

电磁辐射与加速器束流动力学笔记

Introduction to Accelerators Beams, Collective Dynamics, Electromagnetic Radiation and Free-electron Lasers

作者：蔡承颖 (Cheng-Ying Tsai, C.-Y. Tsai)

单位：华中科技大学电气学院

时间：2024 年 4 月

版本：v3.5

特别声明

此笔记/讲义非最终版，内容可能存在笔误、谬误，仍在迭代修改中。此讲义不定期更新。

前言

粒子加速器是什么？如果用三句话概括：

1. 用电场加速带电粒子、用磁场导引使带电粒子弯转并控制粒子束团的电磁装置。
2. 从物理上看，一半讨论“粒子”动力学（经典力学），一半则包含“场”动力学（电磁理论）。
3. 从工程上看，粒子加速器是结合电气、机械、控制、光电等领域的跨学科、多学科平台。

这份讲义面向群体：电气专业、以电磁辐射与粒子加速器束动力学为未来选题方向的大二以上本科生或低年级研究生。对应用物理或光电专业的读者或许略显简单，但仍适用。

编写此讲义的初衷：电气专业的读者对于时变电磁场进阶内容接触较少，部分原因由于电磁场作为必修课的课程学时没有得到足够重视（相比于电气学院的其它课程），另外一部分原因则是本校电气学院属于“强电”专业，由于历史发展原因，高频时变电磁场有时被归类为“弱电”专业。因此，对于时变电磁场理论的一个重要应用——电磁辐射——着墨就更少了，涉及到相对论电子运动情况下的电磁辐射更是只字未提。特殊或狭义相对论曾经在一年级大学物理介绍过，但是，在电磁场课程中没有接续作为解释磁场来源的素材进行介绍是令人遗憾的。并且，也忽略了在不同惯性坐标系中的时变电磁场形式与洛伦兹变换的讨论。这些都无形地阻断了电气学院学生接触电磁辐射与粒子加速器课题的契机。粒子加速器作为结合电气、机械、物理等领域的跨学科、多学科平台，在二十一世纪的现在应该值得更多重视。

写在开始前，讲义第零章介绍几个术语、惯例、基础知识与单位制转换。术语主要包含狭义相对论的洛伦兹因子、时空坐标的洛伦兹变换、伴随的时慢、尺缩效应、常用来描述粒子能量的电子伏特单位等。惯例则包含工程与物理领域的虚数单元 i, j 符号，与傅里叶变换的 $2\pi, \sqrt{2\pi}$ 惯例。基础知识给出几种加速器的大致样貌，提供读者一个粗略、模糊的认识。此讲义不涉及关于加速器历史发展的介绍。同样并入第零章介绍的还有时常令人困惑的单位制，特别是国际单位制 (SI, MKS) 与高斯单位制 (Gaussian/CGS) 的转换，包含常用物理常数列表。正式进入正题前，一些高等数学基础的内容包含：三种正交坐标系的向量微积分与坐标变换、常用向量恒等式、微分运算、常用积分公式、恒等式、特殊函数、近似展开公式、级数求和公式等整理为附录内容。这部分作为参考素材，已具备这些基础知识或不感兴趣的读者可以直接跳过，等在后面学习需要时再回头查阅。

这份讲义的正式内容从第一个主题——时变电磁场与电磁辐射理论——开始，不同于多数介绍加速器基础的教科书由介绍带电粒子的经典力学（哈密顿力学）开始。这么做对于缺乏经典力学基础知识的电气专业学生而言，有一些好处：

- 时变电磁场理论接续本科电磁场课程，先从复习既有电磁场知识开始 (Chapter 1)，接着介绍电磁辐射理论 (Chapter 2-5)，属于学生相对熟悉的电磁场知识，可以减少课题陌生感造成的学习困难与抵触情绪。
- 第一部分，即前五章，介绍的电磁辐射理论多为单电子运动产生的辐射，并假设电子运动轨迹是预先给定 (prescribed) 的。下一步便是探讨电子在粒子加速器中的运动如何受外部场支配。由洛伦兹方程开始，将重心由“场”的分析转移至“电子 (粒子)”的分析，就进入这份讲义的第二个主题：束流动力学 (Chapter 6、7、8)。相信对电气专业学生而言，这个转换会比起直接从讨论“电子”的运动 (哈密顿力学) 至电子辐射的“场” (电磁理论) 更自然。这是此讲义的特色之一。尽管做了内容调整的安排，电气专业的读者在初次接触第二个主题时，觉得陌生、困难是极为正常的。对有志于了解或熟悉加速器课题的读者，应该坚持消化这部分介绍的内容。

第二部分粒子动力学的内容，对单粒子 (Chapter 6-8) 效应与多粒子效应的讨论约各占一半 (Chapter 10-12)，Chapter 9 可视为中场休息。在粒子加速器中，许多 — 成万上亿 ($10^4 \sim 10^{10}$) 个 — 电子形成束团 (beam 或 bunch)，束团内粒子间的 (库仑) 场、电磁辐射场与环境交互作用，产生众多丰富多彩的动力学课题，形成多粒子集体效应 (Chapter 10-13)。集体效应是粒子束流动力学的一个分支，也是这份讲义第二部分的主要组成部分。这里注意到，即使是单粒子束流动力学的研究内容也是多姿多彩的，涉及的研究层面与使用工具既多且广。限于作者水平与知识所限，这份讲义对于单粒子动力学的介绍仅包含最基础部分。对集体效应的介绍，我们选择从自由电子激光 (free-electron laser, FEL) 理论开始，算是这份讲义的另一个特色。这么选择的原因一方面是因为描述自由电子激光机制的理论框架相对独立 (self-contained)，并且使用的语言与符号与传统加速器集体效应有些不同。在介绍完自由电子激光理论之后，这份讲义接着介绍经典、标准的集体效应理论，从尾场函数、阻抗函数开始 (Chapter 11)，然后再是粒子动力学，包含宏粒子模型 (Chapter 12) 与连续体分布函数的动力学模型 (Chapter 13)。

最后，这份讲义的第三个主题简短介绍笔者近年感兴趣的三个课题：超快电子成像的电子动力学 (Chapter 14)、相干同步辐射 (Chapter 15)、高亮度电子微束团动力学 (Chapter 16) 等。

综上，此讲义一共包含 17 章，第零章为预备知识，其余 16 章中，第一部分有 5 章，包含时变电磁场基础、同步辐射与波荡器辐射理论；第二部分有 8 章，包含横向与纵向单粒子束流动力学、自由电子激光理论、集体效应的场动力学与束动力学；第三部分有 3 章，分别介绍三个专题。学时所限，一般未必有足够时间覆盖讲义所有内容：

- 对 32 学时、偏电子束动力学的课程，可挑选第六章至第八章内容，其中，第八章关于同步辐射效应的讨论仅需要非常有限的第四章的内容，在讲义 §8.3、§8.4 中已经提及。如讲授时间有余，可选择一部分第十二章至第十三章的内容，其中，尾场

或阻抗函数作为给定的、已知函数即可。

- 对 32 学时、偏辐射场动力学的课程，可挑选第一章至第五章内容。如讲授时间有余，可包含一部分第十一章的内容，介绍如何计算集体效应的尾场函数或阻抗函数。
- 对 64 学时、总论导向的课程，如果学生背景为初学，原则上可包含第一章至第九章内容。如果学生已具备足够电磁学知识，则可考虑跳过第一章，从第二章开始，跳过第十章以外的前三十三章内容。或者，从第二章至第十章。
- 对 64 学时、偏电子束动力学的课程，如果学生已具备足够电磁学知识，则可涵盖第六章至第十三章内容，其中关于同步辐射与波荡器辐射的基础只需要在必要时候简短回顾第四、五章即可。如讲授时间有余，可选择第三部分的部分内容作为进阶素材。

此讲义虽假设初学的读者为电气专业，但对应用物理或光电专业等相关专业的读者仍适用。需要具备的、共同的前置基础知识有：

- 大学物理、微积分；
- 电磁学或电动力学；
- 高等数学 (包含：线性代数、复变函数与积分变换、偏微分方程、特殊函数)。

对电气专业的读者，如果具备自动控制理论、信号与系统、概率论与数理统计等背景知识则更好，相信能够帮助对粒子加速器集体效应的更深刻理解。对物理或光电专业的读者，如果具备量子力学、统计力学、激光原理、固体物理或许能更深入理解电子产生辐射的物理过程。经典力学一般作为物理专业的必修课之一，相信这些对理解此讲义第二部分内容具有较大程度帮助。

关于这份讲义的几个特点：

- 要点以定律、定义、定理、性质形式模块化呈现，尽可能简明地总结，方便复习、查找。定义或定理中的物理量尽量在方格内全部介绍，虽然用到的一些符号可能前面已经定义过而显得啰嗦。但希望这么做能更方便复习、查找。部分定理可能给出证明或思路；如果不在意证明细节，可以略去不看；如果在乎推导细节，将尽量提供参考文献。

定律.

物理定律、基本方程、经验定律或数量级尺度以“定律”呈现



定义.

专有名词首次出现以“定义”呈现



定理.

一些重要结果以“定理”呈现



性质.

