

基于Z箍缩装置的实验室天体物理研究*

仝博伟 仲佳勇[†]

(北京师范大学天文系 北京 100875)

2018-01-15收到

[†] email: jyzhong@bnu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20181006

Recent advances in laboratory astrophysics based on a Z-pinch device

TONG Bo-Wei ZHONG Jia-Yong[†]

(Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

摘要 大型高功率脉冲装置广泛应用于高能量密度物理的实验室中,随着诊断技术和流体力学模拟技术水平的提高,基于此类装置,实验室天体物理方向取得一些新的重要进展,文章主要介绍帝国理工大学Z箍缩结构的MAGPIE脉冲功率装置上开展的关于磁重联和喷流的实验进展,在磁重联实验中,发现重联电流片中电子温度和离子温度远高于入流等离子体的温度,必然有其他效应导致电子和离子的异常高温;喷流实验中观察到弓形激波和锥形激波的产生。最后对Z箍缩装置实验室天体物理学的未来发展做一些展望。

关键词 实验室天体物理, 高功率脉冲装置, 等离子体, 磁重联, 喷流

Abstract High pulsed power facilities have been widely used in laboratory astrophysics, and with the development of diagnostics and fluid mechanics simulation technology, important advances have been made in this field. We describe here the magnetic reconnection and jet flow on the MAGPIE pulse power facility of Imperial College. In the magnetic reconnection experiment, it is found that the temperature of the electrons and ions in the reconnection layer is much higher than what would be expected from the temperature of the incoming plasma, so there must be other effects that lead to this abnormally high temperature; in jet experiments it is observed that bow shocks and cone shocks are generated. This article presents an overview of the above topics, as well as some perspective on future laboratory astrophysics research.

Keywords laboratory astrophysics, high pulsed power facility, plasma, magnetic reconnection, jet

1 引言

高能量密度物理的主要研究对象是压强大于 10^6 大气压的极端条件下的连续介质或者粒子体系,在高压、高温、高速碰撞、高强度辐射、强电(磁)场诱导等高功率加载条件下,物质单位体

积内聚集的能量或者粒子的平均动能通过沉积、聚积而得到急剧提高,超过分子和原子之间的内能,物质成为电离介质,即等离子体状态。高能量密度物理是核物理实验室模拟、强冲击动力学、超高压物态方程、激光强场物理和实验室天体物理等学科的基础,其基本理论框架是连续介质模型的流体动力学原理。传统的天体物理研究方法包括天体实测和理论模拟,然而天文观测和

* 国家自然科学基金(批准号:11622323)、科学挑战专题(批准号:JCKY2016212A505)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

理论模拟均有一定的局限性, 高能量密度等离子体在天体物理和激光等离子体物理领域存在许多相似之处, 因此利用实验室激光模拟天体物理现象成为可能, 即在地面实验室条件下对极端天体物理现象进行重现和模拟。高能量密度物理实验造就了实验室天体物理这一分支, 在过去的30年, 流体动力学的发展和能量密度实验设施的广泛应用极大地促进了实验室天体物理的发展。流体动力学标度变换关系可以将实验室和天体物理中的物理过程联系起来, 针对某一个具体问题, 忽略非必要因素, 建立相似的理论模型, 将等离子体的密度、压强、速度、尺度、时间等参数按照一定的变换关系建立联系, 用这些标度变换。可以通过实验室中小尺度、短时标的实验研究, 来模拟大尺度、长时标的天体物理过程。

20世纪末期, 为解决能源危机, 基于惯性约束聚变物理原理的研究日益加强, 同一时期, 金属丝阵Z箍缩(Z-pinch)技术也取得重大突破。因此除了传统的高能激光器之外, 以Z箍缩装置为代表的高功率脉冲装置在各地的实验室被建造并用于高能量密度物理的实验研究, 其中最具代表性的是美国圣地亚国家实验室的Z装置。利用高能激光器、高功率脉冲装置等此类实验室装置, 以很好地模拟一些天体中的极端物理条件, 基于相同的物理规律设计实验去研究天体物理相关课题^[1]。实验室研究方法不仅可以使我们加深对物理规律的理解, 而且对天文观测和数值模拟等都有指导意义。小到微观物理学^[2-4], 大到对宇宙大尺度现象的解释^[5-7], 在实验室中的研究已取得一系列重要的成果, 如超新星的核心塌缩、分子云的光致电离、辐射冲击波和行星内部状态方程的研究等^[8]。

