

TOKAMAK 光谱诊断与我们的产品

——从中子, X-ray 到可见光,从稳态测量到超高速时间分辨测试

托卡马克 (Tokamak) 是一种利用磁约束来实现受控核聚变的环形容器,最初是由苏联库尔恰托夫研究所的阿齐莫维奇等人在 20 世纪 50 年代发明的。托卡马克的中央是一个环形的真空室,外面缠绕着线圈,在通电的时候会产生巨大的螺旋型磁场,将真空室中的等离子体加热到很高的温度,以达到发生核聚变反应所需的条件。

托卡马克装置中等离子体温度可以达到几千万甚至上亿摄氏度,从 X 射线到微波波段均有很强的辐射。聚变等离子体的辐射探测,特别是从 X 射线到可见光波段的发射光谱诊断,是发展比较早的诊断项目之一。从电子在跃迁前后的状态来看,聚变等离子体发射的光谱可分类为:

自由态→自由态: 韧致辐射、回旋辐射

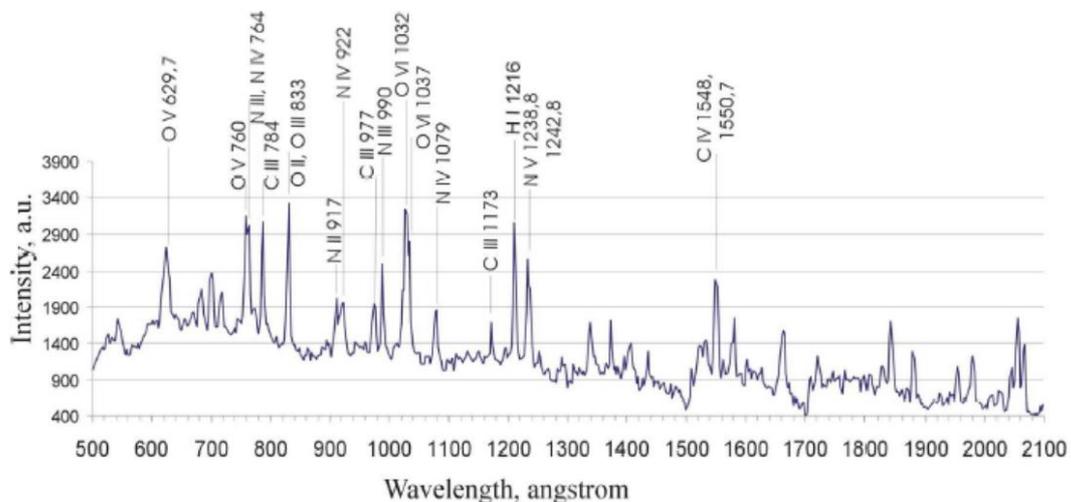
束缚态→束缚态: 线辐射

自由态→束缚态: 复合辐射、双电子辐射

其中韧致辐射、复合辐射和双电子辐射是连续谱,回旋辐射和线辐射是线状谱。复合辐射和双电子辐射有时合称复合辐射。等离子体辐射的线状谱线主要来自杂质离子。在小型装置上,等离子体线辐射主要是低 Z 的轻杂质,而在大中型装置上,线辐射则主要来自未完全电离的高 Z 金属杂质离子。

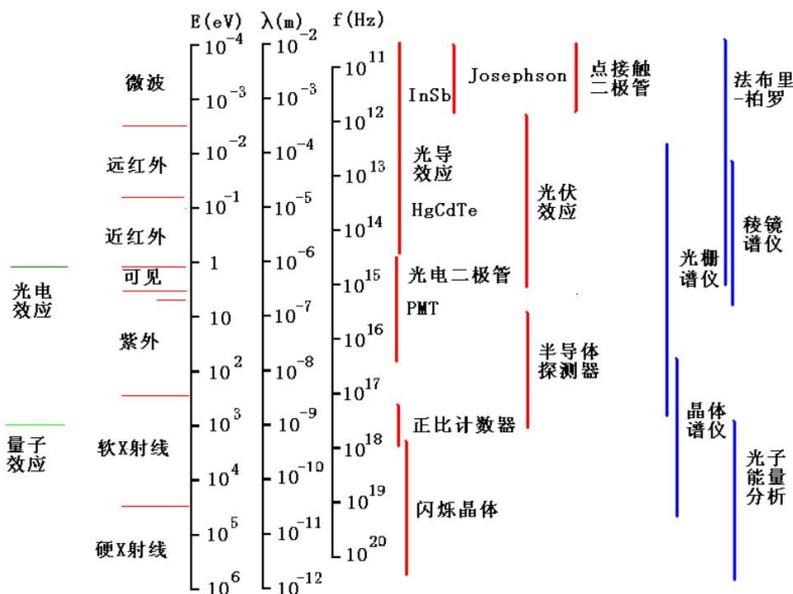
区域	辐射波段	H,He	低 Z 杂质	高 Z 杂质	主要诊断
边缘区	可见,UV	部分电离	部分电离	部分电离	τ , p , Z_{eff}
中间区	UV,X-ray	完全电离	部分剥离	部分剥离	杂质运输
核心区	X-ray	完全电离	完全剥离	部分 / 完全剥离	X 线能谱

