



面向磁约束聚变实验的先进中子发射谱仪诊断的研究

樊铁栓^{①*}, 袁熙^①, 张兴^①, 谢旭飞^①, 陈忠靖^①, 彭星宇^①, 杜腾飞^①, 胡志猛^①,
崔志强^①, 陈金象^①, 李湘庆^①, 张国辉^①, 王晓钢^②

① 北京大学物理学院, 重离子物理研究所, 核科学与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

② 北京大学物理学院, 等离子体物理与聚变研究所, 核科学与核技术国家重点实验室, 北京 100871

*联系人, E-mail: tsfan@pku.edu.cn

收稿日期: 2013-08-26; 接受日期: 2013-08-29; 网络出版日期: 2013-09-18

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013GB106004, 2012GB101003, 2009GB107001, 2008CB717803)、国家自然科学基金(批准号: 91226102)、国家科技支撑计划(编号: 2011BAI02B01)和国防基础科研计划(批准号: B0120110034)资助项目

摘要 本文评述了 EAST 和 HL-2A 托卡马克装置上开展的聚变发射中子谱仪研究的进展. 面向等离子体物理研究和 ITER 装置中子诊断技术发展的最新需求, 针对 EAST 和 HL-2A 托卡马克装置的低中子产额(10^9 – 10^{11} s⁻¹)场, 设计和发展了全数字化的液体闪烁谱仪和蒽晶体中子谱仪. 进行了 EAST 和 HL-2A 放电实验聚变中子产额随时间演化规律的研究, 开展了 HL-2A 装置上 NBI 辅助加热效果的评估和 EAST 聚变等离子体锯齿震荡的中子通量诊断. 使用液体闪烁谱仪和蒽晶体中子谱仪测量实现了 EAST 放电的芯部聚变离子温度诊断, 首次将托卡马克装置实验中子能谱直接诊断离子温度的下限推到 1 keV 以下. 在 EAST 装置上建设的双环式球形阵列中子飞行时间谱仪将为托卡马克装置辅助加热和快离子物理研究打下坚实的基础.

关键词 中子谱仪, 等离子体诊断, 聚变, 托卡马克

PACS: 52.70.-m, 52.55.Fa, 29.30.Hs

doi: 10.1360/132013-365

1 引言

作为一种最有可能替代化石能源的清洁能源, 聚变能在未来世界能源领域将占有重要地位. 托卡马克装置作为解决未来稳态聚变反应堆工程及物理问题的最有效途径, 在最近几十年已经取得了飞速

发展. 通过研究开发先进的等离子体诊断技术, 可以从实验上确定表征聚变等离子体性质和状态的重要物理量, 进而实现对包括 ITER^[1]在内的聚变装置的等离子体参数与反馈控制、约束性能优化和物理研究. 随着磁约束高温等离子体产生的聚变功率不断提高, 一般大中型装置(如 JET^[2]、JT-60U^[3]、DIII-D^[4]、

引用格式: 樊铁栓, 袁熙, 张兴, 等. 面向磁约束聚变实验的先进中子发射谱仪诊断的研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1236–1250

Fan T S, Yuan X, Zhang X, et al. Study of advanced neutron emission spectrometry diagnostics for tokamak fusion experiments (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1236–1250, doi: 10.1360/132013-365

EAST^[5,6]、HL-2A^[7]、MAST^[8]等)均有可观察的中子产生. 由于中子发射是聚变反应发生的主要标记和人类聚变反应堆研究进步快慢的直接度量^[9], 聚变中子的诊断技术和相关理论研究对于聚变装置的输出功率评估和燃烧等离子体物理研究具有独特的重要作用. 因此, 作为国际热核实验堆(ITER)和磁约束聚变 DEMO 堆等离子体控制和评估的主要诊断手段之一, 多种先进的中子诊断系统正在积极研究发展中^[10-12].

能够提供聚变反应本质信息的中子诊断技术, 即中子产额测量^[13-15]、中子发射剖面测量(中子相机)^[16]和中子发射能谱测量等技术, 可以从不同方面提供聚变反应本质的信息^[9]. 经过绝对刻度的中子产额监测器可以确定装置的聚变功率和辅助加热手段的加热效果. 由快中子探测器阵列组成的中子相机测量托卡马克环向截面上中子发射率的一维或者二维剖面, 可以得到等离子体的不同参数信息, 进而研究辅助加热的能量沉积剖面等物理过程. 通过中子发射谱仪测量等离子体芯部准直中子的能量分布, 既可以实现对中子产额监测器或者中子相机的系统标定, 也可以对特定托卡马克装置的中子通量场进行基准检验. 另外, 从中子谱仪测量直射中子和散射中子之比出发, 可以对中子通量监测和中子相机测量的结果进行正确的解释. 聚变中子发射能谱与等离子体燃料离子的动力学过程密切相关, 由此可以方便地诊断聚变反应三要素之一的离子温度. 当等离子体中存在大量快离子时, 由高精度的中子发射能谱测量可以分析燃料快离子的速度分布和快离子密度分布的变化, 进而研究快离子的约束与输运、快离子与磁流体动力学(MHD)活动的相互作用以及聚变反应堆的等离子体自持燃烧过程等物理问题. 中子能谱诊断的结果还可以为国际热核实验堆(ITER)和磁约束聚变 DEMO 堆包层材料的设计和环境辐射防护等提供重要的依据.

与聚变中子产额监测器和中子发射剖面测量这些已经成为大型托卡马克装置上的常规诊断手段不同, 中子发射能谱诊断技术还在不断探索和发展过程中^[17]. 首先, 用于托卡马克聚变等离子体诊断的中子谱仪, 必须满足在磁屏蔽、 γ 射线屏蔽、抗强中子辐射、抗电磁干扰、抗机械振动和快速信号处理能力等方面的多种技术要求^[18]. 其次, 面对 ITER 聚变实验这样的长脉冲和高占空比运行模式下的极强辐射

中子场, 中子谱仪必须能够满足实时控制条件下的高稳定性和长时间运行的需求, 谱仪设计还必须深入研究 and 解决由严酷的核辐射环境所带来的新问题^[19,20]. 从另一方面看, 对于较小体积聚变装置实验产生的伴随着强 γ 辐射的复杂中子场, 如何设计和建造具有足够高探测效率和适当能量分辨本领的中子谱仪是核物理学家不得不长期面对的技术挑战^[21].

聚变中子诊断的根本任务是通过聚变等离子体中子源来描述等离子体的性质^[9], 也就是说, 要通过实验测量的热核反应所产生的中子数目、中子能谱、中子的空间分布和时间分布等物理量诊断聚变等离子体的基本参数和物理性质. 实际上, 中子谱仪在记录直接来自热核反应产生的等离子体源中子的同时, 也记录了在装置结构材料和杂质上散射后且能谱已经被严重扭曲的散射中子; 对能谱测量结果产生干扰的还包括某些非热核反应产生的中子, 如由等离子体中高能(2.2 MeV 以上)逃逸电子通过电致分裂(Electro-disintegration)或者光核反应产生的中子辐射等, 这些吸热核反应的中子能谱呈单调下降趋势, 必须从测量结果中进行有效剔除. 所以, 为了利用中子能谱测量对聚变等离子体源物理性质进行正确的诊断, 必须发展先进的探测器中子/ γ 光子(n/ γ)甄别技术和高速的数据采集和数据处理电子学系统. 要使用先进的 Monte Carlo 模拟技术建立用来描述真实托卡马克装置中子传输过程的计算程序, 进而评估和修正中子散射和吸收过程对谱仪所测量中子信号的影响, 这时如何减少中子模拟的误差对真实实验测量结果的影响是一个艰巨的任务. 由于聚变中子能谱和产额以极其复杂的方式与燃料离子的运动状态相联系, 需要在对等离子体物理的基本理论和等离子体各种辅助加热机制深入研究的基础上, 建立确定等离子体参数和中子测量数据相互关系的迭代程序, 实现对中子能谱测量数据进行正确解释并得到等离子体的参数和物理规律.

面向快离子物理和 ITER 装置中子诊断技术发展的最新需求, 针对 EAST 和 HL-2A 托卡马克装置聚变等离子体复杂中子场的特点, 北京大学课题组开展了基于有机闪烁体中子谱仪和大型双闪烁中子飞行时间谱仪的中子发射能谱诊断研究. 本文在第二节首先评述了面向 EAST 和 HL-2A 中子场(中子产额约为 10^9 – 10^{11} s⁻¹)全数字化紧凑型高探测效率中子谱仪的研究, 在第三节介绍了在 EAST 和 HL-2A 聚变实验

中的发射中子谱仪诊断的部分物理结果. 第四节评述了中性束加热机制的模拟和高能量分辨率的双环式球形阵列中子飞行时间谱仪研究进展, 该谱仪能满足 EAST 辅助加热条件的改善情况后高中子产额 (10^{13} – 10^{15} s $^{-1}$) 中子场的快离子物理诊断需求. 最后在第五节给出结论.

2 全数字化紧凑型聚变中子发射谱仪研究

根据 EAST 和 HL-2A 装置等离子体温度、密度以及辅助加热能力的现状(中子产额约为 10^9 – 10^{11} s $^{-1}$), 在先进的 n/γ 甄别技术和细致的探测器性能研究基础上, 建立了一系列全数字化的具有较高探测效率的紧凑型有机闪烁中子谱仪, 并成功地在托卡马克装置上进行了中子能谱测量.

