

专题: 磁约束等离子体中的高能粒子 · 封面文章

# EAST 上中性束注入和离子回旋共振加热下快离子分布函数层析反演\*

孙延旭<sup>1)2)</sup> 黄娟<sup>1)†</sup> 高伟<sup>1)</sup> 常加峰<sup>1)</sup> 张伟<sup>1)</sup> 史唱<sup>1)</sup> 李云鹤<sup>3)</sup>

1) (中国科学院合肥物质科学研究院, 等离子体物理研究所, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学, 合肥 230026)

3) (北京大学, 核物理与技术国家重点实验室, 北京 100871)

(2023 年 5 月 24 日收到; 2023 年 6 月 30 日收到修改稿)

聚变等离子体中快离子分布函数的速度空间层析反演 (tomography) 是研究磁约束核聚变装置中快离子分布和输运的重要手段. 在东方超环 (experimental advanced superconducting tokamak, EAST) 中性束注入 (neutral beam injection, NBI) 与离子回旋共振加热 (ion cyclotron range of frequencies heating, ICRF) 协同加热实验中, 快离子诊断测量信号以及 TRANSP 模拟获得的快离子分布函数中观测到协同效应产生的高于中性束注入能量的高能粒子. 为了研究快离子分布行为, 获得不同加热条件下诊断测量的快离子分布函数, 采用不同的正则化方法, 增加先验信息以及将快离子  $D_\alpha$  光谱诊断 (fast-ion  $D_\alpha$  spectroscopy, FIDA) 与中子发射谱仪 (neutron emission spectrometers, NES) 相结合等方式, 有效提高快离子诊断信噪比以及在速度空间权重覆盖率, 实现在单独 NBI 加热以及 NBI 和 ICRF 协同加热条件下基于诊断测量的层析反演, 获得真实可靠的快离子分布函数. 这为下一步提高 NBI 与 ICRF 协同加热效率, 研究协同加热机制以及相关的快离子分布和输运行为奠定基础.

**关键词:** 速度空间层析反演, 快离子  $D_\alpha$  光谱诊断, 中性束注入, 离子回旋共振加热**PACS:** 52.25.Xz, 52.35.Hr, 52.55.Fa, 52.70.Nc**DOI:** 10.7498/aps.72.20230846

## 1 引言

在磁约束核聚变装置中, 由中性束注入 (NBI) 和离子回旋共振加热 (ICRF) 等辅助加热产生的快离子在提高电流驱动和等离子体加热效率中起着重要作用<sup>[1]</sup>. 协同效应是通过 ICRF 的快波电场梯度加速位于高次谐波共振层附近的束离子, 而协同效应产生高能离子尾巴, 提高等离子体性能的机制在 DIII-D<sup>[2]</sup>, ASDEX Upgrade<sup>[3]</sup>, JET<sup>[4,5]</sup> 等各大装置上得到实验验证. 各种高能粒子诊断, 如快离子  $D_\alpha$ (FIDA) 诊断<sup>[6,7]</sup>、相干汤姆逊散射 (CTS)<sup>[8,9]</sup>、

伽马射线光谱 (GRS)<sup>[10,11]</sup> 和中子发射光谱 (NES)<sup>[12]</sup> 等被应用于协同加热下的快离子分布信息的测量.

高能粒子诊断获得的是快离子分布函数局部的一维投影或其他衍生量, 无法直接得到分布函数. 通过速度空间层析反演 (tomography) 方法<sup>[13,14]</sup> 对快离子诊断测量进行反演获得速度空间二维快离子分布函数已经成功应用于各大托卡马克装置, 包括 ASDEX Upgrade<sup>[15–17]</sup>, DIII-D<sup>[18]</sup> 和 MAST<sup>[19]</sup>. 特别是在 ASDEX Upgrade, 拥有五视场 FIDA 诊断, 为反演提供丰富的数据集, 在速度空间有足够的覆盖率, 提高了反演的精度. 以前的研究表明, 在速度空间探测范围不完全覆盖的情况下, 从诊断

\* 国家磁约束聚变能源研究专项 (批准号: 2019YFE03020004) 和国家自然科学基金 (批准号: 11975276) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [juan.huang@ipp.ac.cn](mailto:juan.huang@ipp.ac.cn)

系统中重建速度分布函数是十分困难的. 而通过在快离子速度空间层析反演方法中结合不同诊断方法的测量, 可以提高速度空间的分辨率和覆盖率, 在 ASDEX Upgrade 上结合 FIDA 和 CTS 诊断<sup>[20]</sup>、JET 上已经成功地结合 NES 和 GRS 诊断实现速度空间分布函数的反演<sup>[21]</sup>. 在 EAST 托卡马克上, 尽管双视场 FIDA 诊断的速度空间覆盖率有限, 但通过在零阶 Tikhonov 正则化层析反演方法中添加先验信息以及将 FIDA 与 NES 诊断结合, 实现了 NBI 加热下快离子分布函数重建<sup>[22,23]</sup>. 同时, 随着 EAST 上 NBI 以及 ICRF 加热效率的提高<sup>[24]</sup>, 最近在 EAST 进行的实验中观察到通过 NBI-ICRF 协同加热, NBI 的能量低于 80 keV 的束离子被加速至 300 keV 以上, 同时提高了储能、中子产额等等离子体参数, 进一步扩展了 EAST 装置运行区间<sup>[25]</sup>, 相应的协同加热下的快离子分布的测量与反演亟待解决.

为了提高 EAST 上基于快离子诊断测量的速度空间层析反演方法的可靠性, 获得 NBI-ICRF 协同加热下的快离子分布函数. 本文基于快离子诊断实验测量数据采用一阶 Tikhonov 正则化方法, 通过加入额外的先验信息, 例如空值测量 (null measurement)、速度空间 NBI 峰值位置 (known peaks) 等, 以及将 FIDA 与 NES 诊断相结合的方法提高 EAST 上反演快离子分布函数的精度, 获得 NBI 单独加热以及 NBI-ICRF 协同加热下的快离子分布函数, 验证 EAST 上 NBI-ICRF 协同加

热效应, 为开展协同加热下快离子行为物理研究, 探索提高协同效应以及加热效率的方法奠定基础.

