



热核反应和反应堆

苏联专家报告资料汇编之一

上海科学技术出版社

“内部资料、注意保存”

热核反应和反应堆
蘇聯和平利用原子能科学技术展覽會
上海學習委員會

★
上海科学技术出版社出版
(上海南京西路 2004 号)
上海市书刊出版业营业许可证出 093 号
上海劳动印刷厂印刷 新华书店上海发行所总經售

★
開本 787×1092 毫米 1/16 印張 4 5/8 字數 109,000
1959 年 4 月第 1 版 1959 年 4 月第 1 次印刷
印數 1—8,000

統一書號: 13119·274

定價: (十二) 0.56 元

前 言

苏联和平利用原子能科学技术展览会，在上海展出期间，苏联专家组的全体同志，向来自全国二十六个省、市科学研究机关、高等学校、工厂、医院等的科技人员作了百余次的专题报告和座谈会。为了让这些报告更广泛地满足我国原子能科学工作者的需要起见，因此根据报告内容汇编成：1. 热核反应和反应堆；2. 放射性同位素在工业上的应用；3. 放射性同位素在农业和生物学上的应用；4. 放射性同位素在医学上的应用；5. 放射性同位素在地质勘探上的应用；6. 同位素的生产；7. 防护技术等七本专辑。这些讲稿，有的是从原稿翻译，有的是根据记录稿整理，因时间匆促，水平有限，在内容上一定有不少错误，希望各地读者阅后提出宝贵意见。

苏联和平利用原子能科学技术展览会上海学习委员会

一九五九年三月

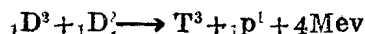
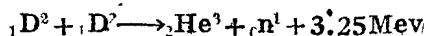
目 錄

| | |
|------------------------------|----|
| 1 热核反应..... | 1 |
| 2 气体放电时伴随产生的中子和硬倫琴輻射..... | 4 |
| 3 关于硬輻射座談会記錄..... | 11 |
| 4. 关于环狀放电管裝置一些問題的座談会記錄..... | 19 |
| 5 关于測量方面的座談会記錄..... | 23 |
| 6 日内瓦會議介紹..... | 30 |
| 7. 关于磁捕集器及等離子体电加速机构的座談会..... | 36 |
| 8 苏联的一些实验性反应堆..... | 39 |
| 9. 苏联所修建的几种类型的原子能发电站..... | 58 |
| 10 反应堆設計的一般原則..... | 70 |

热核反应*

Р. М. Подгорный

随着已经掌握的动力资源的消耗，人类必须去寻找新的可能性。当森林逐渐稀少不能满足人类对燃料日益增长的需要时人们就只能去开采埋于地下的燃料，建造了很深的矿井，去开发石油。工业的不断增长增加了对石油和煤的需要，由于地球上动力资源分布的不均匀，更进一步加深了它们的不足，在某些国家中现在已经感到地下燃料很不够了。因此这几年来没有一次国际冲突不是与争夺石油有关。这并不是偶然的。由于发现了重原子核裂变的链锁反应，在利用能的方面有了些补充。利用重核裂变反应的供工业用电的发电站，已经在苏联、英国和美国建成了，可是地球上裂变物质的贮藏量并非多到可以在数百年后不再感到动力不足的。到现在为止还有一个可能性尚未变成现实，能量不仅当重核裂变时会放出，在轻核合成时也能放出。这是因为在能量上門德列也夫周期表中间一部分元素的原子核是最合适的。典型合成反应的例子是快氘核（重氢核）碰撞时发生的反应：



为实现这个反应只要利用海洋中的重水就可以了，而海洋中重水的贮藏量实际上可说是无穷无尽的。

为了引起合成反应必需克服核的静电斥力使氘核接近。

在实验室条件下合成反应是很容易实现的，只要以重氢核轰击氘靶就行了。太阳的热和星球发光都是依靠合成反应发生的。合成反应也是一个巨大破坏力的来源，这是就包含在氢弹中的破坏力。利用合成的能量是当前人类面前一个巨大的课题。

