

# 飞秒激光脉冲和液体等离子体相互作用产生的高能电子特性研究\*

李玉同<sup>1</sup> 张杰<sup>1,†</sup> 盛政明<sup>1</sup> 滕浩<sup>1</sup>  
梁天骄<sup>2</sup> 彭晓昱<sup>1</sup> 鲁欣<sup>1</sup> 李英骏<sup>1</sup> 唐孝威<sup>2</sup>

(1 中国科学院物理研究所 中国科学院光物理重点实验室 北京 100080)

(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 文章研究了单脉冲和多脉冲飞秒激光和水等离子体相互作用产生的高能电子特性,发现多脉冲激光构型可以大幅度地增强超热电子的产生和提高其温度.实验观测到在激光偏振面内,沿与激光轴反向夹角 $46^\circ$ 的方向,对称地喷射出两束能量大于25keV的高能电子.二维粒子模拟结果和实验符合很好.实验和理论都表明,这些超热电子是通过后续脉冲与前面脉冲形成的球形液滴相互作用产生的,具体机制为共振吸收.

**关键词** 飞秒激光脉冲,超热电子,液体等离子体

## High energy electron emission from water plasmas produced by femtosecond laser pulses

LI Yu-Tong<sup>1</sup> ZHANG Jie<sup>1,†</sup> SHENG Zheng-Ming<sup>1</sup> TENG Hao<sup>1</sup>  
LIANG Tian-Jiao<sup>2</sup> PENG Xiao-Yu<sup>1</sup> LU Xin<sup>1</sup> LI Ying-Jun<sup>1</sup> TANG Xiao-Wei<sup>2</sup>

(1 Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** High energy electrons emitted from water plasmas produced by a single or multiple laser pulses are investigated. The multipulse mode greatly enhances the generation and temperature of the hot electrons. Directional emission of high energy electrons over 25 keV is observed in two symmetric directions with respect to the laser axis and at  $46^\circ$  from the directions of the laser electric field. Two-dimensional particle-in-cell simulations reproduce well the experimental results and indicate that the acceleration mechanism of the high energy electrons is mainly due to the resonance absorption at the edge of the spherical droplets formed by the leading pulse.

**Key words** femtosecond laser pulses, hot electrons, liquid plasmas

超短超强激光脉冲和等离子体相互作用会产生能量很高的超热电子<sup>[1-5]</sup>,这些电子对于激光惯性约束聚变中的快点火过程有重要影响<sup>[6]</sup>.国际上各大激光聚变实验室都开展了这方面的研究<sup>[7,8]</sup>.和激光与固体、气体相互作用研究相比,激光与液体、尤其是飞秒激光和液体等离子体的相互作用研究很少<sup>[9,10]</sup>.仅有的激光液体相互作用研究也主要集中在液体内部的击穿现象<sup>[11,12]</sup>、使用液体射流产生X射线源<sup>[13]</sup>和激光空泡<sup>[14,15]</sup>等方面.本文对从

飞秒激光脉冲聚焦到水表面后形成的等离子体中发射出的高能电子进行了首次研究.我们发现实验产生的超热电子空间分布和固体、气体甚至团簇等离

\* 国家自然科学基金(批准号:10204023,10075075,10105014和10176034)、王宽诚教育基金会(香港)、国家高技术惯性约束聚变委员会和国家重点基础研究发展计划(批准号:G199990-75200)资助项目

2003-05-07 收到

† 通讯联系人, E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn

子体发射的超热电子有很大的不同。

实验是在中国科学院物理研究所的飞秒激光装置上进行的. 该激光器主要参数为: 能量 5mJ, 脉宽 150fs, 波长 800nm. 图 1 是实验装置示意图. 采用  $f/4$  球面透镜将激光束聚焦到蒸馏水和空气界面, 焦斑直径约为  $10\mu\text{m}$ . 通过调节激光器的普科尔盒, 可以使激光器输出单个脉冲或者多个脉冲串. 图 1 中的插图是使用泰克公司生产的 TDS 520A 型数字示波器测得的多脉冲波形, 峰峰之间的间隔为 10ns. 对于单脉冲模式, 在靶面的激光峰值强度约为  $1 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ .

