

# 利用光核反应对激光等离子体中超热电子温度 诊断的理论研究\*

赵家瑞<sup>1)2)</sup> 于全芝<sup>2)†</sup> 梁天骄<sup>2)</sup> 陈黎明<sup>2)</sup> 李玉同<sup>2)</sup> 国承山<sup>1)</sup>

1) (山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

2) (中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 光物理重点实验室, 北京 100190)

(2012年7月5日收到; 2012年12月6日收到修改稿)

超短超强激光与等离子体相互作用可以产生高能的超热电子, 利用光核反应的方法可以对这部分超热电子的温度进行诊断. 本文通过粒子输运程序 (MCNP), 模拟了超热电子通过韧致辐射产生  $\gamma$  光子,  $\gamma$  光子再分别与  $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{12}\text{C}$  等活化材料发生光核反应的物理模型, 并根据核素的活化截面数据, 计算了不同活化片的放射性活度, 得到了  $^{11}\text{C}/^{62}\text{Cu}$ ,  $^{11}\text{C}/^{106}\text{Ag}$  活度比与电子温度关系曲线, 采用理论模拟的方法实现了激光等离子体产生的超热电子的温度诊断.

**关键词:** 超热电子, 韧致辐射光子, 光核反应, MCNP 程序

**PACS:** 25.20.-x, 02.70.Uu, 14.60.Cd, 23.20.Nx

**DOI:** 10.7498/aps.62.072501

## 1 引言

近年来, 随着激光技术尤其是啁啾脉冲放大技术<sup>[1]</sup> (chirped-pulse amplification) 的发展, 高功率激光装置不断建立<sup>[2]</sup>. 高强度激光与等离子体相互作用, 能够产生高能量、高通量的超热电子, 这部分电子在惯性约束核聚变的“快点火”方案<sup>[3]</sup>、粒子束成像<sup>[4]</sup> 和台面粒子加速器<sup>[5]</sup> 等方面有着广泛的应用前景.

激光等离子体相互作用产生的超热电子, 通常服从麦克斯韦分布或准麦克斯韦分布<sup>[6]</sup>. 对这部分超热电子的能谱、角分布、产额、发散角以及电子温度等信息的诊断, 通常是采用磁谱仪等传统诊断设备完成的<sup>[7-10]</sup>. 随着激光等离子体产生的电子能量、通量的不断增大, 这些传统的诊断设备在空间分布、量程以及分辨率等方面表现出一定的局限性, 光核反应诊断方法应运而生.

光核反应是利用激光等离子体产生的高能电子, 与韧致辐射材料相互作用产生  $\gamma$  光子, 当  $\gamma$  光

子的能量超过活化材料的核反应阈值, 将与活化材料发生核反应, 产生放射性核素, 通过对放射性核素特征射线的测量, 并借助核反应截面数据库, 可以反推源电子的能谱、温度、角分布等信息. 该方法的特点是可以根据具体的实验条件, 灵活地选择活化材料, 合理地控制活化片的尺寸和空间位置, 对超热电子进行大空间尺度积分测量, 完成对激光等离子体产生的超热电子温度、能谱、角分布等信息的测量.

光核反应的研究由来已久. 激光诱发核裂变反应的想法最早是在 1988 年第一次被提出<sup>[11]</sup>, 并于 2000 年从实验上通过对  $^{238}\text{U}$  的测量得到证实<sup>[12]</sup>. 在高强度激光等离子体实验中, 光核反应已经成功的应用于  $\gamma$  射线能谱和角分布的测量<sup>[13]</sup>. 本世纪初, Ledingham 领导的课题组, 在卢瑟福实验室的 VULCAN 激光装置上进行了激光等离子体相互作用的实验诊断<sup>[14]</sup>, 通过韧致辐射产生的高能  $\gamma$  光子诱发光核反应, 测量了放射性核素的活化强度和半衰期, 并计算得到了  $^{11}\text{C}/^{62}\text{Cu}$  活度比与电子温度之间的关系曲线<sup>[15]</sup>. Santala 等人通过光核反

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11075203, 10925421, 10974249) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: qzhyu@aphy.iphy.ac.cn