用氘核轰击靶时，用来加速氘核的能量远比由于核反应在靶上放出的能量大，这是因为它们的能量完全消耗于激发和游离靶的原子，氘核的韧致能量损失只有当它在完全电离的气体中运动时才会变得很小，而这时气体必须预先已经加热到它的粒子的平均动能与加速了的氘核的能量差不多才行。不过，如果能把氘气加热到这样的温度，那末就不必要用加速的氘核束去引起合成反应，因为加热的氘核自己的相互作用就能够引起合成反应了，在这样条件下进行的合成反应就叫做热核反应。

* 本文系專家 1958 年 12 月 11 日在上海講演的提要。

把等离子体加热到数百万度温度的尝试会遇到很大的困难，但是建立可控制热核反应的问题并没有被这些困难所限制。另外也需要学会把加热了的电离气体（即等离子体）保持得足够久使大部分物质来得及发生反应，等离子体不能利用由墙壁封闭的反应室来保存，因为等离子体一经与室壁作用，马上就冷下来了。

原则上可以利用磁场来防止热的等离子体与室壁发生作用。大家知道，带电粒子在磁场内只会绕着磁力线作螺旋运动，因此，在均匀磁场内的粒子可以脱离反应器室壁而沿着磁力线运动。这个考虑仅当一个粒子处在真空内时才正确。即使在这情况下，当有了电离的气体，粒子间就发生了碰撞，而碰撞能使粒子的螺旋线的轴发生移动，位移的距离在数量级上等于螺旋线的半径。粒子碰撞以后，它们就沿着另外一条磁力线运动。假如有了粒子浓度的梯度，碰撞就可以使粒子向垂直于磁力线方向扩散。况且到室壁上粒子还是比没有磁场时小得多。

现在我们来研究一下几种可能的热核装置的具体机构。

当等离子体占据了有限的空间范围，其中没有磁场，而它的外面的磁感应强度是 H 高斯，那么，我们知道磁场作用在等离子体上的压力是 $P = \frac{H^2}{8\pi}$ ，可以利用通电的导体系统产生磁场去作用等离子体，也可以借通过它本身的电流所产生的磁场来对它作用。当大电流放电时，放电柱离开壁而收缩是放电电流所产生的磁场对等离子体作用的一个例子。

这就是大家知道的平行电流相互吸引的效应。

假如在压缩过程中等离子柱脱离室壁，则从等离子体传给壁的热很快的减少，而这时等离子体就被通过它的电流有效地加热。这时在平衡状态下的温度由下式确定： $J^2 = 4c^2 NkT$ 。这个式子是由磁压力 $\frac{H^2}{8\pi}$ 等于气体分子运动的压力 NkT 得到的，初看起来只要增加电流就可以得到进行热核反应所需要的温度，可惜这种理想的情况不能实现，只要等离子柱从圆柱形状稍弯一点偏离，这畸变就迅速增加。换言之，带电流的等离子柱是不稳定的，现在来研究几种不稳定性发展的最简单机构。由于偶然原因，在等离子柱上某部分箍紧一些，因为在柱边上， $H = \frac{2J}{cr}$ ，所以在柱的箍紧部分磁场增加，因而在这部分受力 $F = \frac{1}{c} \vec{j} \times \vec{H}$ 也增加，因此在这里，柱的半径就很快的缩小。利用“磁压力”这一术语可以说：在箍紧部分的压力 P_H 比其他区域为大。另外，等离子柱的弯曲也是常出现的不稳定性的一种类型。偶然产生的弯曲，将引起弯曲处凹面所受的磁压力大于外面凸面所受的磁压力。我们有两个可能性来克服这个困难：

