

量子自由电子激光器 产生 γ 射线激光

张启仁 高春媛

北京大学物理学院

2017年12月7日

目录

① 为什么研究 γ 射线激光

目录

- ① 为什么研究 γ 射线激光
- ② 现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光

目录

- ① 为什么研究 γ 射线激光
- ② 现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
- ③ 量子自由电子激光器与 γ 射线激光

目录

- ① 为什么研究 γ 射线激光
- ② 现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
- ③ 量子自由电子激光器与 γ 射线激光
- ④ 从 γ 光源到 γ 激光

目录

- ① 为什么研究 γ 射线激光
- ② 现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
- ③ 量子自由电子激光器与 γ 射线激光
- ④ 从 γ 光源到 γ 激光
- ⑤ 畅想介子激射波

目录

- ① 为什么研究 γ 射线激光
- ② 现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
- ③ 量子自由电子激光器与 γ 射线激光
- ④ 从 γ 光源到 γ 激光
- ⑤ 畅想介子激射波
- ⑥ 总结

目录

- ① 为什么研究 γ 射线激光
- ② 现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
- ③ 量子自由电子激光器与 γ 射线激光
- ④ 从 γ 光源到 γ 激光
- ⑤ 畅想介子激射波
- ⑥ 总结

为什么研究 γ 射线激光？

把激光的波长范围扩展到 γ 射线，是核物理学家和激光学家的共同梦想

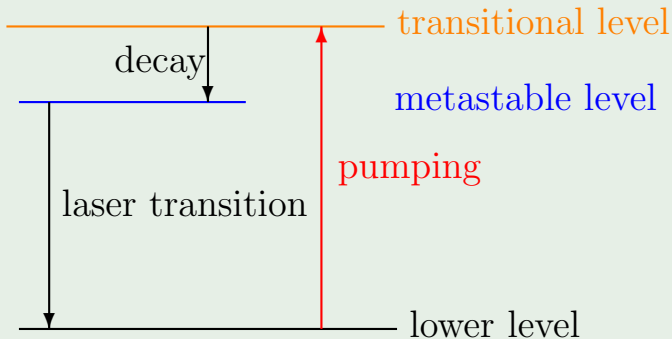
目录

- ① 为什么研究 γ 射线激光
- ② 现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
- ③ 量子自由电子激光器与 γ 射线激光
- ④ 从 γ 光源到 γ 激光
- ⑤ 畅想介子激射波
- ⑥ 总结

为什么研究 γ 射线激光
现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
量子自由电子激光器与 γ 射线激光
从 γ 光源到 γ 激光
畅想介子激射波
总结

以原子，分子，连续介质为发光体的激光器

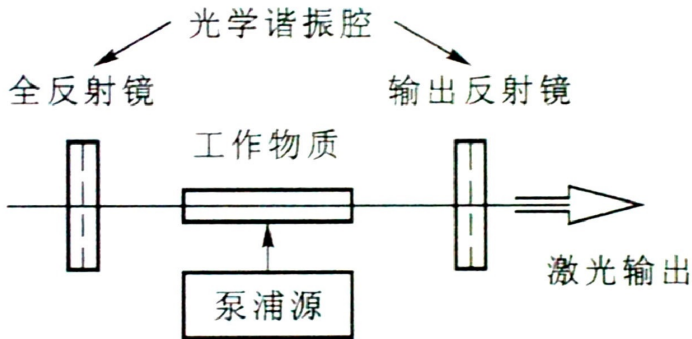
激光器发光介质的三能级图



为什么研究 γ 射线激光
现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
量子自由电子激光器与 γ 射线激光
从 γ 光源到 γ 激光
畅想介子激射波
总结