应 $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$ , 对韧致辐射角分布与等离子体标长度之间的关系进行了研究<sup>[16]</sup>. Malka 等人用 $^{63}\text{Cu}$ 和 $^{12}\text{C}$ 两种活化片测得了激光等离子体产生电子的角分布信息<sup>[17]</sup>. 基于 $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ ,  $^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178}\text{Ta}$ 两种光核反应, Spencer 等人在实验中得到了电子能谱与电子温度等信息<sup>[18]</sup>. Gerbaux 等人将 $^{63}\text{Cu}$ 活化片用不同的方式组合, 分别测量了激光等离子体产生的电子的通量和角分布信息<sup>[19]</sup>. 徐妙华等人运用 MCNP 程序 (Monte-Carlo N-particle Transport Code<sup>[20]</sup>) 计算得到了靶后的韧致辐射  $\gamma$  光谱, 通过对其做指数拟合反推得到了超热电子的温度<sup>[21]</sup>. 另外, 光核反应在核废料处理方面的应用引起了人们的兴趣, 通过韧致辐射产生的  $\gamma$  射线来诱导光核反应, 可以使长半衰期的核废料转化为半衰期较短或者稳定的同位素<sup>[22]</sup>.

本文通过 MCNP 程序, 结合不同材料的光核反应截面, 在不同电子温度条件下对不同活化片的放射性活度比进行计算, 在理论上实现了对激光等离子体产生的超热电子温度的诊断.

## 2 理论模型

激光等离子体相互作用产生的超热电子具有准麦克斯韦分布

$$N(E) = C_0 \sqrt{E} e^{-\frac{E}{k_B T_e}}, \quad (1)$$

其中  $C_0$  为常数,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T_e$  为超热电子温度. 能量为  $E$  的电子穿过靶时经过碰撞、库仑偏转和减速, 产生韧致辐射  $\gamma$  光子.  $\gamma$  光子与活化材料发生光核反应, 产生放射性核素, 放射性核素通过  $\gamma$  衰变而退激到基态, 或者经过  $\alpha$  衰变、 $\beta$  衰变生成另一种稳定的核素, 这个过程通常伴随着放射线的产生.

放射性活度是指放射性元素或同位素每秒衰变的原子数, 目前放射性活度的国际单位为贝克勒尔 (Bq), 也就是每秒有一个原子发生衰变, 可表示为

$$A = -\frac{dN'}{dt} = A_0 e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t}, \quad (2)$$

其中  $dN'$  为放射性核素在  $dt$  时间内的衰变数,  $A_0$  为初始放射性活度值,  $T_{1/2}$  为核素的半衰期,  $e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t}$  为放射性活度随时间的衰变因子,  $t$  为打靶后的冷却时间. 实验中可以通过对放射线数目的测量来确定放射性活度, 也可以由此确定核素的半衰期等.

韧致辐射  $\gamma$  光子与活化材料发生光核反应产生放射性核素的活度可以由 (2) 式演化得到

$$A = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \sum_{E_\gamma} N(E_\gamma) \sigma(E_\gamma) N_0 e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t}, \quad (3)$$

其中  $E_\gamma$  为  $\gamma$  光子的能量,  $N(E_\gamma)$  为  $\gamma$  光子在能量  $E_\gamma$  处的光子数,  $\sigma(E_\gamma)$  为  $E_\gamma$  处光核反应截面,  $N_0$  为单位体积内 ( $\text{cm}^{-3}$ ) 活化材料的原子数目. 因此, 通过活化材料的放射性活度可以反映出源入射电子的部分参数信息.