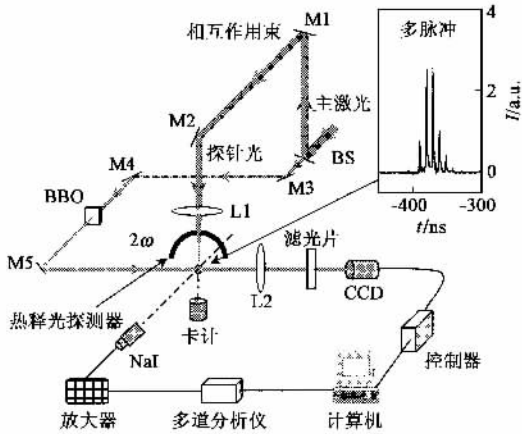


图 1 实验布局示意图

( M1—M5 代表反射镜, BS 代表分束器 )

实验中使用热释光探测器  $\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Cu}, \text{P})$  来测量从等离子体中发射的超热电子, 在探测器前面安装了  $6\mu\text{m}$  的铝膜来遮挡散射激光和选取超热电子能段. 热释光探测器的尺寸为  $\phi 4.5 \times 0.8\text{mm}$ . 除了入射激光轴附近的一个小洞外, 激光焦斑上方的  $2\pi$  空间安装了 100 多片热释光探测器. 图中的反射镜 M2 可以旋转, 它可将水平面内的激光束转为垂直入射或者斜入射. 通过旋转 M2, 可以任意调节入射到水面的入射角. 系统的角分辨能力约为  $6^\circ$ .  $\text{LiF}$  热释光探测器对离子、X 射线光子和电子都敏感. 但是, 从焦斑到探测器的空气和探测器前的铝膜可以挡掉这种条件下从等离子体中发射的离子. 为了区分 X 射线和电子的贡献, 实验中采用了场强为  $1500\text{Gs}$  ( $1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$ ) 的磁场对电子进行偏转. 比较有无磁场的情况, 发现 X 射线的贡献比超热电子的贡献低约 20 倍. 所以热释光探测器的剂量主要是电子造成的.

一台  $\gamma$  射线谱仪用来测量等离子体发出的高能韧致辐射谱<sup>[16]</sup>. 从主激光中分出一束基频光, 倍

频到 400nm 后用于测量等离子体膨胀过程.

图 2 分别给出了单脉冲和多脉冲两种情况下的 X 射线谱. 该谱是  $\gamma$  射线谱仪在相对于靶面法线  $80^\circ$  的方向测得的. 激光垂直入射到水面上. 和单脉冲情况相比, 多脉冲激光构型大大增强了硬 X 射线的发射, 最大光子能量超过了 300 keV. 用指数规律对高能尾部进行拟合后, 得到的超热电子温度高达 64 keV. 此温度可以和类似条件下飞秒激光和固体相互作用得到的超热电子温度相比拟<sup>[17]</sup>.

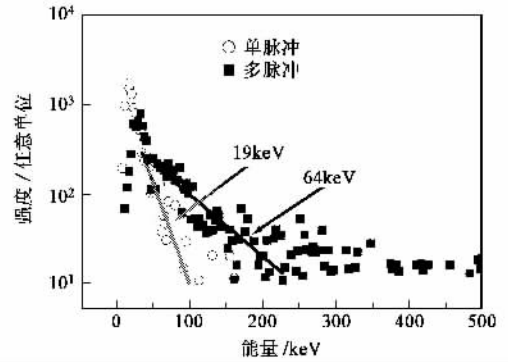


图 2 单脉冲和多脉冲产生的 X 射线谱比较

图 3 ( a )是多脉冲激光串正入射时能量大于 25 keV 的超热电子的空间分布. 图中所示剂量值是 10 000 次的累计结果. 一个明显的特征是, 在偏振面内, 在激光入射方向对称地分布着两个电子发射峰, 两峰与激光波矢反向夹角为  $46^\circ$ , 半高全宽 ( FWHM ) 为  $34^\circ$ . 使用  $\lambda/2$  将激光偏振面旋转  $90^\circ$  后, 发现电子发射峰也随之旋转  $90^\circ$  [ 见图 3 ( b ) ]. 图 3 ( c ) 中给出了在激光偏振面内的电子角分布 ( 实线 ), 其中  $0^\circ$  对应激光传播轴,  $90^\circ$  和  $270^\circ$  对应激光电场矢量方向. 假定电子遵从麦克斯韦分布, 结合从 X 射线谱得到的有效温度 64keV, 使用 ITS 3.0 ( Integrated TIGER Series of Coupled Electron/Photon ) 程序<sup>[18]</sup>, 我们估计在电子发射峰内单发电子总数为  $2 \times 10^5/\text{sr}$ .

