

纸

## 束离子损失由于高能粒子短程线的声模

举这篇文章：RK费舍尔 等2012 *核聚研究 聚变* 52 123015

查看 [网上的文章](#) 更新和改进。

## 相关内容

- [简要沟通](#)  
DC佩斯，RK费舍尔，男加西亚 - 谢穆尼奥斯等。
- [在DIII-d托卡马克诱导阿尔芬本征模式提示非谐振中性束离子损失](#)  
十，陈，WW Heidbrink，GJ Kramer等。
- [的快离子损失的测量通过在HL-2A装置使用基于scintillator-探针MHD不稳定性引起](#)  
YP张，刘义，W. Chen等人。

## 最近引用

- [鸣叫和精力充沛的粒子驱动的测地声模的突然激发的大型螺旋装置实验](#)  
王浩 等
- [通过NBI东激发电磁GAMS观察](#)  
徐明 等
- [粒子输运由于精力充沛 - 粒子驱动的测地声模式](#)  
D. Zarzoso 等

# 束离子损失由于高能粒子短程线的声模

RK费舍尔<sup>1</sup>, DC佩斯<sup>1</sup>, GJ克莱默<sup>2</sup>, 马凡泽兰<sup>1</sup>,  
R. Nazikian<sup>2</sup>, WW Heidbrink<sup>3</sup>和M.Garcia-Munoz<sup>4</sup>

NOZ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>通用原子公司, 邮政信箱85608, 圣迭戈, CA 92186-9784, USA

<sup>2</sup>普林斯顿等离子体物理实验室, 邮政信箱451, 普林斯顿, NJ 08543-0451, USA

<sup>3</sup>加州欧文大学欧文分校, CA 92697, USA

<sup>4</sup>马克斯普朗克研究所F 乌尔Plasmaphysik, 德国加兴

收到2012年5月24日, 接受出版31 2012年10月发布2012年11月20日在网上 [stacks.iop.org/NF/52/123015](http://stacks.iop.org/NF/52/123015)

## 抽象

我们报告在托卡马克快离子损失的第一个实验观察, 由于高能粒子驱动的测地声模 ( EGAMs )。安装在DIII-d托卡马克的快速离子损失检测器观察到的相干与EGAMfrequency束离子损失脉冲串。所述EGAMactivity导致射束离子, 媲美第一个轨道损失的显著的损失。的所测量的快离子损失的俯仰角度和能量同意从全轨道仿真代码SPIRAL, 其包括散射和慢化预测。( 有些科幻gures可能只在网上日记中出现的颜色 )

## 1.简介

从中性束注入, 离子回旋加热, 和聚变反应快离子起到托卡马克等离子体的加热和稳定性的重要作用。大fastion密度可以带动集体不稳定性, 进而降低fastion CON网络ement和等离子体性能。从在ITER DT融合高能 $\alpha$ 粒子的损失将减少可用于达到点火阿尔法加热, 并有可能造成对第一个壁严重损坏的可能性。因此快离子的行为以及它们与等离子体不稳定性在聚变等离子体相互作用已被广泛研究[ 1 , 2 ], 通过在DT等离子体 $\alpha$ 粒子加热的根本重要性动机 3 - 5 ]。

高能粒子从动测声学模式 ( EGAMs ) 计数器中性束注入期间在DIII-d托卡马克等离子体电流的斜坡上早发生[ 6 ]。EGAMs是高能粒子模式与模式频率  $\sim 50\%$  以下的理想测声学模式 ( GAM ) 的频率。一个FL流体动力学模型 [ 7 ]定性复制所观察到的模式的特征, 包括快速模式破裂和频率啁啾, 并且没有可检测的电子温度的涨落大的电子密度的涨落。所述非微扰静电模型示出了高能粒子压力驱动一个  $N = 0$  径向电连接场和一个样GAM 米= 1个密度扰动。模式出现在具有升高的中央安全系数等离子体 (  $q >$

