

## 加速器束流动力学期刊论文导读 (2021 年 2 月)

受“京师物理”公众号启发，我们几个<sup>1</sup>同好便萌生将加速器领域的代表性期刊 Physical Review Accelerators and Beams (PRAB) 里的论文进行导读。主要 (但不限于) 导读材料选自 PRAB 近期上线的期刊，与部分美国物理学会 (American Physical Society, APS) 旗下的其它期刊里可能涉及加速器方面的论文。与超快电子衍射成像动力学相关的论文则不在此限。

预期论文导读将于每个月初收集后发布。限于成员水平，导读仍许多地方有待改进 (正)。任何关于导读内容的指正、建议、意见都欢迎提出、交流，我们期待从交流讨论中激发的可能研究课题。

本期 (2021 年 2 月) 导读成员负责结果统计如下表

成员姓名	导读列表	联系方式
蔡承颖	[6]、[7]、[10]、[11]、[12]、[14]	jcytsai@hust.edu.cn
秦伟伦	[??]	qinweilun1991@gmail.com
宋怡方	[4]、[5]、[9]、[13]	yifangsong@hust.edu.cn
雷健	[??]	aaron_lei@hust.edu.cn
范子钰	[2]	m202071684@hust.edu.cn
袁怡	[3]	verayy@hust.edu.cn
漆鸿	[8]	d201880400@hust.edu.cn
邓秀杰	[1]	dxj15@mails.tsinghua.edu.cn

<sup>1</sup>目前导读成员有蔡承颖 (华中科技大学)、秦伟伦 (Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY)、宋怡方 (华中科技大学, 博士研究生)、雷健 (华中科技大学, 博士研究生)、范子钰 (华中科技大学, 硕士研究生)、袁怡 (华中科技大学, 硕士研究生)。

## 目录

1	稳态微聚束机制的实验验证 [Nature 590] Experimental demonstration of the mechanism of steady-state microbunching	4
2	稳态微聚束原理的实验演示 [Nature 590] Experimental demonstration of the mechanism of steady-state microbunching	7
3	利用纳米加工的丝扫描器实现亚微米尺度的电子束横向相空间层析成像 Electron beam transverse phase space tomography using nanofabricated wire scanners with submicrometer resolution	10
4	具有飞秒级分辨率的单发、非破坏性亚皮秒束团纵向轮廓测量 Single shot, nondestructive monitor for longitudinal subpicosecond bunch profile measurements with femtosecond resolution	12
5	相对论性电子束的级联高梯度太赫兹驱动加速 Cascaded high-gradient terahertz-driven acceleration of relativistic electron beams	13
6	基于直线加速器相干光源的微束团不稳定性抑制 [PRST-AB 7-07] Suppression of microbunching instability in the linac coherent light source	16
7	LCLS 激光加热器及其对自由电子激光效能的测量 [PRST-AB 13-02] Measurements of the linac coherent light source laser heater and its impact on the x-ray free-electron laser performance	19
8	通过相对论渡越辐射产生太瓦阿秒脉冲 [PRL 126] Generation of Terawatt Attosecond Pulses from Relativistic Transition Radiation	21
9	基于激光生成太赫兹脉冲的相对论束流加速 Acceleration of relativistic beams using laser-generated terahertz pulses	24
10	耦合 betatron 运动哈密顿微扰理论的线性分析 [PRST-AB 09-08] Linear analysis of Hamilton perturbation theory for coupled betatron motion	27
11	摇摆器中的相干同步辐射阻抗计算 [PRST-AB 6-04] Calculation of the coherent synchrotron radiation impedance from a wiggler	29
12	摇摆器相干同步辐射阻抗对束流不稳定性与阻尼环优化的影响 [PRST-AB 6-10] Impact of the wiggler coherent synchrotron radiation impedance on the beam	

instability and damping ring optimization	32
13 通过皮秒激光辐照金属箔产生数毫焦的相干太赫兹脉冲 Multimillijoule coherent terahertz bursts from picosecond laser-irradiated metal foils	34
14 利用尾场方法推导自由电子激光增益关系 Derivation of FEL gain using wakefield approach	36

## 1 稳态微聚束机制的实验验证 [Nature 590]

### Experimental demonstration of the mechanism of steady-state microbunching

#### 1.1 基本信息

- 分类: 加速器光源、束流动力学
- 作者: Xiujie Deng, Alexander Chao, Jorg Feikes, Arne Hoehl, Wenhui Huang, Roman Klein, Arnold Kruschinski, Ji Li, Aleksandr Matveenko, Yuriy Petenev, Markus Ries, Chuanxiang Tang, and Lixin Yan (主要机构: 清华大学、美国斯坦福大学、德国 Helmholtz-Zentrum Berlin、德国 Physikalisch-Technische Bundesanstalt)
- 类型: 实验
- 链接: <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03203-0>

#### 1.2 摘要

基于粒子加速器的光源推动了科学与技术的进步。目前加速器光源的主力军是基于储存环的同步辐射光源和基于直线加速器的自由电子激光。同步辐射具有高重频,但由于辐射时间上非相干,其功率相对较低。自由电子激光可产生具有极高峰值亮度(功率)的辐射光,但其重频受限于驱动源。稳态微聚束原理可产生高重频、高功率的辐射,波长能覆盖从太赫兹到极紫外波段。这是通过利用电子储存环中稳态的微聚束(steady-state microbunching, SSMB)逐圈产生相干辐射实现的。揭示 SSMB 作为未来光源潜力的关键一步是在一台真正的加速器上验证其原理。这里我们报告 SSMB 机制的实验验证。我们展示储存在准等时环中的电子束在被波长 1064 纳米的激光能量调制后绕环一整圈,可形成亚微米的微聚束及相干辐射。我们的结果证明了电子的光学相位(即纵向位置)能以短于激光波长的精度逐圈关联。基于这一关联,我们预期在采用相位锁定的激光器与电子束逐圈作用时,SSMB 可以实现。这一验证是基于 SSMB 的高重频、高功率光源发展中的一个里程碑。

#### 1.3 贡献或创新点

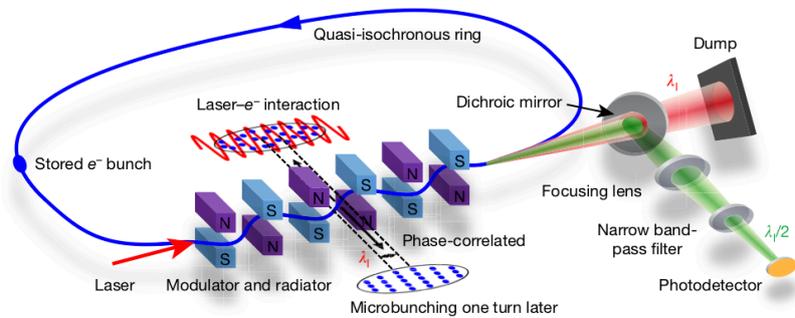
- 贡献 & 创新点: SSMB 作为一种新光源原理,未来在科学及工业等领域有着巨大的应用前景,该工作是 SSMB 的第一个原理验证实验。实验有两项关键点,即一整圈和储存在环内。一整圈是为了证明电子逐圈(turn-by-turn)的相位关联,而

储存在环内则是为了说明电子束的参数及分布是由同一个储存环决定的。两项要素的结合，形成了一个闭环，得以支撑 SSMB 的实现。

- 补充：该实验并没有直接实现 SSMB，而是展示了 SSMB 得以实现的基础，也即精微的逐圈相位关联 (precise turn-by-turn phase correlation)。这也是文章标题取为“SSMB 工作机理的实验演示”，而非“SSMB 的实验演示”的原因。微聚束的形成，即证明了电子逐圈相位 (纵向位置) 关联的精度可小于激光波长，使得电子被稳态地束缚在激光形成的 optical bucket 中成为可能。概念上说，该实验展示了 SSMB 所需的 one-turn map

$$\begin{cases} \delta_{n+1} = \delta_n + A \sin(k_1 z_n + \phi_s) \\ z_{n+1} = z_n - C_0 \eta \delta_{n+1} \end{cases}$$

已经建立<sup>2</sup>。要实现 SSMB，接下来即是该 one-turn map 的不断迭代。实验实现上，这有赖于相位锁定的激光器与电子束逐圈相互作用。



**Fig. 1 | Schematic of the experimental set-up.** The stored 250-MeV electron bunches are energy-modulated by a 1,064-nm-wavelength laser in an undulator, and become microbunched after one complete revolution in the 48-m-circumference quasi-isochronous storage ring. The undulator radiation from the electron bunches is separated into the fundamental and second

harmonics by dichroic mirrors, and the signal detection focuses on the second harmonic. A narrow band-pass filter (centre wavelength, 532 nm; bandwidth, 3 nm FWHM) can be inserted in front of the photodetector to pick out the narrowband coherent radiation generated from the microbunching.