## 2 快离子速度空间层析反演

### 2.1 FIDA 和 NES 诊断

FIDA 诊断系统通过测量快离子与注入的中性束发生电荷交换反应后发出的 Balmer-alpha 辐射, 从测量光谱中的多普勒频移获得关于快离子速度分布的信息. 而安装在 H 窗口的 NES 诊断可以测量从视线中逃出的聚变产生的中子<sup>[26]</sup>. 图 1(a) 俯视图和图 1(b) 极向截面图描述了 EAST 上 FIDA 和 NES 诊断系统的总体布局, 以及本文中使用的放电. 在 EAST 上包括安装在 O 窗口的切向视图和 B 窗口的垂直视图两套 FIDA 诊断系统<sup>[27]</sup>, FIDA 以 A 窗口 NBIIL 为诊断束, 诊断视场与托卡马克内局部磁场的夹角范围是  $10^{\circ}$ — $20^{\circ}$  (O 窗口),  $75^{\circ}$ — $84^{\circ}$  (B 窗口), 中平面上的测量光斑尺寸为 3 cm. 分别覆盖径向位置 177—237 cm 和 177—205 cm 的区域, 两个窗口观测位置重叠以实现快离子分布函数的反演. 由于 FIDA 测量的信噪比通常在靠近等离子体芯部区域较好, 同时那里的快离子密度通常是最高的, 所以本文采用 O 窗口和 B 窗口 FIDA 视图的芯部测量, 其大半径  $R$  分别约为 195 cm 和 194 cm (归一化小半径  $\rho \sim 0.2$ ), 对应图 1 中红色视线观测位置. EAST 上 FIDA 诊断使用 NBIIL 束调制的时间片减法 (束开-束关) 去

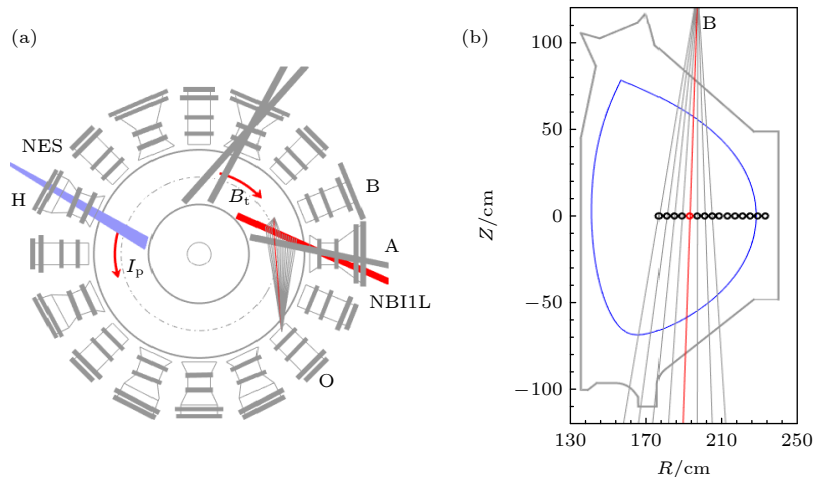


图 1 EAST 托卡马克上四条中性束束线位置、O 和 B 窗口 FIDA 视图以及 NES 的布局 (a) 俯视图; (b) 极向截面图. 视场中的红线是本文所分析的信号的观测位置

Fig. 1. Layout of four neutral beams, the O and B-port view of FIDA, the location of the NES on EAST: (a) Top view; (b) poloidal view. The red lines-of-sight are analyzed in this paper for shot #113648.

除复杂的背景辐射, 同时在光谱仪中使用 2 nm 宽的陷波滤波器过滤掉来自边界的波长为 656.1 nm 的冷  $D_\alpha$  光.

为了从诊断测量光谱中获得快离子分布函数, 需要引入一个权重函数  $\mathbf{W}$ , 权重函数代表诊断测量的速度空间灵敏度, 在特定速度空间的快离子与注入的中性束发生电荷交换反应被中和, 并在特定波长范围内发射  $D_\alpha$  光子的概率. 通过构建的权重函数  $\mathbf{W}$  将快离子速度空间分布函数与特定光谱范围内的信号联系起来:

$$\mathbf{S}(\lambda) = \int_0^\infty \int_{-1}^{+1} \mathbf{W}(\lambda, E, p) f(E, p) dE dp, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{S}(\lambda)$  为测量信号;  $f(E, p)$  是任意的快离子速度分布函数;  $E$  代表快离子能量;  $p$  是俯仰角 ( $v_{\parallel}/v$ ), 其中  $v$  为快离子速度,  $v_{\parallel}$  是与磁场平行的速度分量,  $\lambda$  代表波长. 图 2(a)、图 2(b) 和图 2(c) 分别为 NES 诊断以及 FIDA 切向视图、垂直视图在速度空间权重覆盖率, 由该视图的所有测量相关的权重函数相加得到. 以前的研究表明, 速度空间权重函数的充分覆盖对于利用层析反演提供可靠的重建至关重要<sup>[9]</sup>.

## 2.2 速度空间快离子分布函数层析反演

速度空间层析反演需要解决一个不适定问题, 依赖于确定寻求方程  $\mathbf{F}^*$ ,  $\mathbf{S} = \mathbf{W}\mathbf{F}^*$  的数学上不稳定的解. 在这个方程中  $\mathbf{S}$  代表测量信号和快离子分布函数  $\mathbf{F}^*$  之间的关系, 传递矩阵  $\mathbf{W}$  为已知的权重函数. 为了获得这个不适定问题的稳定解决方案, 需要进行正则化. 以前的研究表明, 使用 Tikhonov 正则化方法<sup>[28]</sup> 可以在托卡马克等离子体中实现快离子分布函数的可靠反演. 这种方法的关键

在于解决最小化问题:

$$\mathbf{F}^* = \underset{\mathbf{F}}{\operatorname{argmin}} \left\| \begin{pmatrix} \mathbf{W} \\ \lambda_1 \mathbf{L} \end{pmatrix} \mathbf{F} - \begin{pmatrix} \mathbf{S} \\ 0 \end{pmatrix} \right\|_2. \quad (2)$$

这里,  $\mathbf{F}$  是任意的快离子速度分布函数, 根据惩罚矩阵  $\mathbf{L}$  的不同分为零阶 ( $\mathbf{L}$  为单位矩阵) 和一阶 ( $\mathbf{L}$  是对梯度进行有限差分近似的矩阵算子) 正则化<sup>[28]</sup>, 而  $\lambda_1$  表示自由正则化参数. 正则化参数平衡解对含有噪声的测量数据的拟合程度和对正则化约束的服从程度. 但是由于测量光谱经常受到韧致辐射和杂质线辐射的背景干扰, 以及 FIDA 诊断视场、实验测量数据集不足的限制, 基于标准的 Tikhonov 正则化反演方法一直受到伪影的困扰, 出现负的快离子相空间密度等情况. 因此通过添加各种已知的先验信息, 弥补测量数据的缺乏, 改善伪影问题<sup>[13]</sup>. 为了增强反演的效果, 尤其是在 EAST 上双视图 FIDA, 权重函数在速度空间覆盖率不足的情况下, 在使用正则化方法时添加额外的先验信息. 聚变等离子体中快离子的速度空间层析反演已经考虑了非负值、空测量和已知峰值位置等先验信息<sup>[19]</sup>. 首先, 为了解决使用 Tikhonov 正则化方法带来的负相空间密度, 需要施加非负性的约束条件, 即不允许负相空间密度的区域的出现, 即  $F^* \geq 0$ . 此外实验上 FIDA 诊断测量到的多普勒频移是有上限的. 在光谱中观察到的低于噪声底线的 FIDA 光的部分被称为空值测量, 其波长范围可以通过权重函数与速度空间区域相关, 与空值测量区域对应的速度空间内不可能出现较高的快离子密度. 而 NBI 注入粒子的全能量、半能量和三分之一能量成分比值以及能量大小已知, 以之可获得中性束已知峰值位置的先验信息.