强梁离子再分配和/或损失[ 6 ]。本文上的束离子损失的观察集中由于EGAMmode活性。

阿基于闪烁体的快速离子损失检测器 ( FILD ) [ 8 ]最近已经安装在DIII-d ( 环形磁场科幻= 2.1 T, 主半径= 1.66米, 和小半径=

0.67米 ) 来研究由Alfvén诱导高能离子损失 恩本征模 ( AES ) 和其它MHD不稳定性。基于对ASDEX使用的设计升级[ 9 , 10 ]中, 光图案由离子撞击一个快速的时间响应所得的 ( 衰减时间

$\sim 500$ 纳秒 ) 闪烁体是由一台CCD相机, 使射束离子到达检测器的俯仰角和回旋半径的测量结果。从闪烁体的光也通过网络连接BRE耦合光电倍增测量以允许AE和其他高频不稳定性的identi音响阳离子。本文报道的在托卡马克束离子损失第一个实验观察由于EGAMs。所测得的损耗进行比较, 以一个完整的轨道仿真代码SPIRAL的结果, 以更好地理解从模式和CON组fi奈德离子之间的相互作用而产生的光束离子传输。所述EGAM离子相互作用相比, 涉及能量, 典型的动力, 并且离子的磁矩的AE-离子相互作用只发生在能量空间中, 。所述EGAMion相互作用主要是静电的, 与所述  $N = 0$  性质EGAM导致仅在离子能量 ( 相比于同时影响离子能量和动量规范AE-离子相互作用 ) 的变化, 从而提供了我们的模型MHD不稳定性对高能离子的影响的能力的基本试验的[ 11 ]。

2 ) andwith可比电子和离子的温度下, 有关建议稳态血浆制度[ 2 ]。急剧下降 (  $\sim 10-15\%$  ) 在中子产生仅指示

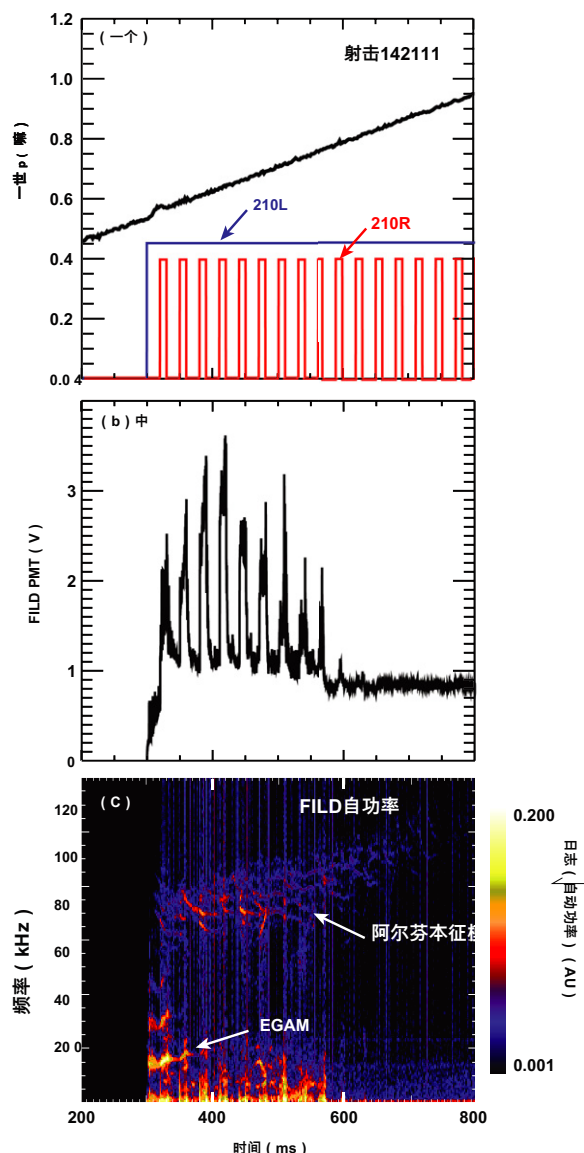


图1. 的时间依赖性 ( 一个 ) 从210R中性束注入和210L ( 以红色和脉冲示出 ) ( 以蓝色显示和上连续地从300毫秒到1000毫秒 ) 离子源, ( b ) 通过FILD PMT和 ( 测量的束离子损失 c ) 束离子损失信号的时间分辨功率谱示出在强EGAM活性