## 1.4 其它

文章对 SSMB 涉及的主要单粒子动力学进行了理论分析及实验研究，相关工作对涉及纵向相空间精密操控的场合有一定参考价值。关于 SSMB 最早的工作可参考 Ref. [1]；至于这篇论文中的一些近期理论与实验结果可以参考 Refs. [2, 3]。

## 参考文献

- [1] D.F. Ratner, and A.W. Chao, Steady-state microbunching in a storage ring for generating coherent radiation, Phys. Rev. Lett. **105**, 154801 (2010), <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.105.154801>

<sup>2</sup>式中各个物理量的定义见该论文。

- [2] X.J. Deng *et al.*, Single-particle dynamics of microbunching, Phys. Rev. Accel. Beams **23**, 044002 (2020), <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.044002>
- [3] X.J. Deng *et al.*, Widening and distortion of the particle energy distribution by chromaticity in quasi-isochronous rings, Phys. Rev. Accel. Beams **23**, 044001 (2020), <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.044001>

## 2 稳态微聚束原理的实验演示 [Nature 590]

### Experimental demonstration of the mechanism of steady-state microbunching

#### 2.1 基本信息

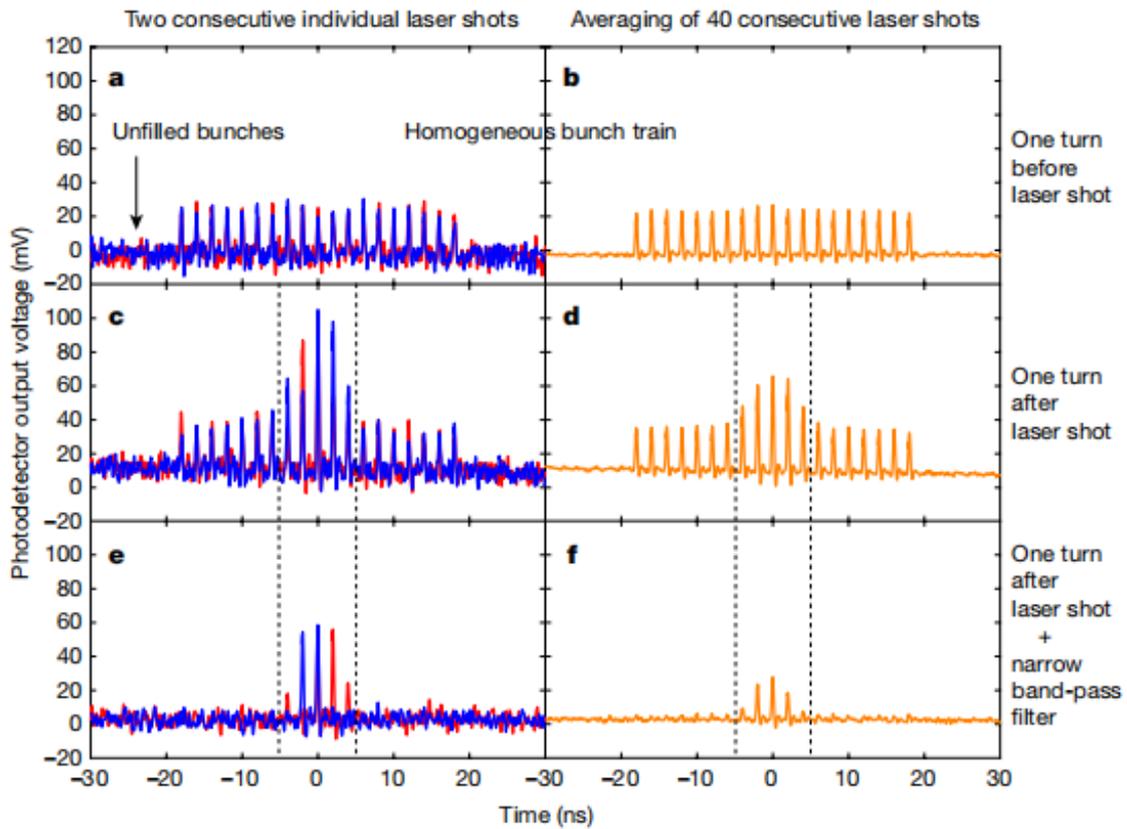
- 来源: Nature
- 作者: Xiujie Deng, Alexander Chao, Jorg Feikes, Arne Hoehl, Wenhui Huang, Roman Klein, Arnold Kruschinski, Ji Li, Aleksandr Matveenko, Yuriy Peten, Markus Ries, Chuanxiang Tang, and Lixin Yan (主要机构: 清华大学、美国斯坦福大学、德国 Helmholtz-Zentrum Berlin、德国 Physikalisch-Technische Bundesanstalt)
- 类型: 实验
- 链接: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03203-0>

#### 2.2 摘要

基于稳态微聚束 (steady-state microbunching, SSMB) 原理可以产生覆盖太赫兹到极紫外波段的高重复频率、高功率、窄带宽相干辐射, 相较于当前常用的同步辐射光源和自由电子激光装置具有显著优势。本文中作者利用柏林 Metrology Light Source (MLS) 储存环开展实验, 在储存环中安装波荡器和注入波长为 1064 纳米的激光组成激光调制器, 电子束在逐圈运动过程中通过与激光调制器交换能量、相互作用, 实现轴向运动聚焦和相位稳定 (因此激光调制的作用和传统射频腔的稳相原理类似), 从而产生微聚束并发出相干辐射。实验中通过光电探测器进行辐射结果检测, 利用相干辐射的窄带宽特性, 采用带宽 3 纳米的滤波器对信号进行处理, 通过比较前后图像验证了储存环中有微聚束形成。最后, 作者还研究了束流电荷量与辐射强度的关系, 结果表明辐射强度是电荷量的二次函数, 二次关系特性也进一步说明实验产生了微聚束。

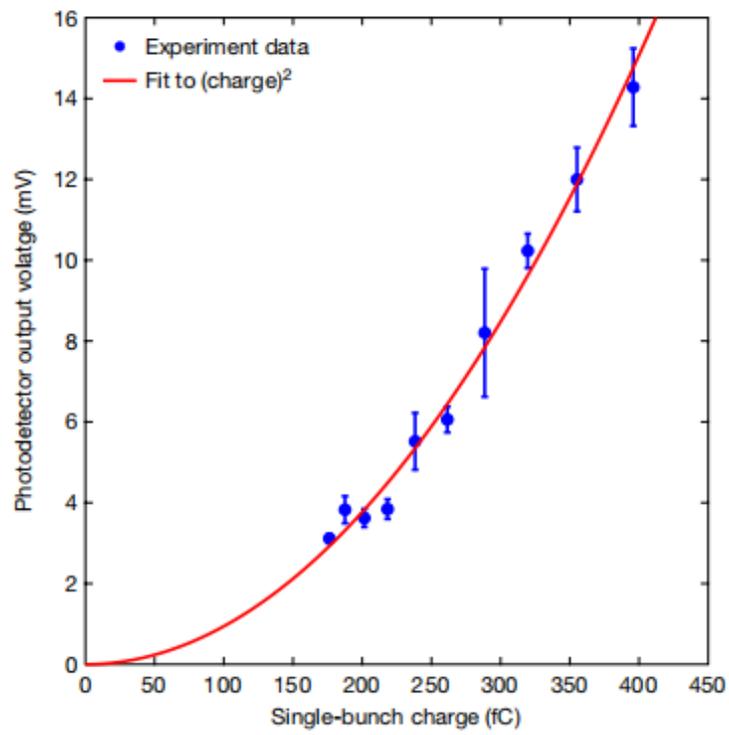
#### 2.3 贡献或创新点

- 贡献: 作者通过实验, 首次验证了稳态微聚束原理, 展示了稳态微聚束作为未来加速器光源的显著优势和发展机遇。通过对辐射强度的探测来分析验证微聚束的形成以及利用相干辐射的特性进行信号处理来增强结论的可靠性为后续有关理论的实验证明提供了很好地借鉴思路。



• 创新点:

- 本文实验的成功离不开对装置和对象各类参数指标的合适选取和调整，例如，通过对纵向运动方程的计算分析选择采用能量为 250 MeV 的束流，通过调节四极铁的聚焦强度以获得小的相位滑移系数，为了实现微聚束采用准等时性 (isochronous) 储存环等等。作者在正文后的“方法”中对这些参数的选取和其他考虑因素做了较详细的说明，也让我们进一步理解了实验成功需要注意的因素，值得学习借鉴。
- 作者对实验结果的处理分析也有一定技巧，由于强大的激光易引起光电探测器的饱和甚至损坏，实验中采用二色镜 (dichroic mirror) 将辐射光的基波和二次谐波分离，只对二次谐波进行检测分析来避免这一问题。同时利用微聚束产生的相干辐射具有高强度、窄带宽特性，与电荷量二次方成正比的关系，通过激光照射前与照射后，窄带滤波处理前后的一系列图像对比，充分论证了微聚束的形成，使结果具有说服力。



### 3 利用纳米加工的丝扫描器实现亚微米尺度的电子束横向相空间层析成像

#### Electron beam transverse phase space tomography using nanofabricated wire scanners with submicrometer resolution

##### 3.1 基本信息

- 分类: 束流控制、诊断与反馈
- 作者: Benedikt Hermann, Vitaliy A. Guzenko, Orell R. Hurzeler *et al.* (主要机构: Paul Scherrer Institut, PSI)
- 类型: 实验、数值模拟
- 链接: <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.022802>

##### 3.2 摘要

对高亮度电子束的横向相空间进行描述和控制自由电子激光和电子衍射实验中关于发射度测量以及束流优化有广泛的需求。这篇论文介绍一种利用丝扫描法 (wire scanner) 在数个位置不同角度测量横向相空间投影的方法, 并采用一种新的迭代层析成像算法, 减小算法复杂度的同时可实现四维横向相空间密度的重构。粒子跟踪模拟结果和在 SwissFEL 装置上的实验数据验证了该方法的有效性, 重构了微米级聚焦电子束沿束腰的横向相空间动力学, 为其它需要测量高亮度电子束横向相空间的相关实验提供了新方法。

##### 3.3 贡献或创新点

- 创新点: 相比于传统用于测量多发电子束一维信息的丝扫描器, 本文提出一种由九根金属丝均匀角度间隔分布的丝扫描器结构 (见论文 Fig. 3), 可以测得束流不同角度  $\theta$  对应的横向电子密度投影。并开发了一种基于宏观粒子分布的迭代算法, 用高斯核密度估计而不是网格密度来表示重建密度, 将四维相空间层析成像的算法复杂度减小至与粒子数成正比。如果测量  $x, y$  平面的相关信息或不同相位超前 (phase advance) 对应的二维分布有望表征四维的横向相空间和发射度。

- 贡献：给出了其基于宏观粒子推断密度分布迭代层析方案的理论算法，为利用丝扫描器实现四维横向测量提供一种可行方案。该方案的计算复杂度相比传统层析算法大大减小(计算时间约 2 分钟)。并给出了在 SwissFEL 装置上的实验方案，实验结果吻合大多数测量数据点，进行了发射度、分辨率等参数的结果分析。最后作者还介绍了该算法当前存在的误差估计和非高斯电子束的层析成像。