2.1 先进的数字化 n/γ 甄别技术研究

当入射中子和 γ 光子进入有机闪烁体探测器时, 损失部分或全部能量使闪烁体电离和激发, 受激原子和分子退激发出荧光分子. 光子产生的电子与中子产生的反冲质子引起的光脉冲信号的主要区别在于信号快、慢成分的比例不同, 可以通过鉴别脉冲形状来实现 n/γ 甄别, 发展高水平的 n/γ 甄别方法是研究先进的有机闪烁体中子谱仪的关键技术之一^[22]. 传

统的 n/γ 甄别方法由电子学系统(如 NIM 系统或者 CAMAC 系统等)硬件实现^[23], 由于近年来高速数字采集技术的快速发展使脉冲信号的逐个分析成为可能, 数字化技术已经开始成为中子测量的主流技术^[24], 已经发展了多种数字化脉冲形状甄别方法如电荷积分法^[25,26]、过零时间法^[27]、小波分析法^[28,29]和神经网络方法^[30]等等.

2.1.1 数字化的时域延迟线成形鉴别技术

在基于硅晶体探测器 and 高速数据采集卡建立的数字化中子谱仪进行钨铍中子源能谱测量中, 首先对电荷积分法、过零时间法、上升时间法和脉冲梯度法的数字化 n/γ 甄别技术进行了比较研究^[31]. 在此基础上, 我们提出并首次实现了数字化的时域延迟线成形鉴别技术, 并在聚变中子和钨铍中子源能谱实验中成功进行了 n/γ 甄别. 时域延迟线成形鉴别算法的原理如图 1 所示^[32]. 首先使用恒比定时(CFD)算法在中子和 γ 射线脉冲 $I(t)$ 的上升沿计算恒比为 χ_1 的时间 t_1 , 将衰减时间为 τ_d 的指数放电函数与脉冲卷积, 将所得到的卷积积分脉冲 $p(t)$ 反相衰减并延迟, 如图 1(c), 将正负脉冲相加得到如图 1(b)的归一化延迟线成形脉冲, 脉冲的下降沿中子和 γ 射线出现明显区别, 做 χ_2 的下降沿 CFD 计算得到时间 t_2 , 根据 $t_2 - t_1$ 计算渡越时间实现中子和 γ 射线脉冲鉴别. 数字化时域延

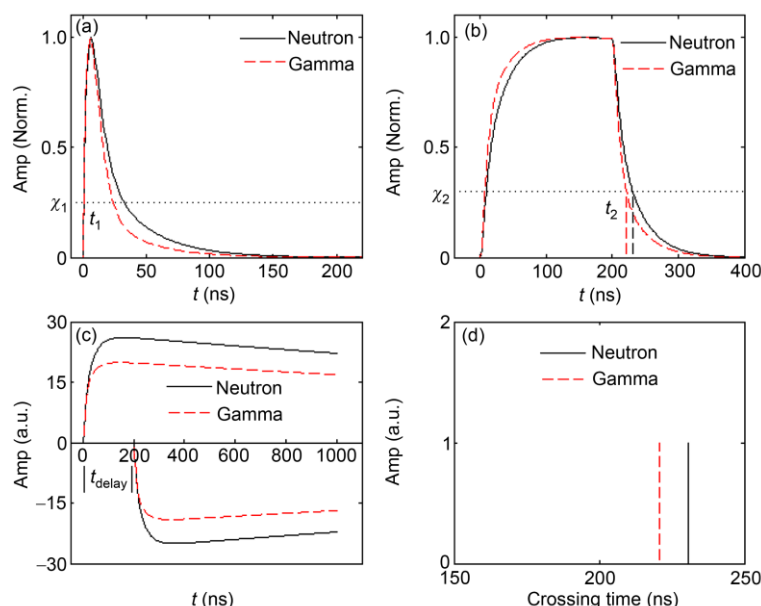


图 1 (网络版彩图) 数字化延迟线成形鉴别算法原理图

Figure 1 (Cocor online) Principle of digital delay-line-shaping (DLS) algorithm.

迟线成形鉴别算法的优点是: (i)通过积分减小噪声影响, 有效降低 n/γ 甄别算法可分辨的能量下限; (ii)在做 n/γ 甄别计算的同时得到脉冲幅度值; (iii)由 CFD 算法提高定时精度, 从而增加鉴别算法的精度.

2.1.2 数字化的矩分析鉴别技术

矩分析方法是一种在数理统计领域应用广泛的数据处理方法, 我们首次发展了优化的矩分析方法并成功地应用于有机闪烁体中子探测器的 n/γ 甄别中^[33]. 这个方法的实现原理如图 2 所示, 关键是计算中子信号和 γ 信号(图 2(a))的积分信号(图 2(b))的第一矩和第二矩(图 2(c)), 由这两者的差别可以将源中子信号和 γ 信号分开. 优化的矩分析技术使用方便简洁, 对于使用苾晶体探测器获取的钨铍源中子和 γ 信号甄别结果如图 3 所示.

2.2 全数字化紧凑型聚变中子谱仪研究

我们研究建立了基于 BC501A($\Phi 5'' \times 2''$)、EJ301($\Phi 2'' \times 2''$)液体闪烁体和苾晶体($\Phi 40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$)探测器的三种紧凑型有机闪烁体中子谱仪, 除了采用具有高性能 n/γ 甄别硬件单元的 NIM 电子学系统外, 还建立了基于 Agilent U1065A 高速采集卡和 CAEN DT5751 高速采集卡的全数字化数据获取系统, 开发了基于延迟线成形(DLS)、矩分析(MA)、电荷比较

(CCM)、过零时间(ZCM)、特定频率比(ROSF)、多尺度小波变换(MWL)和频域的数字化 n/γ 甄别程序, 将谱仪系统计数率上限由传统模拟电路的 50–100 kHz 提升到数字电路的 1 MHz 以上, 在托卡马克聚变中子测量中显示了不可替代的优势.

2.2.1 系统的 γ 刻度

由于有机闪烁体中子谱仪实验测量的脉冲高度谱是由聚变中子能谱卷积探测器对于中子、光子的响应函数矩阵的结果, 必须通过系统准确的中子和 γ 射线刻度建立探测器对于中子和光子的响应函数矩阵. 需要通过谱仪的 γ 刻度来获得用于探测器中子能量刻度的能量-道址关系, 进而通过质子-电子响应函数表示非线性的质子-光子响应函数. 在深入开展有机闪烁体中子谱仪脉冲高度谱反卷积方法研究的基础上, 使用 ^{60}Co , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{54}Mn 和 ^{152}Eu 源实验测量与 GRESP 软件^[34]蒙特卡洛计算相结合完成了从 1.1 MeV 到 17.6 MeV 的中子能量范围的 γ 刻度^[35]. 作为例子^[36], 图 4(a)中显示了使用 EJ301 中子探测器测量 ^{22}Na 源的脉冲高度谱与 GRESP 软件计算结果的比较.

2.2.2 系统的中子刻度

通过实验测量得到探测器的质子-光子响应函数

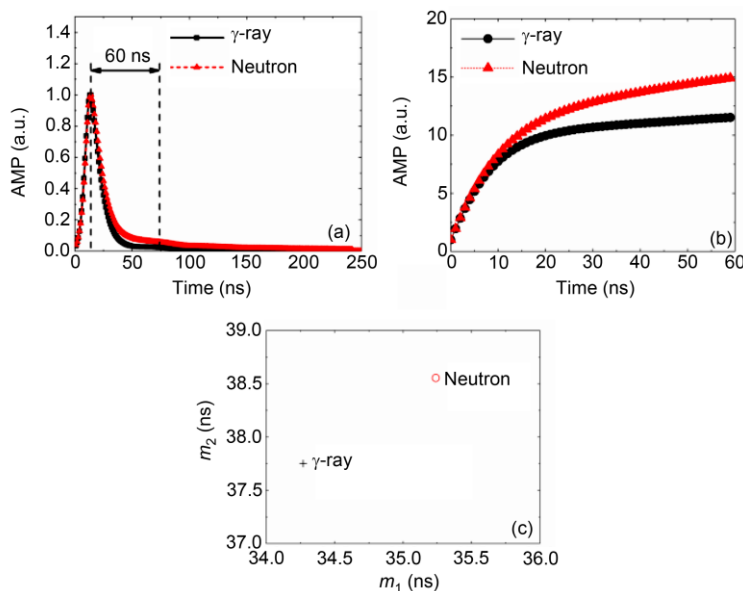


图 2 (网络版彩图) 使用钨铍中子源的中子和 γ 信号的矩分析甄别实现

Figure 2 (Color online) Demonstration of the principle of moment analysis with averaged neutron and γ -ray signal from an Am/Be isotropic neutron source.