~ 15-45千赫发生的光束喷射开始后非常早。

## 2.测EGAM诱导的束离子损失

中性束注入逆着等离子体电流在DIII-d等离子体电流的斜升初期的方向强烈地激发EGAMs。数字 1 是显著的AE和EGAM活性的DIII-d放电的一个例子。氖束 ( 标记210L和210R ) 注入75-81千电子伏中性在等离子体电流相反环形方向, 并且是初级束负责激发EGAMs。该210L光束被注入更垂直于该环形磁场网络连接比210R光束[ 12 ]。数字 1 ( 一个 ) 示出了210L束源是连续地从300至1000毫秒, 而210R源是脉冲的表示10ms上和20ms的关断, 开始于320ms。数字 1 ( b ) 表示光束离子

由FILD闪烁探测器测量损耗信号, 而网络连接古尔 1 ( C ) 显示了用环形Alfv'快离子损失的功率谱

烯的本征模 ( TAE ), 反向剪切Alfv' 恩本征模式 ( RSAE ) 和EGAM活性。在相位的脉冲损失与210R束注入包括提示损失和不稳定性引起的损失。轨道模型显示, 从210R光束提示损失贡献达到FILD探测器 ( 位于大约45·下面在等离子体电流的下限值的外平面 )。作为等离子体电流增加时, 高能离子香蕉宽度减小, 从而导致壁击位置对于所述中间板和不再可检测由FILD ( 后 ~ 600毫秒 )。这些损失coherentwithAEactivity在50-100千赫区[ 13 , 14 ]由于AE活性变得而快离子损失边界向外移动, 减少了AE的直接将离子束到损失轨道的能力本地化多个核心落入如等离子体电流增大。本文集中在15和45千赫支配的损失非常早 ( 从300到350毫秒 ) 在放电, 当高能粒子压力为总血浆压力的显著的部分之间的EGAM活性。此时的低等离子体电流导致的升高的  $q$  分钟, 允许模式而基本上没有热离子朗道阻尼出现并导致低的快离子的 $\beta_H$ 门槛EGAM模式发病[ 6 ]。

数字 2 显示了当EGAM活动是最大的300-450ms时间段的扩展视图。a nexternalmagneticpickupcoil的时间分辨率分析在网络古尔所示 2 ( 一个 )。数字 2 ( b ) 示出了由externalmagnetic音响场拾取线圈 ( 蓝色迹线 ) 测量的EGAM振幅和测定FILD束离子损失信号 ( 红色迹线 ) 的相干成分。两个信号计算出基于一个

~ 2 kHz频带集中于随时间变化的频率EGAM。束注入后不久相干光束离子损失峰开始于300毫秒, 然后迅速衰减, 而由磁拾波线圈所指示的模式的振幅衰减更慢。所述FILD损失信号的相干成分也显然与210R束源的脉冲时间行为有关。Themeasured相干损耗表明, 发生与210R射出光束相既是“快速”信号, 并且衰减在210Rbeamturns断之后几毫秒的“延时”元件。这种衰变时间远远大于所计算的<100更长  $\mu$  小号通行时间离子踢出到直接损失轨道, 表明所测量的EGAM诱导的损耗是共振的结果, 而不是中性束提示损耗的简单调制。一旦210R源关断, 其余的CON组fi奈德束的离子的能量衰减对经典缓冲时标。这减少了能够与EGAMs相互作用的光束的离子的数量, 和被认为导致在每个210R束脉冲之后的相干损失信号的观察到的衰减。上更慢的时间尺度, 增加等离子体电流随时间移动损失边界到更高的能量, 其中有较少的离子束以与EGAMs交互。该效果, 与模式振幅减少相结合, 是在325和425ms之间的观测相干损失降定性一致。

