



## 激光加速高能质子实验研究进展及新加速方案

马文君 刘志鹏 王鹏杰 赵家瑞 颜学庆

### Experimental progress of laser-driven high-energy proton acceleration and new acceleration schemes

Ma Wen-Jun Liu Zhi-Peng Wang Peng-Jie Zhao Jia-Rui Yan Xue-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 084102 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20202115

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202115>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于带电粒子活化法开展的SG II-U皮秒激光质子加速实验研究

Picosecond laser-driven proton acceleration study of SG II-U device based on charged particle activation method

物理学报. 2018, 67(22): 225202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181504>

锐真空-等离子体边界倾角对激光尾波场加速中电子注入的影响

Effects of slant angle of sharp plasma-vacuum boundary on electron injection in laser wakefield acceleration

物理学报. 2020, 69(3): 035201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191332>

用于激光加速质子参数表征的带电粒子活化测谱技术

Charged particle activation analysis for characterizing parameters of laser-accelerated protons

物理学报. 2017, 66(20): 205201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.205201>

神光III原型装置激光驱动高速飞片实验研究进展

Experimental progress of laser-driven flyers at the SG-III prototype laser facility

物理学报. 2017, 66(6): 064703 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064703>

通道靶对超强激光加速质子束的聚焦效应

Focusing effect of channel target on ultra-intense laser-accelerated proton beam

物理学报. 2017, 66(18): 184101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.184101>

超强激光与固体气体复合靶作用产生高能氦离子

Helium ions acceleration by ultraintense laser interactions with foil-gas target

物理学报. 2017, 66(8): 085201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.085201>

专题: 超短超强激光等离子体物理

## 激光加速高能质子实验研究进展及新加速方案\*

马文君<sup>1)2)†</sup> 刘志鹏<sup>1)2)</sup> 王鹏杰<sup>1)2)</sup> 赵家瑞<sup>1)2)</sup> 颜学庆<sup>1)2)3)</sup>

1) (北京大学, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

2) (北京激光加速创新中心, 北京 101407)

3) (北京大学, 应用物理研究中心, 北京 100871)

(2020年12月14日收到; 2021年1月13日收到修改稿)

利用超强激光与等离子体相互作用来加速高能离子是激光等离子体物理及加速器物理领域的研究热点. 经过了近20年的发展, 激光离子加速已取得丰硕成果, 催生了一批新的应用. 本文概述了国内外激光离子加速所取得的标志性实验研究进展, 围绕高能质子的产生这一关键问题进行了深入的探讨, 介绍了近几年来发展的有潜力的新加速方案.

**关键词:** 激光离子加速, 激光加速实验结果, 激光加速方法, 激光加速器

**PACS:** 41.75.Jv, 52.38.Kd, 52.50.Jm

**DOI:** 10.7498/aps.70.20202115

## 1 引言

高能离子束在基础研究、材料学、辐射育种及核医学等多个领域具有重要价值和广泛应用. 由于材料电离击穿阈值的限制, 传统加速器加速梯度通常低于 100 MV/m, 导致高能离子加速器体积巨大、结构复杂、造价昂贵. 随着激光技术的迅猛发展, 近年来人们发现, 光强达到相对论强度 ( $I > 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>) 的超强激光与特定的靶相互作用时, 可驱动靶内大量电子集体运动, 产生极强的纵向电场加速离子. 其加速梯度可达传统加速器的  $10^3$ — $10^6$  倍, 能在微米-飞秒量级的时空尺度内将带电粒子加速至接近光速, 是有着巨大潜力的新型粒子加速方法. 大量理论和实验结果表明, 激光加速离子束具有源尺寸小 (微米量级)、脉宽短 (皮秒尺度)、瞬态流强密度高 ( $10^{10}$  A/cm<sup>2</sup>)、能谱宽等不同于传统加速器束流的特点, 在聚变反应快点火、

超快离子成像、超快辐射化学研究、离子束肿瘤治疗等方面具有广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>.

在诸多应用当中, 基于激光质子的肿瘤治疗是最吸引人的方向之一. 质子/重离子放疗是当下最先进的肿瘤放射治疗方法<sup>[5]</sup>, 目前主要使用射频加速器 (包括同步加速器与回旋加速器) 来加速高能离子, 其昂贵的造价和维护费用极大地制约着质子/重离子放疗的推广和普及. 相比于传统加速器, 激光质子加速器在设备需求空间、安装难度、运行和维护成本、辐射防护难度、系统复杂程度等方面有巨大的潜在优势. 利用高磁场梯度的超小型脉冲磁铁或等离子体透镜对靶后质子流进行收集与控制, 可获得与传统加速器品质相当的单能束流<sup>[6]</sup>. 采用消色散的束流传输系统, 可通过能谱剪裁方法直接获得宽谱质子束流进行适配治疗<sup>[7]</sup>. 可以预期, 基于激光加速器的激光质子放疗系统一旦研制成功, 将可以安装在各大医院现场, 大幅降低癌症患者的治疗费用, 推动质子放疗在我国的普及.

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFF01014402)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61631001)、国家自然科学基金 (批准号: 11775010) 和国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (批准号: 11921006) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wenjun.ma@pku.edu.cn

目前,国际上已有不少研究者开展了激光质子束在辐射生物学上的应用研究<sup>[8-12]</sup>,其超高的剂量率( $> 10^9$  Gy/s)对于新兴的FLASH放疗<sup>[13]</sup>有着重要的价值.然而,激光加速质子要达到放疗所要求的最大能量、平均流强和稳定性等要求,仍面临着巨大的挑战<sup>[14]</sup>.首当其冲的挑战来自于能量.质子束对位于人体内深处的肿瘤进行放疗时,质子能量要达到200 MeV以上<sup>[15]</sup>,而目前实验上获得的最高质子能量仅为94 MeV<sup>[16]</sup>,还显著低于需求能量.

本文回顾了近年来激光驱动高能质子加速的标志性实验进展,探讨了获得高能质子的关键物理问题及技术瓶颈.着重介绍了一些未来有可能产生200 MeV以上质子的激光加速方案,分析了其可行性和亟待解决的问题.最后对激光加速高能质子的前景进行了展望.

## 2 高能质子加速实验进展

在过去的二十年左右的时间里,超强激光驱动的质子加速研究在理论和实验上都取得了很大进展,已有相关文献给出了较全面的综述<sup>[17,18]</sup>.目前已经在实验中实现的加速机制包括:靶背鞘场加速(target normal sheath acceleration, TNSA)、辐射压加速(radiation pressure acceleration, RPA)、无碰撞静电激波加速(collisionless electrostatic shock acceleration, CES)、靶破烧蚀加速(break-out afterburner acceleration, BOA)、库仑爆炸加速(Coulomb explosion, CE)“钻孔”加速(hole-boring, HB)等.本节主要介绍TNSA, RPA及CES这三种最重要的加速机制的物理图像及标志性实验结果.

### 2.1 TNSA 机制

TNSA机制是目前研究最为深入的一种加速机制,其基本物理图像如图1所示.当具有相对论强度的激光入射到较厚的固体靶表面时,在前表面附近通过共振吸收、真空加热、 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 加热等机制产生大量高能热电子<sup>[19]</sup>.这部分热电子在靶内往返运动,最终穿过靶体,在靶后表面外形成高温高密度电子层.由于离子质量远大于电子,在初始阶段大部分离子保持不动.靶外的电子层与靶内的离子共同形成一个很强的准静态纵向电场(鞘层场),

场强可以达到TV/m的量级.逸出靶外的质子及其他种类的离子在这个电场中可在极短的时间内( $< 1$  ps)被加速到很高的能量并沿着靶后法线方向以一定的立体角出射.在实验中,TNSA机制能够较稳定地获得能量为数MeV到数十MeV的质子<sup>[20-28]</sup>,是目前应用最广泛的一种加速机制.

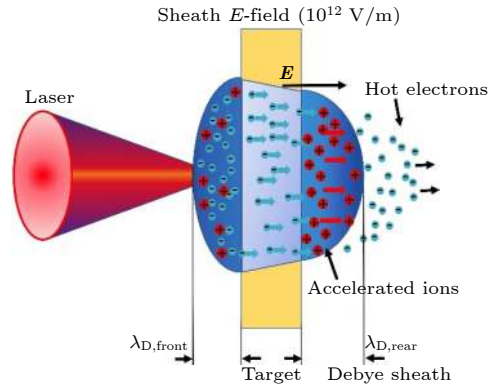


图1 靶背鞘层加速机制

Fig. 1. Target normal sheath acceleration regime.

2000年,Snively等<sup>[29]</sup>利用拍瓦激光轰击厚度为100 μm的碳氢靶,在靶背方向观察到最高能量(截止能量)为58 MeV的强流质子束,能谱呈现典型的指数下降特征,如图2所示.这是实验上首次观察到能量为数十MeV的高能质子束流,引起了很大的反响,也掀起了后续激光驱动离子加速研究的热潮.在短短四、五年内,发表了大量的理论工作,很快证实了TNSA加速的物理机制<sup>[30,31]</sup>.实验上,前期主要使用脉冲宽度大于100 fs的激光研究了激光光强<sup>[32]</sup>、靶材厚度<sup>[33]</sup>、激光对比度<sup>[34]</sup>等参数对加速的影响.2008年后,更多的基于超短脉冲激光的质子加速结果被报道<sup>[35-42]</sup>.使用基于钛蓝宝石晶体的飞秒脉冲激光作为驱动光,可较经济地实现Hz级的重频打靶,这对于很多应用来说非常重要.因此,近年来超短脉冲驱动的TNSA加速逐渐成为主流发展方向.实验结果表明,使用拍瓦( $10^{15}$  W)级的飞秒脉冲激光,在对比度较好的情况下,可以比较普遍地通过TNSA机制获得30—50 MeV的质子<sup>[43]</sup>.

为了获得更高能量的质子,研究者们尝试使用了多种方案来提升加速效果<sup>[44-50]</sup>,目前实验上通过TNSA机制得到的质子最大能量为85 MeV,由Wagner等<sup>[51]</sup>在2016年,通过提升激光的对比度,采用较薄的靶(900 nm)获得.采用薄靶时,

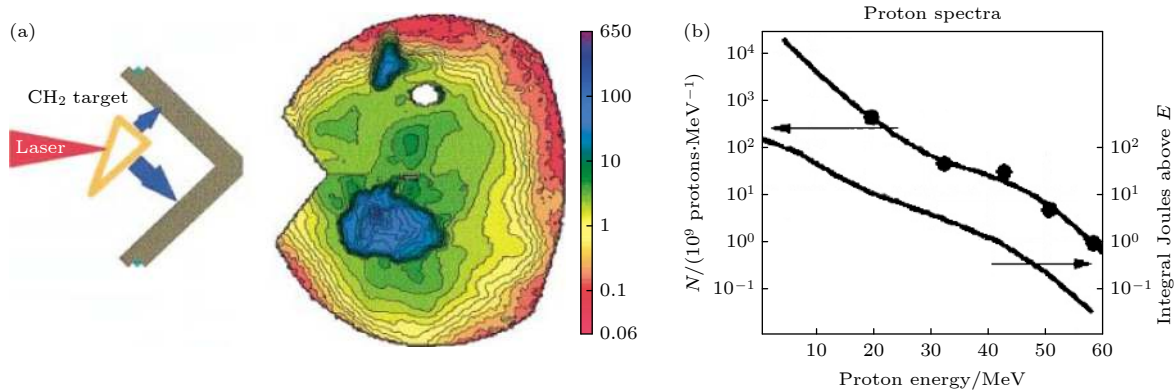


图 2 首次开展靶背鞘层激光加速实验<sup>[29]</sup> (a) 靶背发射质子分布; (b) 质子能谱指数型分布

Fig. 2. First experiment of ion acceleration in the TNSA regime<sup>[29]</sup>: (a) Distribution of proton emission from the rear target; (b) exponential energy spectra of accelerated protons.

