

粒子物理简介

第四节 量子电动力学

余钊焕

中山大学物理学院


<https://yzhxxzxy.github.io>




更新日期：2024 年 10 月 7 日



U(1) 整体对称性

 时空坐标的函数称为**场**。在**量子场论**中，场被量子化，而**粒子**是场的激发态，粒子间相互作用来源于各种场之间的相互作用。场的运动规律由**最小作用量原理**决定，作用量 $S = \int d^4x \mathcal{L}(x)$ ，其中拉氏量 $\mathcal{L}(x)$ 是用场表达出来的。

U(1) 整体对称性


 时空坐标的函数称为**场**。在**量子场论**中，场被量子化，而**粒子**是场的激发态，粒子间相互作用来源于各种场之间的相互作用。场的运动规律由**最小作用量原理**决定，作用量 $S = \int d^4x \mathcal{L}(x)$ ，其中拉氏量 $\mathcal{L}(x)$ 是用场表达出来的。

 对于**不参与相互作用的狄拉克旋量场** $\psi(x)$ ，运动规律用洛伦兹不变的拉氏量

$$\mathcal{L}_{\text{free}}(x) = \bar{\psi}(x) i \gamma^\mu \partial_\mu \psi(x) - m \bar{\psi}(x) \psi(x)$$

描述，其中狄拉克矩阵 γ^μ 是满足 $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu}$ 的 4×4 常数矩阵，时空导数 $\partial_\mu \equiv \partial/\partial x^\mu$ ， m 为相应**费米子**的**质量**， $\bar{\psi} \equiv \psi^\dagger \gamma^0$


U(1) 整体对称性

 时空坐标的函数称为**场**。在**量子场论**中，场被量子化，而**粒子**是场的激发态，粒子间相互作用来源于各种场之间的相互作用。场的运动规律由**最小作用量原理**决定，作用量 $S = \int d^4x \mathcal{L}(x)$ ，其中拉氏量 $\mathcal{L}(x)$ 是用场表达出来的。


 对于**不参与相互作用的狄拉克旋量场** $\psi(x)$ ，运动规律用洛伦兹不变的拉氏量


$$\mathcal{L}_{\text{free}}(x) = \bar{\psi}(x)i\gamma^\mu\partial_\mu\psi(x) - m\bar{\psi}(x)\psi(x)$$

描述，其中狄拉克矩阵 γ^μ 是满足 $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu}$ 的 4×4 常数矩阵，时空导数 $\partial_\mu \equiv \partial/\partial x^\mu$ ， m 为相应**费米子**的**质量**， $\bar{\psi} \equiv \psi^\dagger\gamma^0$

 对 ψ 作 **U(1) 整体变换** $\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{iQ\theta}\psi(x)$ (**整体**指变换参数 θ **不是**时空坐标的函数， Q 是 $\psi(x)$ 场携带的 U(1) 荷)，则 $\bar{\psi}(x) \rightarrow \bar{\psi}'(x) = \bar{\psi}(x)e^{-iQ\theta}$ ，而

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{free}}(x) &\rightarrow \mathcal{L}'_{\text{free}}(x) = \bar{\psi}'(x)(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi'(x) \\ &= \bar{\psi}(x)e^{-iQ\theta}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)e^{iQ\theta}\psi(x) = \mathcal{L}_{\text{free}}(x)\end{aligned}$$

 可见，**自由**狄拉克旋量场的拉氏量具有 **U(1) 整体对称性**

 根据**诺特定理**，相应的 U(1) 荷是**守恒的**

U(1) 规范对称性

🐼 若变换参数 θ 是**时空坐标的函数**，则上述变换变成局域的 **U(1) 规范变换**

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{iQ\theta(x)}\psi(x)$$

👉 从而 $\partial_\mu \psi'(x) = e^{iQ\theta(x)}[\partial_\mu + iQ\partial_\mu \theta(x)]\psi(x)$ 导致 $\mathcal{L}'_{\text{free}}(x) \neq \mathcal{L}_{\text{free}}(x)$