产生和加强激光的三要素

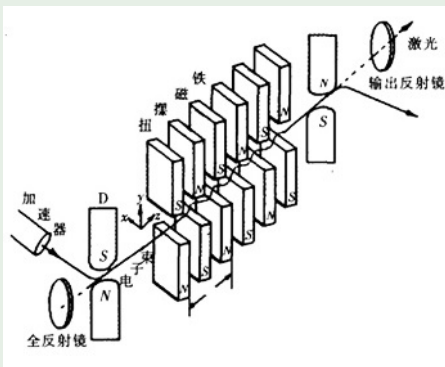
激光器基本结构示意图



为什么研究 γ 射线激光
现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
量子自由电子激光器与 γ 射线激光
从 γ 光源到 γ 激光
畅想介子激射波
总结

自由电子激光器

自由电子激光原理图



图片来自<https://baike.baidu.com/item/自由电子激光>

磁摇摆器难以产生 γ 射线激光

- 自由电子激光的波长 λ 与电子横向摆动的空间周期 λ_w 有比例关系 $\lambda \sim \lambda_w / \gamma^2$ ，其中 $\gamma \equiv 1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ 为电子的相对论因子

磁摇摆器难以产生 γ 射线激光

- 自由电子激光的波长 λ 与电子横向摆动的空间周期 λ_w 有比例关系 $\lambda \sim \lambda_w / \gamma^2$, 其中 $\gamma \equiv 1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ 为电子的相对论因子
- 对相对论摆动电子 $\lambda \ll \lambda_w$

磁摇摆器难以产生 γ 射线激光

- 自由电子激光的波长 λ 与电子横向摆动的空间周期 λ_w 有比例关系 $\lambda \sim \lambda_w / \gamma^2$, 其中 $\gamma \equiv 1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ 为电子的相对论因子
- 对相对论摆动电子 $\lambda \ll \lambda_w$
- 然而要产生 γ 射线激光, 摆动周期 λ_w 要小于毫米量级。对此, 磁摇摆器难以做到!

目录

- ① 为什么研究 γ 射线激光
- ② 现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
- ③ 量子自由电子激光器与 γ 射线激光
- ④ 从 γ 光源到 γ 激光
- ⑤ 畅想介子激射波
- ⑥ 总结

猛回首：普通激光就可做带电粒子摇摆器！

- 激光提供随时间空间周期变化的电磁场，正好用来摇摆带电粒子

猛回首：普通激光就可做带电粒子摇摆器！

- 激光提供随时间空间周期变化的电磁场，正好用来摇摆带电粒子
- 真空中的电磁波是干净的，没有缺陷和杂质，是理想的带电粒子摇摆器

猛回首：普通激光就可做带电粒子摇摆器！

- 激光提供随时间空间周期变化的电磁场，正好用来摇摆带电粒子
- 真空中的电磁波是干净的，没有缺陷和杂质，是理想的带电粒子摇摆器
- 电磁场与带电粒子组成的系统，有很好的基本理论：量子电动力学。这是当今最好最可靠的理论

真空中的量子电动力学

在QED中，真空被定义为能量最低态，是一个没有任何光子或者带电粒子的状态

激光中的量子电动力学

- 主要的改变就是用激光态代替通常的真空态

激光中的量子电动力学

- 主要的改变就是用激光态代替通常的真空态
- 不是将电磁场本身作量子化，而是将电磁场相对于它的经典解（也就是激光场）的涨落量子化

激光中的量子电动力学

- 主要的改变就是用激光态代替通常的真空态
- 不是将电磁场本身作量子化，而是将电磁场相对于它的经典解（也就是激光场）的涨落量子化
- 带电粒子在圆偏振激光中的运动可严格求解，只有发光过程用微扰法处理

在圆偏振激光场中运动的电子的本征态函数

- 在转动图像中，在圆偏振平面波激光场中运动的电子满足定态Dirac方程

$$\{\alpha \cdot (-i\nabla) + eA [\alpha_x \cos(k_z) + \alpha_y \sin(k_z)] + \beta m + k j_z\} \psi_n(x) = \varepsilon_n \psi_n(x).$$

在圆偏振激光场中运动的电子的本征态函数

- 在转动图像中，在圆偏振平面波激光场中运动的电子满足定态Dirac方程

$$\{\alpha \cdot (-i\nabla) + eA [\alpha_x \cos(k_z) + \alpha_y \sin(k_z)] + \beta m + k j_z\} \psi_n(x) = \varepsilon_n \psi_n(x).$$