当采用 p 偏振激光以  $20^\circ$  角入射到靶面时, 仍然有两个位于激光偏振面内、相对于激光波矢对称分布的电子峰产生. 如果使用 s 偏振光以  $20^\circ$  入射, 这两个电子峰也随之旋转  $90^\circ$ . 注意此结果和激光 - 固体等离子体相互作用产生的超热电子行为非常的不同<sup>[17]</sup>.

我们也对单脉冲情况进行了研究, 发现热释光探测器的剂量只是比背景略高. 这一点是在预料之中的, 因为从图 2 看, 单脉冲对应的电子温度只有 19keV, 大部分超热电子不能透过  $6\mu\text{m}$  厚的铝膜到

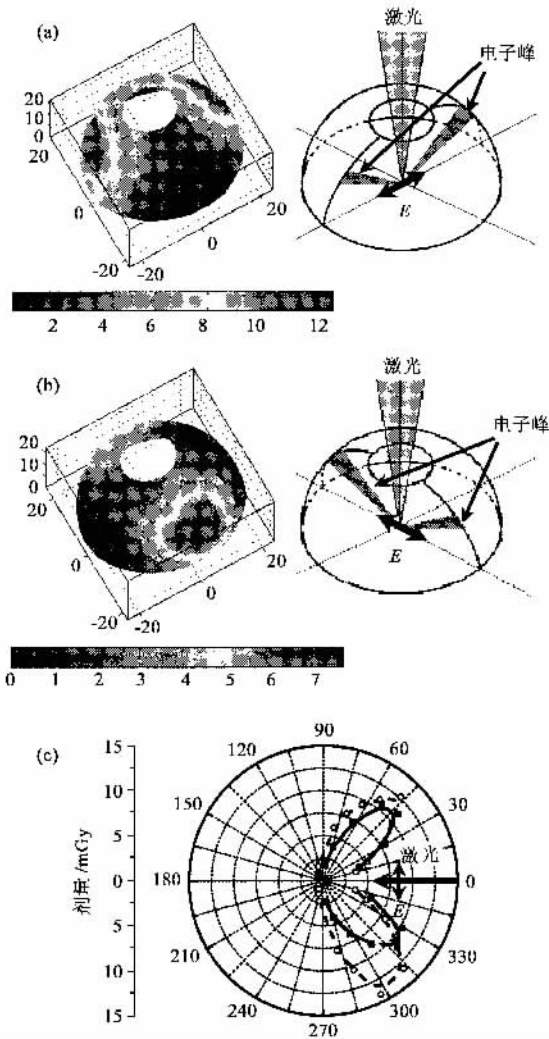


图3 (a)正入射时能量大于25keV的超热电子空间分布 (b)激光偏振面旋转90°时,两个电子峰也随之旋转90° (c)激光偏振面内的电子角分布(实线)和直接的激光-液滴相互作用产生的超热电子角分布(虚线)比较

达探测器. 作为对比, 在一些实验中, 我们引入了一个间隔为50ps的预脉冲, 发现这样短间隔的预脉冲对超热电子的影响很小, 而在固体靶实验中, 这样一个短间隔的预脉冲曾经大幅度提高超热电子的产生数量<sup>[16]</sup>.

我们使用一维流体力学程序(MED103)<sup>[19]</sup>对多脉冲模式下前面脉冲产生的等离子体状态进行了模拟, 发现第一个脉冲形成的等离子体在10ns时刻温度已经很低( $< 0.1$  eV), 电子密度梯度也非常平缓, 所以后续激光脉冲的能量可以更有效地被吸收<sup>[20]</sup>. 但是高能量吸收率不能完全解释观测到的超热电子行为.

为了搞清楚前面脉冲对整个相互作用的影响, 我们采用光学成像法对等离子体进行诊断. 图4给

出了单脉冲情况下向空气中和向水中膨胀的等离子体阴影图. 拍摄阴影图的时刻和多脉冲模式的峰峰间隔一致, 都是10ns. 在水中的细丝是泄漏激光引起的. 由于等离子体压力, 形成了向空气中传播的冲击波和向水中扩散的密度坑. 当第二个脉冲在10ns时刻达到时, 空气中的冲击波和水中的密度坑已经分别离开初始焦点约150 $\mu\text{m}$ 和110 $\mu\text{m}$ 了. 在10ns时刻, 第一个脉冲产生的绝大部分等离子体已经复合. 所以与后续脉冲相互作用的主要对象只有(1)密度坑底部的球形临界密度面;(2)位于冲击波和密度坑之间的压缩空气和水蒸气(可能部分电离);(3)从焦点处直接爆炸或者凝聚形成的微小水滴. 图4(c)给出了相互作用示意图. 下面我们将仔细分析到底是哪一种相互作用导致超热电子的产生.