🦀 为了重新得到对称性，引入**规范场** $A_\mu(x)$ ，令它的 **U(1) 规范变换**为

$$A_\mu(x) \rightarrow A'_\mu(x) = A_\mu(x) - \frac{1}{e}\partial_\mu \theta(x)$$

以此补偿变换参数 $\theta(x)$ 的时空导数引起的差异

🦀 将拉氏量修改为 $\mathcal{L}(x) = \bar{\psi}(x)i\gamma^\mu D_\mu \psi(x) - m\bar{\psi}(x)\psi(x)$ ，其中**协变导数**的定义是 $D_\mu \equiv \partial_\mu + iQeA_\mu(x)$ ，就可以得到 $\mathcal{L}'(x) = \mathcal{L}(x)$

👱 因此 $\mathcal{L}(x)$ 具有 **U(1) 规范对称性**，描述 **U(1) 规范理论**

U(1) 规范对称性

🦉 若变换参数 θ 是**时空坐标的函数**，则上述变换变成局域的 **U(1) 规范变换**

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{iQ\theta(x)}\psi(x)$$

👉 从而 $\partial_\mu \psi'(x) = e^{iQ\theta(x)}[\partial_\mu + iQ\partial_\mu \theta(x)]\psi(x)$ 导致 $\mathcal{L}'_{\text{free}}(x) \neq \mathcal{L}_{\text{free}}(x)$

🦄 为了重新得到对称性，引入**规范场** $A_\mu(x)$ ，令它的 **U(1) 规范变换**为

$$A_\mu(x) \rightarrow A'_\mu(x) = A_\mu(x) - \frac{1}{e}\partial_\mu \theta(x)$$

以此补偿变换参数 $\theta(x)$ 的时空导数引起的差异

🦀 将拉氏量修改为 $\mathcal{L}(x) = \bar{\psi}(x)i\gamma^\mu D_\mu \psi(x) - m\bar{\psi}(x)\psi(x)$ ，其中**协变导数**的定义是 $D_\mu \equiv \partial_\mu + iQeA_\mu(x)$ ，就可以得到 $\mathcal{L}'(x) = \mathcal{L}(x)$

🧜 因此 $\mathcal{L}(x)$ 具有 **U(1) 规范对称性**，描述 **U(1) 规范理论**

🦀 代价是拉氏量中多了一项 $\mathcal{L}_{\text{int}}(x) = \mathcal{L}(x) - \mathcal{L}_{\text{free}}(x) = -QeA_\mu(x)\bar{\psi}(x)\gamma^\mu\psi(x)$

🍈 此项将旋量场 $\psi(x)$ 和规范场 $A_\mu(x)$ 耦合起来，**耦合常数**为 e

🍑 规范场 $A_\mu(x)$ 是洛伦兹矢量场，对应的粒子称为**规范玻色子**，自旋为 1

🍒 \mathcal{L}_{int} 导致费米子与规范玻色子发生**规范相互作用**

量子电动力学

🦁 **量子电动力学** (Quantum Electrodynamics) 简称 **QED**, 是 $U(1)_{\text{EM}}$ **规范理论**, 规范玻色子为**光子**, 描述**电磁相互作用**, 相应拉氏量为

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{QED}} &= \sum_f (\bar{f} i \gamma^\mu D_\mu f - m_f \bar{f} f) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ &= \sum_f [\bar{f} (i \gamma^\mu \partial_\mu - m_f) f - Q_f e A_\mu \bar{f} \gamma^\mu f] - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}\end{aligned}$$

🌺 协变导数 $D_\mu = \partial_\mu + i Q_f e A_\mu$, **电磁耦合常数** e 就是单位电荷量


🌺 f 代表标准模型中各种**带电的旋量场**, Q_f 为 f 所携带的**电荷**, m_f 是 f 的质量, \mathcal{L}_{QED} 中 $\bar{f}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m_f)f$ **项**描述旋量场在时空中传播的过程

