



国防特色院士文库

# 激光与核： 超高强度激光 在核科学中的应用

(德)

海因里希·施沃雷尔  
约瑟夫·马吉尔  
布加德·贝勒

◎著 王乃彦◎译



Springer

Lasers and Nuclei:  
Applications of Ultrahigh Intensity  
Lasers in Nuclear Science



哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press



国防特色院士文库

# 激光与核： 超高强度激光 在核科学中的应用

(德) 海因里希·施沃雷尔  
约瑟夫·马吉尔  
布加德·贝勒

◎著 王乃彦◎译



Springer

Lasers and Nuclei:  
Applications of Ultrahigh Intensity  
Lasers in Nuclear Science



哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press

# 黑版贸审字 08-2018-149 号

## 内 容 简 介

本书的主要内容是激光引发的核物理,从激光-物质相互作用的理论背景介绍开始,对技术的状态进行回顾,由这个领域的顶尖科学家给出了激光粒子加速和激光核物理研究状态的详细报告,并讨论从激光的同位素生产、核反应堆物理、中子影像技术到天体物理和纯粹的核物理的基础研究及其潜在应用前景。

本书可供激光核物理相关领域的科研人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

激光与核:超高强度激光在核科学中的应用/(德)海因里希·施沃雷尔,(德)约瑟夫·马吉尔,(德)布加德·贝勒著;王乃彦译. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2019.2

ISBN 978-7-5661-2094-6

I. ①激… II. ①海… ②约… ③布… ④王… III. ①激光—应用—核物理学—研究 IV. ①TN24 ②O571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 219042 号

选题策划 石 岭  
责任编辑 石 岭  
封面设计 张 骏

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区南通大街 145 号  
邮政编码 150001  
发行电话 0451-82519328  
传 真 0451-82519699  
经 销 新华书店  
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司  
开 本 787mm × 1 092mm 1/16  
插 页 2  
印 张 13  
字 数 338 千字  
版 次 2019 年 2 月第 1 版  
印 次 2019 年 2 月第 1 次印刷  
定 价 168.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

# 前 言

本书的主要内容是激光引发的核物理(Laser induced nuclear physics)。当在高强度的激光等离子体物理实验中产生光子和粒子的能量足够高,就可以产生基本的核反应。首次用激光产生辐射引发的核实验——光子引发中子核蜕变或者裂变是在 20 世纪 90 年代运用大型的激光聚变装置,如在英国 Rutherford Appleton 实验室的 VULCAN 激光器或在美国 Lawrence Livermore 国家实验室的 NOVA 激光器上成功地实现了。但是运用小型的台式激光器也能显示同样的物理问题,并使基于激光的核实验的系统研究向前推进。这些小型的激光系统可以在激光脉冲能量比较低但重复频率非常高时,产生与聚变激光装置相同的光强,在短时间内,所有的基本反应,如裂变、中子或质子引发的核蜕变、聚变都可以进行。

从很早开始,在证实原理性的实验之外,第二个受关注的问题是,在核物理的观点内研究高能激光等离子体发射的独特性质,这些特殊性质是多种多样的,如所有光子和粒子的发射是在超短的时间宽度内,在皮秒量级或更短;源的尺寸是很小的,因为激光和靶物质相互作用的体积是很小的,辐射源装置与传统的加速器或者反应堆装置相比有更高的灵活性和紧凑性。

由于具有这些独特的实验可能性,人们联想到了其在科学与技术中的各种潜在应用。最明显的例子就是借助于核活化技术,对相对论性激光等离子体进行诊断和表征,它是能够探测高能辐射和粒子的唯一方法。潜在应用的第二个领域是核的嬗变。由于在激光等离子体中,产生和加速的发射体的多样性,带有光子、质子、离子和中子的所有反应渠道都是可能实现的。最实际的想法是推广应用到以医学为目的的各种放射性同位素的生产,以及核燃料循环中长寿放射性核的嬗变研究中。最后,在激光等离子体中结合具有高能量、大通量的粒子所产生的极强的能量密度同样提供了基础核科学的新的可能性,如在实验室中研究天体物理的问题。

