

12 2.56—2.61

交叉学科研究

高功率激光在存储环上的应用*

赵之正 刘军辉 王旭东 杨永锋 祖凯玲
(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

TL 594
TN 241

摘要 重离子冷却存储环中的束流是高密度的等离子体, 这样的束流照射物体将得到超高压强. 如果高功率激光照射束流, 将产生实验室中从来没有过的超高温. 这些极端的条件为开辟重离子物理研究新领域提供了可能性. 在存储环中使用 X 射线激光可以测量类锂离子的电荷均方根半径绝对值, 使核基态性质的研究将有突破性的进展. 它开辟了了在等离子体物理、金属物理、核物理和天体物理等领域新的实验条件. 为惯性聚变的快速点火创造了最好条件.

关键词 高能量激光 高密度等离子体 X 射线激光谱学 惯性聚变的快速点火

分类号 TN249

存储环

1 引言

1998年至2000年, GSI 在等离子体物理的研究有所突破的基础上, 将使 Unilac 和 SIS 加速器的束流强度增加3个数量级. 与此同时, 将安装一台每脉冲具有1 000 J 的脉冲激光器, 由于它的光脉冲宽度很窄, 所以瞬时功率非常大, 可达1 PW. 这个计划称为 PHELIX 计划^[1]. 同类激光器美国 Livermore 实验室早有一台. 这样高束流密度的存储环与高能量的激光器的结合, 将产生世界第一的实验条件. 他们希望以这个实验条件能维持国际领先十年. 这个实验将开辟许多新领域的研究项目, 将提供一次在许多研究领域第一次以扫描式作研究工作的机会. 这些新的领域和新的方法, 是过去许多传统学科的交叉.

强度将增加3个数量级, 已经接近空间电荷极限. 这样在2000年可将存储环(ESR)中离子束强度增加到空间电荷极限, 成为目前最高的束流密度. 这个离子流的主要特点是在维持束流是脉冲的条件下, 产生的等离子体是均匀的, 具有很好的几何、小的梯度、均匀电离和高物质密度(接近固体密度). 是精密流体力学和定量相互作用实验的基础.

例如, 在使用了新的劈束元件后脉冲长度为50 ns, 束斑直径为1 mm, 等离子体密度为约 10^{21} ions/cm³. 这个等离子体打在固体上产生的内部温度可以达到10 eV, 而且束流等离子体的形状可以是圆柱、平面或空心的, 如在300 MeV/u 动能下, 典型等离子体靶是直径1 mm、长3 mm 的圆柱状.

2 实验装置与新条件

2.2 高能量激光

2.1 重离子束流

高能量激光器是采用 Nd 玻璃介质($\lambda = 1 053$ nm)的啁啾放大器组构成的脉冲激光器. 它有两个工作模式. (1) 高能量模式: 1 kJ, 1~10 ns 脉冲宽度(0.1~1 TW)带有频率3倍频. (2) 高强度模式: 500 J, 500 fs~5 ps (100 TW~1 PW), 使用啁啾放大器. 进

强流重离子束是主要条件之一. 为达此目的, GSI 将其作为注入器的加速器 Unilac 的束流强度进一步增加, 特别是重离子束流

收稿日期: 1999-04-22.

* 国家自然科学基金(项目号19875067)和中国科学院九五重大项目共同资助.

一步改进还可以达到几千焦耳的激光能量。

高能量激光将以最少的反射镜传入存储环内或加速器束流线上, 这个激光束可以照射能量范围很大的束流靶, 也可以照射固体物质产生高密度等离子体, 还可以作 X 射线激光器的主要泵浦激光器。