## 3 电子温度诊断

### 3.1 韧致辐射靶的选取

激光等离子体相互作用产生的高能电子, 经过与靶材料相互作用, 产生韧致辐射  $\gamma$  光子,  $\gamma$  光子的产额、能谱与源电子的温度、靶材料的原子序数和靶厚度等都有直接的关系.  $\gamma$  光子与物质相互作用有三种机理: 光电吸收、康普顿散射和电子对产生.  $\gamma$  光子的部分或全部能量转化为被辐照物质电子的能量, 参加反应的  $\gamma$  光子或者完全消失, 或者以大角度被散射. 图 1 是通过 MCNP 程序, 分别对温度  $T_e = 3 \text{ MeV}$  和  $T_e = 6 \text{ MeV}$  的电子垂直入射不同厚度的钽靶 (Ta,  $Z = 73$ ) 得到的能量大于  $9.8 \text{ MeV}$  的靶后韧致辐射光子强度的比较. 从图 1 可以看出,  $T_e = 6 \text{ MeV}$  的电子比  $T_e = 3 \text{ MeV}$  的电子在靶后产生的韧致辐射光子强度大一个数量级, 这也验证了韧致辐射强度与入射电子温度之间的正比例关系<sup>[21]</sup>. 当靶厚度较小时, 电子在靶材中的韧致辐射过程不能完全展开, 韧致辐射强度随靶厚度的增加而增大; 当靶厚度大于最佳厚度值时,  $\gamma$  光子与物质相互作用的损耗大于韧致辐射  $\gamma$  光子的产生, 靶后测得韧致辐射强度呈逐渐下降的趋势. 在我们的计算中,  $T_e = 3 \text{ MeV}$  的电子束对应的钽靶最佳厚度为  $2.4 \text{ mm}$ ,  $T_e = 6 \text{ MeV}$  时对应的最佳厚度为  $2.5 \text{ mm}$ , 二者相差不大.

材料不同, 对应的韧致辐射最佳厚度也不同. 我们以温度为  $3 \text{ MeV}$  的电子入射, 分别计算了 C, Al, Cu, Ag, Ta, Au, Pb (对应的原子序数  $Z = 6, 13, 29, 47, 73, 79, 82$ ) 材料的韧致辐射最佳厚度以及最佳厚度对应的韧致辐射强度, 得到了如图 2 所示的结果. 由图 2 可以看出, 随着原子序数增大, 韧致辐射靶的最佳厚度逐渐减小, 而相应的韧致辐射强度呈现递增的趋势. 这可归因于高  $Z$  的靶材内原子数

密度较高, 碰撞截面比较大, 加之库仑场的增强, 使电子在靶材内的碰撞减速和偏转效应更为明显, 从而加大了韧致辐射的输出. 该计算结果为韧致辐射靶材料及靶厚度的选择提供了必要的依据.

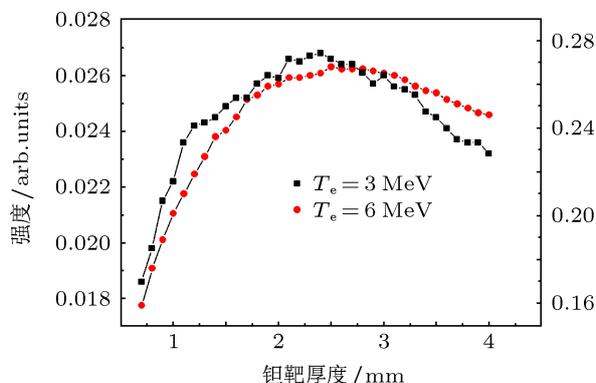


图1 温度为 3 MeV 与 6 MeV 电子入射不同厚度 Ta 靶得到的韧致辐射强度与靶厚度关系曲线

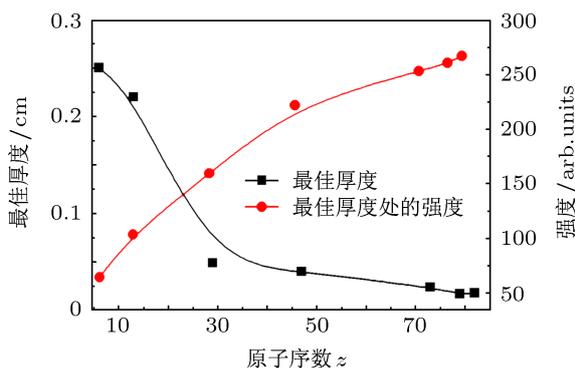


图2 入射电子温度为 3 MeV 时, C, Al, Cu, Ag, Ta, Au, Pb 材料韧致辐射靶的最佳厚度以及最佳厚度对应的韧致辐射强度值

### 3.2 活化片

物质在受到射线照射或者高速粒子碰撞时会产生一些概率不等的核反应, 如果它们的产物中有放射性核素, 这个过程就叫做活化. 光核反应过程可以看作一个活化过程. 我们利用核素的活化性质, 选择 $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{12}\text{C}$  作为活化材料, 对应的核反应道、核素性质如表 1 所示, 截面数据如图 3 所示.