在等离子体参数较低的小型托卡马克装置上,等离子体的辐射主要位于真空紫外和可见光波段。下图为捷克一个小托卡马克装置 CASTOR 中的等离子体发射光谱,主要在真空紫外和可见光波段。其线状谱主要是 O, N 和 C 的杂质谱线。从等离子体发射光谱图上可以较为容易地辨别等离子体中杂质的种类和电离状态。以 C 为例,谱线上标志的光谱符号和相应的电离态的关系如下表所示:



电离次数	化学符号	光谱符号	光谱类型
0	C	CI	原子
1	C+	CII	类 B 离子
2	C2+或 C++	CIII	类 Be 离子
3	C3+	CIV	类 Li 离子
4	C4+	CV	类 He 离子
5	C5+	CVI	类 H 离子
6	C6+		(C 核)

而在大中型装置上，等离子体辐射逐渐向短波移动，主要探测区域为紫外、真空紫外和 X 射线。在大中型装置上，芯部区域的 C、N 和 O 等轻杂质离子的外层电子被完全剥离。而高 Z 金属杂质离子由于电离能较高，并未完全电离，仍可以在较短波段（极紫外和 X 射线波段）观测到其辐射的线状谱线。不同区域的光谱行为和主要探测项目也有所不同。这些波段的范围、分光方法、探测元件可见下图：



国内的合肥，武汉，成都等地的科研单位也运行着多个托卡马克装置。坐落在合肥的中科院等离子体物理研究所的 EAST 装置是目前国内最大的一个托卡马克，其多项等离子体放电指标均处于世界先进水平。在国际上，由中美欧日韩印俄七方共同参与的超大型国际合作项目国际热核实验堆（ITER）计划已经进入工程建设阶段，目前进展顺利。

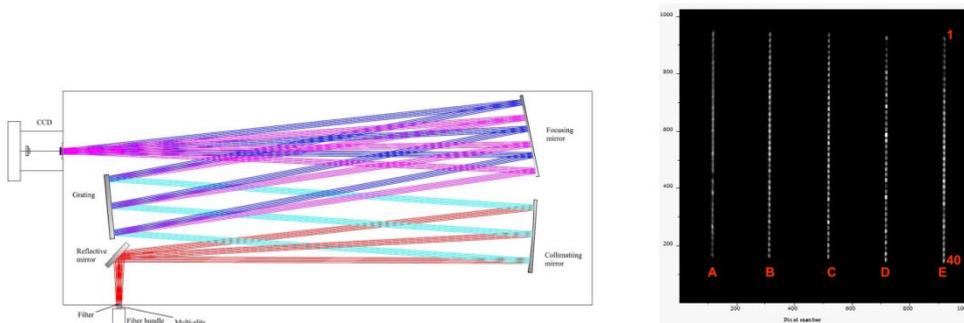
我们的相关仪器设备在托卡马克等离子体光谱诊断领域有着大量的应用，目前已经应用我们产品的的的诊断系统包含：