2.3 新的实验条件

照射到固体的激光功率密度为 $10^7 \sim 10^9$ W/cm² 时, 将使中性原子电离, 如果原子接受的能量足够多, 那么可以产生高电荷态的离子, 直至全剥离; 更高能量密度的激光将使被照射原子产生高能电子和 X 射线, 如果强激光照射在等离子体的表面或内部空腔, 那么将产生极高温度。从目前加速器束流来看, 温度可以从 10 eV 提高到 100 eV, 这为重离子束流与电离物质的相互作用研究提供了条件。此外, 高密度等离子体与物质相互作用, 也就是由于多次冲击波的作用能产生 10 Mbar 的压力, 这可以使氢气金属化, 为极端条件下的物质行为的研究提供了条件, 也为高密度等离子体电离和相对论等离子体物理的研究创造了新的条件。目前, 人们很感兴趣的是 10~20 J 激光能量、皮秒级脉冲宽度的激光器已经成功地产生了 X 射线激光, 如果这类 X 射线激光器能够使用, 那么在存储环上将能开展类锂重离子的 X 射线激光谱学的研究。这个新的实验条件, 将使核基态性质研究有新的突破, 使许多核理论的预言有了检验的机会。另外, 在存储环中进行的光核反应及核的非线性光学等研究成为可能, 也为惯性聚变点火研究提供了目前最好的条件。

3 可以开展的研究内容

3.1 离子束与电离物质的相互作用

利用上述激光照射普通物质可以产生高密度等离子体, 此时若有重离子束经过将实现高密度等离子体与重离子的相互作用, 从

而开辟从来没有过的重离子在等离子体内的能量损失研究^[3]。

设想的实验方法是: 先让离子束流穿过冷靶并用飞行时间法进行测量, 然后用高能量激光对冷靶“点火”, “点火”瞬间冷靶变成高温、高密等离子体, 对离子的阻止能力增大, 随后由于等离子体的扩散作用, 密度减小, 阻止本领随之减小, 这个方法能测量重离子在高密度等离子体中的能量损失。

如果使用高能重离子激发高密等离子体, 可观察到很多动力学过程。实验中, 先用激光将一固体靶融化, 再用高强度束流辐照使之成为等离子体, 即所谓“激光感生等离子体”, 它具有很高的电子浓度。由于离子与电子的复合速度正比于 $Z^2/T_e^{3/2}$, 通过控制激光束和离子束之间的时间延迟, 便可改变等离子体的离子密度 n_i 和温度 T_e , 这样可测得离子的复合速度。由于高的电子浓度可极大的增加复合速度, 有益于进一步研究复合、退激过程。

低发散、高强度离子束可产生非常理想的等离子体空间, 且其温度和密度能够满足核聚变的要求, 因此, 也成为驱动惯性聚变靶的一个可能的候选驱动源。最近在 SIS 上做的实验中, 用 300 MeV/u 的氦束轰击铅靶时, 由于使用的束流强度为 1996 年时的 4 倍, 而获得了 1 kJ/g 的最大阻止率, 强度进一步提高后, 阻止本领将再增大, 可以产生非常均匀的等离子体; 如果测量到两个参数, 如激波速度和物质速度, 就有可能定量的确定状态方程。利用高能量飞秒级激光轰击高 Z 靶产生的高能 X 光(作为背景光能够穿透靶室)可实现对作用过程的观察、测量。

3.2 高密强耦合等离子体与物质相互作用

达到空间电荷极限的重离子束流脉冲也是强耦合等离子体, 它与高密度、高压(1 Mbar~1 Tbar)物质的形成紧密相关, 研究自然界中最丰的元素之一氢以及其他金属如液态金属、合金等在这种条件下的行为具有

重要意义. 人们已经用多种技术手段企图在实验室条件下得到它们的强耦合等离子体. 采用新条件研究强耦合等离子体的性质, 尤其是它的状态方程 EOS、稳态行为、可能的相变和相变点及受离解与电离作用的影响等, 都是主要的研究课题^[3].

人们已经尽管通过激光驱动平面冲击波测得了 3 Mbar 压力下的物质状态方程的数据, 但当继续用 Hugoniot 原理和增加冲击波的强度时, 只能增加熵, 并不能进一步使物质压缩. 采用重离子束流多冲击波技术可实现进一步压缩, 把低熵物质压缩到高密度状态^[4]. 一种多冲击波方法的设想是用高强度束流加热两个平行的板极, 板极中间放置一个板层探针(见图 1). 加热板极在瞬间以 $10^5 \sim 10^6$ cm/s 速度沿垂直方向向内扩张, 形成冲击波, 两冲击波波前在夹层探针中心处相遇并反弹, 在两个被加热的板极和探针夹层中心之间形成一系列反弹冲激波, 对板极进行压缩. 用此方法可将物质压缩至低温(低于 1 eV)高压(10 Mbar)状态. 多冲击波方法对重离子束流的要求是能量 100~1 000 J, 脉宽 50~100 ns.

