



从激光加速到激光加速器

——<mark>激光驱动多束流设施</mark>十四五大科学装置

颜学庆

北京大学物理学院重离子物理研究所

核物理与核技术国家重点实验室(北京大学)

2019.08.09@合肥







一、超强飞秒激光技术 (CPA) 简介

- 二、激光加速原理简介
- 三、北京大学激光加速研究进展
- 四、未来计划



激光光强持续提高









D. Strickland and G. Mourou, *Compression of amplified chirped optical pulses*, Opt. Commun. 56, 219 (1985)



激光功率增强百万倍以上!!







- 磁场强度; 10⁹ Gauss
- ・温度; 10¹⁰ K (~ MeV)
 - (sun core: 1.5*10⁷K)
- ・ 压力(P=I/c); 10⁹ Bars

(The atmospheric pressure at the Earth's surface: 1.013 Bars)

・加速度; 10²⁰ g



CPA激光功率比世界发电总功率高100倍







I (W/cm²)













加速器研究推动着人类文明进步, 20世纪近半数的诺贝尔物理和化学奖与粒子加速 及其应用有关









CPA



激光加速器:下一代先进宽谱辐射源









激光加速器: 1) 离子加速器; 2) 高亮度X/γ光源;3)对撞机









激光加速产生超高亮度伽马光源,通过光核物理逆过程 (y, x) 探索重元素合成机制 (a, Y) Z, 质子数 (y. n) $[n, \gamma]$ (Y, a

The s process, Rev. Mod. Phys. 83, 157 (2011). The r process, Phys. Rep. 450, 97 (2007). The p process, Phys. Rep. 384, 1 (2003).



科学问题: 高温高压状态下核反应截面测量

SKL

在高温高压等离子体下11B(p, α)、 19F(p, α)反应截面比常温 实验室环境下高1-2个量级? 相关研究将对于聚变能源、天体物 理将具有重要的意义。



Nature Comm. 4, 2506 (2013).

激光可以产生<mark>高品质质子</mark>,也是目前实验室条件下产生<mark>高能量密度</mark> 等离子体状态的唯一技术手段。







一、超强飞秒激光技术 (CPA) 简介

- 二、激光加速原理简介
- 三、北京大学激光加速研究进展
- 四、未来计划

IQ

Norman Rostocker教授提出协同加速机制



۷ьо

The early part of the research was carried out under the auspices of the National Science Foundation Grant No. PHY76-12P56 at the University of California at Irvine in the mid 1970's, and was much inspired by Professor N. Rostoker. Later the work was supported by the Office of Naval

by a reflexing electro

Collective ion acceleration by a reflexing electro

F. Mako

Naval Research Laboratory, Washington, D. C. 20375

T. Tajima

Institute for Fusion Studies, University of Texas, Austin, Texas 78712

(Received 21 June 1983; accepted 2 April 1984)

Analytical and numerical calculations are presented for a reflexing electron beam type of collective ion accelerator. These results are then compared to those obtained through experiment. By constraining one free parameter to experimental conditions, the self-similar solution of the ion energy distribution agrees closely with the experimental distribution. Hence the reflexing beam model appears to be a valid model for explaining the experimental data. Simulation shows in addition to the agreement with the experimental ion distribution that synchronization between accelerated ions and electric field is phase unstable. This instability seems to further restrict the maximum ion energy to several times the electron energy.



ling





1975年, Tajima博士毕业成为Dawson的博士后

John M Dawson (1930-2001)



Toshiki Tajima



Volume 43, Number 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

23 July 1979

Laser Electron Accelerator

T. Tajima and J. M. Dawson Department of Physics, University of California, Los Angeles, California 90024 (Received 9 March 1979)

An intense electromagnetic pulse can create a weak of plasma oscillations through the action of the nonlinear ponderomotive force. Electrons trapped in the wake can be accelerated to high energy. Existing glass lasers of power density 10^{18} W/cm² shone on plasmas of densities 10^{18} cm⁻³ can yield gigaelectronvolts of electron energy per centimeter of acceleration distance. This acceleration mechanism is demonstrated through computer simulation. Applications to accelerators and pulsers are examined.