$^{63}\text{Cu}$ ,  $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{12}\text{C}$  都是稳定核素, 当  $\gamma$  光子的能量大于它们的核反应阈值时, 可以分别发生 $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$ ,  $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ ,  $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$  反应, 产生的 $^{62}\text{Cu}$ ,  $^{106}\text{Ag}$ ,  $^{11}\text{C}$  都是放射性核素, 可以自发的发生  $\beta^+$  衰变, 而且衰变效率大于 99%,  $\beta^+$  电子在活化片中与自由电子发生正负电子对湮没, 发出两个能量为 511 keV 且运动方向相反的  $\gamma$  光子. 在

实验中可以通过标定过的  $\gamma$  探测器<sup>[16]</sup> 对该特征  $\gamma$  射线进行测量, 从而得到活化片的放射性活度. 从上面的分析中可以看出, 放射性活度一方面受入射光子能谱、数目的影响, 另一方面受活化材料的影响. 对活化材料的选择, 要根据具体的实验条件, 根据产生放射性核素的半衰期、衰变方式、核反应阈值、核反应截面等方面综合考虑.

表 1 相关光核反应数据

反应道	半衰期/min	阈值/MeV	截面峰值/mb	$\beta^+$ 衰变效率/%
$^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$	9.74	9.8	80.4	> 99
$^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$	23.96	9.4	160	> 99.5
$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$	20.33	18.2	7.2	> 99

### 3.3 电子温度计算

在 MCNP 程序中, 将满足麦克斯韦分布的温度分别为 2 MeV, 3 MeV, 4 MeV, 5 MeV, 6 MeV 的电子分别入射厚度为 2.4 mm 的钽靶, 在靶后统计得到韧致辐射  $\gamma$  光子的高能部分能谱, 如图 4 所示. 这部分高能的  $\gamma$  光子可以与 $^{63}\text{Cu}$  与 $^{12}\text{C}$ ,  $^{107}\text{Ag}$  等活化材料发生光核反应, 从而产生具有  $\beta^+$  衰变的放射性核素.

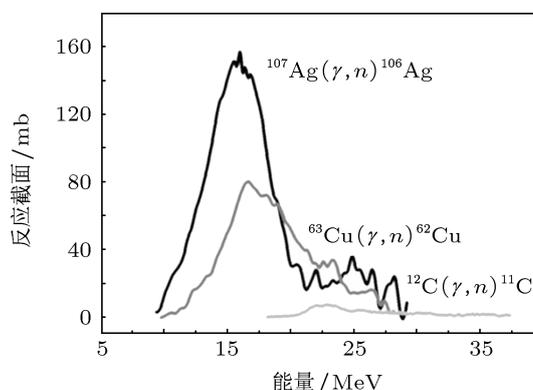


图3 核数据库<sup>[23]</sup> 给出的 $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{12}\text{C}$  的光核反应截面

由表 1 和图 3 可知, 不同活化片的核反应阈值、截面峰值和截面峰值对应的  $\gamma$  光子能量是各不相同的. 因此, 相同温度的  $\gamma$  光子与不同材料的活化片发生光核反应的放射性活度是不同的. 如果将同一束电子产生的韧致辐射  $\gamma$  光子先后经过两片不同材料的活化片, 可以计算出两片活化片的放射性活度比. 改变入射电子温度, 活化片的放射性活度比也随之改变. 也就是说, 入射电子温度与不同活化片的放射性活度比之间存在一一对应的关

系,知道了两个活化片的活度比,就可以反推出入射电子的温度.通过数值模拟计算得出这个关系曲线,也可以应用于激光等离子体的实验诊断中,即通过测量不同活化片的活度比来推知电子温度.如果所选活化材料产生的放射性核素半衰期较短,能够在激光的打靶发次之间获得电子温度,就能够可以实现对电子温度的准实时测量.