EGAMs的破裂行为特性显然visiblewhen themeasured快离子损失信号上的扩展时间标度观察时, 如图音响古尔 3 ( 一个 )。该

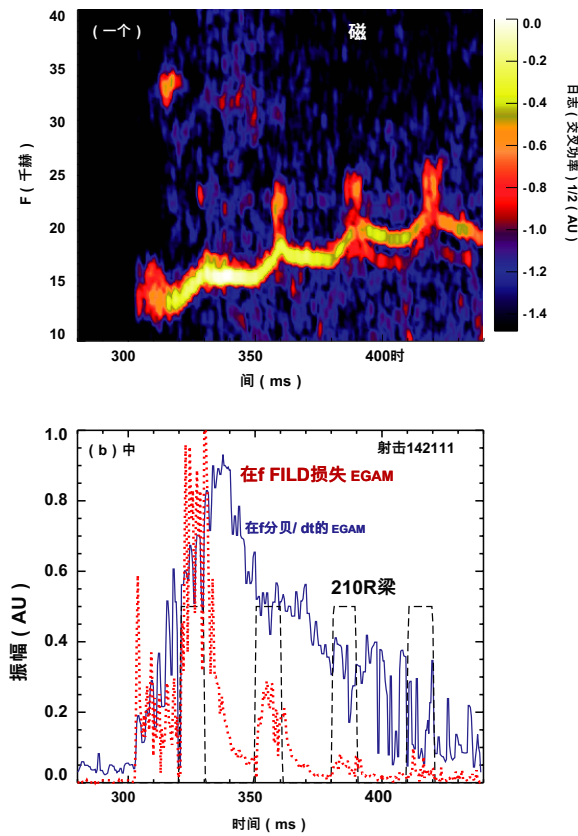


图2. ( 一个 ) 从外部磁性拾波线圈表示EGAMmode活动时间分辨功率谱, 和 ( b ) 从外部磁性拾波线圈 ( 蓝色迹线 ) 的EGAM活动的时间行为和FILD测量束离子损失 ( 红色迹线 )。两个信号都在一个带宽网络滤波的响应  $\sim 2$  kHz频带集中于随时间变化的频率EGAMmode。还示出了从210R离子源 ( 黑色迹线 ) 脉冲中性束注入。

在EGAM模式频率相干振荡  $\sim 15$  千赫的总损耗的信号的部分。在320 ms, 另外的计数器注入由于210Rbeam增加所测量的损失。数字3 ( b ) 显示了从CCD照相机成像光束通过离子损失碰撞FILD闪烁板产生的光图案的连续帧。Agrid指示碰撞的离子的回转半径和浆距角上绘制在白色。伪彩色图像显示在两个地区发生的显著的损失。相机帧的帧速率操作  $\sim 160$  帧/秒, 和曝光时间  $\sim 500 \mu$  秒/帧。在325ms拍摄的帧显示在EGAM诱导的损耗的显著增加 ( 区域黄色圆圈响应的图3 ( b ) 和 ( C ) ) 在接近45度浆距角  $\sim 50^\circ$ 。所述相机数据的分析表明, 该EGAM损失210R束脉冲和衰减期间建立之后, 在网络连接古尔所示的PMT测量相干损失信号的时间行为一致2。

的损失其它区域, 在邻近浆距角  $\sim 70^\circ$ 。 ( 区域红色圆圈在响应的图3 ( b ) ) 的, 不改变帧之间显著地。反向轨道模型显示, 接近70度的损失, 主要是由于以提示从210L光束, 在这段时间内, 其一直处于损失[14]。提示的损失, 或第一个轨道的损失, 从出生与相交外壁轨道离子造成的。该