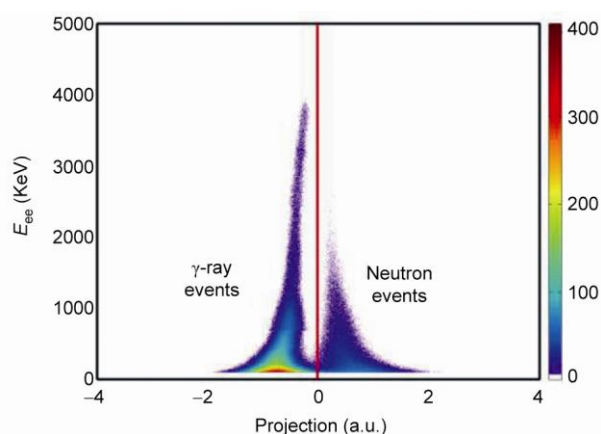


图3 钨铍中子源获取信号的 n/γ 甄别结果

Figure 3 Plot of projection versus E_{ee} for neutron and γ -ray signals acquired from Am/Be isotropic neutron source.

和脉冲高度谱的能量分辨率, 就能够确定有机闪烁体中子谱仪的中子响应函数矩阵. 全部有机闪烁体中子谱仪(探头分别为 BC501A 液体闪烁体、EJ301 液体闪烁体和苾晶体)的中子刻度实验在北京大学 4.5 MV 静电加速器^[37]上完成, 利用 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$, $\text{T}(p, n){}^3\text{He}$, $\text{D}(d, n){}^3\text{He}$ 和 $\text{T}(d, n){}^4\text{He}$ 等带电离子核反应

产生了从 1.14 MeV 到 17.67 MeV 共 14 个准单能中子源. 将蒙特卡洛模拟得到相应的理论谱与实验测量谱迭代拟合得到反冲质子的光响应函数, 在此基础上利用 NRESP 程序^[38]进行蒙特卡洛计算以建立完整的响应函数矩阵. 图 4(b)–(d)分别给出了 EJ301 探测器测量 1.4 MeV、2.4 MeV 和 16.1 MeV 准单能中子源的实验谱与理论计算谱的比较.

2.2.3 EJ301 闪烁体的气泡效应研究

在作为中子谱仪的探测器单元使用时, EJ301 闪烁体的内部封装气泡会对探测器的 γ 射线响应和中子响应的影响不可忽视. 我们将实验测量和 10 个探测器模式的 GEANT4 程序^[39]蒙特卡洛模拟相结合, 进行了 EJ301 闪烁体气泡效应的细致研究^[40]. 图 5 给出了在 3 种不同的探测器摆放方式时实验测量的 EJ301 探测器对 ${}^{137}\text{Cs}$ 和 ${}^{22}\text{Na}$ 源的光子响应曲线, 可以看出, 响应曲线随着探测器的摆放位置的改变而改变. 当探测器气泡位于闪烁体和光电倍增管之间并朝下放置时, 探测器光响应的改变甚至会约为 22%. 物理分析和蒙特卡洛程序模拟表明, 探测器的响应函数与摆放位置之间的相关性来源于闪烁体内部气泡引起光

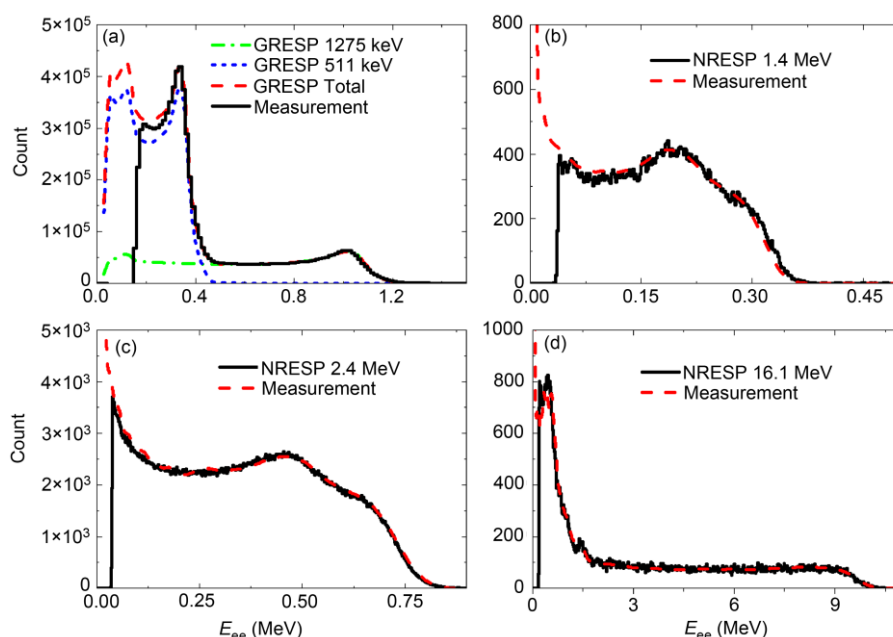


图4 EJ301 液体闪烁体探测器测量的脉冲高度谱与理论计算谱的比较

(a) ${}^{22}\text{Na}$ 源; (b) 1.4 MeV 准单能中子源; (c) 2.4 MeV 准单能中子源; (d) 16.1 MeV 准单能中子源

Figure 4 Comparison of experimental (black histogram) and theoretical (color dashed line) pulse height spectra for ${}^{22}\text{Na}$ radiation source (a) and quasi-monoenergetic neutron sources with the energy of 1.4 MeV (b), 2.4 MeV (c) and 16.1 MeV (d). The theoretical pulse height spectra for γ -rays and neutrons are calculated by GRESP and NRESP, respectively.

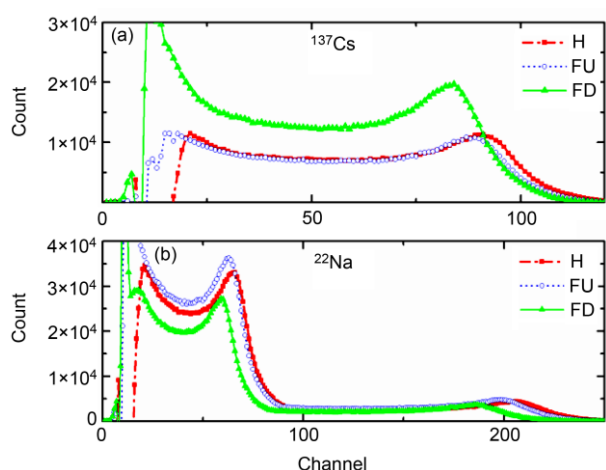


图 5 处于 3 种不同摆放位置时 EJ301 探测器对 ^{137}Cs 源(a) 和 ^{22}Na 源(b) 的响应

Figure 5 Responses of EJ301 detector to ^{137}Cs (a) and ^{22}Na (b) γ -rays at three different placement styles.

传输过程改变. 当使用 EJ301 探测器进行中子能谱测量时, 水平向上的探测器摆放方式可以将这种影响减少到 1.56%.

2.2.4 茛晶体的各向异性效应研究

在进行快中子能谱测量时, 茛晶体中子谱仪比液体闪烁体中子谱仪具有更优的 n/γ 甄别能力和脉冲幅度分辨率. 与液体闪烁体不同, 像质子和 α 这样的带电粒子在茛晶体中电离引起的闪烁发光呈现出明显的各向异性, 因此茛晶体发光的各向异性模型是设计茛晶体中子谱仪的一项关键参数. 我们发展了

一种快速分析茛晶体发光各向异性的分析方法, 建立了 Geant4 模型模拟谱仪的中子响应, 通过 14 个加速器准单能中子源分析了茛晶体的质子发光函数和脉冲幅度分辨率, 最终建立了可靠的中子能量响应矩阵. 我们选用圆柱形茛晶体($\Phi 50\text{ mm} \times 40\text{ mm}$)、带有石英玻璃窗的 ET9814QKB 光电倍增管和数字化脉冲形状鉴别系统建立了一套新型的茛晶体中子谱仪^[41]. 在北京大学 4.5 MV 静电加速器上产生脉冲化的 p 和 d 离子束, 通过 $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ 、 $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ 和 $\text{T}(p, n)^3\text{He}$ 反应产生了 0.6 MeV、1.1 MeV、2.3 MeV 和 5.0 MeV 的准单能脉冲中子束, 通过与飞行时间谱测量结果比较证明了该谱仪具有良好的 n/γ 甄别能力, 通过谱仪测量得到了准单能中子的脉冲幅度谱. 图 6 显示了 $\text{T}(p, n)^3\text{He}$ 反应的测量结果, 中子能量为 2.4 MeV. 图 6(a) 是延迟线成形算法相对渡越时间与中子飞行时间的二维谱, 其中 A 区是靶上产生的 γ 射线, B 区是 2.4 MeV 中子, C 是中子在谱仪附近材料中核反应产生的 γ 射线, D 和 E 分别是倍频束流产生 γ 射线和 2.4 MeV 中子, 经 n/γ 甄别得到的中子脉冲高度谱如图 6(b).