促成本书出版的是 2004 年 9 月在 Karlsruhe 举行的“激光与核”国际研讨会。该研讨会第一次将激光和核的科学家聚集在一起,目的是让他们阐述各自研究领域的当前情况,并敞开思想地研讨这个交叉学科在理论和实验上潜在的优势、需求和新的交叉工作受到的制约。本书从激光-物质相互作用的理论背景介绍开始,对研究和技术的状态进行回顾,由这个领域的顶尖科学家给出了激光粒子加速和激光核物理研究状态的详细报告,并讨论从基于激光的同位素生产、核反应堆物理、中子影像技术到核天体物理和纯粹的核物理中的

基础物理研究及其潜在的应用前景。

本书的研究范围广、跨学科,它将激励人们敞开思想超越传统思维,在激光和核物理之间开展新的研究。

著者

2006年2月

# 译者的话

《激光与核——高强度激光在核科学中的应用》一书是由德国激光物理学家海因里希·施沃雷尔、约瑟夫·马吉尔、布加德·贝勒等人撰写的。他们在描述高强度激光和物质的相互作用的基础上,介绍了激光加速电子、离子以及产生高强度的中子和韧致辐射的机理。随着超短超强激光技术的迅速发展,由激光和物质相互作用所产生的粒子和辐射的强度、能量也迅速提高,当粒子和辐射的能量足够高,足以引发核反应时,激光核物理应运而生。由激光产生的粒子和辐射还具有一些独特的优点,如电子束的单能性,质子束的很小的发射角、很短的时间宽度。一台高强度的激光装置有产生多种粒子的可能性,通过改变靶的材料就能得以实现,甚至由于采用激光分束的方法可以做到同时既加速电子也加速离子。因此近年来激光核物理成为一个引人注目且发展迅速的学科,在核物理领域中成为基于反应堆和加速器的核物理研究的一个重要补充,并逐渐渗透到各种研究和应用领域中。高强度的激光可以在一些大型的激光装置上产生,如在 Rutherford Appleton 实验室的 VULCAN 激光器和美国 Lawrence Livermore 国家实验室的 NOVA 激光器,每个脉冲的能量可以达到百焦耳到千焦耳的量级,脉冲宽度小于 1 ps。由于激光系统内热效应的限制,这种高能量系统的激光,每炮之间的间隔是几十分钟到一小时,而且这种大装置的投资大。然而高强度激光也可以采用聚焦性能比较好、脉冲宽度小于 100 fs、每脉冲能量在焦耳级、重复频率在 10 Hz 左右的超短的高强度激光,它同样可以用来开展激光核物理的许多实验和一些系统性的研究。由于投资比较少,所以在许多实验室,特别是大学都建立了这种类型的装置,如法国的光学应用研究所、德国 Jena 大学的 JETI 激光装置、中国的上海光学精密机械研究所也建立了 10 PW 的装置,这就使得更多的研究所和大学能够开展超强激光和物质相互作用及其应用的研究。应该指出本书作者在撰写这本书的时候激光靶上的功率密度只达到  $10^{20} \text{ W/cm}^2$ ,他们已经在书中指出了超强激光在核科学中的许多应用和可能开辟的新的研究方向,在应用方面可以用于产生医用放射性同位素、治疗癌症、中子或质子成像、引发核嬗变、寻找新的同质异能素,等等。但是现在由于超短激光技术的发展,人们已经可以得到的靶上功率密度为  $10^{22} \text{ W/cm}^2$ ,甚至更高了,所以可研究和应用的领域更多、更广了,书中所论述的相互作用的机制和原理,对于从事这方面工作的科技工作者和研究生们仍然是很有意义的。

这本书的作者是在德国 Karlsruhe 召开的“核与激光”国际研讨会后,将会上的报告整理成书的。那次会议是国际上第一次将激光专家和核物理学家相聚在一起,对介于激光和核

物理之间这一崭新的领域进行讨论和交流,以做到敞开思想,激发超越传统思维,让激光更好、更有效地作用在核上,以实现多年来激光专家和核物理学家的梦想。译者也希望这本书能对我国广大的读者起到相同的作用,为促进这一崭新的交叉学科在我国的发展起到一定作用。