🌺 **电磁场** A_μ 的**场强张量**定义为 $F_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$; 可以验证, $-F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}/4$ **项**在 $U(1)_{\text{EM}}$ 规范变换下不变, 它描述电磁场在时空中传播的过程


🌺 $-Q_f e A_\mu \bar{f} \gamma^\mu f$ **项**描述旋量场与电磁场的**电磁相互作用**

费米子 f	上型夸克 u, c, t	下型夸克 d, s, b	带电轻子 e^-, μ^-, τ^-
电荷 Q_f	+2/3	-1/3	-1


旋量系数和极化矢量

 \mathcal{L}_{QED} 中 $\bar{f}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f)f$ 项与自由旋量场拉氏量 $\mathcal{L}_{\text{free}}$ 形式相同，描述远离相互作用顶点的费米子；根据**最小作用量原理**，此项对应于旋量场 $f(x)$ 的**狄拉克方程**

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f)f(x) = 0$$

 经过傅立叶变换之后，动量空间中的**旋量系数** $u(p, \lambda)$ 和 $v(p, \lambda)$ 满足

$$(\not{p} - m_f)u(p, \lambda) = 0, \quad (\not{p} + m_f)v(p, \lambda) = 0, \quad \not{p} \equiv \gamma^\mu p_\mu$$

 $\lambda = \pm 1$ 称为**螺旋度**，是自旋在动量方向上的投影被归一化后的值

 $\lambda = +1$ (-1) 对应于**右旋 (左旋) 极化的费米子**，螺旋度求和关系为

$$\sum_{\lambda=\pm 1} u(p, \lambda)\bar{u}(p, \lambda) = \not{p} + m_f, \quad \sum_{\lambda=\pm 1} v(p, \lambda)\bar{v}(p, \lambda) = \not{p} - m_f$$

旋量系数和极化矢量

🐯 \mathcal{L}_{QED} 中 $\bar{f}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f)f$ 项与自由旋量场拉氏量 $\mathcal{L}_{\text{free}}$ 形式相同，描述远离相互作用顶点的费米子；根据**最小作用量原理**，此项对应于旋量场 $f(x)$ 的**狄拉克方程**

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f)f(x) = 0$$

🐯 经过傅立叶变换之后，动量空间中的**旋量系数** $u(p, \lambda)$ 和 $v(p, \lambda)$ 满足

$$(\not{p} - m_f)u(p, \lambda) = 0, \quad (\not{p} + m_f)v(p, \lambda) = 0, \quad \not{p} \equiv \gamma^\mu p_\mu$$

🌽 $\lambda = \pm 1$ 称为**螺旋度**，是自旋在动量方向上的投影被归一化后的值

🌽 $\lambda = +1$ (-1) 对应于**右旋 (左旋) 极化的费米子**，螺旋度求和关系为

$$\sum_{\lambda=\pm 1} u(p, \lambda)\bar{u}(p, \lambda) = \not{p} + m_f, \quad \sum_{\lambda=\pm 1} v(p, \lambda)\bar{v}(p, \lambda) = \not{p} - m_f$$


🐮 \mathcal{L}_{QED} 中 $-F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}/4$ 项描述远离相互作用顶点时的光子

🐮 在动量空间中用**极化矢量** $\varepsilon_\mu(p, \lambda)$ 描写光子的运动，光子的螺旋度可取 $\lambda = \pm 1$

🌿 $\lambda = +1$ (-1) 对应于**右旋 (左旋) 极化的光子**，螺旋度求和关系为

$$\sum_{\lambda=\pm 1} \varepsilon_\mu(p, \lambda)\varepsilon_\nu^*(p, \lambda) \rightarrow -g_{\mu\nu}$$

