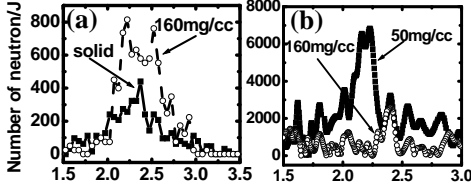


Proton Acceleration in Intense Laser-Plasma Interactions

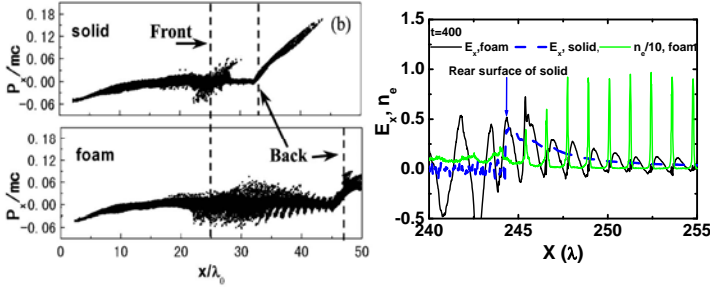
1. 低密度泡沫靶相互作用中的离子体加速

目前，超短超强激光与等离子体相互作用中产生的高能离子（质子）主要来源于靶前表面和后表面。靶内基本没有离子加速过程。我们首次提出了一种利用低密度泡沫靶进行离子“体加速”的概念。在超强激光与低密度泡沫靶相互作用过程中发现，靶前表面产生的超热电子在靶内输运时，会诱导很强的多峰静电场，此场可以对靶内的离子进行加速—体加速。



左图：泡沫靶和固体靶中子能谱（反映靶内离子加速情况）比较

160mg/cc泡沫靶产生的中子数目高于固体靶，50mg/cc的中子数目又大于160mg/cc的数目。表明泡沫靶内产生了更多的氘离子，通过DD碰撞发生了核反应。



2D 粒子模拟得到的离子动量分布。

固体靶：离子加速发生在靶前表面和后表面，靶内没有。（面加速）

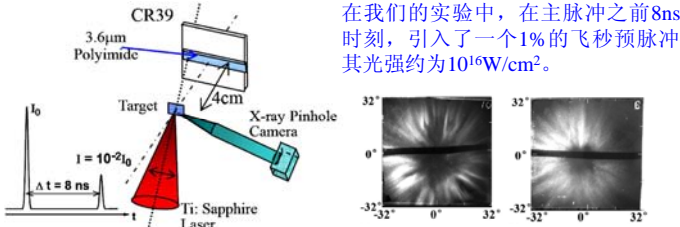
泡沫靶：离子加速不仅存在于靶面，而且存在于靶内，并且是双向加速。（体加速）

1D 粒子模拟的电场分布。

泡沫靶和固体靶内电场分布比较。可见泡沫靶内部每层之间都产生了静电场，而固体靶只在靶背面存在加速场。

2. 预脉冲产生的冲击波引起的质子环形分布

一般认为，实验中观测到的环形质子束分布起因于靶内部的磁场对向前传播的质子束的折射。我们发现，（较强的）预脉冲产生的冲击波对后靶面的扰动，也可以导致质子束的环形分布。



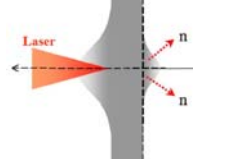
实验布局

在我们的实验中，在主脉冲之前8ns时刻，引入了一个1%的飞秒预脉冲，其光强约为 10^{16}W/cm^2 。

实验测得的、 $3\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 厚铜薄膜靶后表面产生的空心环形质子分布。

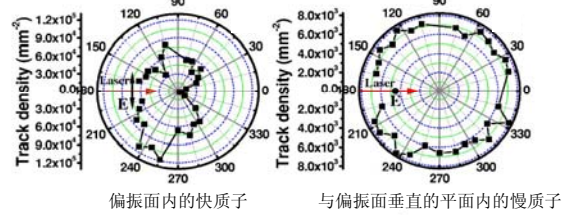
环形质子分布的原因：由于质子沿着法线方向发射，当预脉冲较强时，其产生的冲击波会引起靶后表面的严重形变（凸起和调制），从而影响靶后质子束的空间分布。

为了获得高能、准直性好、高亮度的离子束，必须确保未受扰动的、平整的后靶面。



3. 微滴靶产生的质子发射

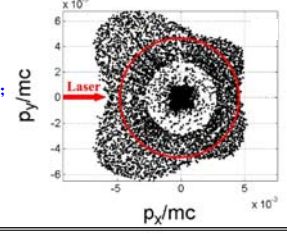
研究了中等强度下fs脉冲激光与乙醇微滴相互作用产生的质子特性，发现能量较高的质子只出现在激光偏振面内，明显依赖于激光的偏振状态，而能量较低的质子则趋向于各向均匀地分布。