3 EAST 和 HL-2A 上中子发射谱仪的等离子体诊断

EAST 托卡马克是世界上第一座全超导非圆截面的托卡马克, 其科学目标旨在近堆芯的高参数条件下研究等离子体的稳态和先进运行模式^[6], EAST 装置 2012 年度实验主要的加热手段包括欧姆加热、2

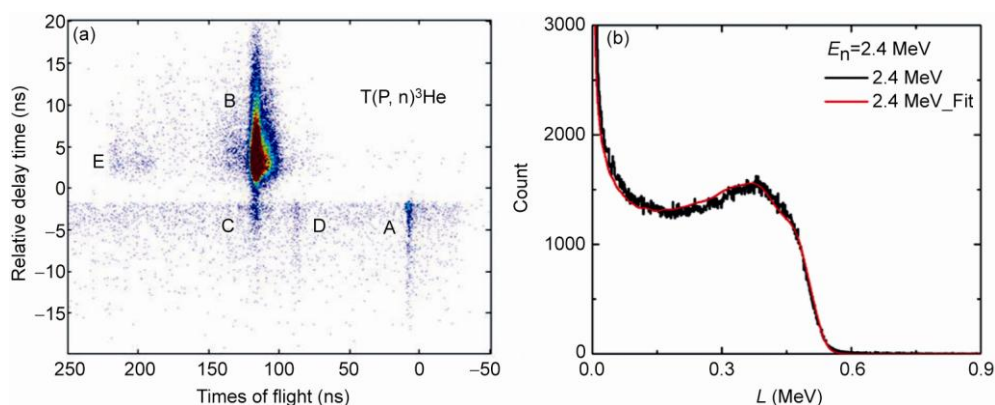


图 6 $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ 反应 2.4 MeV 中子的二维 n/γ 甄别谱(a)和脉冲幅度谱(b)

Figure 6 (a) Two-dimensional plot of relative crossing time vs. time-of-flight for $\text{T}(p, n)^3\text{He}$ reaction measurement. (b) Measured pulse height spectrum of neutrons.

MW 低杂波加热(LHW)和 4.5 MW 离子回旋加热(ICRF). HL-2A 托卡马克是我国第一个具有先进偏滤器位型的非圆截面托卡马克装置, 其科学目标是开展高参数等离子体条件下的改善约束实验, 并利用独特的大体积封闭偏滤器结构, 开展核聚变领域许多前沿物理课题以及相关工程技术的研究, 为我国下一步聚变堆研究与发展提供技术基础^[7]. EAST 和 HL-2A 托卡马克目前运行在 D 等离子体放电模式下, 主要聚变中子能量为 2.5 MeV, 中子产额约为 10^9 – 10^{11} s⁻¹, 考虑到中子的传输效率约为 10^{-7} – 10^{-8} , 到达探测器表面的中子注量率仅 10^2 – 10^4 s⁻¹, 选择对快中子具有较高探测效率(对 2.45 MeV 中子约 20% 左右)有机闪烁体谱仪就有可能获得适于物理分析的数据统计. 在低杂波(LHW)注入和离子回旋频率(ICRF)加热两种放电条件下的 EAST 聚变实验中, 使用苾晶体中子谱仪测量实现了芯部等离子体离子温度的诊断, 将托卡马克装置中子能谱直接诊断芯部燃料离子温度的下限推到 1 keV 以下. 在 HL-2A 的中性束加热实验中, 通过液体闪烁体中子谱仪进行了辅助加热效果的评估.

3.1 EAST 装置锯齿波(Sawtooth)的中子注量诊断

锯齿振荡(Sawtooth)是指在等离子体中心区域发生的温度、密度的周期性振荡, 通常锯齿振荡上升缓慢(由加热和输运决定), 下降迅速(由 $m=1$ 模触发). 我们使用液体闪烁体中子谱仪对 EAST 装置第 41973 次放电进行了中子注量随时间演化的测量研究, 如图 7 显示的数据可见, 在 5.05–5.5 s 期间, EAST 装置等离子体发生了明显的锯齿振荡现象, 这与反映电子温度和电子密度的电子回旋信号(ECE)的周期振荡吻合, 频率大约是 58 Hz. 尽管两者的幅度变化还有一定的差异, 但可以为分析锯齿振荡在电子温度和离子温度上的细微差别提供了有效的数据.

3.2 EAST 装置聚变实验的芯部离子温度诊断

在 LHW 注入放电实验中, 低杂波频率为 2.45 GHz, D 离子的速度分布函数满足麦克斯韦分布, 对应高斯型的聚变中子能谱. 置于准直屏蔽体内的苾晶体中子谱仪在中平面沿垂直磁轴的方向测量聚变中子, 与 EAST 托卡马克的等离子体中心相距 5 m. 由于单次放电的中子产额较低, 实验中通过叠加相同放电条件的测量谱来分析离子温度^[41]. 图 8(a)显示

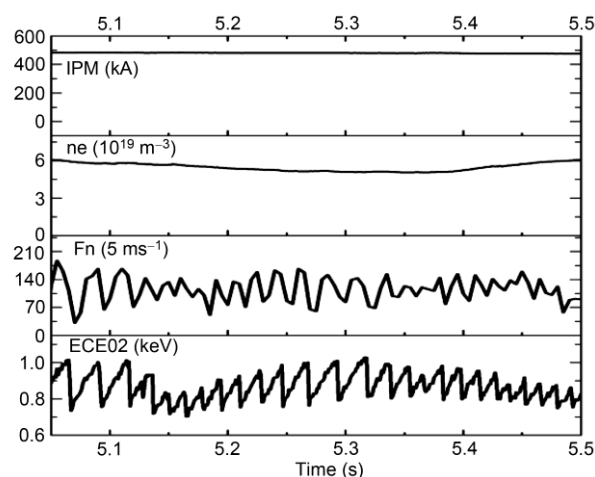


图 7 EAST 第 41973 次放电主要参数时间演化图, 其中参数包括等离子体电流 IPM, 等离子体电子密度 n_e , 从液体闪烁体谱仪得到的中子计数 F_n 和电子回旋辐射测量信号 ECE02

Figure 7 Time traces of plasma current IPM, electron density n_e , neutron rate F_n and ECE signal ECE02 during EAST plasma discharge #41973.

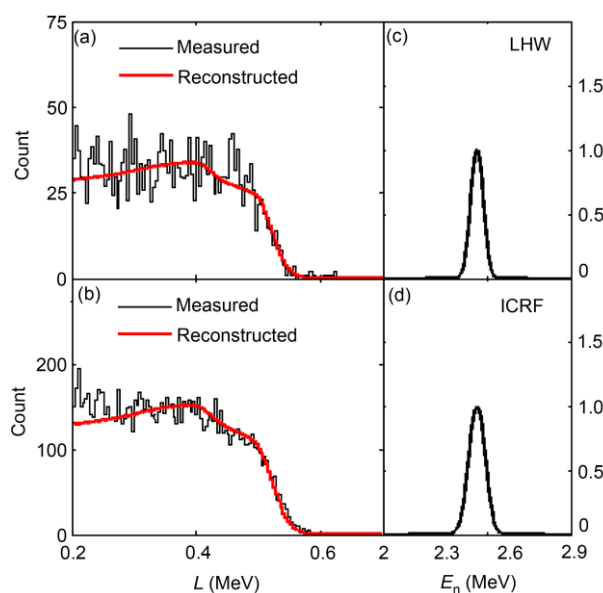


图 8 (网络版彩图) EAST 托卡马克低杂波注入(a)和离子回旋加热放电(b)下的聚变中子测量谱和计算谱, (c)和(d)分别为两种放电情况下从脉冲高度谱反卷得到的聚变中子谱
Figure 8 (Color online) Measured and calculated pulse height spectra determined for the scenarios: (a) LHW and (b) ICRF. (c) and (d): Unfolded fusion neutron spectra determined from the pulse height spectra for the two heating scenarios.s

了 6 次放电(炮号为#42195-#42197 和#42199-#42201)累加的实验测量脉冲幅度谱, 2.45 MeV 中子的反冲质子边清晰可见. 通过不同展宽的高斯能谱模型卷积探测器对中子的响应函数矩阵, 再使用最小二乘法迭代拟合包含反冲质子边的谱高能段, 获得 χ^2 最小的高斯能谱(图 8(c)), 计算得到的平均离子温度 $T_i=0.7$ keV, 在最小 χ^2 处取 $\Delta\chi^2=1$ 作为拟合的置信区间, 得到 T_i 的误差范围为 0.2–1.3 keV.

在频率为 27 MHz 的 ICRF 加热放电实验中, 主要加热模式为 H 少数离子加热, 波功率主要被 H 少数离子吸收, D 离子速度分布函数依然近似为麦克斯韦分布. 图 8(b)给出 3 次相似等离子体放电(炮号为#42311、#42312 和# 42323)累加的 D-D 聚变中子脉冲幅度谱, 在反冲质子边以上的能量范围没有明显的高能拖尾, 说明快 D 离子成分不显著^[41]. 仍使用高斯型能谱迭代拟合实验测量谱的高能段, 得到 χ^2 最小的高斯能谱(图 8(c))并计算得到平均离子温度 $T_i=1.2$ keV, 由 $\Delta\chi^2=1$ 得到 T_i 的误差范围为 0.4–2.4 keV.

3.3 HL-2A 装置聚变实验的 NBI 辅助加热效果诊断

我们使用液体闪烁体中子谱仪系统在 HL-2A 托卡马克上开展了一系列的辅助加热效果评估诊断^[33,42]. HL-2A 托卡马克装置的中性束注入加热时间大约只有 0.5 s, 将经过屏蔽准直的液体闪烁体探测器置于距托卡马克主轴约 4 m 远处(如图 9 所示), 数字化的数据获取单元选用 Agilent U1065A 高速数据采集卡.