一方面电子通过靶体时的发散与降能会被抑制, 另一方面热电子在靶前后表面的往复回流次数也会增加, 这两个因素都会增强靶后鞘场, 有助于产生更高能量的质子<sup>[52]</sup>.

TNSA 机制不足之处在于质子能量相对于激光光强的定标率较差, 能量转化效率较低. 激光能量首先转化为热电子, 再经由热电子建立的准静电场转化为质子能量, 不可避免地会造成大量能量的损失. 理论和实验表明, TNSA 加速质子的截止能量与激光强度的  $1/2$  次方成正比 ( $E_p \propto I^{1/2}$ )<sup>[30]</sup>. 并且, 脉冲长度也不能太短. 根据经验公式外推, 要达到截止能量 200 MeV 的质子输出, 需要激光强度  $4 \times 10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>, 脉宽 1 ps 的激光<sup>[53]</sup>. 这样大能量高光强的激光器造价非常昂贵且目前的光束品质还达不到要求. 2018 年, Nakatsutsumi 等<sup>[54]</sup> 在模拟中发现, 激光与等离子体相互作用会产生强烈的自生磁场, 热电子发生磁化, 导致离子在鞘场中发生偏离, 从而抑制离子加速. 他们认为, 即使继续提高激光强度, 也很难通过 TNSA 机制获得数百 MeV 的质子.

对于很多应用, 单能的束流具有更大的价值. TNSA 机制天然产生的能谱是指数型的, 但是可以通过使用特殊的靶材产生准单能的质子束. 2006 年, Schworer 等<sup>[55]</sup> 在平面靶后放置微型结构靶, 使得靶后鞘场分布更加均匀, 实验中获得了中心能量 1.2 MeV, 能散 25% 的准单能质子束. 这种方法虽然可以获得单能性较好的束流, 但是能量转化效率较低, 相比于先产生宽谱质子束再通过束流光学系统选能及单色化的方案并没有明显优势, 因此实际应用价值有限.

## 2.2 RPA 机制

随着激光技术的进步, 脉冲宽度为数十飞秒, 焦点峰值光强超过  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> 的超短超强脉冲激光被用于了离子加速研究中. 在这样的光强下, 当激光与厚度仅为数纳米的超薄固体靶相互作用时, 激光光压可以直接将靶中的冷电子集体推出, 在靶外形成高密度的电子压缩层. 离子在强大的电荷分离场作用下, 被拉动追赶压缩层的电子. 如果激光光强足够, 离子层与电子层在光场推动下可保持稳定不破碎, 最终作为整体一起被激光脉冲推动加速至接近光速<sup>[56-63]</sup>, 这时可称之为进入了光帆加速阶段 (light sail regime, LS-RPA), 离子最终能量与激光强度成正比. 对比 TNSA 机制, RPA 机制在光强高于  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> 后有较明显的优势, 定标率优于 TNSA 机制. 实验和理论表明, 当采用圆偏振光时,  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  电子加热被抑制, 更易实现稳相加速, 加速产生的质子能谱将具有准单能特性<sup>[64-66]</sup>, 这点非常有利于应用.

2009 年, Henig 等<sup>[67]</sup> 使用能量为 0.7 J, 聚焦光强为  $5 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> 的圆偏振激光入射到 5.3 nm 金刚石碳薄膜靶上, 并且使用了双等离子体镜将激光对比度提高到  $10^{13}$ , 这样的实验参数满足 RPA 发生的条件. 他们在实验中观察到了截止能量为 43 MeV 的 C<sup>6+</sup> 和 10 MeV 的质子, 如图 3 所示. 碳离子的能谱在高端呈现出准单能特性, 符合 RPA 加速特征. 普遍认为, 这个工作第一个在实验上证实了 RPA 加速机制. 随后, Kar 等<sup>[68]</sup> 使用能量为 200 J, 激光强度为  $3 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 的皮秒激光, 经过等离子体镜反射大幅提升对比度后, 再入射到 100 nm 的铜靶上, 通过 RPA 加速机制首次

获得了准单能峰能量 (7 MeV/u) 更高的碳离子. 与 Henig 等 [67] 的实验结果相比, 他们测量到的高能离子通量也提高了一个数量级. 2013 年, Steinke 等 [69] 在实验中通过 RPA 加速机制获得了中心能量为 2 MeV 的准单能质子, 激光到离子能量转化效率达到了 6.5%. 他们认为, 这一能量转化效率意味着在激光强度为  $2 \times 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> 的条件下, RPA 加速机制可以产生能量为 1 GeV 的高能离子束. Kim 等 [70] 使用聚焦强度为  $3.3 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 的飞秒激光作用到 10 nm 的碳氢靶上, 通过混合 RPA 加速机制、TNSA 加速机制和库仑爆炸加速机制, 获得了截止能量为 45 MeV 的质子束. 这一系列实验结果表明, 超高对比度激光和超薄纳米靶相互作用是 RPA 加速机制发生的前提条件.

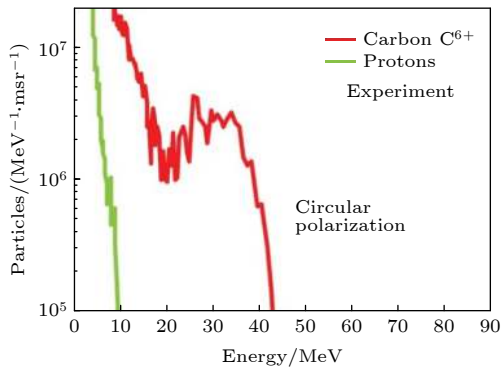


图 3 RPA 机制获得的质子和碳离子能谱 [67]

Fig. 3. Energy spectra of protons and carbon ions accelerated in RPA regime [67].

2015 年, 马文君利用无序堆积的碳纳米管制备出电子密度为几倍临界密度、厚度为微米量级的新型泡沫靶材, 其与 Bin 等 [71] 合作者利用英国卢瑟福实验室的超高对比度 500 TW 激光器, 在到靶

能量为 5 J, 聚焦强度为  $2 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 时, 观测到激光穿过靶体后的自聚焦和自相位调制等效 [72], 符合颜学庆等 [73] 之前理论预测的临界密度等离子体透镜效应. 通过使用碳纳米管与纳米厚度的自支撑类金刚石薄膜靶组成的双层纳米靶材, 他们在实验中观察到 20 MeV/u 的碳离子准单能峰, 显著高于单层类金刚石纳米靶. 该结果表明, 采用等离子体透镜技术对激光进行波形调控及自聚焦后, 有助于 RPA 机制的实现.

2016 年, Kim 等 [74] 利用脉宽 30 fs 的圆偏振激光轰击 15 nm 聚合材料纳米靶, 如图 4(a) 的 15 nm 结果所示, 在光强为  $6.1 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 时得到截止能量为 93 MeV 的质子. 在实验中他们发现对于厚度相同的纳米靶, 质子截止能量与到靶光强的平方成正比, 这符合光压加速特征. 不过实验中没有观测到单能的质子和碳离子. 2018 年, Higginson 等 [16] 在 Vulcan 激光器上利用 ps 激光, 通过混合 RPA-TNSA 机制, 得到截止能量为 94 MeV 的质子束, 如图 4(b) 红色实线. 这也是目前 RPA 机制所获得的质子最高能量记录.

从实验参数和结果判断, 目前已进行的 RPA 实验都还没有进入光帆加速阶段 (LS-RPA). RPA 机制在进入光帆加速阶段后, 有着极高的能量转化效率, 是理想的离子加速机制. 然而, 理论和实验结果表明, LS-RPA 的实现需要光强足够高, 焦斑足够大, 才能压制电子热效应 [75,76]. 除了光强要求, 激光的对比度要足够高 [68,77], 脉冲上升沿足够陡峭, 才能避免纳米靶过早破裂. 除此之外, LS-RPA 过程内在的不稳定性也是阻碍其顺利进行的重要因素 [78-81]. 产生加速不稳定性的原因有很多, 一是有限焦斑半径效应. 激光光强在焦点附近的横

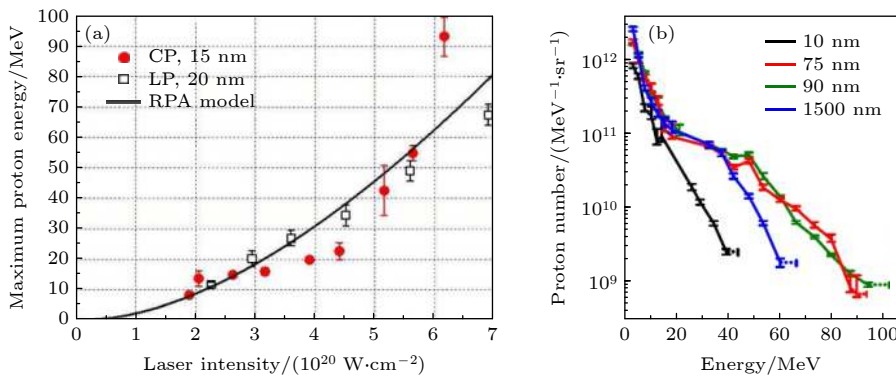


图 4 RPA 机制所获得的高能质子加速结果 (a) 飞秒激光加速最高能量与光强的关系 [74]; (b) 皮秒激光质子加速能谱 [16]

Fig. 4. Experimental results of laser-driven high-power protons in RPA regime: (a) Maximum proton energy as a function of on-target intensity of the femtosecond laser pulses [74]; (b) energy spectrum of protons employing picosecond laser pulses [16].

向梯度会导致靶的弯曲变形, 激光不再正入射到靶面, 电子的横向动量大大增加, 破坏了电子片的稳定性. 二是 RPA 中存在类似于流体中的瑞利泰勒不稳定性 (Rayleigh-Taylor instability, RTI). 当在有一定密度差的界面施加扰动时, 界面会由于微小扰动产生形变, 出现波纹结构. 随着时间推移, 电子与离子密度波动不断发展, 最终导致等离子体薄层的破裂, 使得 RPA 提前终止 [82,83]. 后续有多人相继提出了各种稳定光压加速的方案, 这些方案的可行性至今还有待证实. 通过 RPA 机制得到能量接近 200 MeV 甚至更高的质子, 目前看来还需要一定的努力.