实验室相比传统天文研究方式有几点特点: 其一, 可以方便地设置初始条件, 且具有可重复性; 其二, 实验室和天体物理现象遵循相同的物理规律, 虽然二者等离子体参数不同, 但是经过标度变换之后可以建立相关联系; 其三, 实验室更加参数可控, 可以考察多个方向如原子物理学、流体力学、状态方程和辐射转移等对实验结

果的影响, 保证数据真实性。

天体等离子体大多会受到磁场的影响, 例如磁化的激波加速宇宙射线, 吸积盘、原恒星喷流以及磁重联的现象等均与磁场有关。宇宙中的许多天体都有极强的磁场, 即使经过磁流体力学标度变换之后, 要在实验室模拟类似的磁场环境, 仍然需要几百甚至上千特斯拉的强磁场。在以往的实验中, 发现强磁场会影响等离子体的不稳定性, 因此我们需要在实验室产生超强磁场, 然而这将带来一些新的问题。一方面, 强磁场环境给实验装置的设计带来新的挑战, 另一方面, 高能激光器产生的磁场极不稳定, 由于传统激光产生的欠稠密等离子体中可以容纳各式各样的波, 这些波能够与光波发生不稳定的耦合, 这些不稳定的波可以发展的很大, 散射大量的激光, 从而使得磁场的强度下降。最新研究表明, Z箍缩装置产生的磁场在特定方向上保证了等离子体的稳定性和准直性^[9, 10]。

本文将基于Z箍缩装置对实验室天体物理的几个热点研究问题如磁重联、喷流、冲击波等方面的最新进展进行简要介绍。

2 主要研究进展

2.1 高功率脉冲装置驱动磁重联

磁场重联伴随着磁场拓扑结构的改变, 是磁能转化为等离子体动能和热能的重要方式, 同时伴随着带电粒子的加速和加热, 这种现象在宇宙空间中普遍存在, 可被用来解释宇宙空间中很多能量的快速释放过程, 例如太阳耀斑、日冕物质抛射、太阳风和地磁场的相互作用、地球磁层亚暴等现象。磁重联的物理过程可以简单描述为: 具有不同拓扑连接性的磁场结构相互靠近时, 相反方向的分量之间感应出最强的电场以及相应的电流, 其中的电阻造成的电阻耗散将磁场的能量转化为等离子体的动能和热能, 以及高能粒子的动能。在传统的磁重联发生装置如MRX^[11]和TREX^[12]的实验中, 磁场的能量远远大于等离子

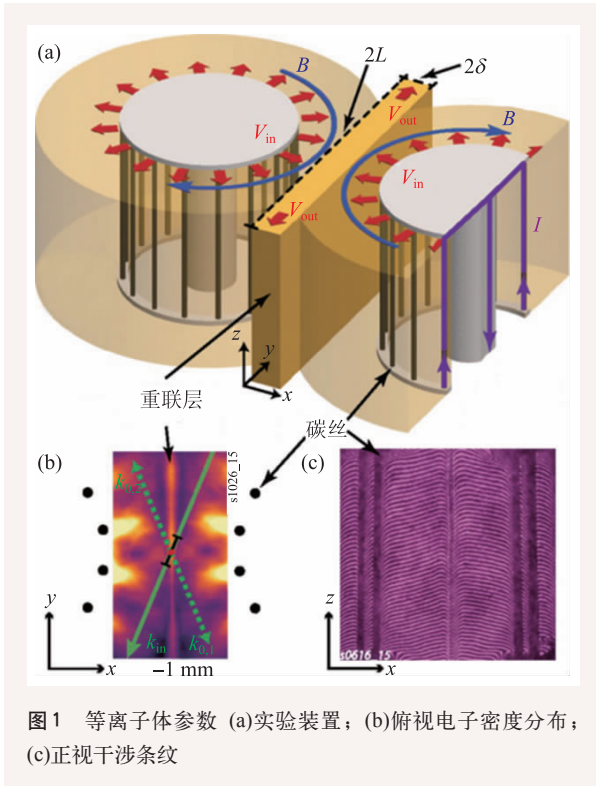


图1 等离子体参数 (a)实验装置；(b)俯视电子密度分布；(c)正视干涉条纹

体的其他各个分量。然而在激光驱动的高能量密度物理(HEDP)实验中，发生了截然相反的情况，以激光驱动产生的高能量密度等离子体，其动能和热能之和远大于磁能^[13]，重联加热作用不明显。

