

加速器束流动力学期刊论文导读 (2021 年 7 月)

受“京师物理”公众号启发，我们几个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) 旗下的其它期刊或过去 PRST-AB、Elsevier 的核物理与技术 Nuclear Instruments and Methods (NIM) 期刊等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，在 http://faculty.hust.edu.cn/jcytsai/zh_CN/article/2191806/content/1551.htm#article 可以找到过去的导读文档。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 7 月) 导读成员¹负责结果统计如下表

成员姓名	导读列表	联系方式
蔡承颖	[1]、[2]、[3]、[4]、[9]、[10]、[12]、[13]	jcytsai@hust.edu.cn
宋怡方	[5]、[6]、[8]	yifangsong@hust.edu.cn
漆鸿	[7]	d201880400@hust.edu.cn
范子钰	[11]	m202071684@hust.edu.cn

¹宋怡方、漆鸿、范子钰为电磁所樊宽军教授研究生。

目录

1	等时储存环自由电子激光概念研究 [NIMA 352]	
	The isochronous storage ring free electron laser	4
2	电子储存环的纵向量子辐射激发 [PRE 54]	
	Longitudinal radiation excitation in an electron storage ring	6
3	准等时性电子储存环 [PRE 48]	
	Quasi-isochronous storage rings	9
4	从真空管到激光，再回到真空管 [PRST-AB 17-07]	
	Wilson Prize article: From vacuum tubes to lasers and back again	13
5	基于亚 10 飞秒电子衍射的激光-等离子体电子源的概念研究 [PRAB 19-02]	
	Concept of a laser-plasma-based electron source for sub-10-fs electron diffraction	22
6	由能量啁啾腔连接射频电子枪产生的高电荷量超短电子束团及其基于横向偏转腔的束长测量 [PRAB 24-08]	
	High-charge ultrashort electron bunch generation by an energy chirping cell-attached rf electron gun and its measurement using a transverse deflecting cavity	24
7	能量啁啾单元附着射频电子枪产生的高电荷超短电子束及其横向偏转腔的测量结果 [PRAB 24-08]	
	High-charge ultrashort electron bunch generation by an energy chirping cell-attached rf electron gun and its measurement using a transverse deflecting cavity	26
8	基于一维高增益自由电子激光模型的边带不稳定性分析 [PRAB 20-12]	
	Sideband instability analysis based on a one-dimensional high-gain free electron laser model	30
9	X 射线自由电子激光波荡器的纵向阻抗与尾场公式与其对 ESASE 的影响 [NIMA 583]	
	Longitudinal impedance and wake from XFEL undulators. Impact on current-enhanced SASE schemes	33
10	相干同步辐射效应的近似公式 [PRAB 24-08]	
	Approximated expressions for the coherent synchrotron radiation effect in various accelerator scenarios	36

- 11 各种加速器场景下相干同步辐射效应的近似表达式 [PRAB 24-08]
Approximated expressions for the coherent synchrotron radiation effect in
various accelerator scenarios 38
- 12 准等时性储存环二阶单粒子动力学及其在 LNLS-UVX 分析应用 [NIMA 329]
Second order single particle dynamics in quasi-isochronous storage rings and
its application to the LNLS-UVX ring 41
- 13 阿秒电子束团产生的真空紫外相干波荡器辐射 [Sci. Rep. 11]
Vacuum ultraviolet coherent undulator radiation from attosecond electron
bunches 44

1 等时储存环自由电子激光概念研究 [NIMA 352]

The isochronous storage ring free electron laser

1.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Kenneth LaMon (主要机构：LBL)
- 类型：理论、数值模拟
- 链接：<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0168900295900209>

1.2 摘要

这篇论文探讨等时储存环自由电子激光 (isochronous storage ring free electron laser, ISRFEL) 的概念与可行性。考虑输出激光效能与储存环参数的关系，包含动量压缩因子、束团电流等。利用这篇论文介绍的模型，可以计算激光增长时间、饱和特性、输出功率与激光脉冲的时间分布等。按这篇论文的分析，作者认为等时储存环自由电子激光概念可行性不高，除对等时性储存环的设计要求困难、许多潜在集体效应尚未考虑，且激光输出效能与基于高功率直线加速器的自由电子激光器无法相比。

1.3 贡献或创新点

- 贡献：在基于直线加速器自由电子激光概念被实现之前，同时存在利用储存环实现自由电子激光的分析。为了实现储存环自由电子激光，必须确保逐圈运行时电子束团的品质能够保持，因此，储存环设计希望具有较好的等时性。等时性意味着电子束团内 (相对于参考粒子) 不同能量的粒子在逐圈运行时，其在束团中 (相对于参考粒子) 的相对距离不会改变。可以预期，当辐射波长越短，对储存环等时性的要求将会越高。这篇论文探讨等时储存环自由电子激光概念与可行性，示意图如下

细节不论，这篇论文将分析分为两部分，Section 2 考虑波荡器中的电子与辐射场动力学，其中， $\zeta = kz - \omega t$ 与 $\nu = 4\pi N \Delta\gamma/\gamma$ 分别表电子局部坐标与相对能差， $|a|$ 与 ϕ 表辐射场的振幅与相位。电子束团群聚因子为 η 。在波荡器内的运动方程为 Eqs. (2.10-2.13)。

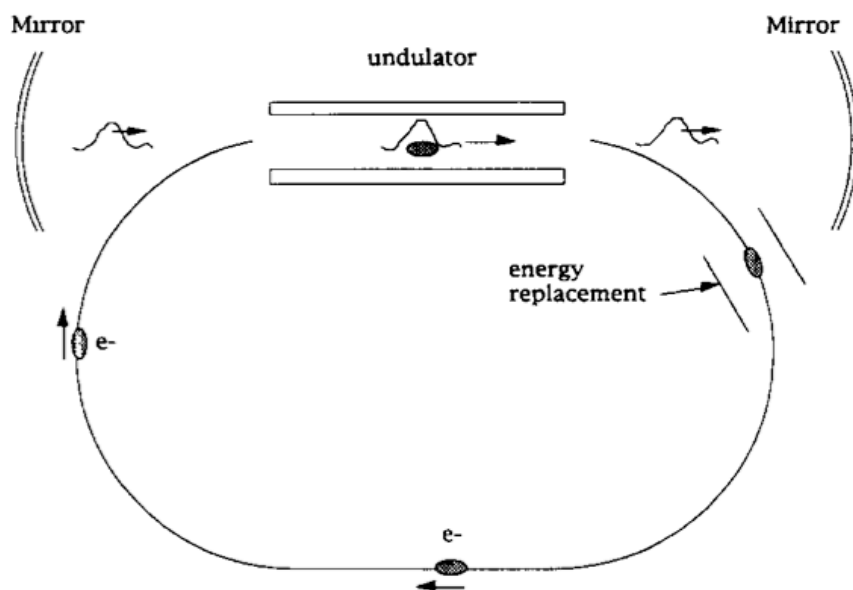


Fig. 1. Schematic diagram of an isochronous storage ring FEL.

Section 3 考虑电子束团在储存环中的动力学，包含两个过程，动量压缩与能量补充。分析忽略纵向同步辐射振荡，即，假设发生自由电子激光过程比其快得多。由于对储存环等时性的要求，这里的动量压缩因子考虑到二阶，有 $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \Delta\gamma/\gamma$ 。运动方程由 Eqs. (3.3-3.4) 给出。

1.4 其它

一个类似 (但不全相同) 的关于等时储存环相干辐射源的研究可以参考 [1]。

参考文献

- [1] D.A.G. Deacon, Basic theory of the isochronous storage ring laser, Phys. Rep. 76, pp. 349-391(1981), [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(81\)90137-X](https://doi.org/10.1016/0370-1573(81)90137-X)

2 电子储存环的纵向量子辐射激发 [PRE 54]

Longitudinal radiation excitation in an electron storage ring

2.1 基本信息

- 分类：单粒子束流动力学
- 作者：Yoshihiko Shoji, Hitoshi Tanaka, Masaru Takao, and Kouichi Soutome (主要机构：Himeji Institute of Technology, 日本)
- 类型：理论
- 链接：<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.54.R4556>

2.2 摘要

这篇论文讨论了在电子储存环中，个别电子逐圈路径长度由于发出同步辐射的影响。即使单圈内不同电子发出的同步辐射能量相同，它们的路径长度差仍可能因为发出同步辐射的位置不同而有所不同。通常来说，这种现象引致的效应在一般 α_c 较大的储存环中被不容易被观察到。然而，在准等时性储存环中，这种效应导致的路径长度变动将主宰着最终束团的纵向长度。这篇论文给出在线性光学传输情况下，准等时性储存环在达到平衡态时的束长与（非相干）能散的解析公式。从这些公式能得到在一准等时性储存环中的平衡态束长的下限。

2.3 贡献或创新点

- 创新点：一般熟悉的储存环中，达平衡时，束团的纵向长度与能散有

$$\sigma_z = \frac{c|\eta|}{\omega_s} \sigma_\delta$$

其中， η 为纵向滑相因子 (slip factor)²，纵向同步振荡角频率有 $\omega_s = \sqrt{-\frac{eV_{RF}h\eta}{2\pi\beta^2 E_0} \cos \phi_s} \propto \sqrt{|\eta|}$ 。由此可知， $\sigma_z \propto \sqrt{|\eta|}$ ，因此，很自然会想，当 η 减小时，则能使平衡时的束团长度更短。事实上，确实存在这个趋势³。但是，当 η 或 α_c 非常小的时候，这

²或称动量压缩因子，有时以 α_c 表示。两者有 $\eta = \alpha_c - 1/\gamma^2$ 关系，当束线设计的参考能量较高时，舍去 $1/\gamma^2$ ，则有 $\eta \approx \alpha_c$ 。在仅考虑线性传输情况下， α_c 仅与束线设计有关，与束团特性无关。

³根据这篇论文里的介绍，在诸多同步辐射储存环中已经证实这个结论，如 NSLS、UVSOR、ALS、Super-ACO、ESRF、LNLS、SPEAR 等。

个结论将不再成立。

这篇论文考虑一个情况，即使单圈内束团内不同电子发出的同步辐射能量相同，它们的路径长度差仍可能因为发出同步辐射的位置不同而有所不同。这是因为电子发出辐射光子的过程是随机的，可能发生在该圈的首个弯铁，也可能发生在该圈的末个弯铁。发出光子之后，该电子能量便会自发出光子的位置开始偏离设计能量，因此至到达下一圈射频谐振腔前的行进的距离将与参考粒子行进的距离产生偏差 ΔL 或 $\Delta\tau$ ，可以写成

$$\Delta L = \sum_{j=1}^N \int_{s_j}^{L_0} \frac{1}{\rho(s)} \left[\eta(s) \frac{u_j}{E_0} + x_j \left(s, \frac{u_j}{E_0} \right) \right] ds$$

或 $\Delta\tau = \frac{T_0}{L_0} \Delta L$ 。其中，假设该电子在行进单圈时总共发出 N 个光子， N 遵循泊松分布 (Poisson distribution)。

这个现象引致的效应在一般 α_c 较大的储存环中不容易被观察到。然而，在准等时性储存环中，这种效应导致的路径长度变动将主宰着最终束团的纵向长度。

- 贡献：按这篇论文的分析，统计独立的光子发射事件导致的个别电子在第 n 圈的线性传输矩阵可以写为 $X_n = AX_{n-1} + D_n$ ，对应的显形式为

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\delta E}{E_0} \right|_n \\ \left. \delta\tau \right|_n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 2\kappa_s T_0 & 0 \\ -\alpha_0 T_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \frac{eV_{RF}}{E_0} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \left. \frac{\delta E}{E_0} \right|_{n-1} \\ \left. \delta\tau \right|_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left. \frac{\Delta E}{E_0} \right|_n - \langle \langle \left. \frac{\Delta E}{E_0} \right| \rangle \rangle \\ \left. \Delta\tau \right|_n - \langle \langle \Delta\tau \rangle \rangle \end{bmatrix}$$

其中， κ_s 为同步辐射阻尼系数 (damping coefficient)， α_0 为动量压缩因子。注意到，这边用 Δ 表示纵向量子辐射激发效应，而用 δ 表示相对于参考粒子的差量。束团的单粒子稳定性由矩阵 A 决定。上式可以进一步化简，在平衡态时与初始状态无关，而有下式右边的关系

$$X_n = A^n X_0 + \sum_{m=0}^{n-1} A^m D_{n-m} \Rightarrow X_\infty = \sum_{m=0}^{\infty} A^m D_m$$

注意到，在平衡态时，束团能散在单圈内不随 s 而变，但是单圈内束长仍为 s 的函数。

求解上式 X_∞ 中 $\frac{\delta E}{E_0}$ 与 $\delta\tau$ 的方差 (variance)，则有

$$\sigma_E^2 = \frac{1 + (\Omega^* T_0)^2 \frac{I_\alpha}{\alpha^2}}{1 - \left(\frac{1}{2} \Omega^* T_0 \right)^2} \sigma_{EN}^2$$

