

加速器束流动力学期刊论文导读 (2022 年 10 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 (2022 年 10 月) 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]、[5]、[6]	jcytsai@hust.edu.cn

目录

1	自由电子激光增益衰减与电子束团特性 [PRA 34]	
	Free-electron-laser gain degradation and electron-beam quality	3
2	短脉冲自由电子激光效应的实验与数值模拟研究 [NIMA 530]	
	Experimental and numerical study of short pulse effects in FELs	5
3	自由电子激光短脉冲非线性传播动力学 [PRE 48]	
	Nonlinear short-pulse propagation in a free-electron laser	11
4	储存环自由电子激光脉冲传输与电子束纵向不稳定性 [NIMA 492]	
	Pulse propagation in storage ring free electron laser devices and longitudinal instabilities	17
5	电子束不稳定性与自由电子激光动力学的交互作用 [NIMA 492]	
	Interplay between electron beam instabilities and storage ring FEL dynamics	21
6	气候变迁是物理问题	
	Climate change is physics	23

1 自由电子激光增益衰减与电子束团特性 [PRA 34]

Free-electron-laser gain degradation and electron-beam quality

1.1 基本信息

- 分类：自由电子激光
- 作者：W. B. Colson, J. C. Gallardo, and P. M. Bosco
- 类型：理论
- 链接：<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.34.4875>

1.2 摘要

这是一篇早期讨论自由电子激光增益计算的经典论文之一。自由电子激光系统可以通过自洽地求解 Lorentz-Maxwell 方程组描述。通过迭代，辐射场的演化方程可以由一积分方程决定，其中电子束团 (纵向或横向) 分布可以任意给定。基于此积分方程，这篇论文给出几种不同情况下，增益与束团特性的关系。在低增益极限情况，增益谱退化为自发辐射谱；在高增益极限情况，场增长率不受束团特性变差而影响太大。

1.3 贡献或创新点

- 创新点：这篇论文假设在弱场 (weak field) 情况下，利用迭代法化简 Lorentz-Maxwell 方程组，从而得到一积分方程决定辐射场演化，其中电子束团 (纵向或横向) 分布可以任意给定。这篇论文就在此基础上讨论束团特性对辐射增益的影响。
- 贡献：从 Lorentz-Maxwell 方程组 (又称摆方程) 开始

$$\begin{aligned}\frac{da}{d\tau} &= -j \langle e^{-i\zeta} \rangle \\ \frac{d^2\zeta}{d\tau^2} &= \frac{dv}{d\tau} = |a| \cos(\zeta + \phi)\end{aligned}$$

注意，至此为止，以上 Lorentz-Maxwell 方程组假设电子束与辐射场作用之后的能量改变不会太大，适用于弱场、强场，大增益、小增益，且任意电子束团分布形

式。如果电子束与辐射场作用之后的能量改变较大，则上述放程应改为

$$\begin{aligned}\frac{da}{d\tau} &= -j \langle \sqrt{\eta} e^{-i\zeta} \rangle \\ \frac{d^2\zeta}{d\tau^2} &= |a| \eta^2 \cos(\zeta + \phi)\end{aligned}$$

其中， $\eta = 1 - \frac{\nu}{2\pi N}$ 。

在弱场情况下， $|a| \ll \pi$ ，且假设初始束团分布为均匀相位，即 $\langle e^{-i\zeta} \rangle = 0$ ，则辐射场的演化方程可写为一积分方程

$$a(\tau) = a_0 + i \frac{j}{2} \int_0^\tau ds \int_0^s dq \langle \exp[-iv_i(s-q)] \rangle \times (s-q)a(q)$$

这篇论文第二部分针对几种理想电子束分布讨论自由电子激光增益，包含

1. on-resonance, cold beam $f(v_i) = \delta(v_i) \Rightarrow$ 低电流、高电流情况下的增益参考该论文 Eqs. (8, 9)
2. off-resonance (detune), cold beam $f(v_i) = \delta(v_i - v_0) \Rightarrow$ 低电流情况下的增益参考该论文 Eqs. (11)，即熟知的 Madey 定理
3. off-resonance (detune), Gaussian beam energy spread $f(v_i) = \frac{\exp[-(v_i - v_0)^2/2\sigma^2]}{\sqrt{2\pi}\sigma} \Rightarrow$ 有简化的积分方程 Eq. (13)
4. off-resonance (detune), exponential-function beam angular spread $f(v_i) = \frac{\exp[-(\nu_0 - v_i)/\sigma_\theta]}{\sigma_\theta}$ for $v_i < v_0$ $f(v_i) = 0$ for $v_i > v_0 \Rightarrow$ 有简化的积分方程 Eq. (15)

2 短脉冲自由电子激光效应的实验与数值模拟研究 [NIMA 530]

Experimental and numerical study of short pulse effects in FELs

2.1 基本信息

- 分类：自由电子激光
- 作者：S. Khodyachikh, M. Brunken, H. Genz, C. Hessler, A. Richter, and V. Asgekar
(主要机构：Technische Universitat Darmstadt)
- 类型：实验、数值模拟
- 链接：<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900204010605#!>

2.2 摘要

这篇论文从实验与数值模拟讨论了自由电子激光振荡器 (free electron laser oscillator, FELO) 操作在短脉冲模式的动力学过程。这里的“短脉冲”指的是当电子束长 σ_z 与滑移长度 $N_u \lambda_r$ 相当的情况。这篇论文针对小信号增益、脉冲功率、辐射谱分布等物理量考虑了当短脉冲 (红外光波段) 自由电子激光操作在 stable focus¹ 区间与 limit cycle² 区间的情况。实验结果与数值模拟结果有良好的一致性。此外，数值模拟还预测了一混沌、period-doubling 区间。

FELO 的操作区间根据 $N_u \lambda_r / \sigma_z$ 与 L_c / σ_z (其中, $L_c = \lambda_r / 4\pi\rho$) 参数可以画成如下 Fig. 1 的相图 (phase diagram)。

2.3 贡献或创新点

- 创新点：这篇论文利用对比两个实验结果 (S-DALINAC、FELIX 分别表征相图中的 a 与 b 区间) 与数值模拟计算，形象化演示了 FELO 在 stable focus (S-DALINAC) 与 limit cycle (FELIX) 的动力学过程。

¹此种情况没有“次脉冲”(subpulse) 产生。

²此种情况频谱会产生“边带”(sideband)。

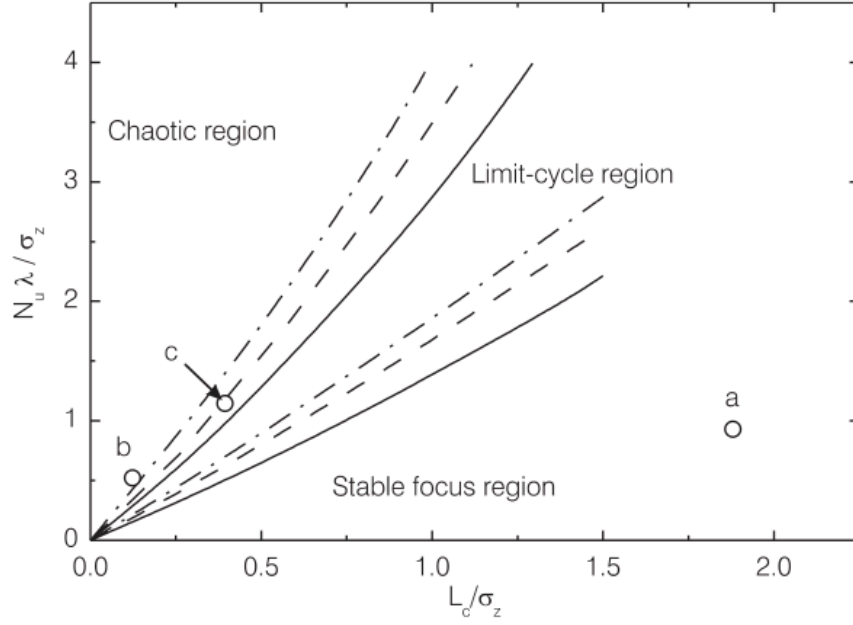


Fig. 1. Phase diagram [7] for different regimes of operation of an FEL oscillator. The quantities $N_u \lambda$ and σ_z are the slippage distance and the electron bunch length, respectively, and $L_c = \lambda/4\pi\rho$. Lines corresponding to three different cavity desynchronizations separate three different regimes of operation namely stable focus, limit-cycle and chaotic regimes. The points a , b and c correspond to three cases studied in the present paper.