我们通过 $^{63}\text{Cu}$ 与 $^{12}\text{C}$ , $^{107}\text{Ag}$ 与 $^{12}\text{C}$ 两种活化片组合方式来得出 $^{11}\text{C}/^{62}\text{Cu}$ , $^{11}\text{C}/^{106}\text{Ag}$ 活度比与电子温度关系曲线.图5为以光核反应为基础的理论计算模型.激光与固体靶相互作用产生具有麦克斯韦分布的电子束,电子束从中心入射2.4 mm的Ta靶,在靶后产生的韧致辐射 $\gamma$ 射线先后照射厚度为3 mm的 $^{63}\text{Cu}$ , $^{12}\text{C}$ 活化片( $^{107}\text{Ag}$ , $^{12}\text{C}$ 活化片),通过蒙特卡罗程序自带的栅元通量计数卡 $F_4^{[24]}$ 分别对

两片活化片中的 $\gamma$ 光子能谱进行计算,将计算出的 $\gamma$ 能谱分别代入(3)式,取冷却时间 $t$ 为20 min,求得每片活化片的放射性活度,得到放射性活度比.

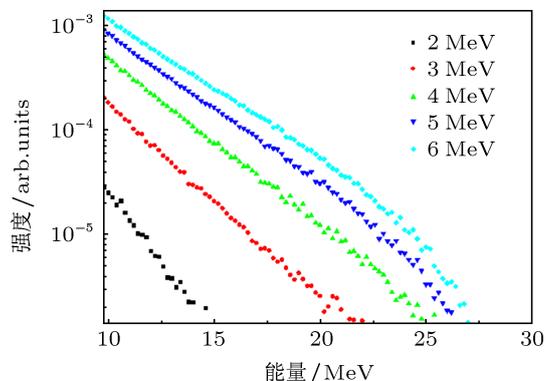


图4 电子温度分别为2 MeV, 3 MeV, 4 MeV, 5 MeV, 6 MeV 入射2.4 mm 钽靶在靶后的韧致辐射谱

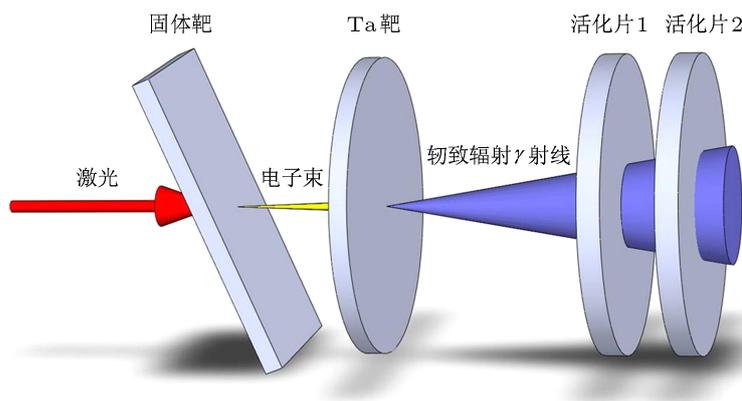


图5 理论计算模型

在MCNP程序的输入文件中,对图5中的活化片1和活化片2分别取 $^{63}\text{Cu}$ 和 $^{12}\text{C}$ 材料,入射电子温度在2 MeV与6 MeV之间依次取值,得到的 $^{11}\text{C}/^{62}\text{Cu}$ 活度比与电子温度曲线如图6(a)所示,此曲线的意义在于当实验中获得两种不同材料的活度比时,可以推知电子温度.图6(b)为对活化片1和活化片2分别取 $^{107}\text{Ag}$ 和 $^{12}\text{C}$ 材料,得到的 $^{11}\text{C}/^{106}\text{Ag}$ 活度比与电子温度曲线.由图6可以看出,在温度 $T_e$ 为2—2.5 MeV时曲线的斜率明显高于温度 $T_e$ 为2.5—6 MeV时的斜率.这一结果的产生可以由光核反应截面来解释:在电子温度为2—2.5 MeV时,韧致辐射光子能量主要集中在小于20 MeV的能段(如图4所示),由于 $^{12}\text{C}$ 的光核反应阈值为20.33 MeV,随着电子温度的升高,发生