其中, $\sigma_{EN}^2 = \frac{1}{4\kappa_s T_0} \langle N \rangle \left\langle \frac{u^2}{E_0^2} \right\rangle$ 为熟悉的束团自然能散 (natural energy spread), I_α 定义在 Eq. (7)。注意到, 此项 $(\Omega^* T_0)^2 = \frac{\alpha_0 e V'_{RF}}{E_0} T_0$ 表征纵向量子辐射激发效应。在非准等时情况下, $(\Omega^* T_0)^2 \frac{I_\alpha}{\alpha^2}$ 相比于 1 很小。

除了能散之外, 平衡时可达到的最短束长可以写成

$$\sigma_{\tau, \min}^2 \approx T_0^2 \left[I_\alpha + 4 \left(\frac{\kappa_s E_0}{e V'_{RF}} \right)^2 \right] \sigma_{EN}^2$$

注意到, 这个最短束长值仅能在环中部分位置实现, 无法在环中的各处都满足。

2.4 其它

这篇论文分析中引入了局域动量压缩因子 (partial momentum compaction factor) 物理量 $\tilde{\alpha}(s_j)$ 。

作者在得到 Eq. (19) 与 Eq. (22) 的过程中略去许多细节。分析方法也许可以参考 [1]。

参考文献

- [1] Schin Date, Kouichi Soutome, and Ainosuke Ando, Equilibrium bunch length with RF noises in electron storage rings, NIMA 355, pp. 199-207 (1995), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/016890029401146X>

3 准等时性电子储存环 [PRE 48]

Quasi-isochronous storage rings

3.1 基本信息

- 分类：单粒子束团动力学
- 作者：David Robin, Etienne Forest, Claudio Pellegrini, and Ali Amiry (主要机构：LBL)
- 类型：理论、数值计算
- 链接：<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.48.2149>

3.2 摘要

这篇论文讨论了准等时性电子储存环的单粒子非线性动力学，即，当滑相因子 (phase slip factor, η) 非常小的情况。这种准等时性电子储存环允许非常短的电子束团稳定运行，对提高对撞机光度 (luminosity) 或是同步辐射光源亮度 (brightness) 有潜在应用。这篇论文在讨论纵向单粒子动力学情况下，给出电子束团要能稳定运行的定标定律 (scaling law)，这些定标定律是由相空间一维哈密顿量得到，结合一个实际加速器磁聚焦结构设计 UVSOR，与六维相空间粒子跟踪模拟程序比较，得到一致结果。

3.3 贡献或创新点

- 贡献：相较于常见的同步辐射光源储存环，准等时性电子储存环的滑相因子大概小了两个数量级或更多。如果横纵向耦合不明显，则两种储存环设计的横向动力学没有太大差别，主要差别在于纵向动力学。滑相因子的原始定义为

$$\eta = \frac{\Delta T/T_0}{\Delta E/E_0} = \frac{\Delta \Psi/2\pi}{\Delta E/E_0}$$

其中，束团中任一粒子的绕行周期不尽相同，与参考粒子能量的差 δ 有关，因此， $\eta = \eta(\delta)$ 。根据储存环设计的形态，滑相因子可以写成 Eq. (5)，按泰勒展开有

$$\eta = \frac{\eta_0}{\delta} + \eta_1 + \eta_2 \delta + \dots$$

忽略横向 betatron 振荡对滑相因子的贡献，则简化成

$$\eta = \eta_{c1} + \eta_{c2} \delta + \dots$$

这篇论文探讨在不同 η_{c1} 与 η_{c2} 情况下的单粒子动力学。注意到，当 η_{c1} 很小时， η_{c2} 的重要性就凸显了。因此，要设计一个准等时性电子储存环，使 η_{c1} 尽量小只是阶段目标而不是最终目标。使 η_{c1} 尽量小的同时也要避免 η_{c2} 可能造成的动力学效应，最终目标是确保粒子在这种设计下能够维持稳定性。这篇论文讨论的是单粒子效应下的稳定性要求，即，要求粒子运动在相空间稳定定点区域附近。

单粒子运动方程可以写成

$$\begin{cases} \phi' = h\eta\delta = h(\eta_{c1}\delta + \eta_{c2}\delta^2) \\ \delta' = \frac{eV}{2\pi E_0} [\sin(\phi + \phi_0) - \sin\phi_0] \end{cases}$$

对应的哈密顿量为

$$H = \frac{1}{2}h\eta_{c1}\delta^2 + \frac{1}{3}h\eta_{c2}\delta^3 + \frac{eV}{2\pi E_0} [\cos(\phi + \phi_0) + \phi \sin\phi_0]$$

有了哈密顿量，就可以描绘相空间结构。下图表示在三种不同情况下的相空间拓扑，按 $\eta_{c1}/\eta_{c2} = \delta_{\max}$ 区分，其中

$$\delta_{\max} = \sqrt{\frac{2eV}{\pi h\eta_{c1}E_0} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \phi_0 \right) \sin\phi_0 - \cos\phi_0 \right]}$$

图 (a) 类似传统储存环的相空间拓扑。对于传统储存环的相空间拓扑，单粒子稳定存在于定点稳定 (stable fixed point, SFP) 区域附近的条件为

$$\sigma_z < \frac{R(\pi - 2\phi_0)}{20h}, \sigma_\delta < \frac{\delta_{\max}}{10}$$

知道图 (b) 为基于 $\eta_{c1}/\eta_{c2} = \delta_{\max}$ 条件得到之后，对于图 (c) 情况，单粒子稳定存在于定点稳定 (stable fixed point, SFP) 区域附近的条件则可以写为

$$\sigma_\delta < \left| \frac{\eta_{c1}/\eta_{c2}}{20} \right|$$

这是这篇论文的主要结果之一，这个结果将在这篇论文第二部分与六维相空间粒子跟踪模拟程序比较检验。

给定哈密顿量之后，在 $\eta_{c1} \gg \eta_{c2}$ 情况下，可以求得纵向归一化同步振荡频率

$$\nu_{s0} = \sqrt{\frac{h\eta_{c1}eV |\cos\phi_0|}{2\pi E_0}}$$

当 η_{c2} 不能忽略时，其扮演类似于横向色品函数 (chromaticity, ξ) 的角色。因此有

$$\nu_{s1} = \nu_{s0} \frac{\eta_{c2}}{\eta_{c1}}$$

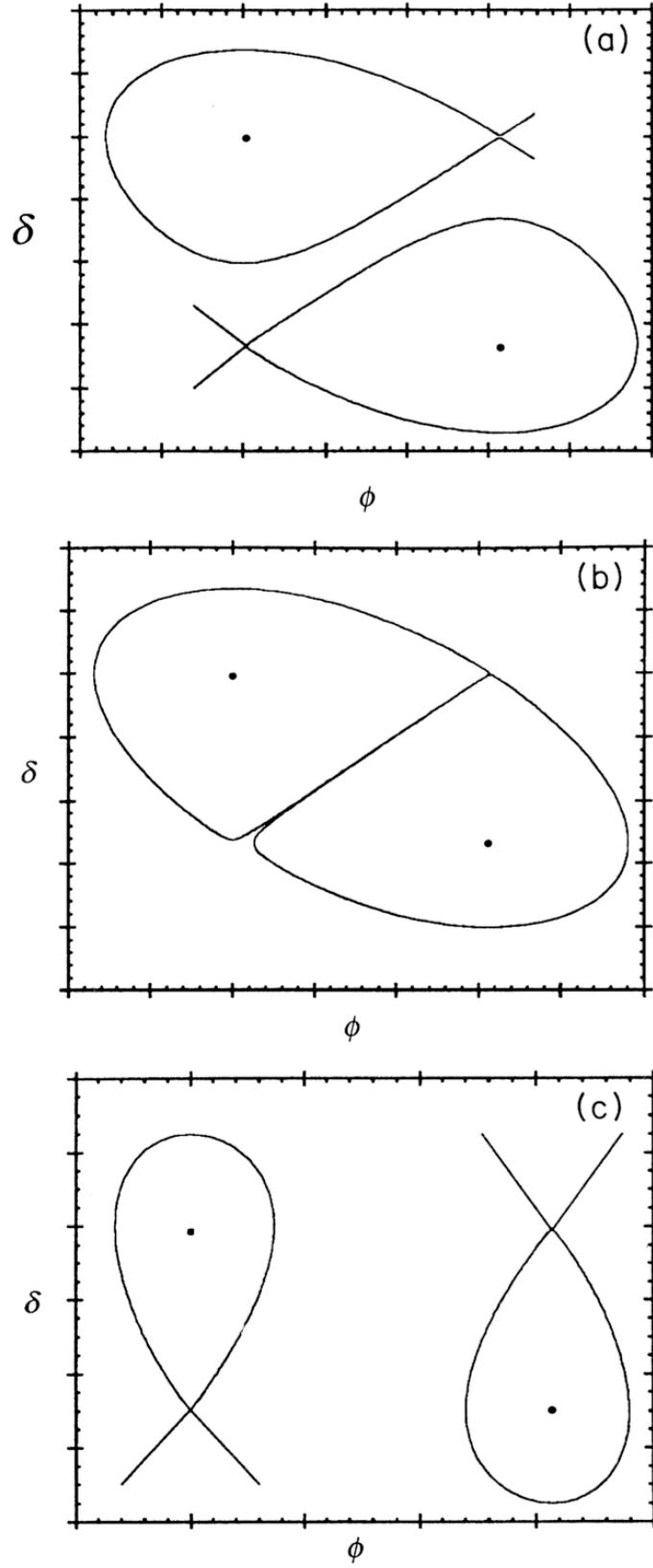


FIG. 3. (a) rf-bucket regime. (b) Boundary between rf bucket and α -bucket regime. (c) α -bucket regime.

图 1: (a) 称 RF bucket, 上下两个 bucket 沿左右移动; (c) 称 α -bucket, 左右两个 bucket 沿上下移动。

为了得到更小的 η_{c1} ，同时要使下一个高阶项 η_{c2} 更小，才能使粒子维持足够的稳定区域 $\sigma_\delta < \left| \frac{\eta_{c1}/\eta_{c2}}{20} \right|$ 。要使 η_{c2} 更小，则需要引入六极铁组。一般六极铁组也用来修正横向色品函数 ξ ，因此，为了避免互相干扰，建议引入另一组独立的六极铁组。引入的六极铁组导致的 η_{c2} 改变可以参考论文的 Eq. (30)。

3.4 其它

关于准等时性电子储存环的另一篇论文，可以参考 [1]。

参考文献

- [1] Claudio Pellegrini and David Robin, Quasi-isochronous storage ring, NIMA 301, pp. 27-36 (1991), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0168900291907348>

4 从真空管到激光，再回到真空管 [PRST-AB 17-07]

Wilson Prize article: From vacuum tubes to lasers and back again

4.1 基本信息

- 分类：Wilson Prize 邀请论文
- 作者：John Michael Julius Madey (University of Hawaii)
- 类型：数值模拟
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.17.074901>

4.2 摘要

John Madey⁴教授是 2012 年美国物理学会 (APS) Robert Wilson 奖的获得者，获奖词为“For the invention and first experimental demonstration of the free electron laser and important contributions to its conceptual development”。这篇文章基于 John Madey 教授的个人纪实，回忆、梳理了关于自由电子激光发展的历程。1960 年 Theodore Maiman 首次证实光波长范围激光的成就，为真空电子学带来变革性的冲击 (transformational impact)，为基于自由电子的更短波长相干辐射源铺路。自由电子激光 (free electron laser, FEL) 源于 Arthur Leonard Schawlow⁵与 Charles Hard Townes⁶以“束缚原子”激光为基础的一种自由电子形式的实现，更大发展潜力在于频率可调、高功率、短波长的应用范围。更多未被发掘的契机可能仍藏于对自由电子激光背后物理的更近一步的认识。

⁴按https://en.wikipedia.org/wiki/John_Madey，本科与硕士于 1964-1965 年自加州理工学院 (California Institute of Technology, Caltech) 毕业，博士 1970 年自 Stanford 大学毕业。John Madey 于 2016 年因肺炎过世。<https://physicstoday.scitation.org/doi/full/10.1063/PT.3.3436>

⁵1981 年诺贝尔物理学奖 (1/4)，与 Nicolaas Bloembergen (1/4) 及 Kai M. Siegbahn (1/2) 分享，A.L. Schawlow 与 Nicolaas Bloembergen 的获奖词为“for their contribution to the development of laser spectroscopy”，Kai M. Siegbahn 的获奖词则为“for his contribution to the development of high-resolution electron spectroscopy”。<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1981/summary/>

⁶1964 年诺贝尔物理学奖 (1/2)，与 Nicolay Gennadiyevich Basov(1/4) 及 Aleksandr Mikhailovich Prokhorov(1/4) 分享，获奖词为“for fundamental work in the field of quantum electronics, which has led to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle”。<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1964/summary/>

