

3872

870610

论文

余文发

中国科学院上海光机所

870613

编者按: 王淦昌教授是我国激光核聚变研究的主要倡导者之一。最近在中国科学院上海光机所技术档案中找到了他在1964年10月4日写成的第一篇未曾正式发表的论文。这篇论文不仅在当时对激光核聚变研究有开拓性的指导意义,而且在现在也不失其重要的参考价值。为回顾他长期指导这个领域所作出的重大贡献,在他八十大寿之际,特予发表。

为了尊重历史,我们对论文中的观点未作任何修改和补充,除几处明显笔误作了订正外,其中一些不够规范的词语亦保留其原样。

利用大能量大功率的光激射器产生中子的建议

王 淦 昌

(中国原子能科学研究院)

提要: 本文提出了用光激射方法产生中子的具体建议。叙述了以氟化铀作靶较为有利的理由,并且估计了入射光能 E 、聚光范围 r_0 与中子产额 N 的关系。本文叙述了氟化铀靶应该怎样制备;如何用实验方法验证有否中子的存在;验证有否 X 光的存在;以及讨论了如何深入到定量的测量。最后还建议利用化学药品代替电容器,以使产生中子的整个装置轻小易携。

Suggestion of neutron generation with powerful lasers

Wang Ganchang

(Chinese Academy of Nuclear Science, Beijing)

Abstract: Concrete suggestion of producing neutrons using laser light is put forward. Also described are the reasons for selecting LiD as preferential target, and dependence of neutron yield N on the incident light energy E and the focus range. In addition, preparation of LiD targete, the experimental demonstration of neutron and X-ray together with some issues of quantitative measurement are discussed. To make the facility compact, the author proposed that chemicals might be used instead of capacitors.

一、引 言

目前国内外,都在研究和制造可以产生

大能量和大功率的光激射器(即莱塞)。但对于它们的应用,除了作切焊钻孔外,尚未见

收稿日期:1987年6月10日。

有实际上行之有效的报道。我们认为若能使这种光能激射器与原子核物理结合起来, 发展前途必相当大; 其中比较简单可行的就是使光激射与含氘的物质发生作用, 使之产生中子。这种产生中子的方法, 至少有两种优点, 即脉冲时间非常的短 (10^{-9} s); 整个装置可以做得轻小, 便于携带, 是其他方法所不能与之比拟的。至于利用这种核作用的方法, 是否有进行一种新型的可控制热核反应的可能性, 暂不在此讨论。

二、原理和设计

由光激射器发出的单色相干光的能量, 目前已达到 100J 至 1000J 的数量级, 将来当然会向前推进。至于发出这种光能的时间, 则由于利用大脉冲 (Giant pulse) 的方法, 已缩短至 10^{-9} s 或更短些。现在设想自光激射器发出一束能量为 E 的光, 聚焦范围为 $d = 2r_0 = 0.01$ cm, 以 $t \cong 10^{-9}$ s 的时间, 射入一个含氘核的靶上, 则由于光与物质的作用, 在靶上的焦点的温度必急剧上升。为简单起见, 可以假定光透入靶的厚度, 与 r 值相近, 因而整个被光所渗入的物质, 可以视作半径为 r 的球体。这样, 则球体达到的温度可以从下式算出:

$$C_v(T - T_0) = C_v T = \frac{3}{2} kNT = E$$

或:

$$T = \frac{2E}{3kN} \quad (1)$$

式中 C_v 是物体的定容比热; k 是 Boltzmann 常数; N 是球体内的粒子总数, 即

$$N = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot n \cdot s,$$

n 是每单位体积的分子数, s 是每个分子的粒子数 (此时分子内的电子绝大部分已游离成为自由电子)。现在假定入射光的能量为 $E = 100$ J, 靶材是二氧化氘 (D_2O , 即重水), 其密度 $\rho = 1.1$ g/cm³, 因而

$$n = \frac{1.1 \times 6 \times 10^{23}}{20} = 3.3 \times 10^{22} / \text{cm}^3, \quad s = 13,$$

