原子离子 K 壳层双光子扫掠中的非偶极效应

A.N. Hopersky、A.M. Nadolinsky、S.A. Novikov和R.V. Koneev

罗斯托夫国立交通大学，俄罗斯，顿河畔罗斯托夫，344038。电子邮箱：
qedhop@mail.ru, amnrnd@mail.ru, sanovikov@gmail.com, koneev@gmail.com

摘要。 本文 [1], 在偶极近似下，采用辐射跃迁算符、二阶非相对论量子微扰理论和 Hartree-Fock 单组态近似，首次对轻氖原子直接双光子扫掠K壳层的广义截面进行了理论研究。在本通讯中，我们在预印本[2] 的基础上，补充了在构建非偶极效应下连续谱态之间辐射跃迁概率振幅时所得到的结果。主要结果是发现非偶极效应会使原子离子（Fe^{16+}）K 壳层双光子扫掠的广义截面，相较于在偶极近似下计算所得的值，降低数个数量级（巨大非偶极效应）。

为避免重复预印本 [2], 中的内容（保留各项结论的编号），我们仅重述并补充第 2.4 节和第 3 节中有关部分广义截面（未探测到光电子时光子消失的概率）的结果：

$$\sigma_g^{(pp)} \cong \frac{2\pi}{\gamma_{1s}} \cdot \mu \cdot [\omega + I(1s^{-2}) - 2I_{1s}]^2 \cdot \left(\frac{4}{3} - \frac{1}{4\pi}\right) \cdot L^2, \tag{41}$$

$$\mu = \frac{8\pi^3}{9V} \cdot \alpha \cdot r_0^2 (a_0 c\hbar)^2 = 0.278 \cdot 10^{-52}\ [\mathrm{cm}^4 \cdot \mathrm{s}], \tag{42}$$

$$L = N_{sp} \langle 1s_0 \| \hat{r} \| \varepsilon p_+ \rangle \langle 1s_+ | \hat{r} | \varepsilon p_{++} \rangle, \tag{43}$$

$$\sigma_g^{(ss)} = \mu K^2 \cdot J, \tag{44}$$

$$K = N_{sp} \cdot \frac{\omega\sqrt{2\varepsilon}}{\gamma_{1s}^2} \langle 1s_0 \| \hat{r} \| \varepsilon p_+ \rangle, \tag{45}$$

$$J = \frac{a}{3} \cdot [8 f^2(a/2) + (f(0) + f(a))^2], \tag{46}$$

$$\sigma_g^{(sd)} = \frac{6}{5}\left(1 - \frac{1}{4\pi}\right) \cdot \sigma_g^{(ss)}, \tag{47}$$

其中 是精细结构常数， 是电子经典半径， 是玻尔半径，且 。 r_0 a_0

)=2ω− 1 −2(sI

让我们来分析 K（公式 (45)）在 偶极近似之外的解析结构。由 [2] 得到的跃迁概率振幅 (28) 是在偶极近似下针对辐射跃迁算符求得的。对于矩阵元而言，严格来说，这种近似并不正确。事实上，在这种情况下， $\hat{R}$ $\langle$ $\rangle$

不存在跃迁态波函数的“局域区域”这一概念，其范围小于吸收光子的波长。超越偶极近似，可通过将算符 （式 7）分解为[2] 关于多极[3-5]的无穷函数级数来实现。将这一分解变换为[多极哈密顿相互作用 $\hat{A}_{\eta}$ 的积分表示[5] (第 5 章，第 5.2 节），再通过电场算符与电磁场算符在 $t = 0$] 处的联系，我们假定辐射跃迁[6, 7] 中单电子算符在以下情形下的乘积近似连续谱态：

=−1 ∂ ∂/)/(

$$\hat{r}, r \in [0;\infty) \to \hat{D} = \begin{cases} \hat{r}, r \in [0; q), \\ q, r \in [q; \infty), \end{cases} \tag{48}$$