### 3.4 实验结果

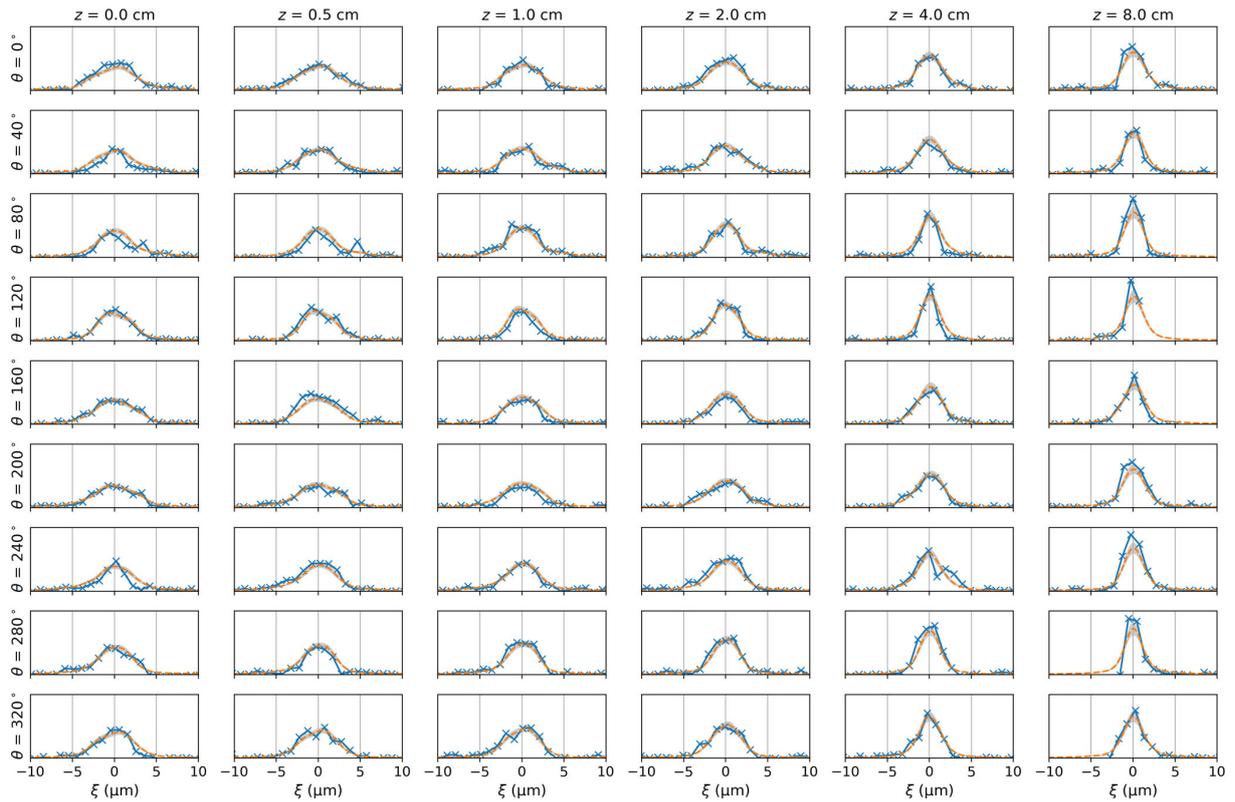


图 1: 测量的 (蓝色叉线) 和重构的 (橙色虚线) 电子束分布的轮廓。所有子图的  $y$  轴相同, 以任意单位显示束流损失监测器信号或重建后的结果。同一列 (column) 的子图对应丝扫描器上相同的  $z$  坐标, 同一行 (row) 的子图对应相同的投影角度  $\theta$ 。灰色区域表示重构的不确定区域。最后一列 ( $z = 8$  cm) 的扫描范围没有覆盖整个束流分布, 这是由于电子传播方向与  $z$  轴上的六轴平台存在偏移, 导致丝扫描器相对于电子束存在横向偏移。该影响在最后一次扫描 ( $z = 8$  cm) 中是最大的, 因为此时丝扫描器与  $z = 0$  cm 处的束轴一致。

- 4 具有飞秒级分辨率的单发、非破坏性亚皮秒束团纵向轮廓测量  
Single shot, nondestructive monitor for longitudinal subpicosecond bunch profile measurements with femtosecond resolution

★ 见 2021 年 1 月 PRAB 导读

## 5 相对论性电子束的级联高梯度太赫兹驱动加速

### Cascaded high-gradient terahertz-driven acceleration of relativistic electron beams

#### 5.1 基本信息

- 分类: 新型加速方法
- 作者: Hanxun Xu *et al.* (主要机构: 清华大学)
- 类型: 实验
- 链接: <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00779-x>

#### 5.2 摘要

太赫兹驱动加速是一种高效、可靠、紧凑的产生高亮度超短电子束的方法。许多与太赫兹驱动加速相关的方案和关键技术已经获得了成功并且在持续发展。不过目前的实验中所获得的加速梯度和能量增益仍然很低, 在高能区的潜在物理和技术挑战还没有得到充分的探索。这篇论文报告了有效加速度梯度高达 85 MV/m 的束流加速, 并给出了能量增益为 204 keV 的级联太赫兹驱动相对论束流加速方案。这些原理证明实验结果代表了相对论束流在高能太赫兹驱动加速领域的一个重要进展, 对未来太赫兹驱动的电子源和相关科学发现具有重要意义。

#### 5.3 贡献或创新点

- 创新点: 本文是目前**第二次**将太赫兹驱动加速用于数十 MeV 电子束的实验成果 (另一相似的 35MeV 的太赫兹加速实验见参考文献 [1]), 其余的太赫兹驱动加速实验大多在 keV 能级 (参考该论文参考文献 [3-8])。本文为了产生高梯度的太赫兹加速场, 第一次使用相干渡越辐射 (coherent transition radiation, CTR) 产生太赫兹驱动脉冲, 相比常见的使用 LiNbO<sub>3</sub> 晶体产生太赫兹驱动脉冲的方法, 将能量从 2  $\mu$ J 提高到了 132  $\mu$ J。这一高能量驱动脉冲预计能在介质波导管中产生了 1.1 GV/m 的峰值加速梯度。
- 贡献:
  - 本文首先设计并验证了使用相干渡越辐射 (CTR) 产生太赫兹驱动脉冲的方案 (见下图), 并获得了  $170 \pm 84$  keV 的能量增益。相比太赫兹驱动领域常用的

optic rectification 方法，CTR 方法可以产生单脉冲能量高 1 至 2 个数量级的太赫兹驱动脉冲，但该方案前提是要求装置具备产生数十 MeV、数百 pC 电子束的能力 (用于轰击金属靶产生 CTR)。

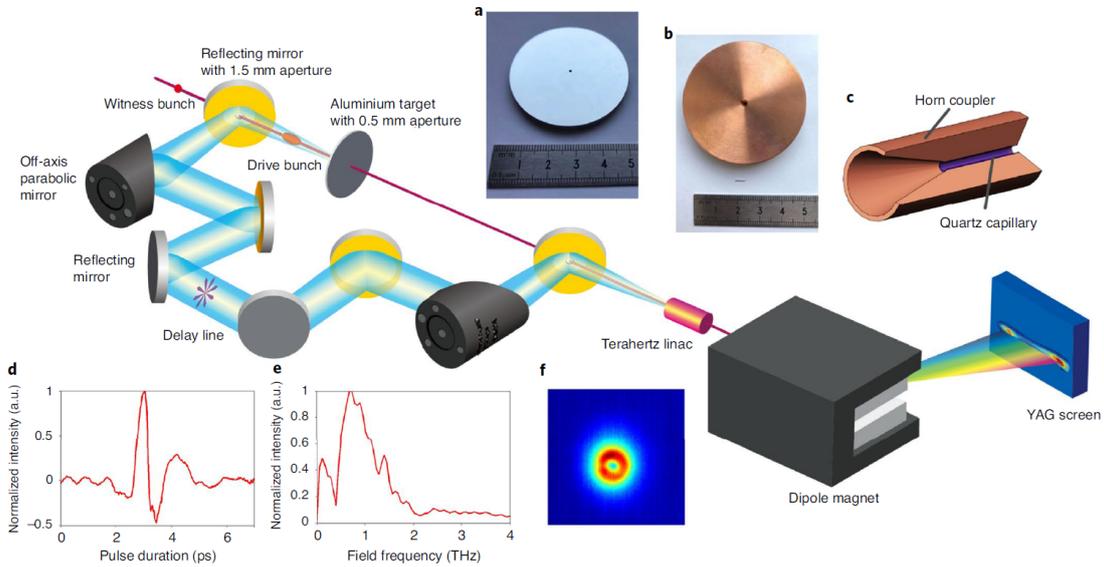


图 2: 单级太赫兹驱动直线加速器。一个 850 pC、30.4 MeV 电子束垂直轰击铝靶，产生一个以 0.6 THz 为中心的单周期 CTR 脉冲。径向极化太赫兹脉冲通过锥形耦合器耦合到介质波导中，并与 1.9 pC、34.3 MeV 加速电子束相互作用。通过位于束线末端的二极管确定加速电子束的能谱。a: 铝靶; b: 锥形耦合器和石英管道; c: 太赫兹直线加速器的示意图; d, e: 通过电光取样测量确定的 CTR 太赫兹脉冲的时间轮廓 (d) 和频谱 (e); f: CTR 脉冲的焦点轮廓。

- 此外，这篇论文还讨论了基于 CTR 的级联太赫兹加速的方案 (见下图)，通过电子束轰击钽薄片产生正射 ( $35 \mu\text{J}$ ) 和背射 ( $66 \mu\text{J}$ ) 的两束 CTR 分别激励介质波导。值得注意的是，虽然级联方案使用的两束 CTR 的总能量降低了，但最终实验获得了更大的能量增益 ( $204 \pm 64 \text{ keV}$ )。

## 参考文献

[1] Hibberd, M.T., Healy, A.L., Lake, D.S. *et al.*, Acceleration of relativistic beams using laser-generated terahertz pulses, *Nat. Photonics* 14, 755-759 (2020), <https://www.nature.com/articles/s41566-020-0674-1>