光核反应的 $^{12}\text{C}$ 原子数显著增加,而此过程中 $^{63}\text{Cu}$ 与 $^{107}\text{Ag}$ 发生光核反应的原子数增加量相对较小,因此,得到的曲线斜率较高;随着电子温度进一步增大到2.5—6 MeV时,发生光核反应的原子数增加量趋于稳定,曲线趋于平缓.

### 3.4 讨论

我们从理论上对光核反应诊断方法进行了分析,为该方法在激光等离子体的实验诊断中的应用提供了理论基础.在光核反应计算模型中,我们选择了 $^{63}\text{Cu}$ , $^{107}\text{Ag}$ , $^{12}\text{C}$ 材料作为活化片,它们在经过高能韧致辐射 $\gamma$ 光子照射时可以产生能量为511 keV的 $\gamma$ 光子.在实验中,对 $\gamma$ 射线的探测通

常采用高纯锗探测器<sup>[18]</sup>或NaI闪烁体探测器<sup>[16]</sup>。高纯锗探测器具有较高的光谱分辨率,但价格比较昂贵,NaI闪烁体探测器对511 keV  $\gamma$ 光子有较高的探测效率,其价格相对较低,已成为许多实验室的重要测量设备,因此,我们将在实验中选择标定过的NaI闪烁体探测器作为 $\gamma$ 射线诊断设备。

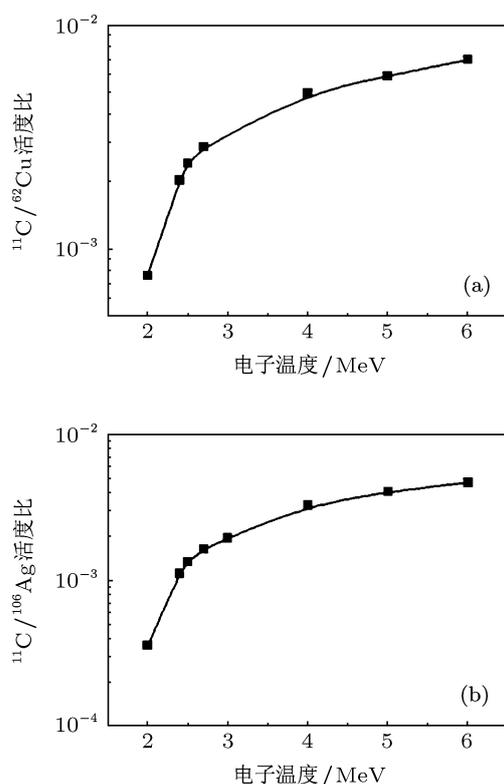


图6 (a) $^{11}\text{C}/^{62}\text{Cu}$  活度比与电子温度曲线; (b) $^{11}\text{C}/^{106}\text{Ag}$  活度比与电子温度曲线

我们在计算中默认活化片的纯度为100%,这

在现实中是很难满足的,通常活化片本身会掺有杂质,并且还会受到空气的潮解和氧化等化学因素的影响,这些因素都会使活化片的纯度降低,这将可能造成在高能 $\gamma$ 光子辐照时,产生其他的放射性核素,导致对活化片的放射性活度测量不准确。另外,我们根据实验条件预评估的打靶冷却时间为20 min,这也提醒我们在活化材料的选择上,特别注意产生核素的半衰期要在20 min左右,太大或太小也会影响测量的准确程度。同时要在激光等离子体实验中,尽可能的控制冷却时间在20 min附近,以减小测量误差。将光核反应诊断方法应用于激光等离子体实验,不仅可以实现超热电子温度的诊断还可以对电子的能谱、角分布等信息进行诊断,我们将在接下来的工作中结合实验逐步开展。