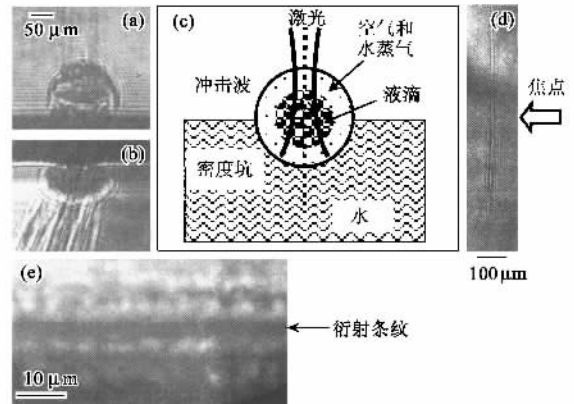


图4 (a)正入射时向空气中膨胀的等离子体阴影图 (b)斜入射时向水中的密度坑阴影图 (c)相互作用模型示意图 (d)1ns时刻拍摄的单脉冲自聚焦和散焦情况 (e)水面上典型的液滴阴影图

或许有人会认为, 实验所测超热电子是由发生在球形密度坑底或者背向传播的临界面电离波前处的共振吸收产生的, 由于空间击穿, 被散焦的后续激光束会以合适的角度在这两个球面上发生共振吸收, 由于球对称从而产生两束超热电子. 对这种推测, 我们进行了只有空气击穿的检测实验. 图4(d)是去掉装水容器后2mJ单束激光脉冲空气击穿后1ns时刻的阴影图. 可见大部分激光能量在距离焦点 $\sim 110\mu\text{m}$ 处仍然保持在 $\phi 20\mu\text{m}$ 的区域内, 被散焦的光束面积约为密度坑底部面积的 $\sim 1\%$ , 所以散焦激光实际上和一个类平面临界密度面相互作用. 这种相互作用模式不能产生与激光轴对称的两束电子. 从图4(d)我们也注意到有自聚焦现象出现, 但是自聚焦只能提高局域光强从而增加电子产额及

温度,而不能直接导致两个电子峰。

当后续激光脉冲和第一个脉冲产生的、冲击波后部分电离的压缩空气和水蒸气相互作用时,可能会有不稳定性发生。但是,从超热电子产生的角度来看,原则上不能产生实验所测的超热电子行为<sup>[21]</sup>。

采用激光烧蚀固体靶产生纳米或者微米尺度的粒子已经被广泛研究<sup>[22]</sup>。在本实验中,多脉冲模式中的峰峰间隔为 10ns。在这段时间内,可以通过凝聚或者从焦点的直接爆炸形成液滴。图 4(e)是一幅在初始水面附近、放大 165 倍、15ns 时刻的液滴像。该液滴是采用 2 mJ 单脉冲产生的。可见液滴大小位于 1—6 $\mu\text{m}$  之间,平均尺寸约 3 $\mu\text{m}$ 。亚微米尺度的液滴由于分辨本领的限制没有看到。

为了搞清楚电子的产生机制,我们用二维粒子模拟程序对相互作用过程进行了模拟。模拟中,采用一束归一化振幅  $a_0 = 0.1$ 、脉宽为 50 激光周期的 p 偏振光正入射到一个球形等离子体上。该等离子体直径为  $3\lambda$ ,径向密度分布从边缘的  $0.2n_c$  按抛物线规律上升到中心的  $2n_c$ ,这里  $n_c$  为临界密度。为了简化相互作用和节省计算时间,这里只取了一个液滴,但这并不影响主要相互作用物理过程。图 5 给出了在 40 激光周期时刻的电子位置、动量、密度和激光电场纵向分量的分布。图 5(a)和(b)清楚地显示出部分电子沿激光轴对称方向发射出来,发射角约为  $40^\circ$ 。这和实验结果吻合很好。从图 5(c)显示的在共振临界面处的局域密度增强和图 5(d)显示的静电场  $E_x$  的增强(最大值为 0.166,比初始值 0.1 大)可以断定,超热电子产生机制为发生在微型等离子体边缘的共振吸收机制。另一方面,当采用 s 偏振光时,模拟中没有观察到超热电子峰发生,这进一步证明共振吸收是超热电子的主要产生机制。对于 s 偏振,二维模拟中没有观察到超热电子发射,这和实验中将偏振面旋转  $90^\circ$  后得到的结果并不矛盾。实验中是三维相互作用,对于球形等离子体来讲, p 偏振和 s 偏振完全是等价的,而在二维模拟中是不同的。