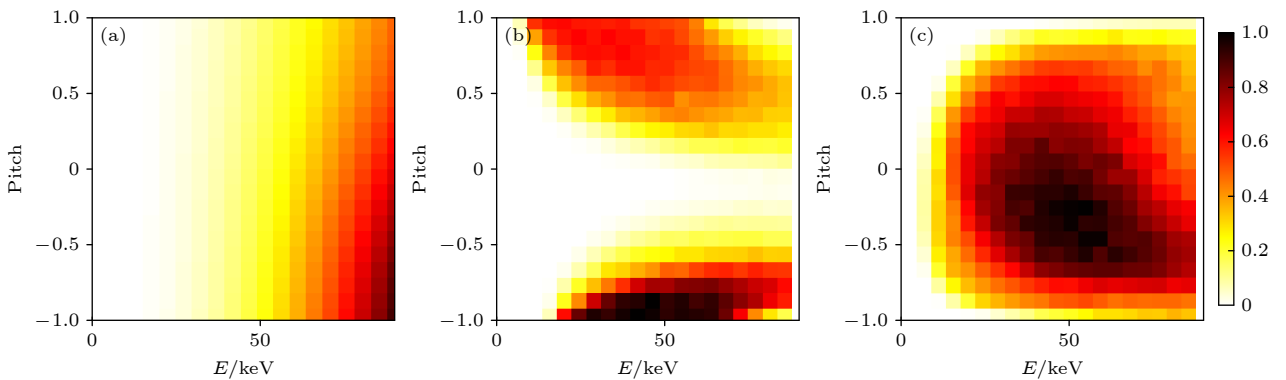


图 2 归一化的权重函数总和 (a) NES H 窗口; (b) FIDA O 窗口; (c) FIDA B 窗口

Fig. 2. Normalized weight function coverage: (a) NES H-port; (b) FIDA O-port; (c) FIDA B-port.



空值测量曾被作为硬约束纳入反演. 确定速度空间的空值测量区域, 忽略空测量权重函数所覆盖区域的快离子相空间密度, 使用  $F(E_0, p_0) = 0$ , 其中  $E_0$  和  $p_0$  是空测权重函数覆盖的能量和间距<sup>[19]</sup>. 虽然这种约束可以避免空值测量区域伪影的出现, 并减少反演中的未知数, 但不能排除空值测量区域的快离子的存在, 因此采用另一种方法, 通过引入一个旨在抑制速度空间空值测量区域中规范解的惩罚函数, 允许在速度空间的空测区域存在快离子<sup>[19]</sup>:

$$F^* = \min_F \left\| \begin{pmatrix} W \\ \lambda_1 L \\ \lambda_0 \xi L_0 \end{pmatrix} F - \begin{pmatrix} S \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\|_2. \quad (3)$$

单位矩阵用  $L_0$  表示, 而惩罚强度由正则化参数  $\lambda_0$  决定,  $\xi = \xi(E, p)$  代表空值测量区域的惩罚函数. 惩罚函数  $\xi$  被选择为随着空值测量区域能量的增加而呈指数增长, 有效地抑制了空值测量区域的速度空间中的明显伪影. 这种方法也实现了密集和稀疏速度空间区域之间的平滑过渡, 消除了空值测量速度空间内的尖锐边界<sup>[13,19]</sup>. 一阶 Tikhonov 正则化, 对速度空间的陡峭梯度进行惩罚, 可能会减少 NBI 的峰值, 因此反演在 NBI 条件下产生的快离子的分布函数的峰值, 特别是在 NBI 能量的全量、半量和三分之一处是十分困难的. 由于 NBI 峰值位置的  $E, p$  是已知的. 通过采用二维函数  $\kappa(E, p)$  来编码 NBI 的已知几何形状, 减少了峰值位置的惩罚强度, 允许分布函数中更大梯度的存在<sup>[13]</sup>. 结合非负性和空值测量的约束, 分布函数的解表示为

$$F^* = \min_F \left\| \begin{pmatrix} W \\ \lambda_1 L \\ \lambda_0 \xi L_0 \end{pmatrix} F - \begin{pmatrix} S \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\|_2, \quad \text{subject to } F \geq 0 \quad (4)$$

### 3 NBI 以及 NBI-ICRF 协同加热下的快离子分布函数

在 EAST 中性束注入系统以及 ICRF 天线升级后, 针对 NBI 单独加热以及 NBI-ICRF 协同加热开展了实验研究, 基于快离子诊断测量数据开展协同加热以及 NBI 单独加热下的快离子分布函数反演工作, 研究表明 ICRF 对注入的束离子进行加速, 产生了高于 NBI 能量的快离子, EAST 上协同加热效果得到实验验证. 图 3 为 EAST 上 #113648

放电的实验参数设置以及中子产额和极向比压  $\beta_p$  的测量结果. 此炮放电的等离子体电流  $I_p$  是 400 kA, 环向磁场  $B_t$  是 2.43 T, 电流方向和磁场方向标注于图 1(a), 分别是逆时针方向和顺时针方向.

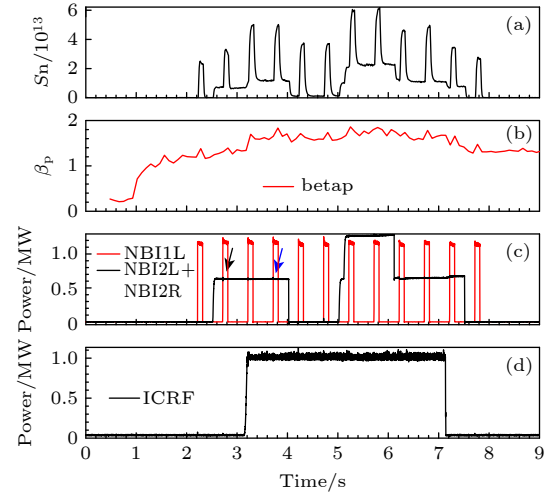


图 3 #113648 放电参数时序演化图 (a) 中子产额; (b) 极向比压; (c) 中性束注入功率; (d) ICRF 加热功率

Fig. 3. Time traces of shot #113648: (a) Neutron yield; (b) poloidal beta; (c) neutral beam injection power; (d) ICRF heating power.

诊断束 NBI1L 以调制注入的方式实现 FIDA 诊断的有效测量, NBI2L 和 NBI2R 以 40 keV 的束压注入进行加热, ICRF 功率为 1 MW, 通过对加热时序的调整, 在保持其他等离子体参数不变的情况下实现一炮内 NBI 单独加热 (图 3(c) 中黑色箭头, 2.72 s) 和 NBI-ICRF 协同加热 (图 3(c) 中蓝色箭头, 3.72 s). 实验发现在 NBI-ICRF 协同加热时等离子体中子产额和  $\beta_p$  分别提高约 57% 和 32%, 等离子体性能得到提高. 为了验证 ICRF 加速束离子的协同加热机制, 研究不同加热下的快离子分布函数的区别, 接下来将对 NBI 单独以及协同加热下的诊断测量数据进行反演.