偏振面内的快质子

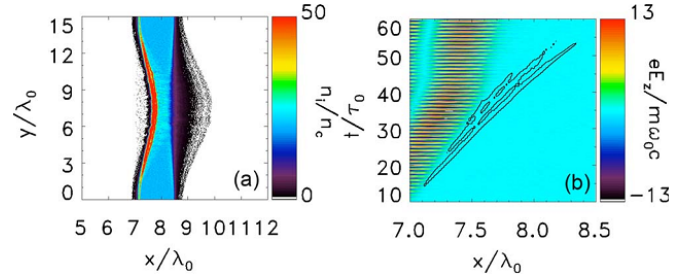
与偏振面垂直的平面内的慢质子

二维粒子模拟的结果表明，能量较高且依赖于激光偏振状态的质子来自于因共振吸收产生的超热电子诱导的准静态电场加速；而能量较低且不依赖于激光偏振状态的质子则由微滴等离子体的流体力学膨胀所产生。右图给出了在动量空间的质子分布。

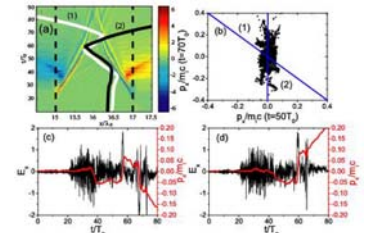
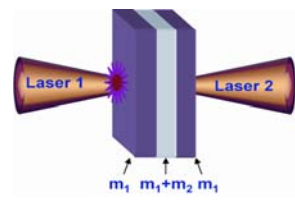
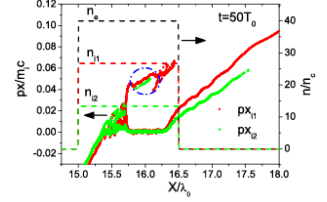


4. 无碰撞静电冲击波离子加速

在等离子体中存在一种特别的冲击波：无碰撞静电冲击波。其产生条件也是： $V_1 > C_s = [(kT_e + qKT_i)/m_i]^{1/2}$ 。其特点是在冲击波前沿存在等离子体电子和离子密度峰，同时存在电荷分离场，无需粒子间碰撞。离子运动来源于电荷分离场的静电力。在强激光与高密度等离子体作用中，在一定的条件下可以产生这种的冲击波。一旦产生这种冲击波，在其传播过程中靶内的一部分离子（特别是具有与冲击波同向运动的一定速度的离子）可以被冲击波捕获，并被加速到两倍左右的冲击波速度。



上图是某时刻在激光与固体薄膜靶作用产生的离子密度分布；右图是在沿着光轴上，离子密度峰位置变化的时空图，同时给出了激光场分布的时空变化。右图给出在激光作用前各离子成分的初始密度分布，以及在强激光作用后某时刻的各离子成分在纵向的动量空间分布。



为了进一步提高冲击波加速离子的能量，提出了用对撞冲击波多次加速产生更高能量离子的方案。用两个强激光脉冲作用于一个三明治固体靶，其中中间层富含荷质比最高的质子。两个激光脉冲各自产生一个冲击波，两个冲击波传到中间层后各自可以捕获其中的质子。质子在被其中一个冲击波加速后获得两倍的冲击波速度，传向另一个反向传播的冲击波。在碰到这个反向传播的冲击波后，被其静电场捕获，并获得反向加速。由此得到三倍的冲击波速度。经过多次反射，质子可以获得更高的能量。质子获得的最大能量取决于冲击波对应静电势的最大值。上图给出了示意图和一个数值模拟结果。

References:

J. Zhang, *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 47, B879 (2005) (特邀论文)
 M. Chen, *et al.*, Phys. Plasmas 14, 113106-113110 (2007)
 M. Chen, *et al.*, Phys. Plasmas 14, 053102-10 (2007).
 M. Q. He, *et al.*, Phys. Rev. E 76, 035402 (2007).
 Z.L. Chen, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 96, 084802 (2006).
 X.Y. Peng, *et al.*, Phys. Rev. E 74, 036405 (2006).
 M. H. Xu, *et al.*, Phys. of Plasmas 13, 104507 (2006).
 YT Li, *et al.*, Phys. Rev. E 72, 066404 (2005)
 J. Zheng, *et al.*, Physics of Plasmas 12, 113105-5 (2005).