图 5 分子离子注入 CSRe 凸轨时的垂直束流包络

综上所述，在不影响 CSRe 现有的注入系统的前提下，安装一个适合分子离子注入参数要求的新凸轨磁铁 Bumper，加上现有的一个切割磁铁和 4 个凸轨线圈，可以实现分子离子的注入。

3.2 相关改造

(1) 束流诊断系统

分子离子源的流强范围为 1 nA—1 μA，对于质量数较大的分子离子流强在几个到几十 nA 的量级。CSRe 现有束流诊断系统对 nA 级别的流强是不灵敏的，因此需重新配置束流诊断系统。

新的诊断系统必须能测量流强很低的直流和脉冲束。我们拟采用 Manne Siegbahn 实验室技术人员发展的高灵敏束流诊断技术，用 ICT 和电容式 Pick-up 的组合测量脉冲束。先用较大的流强对 Pick-up 进行标定，然后用 Pick-up 来测量弱流强的

分子离子束，测量下限可达 0.1 nA，可以满足在环内测量大分子离子的要求。对于连续束，可用微通道板、残余气体探测器和中性粒子探测器的组合系统来进行测量。

(2) 电子内靶

在储存环上开展分子离子复合离解实验研究时，储存环电子冷却装置被用作电子内靶装置，冷却段即为分子离子与电子相互作用的区域。由于此电子冷却的工作能量较高，不适合用作提供低能分子-离子复合实验中所需要电子束的电子内靶装置，且由于阴极尺寸和螺线管磁场的限制，电子温度较高。若将此装置改造，需要更换电子枪、高压系统和电子枪段螺线管等部件。综合上述因素考虑，在 CSRe 分子离子研究平台项目中，需要另外设计一台实验专用的电子内靶装置，用于提供开展高精度分子离子实验所需的横向温度极低的高品质电子束。

如图 6 所示，新建的 CSRe 电子内靶位于第一象限直线段内，该直线段位于两块二极铁之后，一套三组合透镜之前，总长 2.95 m。主要包括电子枪与收集器、引导磁场、高压系统、真空以及冷却系统。电子枪产生的电子束，被加速到所需能量，通过绝热展开降低温度，经纵向引导磁场偏转到储存

生，最大磁场强度为 3 T，其余传输段(包括相互作用段)纵向磁场强度 0.03 T，最大绝热展开因子为 100。另外，对于在低能情况下运行的电子内靶装置，采用光阴极产生的电子束，其纵向温度小于热阴极发射电子束的十分之一；而绝热展开之后的电子束横向温度仅决定于阴极温度，采用光阴极可以使电子束横向温度降低约 10 倍。CSRe 电子内靶主要参数如表 5 所示。

表 5 CSRe 电子内靶主要参数

参量	指标
电子能量	50—104 eV
装置总长度	2.0 m
相互作用段有效长度	0.7 m
冷却离子束能量	0.1—18 MeV/u
绝热加速长度	1.0 m
电子枪导流系数	1—2
电子束最大流强	10 mA
绝热展开因子	10—100
阴极半径	2.0 mm
引导磁场强度	0.03 T
电子枪段最大纵向磁场强度	3.0 T

4 总结

本文在介绍储存环高精度分子谱学研究的科学意义和国内外研究现状的基础上，重点介绍了利用 HIRFL-CSR 开展该项研究的优势以及总体设计方案和技术方案，分析了需要改进的关键环节。本项目的开展将使 HIRFL-CSR 实验环成为世界上磁刚度最高的用于分子离子复合离解研究的重离子冷却储存环，可以大大扩展所能研究的分子离子的种类，显著提高能量分辨，拓展人类对天体演化链的认识，在分子离子复合离解研究领域将具备独一无二的优势。

参考文献 (References):