一些重要结果伴随的讨论或实用公式整理成“性质”呈现

- 除定义、定理、性质外，有时候不免再啰嗦几句，或是给出一些不属于正文的评语、标注、笔记等，将以散落各处的注、笔记呈现。

注**笔记**

此外，有些段落给出延伸的练习。

**练习 0.1**

- 每章篇幅尽可能符合一个较明确、特定的主题，做到讲义“精、美”。

此讲义各章之间关联程度不一，可通过图 1¹体现。

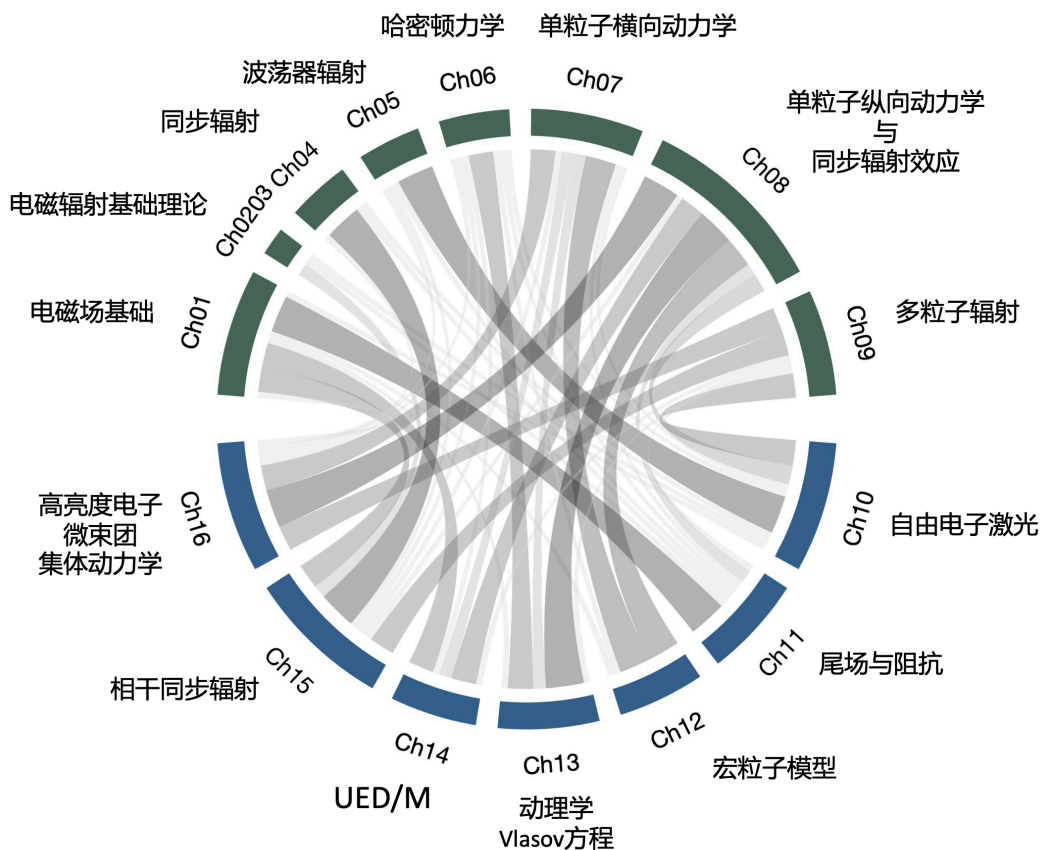


图 1: 此讲义前九章应视为基础章节，主要包含前述第一部分的电磁场理论 (Chapter 1 - Chapter 5) 与第二部分的经典力学前半部 (Chapter 6 - Chapter 9)。后七章则相对进阶，围绕高亮度电子动力学的不同面向展开。

¹此图根据模版修改生成，参考<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/116550-chor-chart>。

既然作为“讲义”，不是百科全书也不是工具书，就不打算也无法“包山包海”²。在这份讲义不够完整的地方，笔者推荐一些目前市面上较经典的几本教科书或讨论特定专题的参考书：

一 电磁理论

- John David Jackson, Classical Electrodynamics, 3rd ed., John Wiley & Sons (1998)
- Julian Schwinger, Lester L. Deraad Jr., Kimball Milton, and Wu-Yang Tsai, Classical Electrodynamics, Perseus Books (1998)
- Charles A. Brau, Modern Problems in Classical Electrodynamics, Oxford University Press (2004)
- Andrew Zangwill, Modern Electrodynamics, Cambridge University Press (2013)
- Richard Feynman, Robert Leighton, and Mathew Sands, The Feynman Lectures on Physics, Volume II, Addison-Wesley Publishing Company (1964). https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html
- Gennady Stupakov and Gregory Penn, Classical Mechanics and Electromagnetism in Accelerator Physics, Springer (2018)

二 加速器物理基础

- Mathew Sands, The Physics of Electron Storage Rings – An Introduction, SLAC-121 (1970). <https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacreports/reports02/slac-r-121.pdf>
- Philip J. Bryant and Kjell Johnsen, The Principles of Circular Accelerators and Storage Rings, Cambridge University Press (1993)
- Alexander Wu Chao, Lectures on Accelerator Physics, World Scientific (2020)
- Alexander Wu Chao, Special Topics in Accelerator Physics, World Scientific (2022)
- Simone Di Mitri, Fundamentals of Particle Accelerator Physics, Springer (2022)
- Shyh-Yuan Lee, Accelerator Physics, 4th ed., World Scientific (2019)
- Helmut Wiedemann, Particle Accelerator Physics, 4th ed., Springer (2015)
- Andrzej Wolski, Beam Dynamics in High Energy Particle Accelerators, Imperial College Press (2014)
- Mario Conte and William M. MacKay, An Introduction to the Physics of Particle Accelerators, 2nd ed., World Scientific (2008)
- Klaus Wille, The Physics of Particle Accelerators, Oxford University Press (2005)
- Donald Edwards and Michael Syphers, An Introduction to the Physics of High Energy Accelerators, John Wiley & Sons (2004)
- James Rosenzweig, Fundamentals of Beam Physics, Oxford University Press (2003)
- Martin Reiser, Theory and Design of Charged Particle Beams, Second, Updated and

²此讲义附录 H 给出 CERN CAS 列举的一般课的课程大纲，此讲义内容大概涵盖 80% 以上内容，作为导论应该足够。

Expanded Edition, Wiley-VCH (2008)

- Rob Appleby, Graeme Burt, James Clarke, and Hywel Owen, The Science and Technology of Particle Accelerators, CRC Press (2021)
- Martin Berz, Kyoko Makino, and Weishi Wan, An Introduction to Beam Physics, CRC Press (2015)
- Alex J. Dragt, Lie Methods for Nonlinear Dynamics with Applications to Accelerator Physics. <https://www.physics.umd.edu/dsat/dsatliemethods.html>
- 金玉明, 电子储存环物理 (修订版), 中国科学技术大学出版社 (2001)

三 同步辐射理论、自由电子激光理论

- Albert Hofmann, The Physics of Synchrotron Radiation, Cambridge University Press (2004)
- Kwang-Je Kim, Zhirong Huang, and Ryan Lindberg, Synchrotron Radiation and Free-Electron Lasers – Principles of Coherent X-Ray Generation, Cambridge University Press (2017). 此书有中文译本: 黄森林、刘克新译, 同步辐射与自由电子激光 – 相干 X 射线产生原理, 北京大学出版社 (2018)
- Peter Schmuser, Martin Dohlus, Jorg Rossbach, and Christopher Behrens, Free-Electron Lasers in the Ultraviolet and X-Ray Regime, 2nd ed., Springer (2014)
- Evgeny L. Saldin, Evgeny A. Schneidmiller, and Mikhail V. Yurkov, The Physics of Free Electron Lasers, Springer (1999)
- Toshiyuki Shiozawa, Classical Relativistic Electrodynamics — Theory of Light Emission and Application to Free Electron Lasers, Springer (2004)
- Henry Freund and Thomas Antonsen Jr., Principles of Free Electron Lasers, 3rd ed., Springer (2018)
- Charles A. Brau, Free-Electron Lasers, Academic Press, Inc. (1990)
- Thomas C. Marshall, Free-Electron Lasers, Macmillan Publishing Company (1985)
- 刘祖平, 同步辐射光源物理引论, 中国科学技术大学出版社 (2009)
- 贾启卡, 自由电子激光物理导论, 科学出版社 (2022)

四 集体效应理论

- Alexander Wu Chao, Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators, John Wiley & Sons (1993). <https://www.slac.stanford.edu/~achao/wileybook.html>
- King-Yuen Ng, Physics of Intensity Dependent Beam Instabilities, World Scientific (2005)
- Bruno W. Zotter and Semyon A. Kheifets, Impedances and Wakes in High-Energy Particle Accelerators, World Scientific (1998)
- Shaikat Khan, Collective Phenomena in Synchrotron Radiation Sources: Prediction, Diagnostics, Countermeasures, Springer (2006)

- J.C. Bergstrom, Jack's Book – On Beam Instabilities and Other Things (2016)

五 束流量测与诊断

- Michiko G. Minty and Frank Zimmermann, Measurement and Control of Charged Particle Beams, Springer (2003)
- Peter Strehl, Beam Instrumentation and Diagnostics, Springer (2006)

六 工具书

- Alexander Wu Chao, Karl Hubert Mess, Maury Tigner, and Frank Zimmermann ed., Handbook of Accelerator Physics and Engineering, 3rd. ed., World Scientific (2023)
- Graham Woan, The Cambridge Handbook of Physics Formulas, Cambridge University Press (2000)

七 高等数学基础

- Jon Mathews and R.L. Walker, Mathematical Methods of Physics, Addison-Wesley (1970)
- George B. Arfken, Hans J. Weber, and Frank E. Harris, Mathematical Methods for Physicists, 7th ed., Elsevier (2013)
- Philip M. Morse and Herman Feshbach, Methods of Theoretical Physics, McGraw-Hill Book Company, Inc. (1953)