最近，Hare等人利用Z-pinch结构的MAGPIE发生器产生两个磁场方向相反的碰撞等离子体流来实现了磁重联。实验设置如图1(a)所示，由两个典型的Z箍缩金属丝阵列构成，两个丝阵列完全相同，中间是电极，外侧是由16根竖直相互平行的C丝(直径400 μm，高16 mm)围成圆筒形结构，半径8 mm，两个阵列中心相隔27 mm，阵列外侧相隔11 mm，每个阵列产生的等离子体流的半径是13.5 mm，在驱动电流的持续时间内，磁化的等离子体流被传送到中间平面发生碰撞重联，产生一个1.2 mm薄的电流片结构，电流片的长宽比大于10，同时电流片的持续时间远远大于

流体动力学时间。碰撞等离子体流速可达超声速、亚阿尔芬速($M_s=1.6$, $M_A=0.7$)，图1(b)和(c)分别是电子密度分布图和干涉图，分别对应实验的俯视角度和正视角度。重联层是在通电180 ns后形成，223 ns时等离子体出流充满整个探测空间。

观察电子密度分布图可以看到在重联层中间有一个等离子体团，其中心电子密度极大，通过多次实验证实等离子体团的出现是可重复的，但是其时间和位置不可控。通过比较不同时间节点等离子体团的位置可以估算出等离子体团的传播速度为130 km/s，这一速度与测得的y方向的等离子体出流的速度是一致的。实验中有一个引人注意的地方，重联层中电子温度和离子温度远高于入流等离子体的温度，等离子体参数如表1所示。不能单一由入流动能转化来解释，Hare等人考虑了粘滞效应和欧姆加热，通过计算发现，如果仅考虑这两种加热机制，将入射能量转化为测得的重联层电子离子的能量，所耗费的时间远远大于实验持续的时间，所以也不能用来解释电子和离子的异常高温。Hare等人猜想电子和离子的异常高温可能是由观察到的等离子体团的不稳定性，或者是由动力学不稳定性引起的异常电阻率和粘度系数导致的。

Hare的实验首次提出在脉冲功率装置Z-pinch实验中发生磁重联的实验证据，热 β_{th} 和动力学 β_{dyn} (热压力和动力学压力与磁压力的比值)都接近于1，入流速度是亚阿尔芬速度 $M_A=0.7$ 。实验观察到两个额外的磁重联标志：等离子体的强烈加热和重联层的速度超过阿尔芬速度 V_A 的快速出流。压缩性和压力平衡效应解释了快速的入流和出流，实验得出在进入和离开重联层的功率流之间存在平衡，但是将磁能转换成热能的机制目前还不清楚，仍需进一步的研究。

表1 等离子体参数

参数单位	n_e / cm^{-3}	Z	$V_A(V_s) / (\text{km/s})$	B_y / T	T_i / eV	T_e / eV	$c/w_m / \mu\text{m}$	$\lambda_d / \mu\text{m}$
入射流	3×10^{17}	4	50	3	50	15	700	3
重联层	6×10^{17}	6	130	—	600	100	400	30

中国工程物理研究院流体物理研究所段正超团队利用FOI-PERFECT程序对反向丝阵Z箍缩进行了数值模拟,给出了磁重联发生的物理图像和动力学过程,并讨论了磁重联发生的证据及标志,这一工作与以上Hare等人开展的实验互补,可更加直观理解磁重联的过程和物理机制^[14]。

2.2 高功率脉冲装置驱动产生喷流并形成激波

天体喷发的狭长、准直、高速、定向的等离子体束也称为“喷流”,是天体物理中普遍存在的现象,发生在各种各样的天体环境中,从活动星系核中心的超大质量黑洞^[15]到宇宙早期的原恒星^[16],以及伽马射线暴^[17]和超新星^[18]等都能观察到喷流的产生。喷流长度在 10^{17} — 10^{24} cm范围内,随着天体的不同而不同,喷流速度达到几百公里每秒,是介质声速的10倍以上。

喷流作为基本的天体结构,它的产生、准直、碰撞、偏折等机制一直是天体物理中的重要研究问题。早期的实验研究使用激光和脉冲功率设备产生纯粹的流体动力学喷流,并伴随着强烈的辐射冷却。然而,目前的共识是,天体物理中的喷流形成机制不是流体动力学,而是磁流体动力学,在实验室研究喷流的产生机制以及它的诸多效应之时,磁场是需要考虑的重要组成部分。