其中，幅值仅取决于吸收光子的能量，结果恰好是«停止点»，即无限增长的算符。然后，将 (48) 代入来自[2], 函数K，通过代入以下内容进行修改：$\hat{r}$

$$)(\Psi\ \omega KK \to, \tag{49}$$

$$\Psi(\omega) = 1 - \exp\{-(\gamma_{1s} / \sqrt{2\varepsilon})q\}, \tag{50}$$

计算结果如图2、图3所示。广义截面参数取以下数值： = 1.046 电子伏特， = 7699.23 电子伏特， = 15811.77 电子伏特和 Γ_{1s}(6; 100) 千电子伏特。

根据图 2，在偶极近似之外，K壳层双光子扫掠广义截面之比的数量级如下：

$$(\sigma_g^{(ss)} + \sigma_g^{(sd)}) / \sigma_g^{(pp)} \cong 10^6. \tag{51}$$

式 (51) 的结果用费曼图形式表示时，可作如下物理解释。根据图 1b，第一个光子在时刻将 K-壳层电离至连续谱的虚–态。第二个光子在时刻被$t_2 > t_1$ 连续谱–“云”–吸收。此时，库仑斥力产生的连续谱态会将剩余的 1s电子从 K壳层中弹射至同对称性的–连续态（见重叠积分）。这一过程比第二个光子自由通过“云”，随后被剩余的 K壳层–电子吸收的过程（图 1a）更可能发生。

根据图 3，对于 超出偶极近似的情况，双光子扫掠与双光子单电离的广义截面之比具有以下数量级，其中原子的 K壳层的结果为：

$$(\sigma_g^{(ss)} + \sigma_g^{(sd)} + \sigma_g^{(pp)}) / (\sigma_g^{(s)} + \sigma_g^{(d)}) \cong 10^3. \tag{52}$$

结果 (52) 可以作如下物理解释。将 K 壳层剩余的电子电离至连续谱的–连续谱态的概率，高于该电子（1s–电子）未被“察觉”的概率（见图 3 中的背景区段）。

结果 (52) 在定性上再现了文献 [1] 的结果。我们指出以下几点。在 [8]，中，对氖原子 K 壳层的双光子双电离广义截面 ~ 10^{-53} (cm^4·s) 在 ≈ 1 千电子伏特处进行了估算，其数值远小于文献 [1] 中的数值 ~ 10^{-49} (cm^4·s)。文献 [1] 给出的广义截面是在偶极近似下针对–算符得到的。考虑非偶极效应 [（见式 (49)）] 后，结果与文献 [8] 一致。同时，文献 [8] 并未说明如何处理–算符与连续谱跃迁态之间的矩阵元（要与文献 [1] 的数学形式进行详细比较）。可以认为，文献中的近似 ($\hat{R}$ 48 [6, 7]

首次用于对原子离子 K 壳层双光子扫掠效应进行理论描述。

因此，在计算 K 壳层双电离的 ss（$^1S_0$）和 sd（$^1D_2$）通道（见图 1b）的广义截面时，发现了巨大的非偶极效应（见图 2b、c 和图 3）。

参考文献
[1] S.A. Novikov 和 A.N. Hopersky，《J. Phys B》**35**，L339 (2002)。[2] A.N. Hopersky 等，arXiv: 2512.22896v1 [physics. atom-ph]。 [3] M.E. Rose，多极场（纽约：John Wiley and Sons，1955）。[4] R.H. Pratt、A. Ron 和 H.K. Tseng，《现代物理评论》**45**，273 (1973)。[5] R. Loudon，光的量子理论。第 2 版（Clarendon，英国牛津，1983）。[6] Y. Komninos、T. Mercouris 和 C.A. Nicolaides，《物理评论A》**65**，043412 (2002)。[7] Y. Komninos、T. Mercouris 和 C.A. Nicolaides，《物理评论A》**86**，023420 (2012)。[8] N. Rohringer 和 R. Santra，《物理评论A》**76**，033416 (2007)。