QED 费曼规则

 $\bar{f}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f)f$ 项和 $-F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}/4$ 项分别提供费米子与光子的初末态和传播子的费曼规则，而 $-Q_f e A_\mu \bar{f}\gamma^\mu f$ 项提供电磁相互作用顶点的费曼规则

$$\text{---} \xrightarrow{p} \text{---} \text{---} = u(p, \lambda)$$

正费米子初态

$$\text{---} \xleftarrow{p} \text{---} \text{---} = \bar{u}(p, \lambda)$$

正费米子末态

$$\text{---} \xleftarrow{p} \text{---} \text{---} = \bar{v}(p, \lambda)$$

反费米子初态

$$\text{---} \xrightarrow{p} \text{---} \text{---} = v(p, \lambda)$$

反费米子末态

$$\mu \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} = \varepsilon_\mu(p, \lambda)$$

光子初态

$$\text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \mu = \varepsilon_\mu^*(p, \lambda)$$

光子末态


$$\bullet \text{---} \xrightarrow{p} \bullet = \frac{i(\not{p} + m_f)}{p^2 - m_f^2 + i\epsilon}$$

费米子传播子

$$\mu \bullet \text{---} \xrightarrow{p} \bullet \nu = \frac{-ig_{\mu\nu}}{p^2 + i\epsilon}$$

光子传播子 (费曼规范)

 光子用波浪线表示

 费米子用带箭头的实线表示，线上的箭头方向是费米子数的方向；正粒子的动量方向与费米子数方向相同，反粒子则相反

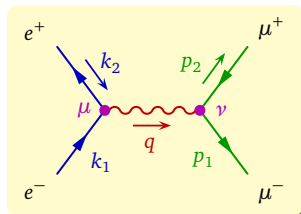
$$\begin{array}{c} \mu \\ | \\ \bullet \\ / \quad \backslash \\ f \quad \quad f \end{array} = -iQ_f e \gamma^\mu$$

电磁相互作用顶点

$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 散射振幅

🐎 右图为 QED 散射过程 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 的领头阶费曼图，利用费曼规则将它表达成**不变振幅**

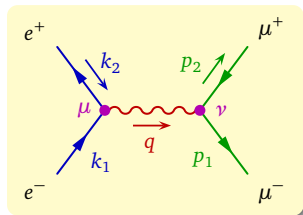
$$i\mathcal{M} = \bar{v}(k_2, \lambda_2)(ie\gamma^\mu)u(k_1, \lambda_1) \frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2} \times \bar{u}(p_1, \lambda'_1)(ie\gamma^\nu)v(p_2, \lambda'_2)$$



$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 散射振幅

🐎 右图为 QED 散射过程 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 的领头阶费曼图，利用费曼规则将它表达成**不变振幅**

$$i\mathcal{M} = \bar{v}(k_2, \lambda_2)(ie\gamma^\mu)u(k_1, \lambda_1) \frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2} \\ \times \bar{u}(p_1, \lambda'_1)(ie\gamma^\nu)v(p_2, \lambda'_2)$$



🐎 通常考虑没有极化的初态，需对初态螺旋度**取平均**，即 $\frac{1}{2} \sum_{\lambda_1} \frac{1}{2} \sum_{\lambda_2}$ ；对末态螺旋度则通过**求和**包括所有情况，即 $\sum_{\lambda'_1} \sum_{\lambda'_2}$ 。因而**非极化振幅模方**为

$$\frac{1}{4} \sum_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda'_1 \lambda'_2} |\mathcal{M}|^2 = \frac{e^4}{4q^4} \sum_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda'_1 \lambda'_2} [\bar{v}(k_2, \lambda_2)\gamma^\mu u(k_1, \lambda_1)\bar{u}(k_1, \lambda_1)\gamma^\rho v(k_2, \lambda_2) \\ \times \bar{u}(p_1, \lambda'_1)\gamma_\mu v(p_2, \lambda'_2)\bar{v}(p_2, \lambda'_2)\gamma_\rho u(p_1, \lambda'_1)] \\ = \frac{e^4}{4q^4} \text{Tr}[(\not{k}_2 - m_e)\gamma^\mu(\not{k}_1 + m_e)\gamma^\rho] \text{Tr}[(\not{p}_1 + m_\mu)\gamma_\mu(\not{p}_2 - m_\mu)\gamma_\rho]$$