通常,喷流被认为是通过旋转和磁场的结合起来驱动的,其从吸积盘和恒星组成的系统中提取旋转能量并产生加速和准直流动的磁应力^[19, 20]。在特定情况下,磁场拓扑结构由于较差旋转而演变成主要为环形磁场的拓扑结构,其将来自系统的喷射物质以喷流的形式在由外部环境压力限制的腔的轴上进行准直喷出。已经提出的一种“磁塔”模型,可以解释从原恒星到中子星等不同天体物理喷流产生的机制。例如,2005年,Lebedev等人通过径向线阵列Z箍缩装置实验再现了与该模型相似的等离子体喷流。其中等离子体喷流通过竖直的环形磁场回路被准直并驱动到磁泡的轴线上。磁流体动力学模拟显示,这些实验中的无量纲参数与来自原恒星天体喷流的参数有很大的相关性。

最近,Suzuki等人提出了观察磁塔喷流情景形成的实验,其实验装置还允许可控地改变磁塔喷流过程中所通过的环境介质的密度。通过Suzuki等人的这个实验可以大胆地猜想,在原恒星喷流中观察到的结和冲击波可能源于喷流形成阶段的变异性,或者可能是由于与周围介质的相互作用而产生的。

实验装置仍然采用基于Z-pinch结构的MAG-PIE发生器,峰值电流1 MA(250 ns),产生电流的结构是一个径向同心圆电极的装置,中间是阴极,外面是阳极,如图2所示,电极上方是一个厚度为6—6.5 μm 的薄铜膜,驱动强电流产生的洛伦兹力将使薄膜快速消融,产生等离子泡,所施加的电流路径(图2)在薄膜下方产生与电流成正比的环形磁场 B ,并随着与阴极的径向距离增大而减小,实验使用了激光干涉、阴影法、纹影法、针孔相机等诊断手段测量等离子体的参数,对于环向磁场的峰值电流可以达到的磁场强度为100 T。由于通电时间的增加,薄铜膜被电流加热并消融,同时在薄膜表面上形成等离子体。消融的等离子体出流方向为图2中的 $J \times B$ 方向。图3显示了电流通过172 ns后的激光干涉图,图中显示出靠近中心阴极的薄膜的轴向位移可通过运动方程很好地描述,假设大多数薄膜质量通过环形磁场的压力加速。通过干涉图我们得到电子密度是 $n_e = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。从干涉测量图可以得出高于薄膜位置部分的轴向密度分布呈现指数衰减,这表明等离子体的等温膨胀,导出典型的声速为

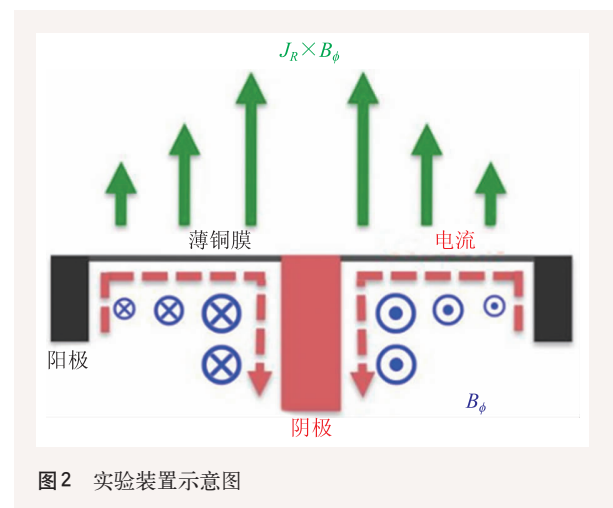


图2 实验装置示意图

$C_s = 9 \text{ cm/s}$ 。

图3显示了在靠近轴的区域中烧蚀的等离子体的密度的增强。该流体动力学出流由薄膜表面烧蚀的等离子体形成，其通过径向压力梯度被重定向到轴的位置。随后在薄膜上方注入环境气体。随着时间的推移，磁驱动喷流的形成开始，当洛伦兹力(其在阴极半径处最强)导致阴极附近的所有薄膜材料的消融，并且在阴极和薄膜的剩余部分之间形成小的径向间隙。从此刻起，可以通过该间隙将坡印廷通量注入到薄膜片上方的区域中。环形磁场沿轴向和径向向外推动烧蚀的等离子体，并且将等离子体会聚在轴上，形成磁塔喷射构型。在这个阶段，电流沿着空腔的轴线和空腔的壁流动。空腔内的这些增强的环形磁场的磁压力使得等离子体在径向和轴向均匀膨胀，测得等离子体的径向速度和轴向速度分别是 $V_r = 50\text{--}60 \text{ km/s}$ 和 $V_z = 130\text{--}200 \text{ km/s}$ 。