激光推开等离子体电子 波速 = 激光的群速度









Courtesy of W. Mori & L. da Silva



激光尾场电子加速器进展





激光粒子加速器





加速梯度 ~100 GV/m



2004年Nature 杂志封面 小型化粒子加速器的黎明

Top Ten Physics News physics Stories in 2014

Tabletop Accelerator

In December, scientists at Lawrence Berkeley National Lab announced a new world record for a compact particle accelerator. The team used a tabletop-sized laser-plasma accelerator to energize electrons up to 4.25 GeV. Though not nearly as powerful as the massive LHC, the tiny BELLA accelerator can do in about one meter what would take CERN 1,000 meters. Physicists hope that this emerging compact accelerator technology will pave the way to new generations of particle colliders.

By Prof.R.X.Li





手掌上的GeV加速器

103倍!



SCIENTIFIC AMERICAN

New Orleans from Exture Storms TERRITARI SOOL

How to Protect

Big Physics rets Sm

Tabletop Accelerators Make Particles Surf on Plasma Waves

How to Stop **Nuclear Terrorists**

Guess Who **Owns Your Genes**?

CSI- Washington (Casta

潜在价值:更小的尺度、更高 的亮度、更短的脉宽、更高的 能量--未来的加速器和光源!



2015年, 9厘米长 4GeV电子 激光尾波场加速器



新型宽谱高亮度辐射源











一、超强飞秒激光技术 (CPA) 简介

二、激光加速原理简介

三、北京大学激光加速研究进展

四、未来大科学装置设想







At Lawrence Berkeley National Laboratory in California, a petawatt-class laser at the Berkeley Lab Laser Accelerator (BELLA) facility is used to accelerate electrons to 4.2 GeV over a distance of 9 cm [78]. This is an acceleration gradient of at least two orders of magnitude higher than what can be obtained with RF technology. That there are many remaining challenges before laser accelerators can be used for medical applications is well understood [79].



Pioneering work of collective ion



Collective ion acceleration by a reflexing electron beam: Model and scaling

F. Mako Naval Research Laboratory, Washington, D. C. 20375

T. Tajima Institute for Fusion Studies, University of Texas, Austin, Texas 78712

(Received 21 June 1983; accepted 2 April 1984)

Analytical and numerical calculations are presented for a reflexing electron beam type of collective ion accelerator. These results are then compared to those obtained through experiment. By constraining one free parameter to experimental conditions, the self-similar solution of the ion energy distribution agrees closely with the experimental distribution. Hence the reflexing beam model appears to be a valid model for explaining the experimental data. Simulation shows in addition to the agreement with the experimental ion distribution that synchronization between accelerated ions and electric field is phase unstable. This instability seems to further restrict the maximum ion energy to several times the electron energy.

The early part of the research was carried out under the auspices of the National Science Foundation Grant No. PHY76-12P56 at the University of California at Irvine in the mid 1970's, and was much inspired by Professor N. Rostoker. Later the work was supported by the Office of Naval





Target Normal Sheath Acceleration



Phys. Rev. Lett. 85, 2945 (2000); Nature 439, 441 (2006); 439, 445 (2006).



Progress of TNSA Ion acceleration





Maximum proton energy 60 MeV in 2000 and 85 MeV in 2016, moreover the spectrum is still exponential!

Phys. Rev. Lett. 85, 2945 (2000).

Phys. Plasmas 18, 056710 (2011)



How to accelerate heavy lon?