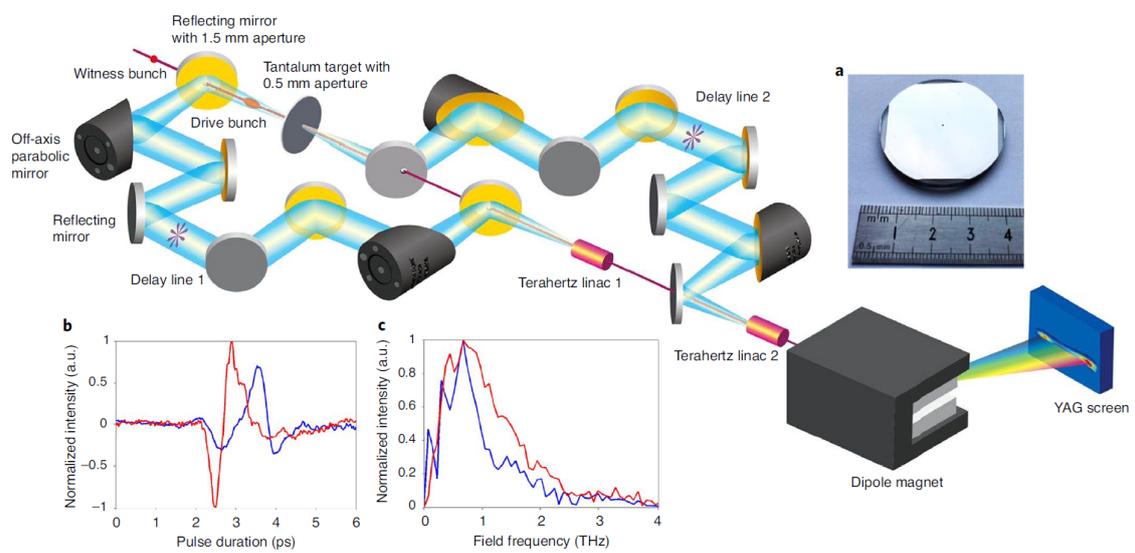


图 3: 级联太赫兹直线加速器。与单级太赫兹驱动直线加速器的主要区别是新设计的 CTR 靶, 它能够在前后两个方向上产生能量相当的太赫兹辐射。a: 钽靶; b, c: 通过光电取样测量确定的 CTR 太赫兹脉冲在向后 (红色) 和向前 (蓝色) 方向上的时间轮廓 (b) 和频谱 (c)。

## 6 基于直线加速器相干光源的微束团不稳定性抑制 [PRST-AB 7-07] Suppression of microbunching instability in the linac coherent light source

### 6.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Z. Huang, M. Borland, P. Emma, J. Wu, C. Limborg, G. Stupakov, and J. Welch (主要机构：SLAC)
- 类型：理论、模拟
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.7.074401>

### 6.2 摘要

这篇经典论文研究世界上最早开始运行的 X 射线自由电子激光 (x-ray free electron laser, XFEL) 设计, 即, SLAC 的相干同步光源 (linac coherent light source, LCLS) 项目, 由纵向空间电荷 (longitudinal space charge, LSC)、相干同步辐射 (coherent synchrotron radiation, CSR)、或直线加速器几何结构形成的尾场 (linac geometric wakefield) 导致的微束团不稳定性 (microbunching instability, MBI)。由于电子束初始的非相干能散 (uncorrelated energy spread, 或切片能散 slice energy spread) 非常小, MBI 增益很大, 因此, 容易放大源自上游 RF 电子枪系统的“噪声”(ripple) 或源自电子束本身的“噪声”(shot noise)。分析下游 FEL 对非相干能散的要求, 知道可以通过适当的增加电子束团的非相干能散, 使在不危害 FEL 效能的前提下, 通过提供较强的朗道阻尼 (Landau damping) 效应而抑制 MBI。这篇论文研究两种不同的能够提供朗道阻尼的方案, 即超导摇摆器 (superconducting wiggler, SC wiggler) 与激光加热器 (laser heater, LH), 并讨论利用激光加热器抑制 MBI 的有效性。

### 6.3 贡献或创新点

- 创新点：这篇虽然不是最早<sup>3</sup>提出利用 LH 抑制 MBI 方案的论文, 但是一般公认是最早比较完整研究这个方案的有效性的论文。此外, 这篇论文还针对稍早在

---

<sup>3</sup>E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller, and M.V. Yurkov, DESY Report No. TESLA-FEL-2003-02, 2003.

LCLS 设计报告<sup>4</sup>中提出的抑制 MBI 的另一个可能方案的评估, 即, 利用 SC wiggler 增加非相干能散。

- 贡献: 由于利用 SC wiggler 增加非相干能散是利用电子在部件中的同步辐射引起的量子激发 (quantum excitation) 效应, 因此无法在太低能量段进行; 放在 BC2 前<sup>5</sup>虽然增加了有效的非相干能散, 但是已经“为时已晚”, 见该论文 Fig. 7, 在一定的调制波长范围内已经无法保证让下游 FEL undulator 入口处要求的非相干能散 (要求  $\sigma_{\delta f} \approx \rho_{\text{FEL}}^{3-D}$ )。

相对地, 利用 LH 则能在低能量段 (如, 135 MeV 处, 见该论文 Fig. 1 处标示 laser heater 的红色圆圈) 有效地产生足够的非相干能散。类似 Fig. 7, LH 的效能评估在 Fig. 13, 可以看到, 在适当设置激光束横向束斑大小与电子束横向尺寸契合时, 将能够有效提供非相干能散、并抑制 MBI, 并达到 FEL 要求的在 undulator 入口处的非相干能散 (Fig. 7 中红色三角形)。需要的非相干能散大约是在电子枪出口处能散的 10 至 15 倍。

这篇论文的其它贡献还包含, 如何设计 LH, 使得激光对电子束产生的“调制”能有效转换成无序的、非相干的“噪声”, 即, 需要满足一些必要 (非充分) 条件 [Eq. (14)]、LH 对电子束横向发射度增长的评估 [Eq. (15)]、LH 的激光对电子束横向分布的影响 [Figs. 8, 10], 以及在 LH 存在的情况下, MBI 增益 (gain) 的估算 [Eq. (11) 或 Figs. 9, 11]。

## 6.4 其它

LH 一般安装在上游低能段较小的 bypass chicane 中, 结构示意图可参考该论文 Fig. 14。利用其  $R_{51} \neq 0$  或  $R_{52} \neq 0$  的特性, 加上  $\sigma_x \neq 0, \sigma_{x'} \neq 0$ , 使 LH 对电子束的调制能够有效地被“抹除”, 从而留下 (几乎) 非相干的能散。

这篇论文的两个附录是值得参考的部分, 其中, 附录 A 给出了在 ELEGANT 中的 LSCDRIFT 的模拟方案与参数设置。附录 B 则是勾勒出一种推广的计算密度调制因子的推导。

2004 年之后, 陆续有许多关于 LH 应用在抑制 MBI 及其对 XFEL 性能的研究。至于 trickle heating, 一个有趣、不在当时预期内、伴随 LH 的现象, 在这篇论文作者后来 2010 年的论文 [1] 将有系统的分析。

<sup>4</sup>Linac Coherent Light Source (LCLS) Conceptual Design Report, SLAC Report No. SLAC-R-593, 2002

<sup>5</sup>电子能量为 4.5 GeV, 参考该论文 Fig. 1。

## 参考文献

- [1] Z. Huang *et al.*, Measurements of the linac coherent light source laser heater and its impact on the x-ray free-electron laser performance, Phys. Rev. STAB **13** 020703 (2010), <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.13.020703>

## 7 LCLS 激光加热器及其对自由电子激光效能的测量 [PRST-AB 13-02]

### Measurements of the linac coherent light source laser heater and its impact on the x-ray free-electron laser performance

#### 7.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Z. Huang, A. Brachmann, F.-J. Decker, Y. Ding, D. Dowell, P. Emma, J. Frisch, S. Gilevich, G. Hays, Ph. Hering, R. Iverson, H. Loos, A. Miahnahri, H.-D. Nuhn, D. Ratner, G. Stupakov, J. Turner, J. Welch, W. White, J. Wu, and D. Xiang (主要机构：SLAC)
- 类型：理论、模拟、实验
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.13.020703>

#### 7.2 摘要

如 SLAC 的 LCLS，作为 X 射线自由电子激光 (free electron laser, FEL) 所要求的高亮度电子束团，在进入波荡器 (undulator) 之前，非常容易受到如微束团集体不稳定性 (microbunching instability, MBI) 的影响而降低其电子束特性。若非相干能散能增加大约一个数量级<sup>6</sup>，则能在不影响 SASE FEL 最终效能情况下，提供足够的朗道阻尼 (Landau damping) 效应以抑制微束团不稳定性。为此，在 LCLS 的注入器系统中安装了“激光加热器”(laser heater, LH)，利用红外激光在一短的波荡器中与电子束并行 (co-propagate) 用来调制 135 MeV 电子束。在这篇论文中，将针对 LH 系统运行时的情况，实验上量测电子束团的非相干能散 (uncorrelated energy spread or slice energy spread)，包含在激光能量设置非常低 (如，1  $\mu$ J) 时发生的“不在预期”中的异常加热效应 (anomalous heating effect)，还讨论了利用 LH 抑制 MBI 与其对 FEL 效能的影响。

#### 7.3 贡献或创新点

- 贡献：这是继 [1] 后的另一篇同样探讨激光加热器的经典论文。这次除了有实际应用于 XFEL 运行的实验数据，还着重于解释一个当时“不在预期”中的异常加热效

---

<sup>6</sup>按 [1] 的分析，大约 10 至 15 倍。

应, 又称 trickle heating。Section III.D 的讨论, 包含在 LH 下游处的光学传输特性, 值得琢磨。另外, 在这篇论文附录中利用了“三维”的纵向空间电荷 (longitudinal space charge, LSC) 模型, 能成功解释实验中得到的结果 [Eq. (6)]。