这个新的实验装置最突出的特征是我们现在观察到在同一个实验中形成几个后续的喷流。如图4所示，每个出流大致以恒定的速度膨胀，轨迹的时间推演可以确定每个片段的开始时间。随后膨胀的磁泡有更快的膨胀速度，第三个磁空腔的膨胀速度可达 $V_z = 325 \text{ km/s}$ ，随后的磁泡通过较

低的环境密度传播。通过实验得出每个新的片段都是从等离子体在磁性腔的轴上被箍缩开始的，并且被箍缩的等离子体是X射线、软X射线发射的来源。轴向膨胀动力学和X射线发射的周期性都表明形成后续磁塔结构出流的时间间隔是30 ns，图4也给出了这个结果。实验中还观察到Z方向的喷流与环境介质气体的相互作用会产生弓形激波，消融的等离子体与环境介质气体相互作用产生锥形激波。随着时间的推移，弓形激波和锥形激波相互作用会产生一个明显的水平界面，猜想这一结构的形成可能是由喷流结束后表面的辐射导致的，这部分结果仍然需要进一步的研究。

3 结论与展望

近年来，在无碰撞冲击波、磁重联、不透明度、等离子体的不稳定性等方面的研究都取得了大量成果。基于最新的高功率脉冲装置的发展，加上激光技术的进步，这些热点问题可能会在不同参数空间取得进展。实验室天体物理研究为天体物理课题的研究提供思路，同样地，天体物理中的研究理论也可以应用到实验中去验证，二者相互促进，推动两大学科的发展。

除了前面介绍的国际上的脉冲功率装置之外，我国自主建设的脉冲功率装置“聚龙一号”主要用于开展电磁驱动的高能量密度物理实验研究，包括Z箍缩驱动惯性约束聚变、磁驱动材料特性和天体实验物理等。“聚龙一号”装置是中国的一个太瓦级脉冲功率装置，包括24个支路平行分布在两层，每个模块包含6 MV的Marx发生器、中间储能器、5-MV触发激光开关、脉冲形成线、水介质自击穿开关和三纤板传输线等。“聚龙一号”在Marx发生器充电65 kV下的初始储能为3 MJ，在一定负载条件下，可以获得上升时间为60—70 ns，峰值近

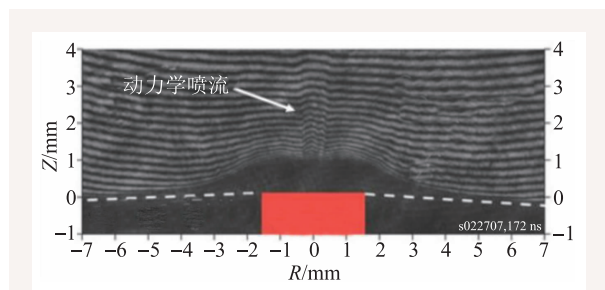


图3 172 ns时侧面干涉图

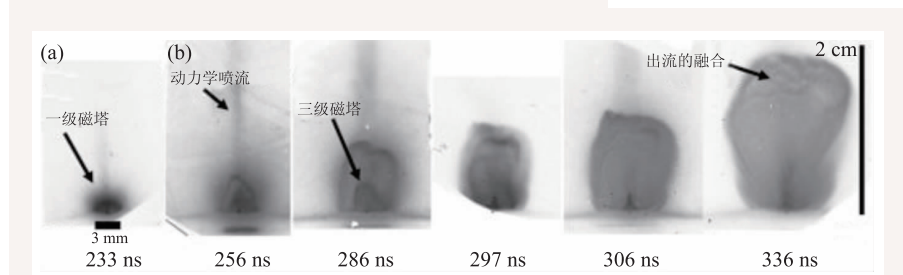


图4 周期性(30 ns)磁塔结构

10 MA的脉冲电流。在“聚龙一号”装置上主要开展了Z箍缩驱动动态黑腔、电磁驱动界面不稳定性及高速等离子体喷流等实验的研究。其中以Z箍缩驱动厚度约20 μm的径向铝薄膜负载产生数百km/s量级的等离子体喷流，实验观测到喷流的形成与发展过程，并初步研究了喷流与目标靶的相互作用。