4.3 一些记录

文章主体分五部分：

A. 1960 年代的电子真空管技术与 Maiman 的“新”激光

- Klystron, magnetron, traveling wave tube (TWT) 等真空高频电子微波器件的操作频率在 100 GHz 为一个限制，进入 THz 将面临极大挑战。激光则不受此限。
- Schawlow 与 Townes 的工作给了四个启示，一个辐射系统要能形成，需要
 - 光放大过程基于 (比起微波物理中) 更具一般性的爱因斯坦的 stimulated emission 机制，是个量子过程；
 - 放大过程指 transition rate for stimulated emission 超过 transition rate for absorption；
 - 电磁场中几个 (放大) 模的 spontaneous transition rate 要够大，至少比谐振腔损耗大，才能得到净的增益；
 - 用了 overmoded open resonator，增加交互作用同时降低衍射效应。
- 1947 年 Vitaly L. Ginzburg⁷最早提出相对论电子经过周期横向磁场可以产生在可见光频段的非相干辐射的概念。但是，具体实现是在稍后的 Hans Motz (1950 年代) 与 R.M. Phillips (1980 年代)，在加州 Stanford 大学与临近的 General Electric Research Lab 与后来的 SLAC。
- Motz 与 Phillips 当时的分析按经典力学图像，并没有按量子力学，因此尚未意识到应用于短波长 FEL 的潜在可能。
- A. 最后一段，Madey 回想如果当时已经知道 Motz 与 Phillips 的工作的话，也许就直接按他们的思路继续走下去，而不是从新的 (量子力学的) 观点探讨操作在更短波长的可能。

B. 自由电子激光概念诞生

- 作者在大学之前已经积累了许多关于真空管的知识与兴趣 (在 New Jersey/Princeton 的时光)，之后在加州理工学院 (Caltech) 就读大学时又正逢 Maiman 首次证实可见光波长激光，在这样时空背景下，基于自由电子激光机制的可行性已经开始酝酿。

⁷2003 年诺贝尔物理学奖 (1/3)，与 Alexei A. Abrikosov(1/3) 及 Anthony J. Leggett(1/3) 分享，获奖词为 “for pioneering contributions to the theory of superconductors and superfluids”。<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2003/summary/>

- 作者本科期间已经在 Caltech Synchrotron Lab 担任 undergraduate research assistant。提到的几门课包含 Barnes 的近代物理、Yariv 的量子电子学、Walker 的研究生电磁场。博士研究生期间则是在 Stanford 大学物理系⁸，导师为 William Fairbank，从事低温物理。
- 这里提到几次“bremsstrahlung(轫致辐射)”机制⁹。这个机制有两个特点：1) 轫致辐射频谱可能自 X 射线延伸至 γ 射线，不像微波电子器件多半局限在 100 GHz；2) 辐射机制发生在电子的横向减速(也可视为一种加速)过程，与微波电子器件多半通过纵向电子速度与纵向电场的耦合有根本的不同。
- 当时的一个顾虑是，是否比起吸收，bremsstrahlung 机制能够引致足够的辐射迁移，使最终产生净的放大效应。当时普遍共识是要引起足够的辐射迁移总是通过原子或分子外围电子束缚态间能量迁移，而不是基于自由电子的 bremsstrahlung 机制。作者在研究生期间修习 Oakes 的量子场论课提到，在电子能量足够高时，bremsstrahlung 机制可以被视为光子的(逆)Compton 散射过程。
- 当电子经过(足够多)周期性加速或减速过程，transition rate 就能够比电子在原子核经历的 bremsstrahlung 机制(相对而言，只经历了半个或一个核场)大得多。接下来就是，是否这种过程能够像 Maiman 的激光过程那样真正实现？
- 作者在这一子节回顾了当时对于 FEL 机制如何从量子力学图像转变到经典力学图像的讨论。当时目标已经从 undulator radiation 渐渐过渡到 FEL。
- 1970 年代同时进行的工作还有同样在 Stanford 大学的 Richard Pantell 团队，利用 high- Q 超导共振腔的电磁场与电子束进行(逆)Compton scattering。当时得到的结论是，按当时直线加速器可达到的电子束团峰值电流，在可见光范围的 stimulated inverse Compton scattering 的增益仍太低。当时仍是博士研究生，作者利用横向周期磁场与电子束进行(逆)Compton scattering 得到的增益则大得多，催生了目前普遍引用的关于自由电子激光最早的实验论文与一专利
 - J.M.J. Madey, “Stimulated emission of bremsstrahlung in a periodic magnetic field,” J. Appl. Phys. 42, 1906 (1971) <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1660466>;
 - J.M.J. Madey, “Stimulated emission of radiation in a periodically deflected electron beam,” U.S. Patent 3,822,410 (2 July 1974) <https://patents.google>.

⁸不是应用物理系。

⁹指高速电子骤然减速产生的辐射。泛指带电粒子在碰撞(如，库仑散射)过程中发出的辐射。例如，一个高能电子与一个原子核相碰撞时就产生这种辐射。根据经典电动力学，带电粒子作加速或减速时必然伴随电磁辐射。其中，又将遵循麦克斯韦分布的电子所产生的轫致辐射叫做热轫致辐射。轫致辐射为连续谱，因为在作为靶的原子核电场作用下，带电粒子的速度是连续变化的。轫致辐射的强度与靶核电场平方成正比，与带电粒子质量平方成反比。因此重的粒子产生的轫致辐射往往远远小于电子的轫致辐射。

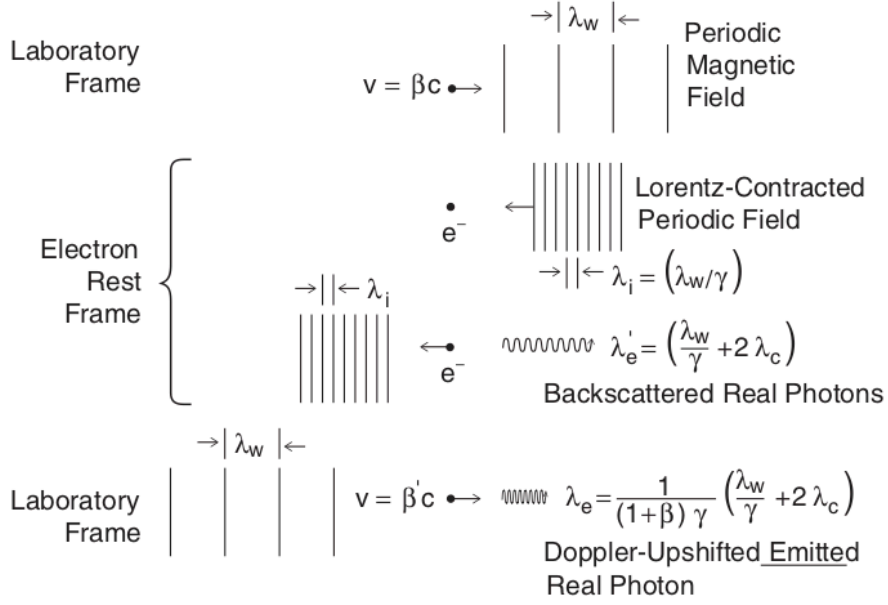


FIG. 1. Wavelength of magnetic bremsstrahlung emitted in a periodic magnetic field. In the electron rest frame, a stationary transverse magnetic field with period λ_w becomes indistinguishable from a traveling plane wave with a period λ_w/γ . Photons backscattered from this Lorentz-contracted field are shifted to a wavelength longer by $2\lambda_c$ by the Compton effect. The backscattered rest frame photons are Doppler upshifted by a factor of $(1 + \beta)\gamma$ to appear in the laboratory frame as real emitted photons with wavelength λ_e .

C. 首个自由电子激光放大器与振荡器的启示

- 可行性获得证实之后, 下一步需要能产生更高峰值电流的电子束。当时在 Stanford 大学的 Hansen 与 Ginzton 的 High Energy Physics Lab (HEPL) 里多数人转到 Project M, 建设二英里 S-band 直线加速器, 即后来的 SLAC。只有少数留在 HEPL 开展下一代高梯度微波加速器器件。作者当时得到 AFOSR 支持, 先进行小信号放大器 FEL 实验项目, 如果顺利, 将继续支持振荡器 FEL 实验项目。当时主要成员有
 - Luis Elias, 负责光学器件 \Rightarrow 后来在 UCSB 完成 energy-recovery DC electrostatics accelerator THz FEL 项目。
 - Todd Smith, 加速器系统、电子光学。
 - John Madey, 激光物理、电子与冷却器件。
- 对放大器增益曲线的实验量测结果非常成功 ($10.6 \mu\text{m}$), 证实了理论模型中的几个重要物理图像。诞生后来的经典论文
 - L. R. Elias, W. M. Fairbank, J. M. J. Madey, H. A. Schwettman, and T. I. Smith, “Observation of stimulated emission of radiation by relativistic electrons in a spatially periodic magnetic field,” Phys. Rev. Lett. 36, 717 (1976) <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.36.717>.
- 接续的振荡器 FEL 实验项目 (综合考虑后决定降到 $3.4 \mu\text{m}$) 对电子束峰值电流的要求更高¹⁰, 此期还加入了其他成员, 有
 - David Deacon, 出众的研究生。
 - Gerry Ramian, 电子工程师。
- 对振荡器的实验量测虽然没有放大器顺利, 但是仍然证实了理论预测。诞生后来的经典论文
 - D. A. G. Deacon, L. R. Elias, J. M. J. Madey, G. J. Ramian, H. A. Schwettman, and T. I. Smith, “First operation of a free electron laser,” Phys. Rev. Lett. 38, 892 (1977) <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.38.892>.
- 此处结论一段作者有趣的回顾...*At the conclusion of these experiments I also occasionally considered that we had succeeded in these experiments in demonstrating,*

¹⁰同时急需设计第二个超导波荡器。当时第一个波荡器由于意外的涌冲电压而损坏。

for the first time in 13.6 billion years and in the first well controlled laboratory experiments, the operation of the mechanism—stimulated Compton scattering—that had played such a prominent role in the evolution of the Universe as we presently understand it.

D. 从可行性验证到实际运行

- 自完成两个原则性实验验证之后 (1977), 直到作者从 Stanford 大学搬迁至 Duke 大学并接受终身教职, 约莫过了 10 年 (1988)¹¹。
- 从可行性验证到实际运行, 需要更高电流与更低发射度的电子束, 关键在于微波电子枪 (microwave electron gun) 的发明与实现, 先是 thermionic gun, 后来有 photocathode RF gun。
- 电子束通过时变加速场时, 可以通过适当设计使束团压缩, 从而得到更高峰值电流的概念也在这时候被提出。当时在 S-band 加速腔情况下, 压缩后到束团长度约为 ps, 峰值电流约为 30 A。
- 作者利用新的电子枪产生 40 MeV 电子, 实现 FEL 已经是 1990 年代, 在夏威夷大学。当时电子枪的设计还提供给 Vanderbilt 大学开展 FEL 作为外科医学用途, 当时平均输出功率约为 10 W。这个平均输出功率的记录直到 2000 年才由 Jefferson Lab FEL 打破。
- 当时在 Stanford 大学的研究生 Michael Borland¹²设计的热阴极微波电子枪后来被 Argonne 国家实验室采用, 作为 UV 波段 SASE FEL 的实验验证。
- 后来更普遍的是光阴极微波电子枪。
- 高平均输出功率操作模式的情况下则电子枪需要能支持高平均电流。
- 这个阶段开始有 storage ring FEL 的想法。当时与法国巴黎大学的 LURE 实验室合作, 由 D. Deacon 与 K.E. Robinson 等人主导。当时的实验不如早期原理验证简单, 因为储存环电子动力学还涉及微波不稳定性、束团拉伸效应等。1985-1990 年期间, 开始意识到 small-signal low gain FEL model 将需要扩展到 high gain model。

¹¹按原文, 作者描述为 10 odd years。记得以前还是学生时期 2013 年 1 月参加 USPAS, 期间参观了 Duke 校园并看到 FEL 实验室。根据维基百科, Madey 教授在 Duke 大学的 FEL 实验室担任 director 长达 10 年。后来, 学校认为 Madey 对实验室管理不当, 而 Madey 则认为学校试图利用 FEL 实验室设备进行政府资助范围外的活动。最终, Duke 大学在 1997 年移除 Madey 担任 director 的职务。在那之后开启了关于当时 Madey 申请的 FEL 专利的侵权争辩。在当时 Madey 辞去 Duke 大学教职之后, Duke 大学仍继续使用 FEL 实验室设备, 于是衍生后面的其它官司。官司在 2002 年结束, 结果对 Madey 似乎有利。