尽管利用 LH, 由于电子束团中可能存在的微结构会产生 COTR (coherent optical transition radiation), 将影响传统 OTR 作为束团横向尺寸量测方案的使用, 特别是在 BC1 之后。因此, 下游束团尺寸量测一般改用 wire scanner。至于能散或束长, 利用在下游处安置的 YAG 屏, 结合 RF 偏转腔或偏转磁铁, 观察束团束长或能散 (分辨率约数个 keV)。

#### 7.4 其它

这篇论文的 Eq. (1)  $\sigma_{\Delta E}$ , 引自 [1] 的 Eq. (8)  $\Delta\gamma_m$ ,  $e^{-\frac{r^2}{4\sigma_r^2}}$  换成了  $\sqrt{\frac{\sigma_r^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_r^2)}}$ 。

关于进一步探索 LH 最近的论文, 还有 [2, 3]。

#### 参考文献

- [1] Z. Huang *et al.*, Suppression of microbunching instability in the linac coherent light source, Phys. Rev. STAB **7** 074401 (2004), <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevSTAB.7.074401>
- [2] J. Tang *et al.*, Laguerre-Gaussian Mode Laser Heater for Microbunching Instability Suppression in Free-Electron Lasers, Phys. Rev. Lett. **124** 134801 (2020)
- [3] S. Li *et al.*, Laser Heater Transverse Shaping to Improve Microbunching Suppression for X-ray FELs, Proceedings of FEL2015, Daejeon, Korea (WEP005), <https://inspirehep.net/files/0f688cbebed24637683607d28d18a039>

## 8 通过相对论渡越辐射产生太瓦阿秒脉冲 [PRL 126]

### Generation of Terawatt Attosecond Pulses from Relativistic Transition Radiation

#### 8.1 基本信息

- 分类: 电磁辐射
- 作者: Xinlu Xu, David B. Cesar, Sebastien Corde, Vitaly Yakimenko, Mark J. Hogan, Chan Joshi, Agostino Marinelli, and Warren B. Mori (主要机构: SLAC)
- 类型: 数值模拟
- 链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.094801>

#### 8.2 摘要

当具有飞秒持续时间和数百千安培峰值电流的电子束穿过真空和高密度等离子体 (high-density plasma) 界面时会产生一个新的过程, 我们称之为相对论渡越辐射 (relativistic transition radiation, RTR), 生成  $\sim 100$  阿秒 (as) 的强脉冲, 其中包括功率为  $\sim 1$  太瓦 ( $10^{12}$  W, TW) 的相干真空紫外 (VUV) 辐射和伴随数个小的、飞秒持续时间的脉冲 (satellite pulses)。此脉冲继承了入射束场的径向极化特性, 强度呈环形分布。当束流密度与等离子体密度相当且样斑尺寸比等离子体趋肤深度 (plasma skin depth) 大得多的时候, 将产生 RTR。物理机制是由于多普勒效应使光子能量蓝移的等离子体内部, 其返回电流或电子的反向相对论运动引起的。RTR 脉冲的个数由等离子体电子群数决定, 其中, 等离子体电子群的产生是源于第一次尾场周期内不同深度的 xx 与在发生相位混合 (phase mixing) 前的相干辐射导致。

#### 8.3 贡献或创新点

- 利用渡越辐射 (transition radiation, TR) 产生高功率阿秒脉冲, 会有一些独特的辐射特性, 如径向极化, 窄环形强度分布。主阿秒脉冲可以与相同电子束产生的同步辐射或自由电子激光辐射同步, 可能使 X 光泵浦-探针实验达到前所未有的精度, 用一个频率滤波器 (或薄箔) 将长波长振荡从短阿秒脉冲中分离出来, 然后将它们组合起来, 用于泵浦探测或强场实验。利用三维全相对论 PIC (particle in cell) 模拟了 RTR 背后的物理原理, 以及如何利用它来产生孤立的阿秒脉冲。电子束采用了双高斯电荷分布。上图模拟表明, 强阿秒脉冲沿  $-z$  方向发射, 且由于相对论多

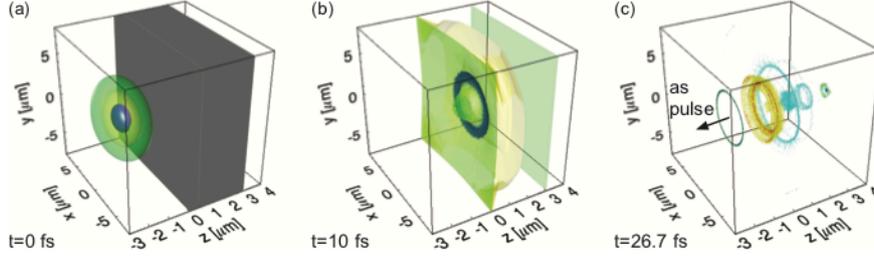


FIG. 1: Relativistic transition radiation when an electron beam propagates through a plasma. (a) The charge density isosurfaces of the beam (blue, yellow and green) and the plasma (gray) at  $t = 0$ fs. The beam center is  $z = -1.5\mu\text{m}$ . (b) The charge density isosurface of the plasma electrons at  $t = 10$ fs. (c) The isosurfaces of the radiated transverse electric field  $E_{\perp}$  (green and blue) and the axial current  $j_z$  (red and yellow represent forward current density while cyan represents the backward current density) at  $t = 26.7$ fs.

普勒效应被压缩。向前的辐射也存在，但没有向后的辐射那么短和强。这个过程的重复次数和产生的脉冲的宽度和靶材的厚度有关。

- 下页模拟了 RTR 产生阿秒脉冲的辐射特点。与非 RTR 相比，由于反向运动的电子发射的光子的相对论多普勒频移，RTR 的频谱可延伸到更高的频率 (VUV 区域)，高达 18 倍。RTR 产生的阿秒脉冲的横截面呈环形，如上图 (b) 中灰色箭头所示辐射呈径向极化。横向模式和辐射的极化与入射空间电荷场的形态一致。因此，可用横向不对称的驱动器来控制阿秒脉冲的分布和极化。阿秒脉冲的产生对等离子体的精确密度、厚度和初始温度相当不敏感。

#### 8.4 其它

RTR 发生在等离子体电子相对论运动区域，但是当等离子体密度大于束流密度时，即使在很高的束流强度下，电子的运动仍是非相对论的，因为自由电子的屏蔽效率，仍会出现标准 TR。

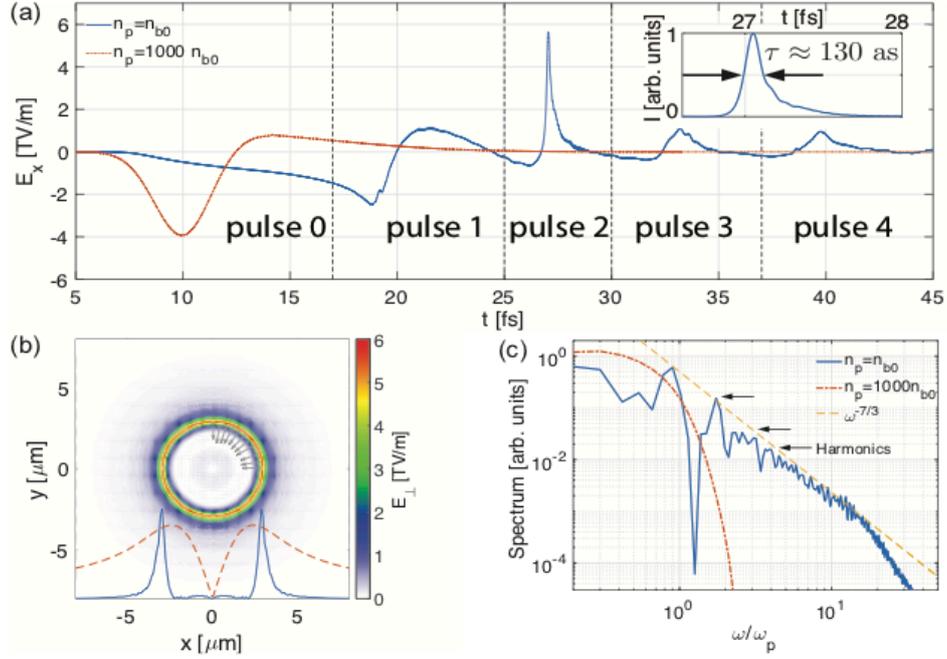


FIG. 2: Attosecond radiation pulse. (a) The recorded electric field when  $n_p = n_{b0}$  (blue) and  $1000n_{b0}$  (red). Normalized intensity profile of the radiation (pulse 2) is shown in the inset. (b) The distribution of the transverse electrical field in the  $x - y$  plane at  $t = 27.1\text{fs}$  and  $z = -1.5\mu\text{m}$ . The gray arrows indicate the direction of the field. The solid blue line shows the field amplitude at  $y = 0\mu\text{m}$  and the dashed red line is for magnitude of the incident Coulomb field. (c) The spectrum of the radiation when  $n_p = n_{b0}$  (blue),  $1000n_{b0}$  (red) and the fitted scaling law (yellow).