- 贡献：以下 Figs. 6-9 为 S-DALINAC 实验结果与数值模拟比较。由 Fig. 6 可看出，在右侧沿 400 μs 时间内，FELO 即达饱和/稳定输出。随时间演进，后方/尾部辐射场强度增加。增益随着调整失谐长度 $\Delta L/\lambda_r$ 增加，宏脉冲平均功率也随着调整失谐长度 $\Delta L/\lambda_r$ 增加，均符合预期。Fig. 9 关于辐射场输出频谱的模拟结果比实验窄些，可能由于实验对谐振腔调谐的偏差或是一维模拟的偏差，需要进一步证实。

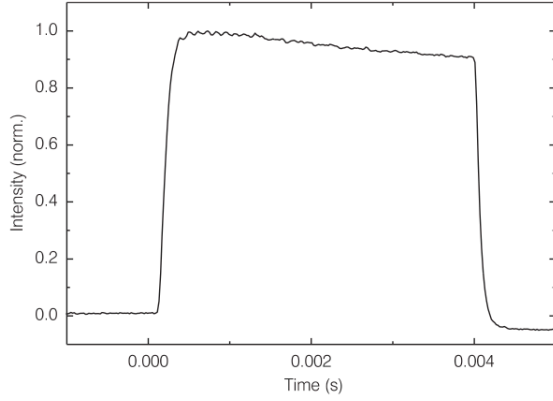


Fig. 6. Typical development of the laser intensity measured within the macropulse at the S-DALINAC. The pulsed electron beam had an energy of 31.04 MeV, a pulse length of 4 ms and a repetition rate of 31 Hz.

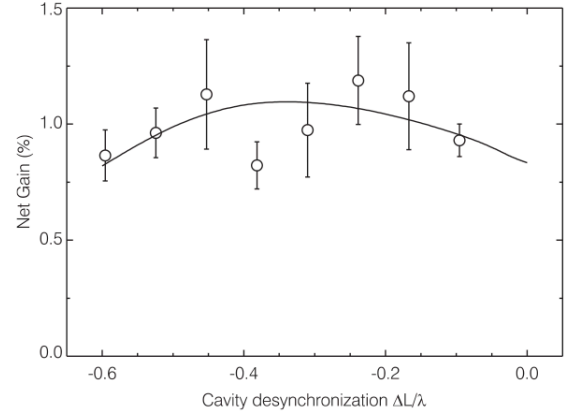


Fig. 7. Small signal gain as a function of the cavity desynchronization. Open circles represent the experimental results obtained at the Darmstadt FEL with the beam parameters listed in the caption of Fig. 6. The solid curve is a fit to the data from the simulation.

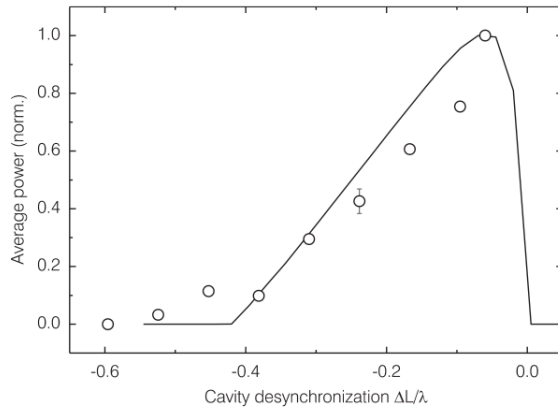


Fig. 8. Average macropulse power as a function of cavity desynchronization measured at the S-DALINAC (circles) compared with the results of the simulation (solid line).

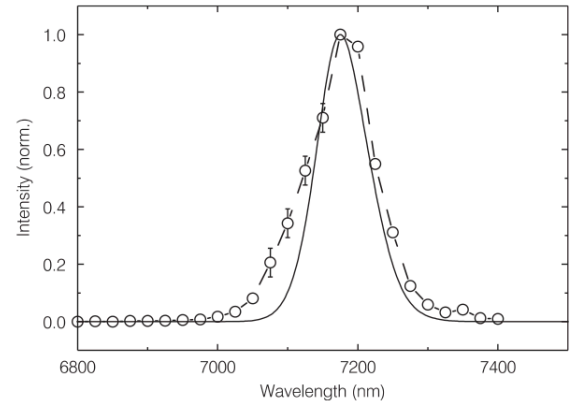


Fig. 9. Spectral distribution of the laser radiation measured at the S-DALINAC (dashed line) and the results of simulations (solid line).

以下 Fig. 10 为 FELIX 实验结果与数值模拟比较。激光在 3 μs 开始，至 4 μs 达饱和，稳定维持在 4 ~ 7 μs 间，之后电子束不再注入，辐射场强开始衰减。在脉冲时间分布中，4 ~ 7 μs 间平顶出现振荡；在频谱中，对应到长波长侧产生长尾、振荡，表征 FELO 操作在 limit cycle 区间。在该论文 Fig. 11 中比较了数值模拟与 Fig. 10 中间图的结果，此处不论。