🍀 每个电磁相互作用顶点贡献一个耦合常数 e ，故 $\mathcal{M} \propto e^2$ ， $|\mathcal{M}|^2 \propto e^4$

$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 散射截面



对狄拉克矩阵乘积作求迹运算，得

$$\frac{1}{4} \sum_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda'_1 \lambda'_2} |\mathcal{M}|^2 = \frac{8e^4}{q^4} [(k_1 \cdot p_1)(k_2 \cdot p_2) + (k_1 \cdot p_2)(k_2 \cdot p_1) + m_e^2(p_1 \cdot p_2) + m_\mu^2(k_1 \cdot k_2) + 2m_e^2 m_\mu^2]$$



在**质心系**中，设 \mathbf{p}_1 与 \mathbf{k}_1 的夹角为 θ ，则 \mathbf{p}_2 与 \mathbf{k}_2 的夹角也为 θ ，有

$$q^2 = (k_1 + k_2)^2 = (p_1 + p_2)^2 = s, \quad k_1 \cdot k_2 = \frac{s}{2} - 2m_e^2, \quad p_1 \cdot p_2 = \frac{s}{2} - 2m_\mu^2$$

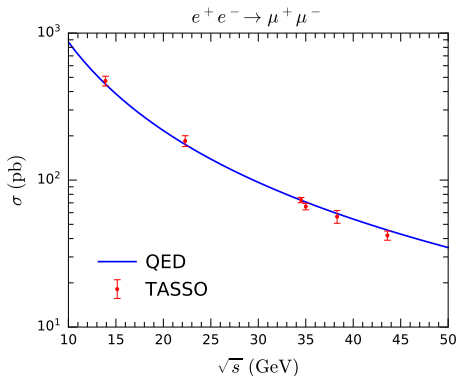
$$k_1 \cdot p_1 = k_2 \cdot p_2 = \frac{s}{4}(1 - \beta_e \beta_\mu \cos \theta), \quad k_1 \cdot p_2 = k_2 \cdot p_1 = \frac{s}{4}(1 + \beta_e \beta_\mu \cos \theta)$$

其中 $\beta_e \equiv \sqrt{1 - 4m_e^2/s}$ ， $\beta_\mu \equiv \sqrt{1 - 4m_\mu^2/s}$ ，从而**散射截面**为

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2E_A 2E_B |\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B|} \int d\Omega_1 \frac{|\mathbf{p}_1|}{(2\pi)^2 4E_{\text{CM}}} \frac{1}{4} \sum_{s_1 s_2 s'_1 s'_2} |\mathcal{M}|^2 \\ &= \frac{\alpha^2 \beta_\mu}{4s \beta_e} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi d\theta \sin \theta \left[1 + \beta_e^2 \beta_\mu^2 \cos^2 \theta + \frac{4(m_e^2 + m_\mu^2)}{s} \right] \\ &= \frac{4\pi \alpha^2 \beta_\mu}{3s \beta_e} \left(1 + \frac{2m_e^2}{s} \right) \left(1 + \frac{2m_\mu^2}{s} \right) \end{aligned}$$