王乃彦  
2018年10月20日

# 目 录

## 第 1 篇 基础和设备

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 激光相互作用的核时代:在功率压缩历史中的新里程碑 ..... | 3  |
| 1.1 功率压缩的历史 .....                    | 3  |
| 1.2 总结 .....                         | 4  |
| 参考文献 .....                           | 5  |
| 第 2 章 高强度激光和物质的相互作用 .....            | 6  |
| 2.1 激光与物质 .....                      | 6  |
| 2.2 最强的光场 .....                      | 7  |
| 2.3 由激光产生的电子加速 .....                 | 9  |
| 2.4 固体靶和超短的硬 X 射线脉冲 .....            | 15 |
| 2.5 质子和离子的产生 .....                   | 16 |
| 2.6 总结 .....                         | 17 |
| 参考文献 .....                           | 18 |
| 第 3 章 激光引发的核反应 .....                 | 20 |
| 3.1 引言 .....                         | 20 |
| 3.2 激光和物质的相互作用 .....                 | 20 |
| 3.3 激光引发的核反应的回顾 .....                | 24 |
| 3.4 未来的应用 .....                      | 30 |
| 参考文献 .....                           | 32 |
| 第 4 章 高重复频率的全二极管泵浦的超高峰值功率激光器 .....   | 37 |
| 4.1 引言 .....                         | 37 |
| 4.2 镱掺杂的氟化磷酸盐玻璃作为激光的活性介质 .....       | 39 |
| 4.3 用于固态激光泵浦的二极管 .....               | 41 |
| 4.4 POLARIS 激光 .....                 | 43 |
| 4.5 POLARIS 激光的 5 个放大级 .....         | 44 |
| 4.6 倾斜的压缩光栅 .....                    | 49 |
| 4.7 未来展望 .....                       | 51 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 参考文献 .....                         | 51 |
| 第 5 章 百万焦耳的激光器——一个高能量密度的物理装置 ..... | 54 |
| 5.1 LMJ 的描述和特性 .....               | 54 |
| 5.2 LIL 的性能 .....                  | 57 |
| 5.3 LMJ 装置 .....                   | 59 |
| 5.4 LMJ 点火和 HEDP 计划 .....          | 61 |
| 5.5 总结 .....                       | 62 |
| 参考文献 .....                         | 63 |

第 2 篇 源

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 6 章 超短激光脉冲产生的电子束和质子束 .....  | 67 |
| 6.1 引言 .....                  | 67 |
| 6.2 理论背景 .....                | 68 |
| 6.3 非线性的等离子体波所产生的电子束 .....    | 69 |
| 6.4 在固体靶上质子束的产生 .....         | 71 |
| 6.5 展望 .....                  | 72 |
| 6.6 总结 .....                  | 73 |
| 参考文献 .....                    | 73 |
| 第 7 章 激光驱动的离子加速和核活化 .....     | 75 |
| 7.1 引言 .....                  | 75 |
| 7.2 激光等离子体离子加速的基本物理概念 .....   | 76 |
| 7.3 实验安排 .....                | 77 |
| 7.4 最近的实验结果 .....             | 79 |
| 7.5 应用于核物理和加速器物理 .....        | 83 |
| 7.6 结论和未来前景 .....             | 85 |
| 参考文献 .....                    | 86 |
| 第 8 章 基于台式激光加速质子的脉冲中子源 .....  | 89 |
| 8.1 引言 .....                  | 89 |
| 8.2 最近的质子加速实验 .....           | 90 |
| 8.3 由激光加速质子束产生中子 .....        | 91 |
| 8.4 激光作为一个中子源 .....           | 97 |
| 8.5 中子源的最佳化——未来激光系统的核应用 ..... | 99 |

|              |     |
|--------------|-----|
| 8.6 总结 ..... | 102 |
| 参考文献 .....   | 102 |