NBI-ICRF 协同加热时, 利用 FIDA 以及 NES 测量协同效应产生的高能粒子的分布信息, 如图 4 双视图 FIDA 测量结果所示, 相较于 NBI 单独加热, 协同加热时 FIDA 光谱强度的提升反映快离子密度的增加, 图中误差棒为诊断束打开区间内测量光谱的整体标准差. 同时 NBI 能量为 40 keV 的快离子在忽略斯塔克分裂的情况下最大多普勒频移为 4.1 nm, 对应于  $D_\alpha$  线左侧的 652 nm 和右侧的 660.2 nm. 在 NBI 单独注入时, 仅在这些波

长范围内测量到 FIDA 光. 在 NBI-ICRH 加热阶段, 可以观测到这些边界 (图 4 中蓝色虚线) 以上的 FIDA 光谱尾巴, 尤其在对捕获离子敏感的垂直观测方向, 这表明存在高于注入能量的快离子. 同时, 如图 5 所示, 在 NBI-ICRF 加热阶段, NES 测量到快离子与背景热离子反应产生的中子, 在强度和能量上限上都远超于 NBI 单独加热阶段, EAST 上协同加热效果得到验证. 由于 #113648 放电过程

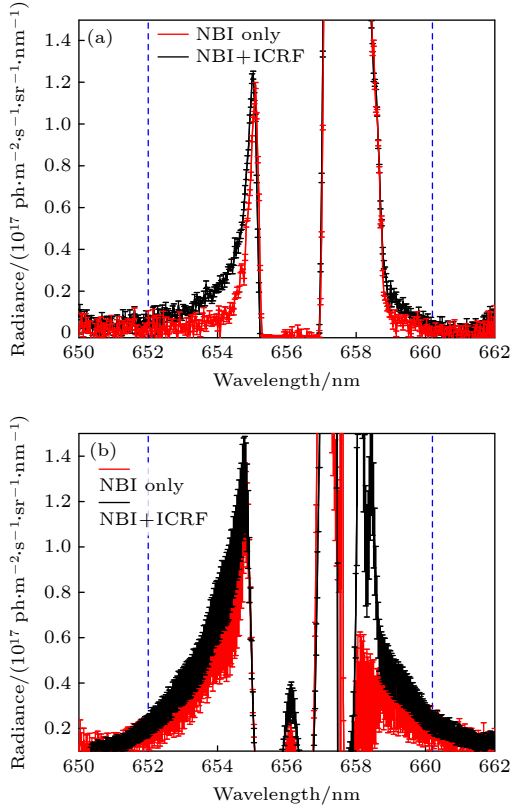


图 4 单独 NBI 以及 NBI-ICRF 协同加热时双视图 FIDA 测量光谱 (a) 切向 FIDA 信号; (b) 垂直 FIDA 信号; 误差棒为诊断束打开区间测量光谱的整体标准差

Fig. 4. Dual view FIDA measurement spectrum of NBI only and NBI-ICRF synergetic heating: (a) Tangential view; (b) vertical view.

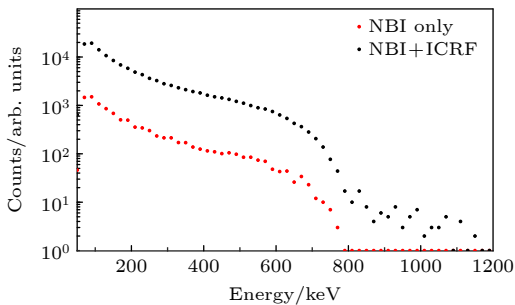


图 5 单独 NBI 以及 NBI-ICRF 协同加热时 NES 能谱  
Fig. 5. NES spectrum of NBI only and NBI-ICRF synergetic heating.

中没有磁流体不稳定性 (MHD) 行为的出现, 不用考虑快离子的反常输运, 因此, 可以认为此次放电满足新经典输运模型. 在完成动理学平衡处理后, 将汤姆孙散射诊断测量的电子温度、弯晶谱仪测量的离子温度剖面以及偏振干涉仪、微波反射计系统测量的电子密度剖面等基本的剖面分布以及电流、环电压等放电基本信息输入至 TRANSP, 利用 NUBEAM<sup>[29]</sup>, TORIC 模块对不同加热阶段的快离子分布函数进行模拟, 获得的速度空间快离子分布函数如图 6 所示.

由于 EAST 上的中性束皆为同电流方向注入, 单独 NBI 加热时, 快离子主要分布在负的俯仰角区域 (以  $B_t$  方向为正), 图中的黑色实线为 NBI 单独加热阶段快离子分布函数的能量上限, 从图 6(b) 模拟的分布函数以及图 7 沿负俯仰角积分的快离子分布能谱图也可以看出, NBI-ICRF 协同加热产生了高于 NBI 能量的快离子, 提高了高能快离子的份额.

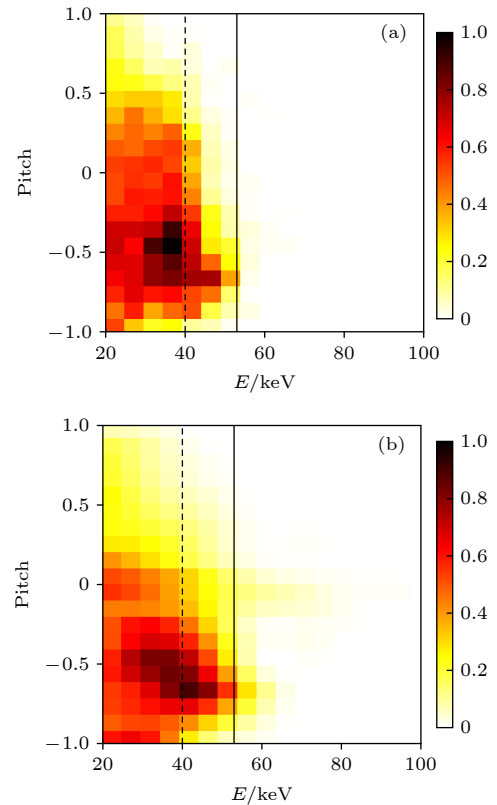


图 6 TRANSP 模拟的快离子分布函数 (a) 单独 NBI 加热; (b) NBI-ICRF 协同加热; 黑色虚线为 NBI 能量, 黑色实线为单独 NBI 加热时快离子能量上限

Fig. 6. TRANSP simulation of fast ion distribution function: (a) NBI only heating; (b) NBI-ICRF synergetic heating. Black dashed line is the NBI injection energy, black solid line is the upper limit of fast ion energy for NBI only.

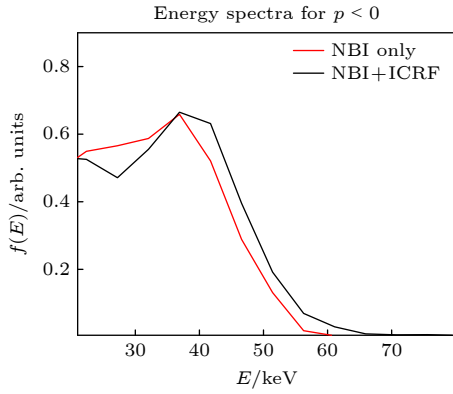


图 7 沿负俯仰角积分的快离子分布能谱图.

Fig. 7. Fast ion distribution energy spectrum integrated along the negative pitch angle.