利用“聚龙一号”装置可以在实验室开展天体物理问题的研究，例如喷流实验，在环境中充入介质气体，与生成的等离子体喷流进行相互作用，观察是否能产生方向性的冲击波。如果能够产生稳定的此类激波，可以进行模拟太阳风穿过周围介质产生冲击波现象的研究，同时也可以对喷流的传播机制进行深入研究，来检验 Suzuki 等人的实验结果。

我国自主建造的脉冲功率装置和高能激光器已经开展了一系列有价值的工作，极大推动了实验室天体物理研究的发展，由于天体物理研究涉及从毫米波到伽马射线的全波段，所观测现象丰富，实验室天体物理学研究除了需要更强大的实验装置之外，还需要更先进的诊断装置以及更高效的计算能力，以提高实验数据的多样性和处理能力。

参考文献

- [1] Remington B, Drake R P, Ryutov D D. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, 78:755
- [2] Keiter P, Mussack K, Kleina S. *High Energy Density Phys.*, 2013, 9:319
- [3] Rochau G, Bailey J *et al.* *Phys. Plasmas*, 2014, 21:056308
- [4] LePenec M, Ribeyre X *et al.* *High Energy Density Phys.*, 2015, 17:162
- [5] Suzuki-Vidal F, Bochhi M, Lebedev S *et al.* *Phys. Plasmas*, 2012, 19:022708
- [6] Manuel M, Kuranz C *et al.* *High Energy Density Phys.*, 2015, 17:52
- [7] Bennett M, Lebedev S *et al.* *High Energy Density Phys.*, 2015, 17:63
- [8] Ryutov D D. *Physics of Plasmas*, 2006, 13:122307
- [9] 张杰, 赵刚. *物理*, 2000, 29(7):393
- [10] Ryutov D D, Remington B A. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 827:341
- [11] Ji H, Terry S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92:115001
- [12] Olson J, Egedal J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116:255001
- [13] Nilson P M, Willingale L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 97:255001
- [14] Fiksel G, Fox W *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 113:105003
- [15] Begelman M C *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 1984, 56:255
- [16] Reipurth B, Bally J. *Ann. Rev. Astronomy and Astrophysics*, 2001, 39:403
- [17] Piran T. *AIP Conference Proceedings*, 2005, 784:164
- [18] Galama T J, Vreeswijk P M *et al.* *Nature*, 1998, 395:670
- [19] Blandford R D, PayneMonthly D G. *Not. R. Astron. Soc.*, 1982, 199:883
- [20] Pudritz R E, Norman C A. *Astrophys. J.*, 1986, 301:571

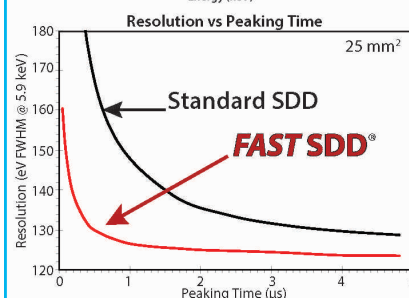
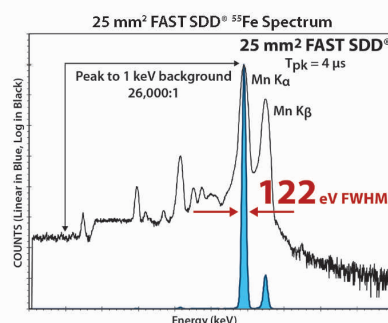
Ultra High Performance Silicon Drift Detector

FAST SDD®

Count Rate = >1,000,000 CPS

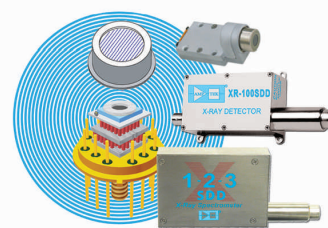
The True State-of-the-Art

- New in-house manufacturing
- Lower noise
- Lower leakage current
- Better charge collection

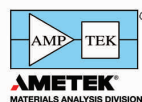


Options:

- 25 mm² active area collimated to 17 mm²
- 70 mm² collimated to 50 mm²
- Windows: Be (0.5 mil) 12.5 μm, or C Series (Si3N4)
- TO-8 package fits all Amptek configurations



Please see our web site for complete specifications and vacuum applications



AMPTek Inc.
sales@amptek.com
www.amptek.com