¹²ELEGANT 粒子跟踪模拟程序的开发者。

- High gain model 涉及一个电子放出多个光子的过程。较大信号的物理过程也涉及较大量子数，极限情况下可以按经典电动力学分析，特别是在较高电子能量与较长辐射波长或当 FEL 达饱和时。
- 关于到底使用量子力学或是经典力学描述 high gain FEL 过程，作者在这边有些讨论。如果利用经典图像讨论 FEL 过程，则这个 FEL 过程将 (只能) 是 physically realistic，此时，要求电子位置与动量改变的乘积 $\gg \hbar$ ，并且，光场的功率密度 \gg 量子振荡对应的功率密度。
- 在 D. Deacon 的博士论文里有部分关于利用量子力学分析的讨论。见<https://www.proquest.com/docview/302935915>。
- 作者在这节最后大致按时间次序总结了 FEL 重要工作里程碑，包含
 1. Madey theorem。
 2. Optical klystron effect by Nikolai Vinokurov。
 3. William Colson 的经典力学模型。
 4. William Colson 与 S.K. Ride 的经典自洽模型与首次数值计算。
 5. David Deacon 的准等时性储存环 FEL。
 6. Steve Benson 基于经典模型的噪声与量子振荡研究。
 7. John LaSala 与 Ted Scharlemann 的三维¹³high gain FEL oscillator。
 8. Ming Xie (谢明¹⁴) 的三维 high gain FEL 解析工作。
 9. Eric Szarmes 关于基于周期调制电子束驱动的 FEL 振荡器的解析与数值工作。
 10. 从“真空 FEL”(vacuum FEL) 到“气体 FEL”(gas loaded FEL) 的理论，目的是延展 FEL 的可调性 (tunability)。与 R. Pantell 的学生合作。
- 几个作者认为过去随着新的电子枪出现而衍生的探索方向有
 1. Optical guiding 现象从 low gain 至 high gain 的过渡过程。
 2. 基于光阴极电子枪的 FEL。
 3. “真空 FEL”到“气体 FEL”的实验测试。

E. 还有变革性的发展课题吗？

¹³三维效应的一个重要物理为加入辐射衍射或对电子束的横向影响 (guiding)。

¹⁴1959-2004, 本科 1982 年毕业于武汉大学。通过 CUSPEA 考试，硕士与博士分别于 1984 与 1989 年毕业于 Stanford 大学，博士导师为 John Madey。 <https://physicstoday.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1996493>。

- The inability of classical macroscopic electrodynamics to fully describe the key radiation mechanism of coherent emission \Rightarrow 目前基于经典电动力学的宏观模型分析没有处理能量守恒的问题。这个工作的突破或许对 SASE x-ray FEL 效率的进一步优化将有深远影响。
- The roles of the acceleration-dependent coherent radiation and velocity-dependent amplification of the harmonic radiation emitted by FELs approaching saturation \Rightarrow 1998 年 Teng Chen 的实验表示 coherent spontaneous harmonic radiation 的抖动接近饱和时低于理论预测值。理论预测值基于 zero-point fluctuation 的 shot noise 与 Poisson statistics 得到。这个工作的突破对量子光学研究将有深远影响。
- The development of optical storage cavities capable of integrating the high peak power phase coherent pulsed output of phase-locked FEL oscillators \Rightarrow 不同于上面两个，这个课题属于技术上的创新，如同 1980 年代微波电子枪的出现。目前产生强场的方式多半是将相对低重频、压缩后的 Ti-sapphire 激光脉冲堆叠形成。开展这个工作能将 duty cycle 提高，从而增加场强。

4.4 其它

在 2017 年国际自由电子激光会议 (38th International FEL conference) 有关于 John Madey 教授的一些回忆，可以参考<https://accelconf.web.cern.ch/fel2017/papers/moa01.pdf>，包含提到在诺贝尔委员会不幸被否决的往事。

关于 FEL 演变的一些历史进程，可以参考 2006 年在德国柏林的 FEL 会议，https://accelconf.web.cern.ch/f06/TALKS/M0AAU02_TALK.PDF，或近期 M.E. Couprie 更详尽的介绍<https://doi.org/10.23730/CYRSP-2018-001.195>。

历年 FEL prize 获得者名单¹⁵如下：

¹⁵修改自 M.E. Couprie, Historical Survey of Free Electron Lasers, Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Free Electron Lasers and Energy Recovery Linacs, Hamburg, Germany, 31 May-10. <https://doi.org/10.23730/CYRSP-2018-001.195>

Table .1: FEL Prize winners

Year	Town	Country	FEL	Prize winners
1988	Jerusalem	Israel	FEL 10	John Madey
1989	Naples	USA	FEL11	William Colson
1990	Paris	France	FEL12	Todd Smith and Luis Elias
1991	Santa Fe	USA	FEL13	Phillip Sprangle and Nikolai Vinokurov
1992	Kobe	Japan	FEL14	Robert Phillips
1993	The Hague	The Netherland	FEL15	Roger Warren
1994	Stanford	USA	FEL16	Alberto Renieri and Giuseppe Dattoli
1995	New York	USA	FEL17	Richard Pantell and George Bekefi
1996	Rome	Italy	FEL18	Charles Brau
1997	Beijing	China	FEL 19	Kwang-Je Kim
1998	Williamsburg	USA	FEL 20	John Walsh
1999	Hamburg	Germany	FEL21	Claudio Pellegrini
2000	Durham	USA	FEL 22	Stephen V. Benson, Eisuke J. Minehara and George R. Neil
2001	Darmstadt	Germany	FEL 23	Michel Billardon, Marie-Emmanuelle Couprie and Jean-Michel Ortega
2002	Argonne	USA	FEL24	H. Alan Schwettman and Alexander F.G. van der Meer
2003	Tsukuba	Japan	FEL25	Li-Hua Yu
2004	Trieste	Italy	FEL26	Hiroyuki Hama and Vladimir Livinenko
2005	Stanford	USA	FEL27	Avraham Gover
2006	Berlin	Germany	FEL28	Evgeni Saldin and Jorg Rosbach
2009	Liverpool	Great Britain	FEL29	Paul Emma and David Dowell
2010	Malmö	Sweden	FEL30	Sven Reiche
2011	Shanghai	China	FEL31	Tsumoru Shintake
2012	Nara	Japan	FEL32	John Galayda
2013	New York	USA	FEL33	Luca Giannessi and Young Uk Jeong
2014	Basel	Switzerland	FEL34	William Fawley and Zhirong Huang
2015	Daejeon	Korea	FEL35	Mikhail Yurkov and Evgeny Schneidmiller
2017	Santa-Fe	USA	FEL36	Bruce Carlsten, Dinh Nguyen and Richard Sheffield
2019	Hamburg	Germany	FEL37	Alex Lumpkin and Gennady Stupakov

5 基于亚 10 飞秒电子衍射的激光-等离子体电子源的概念研究 [PRAB 19-02]

Concept of a laser-plasma-based electron source for sub-10-fs electron diffraction

5.1 基本信息

- 分类: 新加速技术
- 作者: J. Faure *et al.* (主要机构: Universite Paris-Saclay, 巴黎萨克雷大学)
- 类型: 数值仿真、设计
- 链接: <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.021302>

5.2 摘要

这篇论文提出一种新概念的电子源, 用于时间分辨率低于 10-fs 的超快电子衍射。电子是在激光等离子体加速器中产生的, 能够以 5 MeV 的能量和千赫兹的重复频率传输飞秒电子束。作者利用 particle-in-cell (PIC) 模拟, 展示了产生这种电子源的可能性。然后, 通过粒子跟踪模拟, 这种电子束可以在真实的束线中传输和操纵, 以达到适合电子衍射的参数。束线由实际的静态磁光学元件组成, 不引入时间抖动。仿真计算表明可以产生束长 5 fs、每个束团包含 1.5 fC 的电子束, 且横向相干长度超过 2 nm, 符合电子衍射需求。

5.3 贡献或创新点

- 创新点: 本文使用 PIC code Calder-Circ 验证了使用飞秒激光 (波长 800 nm, 束长 5 fs, 能量 4.1 mJ) 产生高重频的 5~10 MeV 电子束的可能性。由于激光-等离子体加速产生的电子束能散和束散严重, 这篇论文设计了由四级铁和弯铁组成的束线, 搭配 slit 在束线尾端获得满足电子衍射要求的束流。
- 贡献: 由激光-等离子体加速产生的电子束能散较大 (约 20 %), 这会导致束团长度随漂移过程不断增加, 同时束流中心能量也会波动。针对这一问题, 作者使用弯铁配合 slit 刮去了 99 % 以上的电子, 将能散限制在了 1 % 左右, 结合弯铁自身的

束长压缩效应，在样品处得到了 3 fs (rms) 的电子束。为了获得最优的束流参数，使用了基因算法优化了四级铁场强、slit 的宽度、以及弯铁角度三个量。

5.4 束线设计及仿真结果

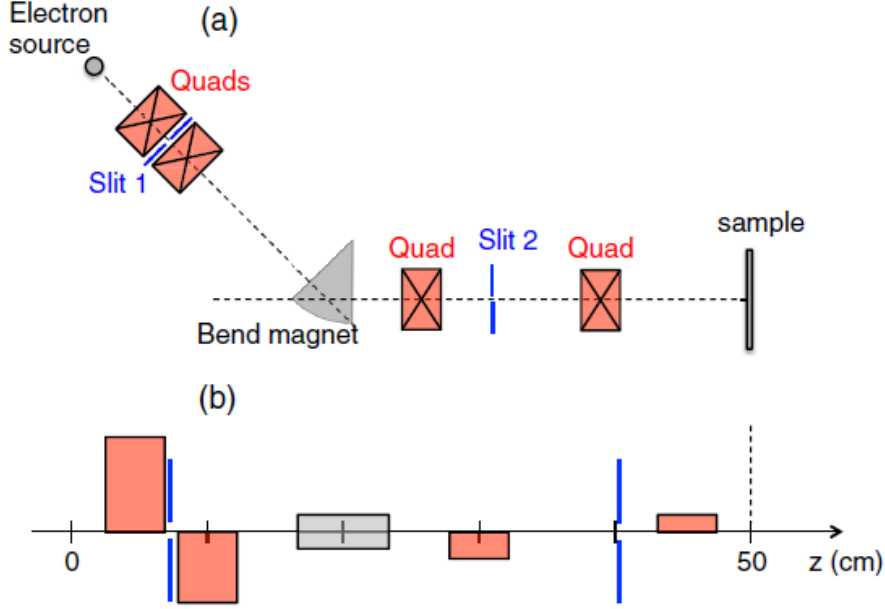


图 2: (a) 静态磁压缩束线的示意图；(b) 束线纵向位置示意图，样品位于 $z = 50$ cm 处。

Distribution	Charge (fC)	γ_0	σ_γ/γ_0 (%)	σ_x (μm)	σ_y (μm)	σ_{p_x} (mc)	σ_{p_y} (mc)	ϵ_{nx} (nm)	ϵ_{ny} (nm)	L_{ex} (nm)	L_{ey} (nm)
Model (uniform)	500	10.3	4.8	0.2	1	0.1	1	1.6	83
At sample plane (from model)	2.8	10.3	0.3	150	200	2×10^{-3}	2×10^{-4}	15	40	4	2
Input distribution from PIC	770	10.3	1.2	0.1	0.6	0.1	0.6	8	300
At sample plane (from PIC)	1.2	10.3	0.3	145	200	2×10^{-3}	2×10^{-4}	15	50	4	2

图 3: 这篇论文使用的各种分布的参数。第 1、2 行对应使用初始为均匀分布束流参数和 GPT 仿真得到的束线末端的束流参数；第 3、4 行对应由 PIC 仿真的得到的电子束的初始分布参数和由 GPT 仿真得到的束线末端的束流参数。 σ 对应各物理量的 rms 值。

6 由能量啁啾腔连接射频电子枪产生的高电荷量超短电子束团及其基于横向偏转腔的束长测量 [PRAB 24-08]

High-charge ultrashort electron bunch generation by an energy chirping cell-attached rf electron gun and its measurement using a transverse deflecting cavity

6.1 基本信息

- 分类: 粒子源、束测
- 作者: Y. Koshiba *et al.* (主要机构: Waseda University)
- 类型: 实验、仿真
- 链接: <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.083401>

6.2 摘要

超短电子束在自由电子激光器、时间分辨电子衍射/显微, 以及一些先进加速器概念中正变得越来越重要。这篇论文介绍了一种独特的射频枪产生飞秒电子束, 并用横向偏转腔进行束长的精确测量。使用该电子枪在距光阴极仅 3 米的距离处获得束团长度 323 ± 13 fs, 电荷量 120 pC ($\sim 7.5 \times 10^8$ 个电子) 的电子束。本文还对电子束的纵向相空间分布进行了测量, 并通过实验证实了线性能量啁啾电子束团的产生和由速度差产生的压缩。

6.3 贡献或创新点

- 创新点: 作者在常规的 BNL 型 1.6-cell 电子枪的整腔后添加了一个用于产生能量啁啾的腔 (energy chirping cell, ECC), 整体称 ECC-rf 电子枪。通过 ECC 使电子束在产生阶段自带速度调制, 即束团头部电子能量低于尾部电子, 因此在漂移一段距离后实现束团长度的自压缩。ECC 的结构与原理如图。
- 贡献: 在设计阶段, 作者使用 SUPERFISH 和 GPT 迭代优化了 ECC 的尺寸, 但未给出详细的尺寸, 更详细的设计过程可以参考 [1]。这篇论文通过实验验证了带有 ECC 的电子枪产生数 MeV, 百 pC, 数百 fs 束长电子束的可行性。本文还测量了该设计的束长压缩效果与发射相位的依赖关系如下图, 得到了最佳发射相位。