利用 2.2 节的速度空间层析反演方法, 对 NBI 单独加热阶段的双视角的 FIDA 测量数据, 在不添加先验条件的情况下, 分别利用零阶和一阶 Tikhonov 正则化方法进行反演, 由于层析反演方法获得的分布函数的能量、俯仰角分辨率即描述分布函数的速度空间  $(E, p)$  网格大小, 取决于用于反演的实验数据测量点的数量<sup>[14]</sup>, 如果网格点多于测量值, 权重函数的特征也会出现在层析成像反演

中<sup>[30]</sup>, 影响反演结果的真实性的. 而 EAST 上 FIDA 诊断仅有两个视场, 用于反演的实验数据点为 446, 因此设置速度空间  $(E, p)$  反演分布函数的网格大小为  $20 \times 20$  (小于测量数据点 446), 此时能量分辨率为 5 keV. 如图 8(a) 和图 8(b) 所示, 无论是零阶或一阶 Tikhonov 正则化方法, 其反演结果都存在严重的伪影问题, 即在高能量区域存在较高的远大于 NBI 能量的快离子密度. 但是一阶 Tikhonov 正则化反演结果在较低能量区域 ( $E$  小于 50 keV) 反演精度要高于零阶正则化方法. 在一阶 Tikhonov 正则化方法的基础上, 通过添加非负性条件以及基于 FIDA 诊断测量光谱获得的空值测量区域的先验信息, 反演带来的伪影问题得到了解决, 如图 8(c), 反演与 TRANSP 模拟的新经典的快离子分布函数基本一致 (图 6(a)). 但是一阶正则化导致在速度空间中 NBI 峰值位置的陡峭梯度被削弱, 峰值信息未能反演出来. 通过引入已知的 NBI 的中性粒子的全能量、半能量、三分之一能量信息作为先验条件, 能够有效地重建出 NBI 峰值信息, 如图 8(d) 所示. 采用这种方法, 实现了在 EAST 上 NBI 单

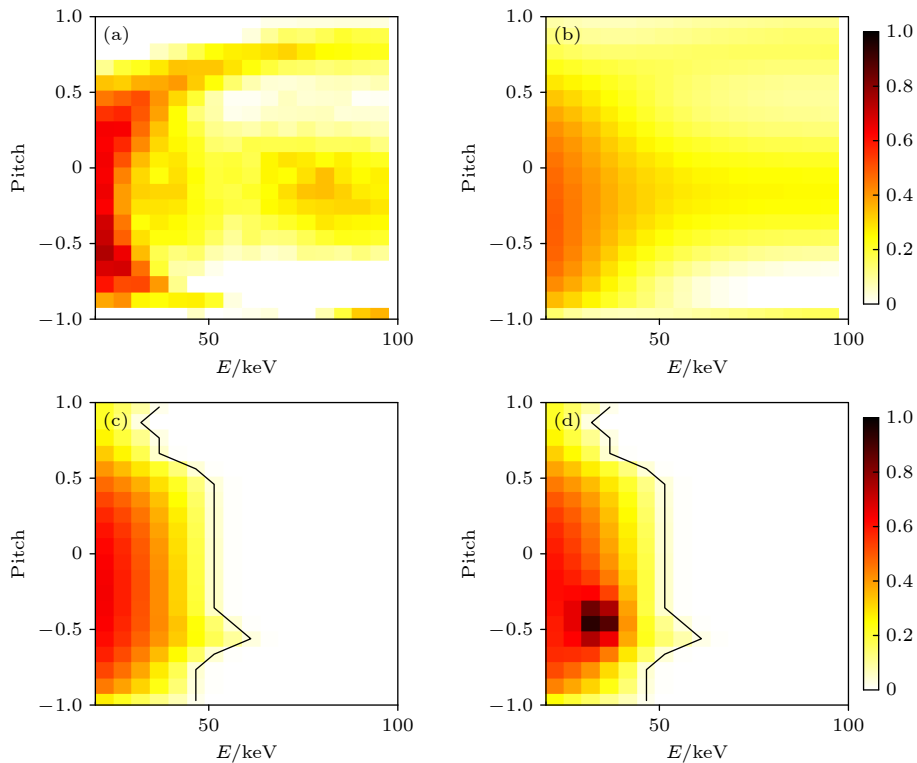


图 8 单独 NBI 时基于 FIDA 诊断测量的快离子分布函数层析反演 (a) 零阶 Tikhonov 正则化; (b) 一阶 Tikhonov 正则化; (c) 一阶 Tikhonov 正则化, 空值测量区域; (d) 一阶 Tikhonov 正则化, 已知峰值位置

Fig. 8. Reconstructions of the fast ion distribution function based on FIDA diagnostic measurements during NBI only heating: (a) Zero-order Tikhonov regularization; (b) first-order Tikhonov regularization; (c) first-order Tikhonov regularization, null measurement; (d) first-order Tikhonov regularization, known peak.

独注入条件下实现快离子分布函数的可靠重建, 提高了反演的精度, 但是由于分布函数的能量、俯仰角分辨率由实验测量数据点的数量决定, 因此能量分辨率并未提高.

FIDA 诊断数据空值测量区域这个先验信息适用于快离子速度分布函数中存在一个较为急剧的跃变到零的情况. 这个条件在 NBI 单独加热时得到了满足. 而在 NBI-ICRF 协同加热的实验中, 由于产生了高于 NBI 能量的快离子, 在 FIDA 测量的能量范围内快离子分布函数不会有跃变, 此时空值测量区域不再适用于基于 FIDA 诊断测量的层析反演. 由于 #113648 放电, 加热束的束压较低仅为 40 keV, 同时基于 TRANSP 模拟和 FIDA 测量发现了在百 keV 量级内快离子分布的能量上限, 因此, 本文在对 NBI-ICRF 协同加热阶段快离子分布函数反演中, 使用 TRANSP 模拟的快离子分布函数能量上限作为空值测量的约束条件, 验证 EAST 上速度空间层析反演算法在协同加热时的可行性.

首先采用合成信号进行反演, 即根据 (1) 式将 TRANSP 模拟的快离子分布函数与权重函数结合, 获得合成信号, 并添加 10% 的噪声进行反演. 在 NBI-ICRF 协同加热阶段, 在不添加先验信息的情况下, 如图 9(b) 所示, 基于一阶 Tikhonov 正则化方法的层析反演效果优于零阶 (图 9(a)), 反演结果与模拟结果基本一致, 反演的误差在 20% 以内, 但是在俯仰角为  $-0.5$  的区域, 仍然存在较大的伪影, 这个问题在添加基于 TRANSP 模拟的空值测量区域后得到改善 (图 9(c)). 进一步基于 EAST 上双视图 FIDA 测量数据展开一阶 Tikhonov 正则

化层析反演, 不添加先验信息的反演结果如图 10(a) 所示, 图中虚线代表 TRANSP 模拟的快离子能量上限. 由于 EAST 上仅有两个视场的 FIDA, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 在速度空间俯仰角为 0 附近, 仅有垂直 B 窗口一个视场覆盖, 这给反演带来了挑战. 图 10(a) 中, 在权重函数覆盖不足的俯仰角 0 至 1 范围内, 反演存在严重的伪影问题. 在权重覆盖率相对较大的俯仰角为  $-0.7$  附近, 伪影相对较小且反演与 TRANSP 模拟吻合. 为了增加速度空间的权重覆盖率, 采用将 FIDA 与 NES 诊断测量相结合进行反演, 结果如图 10(b) 所示, 在速度空间内反演的伪影问题得到了明显的改善, 与模拟的快离子分布函数误差进一步减小, 但是由于 NES 在百 keV 内的探测效率较低 (从图 2(a) NES 的总的权重函数可以看出), 因此在这种快离子能量上限较低的情况下, 并不能从 NES 测量中获得空值测量的先验信息, 伪影并不能完全消除, 因此, 使用 TRANSP 模拟的能量上限作为空值测量的先验条件, 极大地提升了反演的精度, 如图 10(c) 和图 10(d) 所示, 同时结合 FIDA 与 NES 诊断提升了反演在较高能量范围 (50 keV) 的反演效果. 因此, 基于 EAST 上现有的 FIDA 与 NES 诊断, 利用一阶 Tikhonov 正则化, FIDA 与 NES 相结合的层析反演方法, 实现在 NBI-ICRF 协同加热条件下, 获得真实可靠的快离子分布函数.