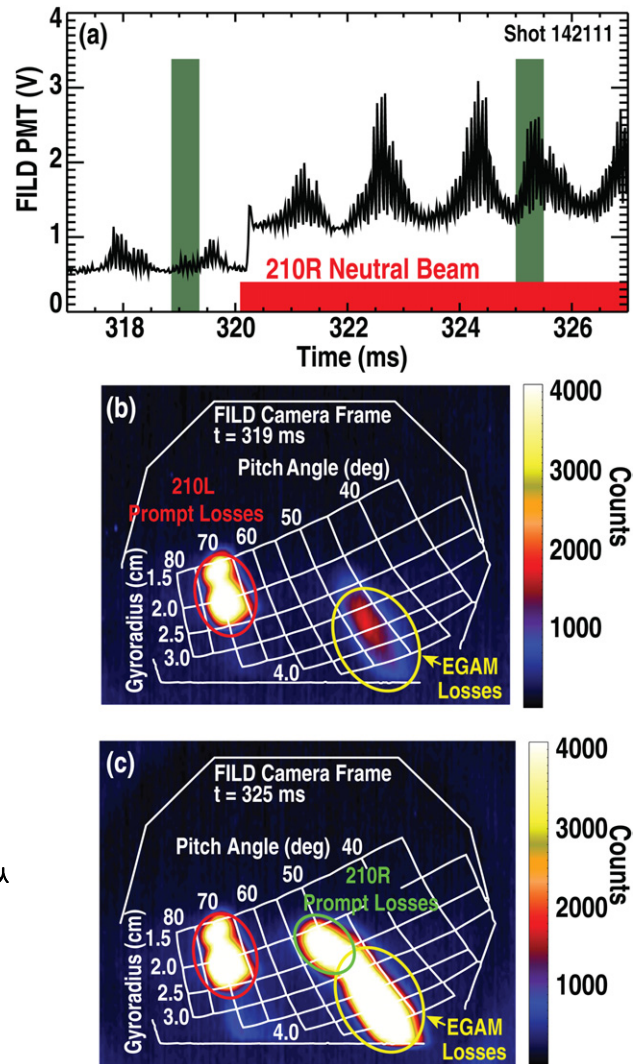


图3 ( 一个 ) 通过测量FILD光束损失信号示出了相干的突发 (  $F \sim$  EGAMs的15千赫 ) 的损失特性。由210R源起始于320ms的额外计数器束注入增加了测得的损失率。在319ms的连续帧 ( b ) 和326ms ( C ) 从CCD照相机测量的损失俯仰角和回旋半径表明相干的损失似乎在接近45度浆距角  $\sim 50^\circ$ 。在70度俯仰角度的损失, 用红色标出不变显著地和主要是由于从提示在这段时间内连续是在210L源损失。近45度  $\sim 50^\circ$  在浆距角是由于EGAM相互作用 ( 在黄色圆圈 ) 和210R提示损失 ( 圆圈中绿色 )。

近50度  $\sim 50^\circ$  在浆距角是由于两个第一个轨道 ( 区域绿色圆圈响应的图3 ( b ) ) 的, 和EGAM诱导的损失, 主要是由于该210R中性束源。这些损耗发生在从gyroradii的范围内  $\sim 2$  到4厘米。检测器处的磁场网络连接是1.5 T, 所以该范围gyroradii对应于氖离子能量从  $\sim 25$  千电子伏至最大注入的束能量  $E_b = 81$  千电子伏。的210L和210R来源是注入计数器在DIII-d等离子体电流的方向唯一中性束 ( 顺流光束提供另一  $\sim$  在此拍摄输入加热 ) 的2MW, 因此所得到的光束的离子生于其香蕉轨道的内侧和这并不奇怪, 它们支配所观察到的损耗的信号。