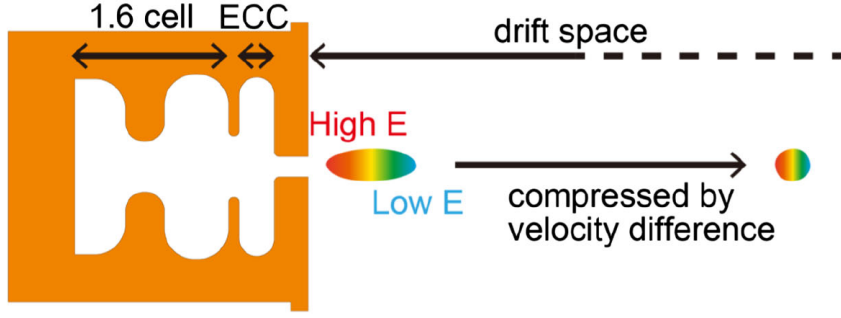


图 4: 腔体结构及速度调制原理

此外，通过横向偏转腔和二极管的组合，成功得到电子束的纵向相空间并以此确认了电子束确实获得线性能量啁啾。

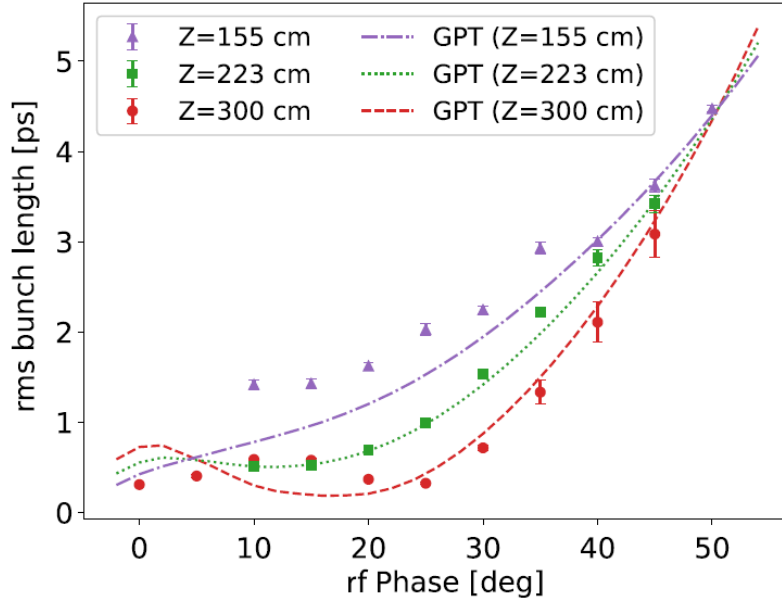


图 5: 在三个不同位置测得的束团长度作为发射相位的函数，虚线表示由 GPT 模拟 100 pC 电子束的计算结果。

参考文献

- [1] K. Sakaue, Y. Koshiba, M. Mizugaki, M. Washio, T. Takatomi, J. Urakawa, and R. Kuroda, Ultrashort electron bunch generation by an energy chirping cell attached rf gun, Phys. Rev. ST Accel. Beams. **17**, 023401, 2014. <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevSTAB.17.023401>

7 能量啁啾单元附着射频电子枪产生的高电荷超短电子束及其横向偏转腔的测量结果 [PRAB 24-08]

High-charge ultrashort electron bunch generation by an energy chirping cell-attached rf electron gun and its measurement using a transverse deflecting cavity

7.1 基本信息

- 分类: 电子枪
- 作者: Y. Koshiba, Y. Tadenuma, S. Otsuka, M. Washio, T. Takatomi, J. Urakawa and K. Sakaue (主要机构: Waseda University)
- 类型: 实验, 数值模拟
- 链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.083401>

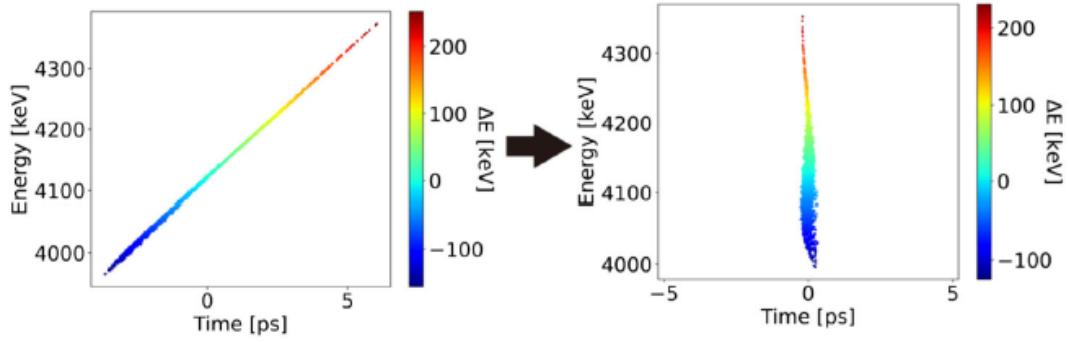
7.2 摘要

超快电子束在很多方向都有着重要的作用, 如自由电子激光、时间分辨电子衍射/显微和其他先进加速器。本文采用一种特殊的 RF 枪来产生飞秒电子束, 并用横向偏转腔对其束长进行了精确测量。从光阴极出发仅 3 m 的距离可产生 120 pC ($\sim 7.5 \times 10^8$ 个电子)、束团长度为 323 ± 13 fs 的束团。也得到了纵向相空间分布情况, 并成功地从实验上证实了线性能量啁啾电子束的产生, 以及可以通过速度差实现自压缩。

7.3 贡献或创新点

- 贡献: 这篇论文研究了直接产生高电荷量 (~ 500 pC) 的超短电子束的 S 波段光阴极 RF 电子枪, 腔体结构在 Brookhaven National Laboratory 制作的结构上进行了一些改进。对这种电子枪进行了简单解释。电子从光阴极出发后可以被加速到大约 4 MeV, 空间电荷效应被减弱。从能量啁啾腔 (energy chirping cell, ECC) 出来后, 这些相对论电子获得正的线性能量啁啾, 再通过漂移段实现速度压缩。早期研究通过分析相干 THz 辐射, 得知此束团长度可以压缩到 < 500 fs。为了更精确的测量, 这篇论文设计并制造了横向偏转腔 (transverse deflecting cavity, TDC), 介绍其测量原理, 并从实验上得到束团长度测量结果和纵向相空间测量结果, 如下图所示。

(a) Phase space



(b) Cavity structure and principle

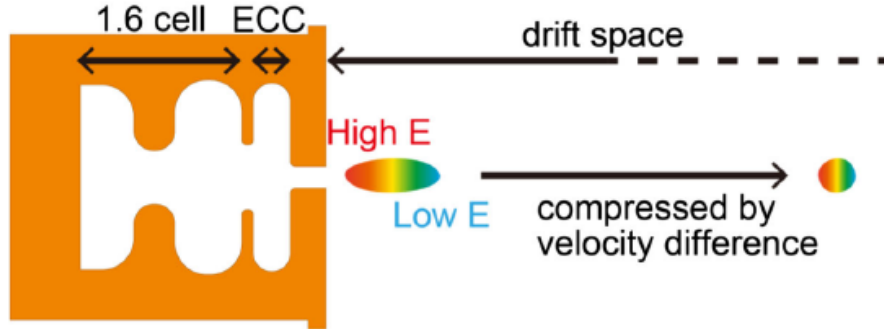


FIG. 1. (a) Phase space of the electron bunch generated by the ECC-rf gun simulated by GPT calculations. The colors show the energy difference. (b) Cavity structure and principle of operation of the ECC-rf gun.

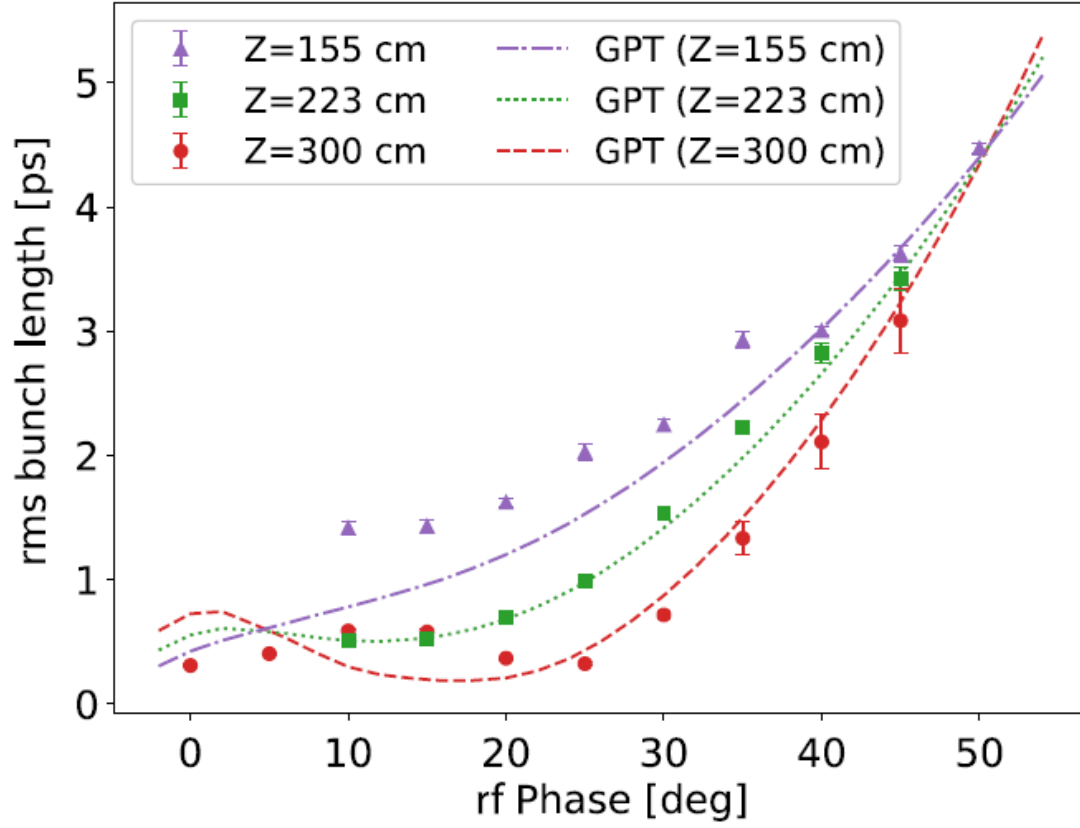


FIG. 7. Measured bunch lengths at three different positions as a function of the rf-accelerating phase. The dashed lines represent GPT simulations with a bunch charge of 100 pC.

- 创新点：这篇论文提出了一种特殊的腔体结构，在传统的 1.6 cell 的设计基础上增加一个额外的腔室，为电子束团提供线性能量啁啾。这种新型电子枪被称为能量啁啾单元附着射频电子枪 (ECC-rf gun)。这种电子枪能够在 RF 相位为 25° 时，产生能量为 3.8 MeV、电荷量为 120 pC 的电子。

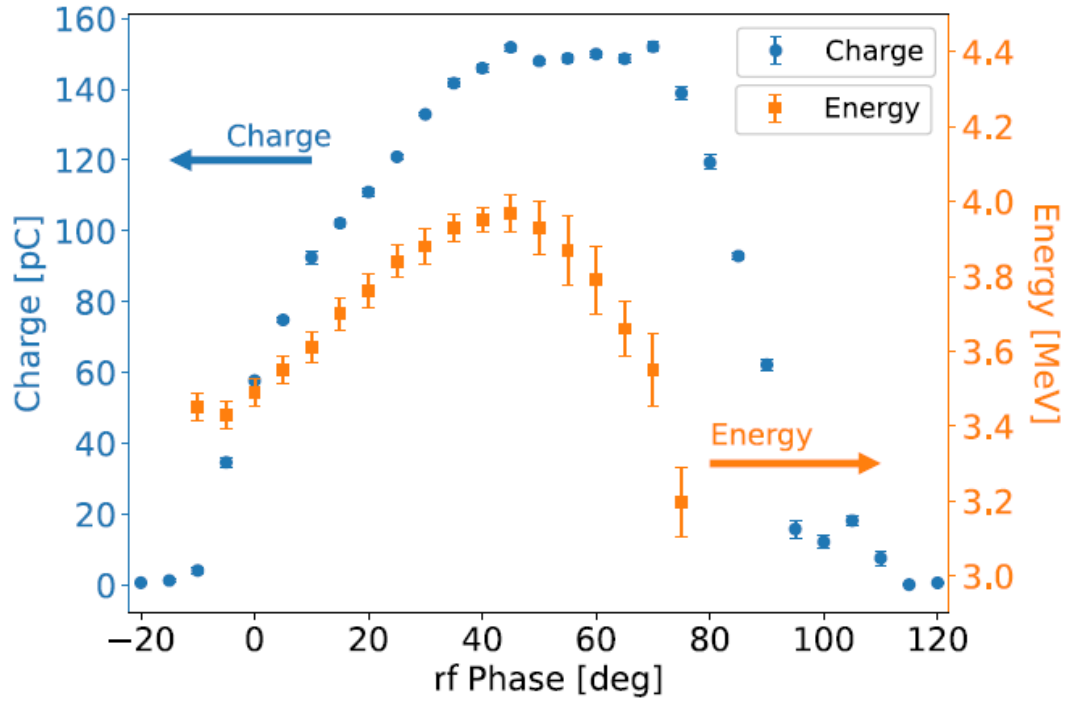


FIG. 5. Phase dependence of the charge and beam energy of the ECC-rf gun.