北京时间4月13日8点零8分,著名天体物理学家史蒂芬·霍金在纽约发布了一条微博,宣布将启动一个超级 科研项目:建造一个激光推进的微型星际飞行器,预计最快用20年抵达离太阳系最近的恒星系统——半 人马座阿尔法星 (Alpha Centauri)。

霍金的微博原文如下:

我在纽约向中国的各位问好!在纽约城的一号楼观景台,我和尤里·米尔纳启动了'突破摄星' 计划 (Breakthrough Starshot),马克·扎克伯格也加入了该计划的董事会,为'突破摄星'助一 臂之力。

在一代人的时间内, '突破摄星' 旨在研发出一台 '纳米飞行器' —— 一台质量为克级的自动 化太空探测器 —— 并且通过光束把它推动到五分之一的光速。如果我们成功的话,这个飞越任务 将会在发射后二十年左右到达半人马座阿尔法星,并发送回来在那个星系中发现的行星的图片。

爱因斯坦曾经幻想在宇宙中乘着一道光线飞驰,这个思想实验为他的狭义相对论奠定了基础。一个多世纪后,我们有机会可以达到光速的一小部分:一亿英里每小时。只有通过这么快的速度, 我们才有希望在人类的时间尺度内到达那些恒星。

这个项目耗资巨大,雄心勃勃地希望探索人类创新和工程学的极限。能参与这样的项目,非常令人兴奋。



RPA-CAIL for ion acceleration



28

Sailboat





X.Q.Yan et al, PRL 100, 135003 (2008) T.Tajima, D.Habs, X.Q.Yan, RAST, (2009) 1–26

Fig. 4. Schematic picture of Coherent Acceleration of Ions by Laser (CAIL), in particular that of Radiation Pressure Accel-



Conversion Efficiency (CE)



A. Einstein, Annalen der Physik 17, 891 (1905)



X.Q.Yan et al, PRL 100, 135003 (2008)

Self-organizing nc GeV proton in Phase Stable regime

,SKL



31





Proton energy E ~ I (laser intensity)



Experimental results for proton energy







1%能散15MeV质子加速器建成出束



J.G.Zhu,..., C.Lin, X.Q.Yan, submitted, 2019)

SKL

Focusing of the mono-energetic proton beam

3 MeV, 1%



5 MeV, 1%



4 MeV, 1%



6 MeV, 1%














SOBP at CLAPA Beam line

SOBP, a key technology of proton radiotherapy, is realized with laser accelerator for the first time at PKU.





世界上第一台1%能散激光离子加速器



北京大学首次提出并实验证实光压稳相加速新方法,解决了加速离 子能散大、能量低等关键物理问题。CLAPA可以像常规加速器一 样稳定的运行,在国际上首次实现从激光加速到激光加速器的跨越。

PRL 100, 135003 PRL 102, 239502 PRL 102, 239502 PRL 103, 245003 PRL 107, 115002 PRL 107, 265002 PRL 115, 064801 PRL 110, 045002 PRL, 122, 014803

光压加速类似于风帆驱动原理



国家重大仪器专项:超小型激光离子加速器及关键技术研究建成出束













激光质子加速器装置教育部验收意见

项目建成了世界上首台1%能散激光离子加速器,可稳定运行,首次实现从激光加速到激光质子加速器的跨越。

项目建成了世界上首台超小型激光离子加速器,并开展了其在生物辐照、空间辐射模拟等方面的研究。项目团队攻克了超强超短飞秒激光系统、纳米靶材制备技术、激光加速靶场关键物理问题、束流传输线和辐照平台设计搭建等多个关键技术,成功加速产生能量1-15 MeV 的质子束,稳定性优于3%。在辐照终端上获得了能量为3 MeV-9 MeV,能散1%,电量为1 pC-20 pC 的的高流强、短脉冲质子束;真空辐照野5*5-20*20 mm² 可调,大气辐照野为3*3 mm²,选能区间内束流传输效率优于90%。