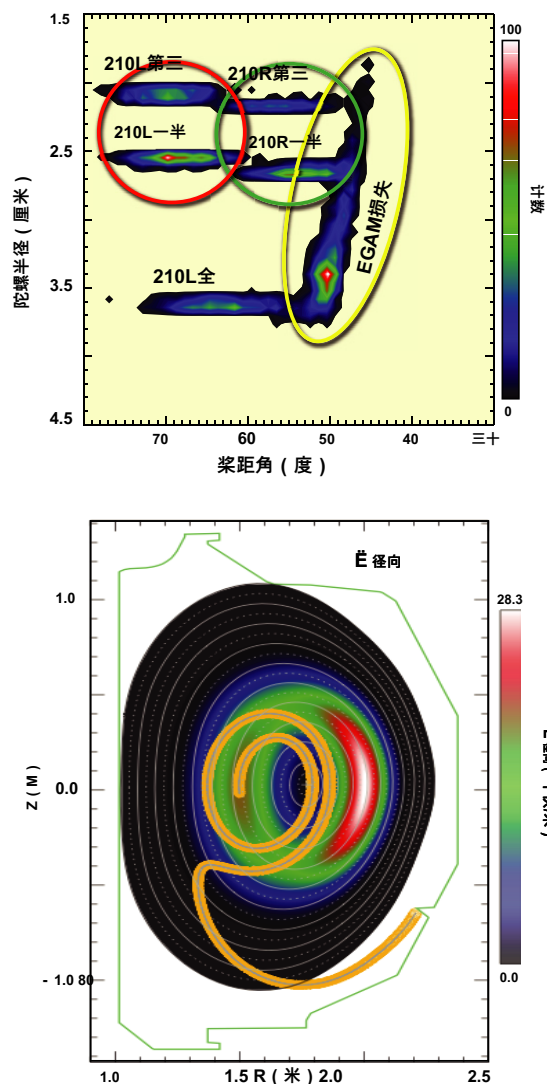


图4. ( 一个 ) 以下用于模拟由于EGAMs损失代码SPIRAL全粒子轨道的结果与测量的FILD结果一致。( b ) 计算损失轨道 ( 金 ) 在FILD相机数据的EGAM引起的损耗区检测到的离子束 (  $E = 75\text{keV}$ , 俯仰角 =  $45^\circ - 50^\circ$  )。还示出了从所计算出的径向电连接场  $m=0$ ,  $N=0$  静电势扰动从EGAM活动而产生的。

### 3.建模和推断EGAM损失机理

螺旋是一个被开发用来建模托卡马克高能离子行为[全粒子轨道下面的代码 16, 17]。数字 4 示出了螺旋线的结果用于模拟所造成的损耗EGAMs。在这些螺旋代码模拟 1, 与出生能量沉积从NUBEAM [离子 18] 遵循, 因为它们减缓和俯仰角度散射在与相互作用  $m=0$ ,  $N=0$  径向电连接的场从EGAM活动而产生的。在螺旋ELD中使用的径向电连接是基于一个环形对称电位这是一个通量函数, 且其大小被选择为匹配所得到的密度来计算

通过光束发射测量扰动光谱学诊断。45之间发生的EGAM诱导损耗。

和50·在俯仰角和在宽范围的gyroradii ( 地区圆黄色在音响ures 4 ( 一个 ) 和 3 ( b ) ) 的作为EGAMs与210R的缓行分布相互作用注入的离子。近45区域的方式 - 50·

还可以包括从所述源210R提示损失。一个例子是在区域绿色即210R喷射期间仅存在并且是与210R的三分之一和二分之二的能量分量提示损失一致盘旋。螺旋导致网络古尔 4 在与网络连接的古尔测得的结果是一致的 3 和相同的颜色编码被用来识别在这两个网络连接tures不同损耗的区域。无论是FILD测量和螺旋码预测显示显著的EGAM引起的损耗, 可比inmagnitude为反注入束提示的损失。螺旋结果也与在音响古尔所示的损失所测量的时间行为一致 2 包括“延时”相干成分210R光束被关断之后。

反向轨道以下技术用于计算波束离子基于它们的测量桨距角和gyroradii到达FILDdetector的轨道。等离子体内部的磁场网络连接CON组figuration使用等离子体平衡代码EFIT [确定 19], 由约束电流廓 ( 基于磁场网络连接间距的运动斯塔克效应测量 ) 和所测量的等离子体压力。数字 4 ( b )