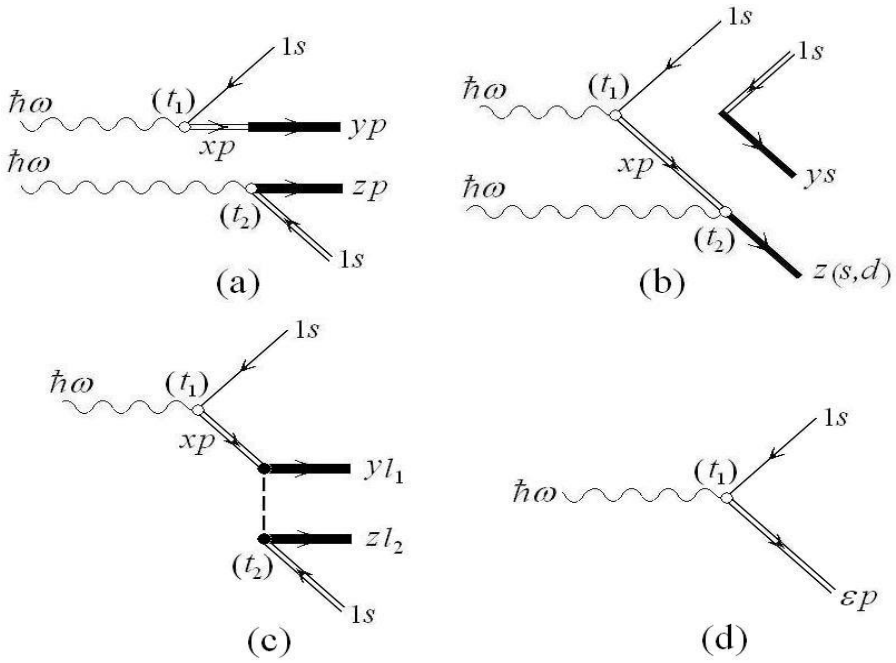

图1。类氖原子离子（Fe^{16+}）K壳层的双光子和单光子电离的概率幅，以（非相对论）费曼图表示：（a）通道（1）上从[2] 到的跃迁；（b）通过通道（1），从[2] 到的跃迁；（c）经由通道到的跃迁；（d）在通道上，。向左的箭头表示空穴，向右的箭头表示电子。双线（宽黑线）——这些态是在一个（两个）→空穴的 Hartree-Fock场中得到的。双线与宽黑线的交点对应于重叠积分（，