## 4 结 论

聚变等离子体中通过速度空间层析反演方法获得快离子分布函数通常受到快离子  $D_\alpha$ (FIDA) 诊断视场和信噪比的限制. 本文在单独中性束加热

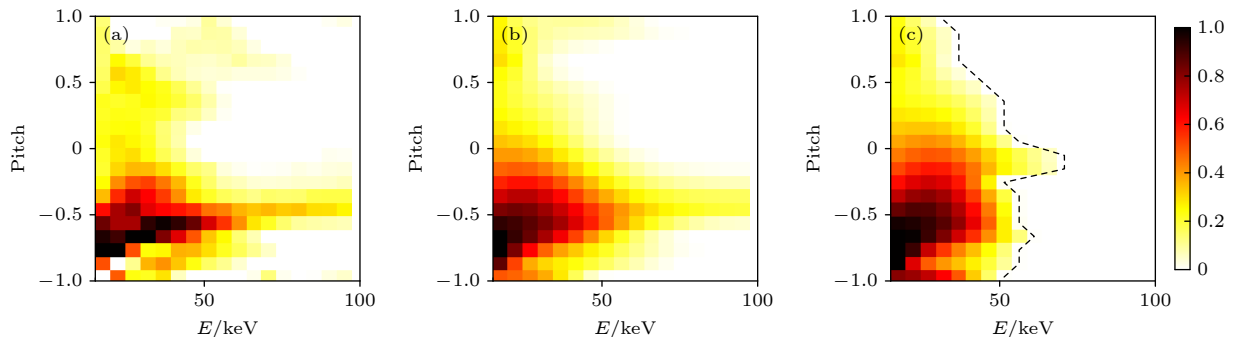


图 9 NBI-ICRF 协同加热阶段基于 TRANSP 模拟合成信号的层析反演 (a) 零阶 Tikhonov 正则化; (b) 一阶 Tikhonov 正则化; (c) 一阶 Tikhonov 正则化, 空值测量区域

Fig. 9. Reconstructions of synthetic signal based on the TRANSP distributions: (a) Zero-order Tikhonov regularization; (b) first-order Tikhonov regularization; (c) first-order Tikhonov regularization, null measurement.



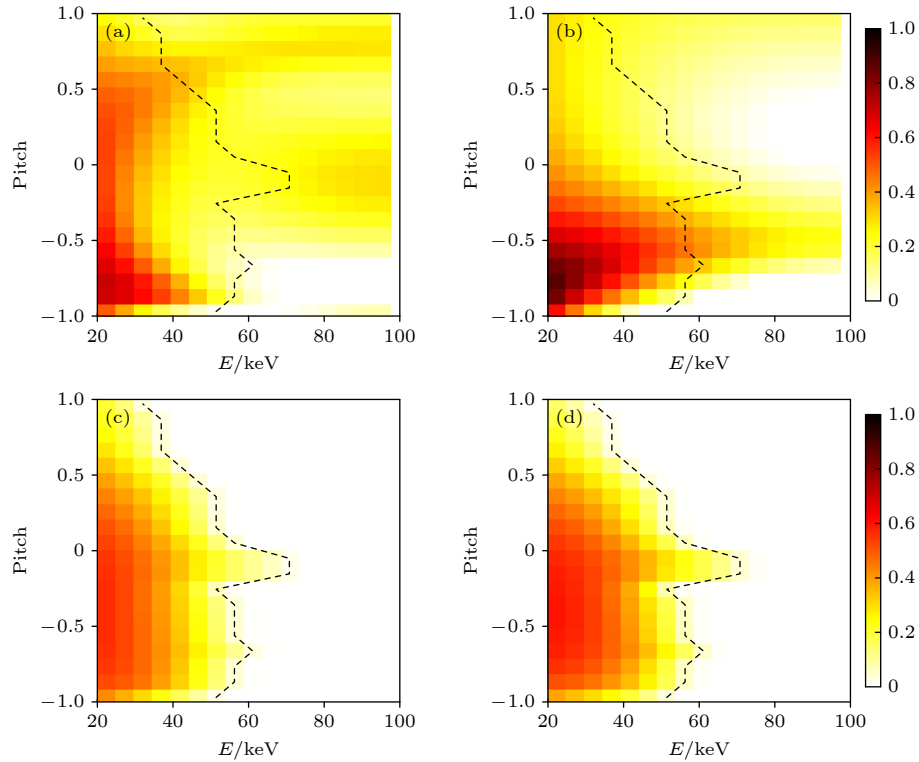


图 10 基于快离子诊断数据的分布函数层析反演 (a), (b) 不添加先验信息; (c), (d) TRANSP 模拟的快离子能量上限作为先验信息; 其中 (a), (c) 仅使用 FIDA 测量; (b), (d) FIDA 与 NES 测量结合

Fig. 10. Reconstructions based on fast ion diagnostic data: (a), (b) Without adding a priori information; (c), (d) fast ion energy upper bounds for TRANSP simulations as prior information. Only FIDA measurement is used in panel (a) and (c); FIDA in combination with NES measurements are used in panel (b) and (d).

的情况下, 通过对比不同正则化方法, 采用反演精度更高的一阶 Tikhonov 正则化层析反演方法, 进一步通过添加空值测量区域, 已知的 NBI 峰值位置等先验信息, 弥补 EAST 上双视图 FIDA 在速度空间测量数据的不足, 解决伪影问题, 在速度空间预期的位置上重建了 NBI 峰, 反演结果得到了明显的改善. 同时, 随着 EAST 上中性束注入与离子回旋共振加热系统的性能, 加热效率的提升, 快离子诊断 FIDA 和 NES 等测量发现了明显的 NBI-ICRF 协同效应, 产生了远高于中性束注入能量的快离子. 为了验证 NBI-ICRF 协同效应, 研究协同加热下快离子分布机制, 本文在一阶 Tikhonov 正则化层析反演方法的基础上, 通过将 FIDA 与 NES 诊断结合, 伪影问题得到改善, 获得了真实可靠的基于实验测量的快离子速度空间分布函数, 并将 TRANSP 模拟得到的快离子能量上限作为先验信息, 弥补 NES 诊断在百 keV 内探测效率的不足, 提升了反演获得的快离子分布函数精度, 对协同加热效果进行了验证. 证明层析反演方法在 EAST 协同加热高参数运行条件下获得快离子分布函数

的可行性, 为下一步开展氢氦比、中性束注入能量对协同加热效率的影响, 协同加热下快离子分布和输运机制的实验研究奠定基础.