### 2.3 CES 加速机制

CES 广泛存在天体环境中, 例如超新星爆炸时所发射大量的高能粒子, 便是通过激波加速产生的 [84–86]. 在实验室中, 激光与等离子体相互作用时, 激光有质动力推动等离子体形成密度堆积, 等离子体内部会出现密度分层. 当密度分界面的传播速度超过离子声波速度的时候, 就会形成沿着激光方向向前传播的激波. 激波传播过程中, 位于激波前方的静止离子会在静电场中被反弹, 获得两倍于激波速度的前向速度, 实现离子加速 [87–89]. 由于离子声速与激光光强的  $1/2$  次方成正比, 与等离子体密度的  $1/2$  次方成反比. 当光强较高, 等离子体密度较低时, 可获得数十 MeV 甚至更高能的质子. CES 加速机制最大的优势在于, 如果激波能够以恒定速度稳定传播, 反射离子速度始终保持为激波速度的两倍, 最终可以获得能散很低的离子束 [90].

实验上, CES 离子加速研究最早开展于 2004 年. Wei 等 [91] 在 Vulcan 激光器, 利用强度为  $3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$  的激光辐照低密度靶时, 在横向上

观察到截止能量为 13.2 MeV 的 He 离子. 实验中, 激光发生了明显的自聚焦成丝, 以及等离子体横向膨胀, 导致只有在横向上才能观察到大量的加速离子, 其单能性也远低于期望, 不利于实际应用. 2012 年, 美国 UCLA 实验室 Haberberger 等 [92] 使用多个聚焦强度为  $6.5 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ , 脉宽为 3 ps, 间隔 18 ps 的脉冲激光串与气体靶相互作用, 首次通过无碰撞激波加速获得了能量为 20 MeV, 能散小于 1% 的单能质子束. 此外作者通过 PIC 模拟发现激光强度提高到  $10^{18} \text{ W/cm}^2$  时, 能够获得能量高达 170 MeV 的单能质子束, 这一参数满足激光质子治疗的要求. 2017 年, 张辉等 [93] 在实验中利用聚焦强度为  $6.9 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$  的圆偏振激光与临界密度等离子体相互作用, 获得了能散 30%、中心能量为 9.3 MeV、通量为  $3 \times 10^{12} \text{ protons}/(\text{MeV} \cdot \text{sr})$  的强流质子束. 他们通过二维 PIC 模拟证明, 质子能谱分布和能散结果与 CES 加速机制相符合.

2020 年, Tochitsky 等 [94] 在实验中通过 CES 加速机制获得了能量分别在 50 和 314 MeV 位置处的准单能质子 ( $\Delta E/E < 30\%$ ) 和碳离子 ( $\Delta E/E < 10\%$ ). 实验中, 如图 5(a) 所示, 他们首先将紫外线激光辐照到厚度为 50  $\mu\text{m}$  的金薄膜靶, 产生 X 射线在靶后对 1  $\mu\text{m}$  厚度的碳氢靶进行密度调制, 随后主激光作用到碳氢靶, 获得了能散低于 30% 的离子. 靶后为经过密度调制后的碳氢靶, 其靶前等离子体密度梯度更陡峭, 有利于激光加热等离子体和激波的形成, 同时靶后等离子体密度梯度变得更加平缓, 可以降低靶后指数衰减的鞘层场, 提高出射离子的单能性. 采用双脉冲激光对靶等离子体的密度进行调制, 可以提高激波的稳定性和离子的单能性.

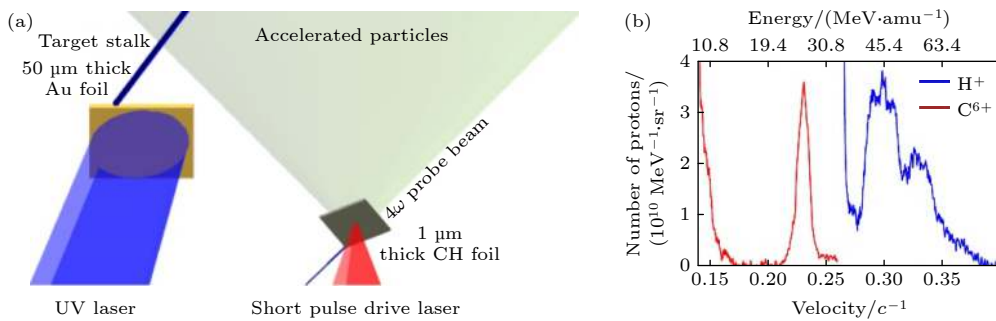


图 5 CES 加速实验 [94] (a) 激波加速密度调制示意图; (b) 质子和碳的准单能峰分布

Fig. 5. Experiment of CES acceleration [94]: (a) Experimental setup of collisionless electrostatic shock acceleration after tailoring the density profile of the plasma; (b) quasimonoenergetic protons and carbon ions in the spectra.

CES 机制的特点是离子单能性好, 但能量不高, 单发离子数目少, 并且易受到等离子体横向扩散影响, 导致能谱展宽和截止能量都比理论预期差. He 等<sup>[95]</sup> 在模拟中采用一种用高原子序数材料制成的微米管对等离子体横向膨胀进行束缚后发现激波能够更稳定地向前传播. 当激光脉宽为 1 ps 时, 在有约束条件下, 等离子体膨胀具有很好的密度梯度, 激波维持时间较长, 最终可以得到截止能量高于 100 MeV 的准单能质子束. 实验上, 这种微米管和临界密度靶结合的复合靶制备难度很大, 目前尚未有成功的实验报道. 未来如能提升制靶工艺, 实现密度梯度控制及横向抑制等离子体扩散, CES 加速也是一种有潜力的加速方法.

除了上面介绍的加速机制外, 一些其他的加速机制也有研究和报道. 例如靶破烧蚀加速 (BOA)<sup>[96,97]</sup>、库仑爆炸加速 (CE)<sup>[98,99]</sup>、“钻孔”加速 (HB)<sup>[100]</sup> 等. 基于这几种加速机制的实验工作较少, 还需要多更深入的研究.

### 3 高能质子加速新方案

目前激光离子加速所获得的最高能量与离子束肿瘤放疗的能量要求相差较大, 为了在实验上获得更高能量的离子, 近年来研究者们又提出了一些新的加速方案, 下面将分别进行介绍.

#### 3.1 增强型 TNSA, RPA 加速

在 TNSA 机制下, 离子的能量与超热电子的温度及密度直接相关. 提高激光到超热电子的耦合效率是获得更高能质子的有效途径. 2011 年, Zigler 等<sup>[101]</sup> 首次通过 0.5 TW 激光作用在水汽凝结成的无定型纳米线靶, 观察到截止能量为 7.5 MeV 的质子束, 比相同激光条件下的实验结果高一个量级. 除了在靶前表面引入微纳结构, 还可以在主脉冲前使用另一束脉冲在靶前表面产生较长尺度的预等离子体, 增强等离子体对激光的吸收<sup>[102]</sup>. 2010 年, Markey 等<sup>[103]</sup> 在实验中, 在激光总能量不变的条件下, 将激光由单脉冲形式改为双脉冲, 质子截止能量由 15 MeV 提高到 20 MeV. 他们模拟发现, 第一发脉冲与靶表面作用时导致的等离子体的预膨胀会提高第二发脉冲的能量吸收系数. 相比于单脉冲, 激光能量到质子的转化效率提高到 3.3 倍. 2018 年, Wang 等<sup>[104]</sup> 发现可利用预脉冲激光对纳米靶进行烧蚀, 主脉冲与所形成的

靶前预等离子体相互作用, 发生自聚焦成丝, 激光强度得到提高. 同时靶后等离子体密度梯度更为陡峭, 靶背鞘层场将得到进一步增强, 相比单脉冲激光, 质子的截止能量提高了 1 倍. 2020 年, Rahman 等<sup>[105]</sup> 的模拟结果表明, 预脉冲可以改变靶内电子分布, 减少主脉冲激光的反射, 提高激光能量吸收系数. 在激光总能量不变的前提下, 双脉冲激光所产生的热电子的温度和数目都明显高于单脉冲, 质子的截止能量由 60 MeV 提高到 120 MeV. 同时由于预脉冲的处理, 等离子体内部能量较低的质子会优先得到加速, 双脉冲质子能谱的单能性更好.

双脉冲与靶相互作用包含了更复杂的物理过程, 当参数不合适时, 预脉冲的出现也会对质子加速带来不利影响. 2007 年 Robinson 等<sup>[106]</sup> 通过数值计算研究发现, 采用双脉冲也可能会降低质子截止能量和高能质子数目. Kaluza 等<sup>[34]</sup> 的研究表明, 对于厚度为 10  $\mu\text{m}$  的金属靶, 当预脉冲与主脉冲间隔小于 2.5 ns 时, 预脉冲会在靶背形成等离子体层, 削弱靶背鞘层电场, 降低质子截止能量.

2019 年, 马文君等<sup>[107]</sup> 采用次临界密度碳纳米管泡沫 (carbon nanotube foam, CNF) 与类金刚石碳纳米薄膜靶组成的双层靶, 利用 PW 级飞秒激光, 在实验中观察到截止能量为 58 MeV 的质子和截止能量为 48 MeV/u 的碳离子. 激光入射到这样的双层靶上时, 其 ps 级的上升沿首先将碳纳米管电离形成高度均匀的次临界密度等离子体 ( $n_e$  约为  $0.1n_c$ — $1.0n_c$ ). 加速过程如图 6(a) 所示, 主脉冲与次临界密度等离子体相互作用, 产生大量的向前传播的超热电子, 其温度可达有质动力温度的 2—3 倍. 当激光穿过第一层靶到达纳米薄膜时, 离子由于辐射压力从薄膜靶中发射出来, 然后在超热电子流所形成的鞘层中获得加速. 双层靶结构加速方案将超热电子的产生和离子加速两个过程分开, 并且混合了 RPA 机制和 TNSA 机制. 当激光作用到薄膜靶时, 主要通过 RPA 机制电离产生大量离子, 并且对离子进行初级加速, 而 TNSA 机制在后续的离子加速中起到主要作用. 该实验打破了飞秒激光驱动碳离子加速的最高能量纪录, 是之前最高纪录的 2.5 倍<sup>[108]</sup>. 模拟结果表明, 这种双层靶加速方案离子的截止能量与激光强度的 0.6 次方成正比, 其定标律略高于 TNSA 机制, 低于 RPA 机制, 但更加稳定可控, 离子的加速时间得到了延长. 这种级联加速机制在现有的激光条件下, 有望产生 GeV 量级高能重离子束.

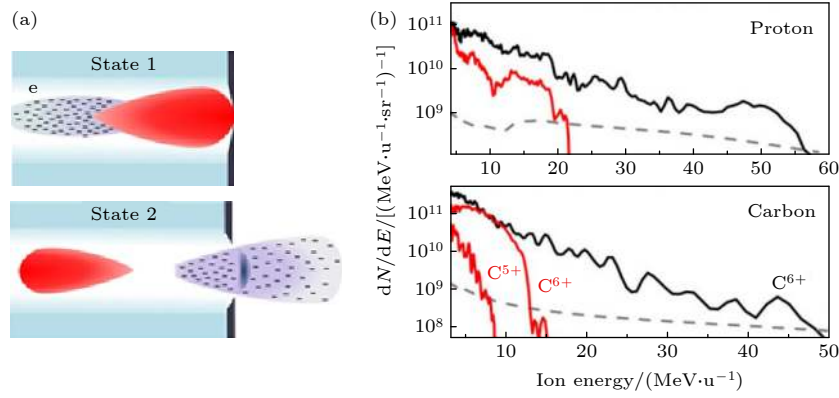


图 6 双层靶加速实验<sup>[107]</sup> (a) 级联过程示意图; (b) 质子碳离子能谱分布

Fig. 6. Experiment laser-driven acceleration using a double-layer target<sup>[107]</sup>: (a) Schematic drawing of the cascaded acceleration process; (b) protons and carbon ions spectrum for: with CNF (black lines) and without (red lines).