(1) 用极大电流通过等离子体，企图在足够短的时间内压缩等离子体；这时各种不稳定性还来不及发展。在快速压缩的过程中，等离子体的粒子得到了沿放电轴方向运动的能量。在最大压缩时，由于被加速粒子的相互作用，等离子体的温度可以达到很大数值。用强力脉冲电流，加热等离子体的尝试，在苏联已经实现了。当通过气体的脉冲电流大到一百万安培时，可以在很短的时间内（微秒数量级），把气体加热到一百万度左右的温度，在原子能研究所进行的研究过程中，曾发现了与氙中放电的同时发生的硬伽马辐射和中子辐射。任

細研究了中子脉冲后証明：这些中子并非由于热核过程产生的。而是由于某些不稳定性的发展而产生的。

看来，为了在很快地压缩等离子体时得到热核反应，必須增加电流增長的速度，这样在箍紧，弯曲的形成和另外一些不稳定性出現以前，就把足够供热核过程进行的能量給与了等离子体的粒子。

进一步研究气体放电时的硬倫琴輻射，可能將有助于理解宇宙射綫起源的問題。

快速过程的另一个方案是用外磁場来压缩氘的装置。

(2) 第二种可能就是用外力作用在等离子体上面。苏联曾进行的計算証明：假如用縱磁場作用在处于金屬壁室中的等离子柱上，可以消除很多种不稳定性，如果在等离子柱内有縱磁場，而它的外部沒有的話，那么在柱面上，条件 $\frac{H_i^2}{8\pi} = \frac{H_e^2}{8\pi}$ 成立（假定等离子柱的气体分子运动的压力很小）。

磁力綫的“凝固”是由于沿着力綫运动的粒子把磁力綫保持在等离子体内。磁力綫好象被“凝固”而不能离开等离子体的时间决定于等离子体的电导率。

当产生“箍形”变形时，等离子体内部的磁場强度增加因而变形消失。当柱弯曲时放电室金屬壁中就产生阻止等离子柱运动的傅科电流。在环形室中特别是不久前在英国所建的“澤塔”装置中采用了这种稳定放电的方法（环形室中沒有流到电极上去的热量）。

有人企圖在这些装置中建立長期存在的（准穩的）帶电流的气体圈。流过等离子体的电流就加热等离子体。可惜，到目前為止这个方向尙未見效。

在金屬壁的环形装置工作中产生了新的困难。特别是在室壁的各种之間及室壁和等离子体間产生了电弧，这使我們所祈求的工作状态不能实现，現在也企圖在“Stellarator”型的装置上得到准穩过程，但是在这里又产生了意外的困难。

在本报告中將談到最后一个方向是駐态过程，特别是叫做磁瓶的方向。

上面已經証明：粒子在均匀磁場中按螺旋綫的軌道运动。可是，如果粒子向磁場增加的方向运动，粒子运动的性質就会改变。此时螺距和螺旋半徑都减小，到了一定時間粒子就会停止而开始向相反方向运动。換句話說，强磁場的区域变成帶电粒子的鏡子。在这样两个鏡子間粒子就可以在有限的空間中保持相当長的时间。在这情况下如粒子能量足够大，这些粒子的相互作用能引起热核反应。

磁捕集器工作的巨大困难是与把快粒子注入捕集器的問題有关的。可以把氘分子离子束注入，在捕集器中 D_2^+ 离解为 D^+ 和 D ，这样氘离子就充滿了捕集器。帶电粒子直接注入磁場中去是不可能的，因为磁場对它們是鏡子。捕集器的实验現在正在美国和苏联进行着。根据这个原理苏联建造了最大的热核装置“奥格拉”。現在很难說那个方向最有前途和那一个現有的装置最值得注意。无疑的，只要在各方面大規模的进行研究，人类一定能够很快地解决这个巨大的問題。