感谢丹麦科技大学的 Mirko Salewski 教授对速度空间层析反演方法研究的支持, 感谢 EAST 团队对实验运行和数据获取的支持.

## 参考文献

- [1] Fasoli A, Gormenzano C, Berk H L, Breizman B, Briguglio S, Darrow D S, Gorelenkov N, Heidbrink W W, Jaun A, Konovalov S V, Nazikian R, Noterdaeme J M, Sharapov S, Shinohara K, Testa D, Tobita K, Todo Y, Vlad G, Zonca F 2007 *Nucl. Fusion* **47** S264
- [2] Heidbrink W W, Luo Y, Burrell K H, Harvey R W, Pinsker R I, Ruskov E 2007 *Plasma Phys. Control. Fusion* **49** 1457
- [3] Reisner M, Fable E, Stober J, Bock A, Bañón Navarro A, Di Siena A, Fischer R, Bobkov V, McDermott R 2020 *Nucl. Fusion* **60** 082005
- [4] Huynh E A L P, Van Eester D, Bilato C R, Varje J, Johnson T, Sauter O, Villard L, Ferreira J, JET contributors and the EUROfusion-IM Team 2020 *AIP Conf. Proc.* **2254** 060003
- [5] Hillairet J, Gallart D, Mantsinen M, Challis C, Frigione D, Graves J, Hobirk J, Belonohy E, Czarnicka A, Eriksson J,



- Goniche M, Hellesen C, Jacquet P, Joffrin E, Krawczyk N, King D, Lennholm M, Lerche E, Pawelec E, Sips G, Solano E, Tsalas M, Valisa M **2017** *EPJ Web Conf.* **157** 02006
- [6] Heidbrink W W **2010** *Rev. Sci. Instrum.* **81** 10D727
- [7] Michael C A, Conway N, Crowley B, Jones O, Heidbrink W W, Pinches S, Braeken E, Akers R, Challis C, Turnyanskiy M, Patel A, Muir D, Gaffka R, Bailey S **2013** *Plasma Phys. Control. Fusion* **55** 095007
- [8] Nielsen S K, Stejner M, Rasmussen J, Jacobsen A S, Korsholm S B, Leipold F, Maraschek M, Meo F, Michelsen P K, Moseev D, Salewski M, Schubert M, Stober J, Suttrop W, Tardini G, Wagner D **2015** *Plasma Phys. Control. Fusion* **57** 035009
- [9] Salewski M, Nocente M, Madsen B, Abramovic I, Fitzgerald M, Gorini G, Hansen P C, Heidbrink W W, Jacobsen A S, Jensen T, Kiptily V G, Klinkby E B, Korsholm S B, Kurki-Suonio T, Larsen A W, Leipold F, Moseev D, Nielsen S K, Pinches S D, Rasmussen J, Rebai M, Schneider M, Shevelev A, Sipilä S, Stejner M, Tardocchi M **2018** *Nucl. Fusion* **58** 096019
- [10] Nocente M, Källne J, Salewski M, Tardocchi M, Gorini G **2015** *Nucl. Fusion* **55** 123009
- [11] Eriksson J, Nocente M, Binda F, Cazzaniga C, Conroy S, Ericsson G, Giacomelli L, Gorini G, Hellesen C, Hellsten T, Hjalmarsson A, Jacobsen A S, Johnson T, Kiptily V, Koskela T, Mantsinen M, Salewski M, Schneider M, Sharapov S, Skiba M, Tardocchi M, Weiszflog M **2015** *Nucl. Fusion* **55** 123026
- [12] Jacobsen A S, Salewski M, Eriksson J, Ericsson G, Korsholm S B, Leipold F, Nielsen S K, Rasmussen J, Stejner M **2015** *Nucl. Fusion* **55** 053013
- [13] Salewski M, Geiger B, Jacobsen A S, Hansen P C, Heidbrink W W, Korsholm S B, Leipold F, Madsen J, Moseev D, Nielsen S K, Nocente M, Odstrčil T, Rasmussen J, Stagner L, Stejner M, Weiland M **2016** *Nucl. Fusion* **56** 106024
- [14] Salewski M, Geiger B, Jacobsen A S, García-Muñoz M, Heidbrink W W, Korsholm S B, Leipold F, Madsen J, Moseev D, Nielsen S K, Rasmussen J, Stejner M, Tardini G, Weiland M **2014** *Nucl. Fusion* **54** 023005
- [15] Weiland M, Geiger B, Jacobsen A S, Reich M, Salewski M, Odstrčil T **2016** *Plasma Phys. Control. Fusion* **58** 025012
- [16] Geiger B, Weiland M, Jacobsen A S, Rittich D, Dux R, Fischer R, Hopf C, Maraschek M, McDermott R M, Nielsen S K, Odstrčil T, Reich M, Ryter F, Salewski M, Schneider P A, Tardini G **2015** *Nucl. Fusion* **55** 083001
- [17] Weiland M, Bilato R, Geiger B, Schneider P A, Tardini G, García-Muñoz M, Ryter F, Salewski M, Zohm H **2017** *Nucl. Fusion* **57** 116058
- [18] Madsen B, Salewski M, Heidbrink W W, Stagner L, Podestà M, Lin D, Garcia A V, Hansen P C, Huang J **2020** *Nucl. Fusion* **60** 066024
- [19] Madsen B, Salewski M, Huang J, Jacobsen A S, Jones O, McClements K G, MAST Team **2018** *Rev. Sci. Instrum.* **89** 10D125
- [20] Jacobsen A S, Salewski M, Geiger B, Korsholm S B, Leipold F, Nielsen S K, Rasmussen J, Stejner M, Weiland M **2016** *Plasma Phys. Control. Fusion* **58** 042002
- [21] Salewski M, Gorini G, Jacobsen A S, Kiptily V G, Korsholm S B, Leipold F, Madsen J, Moseev D, Nielsen S K, Rasmussen J, Stejner M, Tardocchi M, JET Contributors **2016** *Nucl. Fusion* **56** 046009
- [22] Su J, Wan B, Huang J, Madsen B, Salewski M, Sun Y, Wang J, Fu J, Chang J, Wu C, Liang L, Chen Y, Zhong G, Liu H, Zang Q, Li Y, Lyu B, Qian J, Gong X **2021** *Plasma Sci. Technol.* **23** 095103
- [23] Madsen B, Huang J, Salewski M, Järleblad H, Hansen P C, Stagner L, Su J, Chang J F, Fu J, Wang J, Liang L Z, Zhong G, Li Y, Lyu B, Liu H, Zang Q, Luo Z, Nocente M, Moseev D, Fan T, Zhang Y, Yang D, Sun J, Liao L **2020** *Plasma Phys. Control. Fusion* **62** 115019
- [24] Zhang X J, Yang H, Qin C M, Yuan S, Zhao Y P, Wang Y S, Liu L N, Mao Y Z, Cheng Y, Gong X Z, Xu G S, Song Y T, Li J G, Wan B N, Zhang K, Zhang B, Ai L, Wang G X, Guo Y Y **2022** *Nucl. Fusion* **62** 086038
- [25] Zhang W, Zhu G H, Zhang X J, Zhong G Q, Ai L, Chu Y Q, Fan T S, Fan H C, Guo Y Y, Hao B L, Huang J, Jin Y F, Liu L N, Liao L Y, Li Y H, Liang Q C, Sun Y X, Wang G X, Yang D K, Yang H, Zhang H P **2023** *Nucl. Fusion* **63** 056015
- [26] Ge L J, Hu Z M, Zhang Y M, Sun J Q, Yuan X, Peng X Y, Chen Z J, Du T F, Gorini G, Nocente M, Tardocchi M, Hu L Q, Zhong G Q, Lin S Y, Wan B N, Li X Q, Zhang G H, Chen J X, Fan T S **2018** *Plasma Phys. Control. Fusion* **60** 095004
- [27] Hou Y M, Wu C R, Huang J, Heidbrink W W, von Hellermann M G, Xu Z, Jin Z, Chang J F, Zhu Y B, Gao W, Chen Y J, Lyu B, Hu R J, Zhang P F, Zhang L, Gao W, Wu Z W, Yu Y, Ye M Y, Team E **2016** *Rev. Sci. Instrum.* **87** 11E552
- [28] Jacobsen A S, Stagner L, Salewski M, Geiger B, Heidbrink W W, Korsholm S B, Leipold F, Nielsen S K, Rasmussen J, Stejner M, Thomsen H, Weiland M **2016** *Plasma Phys. Control. Fusion* **58** 045016
- [29] Pankin A, McCune D, Andre R, Bateman G, Kritiz A **2004** *Comput. Phys. Commun.* **159** 157
- [30] Salewski M, Geiger B, Nielsen S K, Bindslev H, García-Muñoz M, Heidbrink W W, Korsholm S B, Leipold F, Meo F, Michelsen P K, Moseev D, Stejner M, Tardini G, Team A U **2012** *Nucl. Fusion* **52** 103008