### 3.2 磁涡旋加速

利用激光等离子体相互作用产生的磁压来加速离子早在 2005 年就被提出. Bulanov<sup>[109]</sup> 通过 PIC 模拟发现超强激光与气体靶相互作用, 等离子体内部形成低密度通道, 在通道末端可以产生强大的静电分离场对离子进行加速和聚焦. 作者指出, 这种静电分离场是由通道内部的偶极磁场所激发的. 2019 年 Park 等<sup>[110]</sup> 在模拟中, 利用 PW 激光与临界密度靶相互作用, 能够获得截止能量高达数百 MeV 的质子束, 并且束流具有高度准直和消色差的特性.

如图 7 所示, 磁涡旋加速机制的物理图像为: 超强激光与临界密度靶相互作用时, 激光有质动力

将电子推出, 在等离子体中沿激光轴传播形成低密度通道, 低密度通道中间出现很强的电子流和同轴的高密度等离子体壁, 等离子体壁中有沿管壁回流的电子, 形成了振幅达到 10<sup>5</sup> T 的涡旋磁场. 当涡旋磁场到达靶背, 会排开靶背表面电子, 使靶背表面带正电, 同出射的电子流形成强烈的分离电荷场, 能够加速和聚焦离子, 产生准直的高能质子束.

磁涡旋加速机制的离子能量与激光功率的 0.8 次方成正比 ( $E_i \propto I^{0.8}$ ), 高于 TNSA 加速机制, 理论计算激光功率在 1 PW 时, 可以产生能量达 100 MeV 以上的质子, 其束流特点是准直性好, 消色差, 十分有利于质子束的应用和束流传输. 磁涡旋加速机制被提出后, 目前为止还没有成功的实验

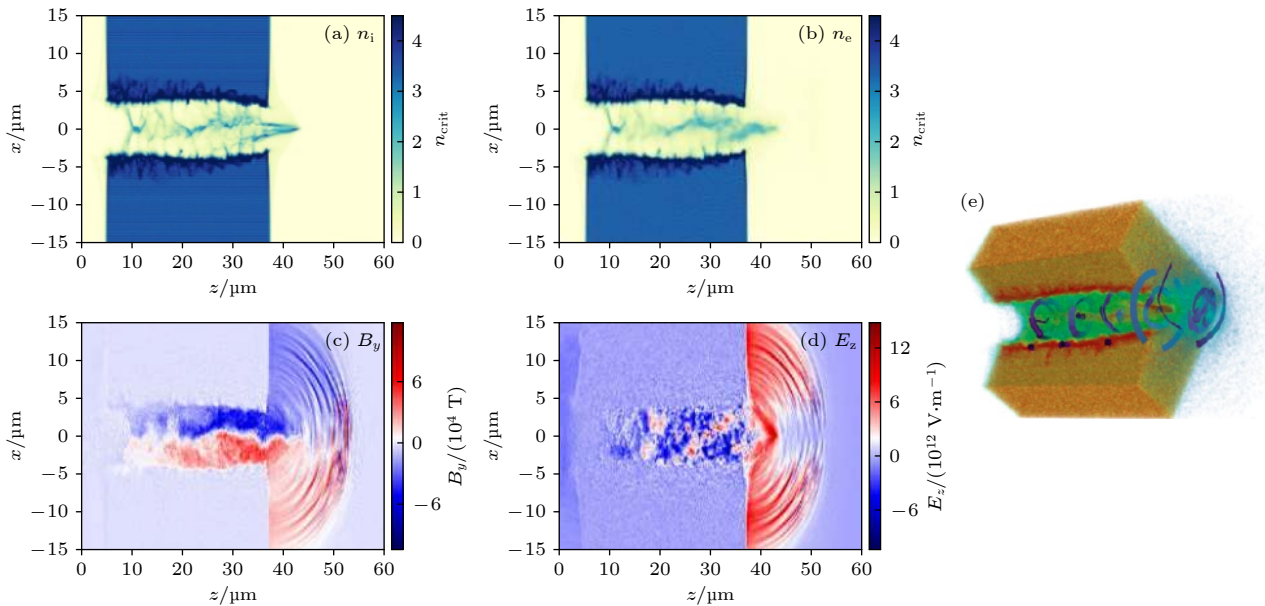


图 7 磁涡旋加速机制<sup>[110]</sup>

Fig. 7. Magnetic vortex acceleration regime<sup>[110]</sup>.



结果被报道. 这是因为磁涡旋加速机制需要等离子体密度和长度同激光功率之间达到最佳耦合条件, 才能产生稳定的等离子体通道和涡旋磁场. 其次, 激光束斑要与等离子体通道半径满足一定条件: 束斑过大无法形成明显的密度通道, 过小会导致等离子体向内膨胀堵塞通道. 实验上目前还无法对等离子体和激光参数进行如此精确操控.

### 3.3 离子波破加速

在 CES 加速机制中, 要求等离子体的密度  $n_e$  高于相对论性临界密度, ( $n_e > \gamma n_c \sim a_0 n_c$ ,  $\gamma$  为电子的洛伦兹因子,  $a_0$  为激光归一化强度,  $a_0 = eE_0/(m_e c \omega)$ ). 激光前沿被堆积出来的等离子体所反射, 冲击波前沿速度受限于等离子体中的离子声速. 刘彬等 [111,112] 从理论和模拟上研究了在相对论自透明的近临界密度 (通常介于  $1n_c$ — $10n_c$  之间) 等离子体中发生的一种独特的离子加速机制. 在等离子体密度较低时, 背景离子在高速移动的静电分离场的作用下集体震荡. 震荡的幅度以及在震荡过程中离子获得的最大速度都随着静电分离场的强度增加而增加. 当等离子体密度足够高从而场的强度足够大, 以至于离子获得的最大速度达到静电场的移动速度时, 离子就会被场“俘获”从而可以被持续加速. 这个离子俘获的过程是自调制的, 离子的运动规律也会伴随着从流体向非流体转变. 理论上, 俘获发生之前的离子的集体运动可以看作离子波, 而少量离子的俘获可以看作离子波的波破. 因此这个加速机制被称作离子波破加速. 相比于不透明的高密度等离子体的离子加速机制, 包括“打洞”加速和冲击波加速, 离子波破加速的优点主要在于其产生的离子能量更高, 缺点在于离子的数目相对较少.

### 3.4 静电电容加速

RPA 机制中, 电子层与离子层互相耦合导致的不稳定性是制约获得高能质子的主要因素之一. Shen 等 [113] 基于 PIC 模拟工作, 提出了一种静电电容加速机制 (electrostatic capacitance-type acceleration, ECA). 模拟中他们通过脉宽数 fs、能量为 10 J 的单周期激光作用到厚度为 4 nm 的超薄靶, 获得了能散低于 10%, 能量达到百 MeV 的准单能质子束. 与 RPA 机制不同, ECA 机制中电子层与离子层并不是作为一个整体的“等离子体飞镜”被加速. 相反, 电子和离子在激光传播方向上是间隔一定距离的. 如图 8(a) 所示, 它的加速过程分为两个阶段, 首先激光与纳米靶相互作用. 由于靶的面密度很低, 会将靶中几乎全部的电子推动向前加速, 电子不能在短时间内扩散, 而是形成一个飞行的电子薄片, 作为阴极, 而留下的重离子充当电容的阳极, 激光能量转化为静电势能, 这等效于电容的充电过程. 随后纳米靶的质子被两个电极之间的匀强静电场加速, 静电势能转化为离子动能, 电容放电.

作者认为, 相比于 RPA 机制, ECA 机制更加稳定可控. 在 RPA 机制中, 激光有质动力推动着由电子和离子组成的“等离子体飞镜”向前传播, 加速过程中需要一直维持“等离子体飞镜”的稳定性, 才能获得准单能的高能离子束. ECA 机制由于电荷分离场的形成和离子加速是相互独立的, 只需要在激光作用瞬间, 确保电子完全打出, 形成一个均匀的平面电子层, 后续离子便能稳定、持续得到加速. 实现 ECA 机制的主要困难在于: 一方面微米尺寸大小、纳米厚度的无支撑靶的制备和定位较为困难, 另一方面目前的激光技术还无法产生接近单周期的能量达到 10 J 量级的激光. 此外, 这种机制

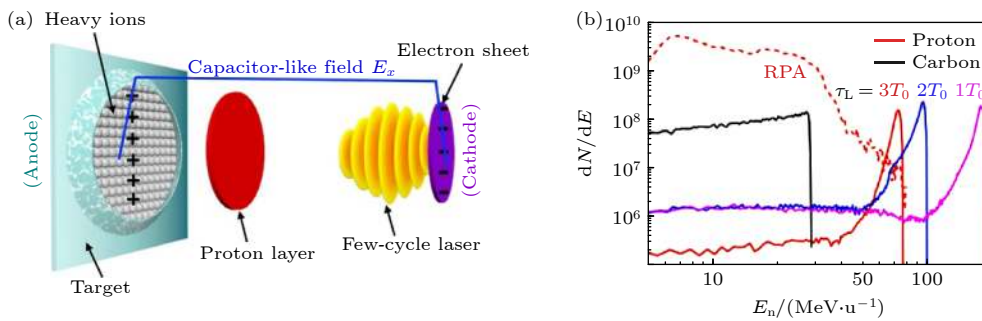


图 8 静电电容加速机制 [113] (a) 加速原理; (b) 不同脉宽激光的三维 PIC 模拟结果

Fig. 8. Schematic of the electrostatic capacitance-type acceleration regime [113]: (a) Principle of ions acceleration; (b) three dimensional PIC simulation results for three different pulse durations.

对激光的对比度要求比 RPA 机制还要高, 激光到离子的能量转化效率不高.

### 3.5 多光束薄膜靶级联加速

单级离子加速方案受限于激光光强、靶材, 一步到位获得超过 100 MeV 的高能质子有一定困难. 采用让离子依次通过多个激光产生的加速场来提升最终能量是一种吸引人的思路. 2010 年, Pfothenhauer 等 [114] 提出了一种级联加速方案, 如图 9(a) 所示, 通过双束激光两次打靶实现多级 TNSA 加速. 首先第一束激光与第一层靶相互作用, 通过 TNSA 机制产生数 MeV 的质子, 当质子向前传播到第二层靶时, 第二束激光与第二层靶相互作用, 在靶内部建立鞘层电场, 对初级质子束施加特征光谱调制. 当质子到达第二层靶时候, 只有部分质子会受到影响, 靶后的质子会进一步得到加速, 而靶前的质子会被库仑势垒减速, 可以改变能谱某一特定能量段的分布, 如图 9(b) 所示. 通过调整两束激光的延迟时间, 可以对输出能谱进行操控, 但在实验中, 鞘层电场较弱, 对质子能量没有明显的二次提升.