$\varepsilon = \hbar\omega -$

$1s$

$\langle xp | yp \rangle$

$\langle 1s | ys \rangle$ 虚线——库仑相互作用。空心圆表示辐射跃迁的顶点。时间方向从左向右（）。为吸收光子的能量。

$\hbar\omega$

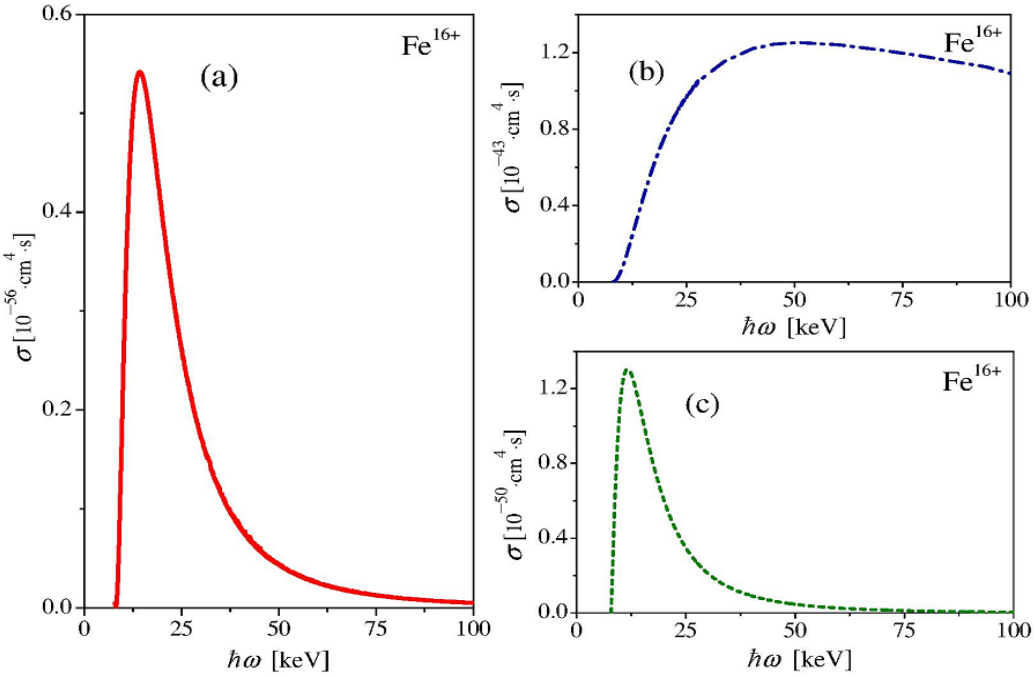

图2. Fe^{16+}离子K壳层双光子双电离的部分广义截面：a——沿通道(1)，从[2] 开始（见图1a）；b（c）——通过通道(1)

ppll

从 [2] 开始（见图1b）；^{1,2} 分别在偶极（非偶极）近似下，对于- $\hat{R}$ 算符。是吸收光子的能量。

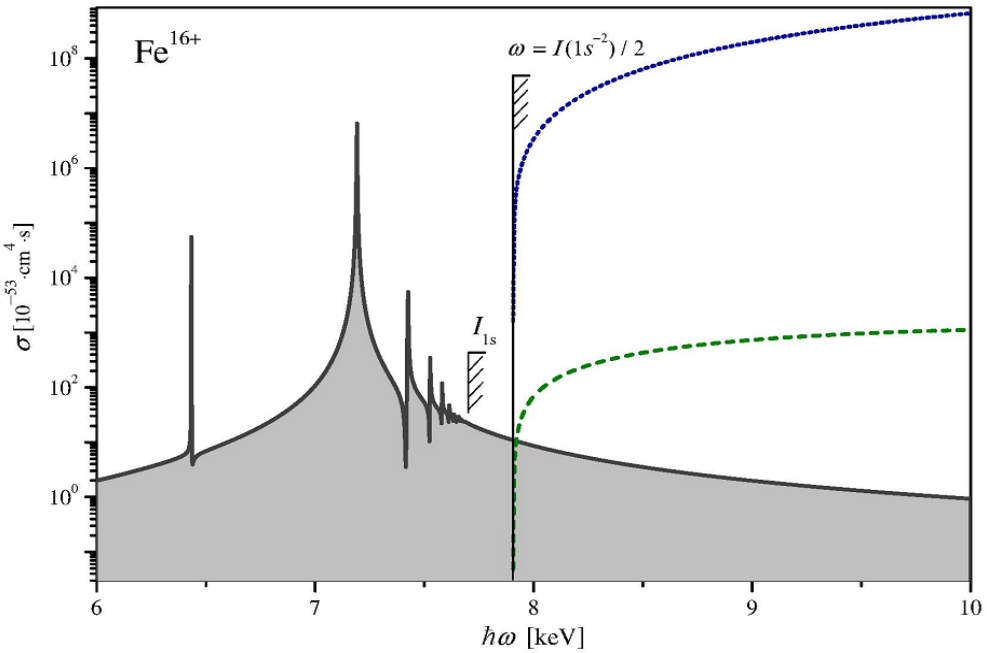

图3. Fe^{16+} 离子K壳层双光子双电离的总广义截面（按通道（1）来自[2]；图2）：点线（虚线）曲线——偶极（非偶极）

-算符近似。A Fe单电离的广义截面$^{16+}$ 离子在 千电子伏特时的数值给出为 背景。是吸收光子的能量。 是1s 壳层的电离阈能。 是形成空 K壳层的阈值能量。

I_{1s}