故 $n \cdot s = 4.3 \times 10^{23} / \text{cm}^3$ 。以此代入 (1) 式, 就得 $T = 4 \times 10^7$ K。在 $t = 10^{-9}$ s 内达到这样高的温度, 可以产生约 2×10^{10} 个中子。这是按公式:

$$N \cong \frac{1}{2} (n_D)^2 \cdot \bar{V}_0 \cdot t \cdot (\sigma \bar{v})_T \quad (2)$$

求得的。其中 n_D 是每立方厘米内的氘核数, 显然 $n_D = 6.6 \times 10^{22} / \text{cm}^3$, $\bar{V}_0 \left(= \frac{4}{3} \pi r^3 = 4r^3 \right)$ 是吸收 E 热量的物质的体积; t 是作用时间, 当作 10^{-9} s; $(\sigma \bar{v})_T$ 是在 T 温度下, D-D 作用截面与 D 核子速度的平均乘积。可以知道, 当 $T = 4 \times 10^7$ K 时, $(\sigma \bar{v})_T = 0.1 \times 10^{-24} \text{cm}^2 / \text{s}^{[1]}$ 。把以上这些数字代入 (2) 式, 即得出总的 D-D 作用次数, 也就是产生中子的数目 N_0 。

但由这种简单方法求得的中子数, 恐怕不会符合实际情况。由于作用点聚焦的热量如此之大, 虽然时间很短 (10^{-9} s), 但向周围扩散的热量仍然相当大, 不能忽略不计, 以致焦点温度远达不到由上面所计算出的 4×10^7 K。

现在让我们来粗略地估计一下热扩散的影响。从能量不灭定律, 得如下公式:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (3)$$

式中 ε 是作用点的能量密度, \mathbf{q} 是该点的“热流密度”。在温度约为 10^6 K 以上时, \mathbf{q} 主要是辐射的。因而可以写成:

$$\mathbf{q} = q_{\text{辐射}} = -\frac{lC}{3} \nabla aT^4 = -\frac{lC}{3} 4aT^3 \nabla T \quad (4)$$

故

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q} = \nabla \cdot \frac{lC}{3} 4aT^3 \nabla T \quad (5)$$

上面两个公式中的 l 是辐射在物质内的自由程, $\alpha = \frac{4\delta}{C}$, δ 是 Stefan 常数, 故 aT^4 即辐射密度, 我们只要估算热扩散的大致情况, 故 (5) 可以写作:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{lC}{3} 4\alpha T^3 \nabla^2 T \quad (6)$$

因 $\varepsilon = C_v T$, 故

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{lC}{3} \cdot \frac{4\alpha T^3}{C_v} \nabla^2 T \quad (7)$$

此式就是普通的扩散方程式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \nabla^2 T \quad (8)$$

由此得到扩散系数 D 的表达式, 即

$$D = \frac{lC}{3} \cdot \frac{4\alpha T^3}{C_v} \quad (9)$$

(8) 式的解是:

$$T = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{r^2}{4Dt}} \quad (10)$$

从(10)式可知, 当 r 扩大到 $2\sqrt{Dt}$ 时, T 值减小到原来的 $\frac{1}{e}$ 。故我们可以把 $2\sqrt{Dt}$ 看作是扩散的“强度”。因此欲使传热扩散减少, 必须使 $2\sqrt{Dt}$ 小。从(9)式知 D 与 l 是成正比的, 但 l 与物质的密度有很大的关系, 密度越大, l 愈小, 故 D 也愈小。因此在我们的实验中, 含氘的靶的密度是愈大愈好。故以重水作靶是不大有利的, 而以氧化铀 ($\rho = 5 \sim 11 \text{ g/cm}^3$) 代替之, 较为适宜。当然, 我们也可以设法使靶本身仍为重水, 而周围则用铀 ($\rho = 19 \text{ g/cm}^3$) 包起来。这样, 原则上也可