## 第 3 篇 嬗 变

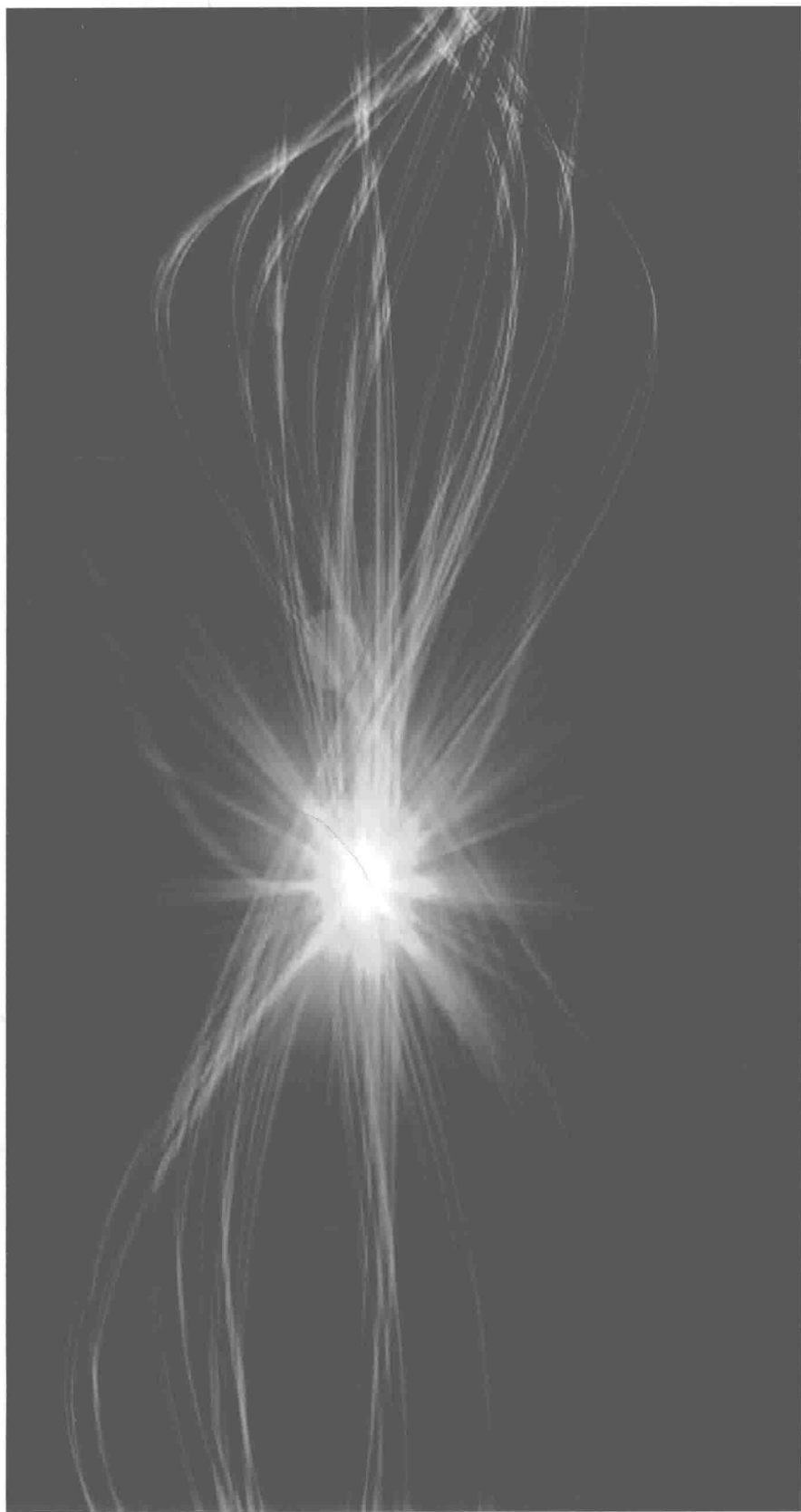
|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 第 9 章 激光嬗变核物质 .....                    | 107 |
| 9.1 引言 .....                           | 107 |
| 9.2 为何衰减常数是不变的? .....                  | 108 |
| 9.3 激光嬗变 .....                         | 109 |
| 9.4 总结 .....                           | 118 |
| 参考文献 .....                             | 118 |
| 第 10 章 用于核嬗变的高亮度 $\gamma$ 射线的产生 .....  | 120 |
| 10.1 引言 .....                          | 120 |
| 10.2 系统的原理 .....                       | 121 |
| 10.3 在 New Subaru 上的嬗变实验 .....         | 126 |
| 10.4 嬗变系统 .....                        | 131 |
| 10.5 总结 .....                          | 135 |
| 参考文献 .....                             | 136 |
| 第 11 章 在可持续裂变能的产生和核废料的嬗变中激光的潜在作用 ..... | 137 |
| 11.1 引言 .....                          | 137 |
| 11.2 核能倡议的经济性 .....                    | 139 |
| 11.3 新倡议的技术特点 .....                    | 140 |
| 11.4 密封的连续流反应堆 .....                   | 141 |
| 11.5 激光引发的核反应 .....                    | 143 |
| 11.6 将聚变中子引导到乏燃料的嬗变中 .....             | 144 |
| 11.7 聚变 d-t 能源和裂变能源的比较 .....           | 146 |
| 11.8 聚变能研究所涉及的内容 .....                 | 147 |
| 11.9 核能研究和开发的含义 .....                  | 148 |
| 11.10 附录 .....                         | 150 |
| 参考文献 .....                             | 151 |
| 第 12 章 高功率激光产生 PET 同位素 .....           | 153 |
| 12.1 引言 .....                          | 153 |
| 12.2 正电子发射断层扫描 .....                   | 153 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 12.3 高强度激光产生的质子加速 | 155 |
| 12.4 实验设备         | 156 |
| 12.5 实验结果         | 159 |
| 12.6 未来的发展和结论     | 161 |
| 参考文献              | 162 |