这篇论文最后一部分讨论了从 limit cycle 进入 chaotic regime 的情况，然后改

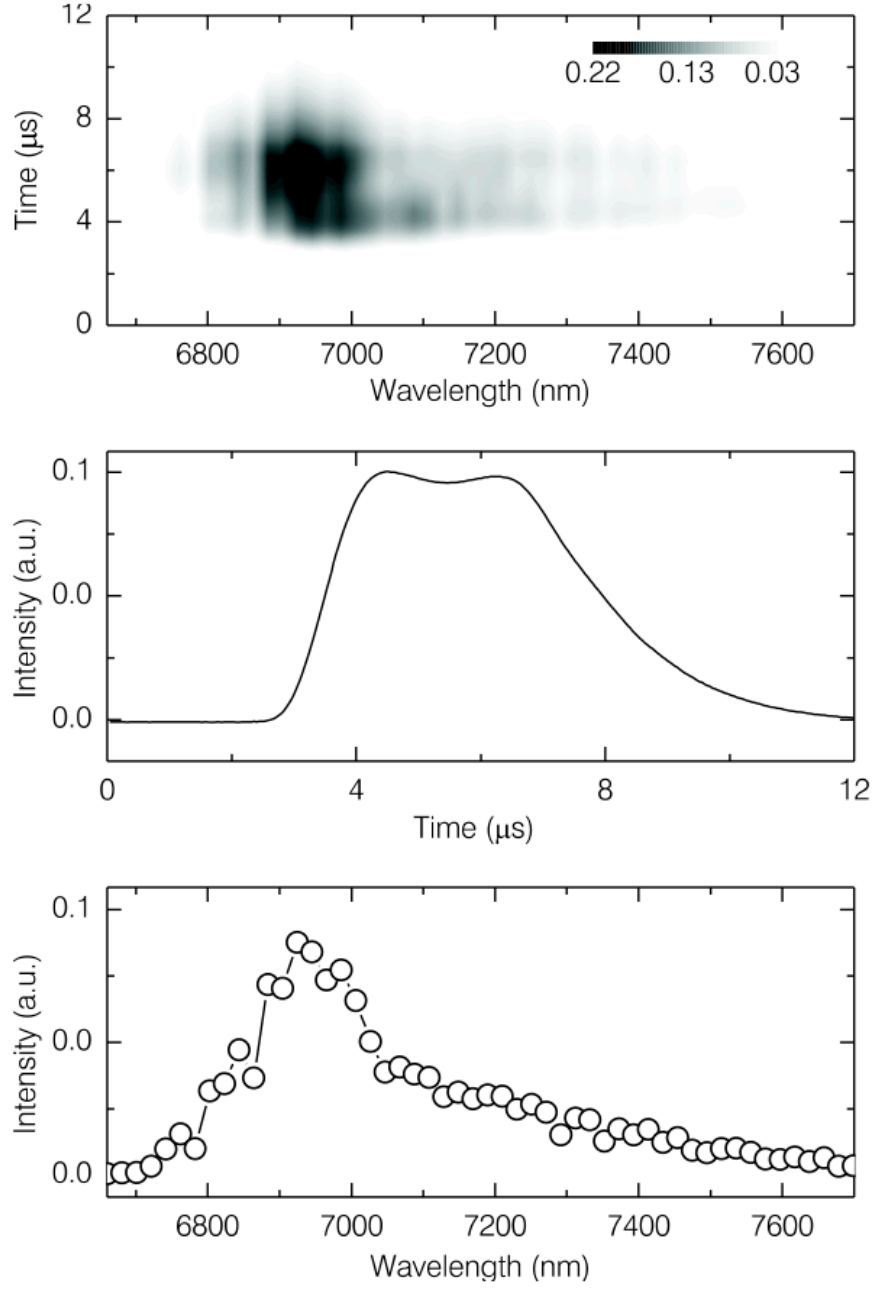


Fig. 10. A sample of a time-resolved spectral distribution measured at FELIX (top). The zero position on the time-scale corresponds to the beginning of the electron macropulse. The electron beam was switched off after 7 μs . The development of the intensity (middle) is obtained by integration of the time-resolved spectrum over the entire wavelength region. The spectral distribution averaged over time (bottom) is antisymmetric with a long tail at the longer wavelength side which together with the oscillation in the intensity points to the limit-cycle regime.

变失谐长度 $\Delta L/\lambda_r$ 。当失谐较大时, $\Delta L/\lambda_r = -0.75$, 系统处于稳定情况; 当 $\Delta L/\lambda_r = -0.5$ 时, 对应 Hahn-Lee 相图的 period-2 regime; 当 $\Delta L/\lambda_r = 0$ 时, 系统进入混沌状态, 光场较大, 但是输出不再稳定, 对不同初始条件, 结果不同, 如图 Fig. 13(c)。这里注意图中顺序由下而上, 不是由上而下。

2.4 其它

这篇论文 Section 3 提到辐射场经过反射镜之后产生的相位改变可以忽略, 因为不影响 FEL 操作。这段描述援引自 Saldin 一书 [1], 值得琢磨。

此外, 这篇论文提到对于 low-gain FEL, 一维情况“辐射场横向模尺寸大于电子束团”的假设大致符合实验条件。对于 high-gain FEL, 逐圈波荡器中的辐射场横向模较强 (场强与横向模分布改变较大), 令人满意的模拟可能需要利用三维模拟程序。

参考文献

- [1] E.L. Saldin, E.A. Schneidmiller, M.V. Yurkov, *The Physics of Free Electron Lasers*, Springer, Berlin, 2000

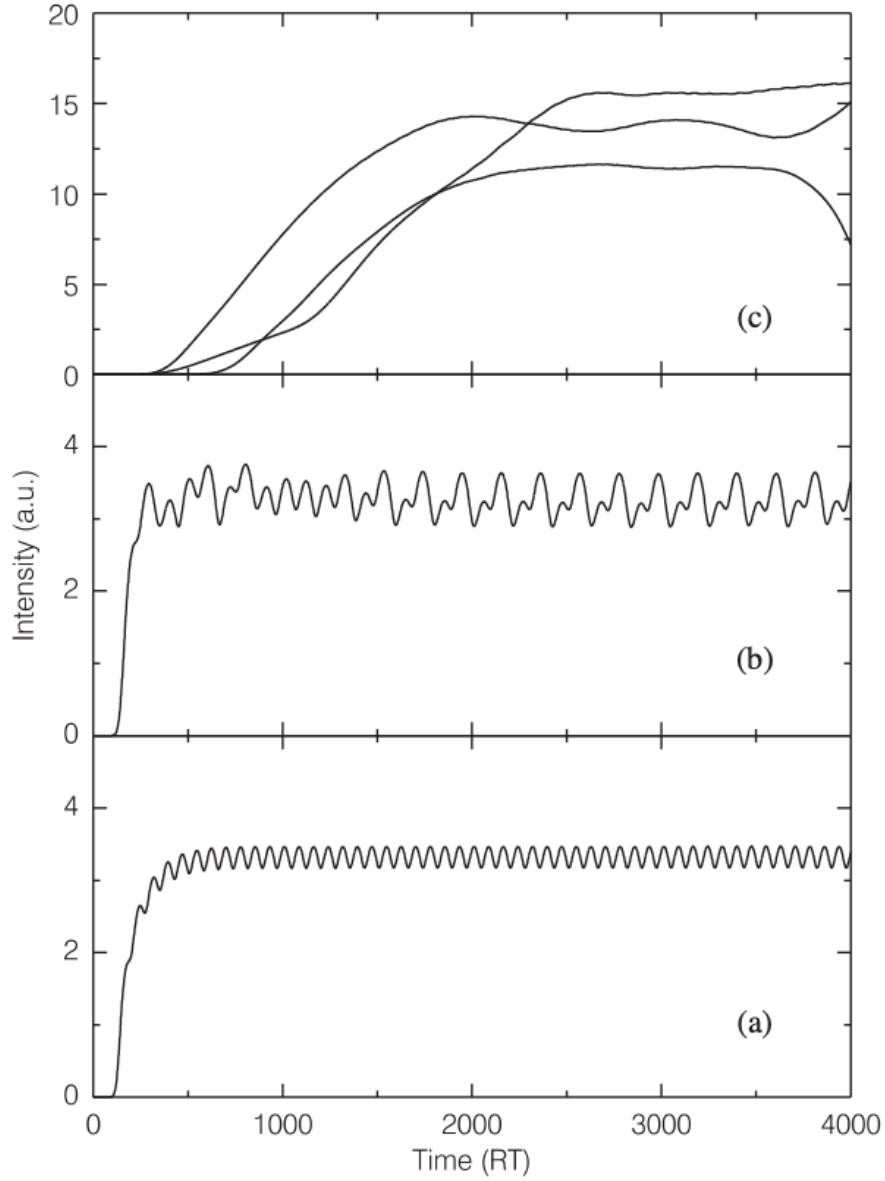


Fig. 13. Different regimes of the FEL operation obtained numerically with the parameters corresponding to the point (c) in Fig. 1. For three different values of cavity desynchronization (i) $\Delta L/\lambda = -0.75$ the limit-cycle regime (a), (ii) $\Delta L/\lambda = -0.5$ period-two regime (b), and (iii) $\Delta L/\lambda = 0$ chaotic behavior (c), are observed.

