中国激光
第14卷 第11期

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。叙述了以氘化锂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。本文叙述了氘化锂靶应该怎样制备；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。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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；其中比较简单易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$t\cong10^{-9}$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：

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

或：

$$T=\frac{2E}{3kN} \tag{1}$$

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，靶材是二氘化氧(D_2O，即重水)，其密度$\rho=1.1$g/cm^3，因而

$$n=\frac{1.1\times6\times10^{23}}{20}=3.3\times10^{22}/\text{cm}^3,\ s=13,$$

故$n\cdot s=4.3\times10^{23}/\text{cm}^3$。以此代入(1)式，就得$T=4\times10^7$ 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：

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

求得的。其中n_D是每立方厘米内的氘核数，显然$n_D=6.6\times10^{22}/\text{cm}^3$，$\bar{V}_0\left(=\frac{4}{3}\pi r^3=4r^3\right)$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$T=4\times10^7$ K时，$(\sigma\bar{v})_T=0.1\times10^{-24}$ cm^3/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：

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+\nabla\cdot\boldsymbol{q}=0 \tag{3}$$

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

$$q=q_{\text{辐射}}=-\frac{lC}{3}\nabla aT^4=-\frac{lC}{3}4aT^3\nabla T \tag{4}$$

故

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}=-\nabla\cdot\boldsymbol{q}=\nabla\frac{lC}{3}4aT^3\nabla T \tag{5}$$

上面两个公式中的l是辐射在物质内的自由程，$a=\frac{4\delta}{C}$，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：

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}=\frac{lC}{3}4aT^3\nabla^2T \tag{6}$$

因 $\varepsilon=C_vT$，故

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{lC}{3}\cdot\frac{4aT^3}{C_v}\nabla^2T \tag{7}$$

此式就是普通的扩散方程式：

$$\frac{\partial T}{\partial t}=D\nabla^2T \tag{8}$$

由此得到扩散系数 D 的表达式，即

$$D=\frac{lC}{3}\cdot\frac{4aT^3}{C_v} \tag{9}$$

(8)式的解是：

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

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，而以氘化铀($\rho=5\sim11\,g/cm^3$)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($\rho=19\,g/cm^3$)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。

现在假定由光激射器发出的光，经透镜聚焦，在 10^{-9} s 内射至范围为 $d=2r_0$ 的靶上(靶的材料为氘化铀，$\rho=5\sim10\,g/cm^3$)，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 为半径的球体氘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：

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

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

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 100J 以

表1 $\rho_{uD_3}=5\,g/cm^3$, $n_D=3.7\times10^{22}/cm^3$, $t=10^{-9}$ s

T (keV)	$2\sqrt{Dt}$ (10^{-3} cm)	$\bar{V}(r_0=5\times10^{-3}$ cm) (10^{-6} cm^3)	N (中子数)	$\frac{2}{3}E$ (J)	$\bar{V}(r_0=10^{-3}$ 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 $\rho_{uD_3}=10\,g/cm^3$, $n_D=7.4\times10^{22}/cm^3$, $t=10^{-9}$ s

T (keV)	$2\sqrt{Dt}$ (10^{-3} cm)	$\bar{V}(r_0=5\times10^{-3}$ cm) (10^{-6} cm^3)	N (中子数)	$\frac{2}{3}E$ (J)	$\bar{V}(r_0=10^{-3}$ cm) (10^{-6} cm)	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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

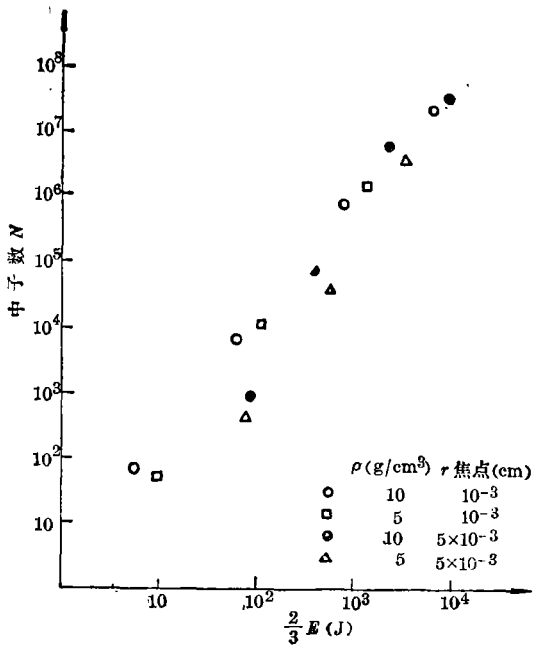


图 1

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，或仅只有几十分之一。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、大功率的光激射，不拟在此讨论。这里只谈当光激射发生以后，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($\rho=1.1\,g/cm^3$)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($11.0\,g/cm^3$)，最好是做成单结晶体，晶体的体积只要约$1\,mm^3$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$8\,g/cm^3$。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$7\,g/cm^3$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

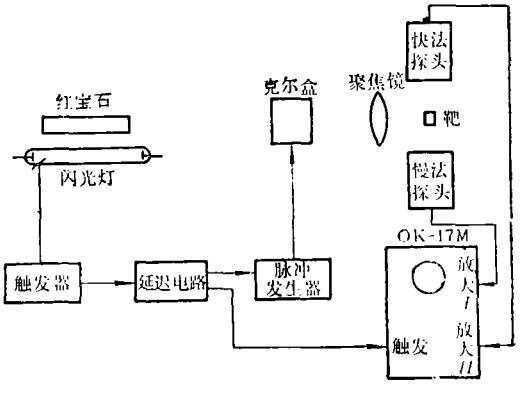


图 2

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

增管加闪烁晶体)和慢法探头(BF_3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:

$$\bar{\lambda}=\frac{12.4\times10^{-5}}{T(\mathrm{eV})}\quad(\mathrm{cm})$$

例如,倘若物体温度$T=1$eV(即1.16×10^4K),则光波的平均长度$\bar{\lambda}$为12.4×10^{-5}cm或1240.0nm,若$T=10$eV(即1.16×10^5K),则$\bar{\lambda}=1.24\times10^{-5}$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Witn的位移定律也是对的,即:

$$\lambda_m T=\frac{2\pi\hbar C}{k\times4.965}=0.2898$$

因此,当$T=1.16\times10^4$K(即1keV)时,$\lambda_m=2.5\times10^{-1}$cm,即250.0nm($\lambda_m$是波谱分布的极大值),$\lambda_m$与$\bar{\lambda}$的值相差不大。因此若能测出光的波长$\lambda_m$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25.0 nm(≈10eV)至0.5nm(≈500eV$=0.5$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1～5mg/cm²)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。这在国外有很好的结果,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源,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小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.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net