研发的激光加速器运行稳定,在国际上首次实现了从激光加速到激光质子加速器的跨越。

序号	姓名	工作单位	职务/职称	专业	联系电话	签字
1	孙冬柏	中山大学	常务副校长			2325
2	祝世宁	南京大学	院士		C	- RE-2
3	娄安如	北京师范大学	教授/处长			ton
4	贺贤土	应用物理与计算 数学研究所	院士			戏出
5	王乃彦	中国原子能科学 研究院	院士			3/4/3
6	韩杰才	哈尔滨工业大学	副校长/院 士			素表
7	邰忠智	中山大学	校长助理			have
8	金铎	中科院基础局	教授			2:08
9	赵志祥	中国原子能科学 研究院	研究员			SUZUZ
10	张丰收	北京师范大学	教授			Raps
11	陈京	应用物理与计算 数学研究所	教授			万岁
12	黄文会	清华大学	教授			勘
13	张天爵	中国原子能科学 研究院	教授			34.4.8
验收	专家组组-	K (签字): フィタイル				4





创造600 MeV碳离子加速新记录



600MeV离子加速新记录



W.J.Ma, et al., PRL, 122, 014803

W.J.Ma, et al., **PRL. 115, 064801 (2015).** PRL编辑推荐文章



GeV Au cut-off energy @GIST/IBS



Shot no : 764 Au⁵⁰⁺: 1GeV

New record!!

Shot no : 805 Cu²¹⁺: 400MeV Shot no : 796 Ag³¹⁺: 400MeV

Shot no : 767 Al¹¹⁺: 200MeV

> Note: Al lines can be overlapped with carbon/oxygen lines







离子束应用:细胞辐照与离子超声



辐照终端@杜广华



Simulation of the space radiation effects by irradiating the AICHI magnetic field sensor installed on FY3 satellite 5.0300e+05/shot 6.32 Gy/shot In air, 5 MeV, 5% ΔE





质子声波







离子束应用: ITER等离子体诊断



激光离子束轨迹探针 Laser-driven Ion-beam Trace Probe (LITP) 比较传统HIBP: 静电分析仪 • 诊断托卡马克极向磁场、径向磁场和 加速器 径向电场: • 二维剖面: • 空间分辨: • 体积较小、造价较低、维护相对简单: 大能散 📥 诊断区域,反演算法 大散角 📥 二维空间分辨 短脉冲 ➡ 飞行时间法分辨能量 多价态 📥 同时诊断磁场与电场











离子束潜在应用: 超短超密离子束核物理







~1 um*5um*5um

~10¹⁰-10¹¹离子

- ▶ 高能离子密度可达10²¹/cm³, 是传统加速器产生的离子密度的10¹⁰倍。
 - ▶ 与目标靶作用后可产生大量的短寿命核素碎片。他们之间相互碰撞反 应的几率大大增加。可产生常规条件下很难产生的短寿命核素。

D. Habs et al., Applied Physics B, 2011, 103(2): 471-484.

•ELI 核物理白皮书 (马文君、颜学庆参与撰写)







激光与纳米阵列相互作 用,可以显著提高吸收 效率,提升等离子体的 <u>温度和密度!!</u>

可控的密度和温度参数 , 将为DD, B (p,α)反 应提供新的研究途径!



55-nm-thin, 15-µm-long Ni nanowires

M. A. Purvis, V. N. Shlyaptsev, R. Hollinger, C. Bargsten, A. Pukhov, A. Prieto, Y. Wang, B. M. Luther, L. Yin, S. Wang, and J. J. Rocca, Nature Photonics 7, 796 (2013).