气体放电时伴随 产生的中子和硬伦琴辐射

И. М. 波德高尔内依

为了探求进行热核反应的有利条件，原子能研究所进行了大功率气体放电的研究，以致于在1952年发现了气体放电的中子辐射和硬伦琴辐射 [1, 2]。

虽然在许多国家的实验室中都在研究气体放电时伴随产生的硬辐射 [例如参考3, 4, 5,] 但是迄今还没有解释这些现象规律性的完整理论。

1. 中子辐射

为获得通过气体的大功率电流脉冲，通常用电容器组和放电室组成的装置 (图1)。为在需要的时刻引起通过气体的电流脉冲，采用了可控制的放电器。

最简单的可控制放电器由二个金属球组成，它们之间要有足够的距离，在电容器一端一定的电位差时不可能自行击穿。可控制放电器的一个球中放一触发电极。在触发电极上输入一电压脉冲，就会在一放电球和触发电极间出现火花。火花的紫外辐射使金属球之间的气体电离，而为击穿创造有利条件。

一些主要的实验，都是在瓷室中进行的。瓷室直径为18到40厘米，长为1米左右。在各个实验中电容器组的电容是几十微法到几百微法。为得到强电流，仪器设计得使放电回路中的电感尽可能的小。例如为减小装置的电感，把放电室放在同轴馈线中。当电容器电压为4万到5万伏时，在这些装置上得到的最大电流有时可达一百万安培。

当通过气体的电流超过15到20万安培时，电流曲线上就能看到特殊的折断 [6]。这种折断的起因和电流柱的半径改变时所引起的回路电感变化有关。放电柱半径的改变是在大功率电流脉冲通过气体时产生的。这时，等离子柱受到放电电流产生的磁场力的作用。在放电电流增长过程中，如果磁压力 $H^2/8\pi$ 大于等离子体的气体运动压力 (nkT)，那么就产生放电柱的电磁收缩。等离子柱收缩过程是熟知的平行电流相互吸引效应的很好例证。

等离子柱收缩时，不仅带电粒子向放电轴收缩，中性原子也向轴运动。中性原子的收缩主要通过电荷交换。离子在向放电轴运动时和中性原子相互作用能够把原子的电子俘获到自

己的軌道上来。这样，就形成了向放电軸运动的中性原子，而离子则在电动力的作用下也会向放电室的軸心运动。

由放电电流的磁場压缩等离子柱的理論 [7] 可知，达到特征点的时间与放电室所充气体质量的四次方根成正比。

随着等离子体向放电室軸的运动，放电柱中粒子的濃度不断增长。当濃度足够高时，粒子間的相互碰撞会使气体发热。换言之，运动等离子体的动能轉变为热能。如果气体温度达到几百万度，则在气中放电时就可能产生与热核过程有关的中子辐射。

为探测中子，采用了人工放射性的方法。在放电室旁边直接放上一塊石臘，里面放一个包有銀箔的 β 計數管。中子流通过石臘塊时，其中一部分由于和氢或碳核彈性碰撞損失能量而減速。減速后的热中子被銀核有效地吸收，而形成放射性銀同位素 Ag^{110} 和 Ag^{108} ，其半衰期分別为24秒和2.3分。在用脉冲裝置做实验时，这种記錄方法是很好的，因为計數器可以在放电結束以后接通（放电时间为几十微秒）而这时候与放电同时产生的电磁干扰已不能引起計數裝置的伪記錄了。

在研究气体放电的中子辐射时要特別注意放电室內所充氖气的純潔。每次放电前，先把放电室抽到 10^{-6} 毫米水銀柱的真空度，然后使氖气通过鈹过滤器进入放电室。在氖的起始压力为0.01到0.3毫米水銀柱高，电流达2万安培时，观察到中子辐射，其强度为每次 10^7 到 10^8 个中子。最初的一些实验表明：在相同条件下，各次放电时所发射的中子强度在一很大范围内变化，这里所引的中子脉冲强度值是按很多次放电平均得来的。研究了中子辐射强度和压力的关系后，发现在初压为 5×10^{-2} 毫米水銀柱高时中子辐射为極大。