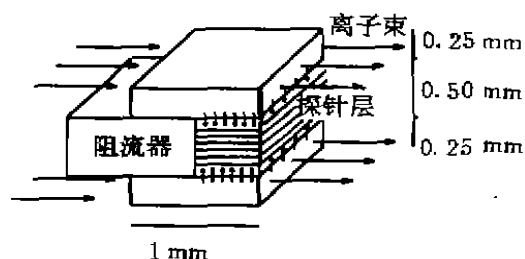


图1 多冲击波压缩方法

氢和其他分子晶体在实验室条件下的金属化问题一直没有得到彻底解决, 其中氢是最难金属化的物质. 关键在于把氢分子转化成简单的金属结构所需 3 Mbar 以上的压力难以实现. 借助于多冲击波方法可以解决这一问题.

确定金属的气-液相变点问题, 除了少数碱金属外, 其他都很难在实验室条件下实现.

它们的密度是一般物质的 $1/2 \sim 1/10$, 温度约 1 eV, 压力在 10~100 kbar 之间. 用重离子束流将板极加热至 5~10 eV, 随后的等熵膨胀将使金属达到该相变所需的条件.

3.3 类锂重离子的 X 射线激光谱学

原子核的电荷半径、自旋以及磁矩与核的质量(或束缚能)一样都是核基态性质的重要信息, 且可以从原子光谱学获得. 在过去 25 年间, 激光谱学的发展, 使得已有几百个同位素的基态性质用激光谱学方法进行了研究, 观察到了十分丰富的核现象. 事实上, 奇异核基态性质的多数信息都是用激光谱学方法获得的. 例如, 通过测量 ^{11}Li 的电四级矩, 说明了这个核仅有很小的形变, 从而支持了对 ^{11}Li 的异常半径的解释, 即 ^{11}Li 的异常半径是由极松弛束缚着的两个中子(中子晕)引起的. 核理论的研究还预言有质子晕和质子皮存在, 但是要研究这个现象只有通过光谱学测量电荷均方根半径的方法. 同时受同位素分离方法的限制, 对短寿命、低截面产物和高温难熔元素做激光谱学测量仍然有困难, 然而许多很有意义的现象都存在于这些核事件之中. 此外, 测量电荷均方根半径只能测量到同位素之间的相对变化. 使用放射性束流装置和重离子冷却存储环可完全克服上述困难.

对于高剥离态离子(指类氢、类氦和类锂离子), 由于电子屏蔽效应的减少使电子波动方程可以精确求解, 并且对同位素移动进行传统测量即可获得绝对电荷半径. 另外, 测量物质半径, 可进一步确定中子半径, 从而为超精细结构和同位素移动的研究提供一个新的实验手段. 因为核性质研究不仅要沿着同位素链, 还要沿同中素链有所进展, 所以电荷半径值的绝对测量为远离稳定线核的基态性质研究开辟了新方向和提供了新手段.

由于类锂离子基态原子激发能小, 受电子的影响也小, 非常适合超精细结构和同位素移动的研究. 铀的 $^2S_{1/2} - ^2P_{1/2}$ 跃迁具有 280

eV 的能量,而在 ESR 中,由于光子与离子的对撞,只需 110 eV 的光子即可实现跃迁的共振激发。

激光激发后退激产生的光子会有较强的多普勒移动,所以对这类光子的探测灵敏度很高,对散射光的抑制也可以很好。由于 ESR 中粒子的速度可调,因此可采用固定频率的 X 射线激光实现 X 光谱的扫描,得到激发 X 射线谱。40 eV 能量的光子即可用于锡以上的类锂元素,现有的 X 射线激光器就可满足这个条件,所以使用 X 射线激光可以在冷却存储环上实现电荷均方根半径的绝对值测量。