第 4 篇 核 科 学

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第 13 章 高强度激光和核物理                   | 167 |
| 13.1 引言                            | 167 |
| 13.2 寻找 <sup>235</sup> U 中的 NEET   | 167 |
| 13.3 在 <sup>181</sup> Ta 中同质异能态的激发 | 171 |
| 13.4 高的强场对核能级性质的影响                 | 172 |
| 13.5 总结                            | 173 |
| 参考文献                               | 173 |
| 第 14 章 核物理和激光康普顿散射伽马射线             | 174 |
| 14.1 引言                            | 174 |
| 14.2 激光康普顿散射产生 $\gamma$ 射线         | 175 |
| 14.3 核物理和核天体物理                     | 176 |
| 14.4 核嬗变                           | 181 |
| 14.5 总结                            | 181 |
| 参考文献                               | 182 |
| 第 15 章 中子成像的现状                     | 185 |
| 15.1 引言                            | 185 |
| 15.2 中子影像装置                        | 187 |
| 15.3 现代的中子影像探测器                    | 191 |
| 15.4 改进的中子影像方法                     | 192 |
| 15.5 中子影像的应用                       | 196 |
| 15.6 未来的趋势和景象                      | 196 |
| 15.7 总结                            | 197 |
| 参考文献                               | 197 |

# 第1篇 基础和设备





# 第1章 激光相互作用的核时代： 在功率压缩历史中的新里程碑

A. B. Borisov<sup>1</sup>, X. Song<sup>1</sup>, P. Zhang<sup>1</sup>, Y. Dai<sup>2</sup>, K. Boyer<sup>1</sup>, and C. K. Rhodes<sup>1,2,3,4</sup>

1. X 射线微影像和生物信息实验室, 芝加哥 Illinois 大学物理系, 芝加哥, IL60607 - 7059, 美国。

2. Illinois 大学生物工程系, 芝加哥 IL60607 - 7052, 美国。

3. Illinois 大学计算机科学系, 芝加哥, IL60607 - 7042, 美国。

4. Illinois 大学电气和计算机工程系, 芝加哥, IL60607 - 7053, 美国。

对超过大约 40 个数量级大小的功率压缩的历史做了一个简要的回顾, 激光与核相互作用大致处于尺度的对数中点, 约为  $10^{20} \text{ W/cm}^3$ , 这个历史图像同时可以导出四个结论:

(1) 功率压缩的发展将能使激光诱导的耦合作用于所有的原子核。

(2) 通常的物理机制遇到一个  $\Omega_\alpha$  约为  $10^{30} \sim 10^{31} \text{ W/cm}^3$  的限制, 比现在达到的能力大约高  $10^{10}$  倍。

(3) 达到  $\Omega_\alpha$  极限值的关键是用几千伏的 X 射线在高  $Z$  的固体中产生相对论性/电荷位移自捕获通道, 这个概念命名为“光子的阻滞”(“Photon staging”)。

(4) 要达到现在所知道的最高区域  $10^{30} \sim 10^{31} \text{ W/cm}^3$ , 这个区域代表着基本粒子衰变的过程, 这将需要了解新的物理过程, 这个过程可能与在普朗克尺度上的现象相联系。

## 1.1 功率压缩的历史

为了达到将激光辐射耦合到核系统的目的, 曾经经历很长的时间——大约经历了 30 年。在这个过程中, 一个很好的信息来源于 Baldwin、Solem 和 Gol'danskii 写的标题为《走向  $\gamma$  射线激光的发展》的文章, 它是综合性的里程碑式的文章<sup>[1]</sup>, 在发表这篇重要文章后 25 年所取得的进展可以预见, 现有的高的功率密度足够放大在  $\gamma$  射线区域相应的核跃迁。

功率压缩的历史如图 1-1 所示, 它说明存在一些发展的时间节点, 节点之间由一个约为  $10^{10}$  的因子分割开, 并且每一阶段标志着一个技术的突破, 同时从这些历史可以明显地看出这一事实: 功率密度每达到一个新水平, 通常都表现为两种形式, 最开始是一种物态的产生, 伴随大量的不可控的能量释放出来, 这就如同化学爆炸; 这样的事件之后就伴随一个新发明, 在这种传统爆炸物的情况下, 如大炮, 它产生有序、可控的输出能量。在发展的每一阶段, 控制是和能量相结合的。在功率水平为  $10^{20} \text{ W/cm}^3$  时, 如图 1-1 所示, 核爆炸和相干的 X 射线放大分别对应于不可控的和可控的两种形式。在这种情况下引导到几千伏特 X 射线放大的新发明是将一种建立高度有序的包括离子、等离子体和相干辐射成分的物质的合成态的新概念和运用两个 20 世纪 90 年代的发现形成的径向对称的荷能的物质, 即中空的原子和自捕获的等离子体通道相结合。现在展现给我们的功率压缩的情况是功率密度

尺度的对数中点大约是在  $10^{20} \text{ W/cm}^3$ ，总的来看，这个水平在实验上有三个代表性现象：①核爆炸；②激光诱导的核裂变<sup>[2-4]</sup>，固体铀在 10 fs 的时间内完成的裂变，这些极限的数值约为  $10^{25} \text{ W/cm}^3$ ；③Xe(L) 中空原子跃迁  $\lambda(28 \text{ nm})$  上的 X 射线放大<sup>[5,6]</sup>。