当放电室中气体压力增加或减少一个数量級时，中子辐射显著地减少。圖 2 示出中子辐射强度和初压的关系。

这种依賴关系与其热核性質并不矛盾。随着压力的减小，由于相互作用的原子数减少，可以預料热核輸出也减少（輸出正比于 n^2 ）。当压力过低时，由于电子和离子的相互作用弱，可以預料电子温度与离子温度不一致。随着压力的增加，过分大的密度能使等离子体冷却，因而导致热核反应的輸出剧烈地减少。可是后来的一些实验表明：这样解釋上述曲綫的形狀是不正确的。进一步的实验指出：加进少量的其他气体时，中子的輸出就很快减少。

中子辐射强度随着电流强度增加而增加，可是其增長并不象当热核反应时所期望的那样按指数上升，而要慢得多。在电流增加2—3倍时中子辐射就达饱和了。

在双綫脉冲示波器上研究过中子辐射的时间特性，示波器的一个輸入端接放电电流或电极間的电压，而另一个可画出中子强度随时间而变的曲綫。圖 3 为其典型的示波圖（“原子能”，1956年第三期85頁）。

在示波圖上可以看到，中子脉冲的时间不超过一微秒，而且脉冲相应于电流或电压曲綫

第二次折斷時出現的。這種形狀的中子脈沖也難以和輻射中子的熱核過程推斷相一致。但是只有在發現了硬倫琴輻射後（關於這個問題我們將在下一部分討論），才最後地論證了中子的產生不是由於進行熱核反應的結果，而是由於某些以前還不知道的大功率脈沖放電等離子體中形成快速粒子的機構的出現所引起的。

研究了氣體放電中子在厚層核乳膠中所引起的反沖質子的能量分布以後 [3, 8]，認為中子的產生是由於在放電中出現了能量被加速到幾十萬電子伏特的一小群重氫造成的。在這些實驗中，厚層乳膠放在放電室電極附近，然後比較放在不同電極後面的膠片中的反沖質子的能譜。處理實驗結果時，僅選與放電室軸綫交角不超過幾度的徑迹。這樣發現氫核是沿放電軸綫被加速的。

從電極中心的小孔將氫束引出放電室，用互相垂直的電場和磁場使它偏轉，並借此測出沿放電室軸綫加速的氫核的能量 [9]。這時觀察到能量被加速到 20 萬電子伏的氫核。中子輻射不單單在絕緣壁做的放電室看到 [10]，如果放電室由金屬做成，則每次放電間中子脈沖強度的起伏就比瓷室中的要小得多。在這種情況下，在電流磁場作用下的放電區域的壓縮過程按其他方式進行。如實驗所指出的，最大壓縮在陽極附近，中子輻射中心也在這個地方。對反沖質子的研究表明在這種情況下也產生快速氫核群，其速度方向沿放電室軸綫。

§ 2 倫琴輻射

探索氣體放電等離子體的倫琴輻射是為了得到等離子體的電子溫度及濃度的數據。如果電子溫度為 T 電子伏特，則等離子體軀致輻射的能譜密度可用下式表示：

$$J_{\nu}d\nu = An^2T^{\frac{1}{2}}e^{-\frac{h\nu}{kT}}d\nu$$

測出了輻射的能譜及其強度在原則上就可以得到 T 和 n 的值。

研究大功率脈沖放電的倫琴輻射的實驗是在瓷制直綫型放電室中進行的。其直徑為 176 毫米，其長度為 1000 毫米。能通過放電室放電的高電容組電容為 36 微法。

為去除氫放電時引起的中子輻射干擾，倫琴輻射的研究是在氫放電中進行的。

在最初的一些實驗中，倫琴輻射通過厚度為 6 微米的鋁箔引出放電室，這種鋁箔對能量達 1 千電子伏的倫琴量子還是透明的。經幾次放電後，放在這種鋁箔窗後面的 X 光膠片就變黑了。由於膠片變黑可以由各種不同原因引起（沖擊波，被加熱箔的紅外輻射等等），因此進行了一系列檢驗性實驗。其結果都表明膠片變黑是由放電所放出的倫琴量子引起的。脈沖放電時放射倫琴量子本身並不奇怪，因為大家都知道在低壓放電開始時，如果離子密度很小，電子在由陰極向陽極運動時，實際不受到散射，而被加速，這時就可能出現倫琴脈沖。