激光驱动的 X 射线激光器研究已经有了突破性进展^[5],以 ns 脉冲激光得到 Ti 的类氦离子的等离子体,跟着以 Sps 的激光脉冲非稳定转换得到了 X 射线激光,只需要几个焦耳的泵浦能量就得到了 32.5 nm 的紧凑 X 激光器,增益系数高达 35 cm^{-1} 和增益-长度乘积达 ≈ 15 。据报道利用相同方法, TiXII 得到的激光波长为 30.1 nm, V XIII 的为 30.4 nm, Ge 的为 19.5 nm 都已经实现。如果使用 10 J 的激光器能量转换系数^[5]将是 5×10^{-6} ,那么将得到 10 mJ 的 X 射线激光能量,合 10^{11} 光子/脉冲,具有足够多的光子。

3.4 相对论的等离子体物理和激光加速

100 TW~1 PW 的激光脉冲作用于等离子体,将得到 $10^{18} \sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$ 的极高功率密度。初步的结果是观察到了光的反射、透射和散射,特别是观察到了相对论电子、X 射线、二次粒子发射,尤其是中子发射。以最简单的理解,是由于激光引起了巨大电流造成强电场和磁场而引起的。当然出射粒子可以作为等离子体的诊断工具。

当激光与等离子体相互作用时,产生自聚焦的能量在 $17 \text{ GW} (\omega_L/\omega_p)$ 以上, (ω_L 和 ω_p 分别是激光和等离子体的频率),同时会产生了一个直径只有几个波长大小的通道,还附加了激光强度的增加。激光隧道又会产生巨

大的电流强度,电流强度是 $en_e c = 10^{12} \text{ A/cm}^2$,取 $n_e = 10^{21}/\text{cm}^3$,相应的 Alven 电流 $I_A = mc^3/e = 17 \text{ kA}$,相应的磁场为几万个特斯拉,这是目前实验室中所能达到的最强宏观磁场。电子被这个自聚焦磁场收缩在激光通道内。结果这个通道不仅能通过激光,而且通过以磁性准直了的电子束,对电子束或离子束都将有强烈的聚焦作用。

当等离子体密度接近临界值时,反应中等离子体波将会被破坏,在激光方向上可以观察到很强的电子束流,它们是在一个很小的锥体内发射的具有高能高温的电子。

同样还可以研究激光导致的电子韧致辐射和二次放射性束。目前高能激光已经应用于核与粒子物理研究,ps、TW 级的激光脉冲用于核放射性研究也将成为可能。

等离子体与激光反应时,在等离子体波的尾部能产生一串尾迹场(Wakefield),这比传统的直线加速器的电场要大几个数量级,因此可以用尾迹场实现离子加速。不幸的是,这样加速的粒子的能量分散太大,改善加速的单色性和加速原理的进一步研究正在开展。

3.5 核物理

有许多人预言,在高能激光作用下可以产生高能量大产额的电子束和光子,其能量超过 300 MeV。这种电子和光子应当引发多种核反应^[6],如光核反应(γ, n)、 π 介子产生反应 $p(\gamma, \pi^0)p$ 、巨共振和正负电子对发射等。目前已经在美国 Livermore 的 1 PW 激光实验中证实,此时激光产生的功率密度为 10^{18} W/cm^2 。考虑到前述高能激光的自聚焦效应, GSI 建议中的激光可以达到 10^{21} W/cm^2 激光功率密度。目前研究的主要目的是利用核物理测量手段和核反应机制,研究发射的电子和离子谱中的高能部分。还可以研究 10^{13} A/cm^2 高强度的电子和光子与核在第一次碰撞时产生的激发态。另外,与炮弹碰撞将产生更高的激发态,称二次效应,用这个

