

## 激光电子散射产生 X 射线激光和 $\gamma$ 射线激光

将激光波长往短波长方向推进是目前激光发展的趋势。目前世界上已经实现的波长最短的激光是 X 射线激光[1—3]，实现的方式是自由电子激光，也就是让自由电子在周期排列的静磁场（称为摇摆磁场，或波荡器）中运动，电子受到磁场调制而摆动，满足一定条件时，电子发出的光子会形成相干光，也就是激光。这种发出波长在埃的量级的 X 射线激光器中入射电子能量在 GeV 量级，摇摆磁场周期在厘米量级，而磁场长度需达几十米到超百米[1]，是个庞然大物，而且耗资巨大。而且如果想进一步缩短激光波长到 $\gamma$ 波段，就需要进一步提高入射电子能量，或者进一步减小摇摆磁场的周期，而这两个方向的改进都已遇到瓶颈，短期内几乎不可能实现。

而用激光代替静磁场作为波荡器产生短波长激光，是一个理论上看来可行而且经济的方案。

我们的理论计算[4—6]表明，如果用波长在微米量级的红外波段激光作为波荡器，入射电子能量只需几十 MeV，即可得到波长在埃量级的 X 射线激光，而如果选用可见光波段的激光作为波荡器，入射电子能量还可以更低一点。还有吸引人的一点是，激光和电子相互作用长度只需要厘米量级，即可使得出射激光达到饱和。因此用激光波荡器产生 X 射线激光，不仅可以使得入射电子能量降低 2—3 个量级，大大降低能耗以及成本，而且能够使得 X 射线激光器小型化，产品化。有将来创业想法的同学，不妨留意关注一下 X 射线激光和 $\gamma$ 射线激光的进展。

如果能够成功利用激光电子散射的方法实现 X 射线激光，除了在实现 X 射线激光时的优势，还有一个诱人之处是，将激光波荡器中激光波长进一步缩短，即可实现 $\gamma$ 射线激光。而这是使用磁波荡器的自由电子激光实现不了的。

从激光发明之后直到今天，人们一直在进行激光与电子散射的研究[7—18]。我们在量子电动力学的框架下研究了直线前进的电子束和激光对撞的极端理想情形：电子束是理想的直线前进的单能电子束，电子束没有能散，方向也没有弥散；激光是理想的圆偏振平面波连续单色激光。我们的理论计算结果表明这将形成一束单色  $\gamma$  射线激光[4]，而且给出了所形成的  $\gamma$  射线激光的频率和入射电子能量以及波荡器激光波长之间的依赖关系。如表 1 所示这个依赖关系与目前各实验室激光电子散射实验[12—17]的结果一致。进一步理论工作可以研究其中丰富的非线性等物理现象，也可以利用已有的理论结果模拟实际的情形。

激光电子散射，是一个纯的电磁相互作用系统，量子电动力学就是描述电磁相互作用的理论。我们知道量子电动力学是迄今为止最可靠的物理理论，在我们的工作中除了用到量子电动力学的知识，还用到了微扰论。而微扰在量子电动力学中也是经过了广泛而且长期考验的。我们的理论比赖以制成现有的磁摇摆的自由电子激光的理论严格得多，可靠得多，可称为量子自由电子激光的理论。所以我们对我们工作中所使用的理论是有十足的底气和信心的。表 1 中各不同实验室实验结果和我们的理论公式计算结果的一致，更是增强了我们自信，也使得我们更希望能开展相关的实验研究。

激光电子散射得到更高能量的光子，世界上这方面的实验不少，甚至已经有实验室在研究这种小型 X 光源的应用[18]。但是目前已有实验都仅限于用激光电子散射的方法得到 X 射线源或 $\gamma$ 射线源，都不是激光。而我们的研究目标是受波荡器激光调制的实际有能散有弥散的电子，什么条件下能发出相干光。我们关注的是出激光。