图 10 给出 HL-2A 在中性束加热下第 40246 次放电的主要参数的时间演化图, 这些参数包括等离子体电流 I_p , 等离子体电子密度 n_e , 中性束注入能量

P_{NBI} , 从硬 X 射线谱仪得到的光子相对产额, 由 ^{235}U 裂变室得到的计数以及从液体闪烁体谱仪得到的中子注量和光子注量计数. 实验表明, 从液体闪烁体谱仪中测量的中子信号和 ^{235}U 电离室测量结果趋势一致, 从液体闪烁体谱仪得到的 γ 信号和硬 X 射线一致, 而这 4 组信号都与中性束功率有同样的升降趋势, 说明在 HL-2A 装置上主要的中子产额来源于中性束注入的快离子与背景等离子体之间的聚变反应.

4 快离子物理的中子发射谱仪诊断

快离子物理是以 ITER 聚变堆为代表的磁约束聚变研究的最重要的课题之一. EAST 和 HL-2A 装置运行在 D 等离子体放电模式下, 在高功率 NBI 加热和 ICRF 加热下中子产额将达到 10^{13} – 10^{15} s⁻¹, 中子谱仪探测器表面的中子注量率将达到 10^5 – 10^8 s⁻¹, 采用阵列式高分辨中子飞行时间谱仪将会得到较高的数据统计, 从而实现对等离子体中的快离子, 尤其是快 D 离子进行研究. 将中子发射能谱的实验测量与等离子体理论与模拟计算结合, 可以诊断快 D 离子的密度, 重建快 D 离子的能量分布, 开展快 D 离子的慢化、约束、输运和损失等多项相关芯部等离子体物理研究. 因此, 在开展在高中子产额放电条件下聚变等离子体中性束加热机制、等离子转动和聚变等离子体中子发射机制的理论模拟研究的同时, 我们设计和正在建造双环式球形阵列中子飞行时间谱仪. 它将于 2014 年春季 EAST 放电实验中投入运行, 为深入开展以芯部燃料快离子诊断为主的快离子物理研究提供基本条件.

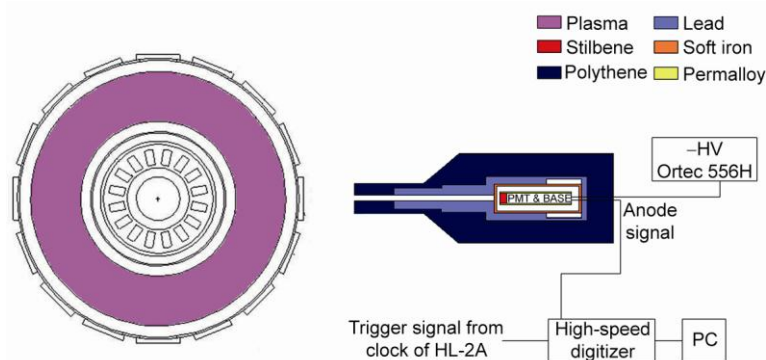


图 9 HL-2A 装置上有机闪烁体中子谱仪的实验布置

Figure 9 Schematic diagram of the experimental set-up on the HL-2A tokamak.

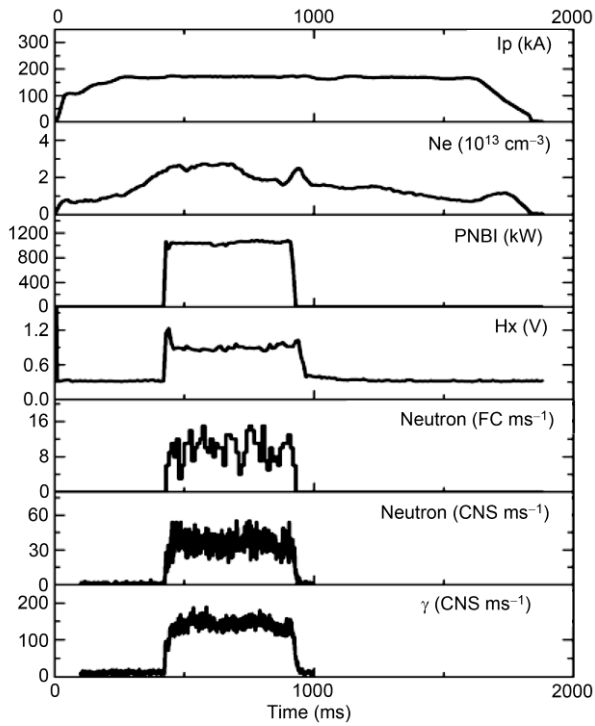


图 10 HL-2A 第 40246 次放电主要参数的时间演化图, 其中参数包括离子体电流 I_p , 等离子体电子密度 n_e , 中性束注入能量 P_{NBI} , 光子相对产额 H_X , 由 ^{235}U 裂变室得到的计数 Neutron (FC) 以及从液体闪烁体谱仪得到的中子注量 Neutron (CNS) 和光子注量计数 γ (CNS)

Figure 10 Time traces of plasma current I_p , electron density n_e , NBI power P_{NBI} , hard X-ray HX, neutron rate and γ -ray count rate during HL-2A plasma discharge #40246.

4.1 EAST 和 HL-2A 上中性束加热的 NUBEAM 模拟研究

为了提高加热功率, EAST 将安装两套切向的中性束注入(NBI)加热系统, 每套系统各有两条束流线, 束能量为 50–80 keV, 最大注入总功率为 8 MW, 持续时间 10–100 s^[43]. 根据 EAST 的中性束注入(NBI)系统的设计, 我们建立了中性束注入 NUBEAM 模拟模型, 研究了 EAST 在不同参数条件下 NBI 的能量沉积、电流驱动、环向转动以及中子发射率剖面, 考察了不同注入能量对 NBI 加热效果的影响. 根据计算结果, 发现高密度等离子体更有利于束能量沉积, 高温等离子体更有利于束能量沉积到离子, 高中性束注入能量能产生更多的中子. 图 11 给出了对于不同束粒子能量下的中子发射剖面^[44].

利用 NUBEAM 模拟程序^[45], 我们首次对 EAST 在不同离轴 NBI 情况下的加热与电流驱动效果进行

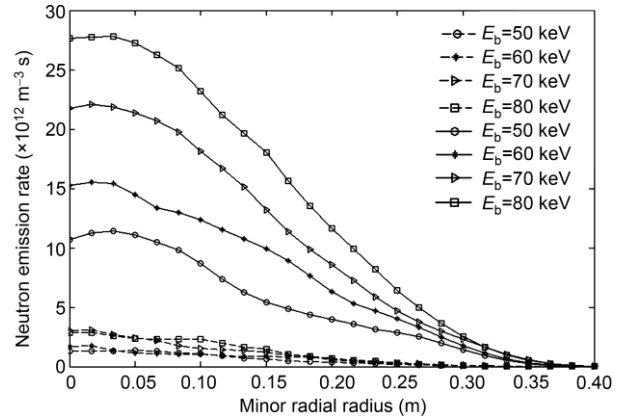


图 11 正向注入的中性束在不同束粒子能量下的中子发射剖面. 其中, 实线表示束-靶反应, 虚线代表了束-束反应

Figure 11 Profiles of the neutron emission rate in Case III with co-current NBIs. Solid lines represent the beam-target reactions, dashed lines represent the beam-beam reactions.

了研究^[46], 发现离轴峰化的驱动电流能够通过离轴 NBI 产生, 并从理论上解释了不同磁场方向以及采用不同离轴 NBI 方案时加热以及电流驱动效果的差异, 给出了在分别考虑加热效果以及电流驱动效果时的最优离轴 NBI 设计方案. 结合理论以及模拟结果, 研究了离轴 NBI 控制锯齿震荡的可行性, 发现离轴 NBI 能够有效改变安全因子剖面, 产生离轴峰化快离子密度分布, 抑制锯齿震荡.

根据 HL-2A 的 NBI 系统的设计, 建立了中性束注入 NUBEAM 模拟模型, 研究了 HL-2A 在不同等离子体放电条件下 NBI 的束能量沉积以及中子发射率. 在 HL-2A 目前的运行条件下, NBI 的束能量沉积可以达到 80%, 具有很好的加热效果, 并且能够有效的提高中子发射率(图 10). 另外, 模拟计算得到的中子发射率时间演化规律能够与实验测量的中子发射率时间演化规律符合, 有效的验证了模型建立以及模拟计算的合理性, 由此可以将数值计算与实验测量结合进行 NBI 注入下的快离子慢化和快离子反常运输机制的研究.