K. K. Ostrikov, F. Beg, and A. Ng, Reviews of Modern Physics 88, 011001 (2016).



高亮度伽马光源产生与应用











Courtesy of P. Favier: Review of Compton sources

Nom	Type	Flux (ph/s)	Energie (keV)	Divergence (mrad)	$\Delta E_{X,\gamma}/E_{X,\gamma}$ (%)	Statut	
AIST [62]	L-CP	107	12-40	2.5	4	Opération	
MEGa-ray [37]	L-CP	1.6 x 10 ⁶	478	60	12	Opération/Développement	直线 -
TTX [63]	L-CP	10^{8}	52	4.8-6.7	4	Opération	激光
STAR [64]	L-CP	10 ⁸	40-140	10	1-10	Financé / Développement	
CXLS [38]	L-CP	$5 \ge 10^{11}$	12.4	4.3	5	Non financé / Développement	
SXFEL [39]	L-CP	4.5 x 10 ⁷	$3.7-39 \ge 10^3$	0.8	< 0.5	Non financé / Développement	百线_激光
ELI-NP-GBS [25]	L-CO	8 x 10 ⁸	$0.2-19.5 \ge 10^3$	0.025-0.2	< 0.5	Financé / Développement	正法规
ELSA [40]	L-CO	$2.9 \ge 10^4$	11	10	/	Opération	小 沉奋
Smart Light [65]	L-CO	$> 10^{5}$	60	1	1	Financé / Développement	
cERL [66]	L-FP	$3 \ge 10^7$	7	0.14	0.4	Opération	
LUCX [67, 68]	L-FP	$3 \ge 10^6$	10	/	5	Opération	PF腔
BRIXS [69]	L-FP	10 ¹¹	20-90	/	/	Non financé / Développement	
FERMILAB [70]	L-FP	$8 \ge 10^9$	$1.1 \ge 10^{3}$	/	0.25	Non financé / Développement	CKL - FF#
NewSUBARU [71, 18]	A-CP	$5 \ge 10^6$	$1.7-4 \ge 10^3$	/	/	Opération	储存环-激
LEPS2 [72]	A-CP	$7 \ge 10^6$	$0-2.4 \ge 10^{6}$	/	/	Opération	*
GRAAL [73]	A-CP	$3 \ge 10^6$	$0.4\text{-}1.5 \ge 10^6$	/	1.1	Opération	
SLEGS [74]	A-CP	10^{9-11}	$22 \ge 10^3$	/	/	Non financé / Développement	储存环-
HIgS [75]	A-FEL	3 x 10 ⁷⁻⁹	$1-100 \ge 10^3$	/	/	Opération	FEL
UVSOR [76]	A-FEL	$1.6 \ge 10^8$	$15-25 \ge 10^3$	/	3	Opération	
MuCLS/CLS [46, 47]	A-FP	$3 \ge 10^{10}$	15-35	4	3	Opération / Commercialisé	储仔坏-
MightyLaser [48]	$\mathbf{A}\text{-}\mathbf{F}\mathbf{P}$	$4 \ge 10^8$	$24 \ge 10^3$	/	/	Démonté (2014)	FP腔
ThomX [26]	A-FP	10^{11-13}	45-90	10	1-10	Financé / Développement	

光子数目有待提高: 1)提升电子数目;2)寻找更高效的产生机制



微型管靶高亮度伽马光源



提高伽马光子的数目和降低发散角:

1) 同步辐射产生伽玛光子; 2) 纵向加速占主导。





Jinqing Yu, et al. APL 2018



全光驱动伽马对撞机(见余金清报告)