[1] Geppert W D, Larsson M. Molecular Physics, 2008, **106**: 2199.
 [2] Florescu-Mitchell A I, Mitchell J B A. Phys Rep, 2006, **430**: 277.
 [3] Adams N G, Poterya V, Babcock L M. Mass Spectrom Rev,

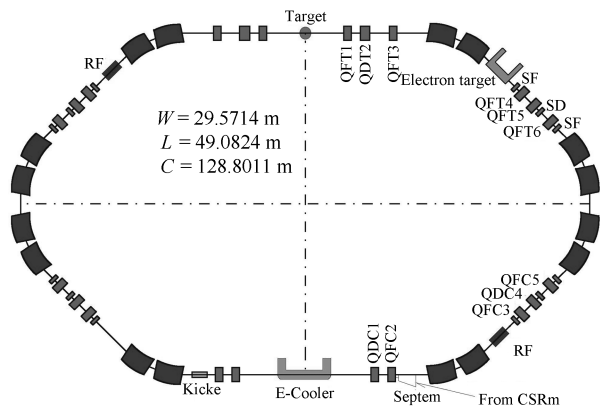


图 6 CSRe 总体布局图

环的直线段内，与分子离子发生相互作用，之后电子束被重新偏转出储存环，被收集器收集。其总体设计与现有的 300 kV 电子冷却装置相似。CSRe 电子内靶提供的电子束最大能量为 10 keV，适用于能量低于 18 MeV/u 的分子束实验。为了获得极低的电子束温度，同时有效约束电子束传输，抑制空间电荷效应，电子枪段的纵向磁场采用超导螺线管产

- 2006, **25**: 798.
- [4] Thomas R D. *Mass Spectrom Rev*, 2008, **27**: 485.
- [5] Larsson M, Orel A E. *Dissociative Recombination of Molecular Ions*. New York: Cambridge University Press, 2008, 315—320.
- [6] McCall B J. *Spectroscopy of H_3^+ in Laboratory and Astrophysical Plasmas*. Chicago: University of Chicago, 2001, 111.
- [7] McCall B J, Geballe T R, Hinkle K H, *et al.* *Science*, 1998, **279**: 1910.
- [8] McCall B J, Huneycutt A J, Saykally R J, *et al.* *Nature*, 2003, **422**: 500.
- [9] Kreckel H, Motsch M, Mikosch J, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2005, **95**: 263201.
- [10] Fonseca dos Santos S, Kokoouline V, Greene C H. *J Chem Phys*, 2007, **127**: 124309.
- [11] Turner B E, Herbst E, Terzieva R. *Astrophys J*, 2000, **126** (Suppl Ser): 427.
- [12] Geppert W D, Thomas R, Semaniak J, *et al.* *Astrophys J*, 2004, **609**: 459.
- [13] Xia J W, Zhan W L, Wei B W, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 2002, **A488**: 11.

Feasibility Analysis of Studying Dissociative Recombination Processes of Molecular Ions at HIRFL-CSR^{*}

CAI Xiao-hong¹⁾, YU De-yang, YANG Jian-cheng, MAO Li-jun, RUAN Fang-fang, LU Rong-chun,
SHAO Cao-jie, SONG Ming-tao, XUE Ying-li, WANG Wei
(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: In the present paper, it is introduced the scientific background and the current status of the high precision spectroscopy of the molecular ions at cooler storage ring. The advantages to study the dissociative recombination(DR) processes using cooler storage ring CSRe are discussed. The physics design, the main parameters of the injection beam line and the injection of the molecular ions into the CSRe and the key techniques are described in detail. With a new injection beam line, HIRFL-CSRe will be reconstructed to a multi-discipline research platform, offering good opportunities for the study of DR processes of molecular ions, especially for that of the molecular ions of $m > 70$ amu with much improved resolution.

Key words: storage ring; molecular ion; dissociative recombination

* **Received date:** 9 Feb. 2010; **Revised date:** 9 Apr. 2010

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10820202050)

1) E-mail: caixh@impcas.ac.cn