## 4 结论

本文选择了钽靶作为韧致辐射靶,计算得出了入射电子温度为3 MeV和6 MeV时,韧致辐射最佳厚度在2.4 mm附近,根据活化片选择原则,采用 $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{12}\text{C}$ 材料作为活化片,通过MCNP程序模拟了温度为2—6 MeV的超热电子经过2.4 mm钽靶产生的高能 $\gamma$ 光子,再分别与厚度为3 mm的 $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{12}\text{C}$ ( $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{12}\text{C}$ )活化片发生光核反应的过程,从理论上计算得到了 $^{11}\text{C}/^{62}\text{Cu}$ ( $^{11}\text{C}/^{106}\text{Ag}$ )活度比与电子温度关系曲线,实现了利用光核反应对激光等离子体的电子温度的诊断。该方法与传统探测手段互相结合、优势互补,实现对高能电子的核反应诊断。

- [1] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **56** 219
- [2] Bahk S W, Rousseau P, Planchon T, Chvykov V, Kalintchenko G, Maksimchuk A, Mourou G, Yanovsky V 2004 *Opt. Lett.* **29** 2837
- [3] Tabak M, Hammer J, Glinsky M E, Kruer W L, Wilks S C, Woodworth J, Campbell E M, Perry M D, Mason R J 1994 *Phys. Plasmas* **1** 1626
- [4] Zhang L, Chen L M, Yuan D W, Yan W C, Wang Z H, Liu C, Shen Z W, Faenov A, Pikuz T, Skobelev I, Gasilov V, Boldarev A, Mao J Y, Li Y T, Dong Q L, Lu X, Ma J L, Wang W M, Sheng Z M, Zhang J 2011 *Opt. Express* **19** 25812
- [5] Geddes C G R, Toth C, Tilborg J V, Esarey E, Schroeder C B, Bruhwiler D, Nieter C, Cary J, Leemans W P 2004 *Nature* **431** 538k
- [6] Zhang L, Chen L M, Wang W M, Yan W C, Yuan D W, Mao J Y, Wang Z H, Liu C, Shen Z W, Faenov A, Pikuz T, Li D Z, Li Y T, Dong Q L, Lu X, Ma J L, Wei Z Y, Sheng Z M, Zhang J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 014104
- [7] Chen L M, Zhang J, Li Y T, Teng H, Liang T G, Sheng Z M, Dong Q L, Zhao L Z, Wei Z Y, Tang X W 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 225001
- [8] Mao J Y, Chen L M, Ge X L, Zhang L, Yan W C, Li D Z, Liao G Q, Ma J L, Huang K, Li Y T, Lu X, Dong Q L, Wei Z Y, Sheng Z M, Zhang J 2012 *Phys. Rev. E* **85** 025401
- [9] Li Y T, Zhang J, Sheng Z M, Zheng J, Chen Z L, Kodama R, Matsuok T, Tamp M, Tanak K A, Tsutsum T, Yabuuch T 2004 *Phys. Rev. E* **69** 36405
- [10] Dong K G, Gu Y Q, Zhu B, Wu Y C, Cao L F, He Y L, Liu H J, Hong W, Zhou W M, Zhao Z Q, Jiao C Y, Wen X L, Zhang B H, Wang X F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8733 (in Chinese) [董克功, 谷渝秋, 朱斌, 吴玉迟, 曹磊峰, 何颖玲, 刘红杰, 洪伟, 周维民, 赵宗清, 焦春晖, 温贤伦, 张保汉, 王晓方 2010 物理学报 **59** 8733]
- [11] Boyer K, Luk T S, Rhodes C K 1988 *Phys. Rev. Lett.* **60** 557
- [12] Cowa T E, Hunt A W, Phillips T W, Wilks S C, Perry M D, Brown C,