3 自由电子激光短脉冲非线性传播动力学 [PRE 48]

Nonlinear short-pulse propagation in a free-electron laser

3.1 基本信息

- 分类：自由电子激光
- 作者：Sang June Hahn and Jae Koo Lee (Pohang Institute of Science and Technology, POSTECH)
- 类型：理论、数值计算
- 链接：<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.48.2162>

3.2 摘要

这篇论文通过求解一维、时变 Maxwell-Lorentz 方程组，讨论了自由电子激光短脉冲非线性传播动力学，包含放大器与振荡器模式。针对有限长束团与谐振腔调谐 (cavity detuning)，详细描述并分析振荡器模式中辐射光场出现的尖峰 (spiking) 与耗散特性。尖峰特性可与超辐射脉冲传播关联，演化过程的动力学则与非线性耗散 (nonlinear, dissipative) 系统的分叉 (bifurcation) 与混沌现象有紧密关联。动力学描述显示此比值 L_{syn}/L_s 扮演重要角色，其中， L_s 为滑移长度， L_{syn} 为在一个同步振荡周期长度中的滑移长度³。

这篇论文总结了三个重要参数： D 为谐振腔失谐参数， S 为滑移参数， K 为超辐射参数。利用这三个参数，能够对自由电子激光振荡器 (FEL) 系统在不同操作区间的动力学提供分类描述。

3.3 贡献或创新点

- 创新点：单次经过自由电子激光系统可分为三个作用区间：电子束团本体不因滑移影响的稳态 (steady state) 区间、束团前方的辐射衰减区间、束团后方的辐射增强区间。这篇论文针对不同电子束团长度与波荡器间相对滑移距离，分析放大器模式与振荡器模式情况下的几种动力学演化过程。论文最好给出“相图”(phase diagram)，有时称 Hahn-Lee 相图。

³注意，在这篇论文中， L_{syn} 不是同步振荡周期长度，但是， T_{syn} 则是指同步振荡周期时间。一般情况下， $L_{\text{syn}} > L_s$ 。

这篇论文总结三个重要参数 (branching parameters):

- $D = \frac{\delta L}{\lambda_r}$ 为谐振腔失谐参数
- $S = \frac{L_s}{L_e}$ 为滑移参数, 其中, $L_s = N_u \lambda_r$ 为滑移长度、 L_e 为电子束长度
- $K = \frac{L_c}{L_e}$ 为超辐射参数, 其中, $L_c = \frac{\lambda_r}{4\pi\rho}$ 为 cooperation length

利用这三个参数, 能够对自由电子激光振荡器 (FELO) 系统在不同操作区间的动力学提供分类描述。

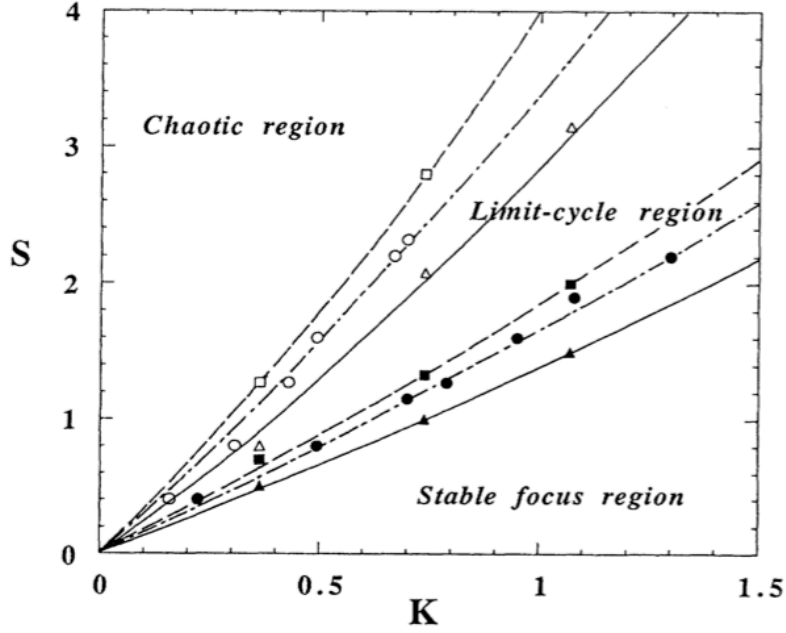


FIG. 12. Phase diagram. Symbolled points are determined by the simulation. The curves are made by simple data fittings. Filled symbols represent Hopf bifurcation points and open symbols represent period-doubling bifurcation points. Rectangle, $D = -0.5$; circle, $D = -1.0$; and triangle, $D = -2.0$.

- 贡献: 由于振荡器模式包含除了辐射场与电子束作用放大, 还有辐射场经反射镜导致能量损耗, 因此, 辐射场的演化不容易通过哈密顿量分析, 且辐射场演化涉及的动力学过程包含线性与非线性。系统属于非线性耗散系统。相对而言, 操作在放大器模式因为没有能量损耗, 虽然涉及非线性过程, 使用哈密顿量分析是相对可行的。

这篇论文 Section II 一开始回顾超辐射的物理机制, 其中提到 Bonifacio 等人利用引入一指数衰减项 $e^{-\alpha z}$ 在稳态方程中以描述超辐射过程, 值得琢磨。

此论文 Section II 列写系统运动方程如下

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x}\gamma_j &= -\frac{k_s a_s a_w}{\gamma_j} \sin(\theta_j + \phi_s) \\ \frac{\partial}{\partial x}\theta_j &= k_w - k_s \frac{(1 + a_w^2)}{2\gamma_j^2} \\ \frac{\partial}{\partial y}\bar{a} &= i\eta F(y) a_w \left\langle \frac{e^{-i\theta}}{\gamma} \right\rangle\end{aligned}$$

其中, x 为相对于电子束的 (归一化) 推迟时间, y 为相对于辐射场的 (归一化) 推迟时间。稳态情况下, x, y 没有区别。

对放大器而言, 超辐射动力学可以下图 Fig. 3 总结。

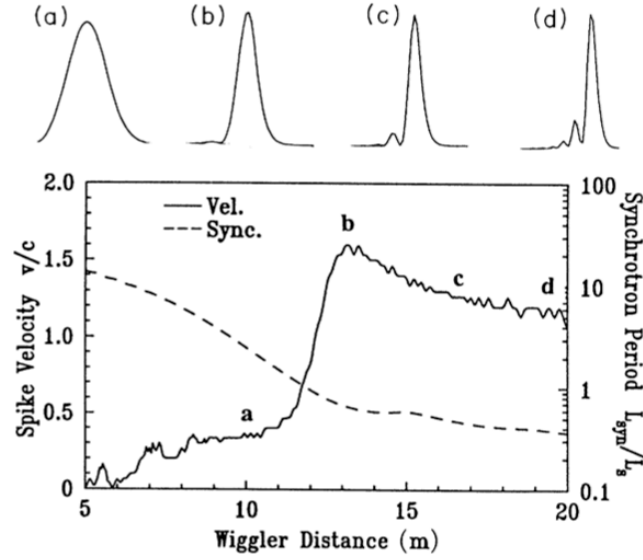


FIG. 3. Spike velocity and scaled synchrotron slippage length as a function of wiggler distance. The four figures on the top are the radiation pulse profiles at the specific positions (a: 10 m, b: 13 m, c: 17 m, and d: 20 m).

对振荡器而言, 超辐射动力学在某些情况下与放大器情况类似, 如下图 Fig. 4 (假设 $\delta L = 0$)。因此, 这篇论文作者提出考虑利用放大器的超辐射模型讨论短脉冲自由电子激光振荡器动力学。

对于不同失谐长度情况 $\delta L < 0$, 辐射场脉冲与频谱可能相差甚巨, 参考 Fig. 5。Fig. 5(a) 为 chaotic 区间, Figs. 5(b,c) 为 limit cycle 区间。此处假设短脉冲操作模式。

针对 limit cycle oscillation (LCO) 情况, 这篇论文作者提出振荡周期应写为

$$\tau = \frac{L_{\text{syn}}}{2|\delta L|} \tau_c$$

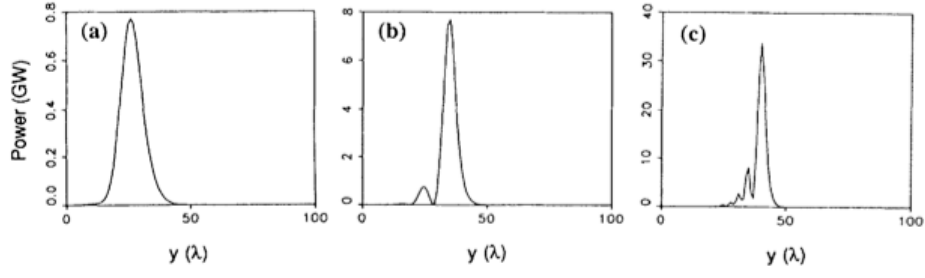


FIG. 4. Short-pulse case ($L_e \sim L_s$). Radiation pulse profiles at pass 50 (a), 100 (b), and 200 (c).