## 9 基于激光生成太赫兹脉冲的相对论束流加速

### Acceleration of relativistic beams using laser-generated terahertz pulses

#### 9.1 基本信息

- 分类: 新型加速方法
- 作者: Morgan T. Hibberd, Alisa L. Healy *et al.* (主要机构: Sci-Tech Daresbury)
- 类型: 实验
- 链接: <https://doi.org/10.1038/s41566-020-0674-1>

#### 9.2 摘要

与传统的射频 (radio-frequency, RF) 技术相比, 由激光产生的太赫兹 (THz) 脉冲驱动的粒子加速器可以对粒子束的“能量-时间”或纵向相空间进行前所未有的控制。本论文演示了在太赫兹驱动直线加速器中相对论电子束的加速。通过将窄带宽的太赫兹脉冲调谐到与矩形介质波导的相速度匹配的工作频率后与 35 MeV、60 pC 电子束进行相互作用, 可以对啁啾 6 ps 电子束进行多周期能量调制, 也可以对亚周期 2 ps 电子束进行注入相位相关的能量增益 (10 keV)。这一原理验证实验建立了亚皮秒粒子束的整束直线加速的途径, 可以直接扩展到更大能量或级联结构上。

#### 9.3 贡献或创新点

- 创新点: 本文是第一个将 THz 驱动加速用于相对论性 (数十 MeV) 电子束的实验。为此, 该团队设计了 THz 驱动矩形介质波导的加速方案, 并完成了长束团 (6 ps) 的能量调制实验和短束团 (2 ps) 的加速实验。之后由清华大学团队完成的另一个相对论性电子束的 THz 驱动加速实验也采用了类似的方案 [1]。
- 贡献: 这个工作设计了基于介质波导的 THz 加速方案, 并讨论了该方案中针对相对论性电子束的“速度-相位”匹配的问题。该方案的一大优点是介质波导的大孔径允许高电荷量的电子束 (数十 pC) 通过。由于是原理验证性试验, 该团队仅使用了约 2  $\mu$ J 的 THz 脉冲, 因此仅产生了 2 MV/m 的平均加速梯度, 鉴于数 mJ 量级的 THz 脉冲已经实现 [2], 有理由相信该方案可以产生更强的加速梯度。

## 9.4 基于相干渡越辐射 (coherent transition radiation, CTR) 的太赫兹驱动加速方案和实验结果

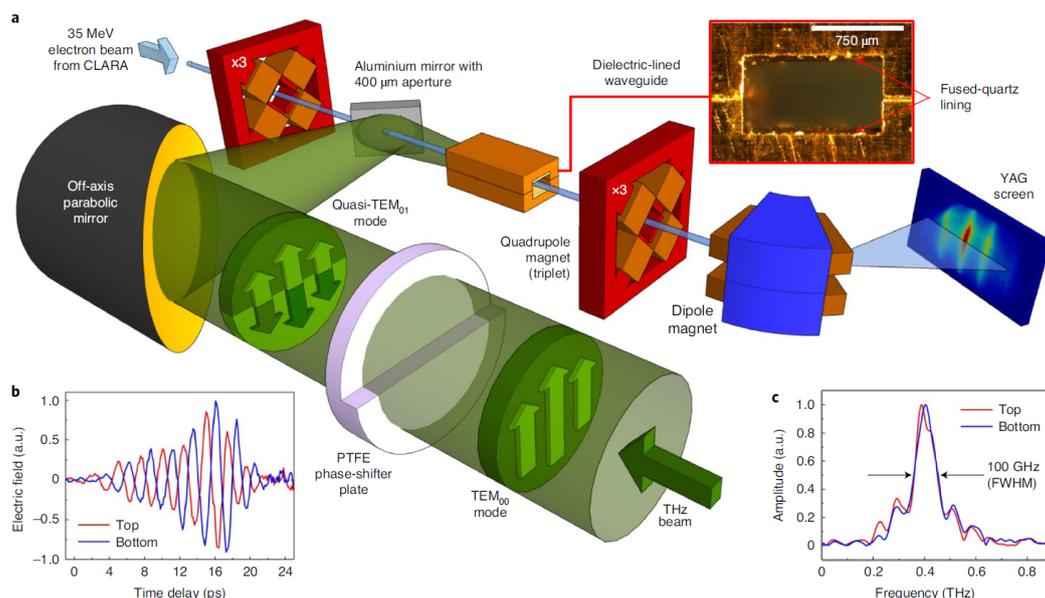


图 4: (a) 实验装置示意图。太赫兹光束通过聚四氟乙烯 (PTFE) 移相板转换成准  $TEM_{01}$  模式, 并聚焦到介质波导中, 与 35 MeV 电子束相互作用。介质波导出口的显微镜图像展示了沿顶部和底部表面的电介质衬层。(b,c) 通过移相器板的上半部分和下半部分的太赫兹脉冲的时间 (b) 和频谱 (c) 剖面的电光取样测量, 记录在介质波导的入口处。

## 参考文献

- [1] Xu, H., Yan, L., Du, Y. *et al.*, Cascaded high-gradient terahertz-driven acceleration of relativistic electron beams, *Nat. Photonics* (2021), <https://www.nature.com/articles/s41566-021-00779-x>
- [2] Guoqian Liao, Yutong Li, Hao Liu *et al.*, Multimillijoule coherent terahertz bursts from picosecond laser-irradiated metal foils, *Proceedings of the National Academy of Sciences* Mar 2019, 116 (10) 3994-3999, <https://www.pnas.org/content/116/10/3994>

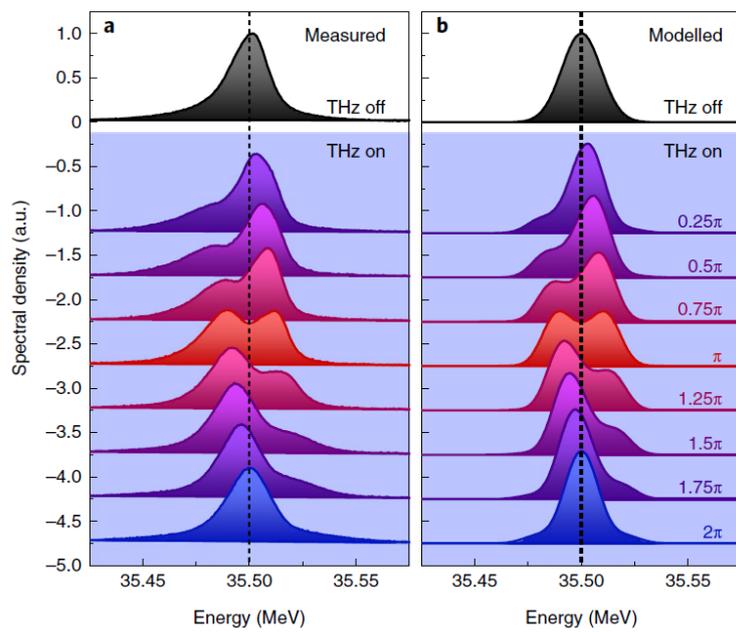


图 5: 亚周期束团加速。(a) 用短束长 (2 ps, FWHM)、低能散 (21 keV, FWHM) 的电子束测试了 THz 关和开时的单发电子束的能谱; (b) 在 THz 周期内不同注入相位仿真得到的电子束能谱。

## 10 耦合 betatron 运动哈密顿微扰理论的线性分析 [PRST-AB 09-08]

### Linear analysis of Hamilton perturbation theory for coupled betatron motion

#### 10.1 基本信息

- 分类：储存环束流动力学
- 作者：M. Takao (SPring-8)
- 类型：理论、实验
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevSTAB.9.084002>

#### 10.2 摘要

一般而言,环形加速器中的耦合 betatron 运动的动力学通过哈密顿微扰理论 (Hamilton perturbation theory) 或矩阵分析 (matrix formalism) 这两种独立方法,各有优缺。为了更好地合并两种分析方法,这篇论文在哈密顿微扰理论的框架上建立矩阵分析。由哈密顿微扰理论,在线性共振<sup>7</sup>点附近的 betatron 运动可以以解析解形式写出。利用这个解,可以利用矩阵分析构建束团动力学,如束团包络 (beam envelope) 的动力学。由耦合运动解表示的 (耦合) 矩阵满足辛条件 (symplecticity), 因此可以通过对角化,将耦合矩阵写为两个正交模 (normal modes) 与耦合矩阵 (coupling matrix) 的形式。这篇论文将这些耦合矩阵以熟悉的 Courant-Snyder 形式的表达式写出来,利用这些结果,可以研究电子储存环在线性共振附近的动力学行为。

#### 10.3 贡献或创新点

- 贡献：理论分析与 SPring-8 的电子储存环实验量测结果比较,并分析其间差别的原因。束团横向尺寸的实验量测利用二维可见光干涉仪 (2-D visible light interferometer) 与利用同步辐射的 X 射线束斑检测仪 (x-ray beam profile monitor)。这两种束测方案在日本 KEK 技术非常成熟。

---

<sup>7</sup>这篇论文的分析适用于和共振 (sum resonance,  $\nu_x + \nu_y \approx q \in \mathbb{Z}$ ) 或差共振 (difference resonance,  $\nu_x - \nu_y \approx q \in \mathbb{Z}$ ), 但着重探讨后者。

这篇论文对单粒子耦合动力学的说明清楚明了，对于具有加速器基础背景的对象值得研读，理解上应该不会有太大隔阂。这篇论文后半部关于电子束团特性的讨论利用束包络矩阵描述。对于线性共振，传输段仅包含线性元件的情况下，可以知道电子束平衡时的分布为高斯分布。

#### 10.4 其它

这篇论文与大多数论文一样，假设电子束已经达到平衡态，即，辐射阻尼效应与量子激发效应达平衡时的情况。对于储存环电子束注入时，传输段存在横向耦合的情况，这些分析将不适用。另外，这篇论文假设 betatron tunes  $\nu_x, \nu_y$  与 betatron amplitude 没有关系，即，假设电子在横向相空间的中心区域。这种情况未必对所有束团内的电子都成立。

## 11 摇摆器中的相干同步辐射阻抗计算 [PRST-AB 6-04]

### Calculation of the coherent synchrotron radiation impedance from a wiggler

#### 11.1 基本信息

- 分类：尾场与阻抗计算
- 作者：Juhao Wu, Tor O. Raubenheimer, and Gennady V. Stupakov (主要机构: SLAC)
- 类型：理论
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.6.040701>

#### 11.2 摘要

大多数关于相干同步辐射 (coherent synchrotron radiation, CSR) 的研究对象考虑的是独立的二极铁。然而，在未来的线性对撞机 (linear collider) 的阻尼环 (damping ring)<sup>8</sup>中，很大一部分辐射发生在阻尼摇摆器 (damping wiggler) 中。这篇论文推导在摇摆器中由于 CSR 导致的纵向尾场与阻抗，特别是在当  $K$  值<sup>9</sup>甚大的时候。通过适当标定 (scaling) 之后，这篇论文得到的结果可以以与  $K$  无关的普适函数 (universal function) 表示。在极短或极长长度尺度，即，低频或高频极限情况下，有解析的渐进表达式。