Jinqing Yu, PRL, under review 2018 Jinqing Yu, et al. APL 2018

	10 F	W	40 PW		
Br at 0.5 MeV	$4.8 \times$	10^{23}	4.5×10^{24}		
Br at 100 ${\rm MeV}$	$1.5 \times$	10^{25}	$1.4 imes 10^{26}$		
$N_{\gamma} \ (> 100 \ {\rm keV})$	$9.3 imes 10^{13}$		6.33×10^{14}		
$ heta_\gamma$	~	3°	$\sim 2^{\circ}$		
	$\mu^{-}\mu^{+}$	e^-e^+	$\mu^{-}\mu^{+}$	e^-e^+	
$\theta_c = 180^{\circ}$	1.3	3.4×10^8	160.5	2.8×10^{10}	
$\theta_c = 150^{\circ}$	1.1	$3.0 imes 10^8$	137.7	2.5×10^{10}	
$\theta_c = 120^{\circ}$	0.64	2.2×10^8	85.1	1.8×10^{10}	
$\theta_c = 90^\circ$	0.23	1.2×10^8	34.2	9.4×10^9	
$\theta_c = 60^{\circ}$	$3.5 imes 10^{-2}$	3.9×10^7	6.7	3.1×10^9	

In one pulse, more than $1 \times 10^{14} \gamma$ -ray photons with a divergence of 3 degrees are generated. At 0.5 MeV, the brilliance of the γ -ray pulse is about 10^{25} photons s⁻¹ mm⁻² mrad⁻² 0.1%BW.



更高亮度的伽马光源





J.Q.Yu, et al., PRL, 122, 014802







●单发产生10^14伽马光子

•第一次在实验室中观察和测量实光子与实光 子之间的对撞和散射 ($\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ light-by-light scattering) (BW过程)

•第一次在实验室中观察和测量实光子与实光 子之间的对撞产生 Breit-Wheeler 正负电子对 ($\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 直接测量能量到物质的转化)



	10 F	νW	40 PW		
Br at 0.5 MeV	$4.8 \times$	10^{23}	$4.5 imes 10^{24}$		
Br at 100 MeV	$1.5 \times$	10^{25}	1.4×10^{26}		
$N_{\gamma} \ (> 100 \ \mathrm{keV})$	$9.3 imes 10^{13}$		6.33×10^{14}		
$ heta_\gamma$	$\sim 3^{\circ}$		$\sim 2^{\circ}$		
	$\mu^{-}\mu^{+}$	e^-e^+	$\mu^{-}\mu^{+}$	e^-e^+	
$\theta_c = 180^{\circ}$	1.3	3.4×10^8	160.5	2.8×10^{10}	
$\theta_c = 150^{\circ}$	1.1	3.0×10^8	137.7	2.5×10^{10}	
$\theta_c = 120^{\circ}$	0.64	2.2×10^8	85.1	1.8×10^{10}	
$\theta_c = 90^{\circ}$	0.23	1.2×10^8	34.2	9.4×10^9	
$\theta_c = 60^{\circ}$	$3.5 imes 10^{-2}$	3.9×10^7	6.7	3.1×10^9	

J.Q.Yu, et al., PRL, 122, 014802







激光加速产生超高亮度伽马光源,通过光核物理逆过程 (y, x) 探索重元素合成机制 (a, Y) AG NOMIN Z, 质子数 (y. n) $[n, \gamma]$ (Y, a

The s process, Rev. Mod. Phys. 83, 157 (2011). The r process, Phys. Rep. 450, 97 (2007). The p process, Phys. Rep. 384, 1 (2003).





- 研究辐射俘获反应的重要手段
 - (p,γ)、(α,γ)、(n,γ)反应,产生能量,合成元素
- 研究方法的原理
 - 在伽玛光源上测量(γ, x)反应
 - 基于细致平衡原理, 辐射俘获反应(x, γ)布居产物基态的 截面 σ_A 可通过测量光致裂解反应(γ, x)的截面 σ_B 导出
 - 研究产物核能级密度 (NLD) , 统计模型中的基本参数
- 研究方法的优势
 - 天体物理能区某些反应的σ(γ,x)与σ(x,γ)之比可高达两个 量级
 - γ-射线在介质中的平均吸收长度容许采用厚靶
 - ¹⁶O(γ,α)¹²C比¹²C(α,γ)¹⁶O的反应产额高~2个数量级





- ・4.1 建设面向肿瘤治疗的质子刀样机
- ・4.2 激光加速创新中心(怀柔)
- ・4.3 十四五大科学设施 (龚旗煌副校长牵头)