模拟中我们还发现,当液滴等离子体的尺度从  $2\lambda$  变到  $8\lambda$  的过程中,电子发射角基本保持不变,对于不同的密度变化规律也是这样。这表明在液滴周围的激光场衍射效应和临界面的激光线形模式转换在超热电子产生中也起了一定作用。

为了进一步证实上面的分析,我们又进行了飞秒激光和液滴靶的直接相互作用实验。液滴是通

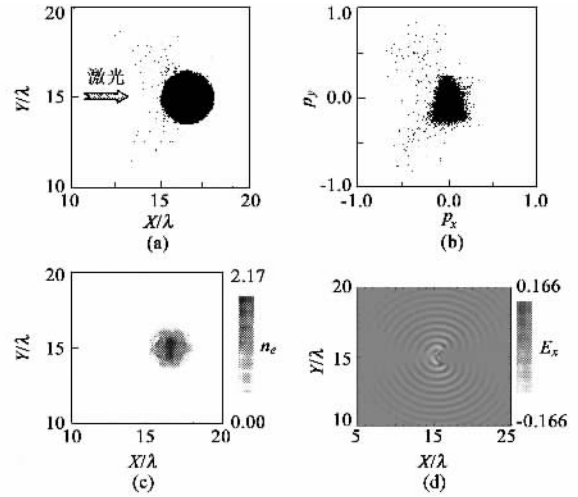


图 5 p 偏振激光脉冲与水等离子体相互作用后 40 激光周期时刻的二维粒子模拟结果 (a)电子在  $X-Y$  空间的坐标位置 (b)在动量空间  $(p_x, p_y)$  (c)电子密度分布 (d)共振激发的纵向电场分量分布

过高压喷嘴产生的,平均尺寸约为  $4\mu\text{m}$ ,超热电子测量方法和前面一样。采用一束 2mJ 激光脉冲在真空中辐照液滴靶,得到的超热电子角分布和本实验结果非常类似。为了便于比较,直接的激光液滴靶相互作用结果也绘于图 3(c)中(虚线)。

液滴的球形对称性导致了相互作用模式完全依赖于入射激光的状态,甚至斜入射情况,所以超热电子的发射方向与激光轴和电场矢量方向紧密相关,无论正入射还是斜入射,也无论激光是 p 偏振还是 s 偏振,超热电子总是位于激光偏振面内,而且对称地分布于激光轴两侧。

## 参 考 文 献

- [1] Chen L M, Zhang J, Li Y T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 87: 225001
- [2] Sheng Z M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 5340
- [3] Dong Q L *et al.* Phys. Rev. E, 2001, 64: 026411
- [4] Cheng L M *et al.* Phys. Plasmas, 2001, 8: 2925
- [5] Chen L M *et al.* Phys. Rev. E, 2001, 63: 036403
- [6] Teng H, Zhang J, Chen Z L, Li Y T *et al.* Phys. Rev. E, 2003, 67: 026408
- [7] Dong Q L, Zhang J *et al.* Phys. Plasmas, 2001, 8: 1025
- [8] Sheng Z M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 88: 055004
- [9] Li Y T *et al.* Phys. Plasmas, 2002, 9: 4028
- [10] Li Y T *et al.* Phys. Rev. E, 2003, 67: 056403
- [11] Noack J *et al.*, Appl. Opt., 1998, 37: 4092
- [12] Doukas A G *et al.* Appl. Phys. B, 1991, 53: 237
- [13] Berglund M *et al.* Rev. Sci. Instrum., 1998, 69: 2361
- [14] Ohl C D *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 80: 393
- [15] Baghdassarian O *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86: 4934

[ 16 ] Zhang P *et al.* Phys. Rev. E ,1998 ,57 :R3746  
 [ 17 ] Li Y T *et al.* Phys. Rev. E ,2001 ,64 :046407  
 [ 18 ] Halbleib J A *et al.* ITS 3.0 : Integrated TIGER Series of Coupled Electron/Photon Monte Carlo Transport Codes , SAND91-1634 ,( March 1992 )  
 [ 19 ] Christiansen J P *et al.* Computer Physics Communications , 1974 ,7 :271