表 1. 目前各实验室激光电子散射实验结果与我们理论计算结果的比较

参考文献	入射电子能量	入射激光波长	出射光子能量	
			实验值	文献[4]理论值
[12]	40 MeV	1047 nm	29 keV	29 keV

[13]	20 MeV	1064 nm	6.95 keV	7.14 keV
[14]	1.28 GeV	1034 nm	24 MeV	29.4 MeV
[15]	60 MeV	10.2 $\mu\text{m}$	6.6 keV	6.7 keV
[16]	0.25—2 GeV	800 nm	2—500 MeV	1.49—90.7 MeV
[17]	42.2 MeV	3.1 $\mu\text{m}$	10.9 keV	10.9 keV

## 参考文献

- [1] P. Emma, R. Akre, J. Arthur, et al., First lasing and operation of an ångstrom-wavelength free-electron laser, *Nature Photon.* 4 (2010) 641—647.
- [2] T. Ishikawa, H. Aoyagi, T. Asaka, et al., A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region, *Nature Photon.* 6 (2012) 540—544.
- [3] H.-S. Kang, C.-K. Min, H. Heo, et al., Hard X-ray free-electron laser with femtosecond-scale timing jitter, *Nature Photon.* 11 (2017) 708—713.
- [4] 张启仁, Quantum electrodynamics in a laser and the electron laser collision, *Chin. Phys. B* 23 (2014) 010306;
- [5] 张启仁, Possible generation of a  $\gamma$ -ray laser by electrons wiggling in a background laser, *Chin. Phys. B* 24 (2015) 054208;
- [6] 张启仁, 高春媛, 实现 $\gamma$ 射线激光之路, *科学通报* 62 (2017) 3420—3428.
- [7] G. Fiocco and E. Thompson, Thomson scattering of optical radiation from an electron beam, *Phys. Rev. Lett.* 10 (1963) 89—91;
- [8] P. G. Zhukov, V. S. Ivanov, M. S. Rabinovich, et al., Stimulated Compton-Scattering by a relativistic electron-beam, *Zh. eksp. teor. Fir.* 76 (1979) 2065—2074;
- [9] C. Haffast, H. Poth, B. Seligmann, and A. Wolf, Measurement of Laser Light Thomson-Scattered from a Cooling Electron Beam, *Appl. Phys. B* 44 (1987) 87—92.
- [10] K. Mima, Y. Kitagawa, T. Akiba, et al., Experiment and theory on CO<sub>2</sub> laser powered wiggler and induction Linac FEL, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 272 (1988) 106—109.
- [11] M. E. Couprie, D. Nutarelli, R. Roux, Gamma rays produced by intra-cavity inverse Compton scattering of a storage ring free-electron laser, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 32 (1999) 5657—5667.
- [12] H. Shimizu, M. Akemoto, Y. Arai, et al., X-ray generation by inverse Compton scattering at the superconducting RF test facility, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 772 (2015) 26—33.
- [13] T. Akagi, A. Kosuge, S. Araki, et al., Narrow-band photon beam via laser Compton scattering in an energy recovery linac, *Phys. Rev. Accel. Beams* 19 (2016) 114701.
- [14] I. Chaikovska, K. Cassou, R. Chiche, et al., High flux circularly polarized gamma beam factory: coupling a Fabry-Perot optical cavity with an electron storage ring, *Scientific Reports* 6 (2016) 36569.
- [15] A. Ovodenko, R. Agustsson, M. Babzien, et al., High duty cycle inverse Compton scattering X-ray source, *Appl. Phys. Lett.* 109 (2016) 253504.
- [16] J. M. Cole, K. T. Behm, E. Gerstmayr, et al., Experimental Evidence of Radiation Reaction in the Collision of a High-Intensity Laser Pulse with a Laser-Wakefield Accelerated Electron Beam, *Phys. Rev. X* 8 (2018) 011020.
- [17] P. Niknejadi, J. M. D. Kowalczyk, M. R. Hadmack, et al., Free-electron laser inverse-Compton interaction X-ray source, *Phys. Rev. Accel. Beams* 22 (2019) 040704.
- [18] Stephanie Kulpe, Martin Dierolf, Benedikt Günther, et al., Spectroscopic imaging at compact inverse Compton X-ray sources, *Phys. Medica* 79 (2020) 137—144.