此外，在几乎万能的网际网路世界也能找到许多关于粒子加速器的许多的素材，包含科普、教学、综述、科研类的文献。以下列举一些推荐网页：

- 科普：粒子加速器对人类社会在方方面面的应用 \Rightarrow <http://www.accelerators-for-society.org/> 里面有许多关于粒子加速器的科普介绍，包含科学、环境、能源、国防安全、工业、医学等面向。
- 教学：CERN Yellow Report \Rightarrow <https://cds.cern.ch/collection/CERN%20Yellow%20Reports?ln=en> 包含许多珍贵的、媲美教科书的加速器基础教程。
- 教学：美国粒子加速器学校 (U.S. Particle Accelerator School, USPAS) \Rightarrow <https://uspas.fnal.gov/> 里面有最新办学信息，还有许多过去加速器学校的上课讲义、材料等。此外，早期由美国物理联合会 (American Institute of Physics, AIP) 出版的会议记录文集中，有几卷包含了丰富、珍贵的加速器会议记录，其中许多是长篇教程、前沿综述等：
 - No. 57: Nonlinear Dynamics and the Beam-Beam Interaction (BNL, 1979). <https://pubs.aip.org/aip/acp/issue/57/1>
 - No. 87: The Physics of High Energy Particle Accelerators (Fermilab, 1981). <https://pubs.aip.org/aip/acp/issue/87/1>
 - No. 105: The Physics of High Energy Particle Accelerators (SLAC, 1982). <https://pubs.aip.org/aip/acp/issue/105/1>

- No. 127: The Physics of Particle Accelerators (BNL/SUNY, 1983). <https://pubs.aip.org/aip/acp/issue/127/1>
- No. 153: The Physics of Particle Accelerators (Fermilab, 1984 & SLAC, 1985). <https://pubs.aip.org/aip/acp/issue/153/1>
- No. 184: The Physics of Particle Accelerators (Fermilab, 1987 & Ithaca, N.Y. 1988). <https://pubs.aip.org/aip/acp/issue/184/1>
- No. 249: The Physics of Particle Accelerators (Upton, N.Y. 1989). <https://pubs.aip.org/aip/acp/issue/249/1>
- High Quality Beams — Joint US-CERN-JAPAN-RUSSIA Accelerator School, AIP Publishers, 2001. <https://pubs.aip.org/aip/acp/issue/592/1>

Springer 也出版了一些关于粒子束讲义：

- Lecture Notes in Physics No. 247: Nonlinear Dynamics Aspects of Particle Accelerators, Springer-Verlag Publishers, 1985.
- Lecture Notes in Physics No. 296, Springer-Verlag Publishers, 1986. <https://link.springer.com/book/10.1007/BFb0031487>
- Lecture Notes in Physics No. 343, Springer-Verlag Publishers, 1988. <https://link.springer.com/book/10.1007/BFb0018278>
- Lecture Notes in Physics No. 400, Springer-Verlag Publishers, 1990. <https://link.springer.com/book/10.1007/3-540-55250-2>
- Lecture Notes in Physics No. 425, Springer-Verlag Publishers, 1992. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-13972-1>

自由电子激光理论早期进展的一些文献 — PQE³ — 也具有借鉴意义：

- Physics of Quantum Electronics, Vol. 5: Novel Sources of Coherent Radiation, Addison-Wesley, 1978.
 - Physics of Quantum Electronics, Vol. 7: Free-Electron Generators of Coherent Radiation, Addison-Wesley, 1979.
 - Physics of Quantum Electronics, Vol. 8: Free-Electron Generators of Coherent Radiation, Addison-Wesley, 1981.
 - Physics of Quantum Electronics, Vol. 9: Free-Electron Generators of Coherent Radiation, Addison-Wesley, 1981.
-
- 科研：物理评论 – 加速器与束物理 (Physical Review Accelerators and Beams, PRAB)
⇒ <https://journals.aps.org/prab/> 一个业内高度认可、标准的加速器物理与工程期刊。
 - 科研：核仪器与方法 (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, NIM)
⇒ <https://www.sciencedirect.com/journal/nuclear-instruments-and-methods-in-physics-research-section-a-accelerators-spectrometers-detectors>

³<https://www.pqeconference.com/pqe-history>

tors-and-associated-equipment 也是一个业内标准的加速器期刊, 包含探测器与核技术应用等。

- 科研: 联合加速器会议网 (Joint Accelerator Conferences Website, JACoW) \Rightarrow <https://www.jacow.org/> 收录许多过去举办的国际加速器会议与会议论文, 也有即将举办的会议信息。
- 综述: 2008 年至 2019 年间, 由 World Scientific 出版的年刊“加速器科学与技术回顾” (Reviews of Accelerator Science and Technology, RAST) <https://www.worldscientific.com/worldscinet/rast> 按十个主题收录了加速器各领域目前最新进展, 具有借鉴意义。

1. Alexander Wu Chao and Weiren Chou ed., Reviews of Accelerator Science and Technology – Vol. 1: Overview, World Scientific (2008) 总览
2. Alexander Wu Chao and Weiren Chou ed., Reviews of Accelerator Science and Technology – Vol. 2: Medical Applications of Accelerators, World Scientific (2009) 医疗应用
3. Alexander Wu Chao and Weiren Chou ed., Reviews of Accelerator Science and Technology – Vol. 3: Accelerators as Photon Sources, World Scientific (2010) 先进光源
4. Alexander Wu Chao and Weiren Chou ed., Reviews of Accelerator Science and Technology – Vol. 4: Accelerator Applications in Industry and the Environment, World Scientific (2011) 工业与环境应用
5. Alexander Wu Chao and Weiren Chou ed., Reviews of Accelerator Science and Technology – Vol. 5: Applications of Superconducting Technology to Accelerators, World Scientific (2012) 超导技术
6. Alexander Wu Chao and Weiren Chou ed., Reviews of Accelerator Science and Technology – Vol. 6: Accelerators for High Intensity Beams, World Scientific (2013) 强流加速器
7. Alexander Wu Chao and Weiren Chou ed., Reviews of Accelerator Science and Technology – Vol. 7: Colliders, World Scientific (2014) 对撞机
8. Alexander Wu Chao and Weiren Chou ed., Reviews of Accelerator Science and Technology – Vol. 8: Accelerator Applications in Energy and Security, World Scientific (2015) 能源与国家安全应用
9. Alexander Wu Chao and Weiren Chou ed., Reviews of Accelerator Science and Technology – Vol. 9: Technology and Applications of Advanced Accelerator Concepts, World Scientific (2016) 先进加速器技术与应用
10. Alexander Wu Chao and Weiren Chou ed., Reviews of Accelerator Science and Technology – Vol. 10: The Future of Accelerators, World Scientific (2019) 加速器的未来

限于作者知之甚少, 这份讲义仅简单介绍了电磁辐射理论与加速器理论的基础内容,

讨论的对象也主要限于容易辐射电磁场的电子。虽然有些讨论同样适用于质子或重离子,但是质子不太容易辐射的这个特点导致的一些特殊的束流动力学现象将不在这份讲义目前包含的范围。

无论在科研或教学上,限于学识与经验,讲义里难免存在错误或不妥处,欢迎所有对此讲义任何带有建设性的意见通过我以下的电邮给我指正。最后,讲义基于Elegant \LaTeX 的ElegantBook模板,经过部分修改后编辑而成。

蔡承颖

jcytsai@hust.edu.cn

2024年3月于武汉

目录

0	几个术语、惯例、基础知识与单位制转换	1
0.1	几个术语	3
0.2	惯例	8
0.2.1	$j = -i$	8
0.2.2	$2\pi, \sqrt{2\pi}$	8
0.2.3	$q, e, -e, e^{(\cdots)}$	13
0.3	基础知识	14
0.4	单位、量纲、物理常数	17
0.5	单位制转换	19
0.6	基础高等数学练习题	26
	第零章 补充习题	27
第一部分	时变电磁场、电磁辐射理论	30
1	电磁场基础：复习	31
1.1	基本方程	31
1.1.1	静电场基本方程	36
1.1.2	恒定电场基本方程	39
1.1.3	静磁场或恒定磁场基本方程	40
1.1.4	电磁场分界面边界条件	42
1.2	无源电磁场方程	44
1.3	趋肤效应	46
1.4	位函数	50
1.5	电磁场能量守恒定律	54
1.6	求解电磁波方程：思路	59
1.7	求解电磁波方程：波动问题	60
1.8	求解电磁波方程：波形问题	61
1.9	电磁波定向传播的几个类型	65
1.10	波速	68
1.11	电磁波的偏振：极化 (polarization)	69
1.11.1	在 X 射线波段，物质折射率小于、但非常接近 1	73
1.12	波导	74
1.12.1	波导的激励	86
1.13	谐振腔	87
1.13.1	真实谐振腔形状	95

1.14	金属加速结构的梯度极限：击穿	96
1.15	Slater 定理	98
1.16	四向量的洛伦兹变换	101
1.17	电、磁场的洛伦兹变换	103
1.18	相对论多普勒效应	104
1.19	康普顿散射	105
1.19.1	逆康普顿散射	106
1.19.2	激光与电子交互作用：定性介绍	106
1.19.3	激光波荡器	107
1.20	镜像法求解电磁场问题	108
1.20.1	镜像电荷法	109
1.20.2	镜像电流法	112
1.21	电磁超材料	114
1.21.1	如何构造超材料？	116
1.22	定向电磁波的高斯束模型	119
1.23	浅谈：为什么 Maxwell 电磁理论这么难？	125
	第一章 补充习题	127
2	电磁辐射的基础理论	133
2.1	推迟条件	133
2.2	Lienard-Wiechert 场	135
2.2.1	粒子匀速运动产生的场 $\dot{\beta} = 0$ 、 $\mathbf{E}(t) \parallel \mathbf{r}_b$	138
2.3	Jefimenko 公式与 Heaviside-Feynman 公式	141
3	电磁辐射的定量理论：功率、能量、谱	143
3.1	Lienard-Wiechert 场的频域表示	143
3.1.1	关于 Lienard-Wiechert 场的几点讨论	143
3.1.2	相对论粒子加速运动产生的场的一般结果	144
3.2	辐射功率、辐射能量、角分布	147
3.3	横向、纵向加速	152
3.3.1	横向加速	152
3.3.2	偶极辐射	154
3.3.3	纵向加速	156
3.4	电子加速器的几种电磁辐射机制：定性介绍	158
3.4.1	契伦科夫辐射 (Cherenkov radiation)	159
3.4.2	渡越辐射 (transition radiation)	160
3.4.3	Smith-Purcell 辐射	161
	第三章 补充习题	164