#### 11.3 贡献或创新点

- 贡献：对于由一系列交变二极铁组成的摇摆器 (wiggler) 或波荡器 (undulator)，其 CSR 导致的尾场或阻抗的计算并不是简单的将单个二极铁的尾场或阻抗相加<sup>10</sup>，因为每对极 (pole) 产生的 CSR 场会在满足“共振条件”时有建设性干涉，因此，其尾场或阻抗会有明显的共振结构 (因此在这些频谱位置附近是窄频的)。换句话说，

---

<sup>8</sup>线性对撞机的结构基本上是对撞粒子通过直线加速器加速到一定能量之后，经过一弯转传输段，两束粒子对撞。在加速过程中，由于是直线加速，基本上没有同步辐射造成的冷却效应。因此，如果要进一步降低对撞束团的发射度，一般会使用阻尼环，在适当能量区间让粒子在阻尼环中运行，使其发射度降低至设定值，再进行下一阶段加速或对撞。

<sup>9</sup>这里的  $K$  值即是熟知的 undulator parameter (如果  $K \leq 1$ )，或 wiggler parameter (如果  $K \gg 1$ )，表征偏转磁场强度与辐射张角等相关物理量的参数。

<sup>10</sup>在短程极限情况下，摇摆器可以视为一串交变磁极的二极铁相加。

在某些特定波长或频率情况下，其尾场或阻抗的值将发散。这篇论文在 [1] 的基础上，将其尾场结果推广到  $\gamma \rightarrow \infty$  的情况。

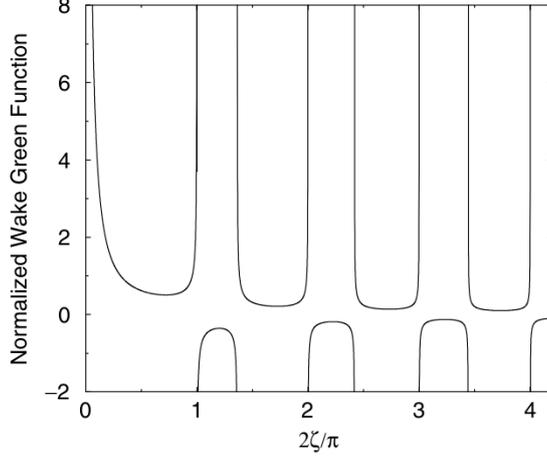


FIG. 3. The normalized wake Green function  $-w(s)[K/(\gamma k_w)]^2$  as a function of the normalized coordinate  $2z/\pi$ .

此外，也给出对应的阻抗形式。阻抗的实部与虚部分别如下图所示，在极低频与极高频情况下有渐进解析解，介于期间的阻抗则利用数值方法计算得到。

$$Z(k) = \int_0^\infty w(s)e^{-iks} ds = -ik \frac{K^2}{\gamma^2} \int_0^\infty G(\zeta)e^{-4i(k/k_0)\zeta} d\zeta$$

$$= -ik \frac{K^2}{\gamma^2} \left\{ \int_0^{\zeta_{\min}} [\text{Eq. (14)}] e^{-4i(k/k_0)\zeta} d\zeta + \int_{\zeta_{\min}}^{\zeta_{\max}} [\text{Eq. (11)}] e^{-4i(k/k_0)\zeta} d\zeta + \int_{\zeta_{\max}}^\infty [\text{Eq. (22)}] e^{-4i(k/k_0)\zeta} d\zeta \right\}$$

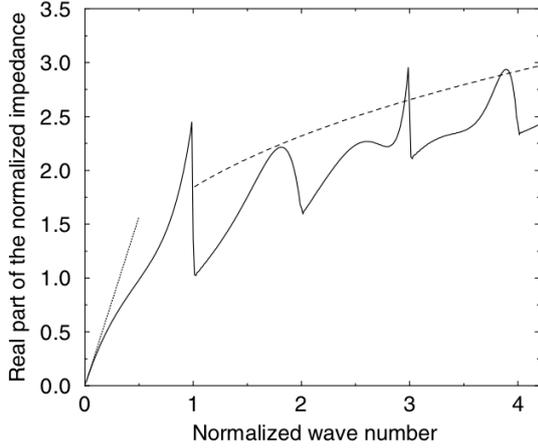


FIG. 5. The real part of the normalized impedance  $Z(k)/k_w$  as a function of the normalized wave number  $k/k_0$ . Solid line: numerical solution from Eq. (23); dotted line: analytical low-frequency asymptotic behavior from Eq. (26); and dashed line: analytical high-frequency asymptotic behavior from Eq. (27).

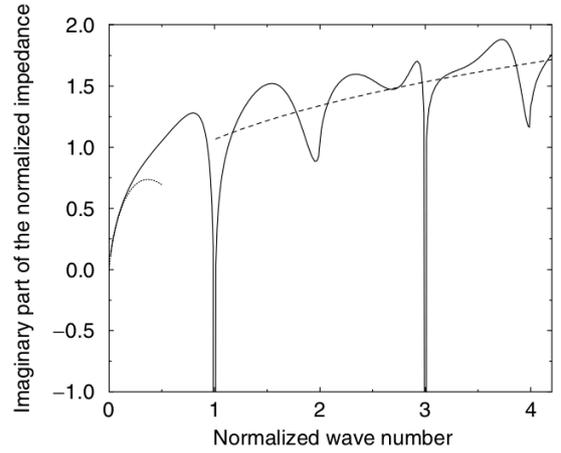


FIG. 4. The imaginary part of the normalized impedance  $Z(k)/k_w$  as a function of the normalized wave number  $k/k_0$ . Solid line: numerical solution from Eq. (23); dotted line: analytical low-frequency asymptotic behavior from Eq. (26); and dashed line: analytical high-frequency asymptotic behavior from Eq. (27).

- 创新点: 这里的分析假设摇摆器为无穷长, 得到的阻抗在归一化波数为整数时, 可以明显看到有共振现象。但是, 这个共振仍为有限频宽, 非单一频率。与 [3] 中推导的理想、单频的 FEL 阻抗有本质上区别。

## 11.4 其它

注意, 这篇论文用的  $s$  与  $z$  (或是  $\hat{s}$  与  $\hat{z}$ ) 遵循 FEL 社群惯例。

这篇论文在讨论长程尾场情况时 (Sec. III.B), 修正了 [1] 中的一处错误。

论文作者在这个工作给出摇摆器的 CSR 尾场与阻抗表示, 在另一篇工作 [2] 中则是利用这里得到的阻抗分析了在 Next Linear Collider (NLC) 阻尼环中的微束团不稳定性。

## 参考文献

- [1] E.L. Saldin, E.A. Schneidmiller, and M.V. Yurkov, Radiative interaction of electrons in a bunch moving in an undulator, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 417, 158 (1998), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900298006238>
- [2] Juhao Wu, G.V. Stupakov, T.O. Raubenheimer, and Z. Huang, Impact of the wiggler coherent synchrotron radiation impedance on the beam instability and damping ring optimization, Phys. Rev. STAB 6,104404 (2003), <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.6.104404>
- [3] G. Stupakov and S. Krinsky, Derivation of FEL gain using wakefield approach, Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, pp.3225-3227

## 12 摇摆器相干同步辐射阻抗对束流不稳定性与阻尼环优化的影响 [PRST-AB 6-10]

### Impact of the wiggler coherent synchrotron radiation impedance on the beam instability and damping ring optimization

#### 12.1 基本信息

- 分类：多粒子束流动力学
- 作者：Juhao Wu, G. V. Stupakov, T. O. Raubenheimer, and Zhirong Huang (主要机构: SLAC)
- 类型：理论
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.6.104404>

#### 12.2 摘要

相干同步辐射 (coherent synchrotron radiation, CSR) 不仅增加电子束团的能散与发射度，还可能导致集体不稳定性。先前关于 CSR 导致的纵向不稳定性的研究大多数聚焦在由二极铁造成的 CSR 不稳定性。然而，许多储存环包含摇摆器，由其引起的同步辐射效应占了整个环相当程度的比例。这些储存环包含高光度 (luminosity) 的对撞机，如 DAPHNE、PEP-II、KEK-B、CESR-C 与未来直线对撞机的阻尼环等。这篇论文研究  $K \gg 1$  的摇摆器中 CSR 导致的纵向不稳定性。这个不稳定性类似于由于在束流管 (beam pipe) 截止频率附近引起的 (相对) 低频的微波不稳定性 (microwave instability)。将这个理论模型得到的结果应用于目前几个相关设计的微束团不稳定性增长率与阈值流强。利用将摇摆器的 CSR 阻抗与二极铁 CSR 阻抗的标度差异，也许能够提供阻尼环的设计与优化。

#### 12.3 贡献或创新点

- 贡献：这篇论文基于应用在储存环作为分析集体不稳定性的 Vlasov 方程，将在 [1] 得到的在摇摆器中的 CSR 阻抗代入 Vlasov 方程，分析电子束在阻尼环中的微束团不稳定性。得到不稳定性的增长率 (growth rate, 如论文 Fig. 4)，以及相对应的阈值流强 (threshold particle number per bunch)。

相较于在直线加速器中的微束团不稳定性 (microbunching instability, MBI), 在储存环中, 发生不稳定性的调制波长较长 (大概在 mm 等级), 或频率较低, 有时又称微波不稳定性 (microwave instability, MWI)。

## 12.4 其它

关于摇摆器的 CSR 尾场与阻抗的推导细节, 可以参考作者的另一篇论文 [1]。

## 参考文献

- [1] Juhao Wu, G.V. Stupakov, T.O. Raubenheimer, and Z. Huang, Calculation of the coherent synchrotron radiation impedance from a wiggler, Phys. Rev. STAB **6**, 040701 (2003), <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.6.040701>