8 基于一维高增益自由电子激光模型的边带不稳定性分析 [PRAB 20-12]

Sideband instability analysis based on a one-dimensional high-gain free electron laser model

8.1 基本信息

- 分类: 同步辐射与自由电子激光
- 作者: Cheng-Ying Tsai, Juhao Wu, Chuan Yang, Moohyun Yoon, and Guanqun Zhou (SLAC)
- 类型: 理论
- 链接: <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.120702>

8.2 摘要

一个非渐变 (untapered) 高增益自由电子激光 (free electron laser, FEL) 达到饱和时, 辐射功率的指数增长会消失并开始围绕平衡点震荡。FEL 的辐射功率/效率可以通过波荡器渐变磁场 (undulator tapering) 来提高。高增益渐变波荡器自由电子激光虽然可以令其功率在第一次饱和后持续增强, 但由于存在所谓的“第二次饱和”, 使用渐变波荡器系统的自由电子激光的功率仍会停止增长, 而边带不稳定性 (sideband instability) 是导致这种二次饱和的主要原因之一。本文对波荡器渐变的梯度如何抑制边带不稳定性增长进行了定量分析。该研究采用半解析方法, 并与一维数值模拟进行了比较。本文使用的电子束和波荡器系统的物理参数取自直线加速器相干光源 (Linac Coherent Light Source, LCLS)。本文研究了不同波荡器渐变梯度下的边带场增益和辐射谱的演化, 发现一个强渐变的波荡器 ($\sim 10\%$) 可以有效抑制后饱和区 (post-saturation) 的边带不稳定性。

8.3 贡献或创新点

- 创新点: 本文基于边带的色散方程得到了边带不稳定性的近似最大增长率表达式, 并分别在弱渐变和强渐变两种情况下的得到了两个近似公式。在两种情况下, 递减渐变波荡器磁场均可以减弱边带不稳定性的增长, 而强递减情况下, 虽然边带

增长被有效抑制，但主信号也会有所降低。

这篇论文的理论基于单电子的宏粒子模型描述，因此不包含可能出现的非对称边带不稳定性的情况。

- 贡献: 基于这篇论文的理论公式, 作者对比了非渐变固定磁场方案、弱渐变 ($\Delta = 0.8\%$) 和强渐变 ($\Delta = 10\%$) 三种情况下的 FEL 后饱和峰值功率、边带增益和频谱分布。其中关于强渐变的理论研究表明, 如果在类似 LCLS 的装置上配置强渐变波荡器 (目前 LCLS 仅有弱渐变波荡器), 可能将峰值辐射功率提升至现有的 7 倍左右。

8.4 部分计算结果

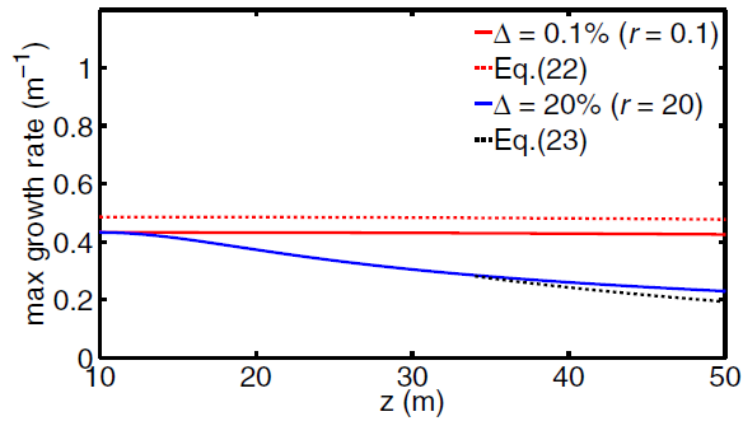


图 6: 边带谱功率增长率作为纵向位置 z 的函数。红色和蓝色分别对应弱渐变和强渐变两种情况。实线由数值求解边带色散方程得到, 虚线由论文中推导的强/弱渐变情况下边带最大增长率的近似公式得到。

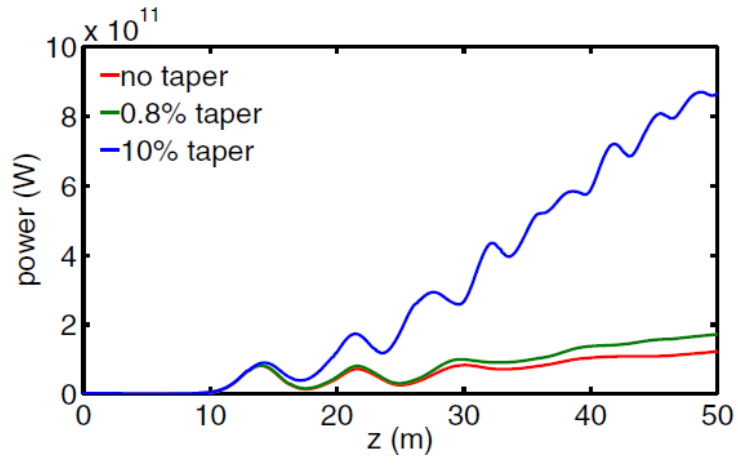


图 7: FEL 的峰值功率作为纵向位置 z 的函数。红色，绿色和蓝色分别对应无非渐变固定磁场、弱渐变和强渐变三种情况。

9 X 射线自由电子激光波荡器的纵向阻抗与尾场公式与其对 ESASE 的影响 [NIMA 583]

Longitudinal impedance and wake from XFEL undulators.
Impact on current-enhanced SASE schemes

9.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Gianluca Geloni, Evgeni Saldin, Evgeni Schneidmiller, Mikhail Yurkov (主要机构：DESY)
- 类型：理论
- 链接：<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900207020001>

9.2 摘要

这篇论文第一部分首先推导 X 射线自由电子激光 (x-ray free electron laser, XFEL) 波荡器的纵向阻抗与尾场，理论模型考虑了电子束团横向有限尺寸的影响。在此之前的波荡器尾场或阻抗只是基于一维线电荷分布模型。这篇论文主要考虑的是长波长情况下的阻抗与尾场，即 $\lambda \gg \lambda_r$ 或 $\omega \ll \omega_r$ ，其中， λ_r, ω_r 为波荡器的共振波长与频率。用到的假设还有：得到的阻抗或尾场基于电子束已经进入波荡器一段远长于追赶长度的距离，即 $z \gg 2\gamma_z^2 \lambda$ 。对于 XFEL 情况下，这个假设是成立的。另外，假设 vacuum chamber 尺寸远大于辐射场的横向尺寸。这篇论文给出了这些假设下的阻抗与尾场的表达式，除了在渐进情况下与特定的束团分布下存在解析解，其它情况可以通过数值计算获得。

这篇论文第二部分利用上面得到的结果分析基于 LCLS (Linac Coherent Light Source) 参数时，考虑波荡器阻抗与尾场造成的能散增加对 ESASE (current-enhanced self-amplified spontaneous emission) FEL 方案的影响。数值估计指出波荡器集体效应对 ESASE FEL 可能造成明显影响。

9.3 贡献或创新点

- 贡献：这篇论文勾勒、分析自由电子激光波荡器尾场与阻抗计算的过程，并给出最终显形式。分析从傍轴场方程 [Eq. (3)] 开始，忽略产生在源粒子“后方”的场，得

到方程的格林函数解 [Eq. (17)], 适用于 $z > z'$, 其中 z' 为源坐标。在 §3.1 与 §3.2 得到横向与纵向电场的一般形式, 有 Eqs. (19) 与 (25)。

为了进一步简化, 假设 $\lambda \gg \lambda_r$, 而有 Eqs. (37) 与 (38)。在 Eq. (38) 之后有关于这两个式子物理图像的说明。值得注记的是, Eqs. (37) 与 (38) 同时包含了空间电荷效应 (space charge, SC) 与相干同步辐射效应 (coherent synchrotron radiation, CSR) 的贡献。并且, SC 与 CSR 的 formation length 不一样, 值得留意。SC 的 formation length 约为 $2\gamma_z^2\lambda$, 而 CSR 的 formation length 约为 λ_w 。

当考虑 $z \gg 2\gamma_z^2\lambda$ 情况下, 频域电场 (类似阻抗) 的形式还可以进一步简化, 有 Eqs. (43) 与 (44)。这篇论文的 §3.5 对得到的横向与纵向电场检验, 发现高斯定律成立。

尾场与阻抗在论文的 §4 定义 [Eq. (58)], 或更精确说, 定义在 Eq. (60)。得到的波荡器阻抗显形式可以写成辐射场与空间电荷贡献的总和 [Eqs. (66), (67)]

$$Z(\omega) = Z_r + iZ_{sc}$$

或是实部与虚部总和 [Eqs. (68), (69)]

$$Z(\omega) = Z_R + iZ_I$$

接着讨论在低频渐进情况下的结果, 参考 §5.1。

这篇论文第二部分针对 LCLS 的 ESASE FEL 方案的可行性进行讨论。作者认为先前的分析¹⁶对波荡器的阻抗与尾场, 包含空间电荷效应, 的分析不够准确, 因此低估了电子束经过波荡器可能引起的能散 (correlated energy spread) 的增加。先前的分析给出经过波荡器后, 引致的电子束能散约为 2.4 MeV; 这篇论文给出的数值则为 30 MeV。差异表明, 两种情况的 energy chirp 截然不同, 因此, 在 FEL 中的饱和和长度将截然不同。在初步设计阶段, 如此差距的能散将给出不同的结果。

9.4 最终阻抗形式 $Z(\omega) = Z_r + iZ_{sc}$ 的来源

其中的 radiation impedance Z_r 可以写成 $Z_r = Z_{zr} + Z_{\perp r}$, 由横向阻抗贡献, 纵向阻抗里的各项抵消为 0, 见 Eq. (64)。其中的 space charge impedance Z_{sc} 由纵向阻抗贡献, 考虑横向束团分布后, 横向阻抗含快速振荡项, 平均后为 0。

¹⁶见该论文参考文献的 Refs. [12]-[14]。

9.5 其它

注意，这篇论文分析采 CGS 单位制。另外，Eq. (22) 与 (23) 似乎重复列写。

以往求解波荡器阻抗时，实部阻抗通常通过与辐射功率谱关联而得到。虚部阻抗一般无法通过功率谱得到，因为 $dP(\omega)/d\omega \propto |\tilde{E}(\omega)|^2$ 不包含相位信息。这篇论文采取的方法也许提供了一种能够同时求得实部与虚部阻抗的方法。

10 相干同步辐射效应的近似公式 [PRAB 24-08]

Approximated expressions for the coherent synchrotron radiation effect in various accelerator scenarios

10.1 基本信息

- 分类：束流动力学
- 作者：Donish Z. Khan and Tor O. Raubenheimer (SLAC)
- 类型：理论、数值模拟
- 链接：<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.080701>

10.2 摘要

这篇论文给出以下三种情况中，相干同步辐射效应 (coherent synchrotron radiation, CSR) 引致的电子束团能散增加的解析公式：

1. 电子束进入弯铁时，固定束长情况下，经历暂态到稳态过程产生的能散 \Rightarrow Eq. (13)；
2. 电子束进入弯铁时，束长压缩情况下，经历暂态到稳态过程产生的能散 \Rightarrow Eq. (18)；
3. 电子束离开弯铁¹⁷时，经历暂态到稳态过程产生的能散 \Rightarrow Eq. (27)。

这篇论文的第二部分利用得到的公式，与粒子跟踪模拟程序 ELEGANT 结果比较，分析 LCLS-II CuRF 与 LCLS-II-HE 设计中 BC1 与 BC2 由于 CSR 引致的束团能散增加与发射度增加，并讨论公式的适用范围。

这篇论文给出的公式能够对 CSR 引致的能散增加给出一个快速、准确估计。

¹⁷离开弯铁时不存在束团压缩过程。

10.3 贡献或创新点

- 贡献：这篇论文对电子束团经过弯铁时的四个过程¹⁸有详细的物理图像分析。此外，这篇论文给出的上述三种情况下的近似解析公式值得借鉴。

通过这篇论文得到的估算公式，能够很快对 CSR 引致的能散增加或发射度增加给出数量级估计，如果考虑的参数空间在论文 Table I 给出的公式适用限制范围内，将能够给出足够精确的评估。

- 创新点：得到近似公式的过程不是借助单纯数学化简，而是通过对物理图像的理解，在特定¹⁹情况下的化简。

10.4 其它

推论、化简中的几个公式中用到了几个数值拟合得到的系数，有

$$\text{Eq. (6)} \Rightarrow P_{\text{ss}} = 1.6$$

$$\text{Eq. (23)} \Rightarrow \xi_o = 0.132$$

$$\text{Eq. (28)} \Rightarrow \chi_o = 0.525$$

另外，这篇论文一个脚注提到了 Y.S. Derbenev et al., DESY-TESLA-FEL-95-05 论文中的一处数值错误：0.22 应为 0.246，见这篇论文 Eq. (4)。

¹⁸这四个过程按 E. Saldin, E. Schneidmiller, and M. Yurkov, On the coherent radiation of an electron bunch moving in an arc of a circle, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 398, 373 (1997). [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00822-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00822-X)