- 这个本征值问题可以严格求解，本征值为

$$\varepsilon_n = E + \frac{e^2 A^2}{2(E - p_z)} + \left(\frac{\sigma}{2} - n\right) k,$$

在圆偏振激光场中运动的电子的本征态函数

相应的本征函数为

$$\begin{aligned} \psi_n(x) = & \frac{1}{2\pi} \exp \left\{ i \left[p_z + \frac{e^2 A^2}{2(E - p_z)} \right] z \right\} \\ & \times \left\{ 1 - \frac{eA}{2(p_z - E)} [\alpha_x \cos kz + \alpha_y \sin kz \right. \\ & + i(\Sigma_y \cos kz - \Sigma_x \sin kz)] \} \left[i^n J_n(p_\perp \rho') e^{-in\varphi'} P_+ \right. \\ & \left. + i^{n-\sigma} J_{n-\sigma}(p_\perp \rho') e^{-i(n-\sigma)\varphi'} P_- \right] u_\sigma(0), \end{aligned} \quad (1)$$

转动图像中的电子态函数解释

- $x = \rho \cos \varphi, y = \rho \sin \varphi.$

转动图像中的电子态函数解释

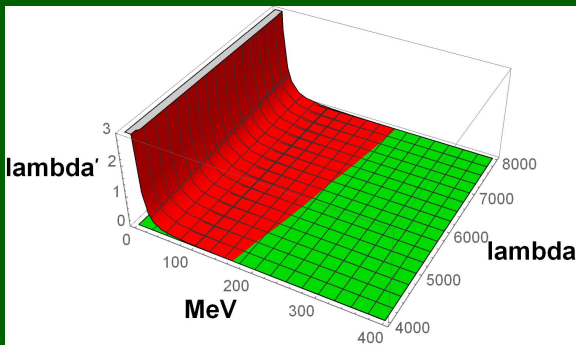
- $x = \rho \cos \varphi, y = \rho \sin \varphi.$
- $x' = x - \frac{eA}{k(p_z - E)} \sin kz = \rho' \cos \varphi',$
- $y' = y + \frac{eA}{k(p_z - E)} \cos kz = \rho' \sin \varphi'.$

转动图像中的电子态函数解释

- $x = \rho \cos \varphi, y = \rho \sin \varphi.$
- $x' = x - \frac{eA}{k(p_z - E)} \sin kz = \rho' \cos \varphi',$
- $y' = y + \frac{eA}{k(p_z - E)} \cos kz = \rho' \sin \varphi'.$
- (1)式中的 ρ' 和 φ' 表明电子波沿着 z 方向在 x - y 平面内发生了周期性的扭曲，沿着 z 方向周期性地受到调制。这就是电子受到摇摆。由于这个摇摆不是出现在电子运动轨道上，而是出现在电子的量子态函数上，因此我们称之为量子摇摆。

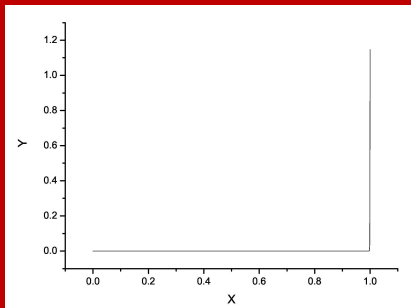
为什么研究 γ 射线激光
现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
量子自由电子激光器与 γ 射线激光
从 γ 光源到 γ 激光
畅想介子激射波
总结

一般结果



背景激光强度 $I = 10^{19} \text{W/m}^2$ 条件下沿电子前进方向发射的光子波长 λ' 与入射激光波长 λ 以及入射电子能量 E 的关系

一般结果



背景激光波长为 $\lambda = 785\text{nm}$ 强度为 $I = 10^{19}\text{W/m}^2$
且入射电子能量为 $E = 307\text{MeV}$ 的条件下
 $Y \equiv 10^6 \times \frac{d\Sigma}{d\Omega_{k'}}$ 和 $X \equiv \theta/\pi$ 的关系。其中 θ 为 γ 光子
发射方向与背景激光传播方向的夹角