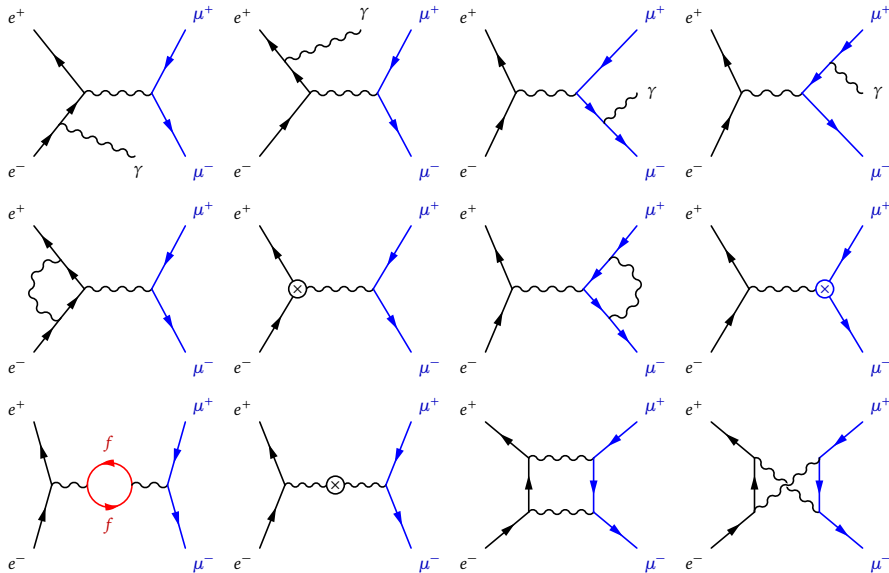
与实验数据对比

将 $\alpha = 1/137.036$ 、 $m_\mu = 105.658$ MeV、 $m_e = 0.510999$ MeV 代入以上公式，得到 **QED 领头阶** 预言的 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 散射截面



✨ 1988 年，德国 DESY 研究中心 PETRA 对撞机上的 **TASSO 探测器** 测量了多个质心能 \sqrt{s} 处的 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 散射截面数据，与 QED 预言比较符合

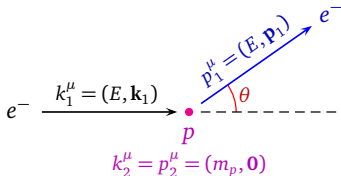
$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 过程 QED 次领头阶费曼图



库仑散射 $e^-p \rightarrow e^-p$

🐼 在**非相对论性**的**经典物理学**中，如果电子动量远小于 m_p ，则可取 $m_p \rightarrow \infty$ 的**极限**，从而质子在散射前后都是**静止**的，初末态电子的运动速率相同，记为 v ，运动方向相差**散射角** θ ，那么库仑力引起的微分散射截面为

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4m_e^2 v^4 \sin^4(\theta/2)} \quad (\text{卢瑟福公式})$$



库仑散射 $e^-p \rightarrow e^-p$

🐼 在**非相对论性**的**经典物理学**中，如果电子动量远小于 m_p ，则可取 $m_p \rightarrow \infty$ 的**极限**，从而质子在散射前后都是**静止**的，初末态电子的运动速率相同，记为 v ，运动方向相差**散射角** θ ，那么库仑力引起的微分散射截面为

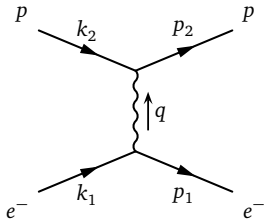
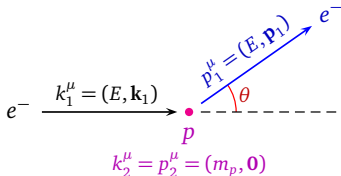
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4m_e^2 v^4 \sin^4(\theta/2)} \quad (\text{卢瑟福公式})$$

🐼 **QED 理论**会修正这条公式

● 当**能标远小于** m_p 时，质子在相互作用过程中就像没有结构的**点粒子**一样，此时可以用旋量场描述质子，并使用 $Q_p = +1$ 的 QED 相互作用顶点

● QED 领头阶给出的**非极化振幅模方**为

$$|\overline{\mathcal{M}}|^2 = \frac{8e^4}{(q^2)^2} [(k_1 \cdot p_2)(p_1 \cdot k_2) + (k_1 \cdot k_2)(p_1 \cdot p_2) - m_p^2(k_1 \cdot p_1) - m_e^2(p_2 \cdot k_2) + 2m_e^2 m_p^2]$$