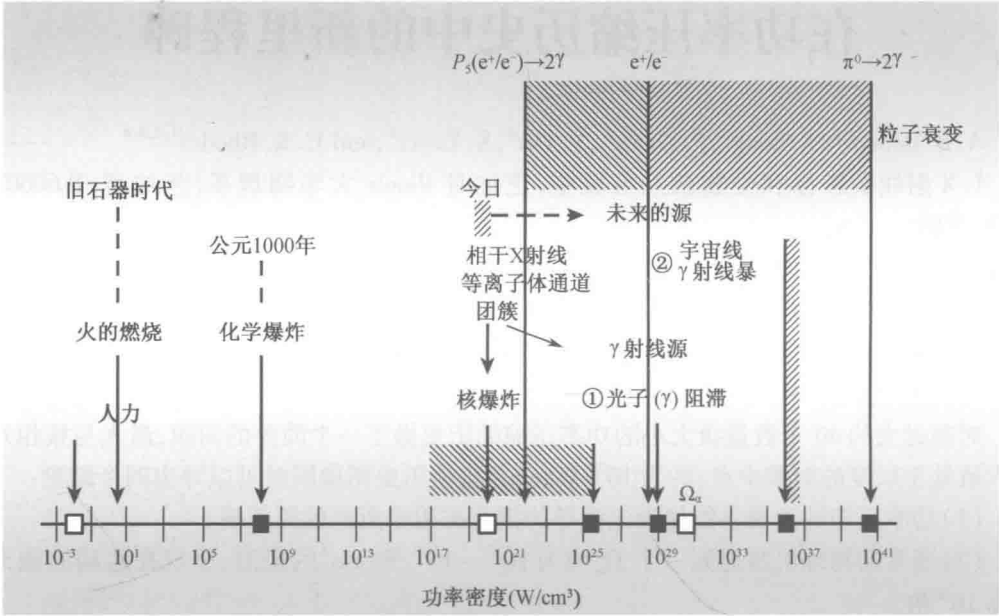


图 1-1 功率技术发展的历史

它展现了功率密度在  $10^{40}$  那么大的量程范围内的历史，这个范围物理上对应于从原始的人力到很快的粒子衰变中的功率密度，现在的情况粗略地说，是处于  $10^{20} \text{ W/cm}^3$ 。在实验上这是相应于核爆炸、激光诱导的核裂变<sup>[2-4]</sup>和相干的 X 射线放大<sup>[5,6]</sup>，估计功率密度可以达到的极限，可以通过几千伏特的 X 射线在高 Z 固体中形成沟道时达到，设计可以达到  $\Omega_{\alpha} \approx 10^{30} \sim 10^{31} \text{ W/cm}^3$

## 1.2 总 结

在 Karlsruhe 聚会期间所得到的信息足以得出以下四个结论：

- (1) 预示的功率压缩的进展将能使激光诱导耦合到所有的原子核；
- (2) 通常的物理过程功率密度极限  $\Omega_{\alpha} \approx 10^{30} \sim 10^{31} \text{ W/cm}^3$  是可以达到的；
- (3) 到达极限的关键是产生相对论性/电荷 - 位移自捕获通道和几千伏特的 X 射线在高 Z 固体中的传输和；
- (4) 要达到  $10^{30} \sim 10^{31} \text{ W/cm}^3$  区将需要对一个基本的新物理的理解，它最可能是和普朗克定标率紧密相关，对于后者，一个丰富的基础是存在的，并且还有一些合成的概念也已有假设<sup>[7-9]</sup>，但是整个理论的图像还在发展之中。

### 致 谢

这项工作由海军研究局 (NOO173 - 03 - 1 - 6015)、陆军研究局 (DAAD19 - 00 - 1 - 0486)、(DAAD19 - 03 - 1 - 0189) 和 Sandia 国家实验室 (1629, 17733, 11141 和 25205) 共同

支持完成。Sandia 是多项目的实验室,由 Sandia 有限公司运行;Lockheed Martin 公司隶属美国能源部,合同号 DE-AC04-94AK85000。