以使热扩散减至很小, 但实际上是很不易做到的。

现在假定由光激光器发出的光, 经透镜聚焦, 在 10^{-9} s 内射至范围为 $d = 2r_0$ 的靶上 (靶的材料为氧化铀, $\rho = 5 \sim 10 \text{ g/cm}^3$), 热能就要向各方扩散, 其扩散范围就是 $2\sqrt{Dt}$ 。为简单起见, 假定在 $t = 0$ 时, 热能都聚在以 r_0 为半径的球体内, 经 t 秒后, 半径扩大至 $r = r_0 + 2\sqrt{Dt}$ 。从此就可以求出此 r 为半径的球体氧化铀在不同的温度下, 所需要的热量 (E) 和在这些温度下放出的中子数 (N)。下面两个表 (表 1、表 2) 就是算出的结果。

应用的公式有:

$$E = \frac{3}{2} n \cdot s \cdot \bar{V} \cdot \bar{\varepsilon}_T \quad (11)$$

$$N = \frac{1}{2} (n_D)^2 \cdot \bar{V} \cdot t \cdot (\sigma \bar{v})_T \quad (12)$$

其中, $\bar{\varepsilon}_T$ 是每个粒子在温度 T 时的平均能量

$$\bar{V} = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi (r_0 + 2\sqrt{Dt})^3$$

除了表 1 和表 2 外, 计算的结果, 都由图 1 的曲线更明显地表达了中子的个数与入射能 E 的关系。从这几条曲线可以看出有如下的关系。当能量较小时, 例如 100 J 以

表 1 $\rho_{uD_2} = 5 \text{ g/cm}^3$, $n_D = 3.7 \times 10^{22} / \text{cm}^3$, $t = 10^{-9} \text{ s}$

T (keV)	$2\sqrt{Dt}$ (10^{-3} cm)	$\bar{V} (r_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ cm})$ (10^{-6} cm^3)	N (中子数)	$\frac{2}{3} E$ (J)	$\bar{V} (r_0 = 10^{-3} \text{ cm})$ (10^{-6} cm^3)	N (中子数)	$\frac{2}{3} E$ (J)
0.2	2.4	1.6	4.2×10^2	63	0.16	41	6.1
0.3	6.2	5.5	4.4×10^4	385	1.48	1.2×10^4	105
0.4	13.9	25.4	3.4×10^6	2750	13.1	1.8×10^6	1450
0.5	25.6						

表 2 $\rho_{uD_2} = 10 \text{ g/cm}^3$, $n_D = 7.4 \times 10^{22} / \text{cm}^3$, $t = 10^{-9} \text{ s}$

T (keV)	$2\sqrt{Dt}$ (10^{-3} cm)	$\bar{V} (r_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ cm})$ (10^{-6} cm^3)	N (中子数)	$\frac{2}{3} E$ (J)	$\bar{V} (r_0 = 10^{-3} \text{ cm})$ (10^{-6} cm^3)	N (中子数)	$\frac{2}{3} E$ (J)
0.2	1.2	0.86	8.8×10^2	67.2	0.046	46	3.6
0.3	3.1	2.12	6.8×10^4	300	0.27	8.7×10^3	38.2
0.4	7.0	6.92	3.7×10^6	1500	2.05	1.1×10^6	450
0.5	12.8	22.40	6.5×10^7	6100	10.50	3.1×10^7	3200