¹⁹公式化简的前提基于 XFEL 束线设计。

11 各种加速器场景下相干同步辐射效应的近似表达式 [PRAB 24-08]

Approximated expressions for the coherent synchrotron radiation effect in various accelerator scenarios

11.1 基本信息

- 分类: 同步辐射与自由电子激光
- 作者: Donish Z. Khan and Tor O.Raubenheimer(SLAC)
- 类型: 理论、数值模拟
- 链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.080701>

11.2 摘要

相干同步辐射 (coherent synchrotron radiation, CSR) 的显著效应会造成束团的能散变化和发射度增长, 如何计算由 CSR 造成的束团能散是一个待解决的问题。这篇论文从已有的单块弯铁系统的 CSR 尾场公式出发, 推导得到了束团在弯铁中、束团在漂移段中和具有压缩效应的束团在弯铁中这三种情况下 CSR 引起的束团均方根能散表达式。通过将表达式与粒子跟踪模拟程序 ELEGANT 进行参数扫描的结果进行比较, 验证了理论公式的有效性和使用时的限制条件。

11.3 贡献或创新点

- 贡献: 目前已有的 CSR 尾场表达式一般是非常复杂的, 使得定量研究分析 CSR 对束团具体参数的影响较为困难。论文开始先分析了尾场表达式中各个边界项和积分项的物理内涵与变化规律, 然后对束团在弯铁中、束团在漂移段中和具有压缩效应的束团在弯铁中三种不同情况下的尾场均按照瞬态和稳态两种状态划分, 分别进行讨论。通过这种思路, 厘清了各边界项和积分项对于整体束团尾场在不同状态下的不同贡献, 从而能够对复杂的尾场表达式进行合理简化, 再根据尾场与粒子能量改变之间的关系, 最后得到形式简洁的束团能散近似表达式。
- 创新点: 这篇论文在研究经历压缩过程的束团在弯铁中的 CSR 能散时, 对于瞬态尾场, 引入一个压缩系数反映压缩效应的影响。对于稳态尾场, 采用束团长度随束团运动距离线性变化的模型反映其影响。这样的简化处理使得作者可以利用已有公式很快可得具有压缩效应时的束团能散表达式。在与仿真结果比较的过程中,

通过改变束团长度、磁场区域弯转角度、磁场区域轨道长度等物理量的大小，详细分析了三种情况下的束团能散公式与 ELEGANT 图像结果之间还存在一定误差的原因，在检验了表达式的可靠性的同时说明其使用的限制条件。

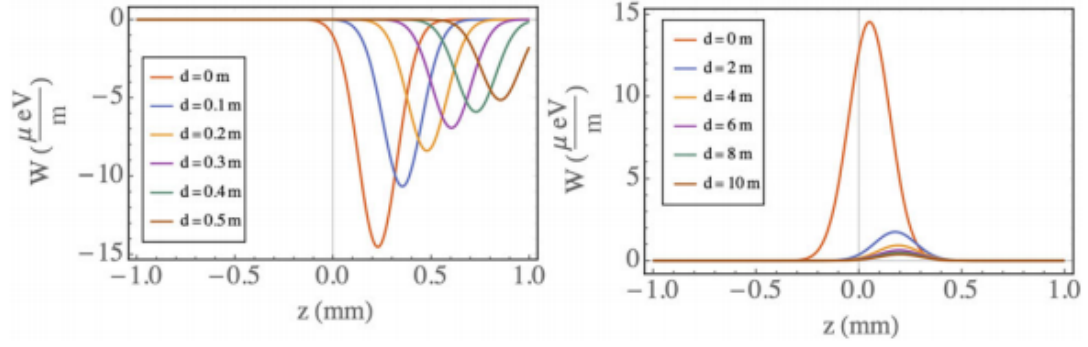


FIG. 2. The drift space CSR's boundary terms [Eq. (2)] energy modulation along the bunch's internal coordinate, z , for various positions along the drift. Left: The transient wake containing the z_C slippage term. Right: The transient wake containing the z_D slippage term.

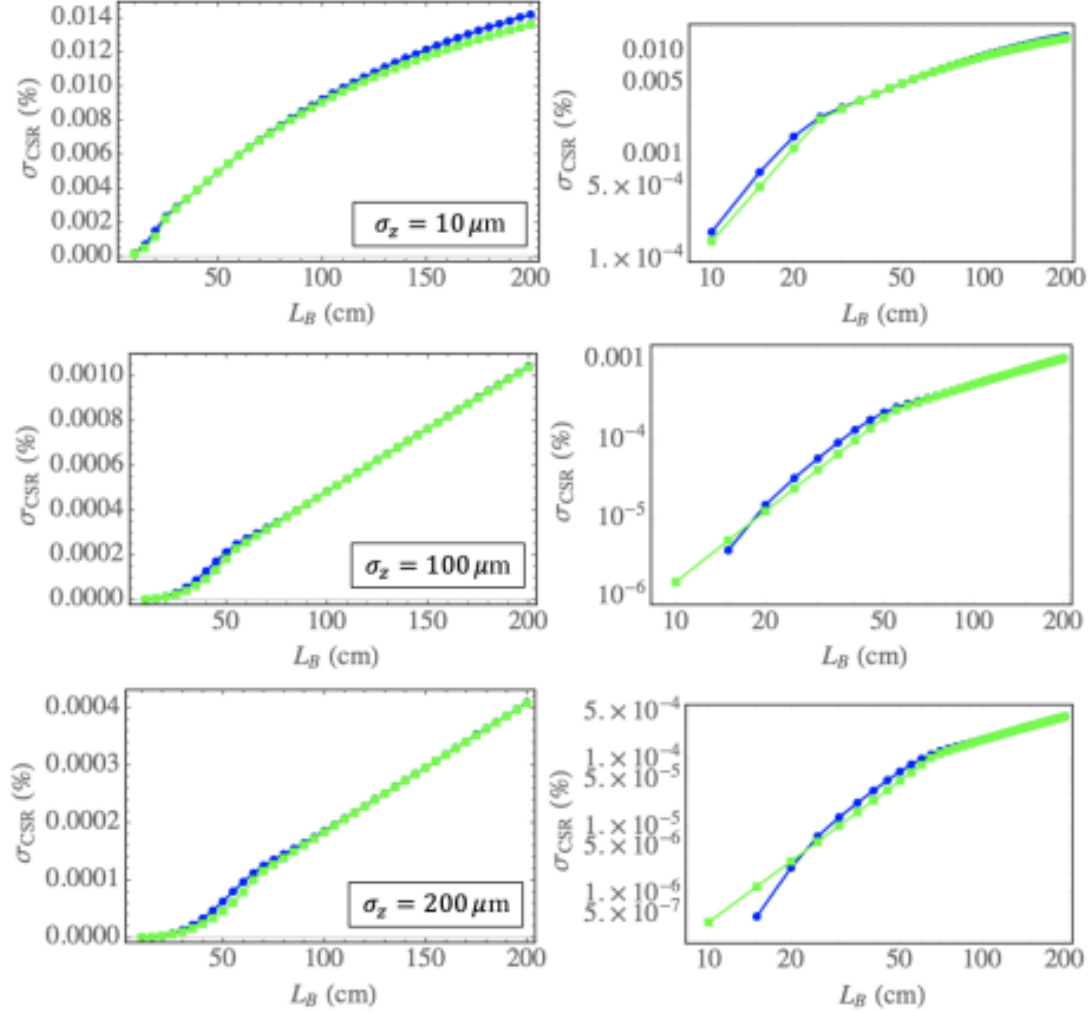


FIG. 5. The CSR rms energy spread for various initial bunch lengths traversing a bend of various bend lengths and constant bend curvature ($\rho = 10$ m). Left column: The CSR rms energy spread from ELEGANT (blue) and Eq. (13) (green). Right: Log-Log plot of the CSR rms energy spread.

12 准等时性储存环二阶单粒子动力学及其在 LNLS-UVX 分析应用 [NIMA 329]

Second order single particle dynamics in quasi-isochronous storage rings and its application to the LNLS-UVX ring

12.1 基本信息

- 分类：单粒子动力学
- 作者：Liu Lin, Cylon E.T. Goncalves da Silva (主要机构：LNLS, 巴西)
- 类型：理论、数值模拟
- 链接：[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)90916-6](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)90916-6)

12.2 摘要

准等时性储存环设计一直是电子储存环光源的焦点之一，因为磁聚焦结构的等时性能够保证电子束长在逐圈运行时（几乎）维持固定。因此，在适当地控制高阶非线性动力学前提下，如果初始束长足够短，那么准等时性储存模式或许能给出操作在极短束长的可能性²⁰。极短束团产生的同步辐射将有更好的相干性²¹与亮度 (brightness or brilliance)，对当代或下一代储存环光源至关重要。

这篇论文分析了准等时性储存环的二阶单粒子纵向动力学，将纵向动量压缩因子²²(momentum compaction factor $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2\delta + \dots$) 展开至二阶，并考虑六极铁与横向 betatron 振荡效应。除了以往熟悉的纵向稳定区间²³外，考虑的非线性效应导致在纵向相空间中出现新的稳定区间。引入的横向 betatron 振荡将导致纵向稳定区间的改变，不同情况下或减小或增加。

这篇论文第二部分将分析得到的结论应用于巴西 Campinas 的 LNLS 1.15 GeV UVX 电子储存环，分析表明这个储存环设计允许操作在准等时模式。

²⁰一般而言，束长 $\propto \sqrt{\alpha_1}$ 。(准)等时性是维持短束长模式的“必要”条件，而不是充分条件。

²¹相干性取决于同步辐射波长，波长取决于电子储存环设计能量与弯转半径。束长越短，则在辐射频谱中能够建设相干的比例更多，辐射功率更高，相干性更好。

²²一般将动量压缩因子以 α 表示，将滑相因子 (slippage factor) 以 η 表示。注意，这篇论文中的 η 为色散函数 (dispersion function)，不是滑相因子。

²³即，类似鱼眼 (fish eye) 的相空间结构。

12.3 贡献或创新点

- 贡献: 纵向电子相空间动力学由磁聚焦结构导致的 α 与 RF 参数决定。一般而言, 为了使整个环的动量压缩因子尽可能地小, 准等时性储存环中将有负色散 (negative dispersion) 二极铁传输段。线性部分的动量压缩因子 α_1 可以通过调整这些带有负色散贡献的元件达到; 高阶项如 α_2 可以通过调整六极铁强度改变, α_2 同时受线性与非线性色散元件影响。对于准等时性储存环, 即 α_1 很小²⁴时, 高阶项如 α_2, α_3 等将必须列入考虑

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \delta + \dots$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha_1 \delta + \alpha_2 \delta^2 + \dots$$

- 创新点: 这篇论文分析在考虑 α_2 情况下, 除了以往熟悉的纵向稳定区间 (称 normal phase space bucket), 考虑的非线性效应导致在纵向相空间中出现新的稳定区间 (称 anomalous phase space bucket)。

此外, 这篇论文讨论了横向 betatron 振荡对粒子纵向动力学的影响。首先将 $\frac{\Delta L}{L_0}$ 显形式推广, 使包含横向 betatron 振荡

$$\frac{\Delta L}{L_0} = k_0 + (\alpha_1 + k_1) \delta + (\alpha_2 + k_2) \delta^2 + \dots$$

其中, k_i 与 betatron 振幅有关 [见 Eqs. (11)]。

关于横向 betatron 效应的影响可以总结如下:

- 当 α_1 与 $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ “异号”时, 纵向相空间面积随 k_0 变大;
- 当 α_1 与 $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ “同号”时, 纵向相空间面积随 k_0 变小。

由此得到一个明确结论, 设计希望使 α_1 与 $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ “异号”。

12.4 其它

准等时性储存环纵向相空间动力学必须考虑高阶动量压缩因子, 其哈密顿量可以写为

$$H = \omega_{\text{rf}} \left(\frac{\alpha_1}{2} \delta^2 + \frac{\alpha_2}{3} \delta^3 \right) + \frac{e\bar{V}_0}{E_0 T_0} [\cos(\psi_s + \phi) + (\psi_s + \phi) \sin \psi_s]$$

如果加上横向 betatron 振荡效应, 则有

$$H = \omega_{\text{rf}} \left(k_0 \delta + \frac{\alpha_1}{2} \delta^2 + \frac{\alpha_2}{3} \delta^3 \right) + \frac{e\bar{V}_0}{E_0 T_0} [\cos(\psi_s + \phi) + (\psi_s + \phi) \sin \psi_s]$$

²⁴比目前三代光源大约小 100 倍。

其中, $k_0 > 0$ 。

也许由于这篇论文年代久远, 其 Fig. 4 显示 normal bucket 与 anomalous bucket 的示意图并不清楚。

13 阿秒电子束团产生的真空紫外相干波荡器辐射 [Sci. Rep. 11]

Vacuum ultraviolet coherent undulator radiation from attosecond electron bunches

13.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：Enrico Brunetti, Bas van der Geer, Marieke de Loos, Kay A. Dewhurst, Andrzej Kornaszewski, Antoine Maitrallain, Bruno D. Muratori, Hywel L. Owen, S. Mark Wiggins and Dino A. Jaroszynski (主要机构：University of Strathclyde, 英国)
- 类型：数值模拟
- 链接：<https://www.nature.com/articles/s41598-021-93640-8>