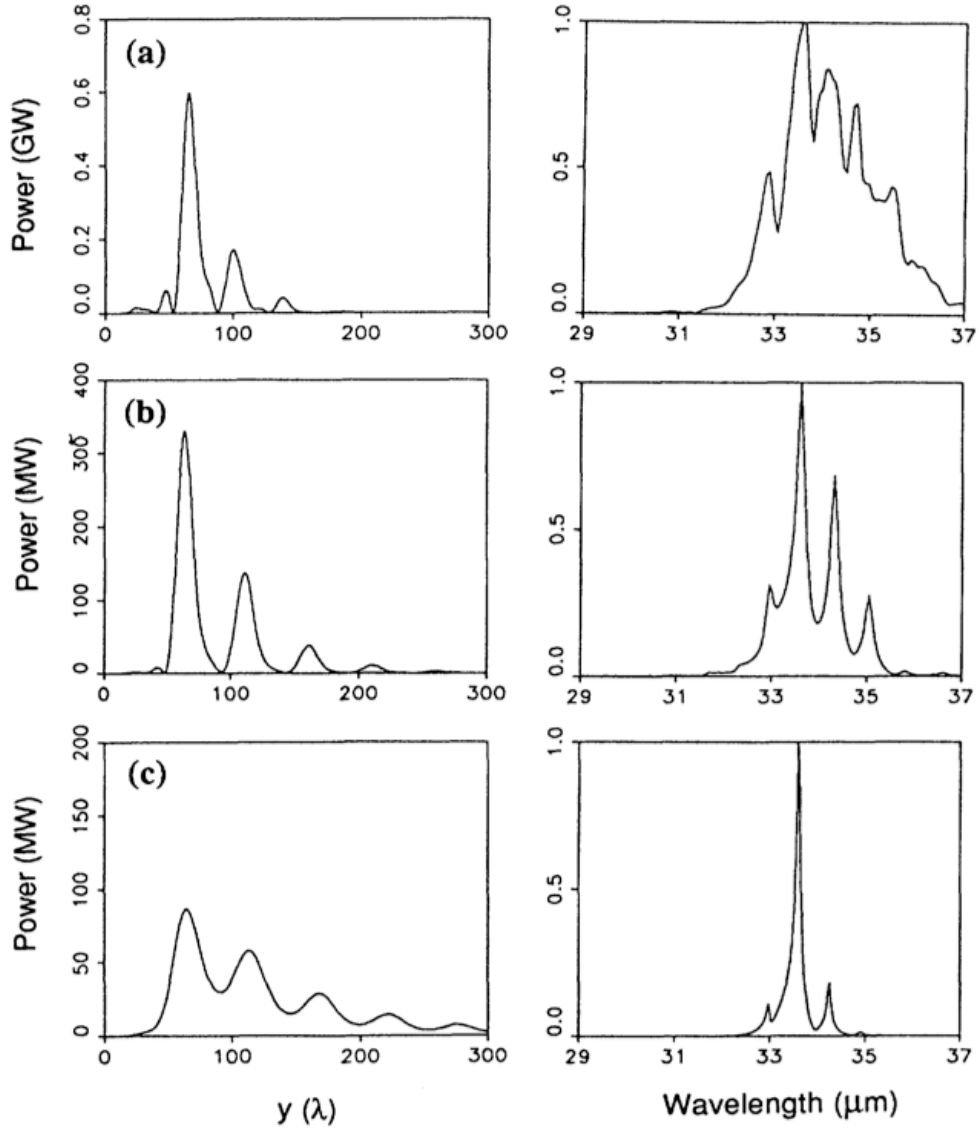


FIG. 5. Radiation pulse profiles and spectral power distributions for $\delta L = -0.5\lambda$ (a), -1.0λ (b), and -2.0λ (c).

与先前 Jaroszynski 等人给出的公式区别在于 L_{syn} 。

不同于上面，长脉冲操作模式有如下 Fig. 10 形式辐射场脉冲与频谱。辐射场脉冲尖峰间隔约滑移长度 λ_s ，与谐振腔失谐参数不敏感。

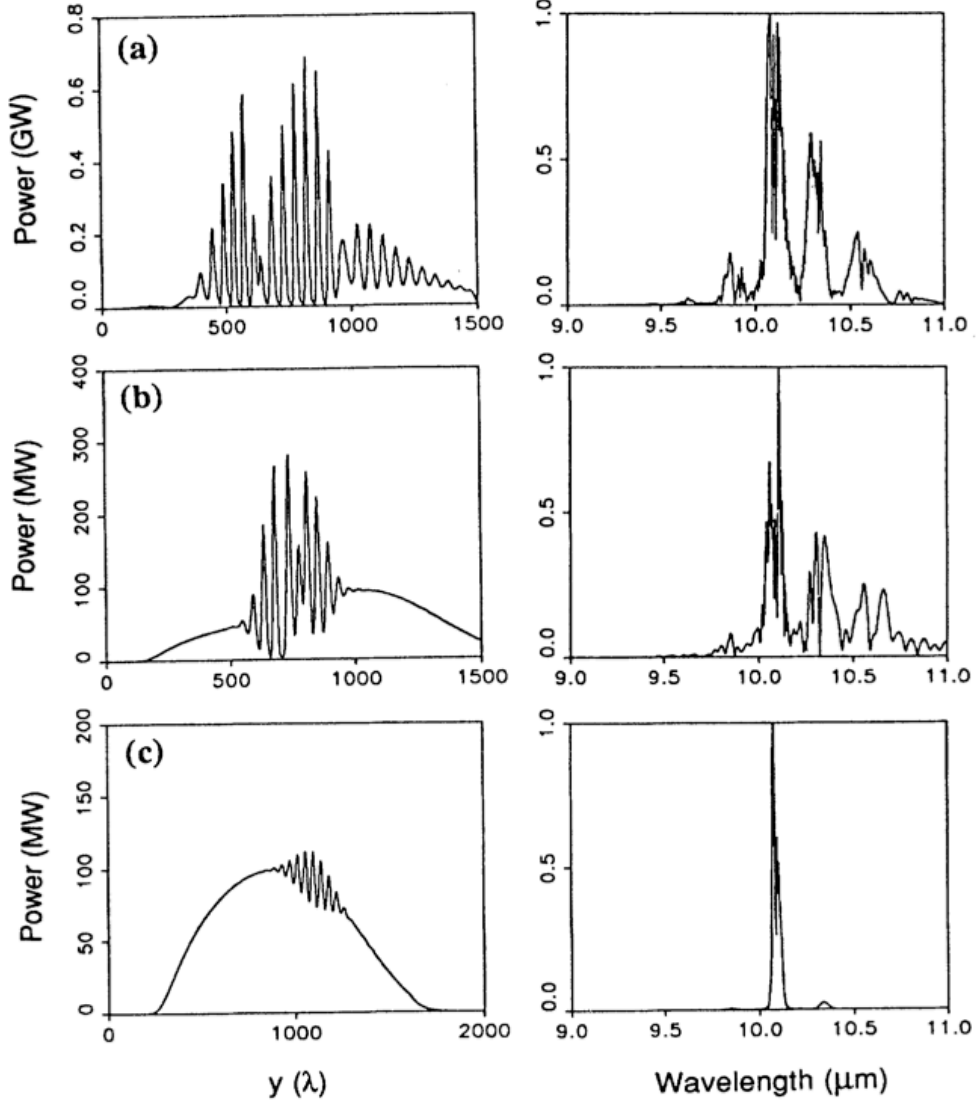


FIG. 10. Radiation pulse profiles and spectral power distributions at pass 400 for $\delta L = -0.5\lambda$ (a), -1.0λ (b), and -2.0λ (c).