[ 20 ] Zhang J *et al.* Science ,1997 ,276 :1097  
 [ 21 ] Krueer W L. The Physics of Laser Plasma Interactions. California : Addison-Wesley Publishing Company , 1988  
 [ 22 ] Juang C-B *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1994 ,65 :40 ; Juang C B *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1994 ,65 :40 ; Schittenhelm H *et al.* J. Phys. D ,1996 ,29 :1564

· 中国物理学会通讯 ·

## 中国物理学会第 7 届理事会第 14 次常务理事会会议纪要

中国物理学会第 7 届理事会第 14 次常务理事会会议于 2003 年 6 月 20 日上午在中国科学院物理研究所召开. 参加会议的有理事长陈佳洱, 副理事长杨国桢、甘子钊、陈和生, 以及常务理事王乃彦、杨展如、苏肇冰、张泽、张焕乔、赵凯华、聂玉昕、谢诒成. 副秘书长田淑琴、唐金媛、谷冬梅, 中国科学院物理研究所吴令安, 以及学会办公室张松岭列席了会议. 会议由杨国桢主持.

( 1 )会议进一步讨论了筹备中国物理学会第 8 届全国会员代表大会( 简称“ 八大 ” )的有关事宜 : 决定于 9 月 16 日晚在合肥召开中国物理学会第 7 届理事会会议 9 月 17 日召开“ 八大 ” ; 审议通过了各分支机构推荐的“ 八大 ” 代表名单及先进工作者名单 ; 酝酿了第 8 届理事会理事、常务理事、正副理事长及秘书长候选人.

谷冬梅在会上报告了中辰兴会计师事务所对第 7 届理事会期间学会财务工作进行审计的情况和结论.

( 2 )陈佳洱通报了德国物理学会赠书事宜. 5 月 23 日 , 德国物理学会司库、原中德会议中心德方主任 Mosch 代表德国物理学会向中国物理学会赠书“ Memorandum on Physics ” 200 册. 中国物理学会在中国科学院物理研究所举行了简短的赠书仪式. 陈佳洱理事长、杨国桢副理事长、常务理事王乃彦、聂玉昕, 以及副秘书长谷冬梅等出席了赠书仪式.

( 3 )2005 年为“ 世界物理年 ”. 该项活动由欧洲物理学会发起, 主题为“ 争取公众对物理学的理解和支持 ”. 会议讨论决定, 由陈和生副理事长负责筹划在中国开展相应的活动并组成工作小组.

( 4 )亚太物理学会联合会( AAPPS )将要进行换届选举. 会议推荐了新一届 AAPPS 理事会理事候选人.

( 5 )今年是中国物理学会前理事长、著名物理学家钱三强 90 寿辰. 会议决定与有关部门联合组织纪念活动.

( 6 )为了响应中国科协关于“ 开展 2020 年的中国科学和技术发展研究 ” 的号召, 邀请甘子钊在今年秋季会议上作《 21 世纪物理学》的大会报告.

( 7 )谢诒成通报了她本人及科普工作委员会在 2002 年 12 月召开的第三次全国科普工作会议上, 分别获得全国科普工作先进工作者和先进集体的情况.

( 8 )欧莱雅化妆品公司准备在中国设立杰出女科学家成就奖, 希望得到中国物理学会有关资助模式等方面的建议. 会议建议, 由女性工作委员会提出方案.

( 9 )谷冬梅通报了办公室的一些工作 : ①2003 年 3 月通过了民政部对学会所属 6 个工作委员会、27 个分会专业委员会的复查工作 ; ②3 月初, 向中国科协推荐、提名两院院士候选人共 13 人 ; ③3 月底, 向中国科协上报学科带头人 248 名及科技专家 152 名及相关材料 ; ④3 月 3 日, 收到北京大学物理学院 8 万元作为饶毓泰物理奖基金, 至此, 已为五项物理奖筹集资金 40 万元 ; ⑤5 月 26 日, 向中国科协上报参加中国科协学术年会报名表, 代表团由辽宁省物理学会组织, 共 15 人, 团长是辽宁省物理学会理事长鲜于泽 ; ⑥5 月 13 日, 向中国科协推荐 10 篇论文参加“ 中国科协首届优秀论文 ” 评选活动 ; ⑦3 月份, 发展两个团体会员单位——山东大学物理学院和四川大学物理学院, 各收取会费 3000 元. 会议决定, 应继续积极发展团体会员, 会费缴纳有两种方式 : 一种是每年交纳 3000 元 ; 另一种是 4 年一次性交纳 10000 元.

( 中国物理学会办公室 谷冬梅 )