莫特公式

在 $m_p \rightarrow \infty$ 的极限下，初末态电子的能量相等，记为 E ，初末态电子的动量大小也相等，记为 $Q \equiv |\mathbf{k}_1| = |\mathbf{p}_1| = \sqrt{E^2 - m_e^2}$ ，初末态电子的运动速率为 $v = Q/E = \sqrt{1 - m_e^2/E^2}$

故 $k_1 \cdot p_1 = E^2(1 - v^2 \cos \theta)$, $k_2 \cdot p_2 = m_p^2$

$$k_1 \cdot p_2 = p_1 \cdot k_2 = k_1 \cdot k_2 = p_1 \cdot p_2 = m_p E$$

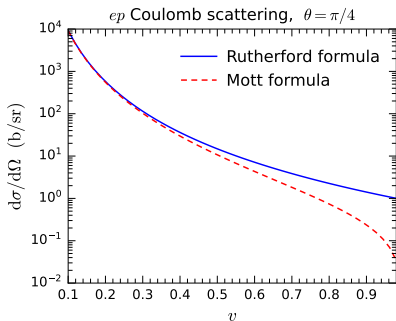
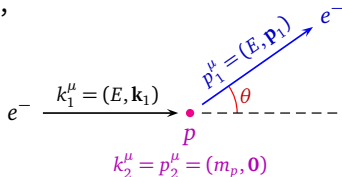
$$q^2 = -2Q^2(1 - \cos \theta)$$

由此得到 **QED 领头阶**微分散射截面

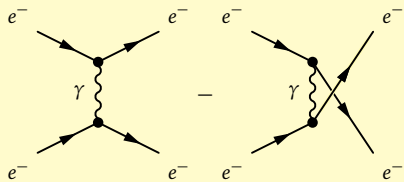
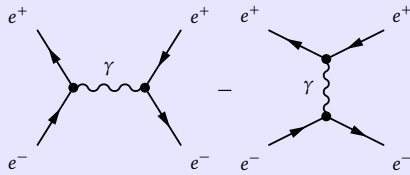
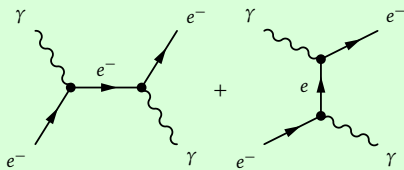
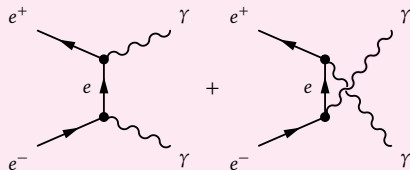
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2 [1 - v^2 \sin^2(\theta/2)]}{4v^2 Q^2 \sin^4(\theta/2)} \quad (\text{莫特公式})$$

在非相对论极限下， $v \ll 1$, $Q \simeq m_e v$,

莫特公式退化为卢瑟福公式



其它 QED 两体散射过程

穆勒散射 $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$ 巴巴散射 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 康普顿散射 $e^-\gamma \rightarrow e^-\gamma$  e^+e^- 湮灭到双光子 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

初末态相同的过程可以具有多个费曼图，它们对应的振幅之间相互干涉

康普顿散射

🐮 电子与光子的散射过程 $e^-\gamma \rightarrow e^-\gamma$ 称为**康普顿散射**

✨ 1923 年，康普顿发现 X 射线照射核外电子之后波长变长。他用的 X 射线光子能量约为 17 keV，远大于原子结合能，核外电子可看作**自由**的

★ 在**实验室系**中，初态电子静止，初态光子通过散射将能动量传递给末态电子；在自然单位制下，光子的能量 E 等于它的**圆频率** ω ，即 $E = \hbar\omega = \omega$ ，而波长 λ 与圆频率的关系为 $\lambda = 2\pi c/\omega = 2\pi/\omega$