3.4 其它

这篇论文最后部分利用数值模拟对较大参数范围 D, S, K 的计算结果总结，定义一 branching parameter $\mu \equiv \frac{L_s}{L_{\text{syn}}}$ ，得到如下结论：

- $\mu < 0.8 \Rightarrow$ stable focus region
- $0.8 < \mu < 1.5 \Rightarrow$ limit cycle region
- $1.5 < \mu < 2 \Rightarrow$ period-doubling region
- $\mu > 2 \Rightarrow$ chaotic region

其中, $\mu = 1$ 差不多对应 Hopf 分叉点。

4 储存环自由电子激光脉冲传输与电子束纵向不稳定性 [NIMA 492]

Pulse propagation in storage ring free electron laser devices and longitudinal instabilities

4.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：R. Bartolini, G. Dattoli, L. Giannessi, L. Mezi (ENEA)
- 类型：理论、模拟
- 链接：<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900202010288>

4.2 摘要

这篇论文开展一种自洽的储存环自由电子激光模拟程序。该程序考虑了束团纵向动力学与激光脉冲传输过程，体现电子束-激光束交互作用，也提供对激光对抑制束团集体不稳定性影响的进一步认识。

4.3 创新点与贡献

- 创新点：关于储存环自由电子激光的电子与辐射场动力学分析一般有以下两种方式
 1. 基于电子束团特性（能散、束长）与激光场增长率的速率方程（rate equations），为现象学；
 2. 基于单宏粒子（single macroparticle）⁴纵向运动方程与自由电子激光场方程⁵，为第一原理。
- 贡献：这篇论文 Section 2 总结了储存环自由电子激光单宏粒子运动方程 Eqs. (1,2) [与 Eqs. (3-6)] 与辐射场演化方程 Eq. (9)，包含谐振腔损耗 η 与失谐 $\delta\mathcal{L}$

$$\epsilon_{n+1} = \epsilon_n + \frac{eV'_{\text{RF}}}{E_s} z_n - 2\frac{T}{\tau_s}\epsilon_n + 2\sigma_{\epsilon,0}\sqrt{\frac{T}{\tau_s}}r + V_\omega(z_n) + V_{\text{FEL}}(z_n)$$

$$z_{n+1} = z_n - \alpha_c L \epsilon_{n+1}$$

⁴一个电子束团由多个单宏粒子组成。

⁵不同于激光场增长率方程。

$$a(z - 2\delta\mathcal{L}, n + 1) - a(z, n) = \left[i\pi \frac{g_0 \sigma_0}{\Delta^3} \sum_{k=1}^N \int_0^{z_k - z} \xi a(z + \xi, n) e^{-i v_k \xi / \Delta} d\xi \right] \times \sqrt{1 - \eta}$$

细节此处不论。注意，此处 $\delta\mathcal{L} > 0$ 表示 round-trip length 缩短， $\delta\mathcal{L} < 0$ 表示伸长。

对于不同谐振腔失谐 (缩短) 长度，逐圈辐射场强度与在波荡器入口处相对于电子束团中心位置的关系分别有如下 Figs. 1 与 3

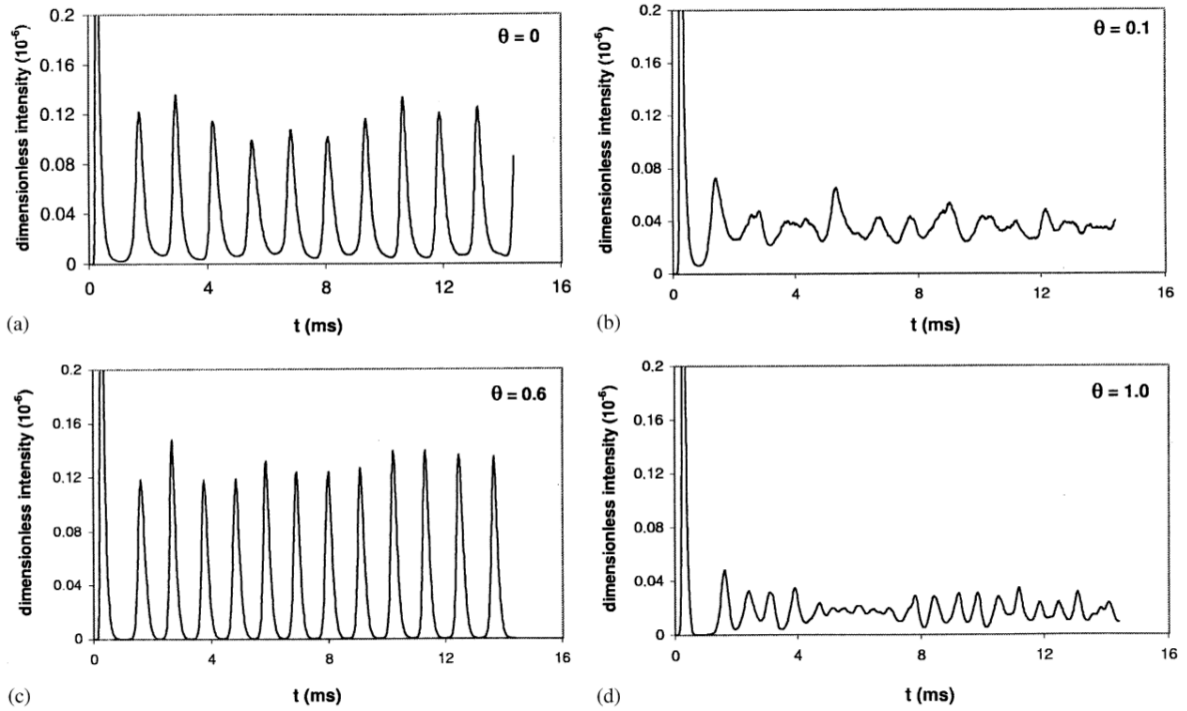


Fig. 1. Laser pulse dimensionless intensity vs. time for different values of the cavity detuning parameter θ (corresponding to different cavity shortening). Dimensionless intensity (I/I_s) vs. time at (a) $\theta = 0$ ($\delta L = 0 \mu\text{m}$) pulsed regime; (b) $\theta = 0.1$ ($\delta L = 0.13 \mu\text{m}$) quasi-stable output; (c) $\theta = 0.6$ ($\delta L = 0.79 \mu\text{m}$) pulsed regime; and at (d) $\theta = 1.0$ ($\delta L = 1.32 \mu\text{m}$) quasi-stable output at reduced power levels. The FEL parameters are listed in Table 1.

当辐射场在波荡器入口处相对于电子束团中心位置逐圈振荡时，表示此时运行自由电子激光不稳定，如 Fig. 3(a,c) 所示。这里 Fig. 3(b,d) 属于近稳定 (quasi-stationary) 状态。

这篇论文后半部分讨论了一个有趣的情况：对 $\delta\mathcal{L} = 0$ ，当 FEL 工作时，电子束团不稳定性消失；当出现电子束不稳定时，FEL 存在但不再稳定输出辐射场，如 Fig. 4 所示。