## 参 考 文 献

- [1] G. C. Baldwin, J. C. Solem, V. I. Gol'danskii: Rev. Mod. Phys. 53, 687 (1981).
- [2] K. Boyer, T. S. Luk, C. K. Rhodes: Phys. Rev. Lett. 60, 557 (1988).
- [3] K. W. D. Ledingham, I. Spencer, T. McCanny, R. Singhal, M. Santala, E. Clark, I. Watts, F. Beg, M. Zepf, K. Krushelnick, M. Tatarakis, A. Dangor, P. Norreys, R. Allott, D. Neely, R. Clark, A. Machacek, J. Wark, A. Cresswell, D. Sanderson, J. Magill: Phys. Rev. Lett. 84, 899 (2000).
- [4] T. E. Cowan, A. Hunt, T. Phillips, S. Wilks, M. Perry, C. Brown, W. Fountain, S. Hatchett, J. Johnson, M. Key, T. Parnell, D. Pennington, R. Snavely, Y. Takahashi: Phys. Rev. Lett. 84, 903 (2000).
- [5] A. B. Borisov, X. Song, F. Frigeni, Y. Koshman, Y. Dai, K. Boyer, C. K. Rhodes: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 36, 3433 (2003).
- [6] A. B. Borisov, J. Davis, X. Song, Y. Koshman, Y. Dai, K. Boyer, C. K. Rhodes: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 36, L285 (2003).
- [7] Y. Dai, A. B. Borisov, J. W. Longworth, K. Boyer, C. K. Rhodes: In: *Proc. Int. Conf. Electromagnet. Adv. Appl.*, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 1999, ed. R. Graglia, 3.
- [8] Y. Dai, A. B. Borisov, J. W. Longworth, K. Boyer, C. K. Rhodes: Int. J. Mod. Phys. A 18, 4257 (2003).
- [9] Y. Dai, A. B. Borisov, J. W. Longworth, K. Boyer, C. K. Rhodes: Adv. Stud. Contemp. Math. 10, 149 (2005).

## 第2章 高强度激光和物质的相互作用

H. Schwoerer

光学和量子电子研究所, Friedrich - Schiller - Universität, Max - Wien - Platz 1, 07743  
Jena, Germany

### 2.1 激光与物质

一个激光束可以用来产生核反应,去产生中子,引起核聚变,或者使一个核裂变。一个激光的光子能量在十分之几到几电子伏特的范围,而使一个铀核裂变所需要的能量为几百万电子伏特,那么它是如何做到的呢?

关键的问题是激光与物质的相互作用完全是由电磁场支配的,而不是单个光子的作用,或者说,相互作用的物理已从经典的非线性光学走向新的占支配地位的相对论性光学。

这种情况有多方面的效果,相对论性光学或者光与物质间的相对性相互作用开始发生,是当一个电子在光场中的抖动能量接近于电子静止质量,这发生在光强为  $2 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  (波长  $\lambda = 800 \text{ nm}$ ) 的情况下。当今的超强激光的强度,比这一数值要高4个数量级以上,因此实验激光物理真正进入了一个新奇的领域。

现在我们将激光聚焦所产生的电场强度和将太阳光聚焦的情况做一个类比,如图2-1所示,如果人们能将射到地球上的太阳光,用一个足够大的透镜聚焦到如铅笔尖大小( $0.1 \text{ mm}^2$ )的焦斑上,这时光斑上的光强约为  $1 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ ,它相当于  $10^{11} \text{ V/cm}$  的电场强度,这个数值几乎比氢原子中电子所受到的原子核的库仑场高一百倍。在激光的光斑上,加在固体上的光压可达到  $\text{Gbar}$  量级,通过电子的直接加速,产生了  $10^{12} \text{ A/cm}^2$  的电流密度和几千特斯拉的磁场。并且,最终微量、浓密的物质被加热到几百万度,物质的这些状态和这样大小的场存在于星球内部、黑洞的边缘和太阳系的喷注中,现在可以在实验室中通过可控的方法在高强度的激光等离子体中产生。

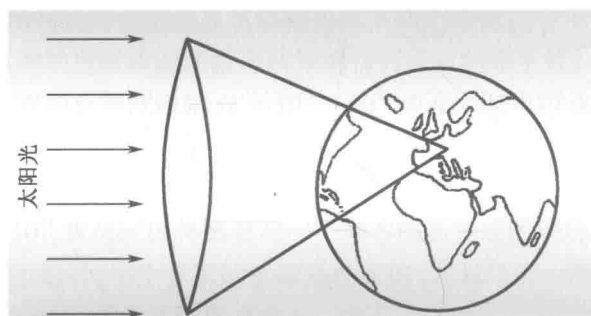


图2-1 如果用透镜将太阳光聚焦到光斑大小为  $0.1 \text{ mm}^2$ , 光强将达到  $10^{20} \text{ W/cm}^2$ , 这个光强是现在高强度激光技术容易达到的