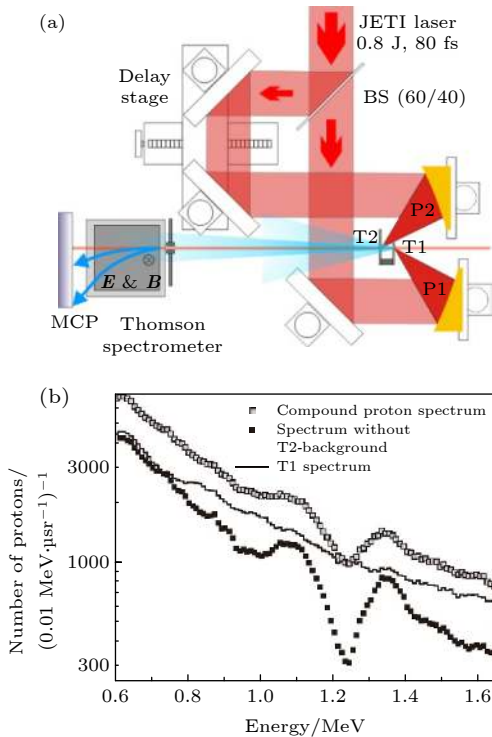


图 9 多级 TNSA 加速方案 [114] (a) 实验示意图; (b) 质子能谱分布

Fig. 9. Multi-stage TNSA acceleration [114]: (a) Schematics of experimental setup; (b) energy spectra of the proton beams.

后面也有人继续研究这种级联加速方案. 2018 年王文鹏等 [115] 在实验中, 利用两束强度为  $7.7 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  的激光先后以  $12^\circ$ ,  $40^\circ$  斜入射在  $4 \mu\text{m}$  厚的金属铝靶及  $200 \text{ nm}$  厚的硼碳复合薄膜靶, 实现了双级 TNSA 加速. 实验结果显示, 质子截止能量由  $7.0 \text{ MeV}$  被提高到  $14.4 \text{ MeV}$ . 他们的模拟结果表明, 在激光归一化强度  $a_0 = 25$  的条件下, 利用这种方法可以得到截止能量为  $135 \text{ MeV}$  的质子束.

尽管取得了初步的成功, 多光束级联加速仍有许多待解决的问题. 首先, 多个加速过程的协调同步需要对激光和靶进行精密的控制, 这无疑增加了方案的复杂性. 其次, 离子数量在多级加速过程中, 不可避免地会有所损失. 最终的加速效率可能并不高. 这对于很多应用来说可能是比较致命的缺陷. 最后, 目前激光器的成本与激光总能量成正比, 多光束级联加速将激光能量分配到多个光束上, 如不能获得很大的能量增益, 从成本角度看, 可能还不如单级加速划算. 以上这些问题的解决, 还需要更多的实践探索.

### 3.6 微米管级联加速

2006 年, Toncian 等 [116] 利用微米管实现了一种对质子束进行聚焦和能量选择的级联加速方案. 他们通过皮秒激光脉冲作用在长度为  $3 \text{ mm}$  的中空金属筒上, 使得内壁产生热电子并向内膨胀, 在管内产生了径向的空间电荷场, 如图 10 所示. 当来自于另一束激光加速的质子束通过管道时, 质子

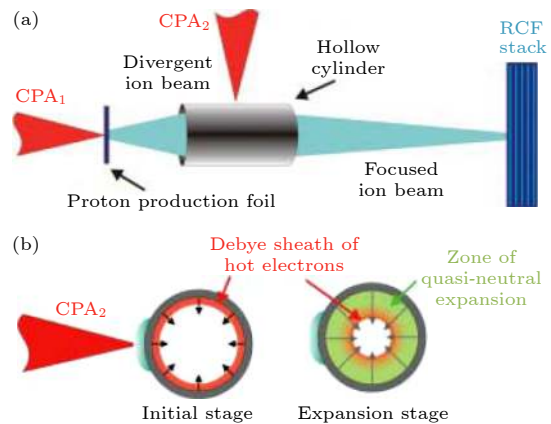


图 10 微米管级联加速 [116] (a) 微米管示意图; (b) 电荷分离场的形成

Fig. 10. Cascade acceleration with microtubes [116]: (a) Schematic diagram of the scheme; (b) space-charge field irradiated by the CPA laser pulse.

束会被聚焦和能量选择, 最终质子单能性和准直性可获得极大提升. 2017年, 上海交通大学 Wang 等<sup>[117]</sup>在模拟中发现, 通过超强激光作用在 1.6  $\mu\text{m}$  的中空金属管外壁, 除了径向电场外, 还可以产生 TV/m 量级的轴向电场. 注入质子的最高能量由 10 MeV 提升到 17 MeV, 能散由 10% 降低到 4.9%, 并且发现增大微米管长度, 质子的截止能量和准直性会得到进一步提高.

2019年, He 等<sup>[118]</sup>提出了一种利用超短强激光脉冲驱动, 实现全光学级联离子加速的方案, 各加速阶段相互独立. 如图 11(a) 所示, 第一阶段通过 PW、皮秒激光与第一段微米管作用, 在管内形成临界密度等离子体, 可以产生准单能, 高度准直的质子束. 第二阶段, 两束 TW、飞秒激光作用在第二个管状结构两翼, 沿着管壁驱动表面电流, 产生电磁场脉冲对质子进行级联加速. 图 11(b) 模拟结果显示, 初级加速质子截止能量为 123 MeV, 一次级联后能量提高达到 151 MeV, 二次级联后提高

到 181 MeV, 每一级能量增益大概在 30 MeV 左右, 总的能量转化效率为 2.1%. 这种级联加速方案, 可以产生能谱发散度很小的离子束. 采用激光能量达到千焦的皮秒激光, 能够产生高通量的离子束, 部分补偿了级联加速过程中不可避免的粒子损失, 有利于质子束的多次级联加速. 这个方案的主要问题在于对激光器能量要求太大, 目前的技术条件下很难推广.

### 3.7 微螺线管后加速

Kar 等<sup>[119–122]</sup>和 Bardon 等<sup>[123]</sup>提出一种利用微型螺旋管的后加速方案, 不需要多束激光即可同时实现质子束的能量选择、准直和二次加速. 如图 12(a) 和图 12(b) 所示, 激光与靶相互作用后, 电子从靶背表面出射, 形成靶背鞘层电场, 产生沿靶后法线方向传播的高能质子束. 同时由于靶中的电子被打出, 靶上积累的正电荷会通过接地导线产生沿螺线管传播的电流脉冲, 形成的超短超强电

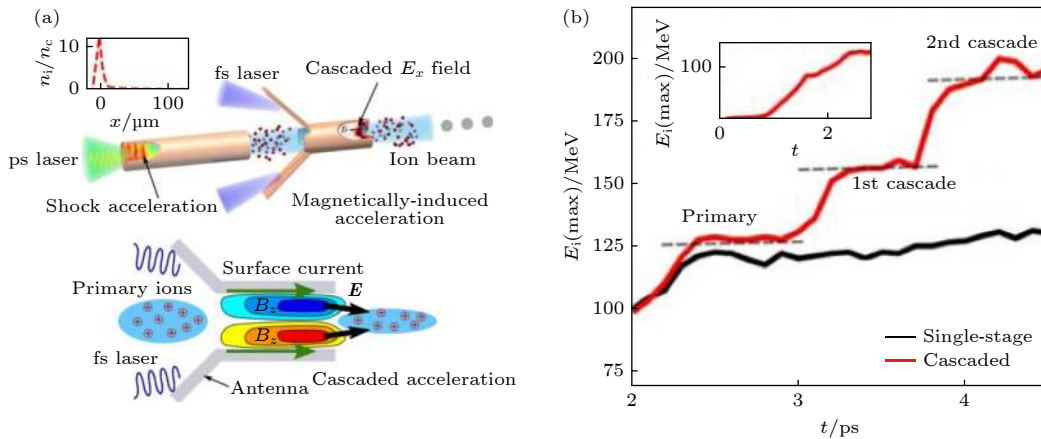


图 11 全光学离子加速级联方案<sup>[118]</sup> (a) 微米管对质子进行级联加速; (b) 质子截止能量演变过程

Fig. 11. All-optical cascaded ion acceleration scheme<sup>[118]</sup>: (a) Post-acceleration of protons in microtubes irradiated by femtosecond laser; (b) time evolution of the maximum ion energy.

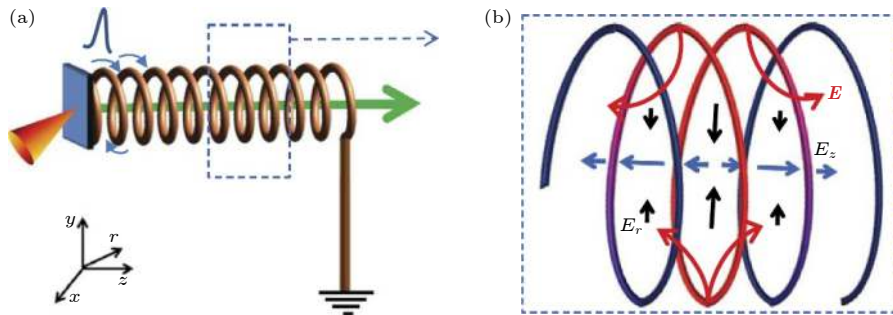


图 12 螺旋管级联加速方案<sup>[119]</sup> (a) 脉冲电流沿螺线管传播; (b) 螺线管内部电场分布

Fig. 12. Schematic of the post-acceleration of ions in helical coils<sup>[119]</sup>: (a) Propagation of electromagnetic pulse along the metallic wire; (b) schematic representation of laser-excited electric field inside the coils.

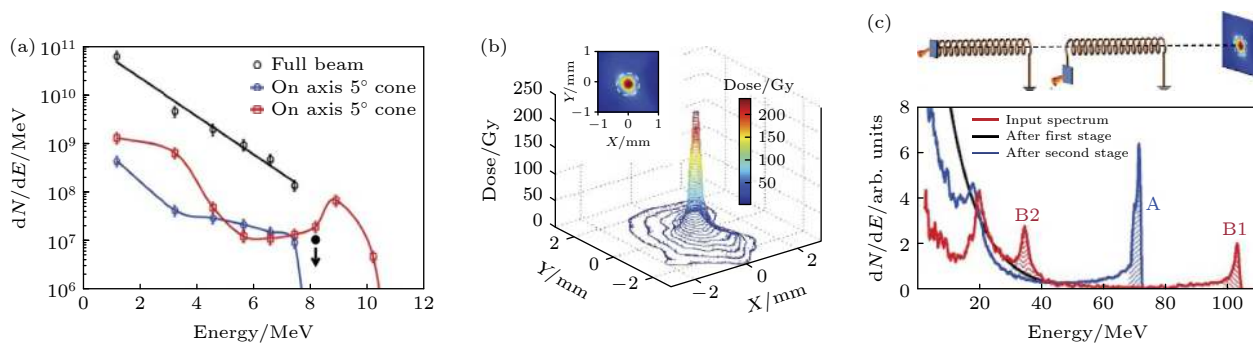


图 13 螺线管级联加速实验及模拟结果<sup>[119]</sup> (a) 质子能谱分布; (b) 质子束三维分布; (c) 两次级联加速模拟结果

Fig. 13. Experimental and simulated results of post-acceleration using helical coils<sup>[119]</sup>: (a) Proton spectrum with and without the helical coils; (b) spatial profile of the ion beams; (c) proton spectra of the input proton source, after the single-stage and after the double-stage post acceleration.