4 同步辐射	165
4.1 同步辐射的定性讨论	166
4.1.1 同步辐射张角 $\theta \approx \frac{1}{\gamma}$	166
4.1.2 同步辐射特征频率 $\omega_c \approx \frac{3c\gamma^3}{2\rho}$	167
4.1.3 同步辐射由横向水平极化主导 $P_\sigma : P_\pi \approx 7 : 1$	169
4.1.4 同步辐射是量子力学效应, 不是经典力学效应	169
4.2 同步辐射的定量讨论	171
4.3 一些计算细节	172
4.4 一些辐射物理量的分布函数	178
4.4.1 同步辐射功率 <u>频谱</u> <u>角</u> 分布	178
4.4.2 同步辐射功率 <u>频谱</u> 分布	180
4.4.3 同步辐射功率 <u>角</u> 分布	181
4.4.4 同步辐射 <u>偏振</u> 或 <u>极化</u> 分布	181
4.4.5 同步辐射 <u>光量子</u> 分布	183
4.4.6 讨论: 中心极限定理	184
4.5 辐射形成长度 (formation length)	186
4.6 整理: 同步辐射实用公式	189
第 四 章 补充习题	191
5 波荡器辐射	193
5.1 四代光源大致进展	194
5.2 波荡器辐射的定性讨论	194
5.2.1 共振条件 $\lambda_1 = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K_u^2}{2} + \gamma^2 \theta^2\right)$	195
5.2.2 波荡器辐射像甩动的探照灯, 谱宽 $\frac{\Delta\omega}{\omega_1} \approx \frac{1}{N_u}$	199
5.2.3 平面型波荡器是线偏振主导	200
5.3 波荡器辐射的定量讨论	201
5.4 一些辐射物理量的分布函数	203
5.4.1 $K_u \leq 1$ 波荡器辐射功率 <u>频谱</u> <u>角</u> 分布	204
5.4.2 $K_u \leq 1$ 波荡器辐射功率 <u>角</u> 分布	205
5.4.3 $K_u \leq 1$ 波荡器辐射功率 <u>频谱</u> 分布	207
5.4.4 $K_u \leq 1$ 波荡器辐射功率 <u>光量子</u> 分布	207
5.4.5 $K_u \geq 1$ 波荡器辐射分析的两个区别	210
5.4.6 $K_u \geq 1$ 波荡器辐射功率 <u>频谱</u> <u>角</u> 分布、 <u>频谱</u> 分布、 <u>光量子</u> 分布	210
5.5 整理: 波荡器辐射实用公式	215
第 五 章 补充习题	218

第二部分 束流动力学、集体效应	220
6 粒子加速器基础：综述与哈密顿力学基础	221
6.1 经典力学理论：拉格朗日量、哈密顿量	221
6.2 相空间与 Liouville 定理	225
6.3 正则变换	229
6.3.1 作用量-角度变换	235
6.4 磁刚度 $B\rho$ 与 Frenet-Serret 坐标系	238
6.4.1 Frenet-Serret 坐标系向量运算	241
6.5 加速器哈密顿量	242
第六章 补充习题	245
7 粒子加速器基础：束流光学 — 横向	247
7.1 几种常见的磁铁部件	248
7.1.1 真空漂移段	249
7.1.2 二极铁	249
7.1.3 四极铁	250
7.1.4 六极铁	253
7.1.5 螺线管	258
7.1.6 磁铁的磁场强度极限：饱和、磁滞	262
7.2 Hill 方程	264
7.3 Courant-Snyder 参量、Twiss 参量	271
7.4 传输矩阵概念初探	279
7.4.1 浅谈：光学的 ABCD 传输矩阵	284
7.5 发射度：一个加速器中重要的物理量	287
7.6 几种常见的磁聚焦结构单元	295
7.7 非参考粒子的几种效应的分类	298
7.8 传输矩阵 — Case 1	301
7.9 闭轨畸变、共振 — Case 2	311
7.10 色散、色品 — Case 3	323
7.11 一个用来衡量储存环横向磁聚焦结构设计的物理量：动力学孔径	337
第七章 补充习题	342
8 电子纵向动力学与同步辐射效应	347
8.1 几个描述粒子纵向运动的物理量	348
8.1.1 讨论： z, s, ct 与束团头部尾部粒子符号惯例	359
8.2 同步加速器稳相原理与纵向动力学	359
8.2.1 高次谐波腔、双 RF 系统	378
8.3 同步辐射经典效应：辐射阻尼	382

8.3.1	纵向	384
8.3.2	横向: y	387
8.3.3	横向: x	389
8.3.4	讨论: 阻尼是一种束团冷却效应	398
8.4	同步辐射量子效应	400
8.4.1	纵向	401
8.4.2	横向: x	404
8.4.3	横向: y	405
8.4.4	讨论: 量子激发效应的另一种分析方式	411
8.5	波荡器、扭摆器辐射的效应	412
8.6	加速器中的粒子如何加速	413
8.6.1	直线加速器	413
8.6.2	环形同步加速器	418
8.6.3	能量回收型直线加速器	420
8.6.4	加速元件的简化传输矩阵表示	423
8.6.5	浅谈: 从直线加速器到同步加速器的注入与引出	423
8.7	整理: 常见磁铁部件的六维线性传输矩阵	425
8.7.1	浅谈: 光学的 Kostenbauder 传输矩阵	430
8.8	一个电子储存环自然发射度的定标定律	433
8.9	电子同步辐射加速器进展	436
第八章 补充习题		439
9	多粒子电磁辐射	444
9.1	线性叠加原理与形成因子	444
9.1.1	纵向	444
9.1.2	横向	446
9.1.3	相干辐射谱	447
9.2	同步辐射脉冲形成长度	448
9.2.1	纵向	449
9.2.2	横向	449
9.3	电子束与多粒子电磁辐射束的物理图像	450
10	自由电子激光理论	453
10.1	激光原理	453
10.2	自由电子辐射: 不同波段可调谐辐射源	458
10.2.1	自由电子激光 vs. 相干波荡器辐射	470
10.2.2	辐射产生的另一种视角: 能量、动量守恒	471
10.3	三种工作模式与几个重要输出指标	473
10.4	低增益 FEL	479

10.5 高增益 FEL: 一维	488
10.6 回顾: 三种工作模式	493
10.6.1 SASE	493
10.6.2 FEL 放大器	496
10.6.3 FEL 振荡器	496
10.7 高增益 FEL: 三维	499
10.8 高增益 FEL 谐波产生与全相干方案	506
第十章 补充习题	522
11 集体效应的场动力学: 尾场与阻抗	524
11.1 定性介绍	525
11.1.1 平均场近似	525
11.1.2 微扰理论	526
11.1.3 追赶长度	529
11.1.4 “三无”定理	531
11.2 空间电荷场	532
11.2.1 束内散射效应与 Touschek 效应	539
11.3 有限电导率圆柱金属真空管的电磁场计算	545
11.3.1 电阻壁阻抗尾场计算的实用公式	551
11.3.2 浅谈: 金属管壁的电导率、反常趋肤效应与表面阻抗	552
11.3.3 浅谈: 同步加速器的金属真空管样貌	560
11.4 圆柱谐振腔的电磁场计算	560
11.5 尾场	567
11.5.1 基本定义	567
11.5.2 特性	572
11.6 阻抗	573
11.6.1 基本定义	573
11.6.2 同步条件	575
11.6.3 Panofsky-Wenzel 定理	576
11.6.4 特性	580
11.7 尾场与阻抗公式	584
11.7.1 一个近似、有用的集总化模型 — 等效 RLC 模型	584
11.7.2 类腔结构的阻抗估算	589
11.7.3 几何光学近似分析	600
11.7.4 尾场与阻抗模型公式	600
11.7.5 能量损耗因子	621
11.7.6 有效阻抗	625
11.8 关于宽带阻抗模型的更多讨论	627

11.9 关于尾场定义的更多讨论	630
第十一章 补充习题	632
12 集体效应的粒子动力学：宏粒子模型	636
12.1 粒子加速器集体不稳定性年代表	636
12.2 束流负载基本定理	637
12.3 几种常见的束团不稳定性	639
12.3.1 束团崩溃不稳定性	639
12.3.2 罗宾逊不稳定性	642
12.3.3 强头尾不稳定性	653
12.3.4 头尾不稳定性	657
12.3.5 讨论	662
第十二章 补充习题	663
13 集体效应的粒子动力学：Vlasov 方程	664
13.1 无碰撞动理学方程	664
13.2 线性化 Vlasov 方程：零阶分析	671
13.3 线性化 Vlasov 方程：一阶分析	678
13.4 积分方程：思路一	678
13.4.1 单次经过加速器微束团不稳定性	681
13.5 色散方程：思路二	684
13.5.1 储存环微束团不稳定性	687
13.6 模式分解：思路三	688
13.6.1 微波不稳定性	691
13.7 三种思路的比较	694
13.8 几种常见的束团不稳定性：分类与半定量讨论	695
13.8.1 势阱畸变效应	697
13.8.2 微波不稳定性	697
13.8.3 基于相空间模式分解的讨论	699
13.8.4 头尾不稳定性	701
13.8.5 耦合束团不稳定性	703
13.8.6 电阻壁不稳定性	706
13.8.7 离子导致的集体不稳定性	708
第十三章 补充习题	709
第三部分 三个专题	712
14 专题讨论：兆伏、超快电子束动力学	713
14.1 泵浦-探测：一种研究物质结构的技巧	713