康普顿散射

🐮 电子与光子的散射过程 $e^-\gamma \rightarrow e^-\gamma$ 称为**康普顿散射**

✨ 1923 年，康普顿发现 X 射线照射核外电子之后波长变长。他用的 X 射线光子能量约为 17 keV，远大于原子结合能，核外电子可看作**自由的**

★ 在**实验室系**中，初态电子静止，初态光子通过散射将能动量传递给末态电子；在自然单位制下，光子的能量 E 等于它的**圆频率** ω ，即 $E = \hbar\omega = \omega$ ，而波长 λ 与圆频率的关系为 $\lambda = 2\pi c/\omega = 2\pi/\omega$

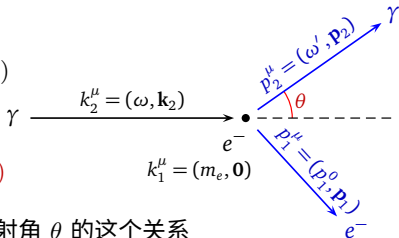
$$\begin{aligned} \text{🌙 } m_e^2 &= p_1^2 = (k_1 + k_2 - p_2)^2 \\ &= m_e^2 + 2m_e(\omega - \omega') - 2\omega\omega'(1 - \cos\theta) \end{aligned}$$

$$\text{👉 } m_e(\omega - \omega') = \omega\omega'(1 - \cos\theta)$$

$$\text{👉 } \Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{2\pi}{\omega'} - \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{m_e}(1 - \cos\theta)$$

☀️ 康普顿在实验中证实了波长变化 $\Delta\lambda$ 与散射角 θ 的这个关系

👉 为**光的粒子性**提供了强有力的支持

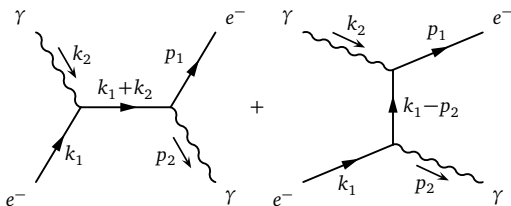


康普顿散射截面

🐷 对于低能电磁辐射与电子散射的过程，汤姆逊根据**经典电磁学**推导出微分散射截面

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{\pi\alpha^2}{m_e^2} (1 + \cos^2\theta)$$

(汤姆逊公式)



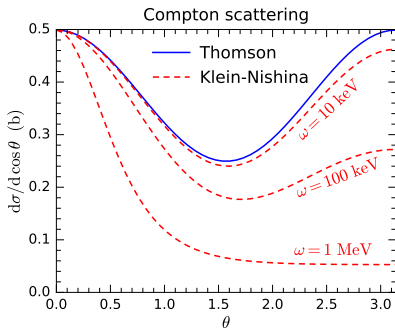
🐻 **QED 领头阶**给出的非极化振幅模方为

$$|\overline{\mathcal{M}}|^2 = 2e^4 \left[\frac{Y}{X} + \frac{X}{Y} + 2m_e^2 \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{Y} \right) + m_e^4 \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{Y} \right)^2 \right]$$

$$X \equiv k_1 \cdot k_2, \quad Y \equiv k_1 \cdot p_2$$

👉
$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{\pi\alpha^2\omega'^2}{m_e^2\omega^2} \left(\frac{\omega'}{\omega} + \frac{\omega}{\omega'} - \sin^2\theta \right)$$

(克莱因-仁科公式)



e^+e^- 湮灭到双光子

🐼 对于 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ ，设质心系中某个末态光子与初态电子运动方向的夹角为 θ ，

QED 领头阶给出的微分散射截面为

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{s\beta_e} \left[\frac{1 + \beta_e^2 \cos^2 \theta}{1 - \beta_e^2 \cos^2 \theta} + \frac{8m_e^2}{s(1 - \beta_e^2 \cos^2 \theta)} - \frac{32m_e^4}{s^2(1 - \beta_e^2 \cos^2 \theta)^2} \right]$$

💥 1983 年，PETRA 对撞机上的 JADE 探测器测量了 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 微分散射截面，与 QED 符合得比较好