效应可以观察核的非线性效应。

3.6 惯性聚变能源的研究

所谓惯性约束聚变能源(IFE)研究就是通过高度压缩在小罐子内的氘-氚燃料(又称靶子)实现点火。点火有两种方法,即激光点火和重离子束点火。高能激光器还可以做到“快速点火”^[7],普通的点火是利用激光或重离子束使含有氘和氚的燃料靶丸压缩,同时做到能量传输,使靶心达到高温的,又称“火花点火”。而快速点火是把这两个过程分开,先以重离子束产生冲击波使靶丸受到压缩,然后用强激光开洞,将传输能量传到靶心实现点火。

目前美国和欧洲正在建造高能量激光器研究火花点火过程,欧洲的重离子驱动器也公布了3年的研究成果,GSI的重离子产生的高密等离子体等问题的研究已经接近IFE的目标。

为了实现点火,必须清楚地知道束流与

等离子体的相互作用和附加的流体力学的基本过程,还需知道重离子束流在辐射区的能量转换和传输,利用高能激光器就可对能量的转换、传输与沉积及对激光通道和重离子束与激光脉冲的延迟时间等问题加以研究。

4 结束语

重离子加速器与最先进的激光PW级脉冲激光器相结合,就会创造国际上从未有过的极端实验条件,产生可以开展探索性研究的空间。重离子冷却存贮环的实验并不局限于加速器和粒子物理的范围,而综合了多种学科,如天文学、金属物理、等离子体、离子与离子相互作用以及聚变能源和核结构等方面,其结果必将使这些领域取得开创性的新结果。使用类锂离子激光光谱学技术做核电荷半径的绝对值测量是个创新的思想,如果成功,将会给核的基态性质研究带来突破性进展。

参 考 文 献

- 1 Members of Study of Group. High-power Laser at GSI. GSI-REPORT 98-10
- 2 Dietrich K G, Hoffmann D H H, Boggasch E *et al.* Charge State of Fast Heavy Ions in a Hydrogen Plasma. *Phys Rev Lett*, 1992, 69: 3 623~3 626; Jacoby J, Hoffmann D H H, Laur W *et al.* Stopping of Heavy Ions in a Hydrogen Plasma. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 1 550~1 553
- 3 Fortov V E. *Physics of Nonideal Plasmas*. Hemisphere, New York, 1990
- 4 Dasilva L B, Celliers P, Collins G W *et al.* Absolute Equation of State Measurements on Shocked Liquid Deuterium up to 200 GPa (2 Mbar). *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 483~490
- 5 Nickles P V, Shlyaptsev V N, Kalachnikov M *et al.* Short Pulse X-ray Laser at 32.6 nm Based on Transient Gaseous Ne-like Titanium. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 2 748~2 751; Nickles P V. *Optics Communication*, 1996, 142: 259
- 6 Karsch S. *Particle Physics with Petawatt Lasers*. Proc XXV ECLIM, Laser Part Beams, 1998
- 7 Pukhov, Meyer-ter-Vehn J. Relativistic Magnetic Self-channeling of Light in Near-critical Plasma Three-dimensional Particle-in-cell Simulation. *Phys Rev Lett*, 1996, 76: 3 975~3 978; Boigheci M, Mackinnon A J, Barringer L *et al.* Relativistic Channeling of a Picosecond Laser Pulse in a Near-critical Preformed Plasma. *Phys Rev Lett*, 1997, 78(5): 879~882

Application of High-energy Laser on Storage Ring

Zhao Zhizheng Liu Junhui Wang Xudong Yang Yongfeng Zu Kailing

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract In cooling storage ring heavy ion beam is plasma of high density. When a big power laser interacted on it, it will get ultra-high temperature. This beam irradiated on an

object will get ultra-high pressure. This high energy pulse laser can produce X-ray laser. In the cooling storage ring absolute value of charge mean root radius of Lithium-like nuclei will be measured by the X-ray laser. It will be broken through in investigating the property of nuclear ground state. That will create many new experiment conditions about plasma physics, metal physics, nuclear physics, astrophysics and so on.

Key words high-energy laser dense plasma super-high pressure shock wave
X-ray laser spectroscopy fast ignition of inertial fusion

Classifying number TN249