14.2 超快电子成像平台概述	714
14.2.1 总论	714
14.2.2 兆伏超快电子衍射: 总论	721
14.3 MeV UED 组成单元	722
14.3.1 MeV UED 束线	722
14.3.2 激光系统	724
14.3.3 射频系统: 光阴极电子枪、加速腔	725
14.3.4 传输段	730
14.3.5 束测元件	731
14.3.6 样品室	736
14.3.7 衍射成像系统	737
14.4 MeV UED 总体设计参数	738
14.4.1 激光系统	738
14.4.2 束流动力学: 初始主体物理参数与仿真结果	743
14.4.3 射频光阴极电子枪附近的发射度增长因素与估算	746
14.5 高亮度电子空间电荷效应动力学	748
14.5.1 RF 腔传输矩阵	752
14.5.2 空间电荷传输矩阵 $\Rightarrow 7 \times 7$ 空间电荷传输矩阵	753
14.5.3 整体束团与切片束团的分与合	755
14.6 横向、纵向空间电荷束包络方程	757
14.7 Kapchinsky-Vladimirsky (KV) 分布	760
14.8 空间电荷效应主宰的束动力学与几个定标定律	765
第十四章 补充习题	769
15 专题讨论: 相干同步辐射	770
15.1 定性描述	771
15.1.1 “场”观点	771
15.1.2 “粒子”观点	772
15.2 一维模型	775
15.2.1 Case A	778
15.2.2 Case B	781
15.2.3 Case C	784
15.2.4 Case D	786
15.2.5 一维稳态与暂态 CSR 尾场	788
15.3 数值算例	790
15.4 一维模型的几个结果	791
15.4.1 讨论: 辐射阻抗函数的一种计算方法	802
15.5 研究现状总论	803

15.6 二维 CSR 模型研究动机与现况	807
16 专题讨论：高亮度电子微束团动力学	810
16.1 高亮度电子束：双面刃	810
16.2 单次经过加速器的微束团不稳定性理论	811
16.2.1 比拟：一种“速调管”放大器	811
16.2.2 积分方程	812
16.2.3 四弯铁磁压缩结构的微束团不稳定性	819
16.2.4 研究现状总论	826
16.3 储存环微束团不稳定性理论	830
16.3.1 两种观点	832
16.3.2 色散方程	833
16.3.3 特征方程	836
16.3.4 数值求解 Vlasov-Fokker-Planck 方程	837
16.3.5 研究现状总论	839
16.4 稳态微聚束：一种崭新的电子储存环高平均功率、相干辐射源	839
16.4.1 总论	840
16.4.2 两类可能的方案与工作原理	843
16.4.3 激光-电子束交互作用	844
16.4.4 研究现状总论	847
16.4.5 浅谈：面向极紫外光刻应用的相干光源	848
 第四部分 附录	 854
A 杨振宁先生对加速器领域的看法	855
B 数学基础	857
B.1 三种正交坐标系的向量微积分与坐标变换	857
B.2 常用向量恒等式、微分运算	861
B.3 偏微分、全微分、对流导数、莱布尼兹法则	865
B.4 δ 函数、留数定理、常用积分公式、三角函数恒等式、双曲函数恒等式	867
B.5 其它恒等式、特殊函数、近似展开公式、级数求和公式	878
B.6 几种常见分布函数的定义	899
B.7 矩阵特征分解的实用特性	900
B.8 归一化完备基底函数展开特性	902
B.9 一元代数方程的一般解公式	905
B.10 时间平均定理	906
B.11 矩阵指数	906

C	目前正在设计、建设或运行的电子加速器参数	909
C.1	直线加速器	909
C.2	常温、光阴极、射频电子枪的典型参数	910
C.3	自由电子激光	911
C.4	同步辐射储存环	912
C.5	能量循环/回收直线加速器	915
C.6	对撞机	916
D	电磁频谱	918
E	Livingston 图	919
F	粒子加速器对人类社会在方方面面的应用	920
G	A-Z、希腊符号用多少?	924
H	部分教科书使用惯例比较	926
I	CERN 加速器学校课程大纲	928
J	加速器学家小传	944
J.1	Helmut Wiedemann — 温文儒雅、受崇敬的加速器专家	944
J.2	Shyh-Yuan Lee — 加速器人才树木园	946
J.3	Klaus Halbach — 世界级加速器磁铁专家	947
J.4	Rodolfo Bonifacio — 经典与量子自由电子激光先驱	948
J.5	Kaoru Yokoya — 直线加速的成功道路	950
J.6	Kwang-Je Kim — 细推物理须行乐, 何用浮名绊此生	951
J.7	John Madey — 第一位实现自由电子激光器的科学家	952
J.8	Claudio Pellegrini — 高增益自由电子激光不稳定性	953
J.9	Albert Josef Hofmann — 同步辐射理论大师	954
J.10	John Paul Blewett — 几乎为首位见证同步辐射的人之一	955
J.11	Alexander Wu Chao — 加速器百科全书	957
J.12	Kenneth Robinson — 谦逊孤独, 卓越天才	958
J.13	Yaroslav Derbenev — 西伯利亚蛇	959
J.14	Ernest Orlando Lawrence — 回旋加速器的发明者	960
J.15	Ernest David Courant — 虎父无犬子、横向强聚焦发明者	961
J.16	Hartland Sweet Snyder — 横向强聚焦发明者、黑洞共同发现者	962
J.17	Milton Stanley Livingston — 横向强聚焦发明者、Livingston 图	963
J.18	Edwin McMillan — 纵向稳相原理提出者	964
J.19	Wolfgang Panofsky — SLAC 首任主任	965
J.20	Robert Wilson — 费米实验室首任主任	966

J.21	Gersh Budker — “相对论”的工程师	967
J.22	Bruno Touschek — 世界上第一台对撞机 AdA 建造者	968
J.23	Matthew Sands — 费曼物理学讲义、SLAC-121	970
J.24	Simon van der Meer — 随机冷却机制的发明者	971
J.25	Nikolay Vinokurov — “OK”	972
J.26	方守贤 — 中国高能加速器事业的开拓者和奠基人	973
J.27	谢明 — 深刻的学识与 19 个拟合系数造就经典公式	974

索引

- 2×2 transfer matrix
 - elements, 302
 - elements, cavity, 423
 - stability, 306
- $2\pi, \sqrt{2\pi}$ convention, 9
- 6×6 transfer matrix
 - elements, 425
- δ function, 867
- \mathcal{H} function, 333
- i, j convention, 8
- $[\mathbf{J}\mathbf{J}]_h$ factor, 217
- ABCD matrix, 284
- accelerator Hamiltonian \mathcal{H} , 243
- action-angle transform, 235, 322
- adiabatic damping, 290
- Airy function, 879, 884
- Alfven current, 679
- alternating-gradient focusing, 266
- anomalous dispersion, 68
- anomalous skin effect, 48, 550, 557
- BBGKY hierarchy, 228
- beam breakup instability, 695
- beam breakup, BBU, 640
- beam matrix Σ , 290
- beam rigidity $B\rho$, 238
- beam rigidity $E^a\rho$, 239
- Beer-Lambert law, 556
- Bessel function, 868, 879, 880, 903
- betatron resonance, 320
- Beth representation, 256
- BNS damping, 641
- booster synchrotron, 418
- Boussard criterion, 686
- breakdown rate (BDR), RF, 97
- brightness, 433
- collider, 524
- electron beam, 4D, 719
- electron beam, 5D, 717
- radiation, 459
- broadband-narrowband substitution, 677
- bunch compression factor, 357
- bunching factor
 - complete random phase, 496
 - definition, 1-D, 445
 - definition, 1-D continuum, 680, 814
 - definition, 1-D, ensemble average, 488
 - definition, 3-D, 446
- Campbell theorem, 401
- canonical transformation
 - generating functions, 230
- Cardano formula, 905
- Carlson's elliptic integral, 753
- catch-up distance, 530, 630
- Cauchy principal value, 871
- Cauchy's integral formula, 870
- Cauchy-Riemann condition, 257
- cavity
 - circular cylindrical modes, 90
 - Landau cavity, 378, 543, 544
 - pillbox cavity TM_{010} , 93
 - quality factor Q , 91
 - rectangular modes, 88
 - RF breakdown, 96
 - shunt impedance R_S , 92
 - Slater theorem, 98
 - TE, TM, E, H mode definition, 65
- Cayley-Hamilton theorem, 901
- central limit theorem, CLT, 185, 215
- Chao-Gareyte scaling law, 698
- Cherenkov radiation, 159
- chicane, 359

- CSR-induced microbunching gain formula,
 - 822
 - optics, 819
- Cholesky decomposition, 756
- chromatic frequency ω_ξ , 627
- chromatic frequency ω_ξ , 333, 658
- chromaticity ξ , 328
 - different conventions, 328
- classical radius of electron, 154
- closed orbit distortion, COD, 311
- coasting beam, 336, 679, 697, 813
 - unbunched beam, 372
- coherence
 - longitudinal, 462
 - transverse, 463
- coherent synchrotron radiation (CSR)
 - Case A, 778
 - Case B, 780
 - Case C, 784
 - Case D, 786
 - CSR-induced microbunching gain formula,
 - chicane, 822
 - CSR-induced microbunching gain formula,
 - general, 824
 - definition, wake function, 777
 - overtaking distance, 790
 - parallel-plate impedance, 795
 - point-kick model, 800
 - slippage distance, 790
 - steady-state impedance, 791
 - steady-state wakefield, 788
- collective effects
 - beam breakup, BBU, 640
 - CSR, 796
 - definition, 527
 - dispersion equation, coasting beam, 684, 833
 - fast beam-ion instability, 708
 - fundamental theorem of beam loading, 638
 - Haissinski equation, 674
 - head-tail instability, 661
 - ion trapping instability, 708
 - kick factor κ_\perp , 623
 - Landau damping, 818
 - longitudinal mode coupling instability, 691
 - loss factor κ_\parallel , 623
 - microbunching instability, 817
 - microwave instability, 691
 - negative mass instability, 697
 - potential well distortion, PWD, 673
 - resistive wall instability, 706
 - Robinson instability, 646
 - Sacherer integral equation, 690
 - space charge
 - beam dynamics, 748
 - field dynamics, 532
 - strong head-tail instability, 655
 - transverse microwave instability, 655
 - transverse mode coupling instability, TMCI, 655
 - turbulent instability, 690
 - Volterra integral equation, 680
- compression factor, 357
- Compton scattering effect, 105
 - inverse, 106
- conductivity, AC, 47, 552
- conductivity, DC, 47, 552
- configuration space (x, y) , 243
- confluent hypergeometric function, 887
- Constants, 19
- constitutive relation $\mathbf{D}(\mathbf{E}), \mathbf{H}(\mathbf{B})$, 33
 - CGS units, 127
- convention
 - $2\pi, \sqrt{2\pi}$, 9
 - i, j , 8
 - k, Γ , 8