- Fountain W, Hatchett S, Johnson J, Key M H, Parnell T, Pennington D M, Snavely R A, Takahashi Y 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 903
- [13] Santala M I K, Najmudin Z, Clark E L, Tatarakis M, Krushelnick K, Dangor A E, Malka V, Faure J, Allott R, Clarke R J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 7
- [14] Spencer I, Ledingham K W D, Singhal R P, McCanny T, McKenna P, Clark E L, Krushelnick K, Zepf M, Beg F N, Tatarakis M, Dangor A E, Norreys P A, Clark R J, Allott R M, Ross R N 2001 *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* **183** 449
- [15] Ledingham K W D, Spencer I, McCanny T, Singhal R P, Santala M I K, Clark E, Watts I, Beg F N, Zepf M, Krushelnick K, Tatarakis M, Dangor A E, Norreys P A, Allott R, Neely D, Clark R J, Machacek A C, Wark J S, Cresswell A J, Sanderson D C W, Magill J 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 899
- [16] Santala M I K, Zepf M, Watts I, Beg F N, Clark E, Tatarakis M, Krushelnick K, Dangor A E 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1459
- [17] Malka V, Fritzel s, Lefebvre E, Aleonard M M, Burgy F, Chambaret J P, Chemin J F, Krushelnick K, Malka G, Mangles S P D, Najmudin Z, Pittman M, Rousseau J P, Scheurer J N, Walton B, Dangor A E 2002 *Science* **298** 1596
- [18] Spencer I, Ledingham K W D, Singhal R P, McCanny T, McKenna P, Clark E L, Krushelnick K, Zepf M, Beg F N, Tatarakis M, Dangor A E, Edwards R D, Sinclair M A, Norreys P A, Allott R M, Clark R J 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 3801
- [19] Gerbaux M, Gobet F, Aléonard M M, Hannachi F, Malka G, Scheurer J N, Tariesien M, Claverie G, Méot V, Morel P, Faure J, Glinec Y, Guemnie-Tafo A, Malka V, Manclossi M, Santos J J 2008 *Rev.Sci. Instrum.* **79** 023504
- [20] Briesmeister J F 2000 *MCNP —A General Monte Carlo N-Particle Transport Code* (Radiation Safety Information Computational Center)
- [21] Xu M H, Liang T J, Zhang J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2357 (in Chinese) [徐妙华, 梁天骄, 张杰 2006 物理学报 **55** 2357]
- [22] Ledingham K W D, McKenna P, Singhal R P 2003 *Science* **300** 1107
- [23] EXFOR www nuclear reaction database, <http://iaeand.iaea.or.at/exfor/>
- [24] Lu X X, Liu R, Jiang L, Wang M, Lin J F, Wen Z W, Wang D L 2007 *Chin. JourNucl. Sci. Eng.* **27** 177 (in Chinese) [鹿心鑫, 刘荣, 蒋励, 王玫, 林菊芳, 温中伟, 王大伦 2007 核科学与工程 **27** 177]

## Temperature diagnostic using photonuclear reactions for hot electrons in laserplasma interactions\*

Zhao Jia-Rui<sup>1)2)</sup> Yu Quan-Zhi<sup>2)†</sup> Liang Tian-Jiao<sup>2)</sup>  
Chen Li-Ming<sup>2)</sup> Li Yu-Tong<sup>2)</sup> Guo Cheng-Shan<sup>1)</sup>

1) (Department of Physics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

2) (Key Laboratory of Optical Physics, Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 5 July 2012; revised manuscript received 6 December 2012)

### Abstract

The temperature of hot electrons produced in ultra-short ultra-intense laser-plasma interactions could be measured by photonuclear diagnostic method. In this paper, the process of bremsstrahlung gamma photons generated by hot electrons interacting separately with  $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{107}\text{Ag}$ , and  $^{12}\text{C}$ , were simulated using the Monte Carlo N-particle transport code (MCNP). According to the different cross-sections, the activities of different samples were calculated. The activity ratios for  $^{11}\text{C}/^{62}\text{Cu}$  and  $^{11}\text{C}/^{106}\text{Ag}$  were achieved at different electron temperatures. This method can realize the temperature diagnostic of hot electrons in laser-plasma interactions.

**Keywords:** hot electron, bremsstrahlung photon, photonuclear reaction, MCNP

**PACS:** 25.20.-x, 02.70.Uu, 14.60.Cd, 23.20.Nx

**DOI:** 10.7498/aps.62.072501

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11075203, 60878014, 10974249).

† Corresponding author. E-mail: qzhyu@aphy.iphy.ac.cn