## 13 通过皮秒激光辐照金属箔产生数毫焦的相干太赫兹脉冲

### Multimillijoule coherent terahertz bursts from picosecond laser-irradiated metal foils

#### 13.1 基本信息

- 分类: 其它相关文章
- 作者: Guoqian Liao (SJTU), Yutong Li (CAS) *et al.*
- 类型: 实验
- 链接: <https://www.pnas.org/content/116/10/3994>

#### 13.2 摘要

超高功率太赫兹 ( $10^{12}$  Hz, THz) 辐射源在许多应用中是必不可少的, 例如, 基于 THz 波的紧凑型加速器和 THz 物质控制。然而, 迄今为止, 无论是基于大规模加速器还是基于高功率激光器产生的太赫兹源都没有能产生能量超过毫焦耳 (mJ) 的太赫兹脉冲<sup>11</sup>。这篇论文报告了一个高强度皮秒激光脉冲照射金属箔所产生高达数十 mJ 的 THz 脉冲能量的实验。此外, 如果预先使用等离子体照射金属箔背面, 可以观察到太赫兹能量又进一步放大了  $\sim 4$  倍。实验测量和理论模型表明, 利用激光加速自靶材逃逸产生的高能电子束产生相干渡越辐射 (coherent transition radiation, CTR) 是 THz 产生的主要机制。作为概念验证应用, 本文观察了在高阻硅 (high-resistivity silicon) 中观察到太赫兹场致载流子倍增现象。如此高的太赫兹能量不仅可以触发物质中的各种非线性动力学, 而且开启了相对论太赫兹光学 (relativistic THz optics) 的研究时代。

#### 13.3 贡献或创新点

- 创新点: 使用基于激光激发金属箔引致相干渡越辐射 CTR 而产生 THz 脉冲的方式, 第一次产生了数十 mJ 的 THz 脉冲, THz 脉冲的中心频率大部分在 0.1~1 THz 范围, 在金属箔表面的 THz 电场预计达到 4 GV/m。此外, 本文使用了预脉冲 (prepulse) 提前激发金属箔的方法, 预计将 THz 脉冲能量提高了 4 倍。
- 贡献: 本文产生了数十 mJ 的 THz 脉冲, 并通过实验验证了背后的物理机制主要为利用激光加速自金属靶逃逸的电子束至高能区间从而产生的相干渡越辐射。值

---

<sup>11</sup>JLab THz FEL 大约数百  $\mu$ J。

值得一提的是，本文用来照射金属箔的激光能量为 60 J，远超过标准的商用激光器能达到范畴。但本文使用的预脉冲提前激发金属箔的方法，或许可以应用到低能激光激发 THz 脉冲的实验中，并提高所产生的 THz 脉冲的能量。

### 13.4 装置意义图及部分结果

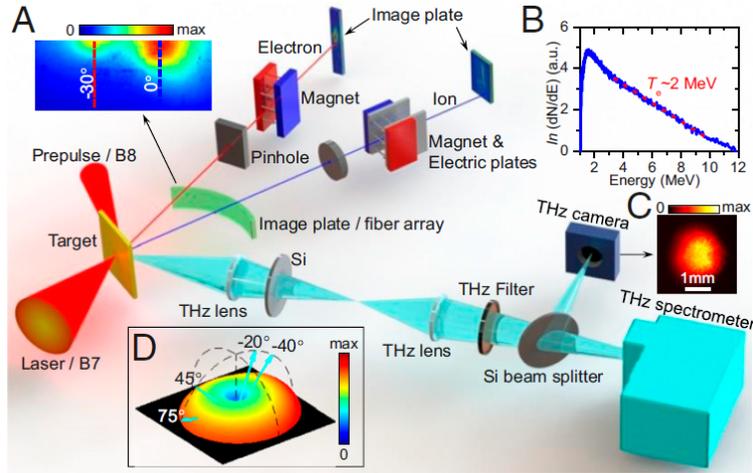


图 6: 实验装置示意图。(A) 用 image plate 测量的电子角分布。(B) 测量了电子能谱和指数衰减函数曲线拟合。(C) 用 CMOS 太赫兹相机测量的太赫兹光斑图像。(D) 从理论上评估了从目标后表面发射的太赫兹辐射的空间分布，青色箭头表示太赫兹探测方向。为清楚起见，仅描绘了相对于后目标法线的 75° 处的 THz 探测，而未示出其它方向上的类似配置。

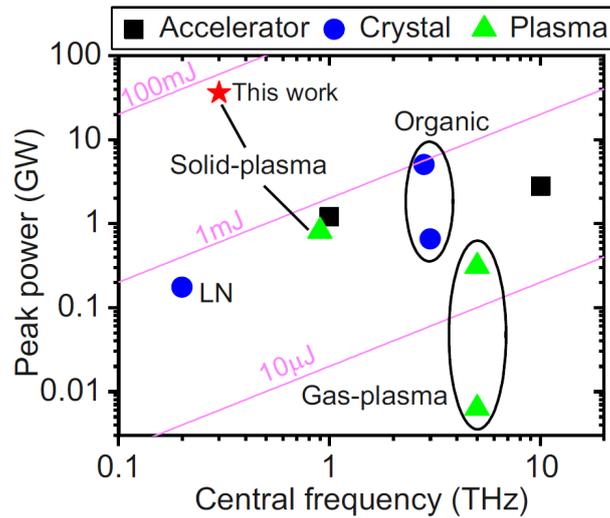


图 7: 目前可用的高峰值功率太赫兹源的比较 (数据来源可见原文该图中的参考文献)。

## 14 利用尾场方法推导自由电子激光增益关系

### Derivation of FEL gain using wakefield approach

#### 14.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：G. Stupakov (SLAC) and S. Krinsky (BNL)
- 类型：理论
- 链接：<https://accelconf.web.cern.ch/p03/PAPERS/RPPG025.PDF>

#### 14.2 摘要

这篇论文利用经典的尾场方法描述一维自由电子激光 (free electron laser, FEL) 不稳定性理论。先是通过分析得到螺旋波荡器的一维纵向尾场，然后利用 Vlasov 方程，适当考虑辐射场的推迟效应后，就能得到产生 FEL 不稳定性的正确的色散关系。色散关系与利用传统方法得到的形式一致。

#### 14.3 贡献或创新点

- 贡献：这是一篇有趣的会议论文，发表于 2003 年的粒子加速器会议 (particle accelerator conference, PAC)<sup>12</sup>。过去给人一种印象是，研究加速器集体不稳定性的一套理论通常基于求解尾场或阻抗模型，确立模型之后，代入 Vlasov 或 Fokker-Planck 方程分析集体动力学；与研究自由电子激光社群通常解 Maxwell-Lorentz 方程组有所不同。这篇论文作者利用前者方法重新得到利用后者分析中得到的一维 FEL 色散关系，一定程度上将两种不同分析方式在一个理论框架上统合。
- 创新点：虽然推导得到的色散关系与经典自由电子激光理论得到的一致，但是这篇论文的创新点在于对 Vlasov 方程一个项的修正，加入了辐射场与运动中的电子束之间的相对运动关系，如下式所示，注意红色标注处

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f}{\partial s} - \eta \delta \frac{\partial f}{\partial z} - \frac{r_0}{\gamma} \frac{\partial f}{\partial \delta} \iint w(z - \zeta; s) f(\zeta, \delta; s) d\zeta d\delta = 0 \\ \rightarrow & \frac{\partial f}{\partial s} - \eta \delta \frac{\partial f}{\partial z} - \frac{r_0}{\gamma} \frac{\partial f}{\partial \delta} \iint w(z - \zeta; s) f\left(\zeta, \delta; s - \frac{z - \zeta}{1 - \beta_z}\right) d\zeta d\delta = 0 \end{aligned}$$

<sup>12</sup>历年的国际加速器发表的会议论文一般可以在 JACoW 找到，<http://www.jacow.org/>。

## 14.4 其它

这篇论文使用的 FEL“尾场”<sup>13</sup>如 Eq. (6) 所示, 为单频场, 频率为  $\omega_0$  [参考 Eq. (3)]。实际情况辐射产生的场具有有限频宽。尽管为单频模型, 产生 FEL 不稳定性的区间并不仅限于当  $\nu = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = 0$  时, 而是存在一个有限区间, 即  $|\nu| \leq 2\rho$ , 其中,  $\rho$  为 Pierce parameter (有时又称 FEL parameter)。造成这个有限区间的根本原因在于辐射场与电子运动的推迟效应。为了进一步验证这个论点, 在论文中的最后一节, 作者演示了不考虑推迟效应情况下的色散关系, 得到了在  $\nu \rightarrow 0$  时的发散结果。

这里也许值得一提, 辐射场与电子的推迟条件 (retardation condition) 在一般基于尾场或阻抗形式的传统集体不稳定性分析中没有涉及, 涉及的是因果律 (causality)。只有在两者都适当加入理论框架后, 才能得到正确的 FEL 色散关系。

这篇论文为会议论文, 或许不像标准期刊论文严谨, 文中有几处瑕不掩瑜的错误, 如

- Eq.(3) 下方的式子多了 2 倍, 即

$$E_0 = H_0 = 2\gamma_z \hat{H}_0 = \frac{4\pi}{c} \sigma v_{\perp} \gamma_z^2$$

应为

$$E_0 = H_0 = \gamma_z \hat{H}_0 = \frac{2\pi}{c} \sigma v_{\perp} \gamma_z^2$$

- Eq.(5) 最后一个等号右边少了一个  $c$
- Eq.(6) 中的 otherwise 应为 otherwise
- Eq.(14) 中的积分变元  $s'$  应为  $\hat{s}'$

S. Krinsky 在 2014 年过世, 有许多关于储存环加速器与自由电子激光的开创性工作, 其相关工作总结可见于 FEL 2014 余理华教授的介绍<sup>14</sup>。

---

<sup>13</sup>尾场为 wakefield; 严格来说, 这里的场应为 advanced field。

<sup>14</sup>[https://accelconf.web.cern.ch/FEL2014/talks/moa01\\_talk.pdf](https://accelconf.web.cern.ch/FEL2014/talks/moa01_talk.pdf)、<https://accelconf.web.cern.ch/FEL2014/papers/moa01.pdf>