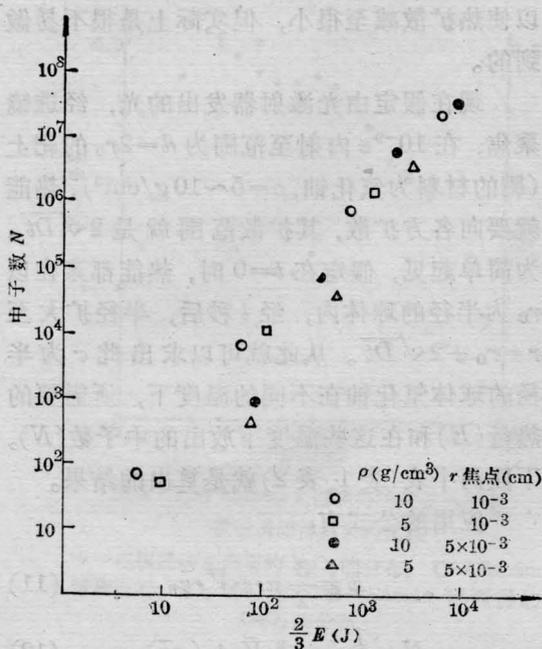


图 1

下, 靶的密度大和聚焦点小较为有利。但当能量达到 100J 以上, 各线渐趋于 1。这也是合理的, 因为能量大, 温度也高, 此时主要都由辐射扩散来决定。但我们必须了解, 由于计算的粗糙, 这些曲线, 只不过表示中子数产生的大致数量级, 因此不能过于重视它们。实际情况可能比此多几十倍, 或仅只有几分之一。应该通过实验来验证这些估计的准确程度。

三、实验安排的设想

关于如何产生大能量、大功率的光激励, 不拟在此讨论。这里只谈当光激励发生以后, 如何利用它来产生和探测中子。看来, 最重要的是靶的问题, 倘若材料用重水, 做起来就很容易。但按前节的分析, 重水的密度 ($\rho=1.1\text{g/cm}^3$) 太小, 对于阻止热扩散不很有效。因此应该用氘化铀。制备氘化铀有两个问题, 第一个问题是如何使它的密度增大到近乎它的理论密度 (11.0g/cm^3), 最好是做成单结晶体, 晶体的体积只要约 1mm^3 就

足够了, 甚至更小些也可以。倘若不能做单结晶体, 那只能将它压成小块, 这样密度是不会大的, 大概最多也不过 7 或 8g/cm^3 。但总比重水大得多。第二个问题是防止氧化。氘化铀在制备时就不可以和空气接触, 否则就要被氧化。制备完毕后, 也应该放在封闭器内, 以防止氧化。在这里的情况, 我们认为倘能制成约一个立方毫米的氘化铀单晶体, 应该把它们放在很薄的 (约 0.001mm 厚) 由 Mylar 制成的封袋内, 不使与空气接触。若只能制成粉末, 则必须以透明的有机玻璃管 (尽可能薄, 但必须能承受几百公斤/平方厘米的压强) 装入此粉末, 然后施加压力, 使其密度增大到 7g/cm^3 以上, 再封闭即成。当然, 在装制的全部过程中, 氘化铀都不能与空气接触。

若氘化铀已制备就绪, 我们就可以依照图的安排来做实验。这图虽然只是示意图, 但意义很明了, 除个别外, 无需加以解释, 图中靶与透镜及红宝石的相对位置, 并非按实际情况画出的。至于探测中子的仪器 (即图中所示的慢探头和快探头), 对于靶的位置如何才算适当, 则要以由靶发出的中子的数目及探测器的大小和效率来决定。此时很难定死, 必须通过试验, 逐渐得准确的位置 [当然, 开始时探测器离靶近些 (例如 5cm), 是比较合理的]。

关于探测中子仪器 [即快法探头 (光电倍

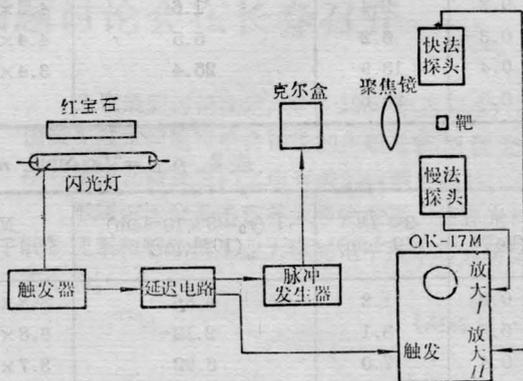


图 2

增管加闪烁晶体)和慢法探头(BF₃ 计数管加石蜡外层)]的具体构造和用法,不拟作介绍。但可以指出一点:欲证明由靶发出的射线确是中子,则用慢法探头最为可靠。

倘若中子探测器一时不易得到,可以先试探有否 X 光或波长很短的紫外光发出。此时靶的材料当然不必是含氘物质了。钨或铜、铁都可以,尤其以钨更为相宜。物体被光激射器照射后,能提高温度,即第二节所述,但高温的物体,必会发出光线。光线的平均波长 $\bar{\lambda}$ 与物体温度 T 的关系,粗略地可以由下式表示:

$$\bar{\lambda} = \frac{12.4 \times 10^{-5}}{T(\text{eV})} \quad (\text{cm})$$

例如,倘若物体温度 $T = 1\text{eV}$ (即 $1.16 \times 10^4 \text{K}$), 则光波的平均长度 $\bar{\lambda}$ 为 $12.4 \times 10^{-5} \text{cm}$ 或 1240.0nm , 若 $T = 10\text{eV}$ (即 $1.16 \times 10^5 \text{K}$), 则 $\bar{\lambda} = 1.24 \times 10^{-5} \text{cm}$ 或 124.0nm , 余类推。我们可以粗略地假定物体是黑体,并且假定此时 Wien 的位移定律也是对的,即:

$$\lambda_m T = \frac{2\pi\hbar C}{k \times 4.965} = 0.2898$$

因此,当 $T = 1.16 \times 10^4 \text{K}$ (即 1keV) 时, $\lambda_m = 2.5 \times 10^{-1} \text{cm}$, 即 250.0nm (λ_m 是波谱分布的极大值), λ_m 与 $\bar{\lambda}$ 的值相差不大。因此若能测出光的波长 λ_m 或 $\bar{\lambda}$ 即可以估计物体的温度。在我们所感兴趣的领域内,波长估计是在 25.0nm ($\approx 10\text{eV}$) 至 0.5nm ($\approx 500\text{eV} = 0.5\text{keV}$) 之间,即短紫外线至长 X 光波之间。最简单的方法,是用 X 光照像底片,以极薄(约 $1 \sim 5 \text{mg/cm}^2$) 的黑纸或铝箔包好后,放在靶的附近(距离不大于 5cm) 看是否有感光作用。若没有,则设法提高聚焦点的温度,例如增加入射光的能量或使聚

焦点聚光更好。反之若有感光则设法做定量的测量,得出温度的确实数据,和它与入射能量和聚焦程度的关系,从而与理论作比较,改进理论,使与实验更加符合。

若实验证明已经得出中子,即可逐渐设法提高产生中子的效率。另一方面,则应该从事于使整个装置的轻小化,这是一个很重要的实验问题。若我们确能做出一种既轻便又能产生大量中子的装置,则这种装置的应用范围必定很广。否则,若太笨重,应用范围就要受到很大限制。

要达到这个目的,有两个不同的方法:第一个是改进现有的电容器的构造。这在外国有很好的结果,我们应该急起直追,此时暂且不谈。另一个方法是利用化学能作为光泵的能量,以代替电容器和电整流器等。由于化学药品贮能很大(每克化学药品就能放出 4000J 以上的热能),发光效率也好。现在已有人利用过氧氯化钾以作光源的。如以 TNT 激发氩气体发光以作光源,效果可能更好。相信这方面成功的可能性很大,而且似乎比改进电容器更有前途。我们曾估计过一个能发出 1000J 的光激射器。如用化学药品作光泵的源,则药品重量还不到十分之一公斤。这比目前利用最轻的电容作光源所需的重量至少可小十倍!如此,则中子源产生器的全部重量,可以减至十公斤以内,而体积也将不超过普通热水瓶的大小,这样就成为世界上最轻的中子产生器了。

参 考 文 献

- [1] S. Glasstone, R. H. Lovberg; "Controlled Thermonuclear Reaction. An Introduction to Theory and Experiment", D. Van Nostrand, Toronto, 1960, p. 19.