- z, s, ct and bunch head vs. tail, 359
- capacitive, inductive, 574
- convolution theorem (faltung theorem), 11
 - Z-transform, 651
- Cornu spiral, 596, 872
- correlation function
 - auto-correlation, 462
 - convolution, 464
 - cross-correlation, 464
- cosine integral, 872
- Coulomb field, 533
- Coulomb gauge, 52
- coupled bunch instability, 591, 627, 662, 695
- Courant-Snyder parameters, 272
- critical angle, 72
- cyclotron frequency ω_c , 261
- Darwin width, 508
- Dawson function, 874
- de Moivre theorem, 282
- Debye length
 - longitudinal, 533
 - transverse, 533
- delta function, 867
- Derbenev criterion, 790
- diamagnetic $\mu_r < 1$, 33
- diffusion, 186
 - anomalous diffusion, 186
 - sub-diffusion, 186
 - super-diffusion, 186
- dipole radiation, 154
- dispersion equation
 - 1-D high-gain FEL, 489
 - microbunching instability, 684
 - Robinson instability, 652
- dispersion function D, η, R_{16} , 323
 - comparison, 334
- distribution
 - δ -function, 899
 - bi-Lorentz, 899
 - elliptical, 899
 - Gaussian, 899
 - Lorentz, 899
 - normal, 899
 - parabolic, 899
 - rectangular, 899
 - tri-elliptical, 899
 - triangular, 899
 - water-bag, 899
- distribution width $\Delta\omega$, 900
- Doppler effect, 104, 166
- Drude model, 47, 552
- Drude-Lorentz model, 552
- dynamic aperture, 337, 705
- Earnshaw's theorem, 348, 371
- effective impedance, 625
- elliptic functions, 891
- elliptic integrals, 887
- elliptic theta function $\vartheta_3(u, q)$, 706
- emittance
 - beam, 288
 - coupling κ , 407
 - geometric ϵ , 289
 - longitudinal, 376
 - natural ϵ , 289
 - normalized ϵ_N , 289
 - photon, 450
 - single-particle, 279
 - statistical definition, continuous distribution, 291
 - statistical definition, discrete distribution, 292
- emittance compensation, 748
- energy acceptance, 339, 372, 543, 544
- energy recovery linac, ERL, 420
- energy spread
 - correlated, bulk, 355

- incoherent, uncorrelated, slice, 355
- ensemble, 225
- ergodic hypothesis, 288
- error function, 874
 - complementary, 874
 - complex, 874
 - imaginary, 874
- Euler-Lagrange equation, 224
- exponential integral, 872
- extraction, 423
- factorial function, 896
 - double, 896
- Faddeeva function, 874
- faltung theorem, 11
- fast beam-ion instability, 708
- fast head-tail instability, 695
- FEL parameter, 478
- Fermi velocity, 556
- ferromagnetic $\mu_r \gg 1$, 33
- Feynman diagram, synchrotron radiation, 170
- Feynman's integration trick, 866
- Feynman-Heaviside formula, 142
- first recurrence map, 279
- fixed point, 367
 - attractor, repellor, 367
 - SFP, UFP, 367
- Floquet transformation, 267
- Fourier transform
 - convolution theorem, 11
 - definition, 9
 - Parseval theorem, 10, 148
 - sine transform, cosine transform, 10
- Fraunhofer diffraction, 595
- free-electron laser (FEL)
 - 1-D ($2N + 1$) equations, 477
 - 1-D high-gain, 489
 - 3-D high-gain, guiding effect, 500
 - ADM, 518
 - amplifier, 496
 - DEHG, 519
 - EEHG, 512
 - HGHG, 511
 - inverse FEL, 467
 - low-gain pendulum equation, 480
 - Madey theorem, 485
 - Ming Xie fitting formula, 505
 - oscillator, FEL, 496
 - PEHG, 515
 - Pierce parameter, 478
 - SASE, 493
 - self-seeding, 507
 - sideband instability, 495
- Frenet-Serret coordinate
 - calculus, 241
 - definition, 240
 - left-hand vs. right-hand, 244
- frequency map analysis, 339
- Fresnel diffraction, 595
- Fresnel integrals, 596, 872
- fundamental theorem of beam loading, 638
- gain guiding, 500
- Gamma function, 884
- Gauss divergence theorem, 861
- ghost imaging, 464
- globatron, 239
- Goos-Hanchen effect, 72
- Gouy phase, 124, 188, 273
- Gram-Schmidt process, 67
- Green's theorem, 862
- H function, 333
- Haissinski integral equation, 674
- Halback formula, 197
- Hamilton's equations of motion, 224
- Hamiltonian \mathcal{H}
 - definition, 224

- integrable, 322, 366
- KAM theorem, 322
- quasi-integrable, 322
- torus, tori, 237, 366
- harmonic cavity, 378, 543, 544
- harmonic number h , 368
- head-tail instability, 661, 695
- Heaviside step function, 884
- Heaviside-Feynman formula, 142
- Helmholtz equation
 - frequency domain, 46
 - time domain, 50
- Helmholtz theorem, 862
- Hermite polynomial, 904
- higher harmonic cavity, HHC, 378, 543, 544
- Hill equation, 267
- Huygens principle, 50
- hypergeometric function, 886
 - confluent, 887
- image charge method, 109
- image current method, 112
- Imbert-Fedorov effect, 72
- impedance
 - broadband, 591
 - cavity resonator, 573
 - CSR, 606, 791, 795
 - dimensionality, 575
 - impedance function Z_{\parallel}, Z_{\perp} , 573
 - LSC, 603
 - LSC, low frequency, 573
 - order of magnitude estimate, 590
 - periodic structure, 607
 - resistive wall, ASE, 559
 - resistive wall, NSE, 573
 - RLC, 584
 - tables, 608
- index of refraction, 70
 - critical angle, 72
- metamaterial, 115
- x-ray, 73
- injection, 423
 - emittance convention, 289
 - off-axis vs. on-axis, 423
 - single-turn vs. multi-turn, 423
 - swap-out injection, 423
 - top-up injection, 423
- intra-beam scattering, IBS, 540
- inverse Compton scattering, 106
- ion trapping instability, 708
- IOTA, Integrable Optics Test Accelerator, 337
- isochronous, 358
- Jacobi-Anger identity, 510, 879
- Jacobian matrix, 235
- Jefimenko formula, 141
- JJ_h factor, 217
- Jordan's lemma, 13
- Joule's law of heating, 39
- Keil-Schneil criterion, 685
- Keil-Schneil-Boussard criterion, 686
- kick factor κ_{\perp} , 623
- Kilpatrick limit, 97
- Kolmogorov–Arnold–Moser (KAM) theorem, 322
- Kostenbauder matrix, 284, 430
- Kramers-Kronig relation, 466, 581
- Kummer function, 887
- Lagrangian L
 - definition, 223
- Landau cavity, 378, 543, 544
- Landau damping, 549, 818
- Langevin equation, 411
- Laplace transform
 - definition, 12
- Larmor frequency ω_L , 261
- laser heater, 826

- laser undulator, 107, 198, 470
- laser-electron modulation, 508
- lattice
 - DBA, TBA, MBA, 297
 - FODO, 296
 - FODO, properties, 308, 332
- Legendre polynomial, 903
- Leibniz Rule, 865
- length contraction, 6
- Leontovich boundary condition, 49, 545, 557
- Lie operator, 233
- Lienard-Wiechert formula
 - frequency-domain, 146
 - time-domain, 135, 145
- linear acceleration, 413
 - standing-wave structure, 415
 - traveling-wave structure, 413
- Liouville theorem, 228, 665
 - ensemble, 225
- Livingston plot, 919
- longitudinal coupled bunch instability, 695
- longitudinal mode coupling instability, 691, 695
- Lorentz force equation, 32
 - CGS units, 127
- Lorentz relativistic factor
 - conversion, 17
 - definition, 4
- Lorentz transformation
 - E, B , 103
 - Doppler effect, 104
 - four-vector, 102
 - length contraction, 6
 - space-time, 101
 - time dilation, 6
- Lorenz gauge, 52
- loss factor κ_{\parallel} , 623
- loss tangent $\tan \delta$, 45
- luminosity, 524
- Madey theorem, 485
- magnet
 - dipole, 249
 - quadrupole, 250
 - sextupole, 253
 - solenoid, 260
 - strength, 254
- magnetic hysteresis, 262
- magnetization currents, 41
- matrix exponential, 906
- matrix properties, 900
- Maxwell equations
 - boundary conditions, 42, 51
 - CGS units, 127
 - covariant form, 103
 - electrostatics, 36
 - free space, 32
 - magnetostatics, 40
 - material, 33
- mean free path, 555
- mean transverse kinetic energy, MTE, 719
- metamaterial, 114
- metamaterial $\mu_r < 0$, 33
- method of steepest descent, 895
- microbunching instability, 695
- Microbunching instability (MBI)
 - bunched beam, storage ring, 691
 - coasting beam, single-pass, 680
 - coasting beam, storage ring, 684
 - formula, chicane, 822
 - formula, general, 824
 - klystron analogy, 811
 - laser heating, 826
 - model comparison, 694
- microwave instability, 691, 695
- mirror symmetry, 283
- Mobius transform, 285
- momentum compaction factor α_c, R_{56} , 348