13.2 摘要

相对论阿秒 (10^{-18} s, 写为 as 或 asec)²⁵ 束长电子脉冲经过波荡器时，能够产生从可见光至真空紫外波段的高亮度相干辐射。这篇论文给出详尽的数值模拟结果用以研究在电子参数范围内 (电子能量、束长、束团电荷、啁啾强度等) 的辐射特性，包含空间电荷效应对电磁辐射造成的影响。结果表明，对于 rms 50 as 束长、0.1 pC 电荷、100-250 MeV 电子能量能够在 100-600 nm 波长范围产生 (每脉冲) 10^9 个相干光子。如果给定电子束适当大小的啁啾使其在波荡器中产生束团自身压缩，则在相当波段范围内在 100 pC 电荷下能够产生 10^{14} 个相干光子。

13.3 贡献或创新点

- 创新点：这篇论文主要为 GPT 数值模拟，利用 SPECTRA 作为检验在波荡器中计算辐射特性结果的正确性，利用 EFBPIC 作为模拟利用激光尾场产生与加速的电子束团分布计算，然后汇入 GPT 作为后续电子与辐射场交互作用的计算。针对数值仿真结果有详尽的讨论，包含电子与辐射场交互作用的物理图像。这篇论文着眼于阿秒电子束长经过波荡器的电磁辐射特性讨论。由于辐射中心波长在真空紫外光，是目前加速器作为相干辐射源的研究热点之一。

²⁵下一个数量级为仄秒，定义为 10^{-21} s, 写为 zs 或 zsec。

- 贡献：这篇论文首先通过数值仿真，给出在不同束长情况下，其它电子束参数保持不变，经过同一个波荡器时，波荡器辐射场特性的讨论，结果如下图所示。可以看到，图 (a) 的辐射场强度相较于图 (b) 的辐射场强度低了两个数量级，并且图 (a) 的辐射场除了 z 轴上，偏轴 (off-axis) 也存在一定强度辐射场；图 (b) 则几乎聚集在 z 轴上。

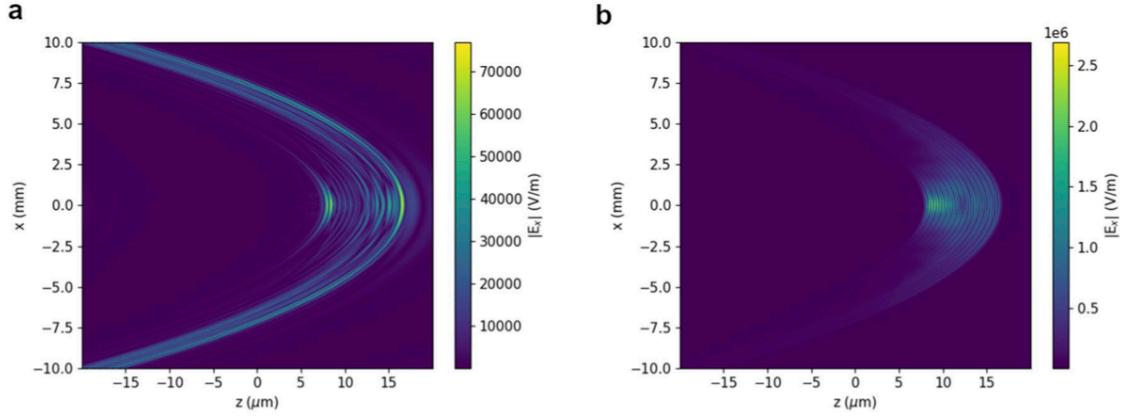


Figure 1. Electric field of undulator radiation calculated using GPT for an electron beam with 100 MeV energy, 0.1% uncorrelated energy spread, 0.1 mrad divergence, 1π mm mrad normalized emittance and 0.1 pC charge. The r.m.s. bunch duration is (a) 1 fs and (b) 100 as. The observation point is 1 m from the undulator exit.

接着讨论不同电子能量与不同束团长度的电子束团沿着同一波荡器时，产生的波荡器辐射特性的差别，包含光子中心平均能量、非相干背景、相对于中心频率的 rms 频宽等。可以看到，在固定束长情况下，当电子能量增加时，共振波长变短，因此束团内能够完全辐射在相干波段频宽内的电子数减少，相干性变差。

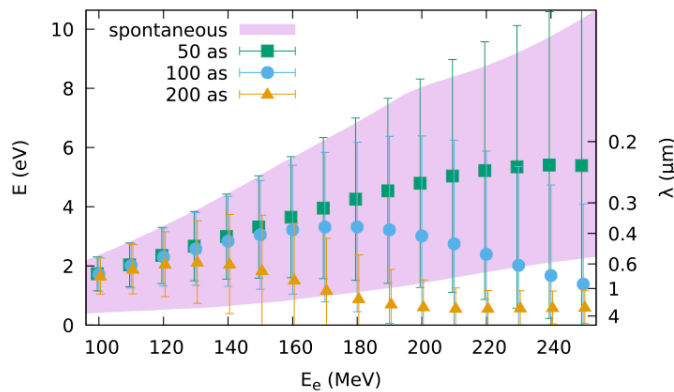


Figure 2. Mean photon energy E and r.m.s. bandwidth (error bars) of coherent undulator radiation produced by electron beams with energy E_e between 100 and 250 MeV, 0.1% uncorrelated energy spread, 0.05 mrad divergence, 1π mm mrad normalized emittance and r.m.s. bunch duration of 50 as, 100 as and 200 as. Radiation is observed 1 m from the undulator exit in a $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ area and integrated between 0.1 and 6 eV ($100\text{ MeV} \leq E_e \leq 150\text{ MeV}$), 10 eV ($160\text{ MeV} \leq E_e \leq 200\text{ MeV}$) or 15 eV ($210\text{ MeV} \leq E_e \leq 250\text{ MeV}$). The shaded area marks the r.m.s. bandwidth σ_E of spontaneous emission. Simulations carried out using SPECTRA.

下图分别考虑两种情况下的波荡器辐射特性与带有能量啁啾电子特性。存在能量啁啾使电子束经过波荡器期间，其束团长度随着 z 改变，因此辐射特性也跟着改变。左边列 (left column) 考虑 100 MeV, 1 fs 电子束，右边列 (right column) 考虑 250 MeV, 100 as 电子束。中间行是不考虑空间电荷效应的情况，最下行则是考虑 100 pC 电荷具有空间电荷效应的结果。

除了以上部分讨论，这篇论文后半部针对基于激光尾场加速产生电子束的机制，利用 FBPIC 模拟的电子束团参数，汇入 GPT 中，计算这类电子束在波荡器中的电磁辐射特性并讨论其可行性。这篇论文工作更多聚焦于讨论辐射特性相对于 (单次通过) 电子束束团参数的依存关系，这些分析基于电子束在波荡器的运动轨迹必须是给定的。

基于阿秒电子束团产生的真空紫外相干波荡器辐射对以下学科课题具有潜在应用，如：DNA 损坏机制、光化学 (photochemistry)、太空化学 (astrochemistry) 机制等。

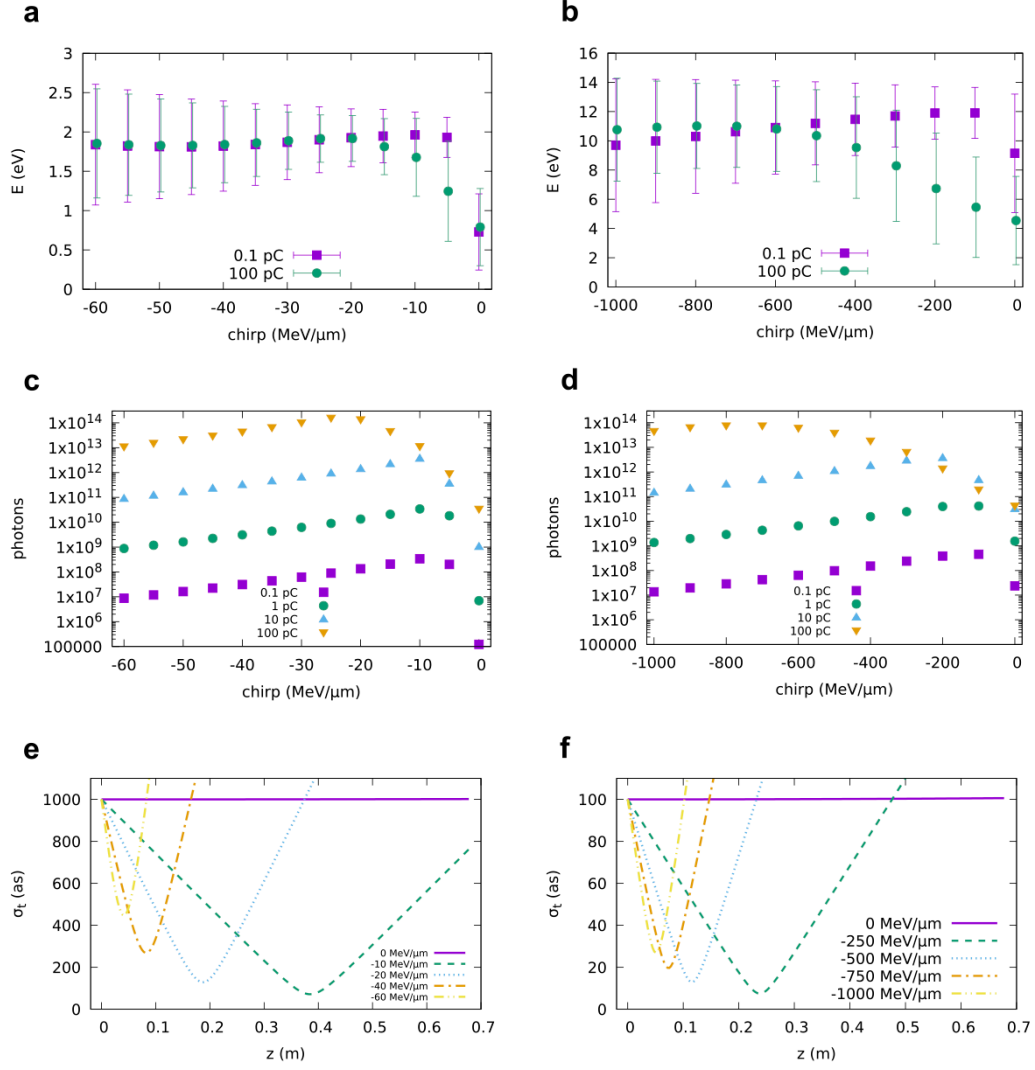


Figure 6. Undulator radiation obtained using GPT including space-charge effects for an electron beam with 0.05 mrad divergence, 1π mm mrad normalized emittance, 0.1% slice energy spread, charge between 0.1 and 100 pC and varying linear chirp. Figures (a, c, e) show results for 100 MeV energy and 1 fs initial bunch duration. Figures (b, d, f) show results for 250 MeV energy and 100 as initial bunch duration. Radiation is calculated 1 m from the undulator exit in a $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ area. (a, b) Mean photon energy and r.m.s. bandwidth (error bars) of undulator radiation integrated between 0.1 and 10 eV. (c, d) Number of photons with energy $0.9E_1 < E < 1.1E_1$. (e, f) GPT simulations showing the evolution of the bunch duration in vacuum for different chirp rates and space-charge off.

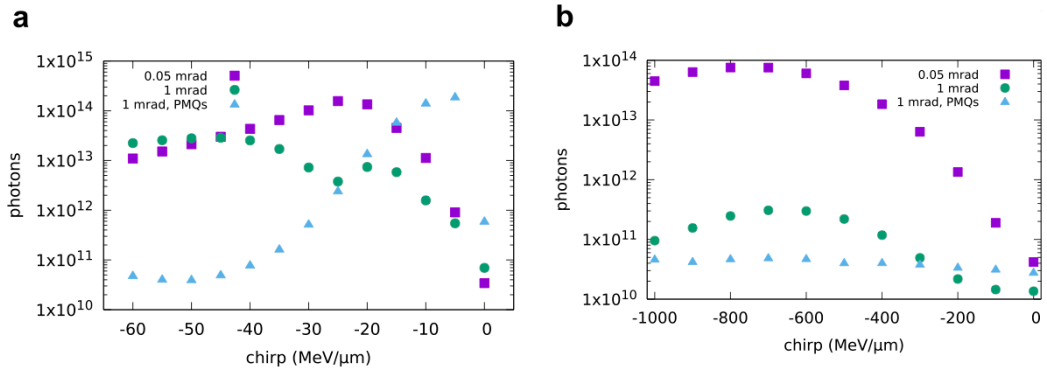


Figure 7. Undulator radiation obtained using GPT including space-charge effects for an electron beam with varying divergence, 1π mm mrad normalized emittance, 0.1% slice energy spread, 100 pC charge and (a) 100 MeV energy and 1 fs initial r.m.s. bunch duration (b) 250 MeV energy and 100 as initial r.m.s. bunch duration. Radiation is calculated 1 m from the undulator exit in a $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ area.