當然下一步工作就應該去研究倫琴輻射強度隨時間的變化。在鋁箔前放上閃爍體，倫琴量子打入閃爍體時所產生光量子，穿過光導管後落在光電倍增管的光陰極上。開始的一些的

实验中，光电倍增管的输出处出现两个脉冲，其中一个脉冲是在放电开始时产生的，第二个脉冲在电流和电压曲线折断时产生的，脉冲长度为1微秒。

与脉冲发生器一起工作的测量仪器常可遭到干扰，因此，为检验起见，在荧光体与铝箔间放上一块铅玻璃，其厚度足以吸收能量为4万电子伏的起始辐射。X光胶片在十次放电的曝光下，起始脉冲在底片上一次也未发现，而第二个脉冲（以后将称之为特殊区的脉冲）；在十张片中发现三次，这究竟是什么？当后来增加了光电倍增管的电压，也就是增加了它的灵敏度以后，特殊区的脉冲就经常出现了。把有机磷光体换以发光时间长的磷光体后，就可以使脉冲长度相应于发光强度的增加而增长。在这一系列实验结果的基础上就可以做出结论：在电流曲线第二个折断点时放出的量子的能量超过4万电子伏。

由于折断区的伦琴脉冲中放出的量子可以自由地通过厚为3毫米的铅玻璃，所以以后研究伦琴辐射就没有必要特地把量子引出铝箔了。这些量子穿过放电室的瓷壁，被放在离放电室一定距离的磷光体或气体计数器记录下来。它们也可以用X光胶片记录下来；为了提高灵敏度，胶片是夹在用 CaWO_4 做的加强屏中间。用各种方法估计极限能量指出：当特殊区伦琴脉冲出现的时刻，放电室二极上的电压是20—25千伏，而发现的伦琴辐射的极限能量却是几十万电子伏。

后来，伦琴谱能量的极限是按威尔逊云雾室中反冲电子形成痕迹能量分布来测量的[11]。这个方法毫无疑问比以前用的方法有一系列的优点，为了得到比较用的能谱，利用了工作电压达30千伏的脉冲X射线管。分析了脉冲放电的伦琴脉冲照射威尔逊云雾室时产生电子能谱，把这种能谱与比较能谱比较以后，证明用大量放电平均出来的极限能量值为320千电子伏，在150—300千电子伏能量间距中，每次放电放出的量子平均数目为 10^{10} 个，发现了硬伦琴量子后，立刻就进行了解释氙中放电时伦琴与中子辐射间关系的实验。

1、首先进行了测定中子和伦琴脉冲发生时间的实验，把从两个闪烁记录器来的信号送入双踪示波器OK-17的输入端，其中一个记录器既能记录伦琴量子，又能记录中子，另一个只能记录中子。

最初一些实验表明，中子脉冲比伦琴脉冲有一个0.1—0.2微秒的时间延迟，随着放电室与记录器间距离的增加，这个延迟时间也增加。测量结果的处理证明：所有延迟是由于D—D反应时发生的中子飞行时间，而在 $5 \cdot 10^{-8}$ 秒的准确度内，中子脉冲是伦琴脉冲同时发生的。