- ✧ 电荷符合交换光谱（CXRS）诊断
- ✧ 汤姆逊（Thomson）散射
- ✧ 运动斯塔克（Stark）效应诊断

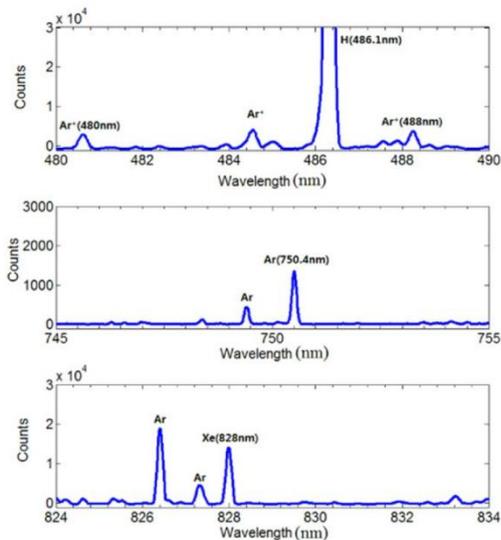
- ◇ 中性束注入主动光谱诊断
- ◇ 磁流体动力学（MHD）真空紫外成像诊断
- ◇ 用于测量边界旋转的边界被动光谱诊断系统

我们可以用于托卡马克等离子体光谱诊断的设备包括：

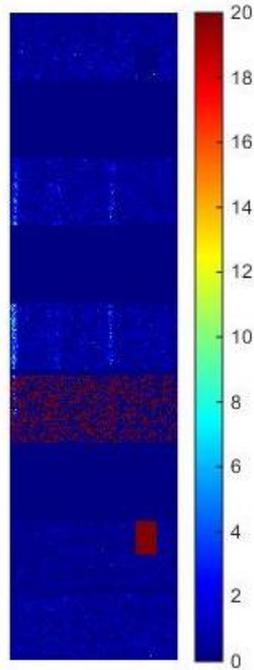
- ◇ 传统 CT 式光谱仪—用于可见与 NIR 波段以及多道成像光谱
- ◇ $\geq 1\text{m}$ 长焦距高分辨光谱仪—用于高分辨与多道成像光谱
- ◇ 真空紫外光谱仪
- ◇ ICCD—用于时间分辨光谱与影像
- ◇ iSCMOS—快速读出 ICCD
- ◇ EMCCD—微弱信号探测增强型 CCD
- ◇ High Speed ICCD—高速 ICCD，读出速度可以达到 10000f/s 以上，并且具备时间分辨能力
- ◇ MCP 粒子探测器—可以用于真空粒子探测
- ◇ 基于中阶梯的 LIBS 探测系统
- ◇ 传统 X-ray CCD 探测器
- ◇ 单光子计数 X-ray 探测器
- ◇ 条纹相机—用于超快过程研究
- ◇ 高速相机—用于高速现象研究



用于测量边界旋转的边界被动光谱诊断与获得的多道光谱图像（100 道）



中性注入光谱诊断测量得到的可见光波段光谱



基于大面积 PILUTUS 探测器的 X 射线弯晶谱仪测量到的原始谱线图像

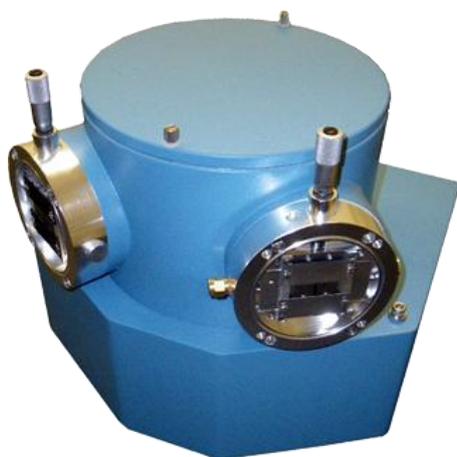
不同的诊断可以测量不同的等离子体参数。按照诊断种类不同, 我们有不同推荐使用的设备:

测量参数	诊断系统名	测量区域	推荐设备
杂质离子温度	X 射线弯晶谱仪 电荷符合交换光谱 边界被动光谱诊断	芯部 边界和芯部 边界	EMCCD ≥1m 长焦距高分辨光谱仪
主离子温度	中子诊断系统 电荷符合交换光谱 边界被动光谱诊断	芯部 边界和芯部 边界	中子成像探测器 EMCCD ≥1m 长焦距高分辨光谱仪
电子温度	汤姆逊散射诊断 电子回旋辐射诊断 X 射线弯晶谱仪 边界朗缪尔探针	边界和芯部 芯部 芯部 刮削层区	iSCMOS / 超高速 ICCD
电子密度	HCN 激光反射仪 汤姆逊散射诊断 二氧化碳散射 微波反射仪 边界朗缪尔探针	边界和芯部 边界和芯部 边界 边界	像增强器 & ICCD & 光谱仪等
环向杂质旋转速度	X 射线弯晶谱仪 电荷符合交换光谱 边界被动光谱诊断	芯部 边界和芯部 边界	EMCCD ≥1m 长焦距高分辨光谱