示出了用于一个为75keV束离子所计算的轨迹 ( 在金示出 ) 的以45的桨距角的极向投影螺旋结果 - 50·到达FILD检测器。这个无条件转接网络定义捕集粒子轨道的内侧部分是接近CON组fi奈德计数器注入离子束的轨道。作为反注入束离子失去能量到波, 在他们的桨距角的变化使一个themon科幻无条件转接定义捕获粒子轨道, 导致相干与EGAM活性所测量的损失FILD信号。束的离子的损失减少了模式, 这又降低了光束损失速率, 直至循环再次开始驱动机构。这种捕食不稳定的行为导致在模式幅度和测量束离子损失所观察到的脉冲串。

### 4. 结论

上DIII-d一种新的基于闪烁体的快速离子损失检测器已经允许快离子损失的第一个实验观察由于托卡马克EGAM活性。中性束注入计数器到等离子体电流的方向强烈地激发EGAMs。从相干束离子损失信号的测得的桨距角和gyroradii, 反向轨道下列技术产生俘获离子损失轨道, 来在等离子体内部达到很好的大型香蕉宽度。通过与EGAM的相互作用, CON上counterpassing轨道网络斯内德束离子经历在他们的俯仰角的变化是把它们放在捕获粒子损失轨道。所测得的损耗fastion呈现EGAMs的破裂行为特性, 与测量的生长速率与fastion压力驱动themodes一致。

1 SPIRAL代码使用UNIX 512个AMD Opteron处理器被运行, 并且随后250000个粒子 ( 50000每束束 )。



致谢

这项工作是由能源在DE-FC02-04ER 54698 , SC-G903402和DEAC02-09C H11466美国能源部的部分资助。在DIII-d团队的协助深表感谢。

参考

[1] Heidbrink WW和萨德勒GJ 1994 核聚变研究 聚变 34 535  
[2] A. FASOLI 等在ITER物理基础进展情况：第5章。  
高能离子2007年的物理学 核聚变研究 聚变 47 S264  
[3]自韦本SJ 2000 核聚变研究 聚变 40 91  
[4] Heidbrink WW 2002 物理学。等离子体 9 2113  
[5] Keilhacker M. 等 1999年 核聚变研究 聚变 39 209  
[6] Nazikian R. 等 2008年 物理学。教师快报。 101 185001

[7]傅GY 等 2008年 物理学。教师快报。 101 185002  
[8]费希尔RK 等 2010 启科学。仪器厂。 81 10D307  
[9]Garc'ia-Mu~ NOZ M. 等 2009年 启科学。仪器厂。 80 053503  
[10]Garc'ia-Mu~ NOZ M. 等 2010 物理学。教师快报。 104 185002  
[11] H.伯克 等 2006年 核聚变研究 聚变 46 S888  
[12] Heidbrink WW 等 2009年 等离子物理学。控制。聚变 51 125001  
[13]佩斯DC 等 2011 等离子物理学。控制。聚变 53 062001  
[14]范泽兰MA 等 2011 物理学。等离子体 18 056114  
[15]佩斯DC 等 2010 启科学。仪器厂。 81 10D305  
[16]克莱默GJ 等 2008年 PROC。22日聚变能的conf。  
(日内瓦,瑞士) (维也纳:IAEA) CCD-ROM文件IT / P6-3和 [www-naweb.iaea.org/napc/physics/FEC/FEC2008/HTML/index.htm](http://www-naweb.iaea.org/napc/physics/FEC/FEC2008/HTML/index.htm)的  
[17]克莱默GJ 等 2012 A中的全粒子轨道的描述  
以下SPIRAL代码托卡马克模拟快离子实验 等离子物理学。控制。聚变 提交  
[18]潘金A. 等 2004年 COMPUT。物理学。COMMUN。 159 157  
[19]老拉L. 等 2005年 融合科学。TECHNOL。 48 968