4.1 建设面向肿瘤治疗的质子刀样机

Radiation pressure Acceleration similar to wind sail (PRL 100, 135003,2008) **Electromagnet lattice**

Laser Proton therapy



3-10 MeV Proton beam with 1% energy spread



Perspective of Proton cancer therapy











北京激光加速创新中心位 于怀柔科学城基础研究核心区 ,建筑面积3万平方米。







为十四五大科学设施奠定技术基础







4.3 十四五大科学设施(极端激光)









时间分辨





全国超强激光科学中心







激光加速创新中心





科技部重大仪器专项 百兆电子伏激光质子加速器



北京激光加速器装置 (2017ZF22)

2018年3月31日: 国家重大科技基础设施培 育项目(教育部)启动会 2019年4月20日: 超短激光多束流装置及应 用研讨会









高能电子加速面临的挑战:

- 1: 电子能量如何进一步提升?
- 2: 稳定性和可靠性?
- 3: 进一步降低能散?





激光等离子体加速准单能电子束







C. G. R. Geddes et. al. Nature 431, 538 (2004)



W.P. Leemans et al., Nature Physics 2, 696 (2006)



X. Wang et al., Nature Communications 4, 1988 (2013).





A. J. Gonsalves et. al. PRL 122, 084801 (2019)

单级激光加速能量增益受限于激光衍射 ,电子加速失相长度,激光耗散。

通过等离子体通道导引激光在毛细管中传播可以经过几个瑞利长度。

通过密度调制等手段可以对电子相位控 制。

通过级联加速可以改善激光耗散问题。 单级激光等离子体加速至高能,需要低 密度,高能激光,导致需要很长加速距 离,单级激光加速能加速到10 GeV左右







等离子体通道导引



密度调制相位控制





多束激光级联加速 激光耗散



W. P. Leemans et. al. PRL. 113. 245002 (2014) A. J. Gonsalves et. al. PRL 122, 084801 (2019) E. Guillaume et. al. PRL 115, 155002 (2015) Steinke, S. *et al. Nature* 530, 190, (2016).



(a)

(mrad)



单束激光 注入级加速级 两阶段加速







单束激光 注入级加速级 两阶段加速



对级联加速可以应用于PW激光器,加速至3 GeV量级。

Kim, H.T., et al., PRL, 2013. 111(16): p. 165002.




注入加速级分离品质得到优化





100

50

Lo

1 1.5 Energy [MeV]

Wang, W.T., et al., PRL, 2016. 117(12): p. 124801. Mirzaie, M., et al., Sci. Rep., 2015. 5: p. 14659. Pollock, B.B., et al., PRL, 2011. 107(4): p. 045001. Qin, Z., et al., POP, 2018. 25(2): p. 023106. Burza, M., et al., , PRST-AB, 2013. 16(1): p. 011301.





多级激光级联加速

对于单级激光加速由于激光的耗散,所以加速能量存在上限,而加 速到更高的能量需要考虑多级激光的级联加速,不同方式引入激光

1: 中空反射镜 第二级激光级联

比较直接的方法,通过中空0AP或者中空反射镜反射0AP聚焦第二束激光进行级联加速, 对两路激光的时间耦合和空间控制要求高,第二级的电子捕获效率相对较低 这种方法由于光学反射镜反射阈值的限制,因此要求光学镜面处光斑功率密度足够低,对 距离要求高。第一级和第二级距离相对长为了提高捕获率需要对电子束品质优化。



Panasenko, D. et al AIP Conference Proceedings 1086, 215-220 (2009).