SPECIAL TOPIC —Energetic particles in magnetic confinement fusion plasma •  
COVER ARTICLE

# Tomography of fast ion distribution function under neutral beam injection and ion cyclotron resonance heating on EAST\*

Sun Yan-Xu<sup>1)2)</sup> Huang Juan<sup>1)†</sup> Gao Wei<sup>1)</sup> Chang Jia-Feng<sup>1)</sup>  
Zhang Wei<sup>1)</sup> Shi Chang<sup>1)</sup> Li Yun-He<sup>3)</sup>

1) (*Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

2) (*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

3) (*State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*)

( Received 24 May 2023; revised manuscript received 30 June 2023 )

## Abstract

In magnetic confinement fusion devices, velocity-space tomography of fast-ion velocity distribution function is crucial for investigating fast-ion distribution and transport. In the neutral beam injection (NBI) and ion cyclotron resonance heating (ICRF) synergistic heating experiments in Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST), high-energy particles with energy exceeding the particle energy in NBI are observed. Simulations of synergistic effect on fast-ion velocity distribution function given by TRANSP also show the existence of particles with energy higher than the particle energy in NBI. To investigate the behaviors of fast ion distribution and calculate the velocity distribution functions under different heating conditions, the first-order Tikhonov regularization tomographic inversion method with higher inversion accuracy is introduced by comparing various regularization techniques. The limitations of the dual-view fast-ion  $D_\alpha$  (FIDA) diagnostic measurements in velocity space are addressed by incorporating prior information such as null measurement and the known peaks and effectively mitigate the occurrence of artifacts. This method is first employed in the case of NBI heating. The NBI peak is successfully reconstructed at the expected location in velocity space, which shows significant improvement in the inversion results. In order to further validate the synergistic effect of NBI-ICRF heating and study the mechanism of fast ion distribution under synergistic heating, the combination of FIDA and neutron emission spectrometer (NES) is applied to the first-order Tikhonov regularization tomographic inversion method for enhancing the coverage of velocity space, through which the issue of artifacts in the inversion results is significantly improved, and thus the precision of the obtained fast-ion velocity distribution functions is enhanced. Based on the benefit described above, the method of combining NES diagnosis and FIDA diagnosis is used to obtain fast-ion velocity distribution functions in the NBI and ICRF synergistic heating discharge. The synergistic heating effect is manifested in the fast-ion velocity distribution. The availability of this inversion method in reconstructing fast-ion velocity distribution functions during high-performance operation of NBI-ICRF synergistic heating in the EAST experiment is confirmed. In the next-step EAST research, high performance discharge will demand more efficiency NBI and ICRF synergistic heating, the present work builds the stage for investigating the underlying mechanism of synergistic heating and the intricate behaviors associated with fast ion distribution and transport.

**Keywords:** velocity-space tomography, fast-ion  $D_\alpha$  spectroscopy, neutral beam injection, ion cyclotron resonance heating.

**PACS:** 52.25.Xz, 52.35.Hr, 52.55.Fa, 52.70.Nc

**DOI:** [10.7498/aps.72.20230846](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230846)

\* Project supported by the Special Project for National Magnetic Confinement Fusion Energy Research of China (Grant No. 2019YFE03020004) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11975276).

† Corresponding author. E-mail: [juan.huang@ipp.ac.cn](mailto:juan.huang@ipp.ac.cn)

EAST上中性束注入和离子回旋共振加热下快离子分布函数层析反演

孙延旭 黄娟 高伟 常加峰 张伟 史唱 李云鹤

**Tomography of fast ion distribution function under neutral beam injection and ion cyclotron resonance heating on EAST**

Sun Yan-Xu Huang Juan Gao Wei Chang Jia-Feng Zhang Wei Shi Chang Li Yun-He

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 215203 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230846

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230846>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

微型电子回旋共振离子源的全局模型

Global model of miniature electron cyclotron resonance ion source

物理学报. 2022, 71(14): 145204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212250>

磁路和天线位置对2 cm电子回旋共振离子推力器性能影响的实验研究

Experimental study of magnetic circuit and antenna position influence on performance of 2 cm electron cyclotron resonance ion thruster

物理学报. 2019, 68(23): 235202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191122>

2 cm电子回旋共振离子推力器离子源中磁场对等离子体特性与壁面电流影响的数值模拟

Numerical simulation of influence of magnetic field on plasma characteristics and surface current of ion source of 2-cm electron cyclotron resonance ion thruster

物理学报. 2021, 70(7): 075204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201667>

2 cm电子回旋共振离子源猝灭现象模拟

Numerical study on abnormal flameout of 2-cm electron cyclotron resonance ion source

物理学报. 2022, 71(8): 085203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212151>

电子束离子阱光谱标定和Ar<sup>13+</sup>离子M1跃迁波长精密测量

Spectral calibration for electron beam ion trap and precision measurement of M1 transition wavelength in Ar<sup>13+</sup>

物理学报. 2022, 71(3): 033201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211663>

电四极跃迁对电子束离子阱等离子体中离子能级布居的影响

Effects of electric quadrupole transitions on ion energy-level populations of in electron beam ion trap plasma

物理学报. 2022, 71(19): 195201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220489>