磁场能够对质子束进行二次加速和聚焦. 实验中使用 200 TW 的激光器, 后加速段的加速梯度达 0.5 GV/m, 远超传统加速器所能达到的加速梯度.

实验结果如图 13(a),(b) 所示, 经过螺线管电场二次加速后, 质子的截止能量由 7.6 MeV 提升到 10.4 MeV, 并且质子束得到了良好的聚焦, 靶后 35 mm 处, 束流高度准直, 发散角小于 0.5%. 此外他们还模拟了质子束经过两次螺线管结构加速后的效果, 如图 13(c) 所示, 在 PW 激光下, 由薄膜靶发射的初级质子束截止能量为 40 MeV, 经过一次螺线管结构后, 达到了 70 MeV. 两次级联加速后, 达到 100 MeV. 可见使用 PW 激光器, 利用螺线管级联加速方案有望获得能量为 100—200 MeV 的高能质子束.

## 4 总结与展望

从实验上发现超强激光与固体薄膜作用可产生高能质子到今天, 已经过了 20 年左右的时间. 在世界范围内广大科研工作者的共同努力下, 激光驱动离子加速作为一种全新的离子加速方法, 已逐渐走向成熟. 质子能量记录不断提高, 加速稳定性与可靠性稳步提升. 激光加速一个重要优势是激光到离子的能量转化效率较高, 普遍可达百分之几. 如采用高平均功率和高电光源转化效率的超短超强激光作为驱动源, 激光加速有很大潜力成为一种经济高效的中低能离子产生方法. 目前, 采用二极管泵浦的高功率激光器, 已可实现 60% 的强电到泵浦光转化效率和超过 20% 的泵浦光到脉冲光的转化效率. 预计在不久的将来, 平均功率达到千瓦量级的拍瓦激光器将会出现<sup>[124]</sup>. 利用这种激光器

预期可产生平均功率在十瓦量级的离子束流.

世界各国正将注意力由基础物理研究转到应用. 2010 年, 欧洲批准了首个艾瓦 ( $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>) 激光装置 ELI (extreme light infrastructure), 预期激光强度可超过  $10^{24}$  W/cm<sup>2</sup>. ELI 项目一个非常重要的研究目标为产生最高能量达 300 MeV 的质子, 并开展肿瘤治疗应用研究<sup>[125]</sup>. 与此同时, 德国政府也在慕尼黑大学和德累斯顿建立了两个激光加速研究中心, 各投入 7000 万欧元, 主要目标为产生 20—100 MeV 的质子, 应用于癌症治疗、医学成像和质子诊断等. 韩国政府也批准了投资过亿美元的 UQBF (ultrashort quantum beam) 计划, 其中一个重要方向即为激光质子加速及应用于医学和成像.

我国在激光质子加速领域同样成果显著, 中国科学院物理研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国工程物理研究院、北京大学、清华大学、上海交通大学等单位在激光离子加速领域做出了很多具有世界先进水平的理论和实验工作. 其中北京大学激光加速团队在国家重大仪器专项的支持下, 已建成世界上首台 1% 能散的小型激光质子加速器 (CLAPA) 及辐照装置, 在激光加速到稳定可用的激光加速器的过程中迈出了坚实的一步<sup>[6,126]</sup>. 未来在国家重点研发专项“拍瓦激光质子加速器装置研究与应用示范”的支持下, 可以预期, 我国将在激光离子加速及应用领域获得更多更大的突破.

## 参考文献

- [1] Ledingham K W D, Bolton P R, Shikazono N, Ma C M C

- 2014 *Appl. Sci.* **4** 402
- [2] Borghesi M, Fuchs J, Bulanov S V, Mackinnon A J, Patel P K, Roth M 2006 *Fusion Sci. Technol.* **49** 412
- [3] He X T, Li J W, Fan Z F, Wang L F, Liu J, Lan K, Wu J F, Ye W H 2016 *Phys. Plasmas* **23** 082706
- [4] Malka V, Fritztler S, Lefebvre E, d'Humieres E, Ferrand R, Grillon G, Albaret C, Meyroneinc S, Chambaret J P, Antonetti A, Hulin D 2004 *Med. Phys.* **31** 1587
- [5] Bulanov S V, Wilkens J J, Esirkepov T Z, Korn G, Kraft G, Kraft S D, Molls M, Khoroshkov V S 2014 *Phys. Usp.* **57** 1149
- [6] Zhu J G, Wu M J, Liao Q, Geng Y X, Zhu K, Li C C, Xu X H, Li D Y, Shou Y R, Yang T, Wang P J, Wang D H, Wang J J, Chen C E, He X T, Zhao Y Y, Ma W J, Lu H Y, Tajima T, Lin C, Yan X Q 2019 *Phys. Rev. Accel. Beams* **22** 061302
- [7] Tao L, Zhu K, Zhu J, Xu X, Lin C, Ma W, Lu H, Zhao Y, Lu Y, Chen J E, Yan X 2017 *Phys. Med. Biol.* **62** 5200
- [8] Bayart E, Flacco A, Delmas O, Pommarel L, Levy D, Cavallone M, Megnin-Chanet F, Deutsch E, Malka V 2019 *Sci. Rep.* **9** 10132
- [9] Kraft S D, Richter C, Zeil K, Baumann M, Beyreuther E, Bock S, Bussmann M, Cowan T E, Dammene Y, Enghardt W, Heibig U, Karsch L, Kluge T, Laschinsky L, Lessmann E, Metzkes J, Naumburger D, Sauerbrey R, Schürer M, Sobiella M, Woithe J, Schramm U, Pawelke J 2010 *New J. Phys.* **12** 085003
- [10] Hofmann K M, Masood U, Pawelke J, Wilkens J J 2015 *Med. Phys.* **42** 5120
- [11] Masood U, Cowan T E, Enghardt W, Hofmann K M, Karsch L, Kroll F, Schramm U, Wilkens J J, Pawelke J 2017 *Phys. Med. Biol.* **62** 5531
- [12] Manti L, Perozziello F M, Borghesi M, Candiano G, Chaudhary P, Cirrone G A P, Doria D, Gwynne D, Leanza R, Prise K M, Romagnani L, Romano F, Scuderi V, Tramontana A 2017 *J. Instrum.* **12** C03084
- [13] Durante M, BräUER-Krisch E, Hill M 2018 *Br. J. Radiol.* **91** 20170628
- [14] Linz U, Alonso J 2016 *Phys. Rev. Accel. Beams* **19** 124802
- [15] Linz U, Alonso J 2007 *Phys. Rev. Accel. Beams* **10** 094801
- [16] Higginson A, Gray R J, King M, Dance R J, Williamson S D R, Butler N M H, Wilson R, Capdessus R, Armstrong C, Green J S, Hawkes S J, Martin P, Wei W Q, Mirfayzi S R, Yuan X H, Kar S, Borghesi M, Clarke R J, Neely D, McKenna P 2018 *Nat. Commun.* **9** 724
- [17] Daido H, Nishiuchi M, Pirozhkov A S 2012 *Rep. Prog. Phys.* **75** 056401
- [18] Macchi A, Borghesi M, Passoni M 2013 *Rev. Mod. Phys.* **85** 751
- [19] Brumel F 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 52
- [20] Wilks S C, Langdon A B, Cowan T E, Roth M, Singh M, Hatchett S, Key M H, Pennington D, MacKinnon A, Snavely R A 2001 *Phys. Plasmas* **8** 542
- [21] Karsch S, Düsterer S, Schwoerer H, Ewald F, Habs D, Hegelich M, Pretzler G, Pukhov A, Witte K, Sauerbrey R 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 015001
- [22] Mackinnon A J, Borghesi M, Hatchett S, Key M H, Patel P K, Campbell H, Schiavi A, Snavely R, Wilks S C, Willi O 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1769
- [23] Roth M, Blazevic A, Geissel M, Schlegel T, Cowan T E, Allen M, Gauthier J C, Audebert P, Fuchs J, Meyer-Ter-Vehn J, Hegelich M, Karsch S, Pukhov A 2002 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **5** 061301
- [24] Krushelnick K, Clark E L, Zepf M, Davies J R, Beg F N, Machacek A, Santala M I K, Tatarakis M, Watts I, Norreys P A, Dangor A E 2000 *Phys. Plasmas* **7** 2055
- [25] McKenna P, Ledingham K W D, Yang J M, Robson L, McCanny T, Shimizu S, Clarke R J, Neely D, Spohr K, Chapman R, Singhal R P, Krushelnick K, Wei M S, Norreys P A 2004 *Phys. Rev. E: Stat. Nonlinear Soft Matter Phys.* **70** 036405
- [26] Passoni M, Bertagna L, Zani A 2010 *New J. Phys.* **12** 045012
- [27] Hatchett S P, Brown C G, Cowan T E, Henry E A, Johnson J S, Key M H, Koch J A, Langdon A B, Lasinski B F, Lee R W, Mackinnon A J, Pennington D M, Perry M D, Phillips T W, Roth M, Sangster T C, Singh M S, Snavely R A, Stoyer M A, Wilks S C, Yasuike K 2000 *Phys. Plasmas* **7** 2076
- [28] Kumar S, Gupta D N 2020 *Laser Part. Beams* **38** 73
- [29] Snavely R A, Key M H, Hatchett S P, Cowan T E, Roth M, Phillips T W, Stoyer M A, Henry E A, Sangster T C, Singh M S, Wilks S C, MacKinnon A, Offenberger A, Pennington D M, Yasuike K, Langdon A B, Lasinski B F, Johnson J, Perry M D, Campbell E M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2945
- [30] Mora P 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 185002
- [31] Sentoku Y, Cowan T E, Kemp A, Ruhl H 2003 *Phys. Plasmas* **10** 2009
- [32] Fuchs J, Antici P, D'Humieres E, Lefebvre E, Borghesi M, Brambrink E, Cecchetti C A, Kaluza M, Malka V, Manclossi M, Meyroneinc S, Mora P, Schreiber J, Toncian T, Pépin H, Audebert P 2006 *Nat. Phys.* **2** 48
- [33] Mackinnon A J, Sentoku Y, Patel P K, Price D W, Hatchett S, Key M H, Andersen C, Snavely R, Freeman R R 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 215006
- [34] Kaluza M, Schreiber J, Santala M I K, Tsakiris G D, Eidmann K, Meyer-Ter-Vehn J, Witte K J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 045003
- [35] Flacco A, Sylla F, Veltcheva M, Carrié M, Nuter R, Lefebvre E, Batani D, Malka V 2010 *Phys. Rev. E: Stat. Nonlinear Soft Matter Phys.* **81** 036405
- [36] Zeil K, Kraft S D, Bock S, Bussmann M, Cowan T E, Kluge T, Metzkes J, Richter T, Sauerbrey R, Schramm U 2010 *New J. Phys.* **12** 045015
- [37] Margarone D, Klimo O, Kim I J, Prokúpek J, Limpouch J, Jeong T M, Mocek T, Pkal J, Kim H T, Proka J, Nam K H, Tolcová L, Choi I W, Lee S K, Sung J H, Yu T J, Korn G 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 234801
- [38] Margarone D, Kim I J, Psikal J, Kaufman J, Mocek T, Choi I W, Stolcova L, Proska J, Choukourov A, Melnichuk I, Klimo O, Limpouch J, Sung J H, Lee S K, Korn G, Jeong T M 2015 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **18** 071304
- [39] Ogura K, Nishiuchi M, Pirozhkov A S, Tanimoto T, Sagisaka A, Esirkepov T Z, Kando M, Shizuma T, Hayakawa T, Kiriya H, Shimomura T, Kondo S, Kanazawa S, Nakai Y, Sasao H, Sasao F, Fukuda Y, Sakaki H, Kanasaki M, Yogo A, Bulanov S V, Bolton P R, Kondo K 2012 *Opt. Lett.* **37** 2868
- [40] Tresca O, Carroll D C, Yuan X H, Aurand B, Bagnoud V, Brenner C M, Coury M, Fils J, Gray R J, Kuehl T, Li C, Li Y T, Lin X X, Quinn M N, Evans R G, Zielbauer B, Roth M, Neely D, McKenna P 2011 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **53** 105008
- [41] Toncian T, Swantusch M, Toncian M, Willi O, Andreev A A, Platonov K Y 2011 *Phys. Plasmas* **18** 043105
- [42] Poole P L, Obst L, Cochran G E, Metzkes J, Schlenvoigt H P, Prencipe I, Kluge T, Cowan T E, Schramm U, Schumacher D W, Zeil K 2018 *New J. Phys.* **20** 013019