量子自由电子激光(QFEL)

- 发出的 γ 光子与入射电子同行，产生诱致辐射，增强已发出的 γ 光束

量子自由电子激光(QFEL)

- 发出的 γ 光子与入射电子同行，产生诱致辐射，增强已发出的 γ 光束
- 诱致辐射的正反馈使这束 γ 光子塌缩成一支方向性和单色性都极好的极化 γ 射线

量子自由电子激光(QFEL)

- 发出的 γ 光子与入射电子同行，产生诱致辐射，增强已发出的 γ 光束
- 诱致辐射的正反馈使这束 γ 光子塌缩成一支方向性和单色性都极好的极化 γ 射线
- 诱致辐射还使这支 γ 射线中光子数不确定，从而成为一束具非零振幅的相干波

量子自由电子激光(QFEL)

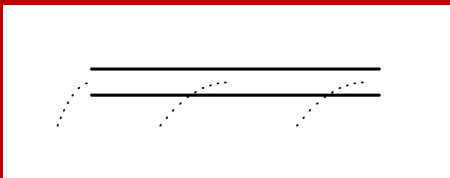
- 发出的 γ 光子与入射电子同行，产生诱致辐射，增强已发出的 γ 光束
- 诱致辐射的正反馈使这束 γ 光子塌缩成一支方向性和单色性都极好的极化 γ 射线
- 诱致辐射还使这支 γ 射线中光子数不确定，从而成为一束具非零振幅的相干波
- 这就是 γ 射线激光，一种量子自由电子激光(QFEL)

相当于抽运和共振腔的机制， γ 激光的直线增强器

计算表明，电子在激光场内前进厘米量级距离后有一半左右发出 γ 光子

相当于抽运和共振腔的机制， γ 激光的直线增强器

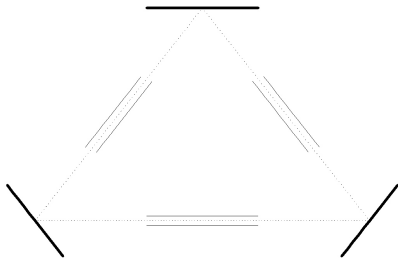
计算表明，电子在激光场内前进厘米量级距离后有一半左右发出 γ 光子



γ 激光的直线增强器概念图

为什么研究 γ 射线激光
现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
量子自由电子激光器与 γ 射线激光
从 γ 光源到 γ 激光
畅想介子激射波
总结

布喇格反射与X射线激光的回旋增强器



回旋增强器概念图

产生量子自由电子激光的三要素

● 单色光源

产生量子自由电子激光的三要素

- 单色光源
- 不断更新发光介质将它维持在单色光源的发光始态

产生量子自由电子激光的三要素

- 单色光源
- 不断更新发光介质将它维持在单色光源的发光始态
- 相随共振

一般结果

理论计算表明，电子数密度 $n_0 = 10^{18} \text{m}^{-3}$ ，入射电子能量 $E = 307 \text{MeV}$ ，背景激光波长 $\lambda = 785 \text{nm}$ ，背景激光强度 $I = 10^{19} \text{W/m}^2$ 的条件下，输出的 γ 射线激光强度可达 $5 \times 10^{13} \text{W/m}^2$

目录

- ① 为什么研究 γ 射线激光
- ② 现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
- ③ 量子自由电子激光器与 γ 射线激光
- ④ 从 γ 光源到 γ 激光
- ⑤ 畅想介子激射波
- ⑥ 总结

从康普顿背散射 γ 光源到 γ 射线激光的相变

CBS γ 光源

非相干

γ 射线激光

相干

从康普顿背散射 γ 光源到 γ 射线激光的相变

CBS γ 光源

γ 射线激光

非相干

相干

无序

有序

从康普顿背散射 γ 光源到 γ 射线激光的相变

CBS γ 光源

γ 射线激光

非相干

相干

无序

有序

临界点

目录

- ① 为什么研究 γ 射线激光
- ② 现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
- ③ 量子自由电子激光器与 γ 射线激光
- ④ 从 γ 光源到 γ 激光
- ⑤ 畅想介子激射波
- ⑥ 总结