对于 NBI 加热条件下的托卡马克放电实验, 可以选用 Half-Box 模型^[47]对测量的中子能谱进行简单分析. 而基于 Half-Box 模型改进建立的 Modified Half-Box (MHB) 模型计算得到的中子能谱与基于 NUBEAM 模拟得到的全相空间速度分布函数计算的结果更好地符合, 更有利于对中子能谱进行相对细致的分析, 从而为进一步的快离子相关的中子能谱结构

分析打下了基础^[48]. 同时, 在麦克斯韦等离子体和 NBI 加热等离子体条件下, 应用 GENESIS^[49,50] 软件平台进行了不同谱仪视线的中子能谱计算模型的建立与能谱结构的分析(见图 12). 基于中子能谱与快 D

离子的速度分布函数的依赖关系, 提出了利用飞行时间谱仪可以研究的 EAST 等离子体物理课题, 比如快离子慢化, 等离子体旋转, 等离子体 MHD 不稳定性研究. 其中, 等离子体旋转对于托卡马克等离子体

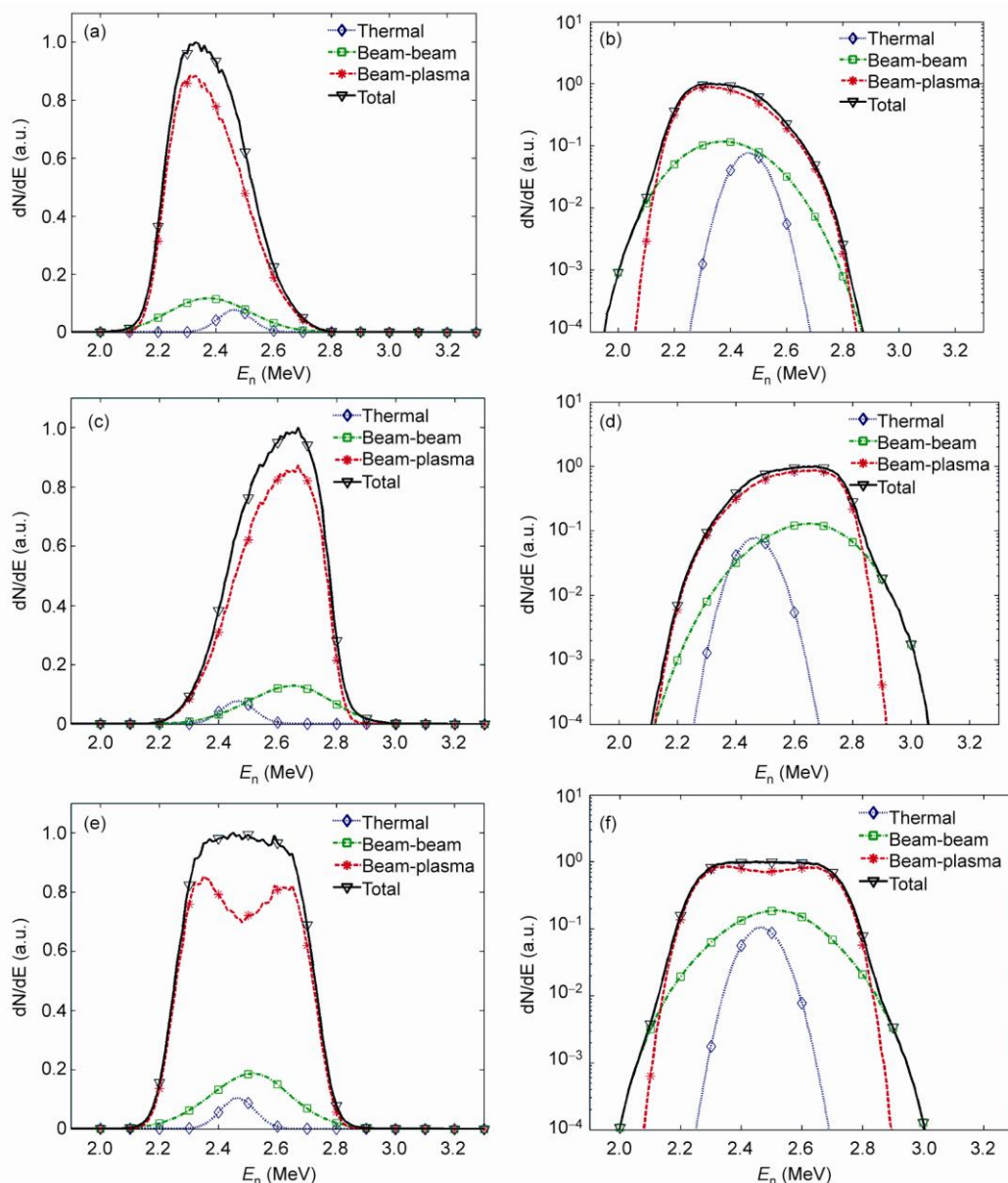


图 12 不同谱仪视线的中子能谱形状以及成分分离

不同谱仪视线(顺电流方向(a)和(b)、逆电流方向(c)和(d), 以及垂直电流方向(e)和(f))在线性坐标(a)、(c)和(e), 和对数坐标(b)、(d)和(f)中的中子能谱形状, 以及总中子能谱(黑色三角形)与三种成分(热核聚变中子(蓝色菱形)、束靶中子(绿色正方形)和束束中子(红色星形))分离; 总中子能谱最高点归为一

Figure 12 Calculated neutron spectra for the case of a quasi-tangential co- (a) and (b), and counter- (c) and (d) LOS ($p=-1$; $\theta_{\text{view}}=40^\circ$). (e) and (f): Neutron spectrum for the case of a radial LOS ($p=-4.4$; $\theta_{\text{view}}=90^\circ$). The spectrum is shown both on the linear (a), (c) and (e), and log (b), (d) and (f) scales. The spectrum includes the thermal (blue diamond), beam-plasma (green square) and beam-beam (red star) components. The sum of the three components (black triangle) is also shown. The peak value of the total component is normalized to unity.

的约束有着十分积极的作用, 特别是等离子体自发转动对于未来的 ITER 聚变反应堆的约束改进具有决定性的意义. 我们使用完全快离子速度分布方法研究了托卡马克等离子体中自发转动的产生机制, 发现湍流雷诺压强可以驱动自发的环向转动, 计算结果能够较好的描述实验结果^[51].

4.2 双环式球形阵列中子飞行时间谱仪的研究

随着 NBI 和 ICRF 等辅助加热能力的提升, 等离子体中燃料快离子的数量和能量都出现了显著提升. 快离子的有效约束是未来聚变反应堆最关注的物理问题, 快离子的输运过程是当前聚变等离子体物理研究中的一个热门议题. 燃料快离子的不同分布将产生结构丰富的聚变中子能谱, 通过中子能谱的高精度测量可以有效开展燃料快离子相关的等离子体物理研究.

双闪烁中子飞行时间谱仪是开展 D-D 聚变 2.45 MeV 中子能谱高分辨测量的最佳谱仪. 为了提高传统的双闪烁飞行时间谱仪的探测效率, 基于球面飞行时间原理, 我们设计了一套新型的双环式球形阵列中子飞行时间谱仪, 并利用 Geant4 软件包^[52]完成了中子输运和闪烁体发光与传输等多项模拟, 在兼顾探测效率和能量分辨率最优原则下设计的谱仪如图 13 所示, 初级闪烁体由 5 层圆形闪烁体组成, 采用双端光电倍增管读出, 次级闪烁体由 40 组梯形闪烁体组成, 每组包含两块尺寸不同的闪烁体, 采用单端光电倍增管读出. 双闪烁中子飞行时间谱仪对于测量 2.45 MeV 中子的能量分辨率设计值为 5.6%, 探测

效率 1.4%. 为了更好开展快离子相关中子能谱测量, 本谱仪首次引入了全数字化的测量系统, 并开发了双环式动态能选算法, 将快离子相关中子能区的信噪比相比国际最新谱仪提高了一个量级, 模拟的 2.45 MeV 中子飞行时间谱如图 14. 目前已经在中子实验室中建立了该谱仪的单路原型谱仪^[53], 测量了加速器打靶产生的 2.45 MeV 聚变中子模拟能谱, 最优能量分辨率达到了 4.2%, 并成功测量了 Am-Be 中子源的中子能谱, 为全谱仪的建立奠定了基础.

结合 EAST 和 HL-2A 托卡马克的等离子体参数和物理诊断需求, 我们完成了磁约束聚变中子能谱的理论建模和数据分析的平台建设. 分析了在麦克斯韦等离子体、NBI 加热和 ICRF 加热等多种条件下的 D 离子速度分布函数, 研究不同条件下的聚变中子能谱结构特征和对应的中子飞行时间谱结构特征, 建立了快 D 离子密度的快速分析算法. 图 15 分析了 EAST 托卡马克上在 A 窗口 NBI 两条束流 80 keV 注入 2 MW 加热条件下的中子能谱, 图 15(a)是 NUBEAM 计算得到的快 D 离子速度分布, 由此通过模拟计算得到聚变中子发射能谱(图 15(b))和谱仪的中子飞行时间谱(图 15(c)), 在 EAST 托卡马克 NBI 加热下, 快 D 离子相关的中子是聚变中子的最主要成分, 利用中子飞行时间谱的时间演化测量可以非常有效地分析快 D 离子的输运和约束等.

5 结论

面向 ITER 聚变堆对中子诊断技术发展的最新需求, 针对 EAST 和 HL-2A 托卡马克装置聚变等离子体复杂中子场的特点, 北京大学课题组开展了基于有机闪烁体谱仪和大型双闪烁中子飞行时间谱仪的中子发射能谱诊断研究. 在设计和开发了基于多种全数字化有机闪烁体中子谱仪的基础上, 进行了 EAST 和 HL-2A 放电实验中子产额随时间演化规律的研究, 开展了 HL-2A 装置上 NBI 辅助加热效果的评估和聚变等离子体锯齿震荡的中子通量诊断. 使用茈晶晶体中子谱仪测量实现了 EAST 放电的芯部聚变离子温度诊断, 首次将托卡马克装置实验中子能谱直接诊断芯部燃料离子温度的下限推到 1 keV 以下. 在 EAST 装置上建设的双环式球形阵列中子飞行时间谱仪将为托卡马克装置辅助加热和快离子相关的 ITER 物理研究打下坚实的基础.