当 $\delta\mathcal{L} > 0$ 时，FEL 存在且能够操作在稳定区间，如 Fig. 5 所示。

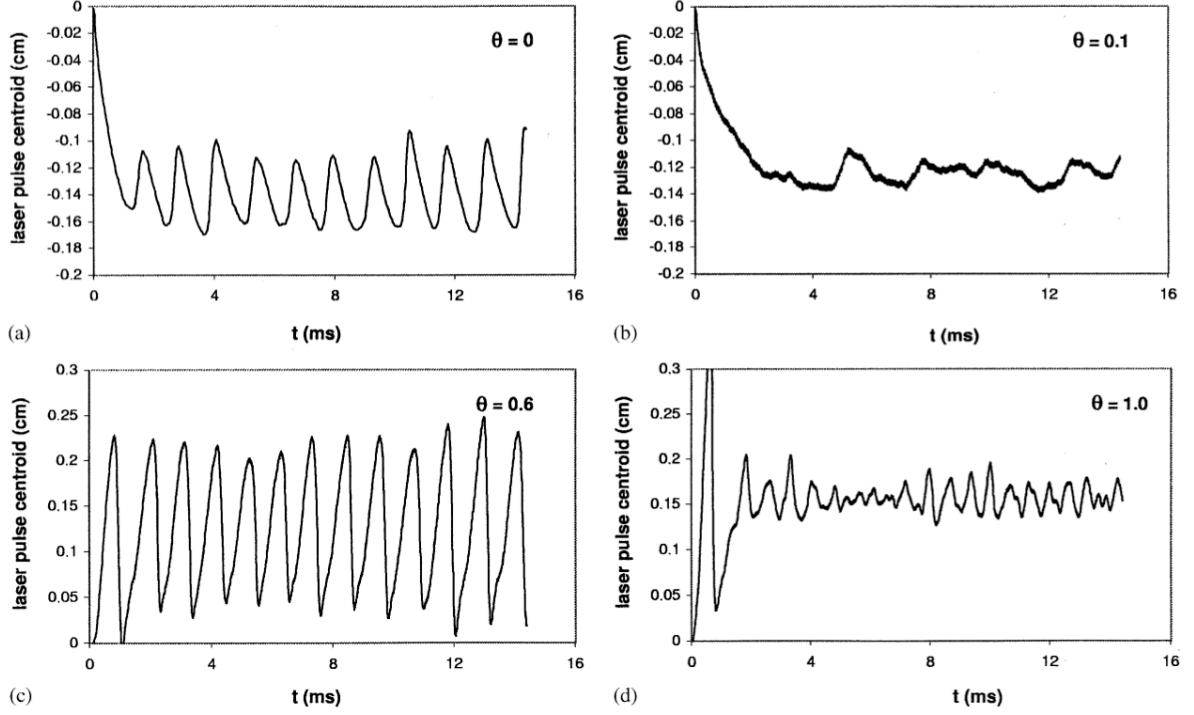


Fig. 3. Laser pulse centroid position vs. time for the same parameter as in Fig. 1.

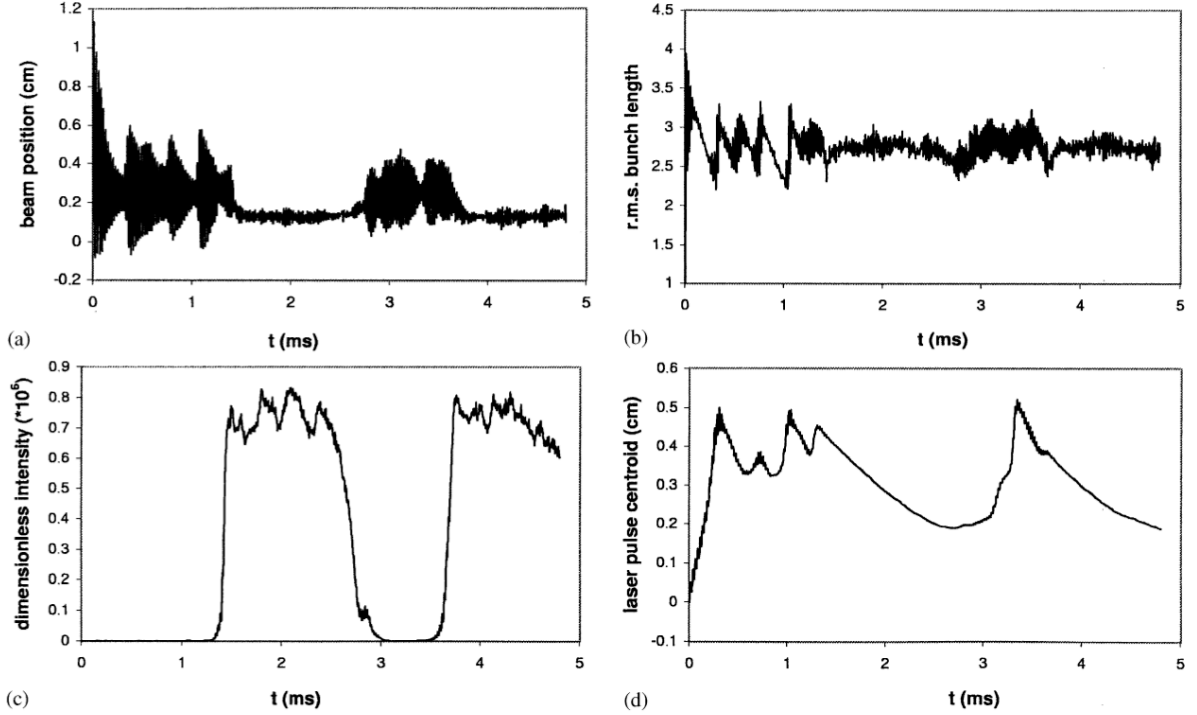


Fig. 4. e-Beam parameters and laser pulse temporal characteristics in the presence of longitudinal instability of sawtooth type: (a) e-beam centroid motion, (b) e-beam r.m.s. bunch length, (c) dimensionless intensity (I/I_s) and (d) laser pulse centroid position vs. time. The FEL parameters are listed in Table 1 with a damping time reduced by a factor 10. The impedance parameter $R = 1 \text{ K}\Omega$, $k_0 = 0.5$ and dimensionless current [11] $I = eN\omega_0 R/QV'_{\text{RF}}\sigma_{z0} = 30$. The cavity detuning is set to $\theta = 0$ ($\delta L = 0 \mu\text{m}$). When the laser is on the sawtooth instability is switched off; as the laser pulse slip over the e-beam the instability may rise again switching off the laser.

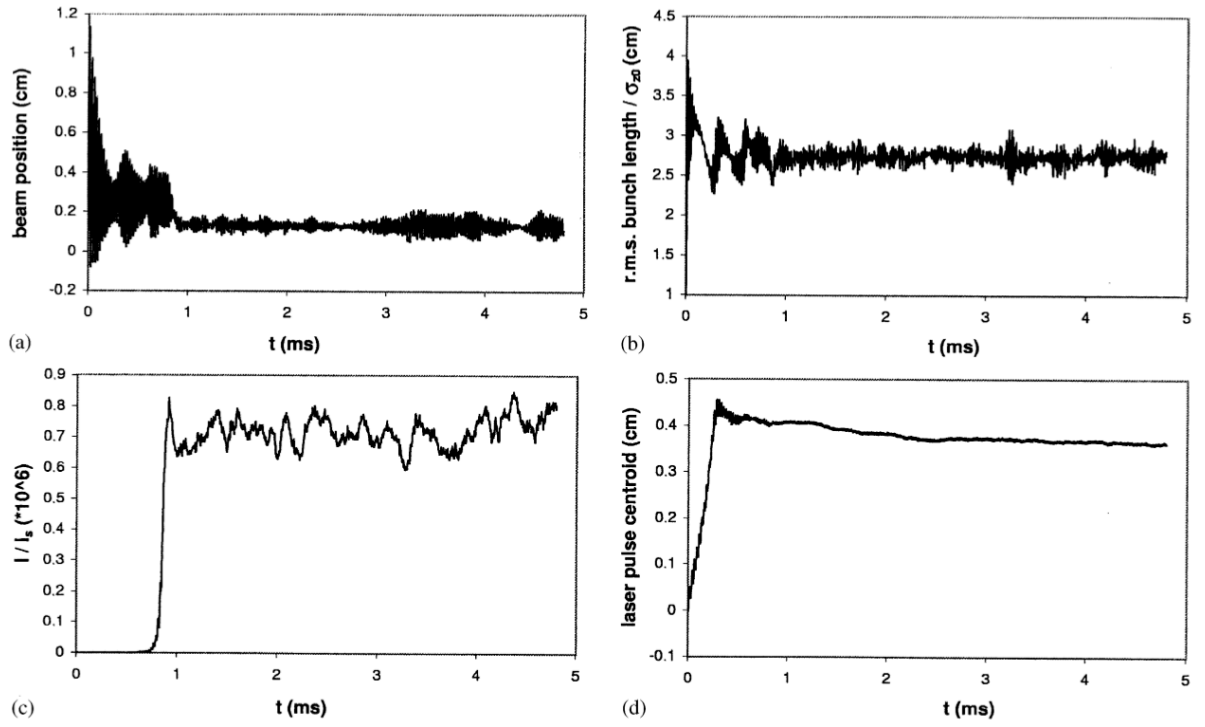


Fig. 5. Same as Fig. 4 with the cavity detuning set to $\theta = 0.2$ ($\delta L = 0.26 \mu\text{m}$). The slip of the laser pulse over the e-beam is compensated by the cavity detuning and the laser output is stable.