质子与激光碰撞产生介子束

- 用质子代替电子与激光碰撞会发生什么？

质子与激光碰撞产生介子束

- 用质子代替电子与激光碰撞会发生什么？
- 质子带电，通过与激光碰撞可产生光子，形成激光

质子与激光碰撞产生介子束

- 用质子代替电子与激光碰撞会发生什么？
- 质子带电，通过与激光碰撞可产生光子，形成激光
- 然而质子还参与强作用，高能质子与激光中的光子作用还可产生介子

质子与激光碰撞产生介子束

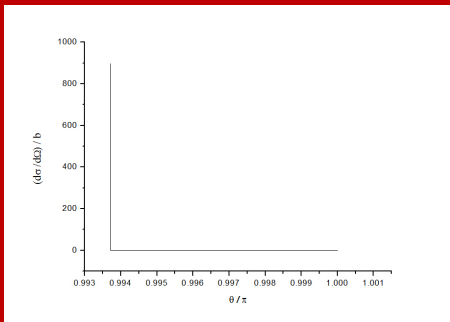
- 用质子代替电子与激光碰撞会发生什么？
- 质子带电，通过与激光碰撞可产生光子，形成激光
- 然而质子还参与强作用，高能质子与激光中的光子作用还可产生介子
- 如有适当的共振环境，形成介子诱致辐射的正反馈，便可产生介子激射波

质子与激光碰撞产生介子束

- 用质子代替电子与激光碰撞会发生什么？
- 质子带电，通过与激光碰撞可产生光子，形成激光
- 然而质子还参与强作用，高能质子与激光中的光子作用还可产生介子
- 如有适当的共振环境，形成介子诱致辐射的正反馈，便可产生介子激射波
- 简称介子激光

为什么研究 γ 射线激光
现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
量子自由电子激光器与 γ 射线激光
从 γ 光源到 γ 激光
畅想介子激射波
总结

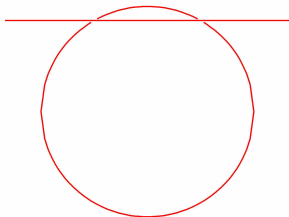
单能 π^+ 介子辐射



单能 π^+ 介子沿以入射质子运动方向为轴，顶角很小的锥面母线发射

为什么研究 γ 射线激光
现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
量子自由电子激光器与 γ 射线激光
从 γ 光源到 γ 激光
畅想介子激射波
总结

π^+ 介子的圆形储存环，即介子波的共振腔



π^+ 介子的圆形储存环

目录

- ① 为什么研究 γ 射线激光
- ② 现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
- ③ 量子自由电子激光器与 γ 射线激光
- ④ 从 γ 光源到 γ 激光
- ⑤ 畅想介子激射波
- ⑥ 总结

总结

- 利用量子自由电子激光器产生 γ 射线激光是一项可以理论和实验配合进行的工作。而且这项实验进可以实现 γ 激光，退可以改进康普顿背散射 γ 光源。旱涝保收，值得一试。

总结

- 利用量子自由电子激光器产生 γ 射线激光是一项可以理论和实验配合进行的工作。而且这项实验进可以实现 γ 激光，退可以改进康普顿背散射 γ 光源。旱涝保收，值得一试。
- 介子激射波的工作极具诱惑力，我们正在对产生 π 介子激射波的可能性作具体的理论研究

References

Chin. Phys. B **23**(1) (2014): 010306
arXiv:1303.7229

Chin. Phys. B **24**(5) (2015): 054208
arXiv:1408.3112

为什么研究 γ 射线激光
现有两类激光器为何不能产生 γ 射线激光
量子自由电子激光器与 γ 射线激光
从 γ 光源到 γ 激光
畅想介子激射波
总结

谢 谢 大 家 ！