

磁约束聚变装置中子能谱诊断研究的新进展

樊铁栓¹, 张一镆¹, 葛理健¹, 孙嘉琪¹, 胡志猛^{1,3}, 杨丹可¹, 廖龙勇¹, 彭星宇^{1,7}, 陈忠靖^{1,7}, 张兴^{1,7}, 袁熙^{1,7}, 谢旭飞^{1,7}, 李湘庆¹, 陈金象¹, 钟国强², 胡立群², 万宝年², 袁国梁³, 张轶泼³, 杨进蔚³, 杨青巍³, G. Gorini^{4,5}, M. Nocente^{4,5}, M. Tardocchi⁵, T. Nishitani⁶, K. Ogawa⁶, M. Isobe⁶

¹北京大学物理学院, 重离子物理研究所, 北京 100871

²中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

³核工业西南物理研究院, 成都 610041

⁴Dipartimento di Fisica ‘G. Occhialini’, Università degli Studi di Milano-Bicocca, 20126 Italy

⁵Istituto di Fisica del Plasma ‘P. Caldirola’, Consiglio Nazionale delle Ricerche, 20125 Italy

⁶National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-cho, Toki 509-5292, Japan

⁷中国工程物理研究院, 绵阳 621900

Email: tsfan@pku.edu.cn

摘要: 中子发射是聚变反应发生的主要标记和人类聚变堆研究研发进程的直接度量, 聚变中子发射测量对于大型聚变装置(如 ITER、CFETR 和 DEMO 等)的输出功率评估、燃烧等离子体物理研究和未来聚变堆的运行及控制具有不可替代的重要作用。

根据我国中型托卡马克装置(EAST 和 HL-2A)氘氦等离子体聚变中子场的特点和未来聚变堆对中子能谱诊断技术发展的需求, 我们开展了聚变中子能谱测量技术及其快离子物理诊断的研究工作. 实现了基于紧凑型全数字化有机闪烁中子谱仪的等离子体诊断, 将使用中子谱仪直接诊断芯部等离子体离子温度的极限下推到 1keV 以下; 发展了基于金刚石热中子探测器的 Bonner 球谱仪, 首次实现了聚变装置中子场从热中子到 20MeV 中子的宽谱强场中子能谱测量。基于双闪烁法飞行时间球原理, 在 EAST 上研究建成了 80 路阵列式中子飞行时间谱仪 TOFED (Time Of Flight Enhanced Diagnostics, 诊断性能强化型中子飞行时间谱仪)。该谱仪首次提出和实现了基于双球形阵列的设计和全数字化数据采集系统的双环动态能选算法, 将快离子相关中子能区测量的信噪比提高了一个多数量级, 谱仪的能量分辨约为 6.6%, 探测效率为 1.8%, 为在磁约束聚变装置上开展快氦离子物理诊断和辅助加热效果评估打下了基础。我们也将报告在 EAST 实验中基于 TOFED 谱仪和紧凑型谱中子仪联合诊断快离子速度分布的新结果。

TOFED 中子谱仪在 MeV 能区快离子诊断中具有独特的优势, 日本国立聚变科学研究所 NIFS 的 LHD 装置和核工业西南物理研究院的 HL-2M 装置已经开始建设 TOFED 谱仪以开展聚变等离子体物理研究。我们将报告 LHD 装置上 TOFED 谱仪的优化设计, 对于能量为 2.45 MeV 和 14 MeV 中子, TOFED 飞行时间能谱仪的能量分辨率分别达到 6.6%和 9.0%, 面积探测效率分别达到 0.2 cm² 和 0.04 cm²。本报告将要讨论在 LHD 上使用 TOFED 飞行时间能谱仪同时测量 DD 中子和 DT 中子的可行性。最后, 本报告将给出 CFETR 和 ITER 聚变堆中子能谱诊断技术的需求和发展动向。

关键词: 快离子速度分布, 聚变飞行时间谱仪, 有机闪烁体谱仪, 磁约束聚变堆

参考文献

- 【1】 X. Zhang *et al*, Diagnosing NB plasmas on the EAST tokamak with new time-of-flight neutron spectrometer, *Nucl. Fusion* 2014, 54, 104008

- 【2】 X. Peng *et al*, Measurement and simulation of the response function of time of flight enhanced diagnostics neutron spectrometer for beam ion studies at EAST tokamak, *Rev. Sci. Instrum.* 2016, 87, 11D836
- 【3】 Z. Chen *et al*, Simulation of neutron emission spectra from neutral beam-heated plasmas in the EAST tokamak, *Nucl. Fusion* 2013, 53, 063023
- 【4】 X. Peng *et al*, Application of a BC501A Liquid Scintillation Detector with a Gain Stabilization System on the EAST Tokamak, *Plasma Sci. Technol.* 2016, 18, 23
- 【5】 L. Ge *et al*, Neutron emission spectroscopy measurements with a compact liquid scintillation detector for NBI-heated plasma at EAST, *Plasma Phys. Control. Fusion* 2018, 60, 095004
- 【6】 Z. Hu *et al*, An active Bonner sphere spectrometer capable of intense neutron field measurement, *Appl. Phys. Lett.* 2019, 114 233502

基金项目：国家磁约束聚变能专项(批准号：2013GB106004, 2012GB101003, 2009GB107001, 2008CB717803)、国家自然科学基金重大项目(批准号：11790324, 91226102)、国家重点研发计划(编号：2016YY0200804, 2017YFF0206205)等