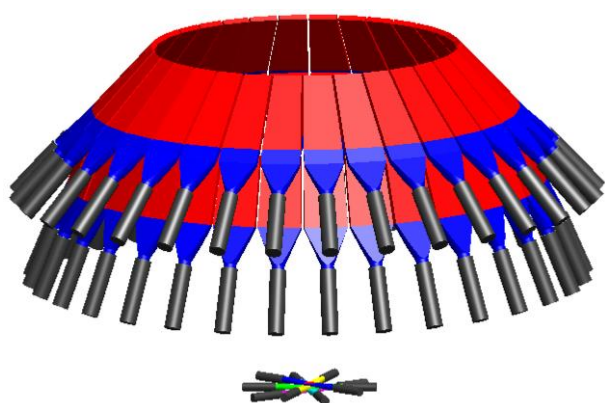


图 13 (网络版彩图) 新型双环式球形阵列中子飞行时间谱仪模型图

Figure 13 (Color online) Three-dimensional drawings of new generation double ring neutron time-of-flight array spectrometer.

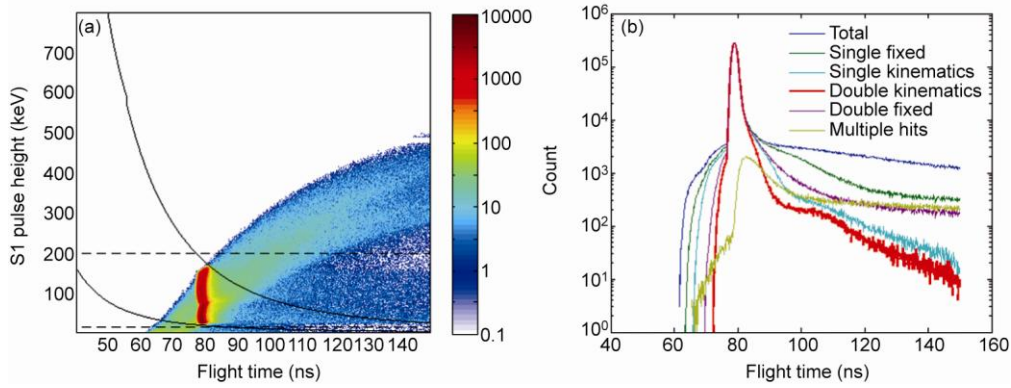


图 14 双环式飞行时间谱仪的飞行时间-初级脉冲高度二维谱(a)和不同能选算法下的中子飞行时间谱(b)

Figure 14 Two-dimensional plot of the 2.45 MeV neutron flight time and the recoil proton pulse height in S1 scintillators (a), and the 2.45 MeV neutron flight time spectra with different energy selection ranges (b).

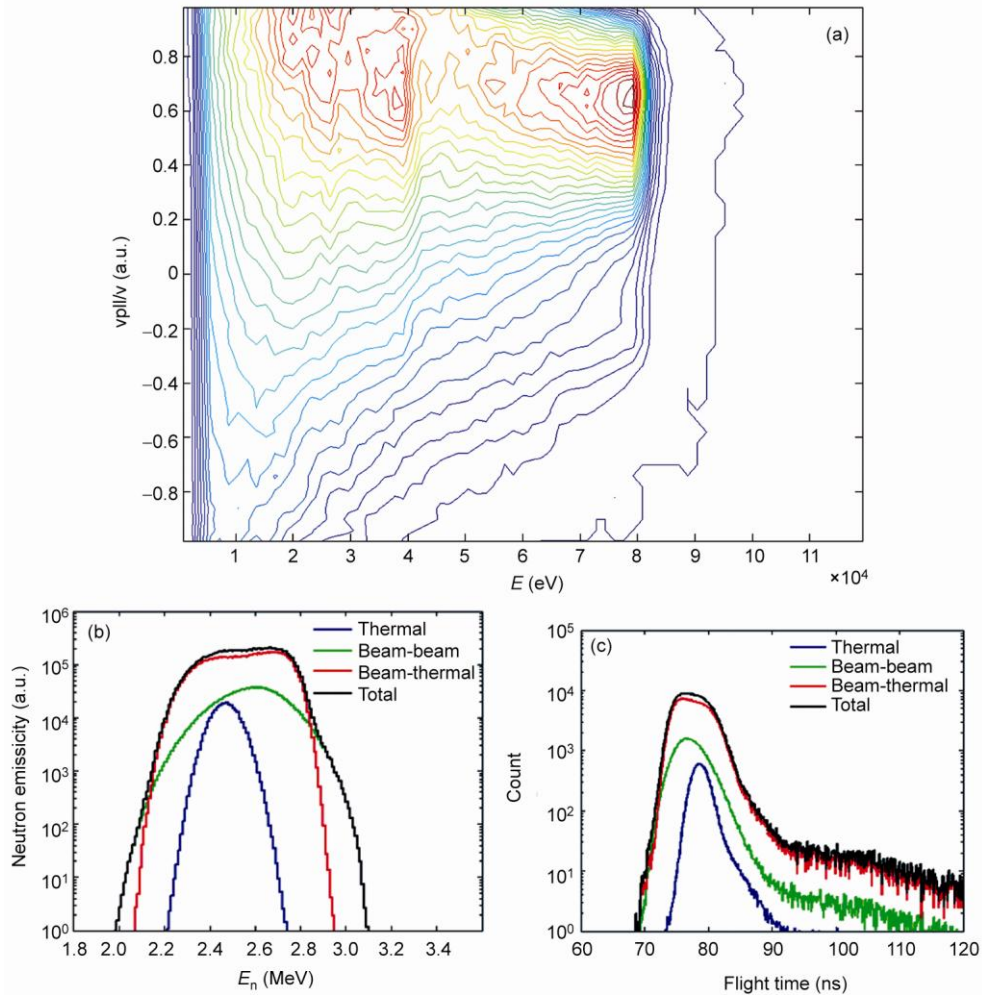


图 15 EAST 托卡马克上在 A 窗口 NBI 两条束流线 80 keV 注入 2 MW 加热条件下的快离子速度分布(a), 中子能谱(b)和飞行时间谱(c)

Figure 15 Calculated fast ion energy distribution (a), neutron energy spectrum (b), and time of flight spectrum (c) when heated by two beamlines of NBI system in EAST on port A, with a beam power of 2 MW and beam energy of 80 keV.

随着 ITER 聚变反应堆建设的不断推进, EAST 与 HL-2A 等先进托卡马克装置等离子体参数和辅助加热功率的迅速提高, 聚变等离子体的中子产额不断

增长, 先进的高能量分辨的中子发射谱仪诊断研究必将为 ITER 物理研究和先进聚变反应堆的研究、运行与评估作出重要贡献.