- [43] Dover N P, Nishiuchi M, Sakaki H, Kondo K, Lowe H F, Alkhimova M A, Ditter E J, Ettlinger O C, Faenov A Y, Hata M, Hicks G S, Iwata N, Kiriyama H, Koga J K, Miyahara T, Najmudin Z, Pikuz T A, Pirozhkov A S, Sagisaka A, Schramm U, Sentoku Y, Watanabe Y, Ziegler T, Zeil K, Kando M, Kondo K 2020 *High Energy Density Phys.* **37** 100847
- [44] Perego C, Zani A, Batani D, Passoni M 2011 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **653** 89
- [45] Spencer I, Ledingham K W D, McKenna P, McCanny T, Singhal R P, Foster P S, Neely D, Langley A J, Divall E J, Hooker C J, Clarke R J, Norreys P A, Clark E L, Krushelnick K, Davies J R 2003 *Phys. Rev. E* **67** 046402
- [46] Buffechoux S, Psikal J, Nakatsutsumi M, Romagnani L, Andreev A, Zeil K, Amin M, Antici P, Burris-Mog T, Compant-La-Fontaine A, d'Humières E, Fourmaux S, Gaillard S, Gobet F, Hannachi F, Kraft S, Mancic A, Plaisir C, Sarri G, Tarisien M, Toncian T, Schramm U, Tampo M, Audebert P, Willi O, Cowan T E, Pépin H, Tikhonchuk V, Borghesi M, Fuchs J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 015005
- [47] Neely D, Foster P, Robinson A, Lindau F, Lundh O, Persson A, Wahlström C G, McKenna P 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 021502
- [48] Passoni M, Sgattoni A, Prencipe I, Fedeli L, Dellasega D, Cialfi L, Choi I W, Kim I J, Janulewicz K A, Lee H W, Sung J H, Lee S K, Nam C H 2016 *Phys. Rev. Accel. Beams* **19** 061301
- [49] Zeil K, Metzkes J, Kluge T, Bussmann M, Cowan T E, Kraft S D, Sauerbrey R, Schmidt B, Zier M, Schramm U 2014 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **56** 084004
- [50] Hegelich B M, Albright B J, Cobble J, Flippo K, Letzring S, Paffett M, Ruhl H, Schreiber J, Schulze R K, Fernández J C 2006 *Nature* **439** 441
- [51] Wagner F, Deppert O, Brabetz C, Fiala P, Kleinschmidt A, Poth P, Schanz V A, Tebartz A, Zielbauer B, Roth M, Stöhlker T, Bagnoud V 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 205002
- [52] Passoni M, Perego C, Sgattoni A, Batani D 2013 *Phys. Plasmas* **20** 060701
- [53] Robson L, Simpson P T, Clarke R J, Ledingham K W D, Lindau F, Lundh O, McCanny T, Mora P, Neely D, Wahlstrom C G, Zepf M, McKenna P 2007 *Nat. Phys.* **3** 58
- [54] Nakatsutsumi M, Sentoku Y, Korzhimanov A, Chen S N, Buffechoux S, Kon A, Atherton B, Audebert P, Geissler M, Hurd L, Kimmel M, Rambo P, Schollmeier M, Schwarz J, Starodubtsev M, Gremillet L, Kodama R, Fuchs J 2018 *Nat. Commun.* **9** 280
- [55] Schwoerer H, Pfoth H, Jackel O, Amthor K U, Liesfeld B, Ziegler W, Sauerbrey R, Ledingham K W D, Esirkepov T 2006 *Nature* **439** 445
- [56] Esirkepov T, Borghesi M, Bulanov S V, Mourou G, Tajima T 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 175003
- [57] Yan X Q, Lin C, Sheng Z M, Guo Z Y, Liu B C, Lu Y R, Fang J X, Chen J E 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 135003
- [58] Qiao B, Zepf M, Borghesi M, Dromey B, Geissler M, Karmakar A, Gibbon P 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 155002
- [59] Chen M, Pukhov A, Yu T P, Sheng Z M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 024801
- [60] Robinson A P L, Zepf M, Kar S, Evans R G, Bellei C 2008 *New J. Phys.* **10** 013021
- [61] Qiao B, Zepf M, Borghesi M, Geissler M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 145002
- [62] Zhuo H B, Chen Z L, Yu W, Sheng Z M, Yu M Y, Jin Z, Kodama R 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 065003
- [63] Yu T P, Pukhov A, Shvets G, Chen M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 065002
- [64] Bulanov S S, Brantov A, Bychenkov V Y, Chvykov V, Kalinchenko G, Matsuoka T, Rousseau P, Reed S, Yanovsky V, Litzenberg D W, Krushelnick K, Maksimchuk A 2008 *Phys. Rev. E* **78** 026412
- [65] Grech M, Skupin S, Nuter R, Gremillet L, Lefebvre E 2009 *New J. Phys.* **11** 093035
- [66] Aurand B, Kuschel S, Jäckel O, Rödel C, Zhao H Y, Herzer S, Paz A E, Bierbach J, Polz J, Elkin B, Paulus G G, Karmakar A, Gibbon P, Kuehl T, Kaluza M C 2013 *New J. Phys.* **15** 033031
- [67] Henig A, Steinke S, Schmurder M, Sokollik T, Horlein R, Kiefer D, Jung D, Schreiber J, Hegelich B M, Yan X Q, Meyer-ter-Vehn J, Tajima T, Nickles P V, Sandner W, Habs D 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 245003
- [68] Kar S, Kakolee K F, Qiao B, Macchi A, Cerchez M, Doria D, Geissler M, McKenna P, Neely D, Osterholz J, Prasad R, Quinn K, Ramakrishna B, Sarri G, Willi O, Yuan X Y, Zepf M, Borghesi M 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 185006
- [69] Steinke S, Hilz P, Schnürer M, Priebe G, Bränzel J, Abicht F, Kiefer D, Kreuzer C, Ostermayr T, Schreiber J, Andreev A A, Yu T P, Pukhov A, Sandner W 2013 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **16** 011303
- [70] Kim I J, Pae K H, Kim C M, Kim H T, Sung J H, Lee S K, Yu T J, Choi I W, Lee C L, Nam K H, Nickles P V, Jeong T M, Lee J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 165003
- [71] Bin J H, Ma W J, Wang H Y, Streeter M J V, Kreuzer C, Kiefer D, Yeung M, Cousens S, Foster P S, Dromey B, Yan X Q, Ramis R, Meyer-Ter-Vehn J, Zepf M, Schreiber J 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 064801
- [72] Bergé L, Skupin S, Nuter R, Kasparian J, Wolf J P 2007 *Rep. Prog. Phys.* **70** R03 1633
- [73] Wang H Y, Lin C, Sheng Z M, Liu B, Zhao S, Guo Z Y, Lu Y R, He X T, Chen J E, Yan X Q 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 265002
- [74] Kim I J, Pae K H, Choi I W, Lee C-L, Kim H T, Singhal H, Sung J H, Lee S K, Lee H W, Nickles P V, Jeong T M, Kim C M, Nam C H 2016 *Phys. Plasmas* **23** 070701
- [75] Bulanov S S, Brantov A, Bychenkov V Y, Chvykov V, Kalinchenko G, Matsuoka T, Rousseau P, Reed S, Yanovsky V, Krushelnick K, Litzenberg D W, Maksimchuk A 2008 *Med. Phys.* **35** 1770
- [76] Andreev A, Lévy A, Ceccotti T, Thauray C, Platonov K, Loch R A, Martin P 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 155002
- [77] Antici P, Fuchs J, d'Humieres E, Lefebvre E, Borghesi M, Brambrink E, Cecchetti C A, Gaillard S, Romagnani L, Sentoku Y, Toncian T, Willi O, Audebert P, Pépin H 2007 *Phys. Plasmas* **14** 030701
- [78] Yin Y, Yu W, Yu M Y, Lei A, Yang X, Xu H, Senecha V K 2008 *Phys. Plasmas* **15** 093106
- [79] Xiao K D, Zhou C T, Jiang K, Yang Y C, Li R, Zhang H, Qiao B, Huang T W, Cao J M, Cai T X, Yu M Y, Ruan S C, He X T 2018 *Phys. Plasmas* **25** 023103
- [80] Wan Y, Pai C H, Zhang C J, Li F, Wu Y P, Hua J F, Lu W, Joshi C, Mori W B, Malka V 2018 *Phys. Rev. E* **98** 013202
- [81] Wan Y, Andriyash I A, Lu W, Mori W B, Malka V 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 104801
- [82] Pegoraro F, Bulanov S V 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 065002
- [83] Palmer C A J, Schreiber J, Nagel S R, Dover N P, Bellei C, Beg F N, Bott S, Clarke R J, Dangor A E, Hassan S M, Hilz P, Jung D, Kneip S, Mangles S P D, Lancaster K L,