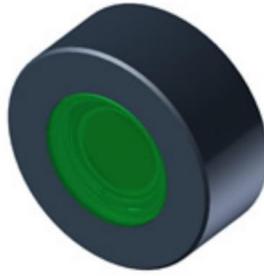
			仪 EMCCD
环向主离子旋转速度	X 射线弯晶谱仪 电荷符合交换光谱 边界磁探针	边界 边界和芯部 安全因子 $q=1$ 词 磁面	PILATUS 探测器 EMCCD
极向杂质旋转速度	边界被动光谱诊断 电荷符合交换光谱	边界 边界和芯部	EMCCD $\geq 1\text{m}$ 长焦距高分辨光谱 仪 EMCCD
杂质密度	边界被动光谱诊断 电荷符合交换光谱 X 射线弯晶谱仪 极紫外真空紫外谱仪	边界 边界和芯部 芯部 芯部	EMCCD $\geq 1\text{m}$ 长焦距高分辨光谱 仪 EMCCD 真空紫外光谱仪系统



美国 McPherson 长焦距光谱仪



美国 McPherson 公司真空紫外光谱仪



英国 Photek 公司像增强器与 MCP 真空成像探测器



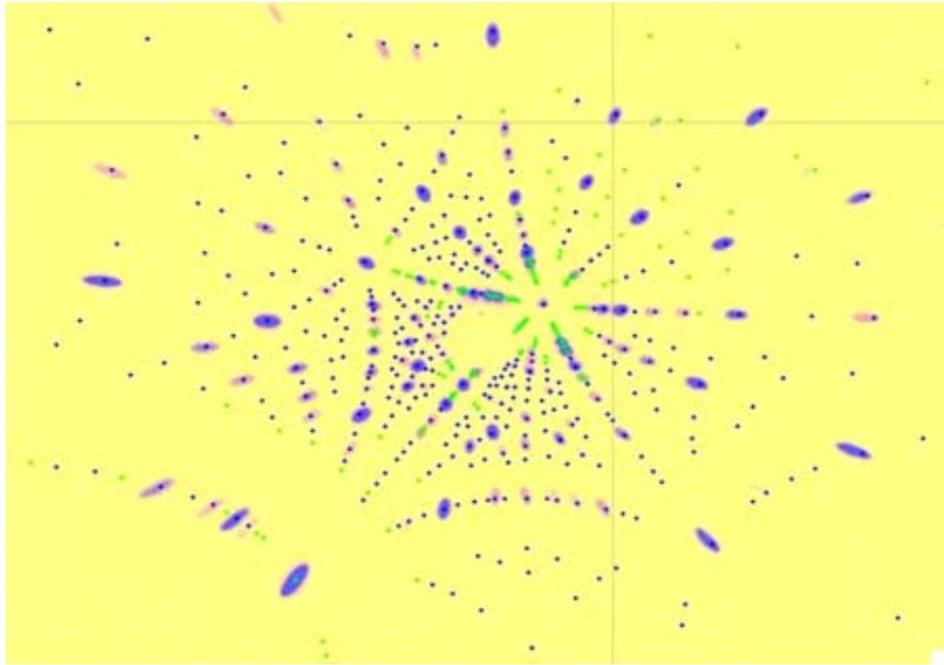
Dectris-PILATUS 系列单光子 X 射线探测器



快速读出 ICCD 与超高速读出 ICCD（搭配 Phantom 公司高速读出探测器）



Andor 公司传统 CT 式光谱仪与 EMCCD



基于 Photonic Science 公司中子成像 ICCD 拍摄到的中子成像实验图
CYCLOPS, A proposed high flux CCD neutron diffractometer, Physica B Condensed Matter
385:1052-1054 2005