参考文献

- 1 Shimada M, Campbell D J, Mukhovatov V, et al. Progress in the ITER physics basis—Chapter 1: Overview and summary. Nucl Fusion, 2007, 47: S1–S17
- 2 Keilhacker M, Gibson A, Gormezano C, et al. High fusion performance from deuterium-tritium plasmas in JET. Nucl Fusion, 1999, 39: 209–234
- 3 Oyama N. Overview of JT-60U results towards the establishment of advanced tokamak operation. Nucl Fusion, 2009, 49: 10407
- 4 Strait E J. DIII-D research in support of ITER. Nucl Fusion, 2009, 49: 104008
- 5 Wan B N. Recent experiments in the EAST and HT-7 superconducting tokamaks. Nucl Fusion, 2009, 49: 10401
- 6 Wu S T. An overview of the EAST project. Fusion Eng Des, 2007, 82: 463–471
- 7 Duan X R, Ding X T, Dong X T, et al. Overview of experimental results on HL-2A. Nucl Fusion, 2009, 49: 104012
- 8 Meyer H, Akers R J, Alladio F, et al. Overview of physics results from MAST. Nucl Fusion, 2009, 49: 104017
- 9 Jarvis O N. Neutron measurement techniques for tokamak plasmas. Plasma Phys Control Fusion, 1994, 36: 209–244
- 10 Sasao M, Krasilnikov A V, Nishitani T, et al. Overview of neutron and confined/escaping alpha diagnostics planned for ITER. Plasma Phys Control Fusion, 2004, 46: S107–S118
- 11 Neilson G H, Federici G, Li J, et al. Summary of the international workshop on magnetic fusion energy (MFE) roadmapping in the ITER era. Nucl Fusion, 2012, 52: 047001–047011
- 12 Wolle B. Tokamak plasma diagnostics based on measured neutron signals. Phys Rep-Rev Sec Phys Lett, 1999, 312: 1–86
- 13 Yang J, Yang Q, Xiao G, et al. Fusion neutron flux monitor for ITER. Plasma Sci Technol, 2008, 10: 141–147
- 14 Li X L, Wan B N, Zhong G Q, et al. Neutron flux in lower hybrid current drive plasmas on EAST. Plasma Phys Control Fusion, 2010, 52: 105006
- 15 Zhong G, Hu L, Li X, et al. Measurement of neutron flux at the initial phase of discharge in EAST. Fusion Eng Des, 2011, 13: 162–166
- 16 Jarvis O N, Adams J M, Marcus F B, et al. Neutron profile measurements in the Joint European Torus. Fusion Eng Des, 1997, 34–35: 59–66
- 17 Giacomelli L, Hjalmarsson A, Sjostrand H, et al. Advanced neutron diagnostics for JET and ITER fusion experiments. Nucl Fusion, 2005, 45: 1191–1201
- 18 Orlinskij D V, Magyar G. Plasma Diagnostics on large Tokamaks. Nucl Fusion, 1988, 28: 611–697
- 19 Coatley A E, Sugie T, Vayakis G, et al. Technological challenges of ITER diagnostics. Fusion Eng Des, 2005, 74: 109–119
- 20 Sasao M, Krasilnikov A V, Karschuck Yu A, et al. Status of ITER neutron diagnostic development. In: Proceedings of 20th IAEA Fusion Energy Conference. Vilamoura, Portugal: IAEA, 2004
- 21 Jarvis O J. Neutron spectrometer at JET. Rev Sci Instrum, 1986, 57: 1717–1722
- 22 Knoll G F. Radiation Detection and Measurement. 3rd ed. New York: Wiley, 2000
- 23 Alexander T K, Goulding F S. An amplitude-insensitive system that distinguishes pulses of different shapes. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 1961, 13: 244–246
- 24 Luo X L, Liu G F, Yang J, et al. Development of the discrimination of neutrons and gamma rays in liquid scintillators (in Chinese). Nucl Electron Detection Tech, 2010, 30: 802–806 [罗晓亮, 刘国福, 杨俊, 等. 液体闪烁体探测器 n/γ 甄别方法的现状与发展. 核电子学与探测技术, 2010, 30: 802–806]
- 25 Esposito B, Kaschuck Y, Rizzo A, et al. Digital pulse shape discrimination in organic scintillators for fusion applications. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2004, 518: 626–628
- 26 Esposito B, Riva M, Marocco D, et al. A digital acquisition and elaboration system for nuclear fast pulse detection. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2007, 572: 355–357
- 27 Nakhostin M, Walker P M. Application of digital zero-crossing technique for neutron-gamma discrimination in liquid organic scintillation detectors. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2010, 621: 498–501
- 28 Yousefi S, Lucchese L, Aspinall M D. Digital discrimination of neutrons and gamma-rays in liquid scintillators using wavelets. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2009, 598: 551–555
- 29 Shippen D I, Joyce M J, Aspinall M D. A Wavelet packet transform inspired method of neutron-gamma discrimination. IEEE Trans Nucl Sci, 2010, 57: 2617–2624
- 30 Ronchi E, Soderstron P A, Nyberg J, et al. An artificial neural network based neutron-gamma discrimination and pile-up rejection framework for the BC-501 liquid scintillation detector. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2009, 610: 534–539
- 31 Huang L, Chen L, Chen H, et al. Study of digital pulse shape discrimination methods in stilbene detectors (in Chinese). Nucl Electron

- Detection Tech, 2012, 32: 993–998 [黄林, 陈黎, 陈华, 等. 基于数字化技术的苾晶体探测器脉冲形状甄别方法研究. 核电子学与探测技术, 2012, 32: 993–998]
- 32 Zhang X, Yuan X, Xie X F, et al. A digital delay-line-shaping methods for pulse shape discrimination in stilbene neutron detector and application to fusion neutron measurement at HL-2A tokamak. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2012, 687: 7–13
 - 33 Xie X, Zhang X, Yuan X, et al. Digital discrimination of neutrons and gamma-rays in organic scintillation detectors using moment analysis. Rev Sci Instrumen, 2012, 83: 0935071–0935076
 - 34 Dietze G, Klein H. Gamma-calibration of NE 213 scintillation counters. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 1982, 193: 549–556
 - 35 Xie X, Yuan X, Zhang X, et al. Calibration and unfolding of the pulse height spectra of liquid scintillator-based neutron detectors using photon sources. Plasma Sci Tech, 2012, 14: 553–557
 - 36 Yuan X, Zhang X, Xie X, et al. Neutron energy spectrum measurements with a compact liquid scintillation detector on EAST. J Instrumentation, 2013, 8: P070161–P0701615
 - 37 Lu J, Quan S. Beam pulsing system for the 4.5 MV electrostatic accelerator. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 1994, 346: 31–35
 - 38 Dietze G, Klein H. Programs NRESP4 and NEFF4. PTB Laboratory Report, PTB-ND-22, Braunschweig, Germany, 1982
 - 39 Patronis N, Kokkoris M, Giansoudi N, et al. Aspects of GEANT4 Monte-Carlo calculations of the BC501A neutron detector. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2007, 578: 351–359
 - 40 Xie X, Zhang X, Yuan X, et al. Investigation of the influence of an inner gas bubble on the response of a liquid scintillation detector to γ -rays and neutrons. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2013, 721: 10–16
 - 41 Zhang X, Yuan X, Xie X, et al. A compact stilbene crystal neutron spectrometer for EAST D-D plasma neutron diagnostics. Rev Sci Instrum, 2013, 84: 033506
 - 42 Yuan X, Zhang X, Xie X, et al. First neutron spectrometry measurement at the HL-2A tokamak. Chin Phys C, 2013, doi: 10.1088/1674-1137/37/12/126001
 - 43 Hu C, NBI Team. Conceptual design of neutral beam injection system for EAST. Plasma Sci Tech, 2012, 14: 567–572
 - 44 Ni Q, Fan T, Zhang X, et al. Predictive calculation of neutral beam heating plasmas in EAST tokamak by NUBEAM code for certain parameter ranges. Plasma Sci Tech, 2010, 12: 661–667
 - 45 Pankina A, McCuneb D, Andreb R, et al. The tokamak Monte Carlo fast ion module NUBEAM in the National Transport Code Collaboration library. Comput Phys Commum, 2004, 159: 157–184
 - 46 Chen Z, Fan F, Zhang C, et al. Simulation of EAST off-axis neutral beam heating and current drive. Fusion Eng Des, 2012, 87: 325–331
 - 47 Henriksson H. Neutron Spectroscopy Studies of Heating Effects in Fusion Plasmas. Dissertation for the Doctoral Degree. Uppsala: Uppsala University, 2003
 - 48 Chen Z, Nocente M, Tardocchi M, et al. Simulation of neutron emission spectra from neutral beamheated plasmas in the EAST tokamak. Nucl Fusion, 2013, 53: 063023
 - 49 Ballabio L. Calculation and measurement of the neutron emission spectrum due to thermonuclear and higher-order reactions in tokamak plasmas. Dissertation for the Doctoral Degree. Uppsala: Uppsala University, 2003
 - 50 Tardocchi M, Nocente M, Proverbio I, et al. Spectral broadening of characteristic γ -ray emission peaks from $12\text{C}(3\text{He}, p\gamma)^{14}\text{N}$ reactions in fusion plasma. Phys Rev Lett, 2012, 107: 205002
 - 51 Ni Q, Wang X, Zhang C, et al. A full-f calculation of spontaneous toroidal rotation in H-mode plasma. Plasma Phys Control Fusion, 2012, 53: 085027
 - 52 Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Geant4—A simulation toolkit. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2003, 506: 250–303
 - 53 Zhang X, Yuan X, Xie X, et al. The design and optimization of a neutron time-of-flight spectrometer with double scintillators for neutron diagnostics on EAST. Plasma Sci Tech, 2012, 14: 675–682

Study of advanced neutron emission spectrometry diagnostics for tokamak fusion experiments

FAN TieShuan^{1*}, YUAN Xi¹, ZHANG Xing¹, XIE XuFei¹, CHEN ZhongJing¹,
PENG XingYu¹, DU TengFei¹, HU ZhiMeng¹, CUI ZhiQiang¹, CHEN JinXiang¹,
LI XiangQing¹, ZHANG GuoHui¹ & WANG XiaoGang²

¹ School of Physics, Institute of Heavy Ion Physics and Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;

² School of Physics, Institute of Plasma Physics and Fusion, Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

The research progress of fusion neutron emission spectrometers in the EAST and HL-2A tokamaks is reviewed. Considering the requirements for plasma physics research and neutron diagnostic development for the ITER device, two digital liquid scintillation spectrometers and a stilbene crystal spectrometer were set up for the discharges with the low neutron yield (10^9 – 10^{11} s⁻¹) on EAST and HL-2A. We present some neutron spectrometry diagnostic results, such as the time traces of fusion neutron count rates during the EAST discharges, the evaluation of the heating effect in HL-2A neutral beam injection experiments and the neutron diagnostics of sawtooth instability in EAST plasmas. The ion temperature diagnostics of the core plasma were made by using the stilbene neutron spectrometer and the liquid scintillation neutron spectrometer in EAST, and the ion temperature measurement with the neutron emission spectrometer for the plasma with low temperature, which was less than 1 keV, was successful for the first time. A double ring neutron time-of-flight array spectrometer was designed and constructed on EAST for the fast ion physics and tokamak auxiliary heating research.

neutron spectrometer, plasma diagnostic, fusion, tokamak

PACS: 52.70.-m, 52.55.Fa, 29.30.Hs

doi: 10.1360/132013-365