- Moore's law, 849
- NAFF, 339
- narrowband-broadband substitution, 677
- NEG, non-evaporable getter, 437
- negative mass effect, 354
- negative mass instability, 697
- Newton's law vs. radiation reaction, 528, 642
- nonlinear resonance, 320, 368
- normal dispersion, 68
- numerical aperture, 740, 850
- optical guiding, 500
- orthogonal expansion, 902
- P.V., definition, 871
- Pade approximant, 894
- Panofsky-Wenzel theorem, 577
- paramagnetic $\mu_r > 1$, 33
- parametric resonance, 320, 368
- parasitic energy loss, 644
- paraxial approximation, 243
- paraxial wave equation, 121, 177, 599
- Parseval theorem, 10, 148
- phase advance ψ , 278
- phase space (x, p_x) , 226, 243
- photon emittance, 450
- Pierce parameter, 478
- plasma frequency, 48, 555
 - index of refraction, 70
 - plasma oscillation, 605
- Poincare map, 279
- Poincare section, 279
- point-kick model, see CSR, 800
- Poisson bracket, 231
- Poisson noise, 495
- Poisson sum formula, 642
- polarization, 69
- polarization charges, 38
- ponderomotive motion, 107, 468
- population inversion, 454
- potential well distortion, PWD, 644, 671, 673, 695
- Poynting theorem, 57
- Poynting vector, 54
- principle of longitudinal phase stability, 360
- quality factor Q , 91
- radiation reaction vs. Newton's law, 528, 642
- ramp function, 884
- ramping, booster, 418
- ramping, linac, 413
- Rayleigh length, Rayleigh range, 122, 187, 499
- rectangular function, 869
- Residual Resistance Ratio (RRR), 558
- residue theorem, 870
- resistive wall instability, 591, 662, 706
- resonance, 315
 - difference resonance, 320
 - nonlinear, 320
 - order, 320
 - parametric, 320
 - sum resonance, 320
- resonator
 - circular cylindrical modes, 90
 - pillbox cavity TM_{010} , 93
 - quality factor Q , 91
 - rectangular modes, 88
 - RF breakdown, 96
 - shunt impedance R_S , 92
 - Slater theorem, 98
 - TE, TM, E, H mode definition, 65
- retardation condition, 52, 134
- RF breakdown, 97
 - figure of merit, 97
 - Kilpatrick limit, 97
- RF breakdown rate (BDR), 97
- RFQ, radio-frequency quadrupole, 347, 760

- RFQM, radio-frequency quadrupole magnet, 347, 641, 760
- Riemann-Lebesgue lemma, 13
- RLC circuit model, 584
- Robinson instability, 646, 695
 dispersion equation, 644, 652
 secular equation, 644, 652
- Robinson sum rule $\sum_{i=x,y,z} \mathcal{J}_i = 4$, 395
- rocking curve, 508
- Sacherer integral equation, 690
- Sacherer mode coupling theory, 650, 690
- saddle-point method, 895
- Schottky effect, 719, 746
- secular equation, 644, 901
- shot noise, 495
- shunt impedance R_S , 92, 571, 584
- simple harmonic oscillator, SHO, 222
- sinc function, 869
- sine integral, 872
- single-particle emittance, 279, 388
- single-particle equations
 single-pass accelerator, 335
 storage ring, 336
- skin effect, skin depth, 48, 550
- Slater theorem, 98
- slippage factor $\eta = \alpha_c - \frac{1}{\gamma^2}$, 352
- Smith-Purcell radiation, 161
- Snell's law, 70
- solid angle, 55, 148
- space charge
 beam dynamics, 748
 definition, 532
 direct space charge field, 534
 envelope equation, 758
 field dynamics, 532
 indirect space charge field, 109, 534
 perveance, 753, 763
- special functions
 Airy function, 879
 Bessel function, 868, 880, 903
 Dirac delta function, 867
 Gamma function, 884
 Hermite polynomial, 904
 Legendre polynomial, 903
 modified Bessel function, 879
- spectral fluence, 151
- split-ring resonator (SRR), 118, 734
- stability condition
 1-D, 2×2 , 306
 n-D, $2n \times 2n$, 308
- stable fixed point, SFP, 367
- steady-state microbunching, SSMB, 840
- Stirling's formula, 896
- Stokes curl theorem, 862
- strong focusing, 266
- strong head-tail instability, 655, 695
- surface impedance, 49, 546, 552, 557, 558
- surface resistivity, 49
- symplectic condition, 235, 307
- synchrotron
 energy ramping, 418
- synchrotron oscillation
 low-gain FEL, 481
 storage ring, 371
- synchrotron radiation
 bunch form factor, 445
 damping, 383
 damping partition number $\mathcal{J}_{x,y,z}$, 395
 energy-momentum conservation, 471
 Feynman diagram, 170
 formation length — longitudinal, 186, 449
 formation length — transverse, 187, 449
 opening angle, 166
 practical formula, 189
 properties, 177
 quantum excitation, 400

- quantum lifetime, 410
- radiation integrals $\mathcal{I}_{1,2,3,4,5,6}$, 385
- shielding, 189, 448, 790
- theta function $\vartheta_3(u, q)$, 706
- Thomson scattering, 107
- time dilation, 6
- TMCI (transverse mode coupling instability), 655
- total internal reflection, 72
- Touchard polynomial, 898
- Touschek effect, 533, 543
- trace space (x, x') , 243
- transit time factor, 416
- transition γ_t , 352
- transition crossing, 352, 374
- transition radiation, 160
- transparent, 283
- transverse deflecting cavity, TDC, 734
- transverse gradient undulator, TGU, 515
- transverse microwave instability, 655, 695
- transverse mode coupling instability, 695
- transverse mode coupling instability, TMCI, 655
- tune ν , 278
- tune diagram, 320
- turbulent instability, 690, 695
- Twiss parameters, 272
- unbunched beam, 697
- undulator radiation
 - formation length — longitudinal, 214
 - formation length — transverse, 214
 - practical formula, 215
 - properties, 202
- Unit & Dimensionality, 19
- Unit conversion table
 - numeric, 24
 - symbolic, 20, 22
- unit impulse function, 867
- unstable fixed point, UFP, 367
- variation of constants, 325
- Vlasov equation, 227, 667
 - stationary solution, 667
 - transient solution, 669
- Vlasov-Fokker-Planck equation, 666
- Volterra integral equation, 680, 817
- wakefield
 - broadband, 591
 - catch-up distance, 530, 630
 - CSR, 606, 777, 788, 791
 - Derbenev criterion, 790
 - cylindrical cavity, 560
 - dimensionality, 571
 - No-wake theorem, 531
 - order of magnitude estimate, 590
 - resistive wall, 545
 - RLC, 585
 - space charge, 532
 - vs. electric field, 571
 - wake function W_{\parallel}, W_{\perp} , 567
 - wake potential V_{\parallel}, V_{\perp} , 569
 - wakefield $\mathcal{W}_{\parallel}, \mathcal{W}_{\perp}$, 569
- water-bag distribution, 764
- waveguide
 - band, 74
 - circular cylindrical mode plots, 83
 - circular cylindrical modes, 82
 - rectangular mode plots, 78
 - rectangular modes, 77
 - TE, TM, E, H mode definition, 65
- weak focusing, 266
- Weizsacker-Williams approximation, 539
- Wiener-Khinchin theorem, 465
- Wigner distribution, 295
- Wronskian, 325