5 电子束不稳定性与自由电子激光动力学的交互作用 [NIMA 492]

Interplay between electron beam instabilities and storage ring FEL dynamics

5.1 基本信息

- 分类：同步辐射与自由电子激光
- 作者：R. Bartolini, G. Dattoli, L. Giannessi, M. Marsi, L. Mezi, M. Migliorati, M Trovo, R.P. Walker (主要机构：ENEA)
- 类型：理论、模拟
- 链接：<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900202012378>

5.2 摘要

这篇论文讨论存在电子束团由于势阱畸变 (potential well distortion, PWD) 与纵向微波不稳定性导致的束团分布改变对储存环自由电子激光运行的影响，并分析输出功率。同时，比较基于理论预测的结果与在 ELETTRA 的实验量测结果。

5.3 创新点与贡献

- 创新点：储存环自由电子激光动力学 (storage ring free electron laser, SR FEL) 可以通过一组单电子或宏粒子动力学与激光场动力学的耦合方程描述，最早由 G. Dattoli 等人提出。虽然早期模型可以很好地解释 Super-ACO⁶实验结果，但是近期在 ELETTRA SRFEL 的实验结果则存在差异。这篇论文认为是理论模型中尚没有考虑势阱畸变集体效应，因此，这篇论文讨论将势阱畸变加入模型之后的结果。
- 贡献：这篇论文一开始点出储存环自由电子激光的电子束团动力学涉及两种不稳定性：自由电子激光不稳定性与微波不稳定性，除了两者机制具有相似之处外，当激光场形成时，通常伴随微波不稳定性消失，形成类似锯齿不稳定性 (sawtooth instability, STI)。讨论 FEL 与 STI 的交互作用可通过激光场增长率的速率方程 (rate equation) 与电子束团不稳定性的 Volterra 积分方程，从而给出 Boussard 条

⁶位于法国 Orsay。

件的“动态”版本。

不考虑 FEL，在储存环中，平衡态的电子束特性由辐射阻尼与量子激发效应互相抗衡达到。当储存环中存在 FEL 时，FEL 不稳定性会导致的束团能散增加与峰值电流下降（由于束团长度拉伸）。当存在 PWD 时，能散与束长也会互相牵制，直到满足自洽解。这些动力学过程导致的束团参数也跟着动态改变。

这篇论文处理 PWD 的方式为利用既有文献的结果，针对简化情况写出存在 PWD 效应平衡时电子束长与能散应满足的方程，如对低电流、感性阻抗情况

$$\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{zn}}\right)^3 - \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{zn}}\right) - A = 0$$

或高电流情况

$$\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{zn}}\right)^3 - \left[1 + B \left(\frac{\sigma_{zn}}{\sigma_z}\right)^{2a}\right] \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{zn}}\right) - A = 0$$

其中，指数部分 $2a$ 待定，不同加速器装置决定其值。

FEL 部分则由速率方程 (rate equation) 给出，决定归一化辐射强度 $x = I/I_{s,\delta}$ 的演化。

$$x_{n+1} = (1 - \eta) (G(x_n) + 1) x_n$$

$$\sigma_{i,n+1}^2 = \left(1 - \frac{2T}{\tau_s}\right) \left[\sigma_{i,n}^2 + \left(\frac{0.365}{N\sqrt{2\beta}} \frac{1}{1+\delta}\right)^2 \frac{\beta x_n}{2} \right]$$

其中， $\beta = 0.53\frac{\pi}{2}$, $G(x_n) = \frac{1}{2}x_n E(x_n) B(x_n)$, $E(x_n) = \frac{1}{1+1.7\mu_\epsilon^2(0)\bar{\sigma}_n^2}$, $B(x_n) = \frac{1}{R(\bar{\sigma})} = \frac{\bar{\sigma}_z(\bar{\sigma})}{\sigma_z(0)}$ 。

5.4 其它

这篇论文采用的分析方式不从第一原理出发，而是结合几个既有的结果。通过梳理动力学过程，给出同时满足几个不同方程的自洽或迭代结果，值得琢磨。

6 气候变迁是物理问题

Climate change is physics

6.1 基本信息

- 分类：其它
- 作者：Gabriele C. Hegerl (University of Edinburgh)
- 类型：其它
- 链接：<https://www.nature.com/articles/s43247-022-00342-8.pdf>

6.2 摘要

这篇论文作者为地球科学专家，针对 2021 年诺贝尔物理学奖得主的工作给了一个简短介绍。

2021 年诺贝尔物理学奖⁷授予的其中两人 (Klaus Hasselmann 与 Syukuro Manabe) 为地球气候建模、量化及预测地球暖化、温室效应等做出贡献，从概念解释到利用流体力学预测与观察。这些工作逐渐形成“数字地球”的概念。模拟 (或仿真) 是预测未来的一个有效方法。此次诺贝尔物理学奖的授予也表征气候变迁不再是信念上的选择，而在真正意义上是一个物理上能量均衡的问题。

6.3 创新点与贡献

- 贡献：这篇论文提到气候模型中的时间变化尺度 (variability) 的重要性，短时间的天气 (weather) 变化导致长时间的气候 (climate) 变化。长时间尺度的气候系统中的缓变成分会集成短时间 (天、月) 尺度为年或数十年尺度的变化。Hasselmann 的随机气候模型 (stochastic climate models) 理论甚至能够预测更长时间尺度的气候变化。由于主要致力于对温室效应气体浓度增加的研究，方程组非常复杂，早期的计算机发展稍缓，因此进展较慢。但是，根据此模型的定型结论与现今的数据仍是一致的，如两极比赤道附近的地球暖化明显，陆地比海洋的地球暖化明显等。

⁷2021 年诺贝尔物理学奖由三位科学家分享：一半授予日裔美籍科学家真锅淑郎 (Syukuro Manabe) 和德国科学家克劳斯哈塞尔曼 (Klaus Hasselmann)，另一半授予意大利科学家乔治帕里西 (Giorgio Parisi)，以表彰他们在理解复杂物理系统方面作出的开创性贡献。

进一步验证理论模型的正确性并不是显而易见的, Hasselmann 与 Hans von Storch 等人进一步通过辨别正常天气变化与暖化天气变化的“模式 (pattern)”差异, 并结合基于 inverse covariance matrix of climate variability 的减噪等才获得更准确相关的观测。观测量的其中之一为垂直 (vertical) 观察, 证实对流层暖化 (tropospheric warming) 与平流层冷却 (stratospheric cooling) 效应等。

排除统计学上的涨落, 实验上观测发现气候变迁是统计学上显著的 (statistically significant), 并且人类活动造成的影响越来越显著。“暖化”已经是无疑的 (unequivocal) 结论。

现在典型的气候变化模型主要探讨以下几个面向的问题:

- how the climate system works
- how the climate system varies
- how the climate system evolved over time
- how increases in greenhouse gases may affect the climate system

6.4 其它

古时候的气候 (palaeoclimatic) 模型一般是用来“解释”过去的天气数据。近代的气候模型一般用来理解气候变化 (或改变) 的原因, 并且, 这些原因可能涉及不同时间尺度, 关联大气、海洋、陆地、生物圈、人类活动等。