- Rehman A, Robinson A P L, Spindloe C, Szerypo J, Tatarakis M, Yeung M, Zepf M, Najmudin Z 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 225002
- [84] Koyama K, Petre R, Gotthelf E V, Hwang U, Matsuura M, Ozaki M, Holt S S 1995 *Nature* **378** 255
- [85] Caprioli D, Blasi P, Amato E 2011 *Astropart. Phys.* **34** 447
- [86] Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. 2011 *Science* **332** 69
- [87] Zhidkov A, Uesaka M, Sasaki A, Daido H 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 215002
- [88] Silva L O, Marti M, Davies J R, Fonseca R A, Ren C, Tsung F S, Mori W B 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 015002
- [89] Zhang W L, Qiao B, Huang T W, Shen X F, You W Y, Yan X Q, Wu S Z, Zhou C T, He X T 2016 *Phys. Plasmas* **23** 073118
- [90] Fiuza F, Stockem A, Boella E, Fonseca R A, Silva L O, Haberberger D, Tochitsky S, Gong C, Mori W B, Joshi C 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 215001
- [91] Wei M S, Mangles S P D, Najmudin Z, Walton B, Gopal A, Tatarakis M, Dangor A E, Clark E L, Evans R G, Fritztler S, Clarke R J, Hernandez-Gomez C, Neely D, Mori W, Tzoufras M, Krushelnick K 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 155003
- [92] Haberberger D, Tochitsky S, Fiuza F, Gong C, Fonseca R A, Silva L O, Mori W B, Joshi C 2012 *Nat. Phys.* **8** 95
- [93] Zhang H, Shen B F, Wang W P, Zhai S H, Li S S, Lu X M, Li J F, Xu R J, Wang X L, Liang X Y, Leng Y X, Li R X, Xu Z Z 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 164801
- [94] Tochitsky S, Pak A, Fiuza F, Haberberger D, Lemos N, Link A, Froula D H, Joshi C 2020 *Phys. Plasmas* **27** 083102
- [95] He H, Qiao B, Shen X F, Yao W P, Xie Y, Zhou C T, He X T, Zhu S P, Pei W B, Fu S Z 2019 *New J. Phys.* **21** 033035
- [96] Yin L, Albright B J, Hegelich B M, Bowers K J, Flippo K A, Kwan T J T, Fernández J C 2007 *Phys. Plasmas* **14** 056706
- [97] Hegelich B M, Pomerantz I, Yin L, Wu H C, Jung D, Albright B J, Gautier D C, Letzring S, Palaniyappan S, Shah R, Allinger K, Hörlein R, Schreiber J, Habs D, Blakeney J, Dyer G, Fuller L, Gaul E, McCary E, Meadows A R, Wang C, Ditmire T, Fernandez J C 2013 *New J. Phys.* **15** 085015
- [98] Ostermayr T M, Haffa D, Hilz P, Pauw V, Allinger K, Bamberg K U, Böhl P, Bömer C, Bolton P R, Deutschmann F, Ditmire T, Donovan M E, Dyer G, Gaul E, Gordon J, Hegelich B M, Kiefer D, Klier C, Kreuzer C, Martinez M, McCary E, Meadows A R, Moschüring N, Rösch T, Ruhl H, Spinks M, Wagner C, Schreiber J 2016 *Phys. Rev. E* **94** 033208
- [99] Zigler A, Eisenman S, Botton M, Nahum E, Schleifer E, Baspaly A, Pomerantz I, Abicht F, Branzel J, Priebe G, Steinke S, Andreev A, Schmuerer M, Sandner W, Gordon D, Sprangle P, Ledingham K W D 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 215004
- [100] Naumova N, Schlegel T, Tikhonchuk V T, Labaune C, Sokolov I V, Mourou G 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 025002
- [101] Zigler A, Palchan T, Bruner N, Schleifer E, Eisenmann S, Botton M, Henis Z, Pikuz S A, Faenov A Y, Gordon D, Sprangle P 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 134801
- [102] Brenner C M, Robinson A P L, Markey K, Scott R H H, Gray R J, Rosinski M, Deppert O, Badziak J, Batani D, Davies J R, Hassan S M, Lancaster K L, Li K, Musgrave I O, Norreys P A, Pasley J, Roth M, Schlenvoigt H P, Spindloe C, Tatarakis M, Winstone T, Wolowski J, Wyatt D, McKenna P, Neely D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 081123
- [103] Markey K, McKenna P, Brenner C M, Carroll D C, Guenther M M, Harres K, Kar S, Lancaster K, Nuernberg F, Quinn M N, Robinson A P L, Roth M, Zepf M, Neely D 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 195008
- [104] Wang D, Shou Y, Wang P, Liu J, Li C, Gong Z, Hu R, Ma W, Yan X 2018 *Sci. Rep.* **8** 2536
- [105] Rahman O, Tong S F, Sheng Z M 2020 *Phys. Plasmas* **27** 033107
- [106] Robinson A P L, Neely D, McKenna P, Evans R G 2007 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **49** 373
- [107] Ma W J, Kim I J, Yu J Q, Choi I W, Singh P K, Lee H W, Sung J H, Lee S K, Lin C, Liao Q, Zhu J G, Lu H Y, Liu B, Wang H Y, Xu R F, He X T, Chen J E, Zepf M, Schreiber J, Yan X Q, Nam C H 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 014803
- [108] Scullion C, Doria D, Romagnani L, Sgattoni A, Naughton K, Symes D R, McKenna P, Macchi A, Zepf M, Kar S, Borghesi M 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 054801
- [109] Bulanov S V, Dyllov D V, Esirkepov T Z, Kamenets F F, Sokolov D V 2005 *Plasma Phys. Rep.* **31** 369
- [110] Park J, Bulanov S S, Bin J, Ji Q, Steinke S, Vay J L, Geddes C G R, Schroeder C B, Leemans W P, Schenkel T, Esarey E 2019 *Phys. Plasmas* **26** 103108
- [111] Liu B, Meyer-Ter-Vehn J, Bamberg K U, Ma W J, Liu J, He X T, Yan X Q, Ruhl H 2016 *Phys. Rev. Accel. Beams* **19** 073401
- [112] Liu B, Meyer-Ter-Vehn J, Ruhl H 2018 *Phys. Plasmas* **25** 103117
- [113] Shen X F, Qiao B, Zhang H, Xie Y, Kar S, Borghesi M, Zepf M, Zhou C T, Zhu S P, He X T 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 144102
- [114] Pfothenhauer S M, Jäckel O, Polz J, Steinke S, Schlenvoigt H P, Heymann J, Robinson A P L, Kaluza M C 2010 *New J. Phys.* **12** 103009
- [115] Wang W P, Shen B F, Zhang H, Lu X M, Li J F, Zhai S H, Li S S, Wang X L, Xu R J, Wang C, Leng Y X, Liang X Y, Li R X, Xu Z Z 2018 *Phys. Plasmas* **25** 063116
- [116] Toncian T, Borghesi M, Fuchs J, d'Humieres E, Antici P, Audebert P, Brambrink E, Cecchetti C A, Pipahl A, Romagnani L, Willi O 2006 *Science* **312** 410
- [117] Wang H C, Weng S M, Murakami M, Sheng Z M, Chen M, Zhao Q, Zhang J 2017 *Phys. Plasmas* **24** 093117
- [118] He H, Qiao B, Shen X F, Yao W P, Yao Y L, Zhou C T, He X T, Zhu S P, Pei W B, Fu S Z 2019 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **61** 115005
- [119] Kar S, Ahmed H, Prasad R, Cerchez M, Brauckmann S, Aurand B, Cantono G, Hadjisolomou P, Lewis C L S, Macchi A, Nersisyan G, Robinson A P L, Schroer A M, Swantusch M, Zepf M, Willi O, Borghesi M 2016 *Nat. Commun.* **7** 10792
- [120] Kar S, Ahmed H, Nersisyan G, Brauckmann S, Hanton F, Giesecke A L, Naughton K, Willi O, Lewis C L S, Borghesi M 2016 *Phys. Plasmas* **23** 055711
- [121] Ahmed H, Kar S, Giesecke A L, Doria D, Nersisyan G, Willi O, Lewis C L S, Borghesi M 2017 *High Power Laser Sci. Eng.* **5** e4
- [122] Ahmed H, Kar S, Cantono G, Hadjisolomou P, Poye A, Gwynne D, Lewis C L S, Macchi A, Naughton K, Nersisyan G, Tikhonchuk V, Willi O, Borghesi M 2017 *Sci. Rep.* **7** 10891
- [123] Bardou M, Moreau J G, Romagnani L, Rousseaux C, Ferri M, Lefèvre F, Lantuéjoul I, Etchessahar B, Bazzoli S, Farcage D, Maskrot H, Serres F, Chevrot M, Loyez E, Veullot E, Cayzac W, Vauzour B, Boutoux G, Sary G,

- Compant La Fontaine A, Gremillet L, Poyé A, D'Humières E, Tikhonchuk V T 2020 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **62** 125019
- [124] Danson C N, Haefner C, Bromage J, Butcher T, Chanteloup J C F, Chowdhury E A, Galvanauskas A, Gizzi L A, Hein J, Hillier D I, Hopps N W, Kato Y, Khazanov E A, Kodama R, Korn G, Li R, Li Y, Limpert J, Ma J, Nam C H, Neely D, Papadopoulos D, Penman R R, Qian L, Rocca J J, Shaykin A A, Siders C W, Spindloe C, Szatmári S, Trines R M G M, Zhu J, Zhu P, Zuegel J D 2019 *High Power Laser Sci. Eng.* **7** e54
- [125] Margarone D, Cirrone G, Cuttone G, Amico A, Andò L, Borghesi M, Bulanov S, Bulanov S, Chatain D, Fajstavr A, Giuffrida L, Grepl F, Kar S, Krasa J, Kramer D, Larosa G, Leanza R, Levato T, Maggiore M, Manti L, Milluzzo G, Odlozilik B, Olsovcova V, Perin J-P, Pipek J, Psikal J, Petringa G, Ridky J, Romano F, Rus B, Russo A, Schillaci F, Scuderi V, Velyhan A, Versaci R, Wiste T, Zakova M, Korn G 2018 *Quantum Beam Sci.* **2** 8
- [126] Wu M, Zhu J, Li D, Yang T, Liao Q, Geng Y, Xu X, Li C, Shou Y, Zhao Y, Lu Y, Lu H, Ma W, Lin C, Zhu K, Yan X 2020 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **955** 163249

SPECIAL TOPIC—Ultra short ultra intense laser plasma physics

## Experimental progress of laser-driven high-energy proton acceleration and new acceleration schemes\*

Ma Wen-Jun<sup>1)2)†</sup> Liu Zhi-Peng<sup>1)2)</sup> Wang Peng-Jie<sup>1)2)</sup>

Zhao Jia-Rui<sup>1)2)</sup> Yan Xue-Qing<sup>1)2)3)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*)

2) (*Beijing Laser Acceleration Innovation Center, Beijing 101407, China*)

3) (*Center for Applied Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*)

( Received 14 December 2020; revised manuscript received 13 January 2021 )

### Abstract

The acceleration of high-energy ions by the interaction of plasma with ultra-intense laser pulses is a frontier in the fields of laser plasma physics and accelerator physics. Laser-driven ion acceleration has achieved great success and triggered plenty of new applications after nearly twenty years' development. This paper reviews the important experimental progress of laser-driven high-energy proton acceleration, discusses some critical issues that influence the acceleration. It also gives an introduction to new acceleration schemes developed in recent years, which promise to generate over 200 MeV protons.

**Keywords:** laser-drive ion acceleration, laser-driven acceleration experimental results, laser-driven acceleration schemes, laser plasma accelerator

**PACS:** 41.75.Jv, 52.38.Kd, 52.50.Jm

**DOI:** 10.7498/aps.70.20202115

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2019YFF01014402), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61631001), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11775010), and the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11921006).

† Corresponding author. E-mail: [wenjun.ma@pku.edu.cn](mailto:wenjun.ma@pku.edu.cn)