Z-transform, 651

加速器物理学家

Blewett, John Paul (1910-2000), 加拿大,
165, 855, 955

Bonifacio, Rodolfo (1940-2016), 意大利,
489, 948

Budker, Gersh Itskovich (1918-1977), 俄
国, 398, 967

Chao, Alexander Wu (1949-), 美国, 567,
840, 957

Christofilos, Nicholas Constantine (1916-
1972), 希腊, 267, 855

Courant, Ernest David (1920-2020), 美国,
267, 272, 961

Davidson, Ronald Crosby (1941-2016), 加
拿大, 749

Derbenev, Yaroslav (1940-), 俄国/美国,
790, 959

Fang, Shouxian (1932-2020), 中国, 973

Gluckstern, Robert L. (1924-2008), 美国,
599

Haissinski, Jacques (1935-), 法国, 674

Halbach, Klaus (1924-2000), 美国/德国,
947

Hofmann, Albert Josef (1933-2018), 瑞士,
viii, 954

Kim, Kwang-Je (1944-), 美国, 951

Lawrence, Ernest Orlando (1901-1958), 美
国, 855, 960

Lawson, John David (1923-2008), 英国,
596, 749

Livingston, Milton Stanley (1905-1986),
美国, 267, 855, 963

Madey, John M.J. (1943-2016), 美国, 458,
952

McMillan, Edwin Mattison (1907-1991),
美国, 964

Ng, King-Yuen (1949-), 美国, 567

Orlov, Yuri Fyodorovich (1924-2020), 俄
国, 396

Panofsky, Wolfgang Kurt Hermann (1919-
2007), 德国/美国, 965

Pellegrini, Claudio (1935-), 意大利/美国,
953

Piwinski, Anton (1934-), 德国, 540

Reiser, Martin (1931-2011), 美国, viii

Robinson, Kenneth (1925-1979), 美国, 396,
958

Sacherer, Frank (1940-1978), 美国, 690

Saldin, Evgeny L. (1951-), 俄国, 811

Sands, Matthew Linzee (1919-2014), 美
国, viii, 970

Sessler, Andrew Marienhoff (1928-2014),
美国, 818

Snyder, Hartland Sweet (1913-1962), 美
国, 267, 272, 962

Touschek, Bruno (1921-1978), 奥地利, 543,
968

Twiss, Richard Quintin (1920-2005), 英
国, 272

Vaccaro, Vittorio Giorgio (1941-2023), 意
大利, 575

van der Meer, Simon (1925-2011), 荷兰,
399, 971

Vinokurov, Nikolay Aleksandrovich (1952-
), 俄国, 972

Wiedemann, Helmut (1938-2020), 美国,
viii, 944

Wilson, Robert Rathbun (1914-2000), 美
国, 966

Xie, Ming (1959-2004), 中国, 505, 974

Yokoya, Kaoru (1947-), 日本, 950

数学家

Arnold, Vladimir Igorevich (1937-2010),
俄国, 322

Bessel, Friedrich Wilhelm (1784-1846),

- 德国, 903
- Cardano, Gerolamo (1501-1576), 意大利, 905
- Cauchy, Baron Augustin-Louis (1789-1857), 法国, 870
- Cayley, Arthur (1821-1895), 英国, 901
- de Moivre, Abraham (1667-1754), 法国, 282
- Euler, Leonhard (1707-1783), 瑞士, 224
- Floquet, Achille Marie Gaston (1847-1920), 法国, 267
- Fourier, Jean-Baptiste Joseph (1768-1830), 法国, 9
- Gauss, Carl Friedrich (1777-1855), 德国, 31, 861
- Green, George (1793-1841), 英国, 50, 570, 754, 862
- Hamilton, William Rowan (1805-1865), 爱尔兰, 224, 901
- Heaviside, Oliver (1850-1925), 英国, 142
- Helmholtz, Hermann Ludwig Ferdinand (1821-1894), 德国, 46
- Hermite, Charles (1822-1901), 法国, 904
- Hoene-Wronski, Jozef Maria (1776-1853), 波兰, 325
- Jacobi, Carl Gustav Jacob (1804-1851), 德国, 230, 510
- Jordan, Marie Ennemond Camille (1838-1922), 法国, 13
- Khinchin, Aleksandr Yakovlevich (1894-1959), 俄国, 465
- Kolmogorov, Andrey Nikolaevich (1903-1987), 俄国, 322
- Lagrange, Joseph-Louis (1736-1813), 法国, 223
- Laplace, Pierre-Simon (1749-1827), 法国, 12, 31, 60
- Lebesgue, Henri Leon (1875-1941), 法国, 13
- Legendre, Adrien-Marie (1752-1833), 法国, 903
- Leibniz, Gottfried Wilhelm (1646-1716), 英国, 865
- Lie, Marius Sophus (1842-1899), 挪威, 232
- Liouville, Joseph (1809-1882), 法国, 228
- Moser, Jurgen Kurt (1928-1999), 德国/美国, 322
- Pade, Henri Eugene (1863-1953), 法国, 894
- Parseval, Marc-Antoine (1755-1836), 法国, 10, 148
- Poincare, Jules Henri (1854-1912), 法国, 279
- Poisson, Simeon Denis (1781-1840), 法国, 35
- Riemann, Georg Friedrich Bernhard (1826-1866), 德国, 13
- Stokes, George Gabriel (1819-1903), 爱尔兰, 862
- Volterra, Vito (1860-1940), 意大利, 680
- Wiener, Norbert (1894-1964), 美国, 465
- 数量级
- 储存环磁聚焦结构函数, 334
- 电子储存环时间尺度, 397
- 自由电子激光空间尺度, 506
- 物理学家
- Ampere, Andre-Marie (1775-1836), 法国, 31
- Beth, Richard Alexander (1906-1999), 美国, 256
- Biot, Jean-Baptiste (1774-1862), 法国, 31
- Bohr, Niels Henrik David (1885-1962), 丹麦, 170
- Boltzmann, Ludwig Eduard (1844-1906), 奥地利, 288, 667

- Campbell, Norman Robert (1880-1949), 英国, 401
- Cherenkov, Pavel Alekseyevich (1904-1990), 俄国, 159
- Coulomb, Charles-Augustin (1736-1806), 法国, 31
- Debye, Peter Joseph William (1884-1966), 荷兰/美国, 533
- Dirac, Paul Adrien Maurice (1902-1984), 英国, 867
- Doppler, Christian Andreas (1803-1853), 奥地利, 104
- Drude, Paul Karl Ludwig (1863-1906), 德国, 552
- Dyson, Freeman John (1923-2020), 英国/美国, 125
- Earnshaw, Samuel (1805-1888), 英国, 348
- Einstein, Albert (1879-1955), 德国, 31, 465
- Faraday, Michael (1791-1867), 英国, 31
- Fermi, Enrico (1901-1954), 意大利/美国, 239
- Feynman, Richard Phillips (1918-1988), 美国, 142
- Feynman, Richard Phillips (1918-1988), 美国, 866
- Fokker, Adriaan Daniel (1887-1972), 荷兰, 666
- Frank, Ilya Mikhailovich (1908-1990), 俄国, 159
- Fresnel, Augustin-Jean (1788-1827), 法国, 597
- Gibbs, Josiah Willard (1839-1903), 美国, 31, 226
- Ginzburg, Vitaly Lazarevich (1916-2009), 俄国, 160
- Goos, Hermann Fritz Gustav (1883-1968), 德国, 72
- Gouy, Louis Georges (1854-1926), 法国, 124
- Hanchen, Hilda (1919-2013), 德国, 72
- Heaviside, Oliver (1850-1925), 英国, 31, 884
- Heisenberg, Werner Karl (1901-1976), 德国, 295
- Hertz, Heinrich Rudolf (1857-1894), 德国, 31
- Hill, George William (1838-1914), 美国, 267
- Huygens, Christiaan (1629-1695), 荷兰, 50
- Jackson, John David (1925-2016), 美国, viii
- Jeans, James Hopwood (1877-1946), 英国, 667
- Jefimenko, Oleg Dmitrovich (1922-2009), 乌克兰, 141
- Kramers, Hendrik Anthony “Hans” (1894-1952), 荷兰, 581
- Kronig, Ralph (1904-1995), 德国, 581
- Landau, Lev Davidovich (1908-1968), 俄国, 818
- Langevin, Paul (1872-1946), 法国, 411
- Larmor, Joseph (1857-1942), 英国, 261
- Leontovich, Mikhail Aleksandrovich (1903-1981), 俄国, 49, 545
- Lienard, Alfred-Marie (1869-1958), 法国, 135
- Lorentz, Hendrik Antoon (1853-1928), 荷兰, 31, 101
- Lorenz, Ludvig Valentin (1829-1891), 丹麦, 52
- Maxwell, James Clerk (1831-1879), 英国, 31
- McMillan, Edwin Mattison (1907-1991), 美国, 360

- Oersted, Hans Christian (1777-1851), 丹麦, 31, 40
- Panofsky, Wolfgang Kurt Hermann (1919-2007), 德国/美国, 577
- Pendry, John Brian (1943-), 英国, 114
- Planck, Max Karl Ernst Ludwig (1858-1947), 德国, 666
- Poynting, John Henry (1852-1914), 英国, 55
- Purcell, Edward Mills (1912-1997), 美国, 161
- Savart, Felix (1791-1841), 法国, 31
- Schott, George Augustus/Adolphus (1868-1937), 英国, 137
- Schroedinger, Erwin Rudolf Josef Alexander (1887-1961), 奥地利, 126
- Schwinger, Julian Seymour (1918-1994), 美国, 74, 165
- Slater, John Clarke (1900-1976), 美国, 98
- Strutt, John William (3rd Baron Rayleigh), (1842-1919), 英国, 122
- Tamm, Igor Yevgenyevich (1895-1971), 俄国, 159
- Thomson, William (1824-1907), 英国, 109
- van Kampen, Nicolaas Godfried (1921-2013), 荷兰, 818
- Veksler, Vladimir Iosifovich (1907-1966), 俄国, 360
- Veselago, Victor Georgievich (1929-2018), 俄国/乌克兰, 114
- Vlasov, Anatoly Aleksandrovich (1908-1975), 俄国, 227
- Wiechert, Emil Johann (1861-1928), 德国, 135
- Yang, Chen Ning (1922-), 中国, 855
- 表格
- $2\pi, \sqrt{2\pi}$, 9
- i, j 惯例, 8
- z, s, ct 、头部 vs. 尾部粒子, 359
- Frenet-Serret 坐标系左右手惯例, 244
- 三种坐标系
- 定义, 859
- 梯度、散度、旋度和 Laplace 算子展开, 863
- 三角函数恒等式, 876
- 不同分布函数的定义 $\rho(\omega)$, 899
- 不同分布函数的特征宽度 $\Delta\omega$, 900
- 不同教科书符号惯例比较, 926
- 传统常温磁铁 vs. 超导磁铁, 250
- 位置向量 \mathbf{r} 的微分运算, 865
- 加速器基础科学问题, 770
- 加速器应用、模拟与技术难题, 770
- 加速器集体不稳定性年表, 637
- 单位制转换 — 数值, 24
- 单位制转换 — 符号, 20, 22
- 单侧傅里叶变换公式, 551
- 双曲函数恒等式, 878
- 同步辐射储存环, 912
- 同步辐射实用公式, 189
- 商业激光覆盖频谱, 456
- 四代光源亮度比较, 460
- 四极铁梯度, 266, 386
- 容性、感性阻抗惯例, 574
- 对撞机, 916
- 尾场与阻抗公式, 608
- 常温、光阴极、射频电子枪, 910
- 常用向量恒等式 $\cdot, \times, \nabla, \nabla \cdot, \nabla \times$, 861
- 常用积分公式, 873
- 微波频段定义, 74
- 波荡器辐射实用公式, 215
- 泰勒展开近似公式, 892
- 物理常数, 19
- 电子加速器光源形态的束团特性, 842
- 电磁频谱, 918
- 直线加速器, 909
- 级数求和公式, 897

- 能量循环/回收直线加速器, 915
- 自由电子激光, 911
- 贝索函数解, 85
- 量纲, 19
- 铝、铜金属的一些特性参数, 556