将第一级激光尾波场产生的电子通过放电毛细管作为等离子体透镜聚焦注入第二级。

第二级加速中电子捕获效率: 3.5%

第二级激光采用等离子镜反射至毛细管:能量传输85%

第二级电子能量增益: 100MeV

Steinke, S. *et al. Nature* 530, 190, (2016). van Tilborg, J. et al. PhysRevLett.115.184802 (2015). Sokollik, T. *et al. AIP Conference Proceedings* 1299, 233-237, (2010).

模拟上存在匹配条件,等离子体通道在匹配条件下第二级电子俘获效率达到90%,

电子通过等离子体镜聚焦,注入下一级尾场结构,而构造匹配条件的等离子体通道相对较难,捕获率难以提高





弯曲等离子体通道进行导引





$$i\frac{\partial a}{\partial t} = \left[-\frac{c^2}{2\omega_l}\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\omega_l}{2}\frac{n_0}{n_{\rm er}}\left(1 + \frac{\Delta n}{n_0}\frac{r^2}{w_0^2}\right) - \omega_l\frac{r}{R}\right]a$$

从理论模拟上验证弯曲等离子体对 激光导引作为多级激光电子加速可 能性,后级加速结构具有很高的捕 获效率达到80%左右的超过1 GeV电 子可以注入后一级。

理论上通过由于超高的捕获率,电 子级联加速到TeV是可能的。 但是实验上由于弯曲等离子体通道 密度随着传输而变化比较难控制实 现相对较难。为了提高捕获随着等 离子体通道增加,激光损失相对提 高。

Luo, J. et al Phys. Rev. Lett.120.154801(2018).





F#12.5 OAP 电子加速实验



激光前端4J(传输效率46.4%) 气体**0.5%**N₂+H_e 4mm 条形**喷嘴**



22.4 um * 22.2 um 能量集中度33% $I=1.47\times 10^{19}W/cm^2$ a=2.6 按照密度 $n = 6 \times 10^{18} cm^{-3}$ $k_p w_0 = 8.63 > 2\sqrt{a} = 3.22$



北京大学电子加速初步结果



F#12.5 OAP 电子加速实验稳定性和能谱





装置之一: 高能电子束及应用



		◆ 与国际上同类装置对比:		
单位/装置/年份	电子束参数	激光参数	γ光参数	
罗马利亚 /ELI-NP/2013- 2018 (在建)	激光电子加速器 预期能量> GeV, 电荷量~pC 能散~1-2%	10PW@1Hz >300J, 30fs	能量1-50MeV, 通量: 10 ¹⁰⁻¹² ph/pulse, >10 ²⁵ ph/s, 峰值亮度 ≥10 ²⁰ ph/(s·mm ² ·mrad ² ·0.1%)@	
美国BELLA /LBNL/(运行)	激光电子加速器 最高能量7.8 GeV, 电荷量5 PC	0.85 PW@1Hz	无	
PKU激光电子加 速器	激光电子加速器预期能量>10 GeV???,电荷量~pC,能 散~1-2%	5PW&1PW@1 Hz, >150J&30J, 30fs	能量1-50MeV, 通量: 10 ¹⁰⁻ ¹² ph/pulse,>10 ²⁵ ph/s,峰值亮度 10 ²⁰ ph/(s·mm ² ·mrad ² ·0.1%)@1 0MeV	



PKU CLAPA group





陈佳洱







颜学庆

马文君 研究员 林晨 研究员 (青年千人计划)(百人计划)

卢海洋 研究员 (百人计划)



袁忠喜 (教授高工)



赵研英 (高工)



朱昆 (高工)









自然科学基金、科技部、XX专项

- 基金委激光加速与应用创新团队成员:许甫 荣、陈佳洱、马文君、乔宾、付恩刚
- PKU: 叶延林、余金清
- 原子能院: 郭冰、柳卫平
- LMU: J.Schreiber
- GIST: C.H.Nam
- LOA/IZEST: G.Mourou,T.Tajima

欢迎同学们申报北京大学博雅博士后/研究员

联系方式: <u>x.yan@pku.edu.cn</u>,15010810394