2、伦琴辐射强度与氙的初压力的关系的研究证明：在同样条件下测得的中子和伦琴射线的曲线实际上是一样的。

3、伦琴和中子脉冲的持续时间一样。

从上面列举的结果可以得出结论：这两种现象的起源是同样的，特别是很自然地会这样假定：伦琴辐射是出现了中子辐射的结果，或者中子辐射是出现了伦琴辐射的结果，这两种

考虑都是立足不住的，在倫琴輻射譜中沒有发现能量大于數十万电子伏的量子，所以不能用光核反应来解釋中子的起源。

量子由核反应产生的說法也不行的，因为硬倫琴輻射不仅在氙放电时发现，在氫和氦中放电时也发现，此外，当放电室的瓷壁被質子束轟击时所作的补充檢驗也証明量子不是核起源的。

这現象产生的剩下唯一的可能就是：由于在某种不明的机构发生的电場中加速的电子被制动所致。

为了弄清楚电子在那个放电区域内被加速，作了一些闡明倫琴輻射放射中心定位的实驗。

借助于針孔照相室可以进行发射中心的空間分布位置研究，用照相室可以在放电本身所放出的倫琴脉冲射綫中得到放电的照片 [2]。

利用置于加强屏間的灵敏 X 光膠片来照相。为了得到足够变黑的膠片，需要进行數十次放电，不过补充的实驗証明：这样观察到的圖样在相当大的准确度內与个别脉冲所得的相符合。利用鉛制針孔照相室可得到倫琴射綫的放电照片，經過处理証明：量子发射的主要中心是在开始时接正电位的电極上。另用檢驗的实驗証实：在放电室中部的一个不很强的輻射極大是由于同軸饋电管的某些不对称引起的。

在氙中放电时进行的实驗 [12] 証明：在重气体中放电时，輻射的大部分是在放电室轉附近发生的，选择氙的原因是因为它的原子序數很大，这引起电子大量致輻射損失，因而阻止它們从放电区域逸出。在这些实驗中用两个光电倍增管，其中一个准直到它只能記錄放电室壁上产生的量子，而第二个光电倍增管既能記錄室中体积內发生的，也能記錄壁上发生的量子，这些实驗的結果确实証明，气体放电的倫琴輻射是当电子制动时发生的，电子看来是被气体柱周圍的磁通量改变时出現的电場所加速的。

不过，关于电子是沿 Z 軸运动被加速的假說，只有当气体中大功率脉冲放电时形成电子束引出后才直接証明了它的正确性。为了把沿放电室軸加速的电子引出来，在开始时接正电压的电極上开一个洞，洞上用一層薄的鋁箔盖起来，在箔外放一台 β 能譜儀。电子最大能量測得为 300 千电子伏。可是在放电开始时接負电压的电極上做一个鋁窗，放在窗外的記錄器并未发现电子束存在，由此可見，引起硬倫琴輻射的电子是沿着放电軸按一定方向加速的。

現列举一些主要的結果，它們能說明电子加速的唯一机构，这个机构可以引起电子制动时出現倫琴量子，也可引起氙中放电时氙的加速，結果就由于 D-D 反应而产生中子。

- 1、中子和倫琴量子产生的时刻是重合的。
- 2、脉冲的持續時間是重合的。
- 3、能发现倫琴射綫和中子的初压力范围是一样的。

4、电子能量和重粒子能量实际上是相符合。

5、电子和氙在轴附近是按相反的方向被加速。

以上列举的事实无疑地证明：电子和离子都是在沿放电室轴方向的同一个电场中被加速，因此，关于电子和伦琴辐射起源的问题就归结为解释沿放电室轴方向的强电场来源的问题了。这种电场可以在压缩过程中由于电流重新分布时放电柱电感改变而发生的这种系统与有可变自感的电路相似，当在脉冲放电中出现箍型不稳定时，可用超高速照相观察到等离子柱自感的变化特别大。这些解释当然只是定性的，而能够解释主要规律性的完整的辐射理论至今还没有。

最后必须注意到，脉冲气体放电的伦琴辐射的起源与放电开始无关，这不仅在氩中看到，而且也在其他气体中看到，但是硬量子仅当在轻的气体（H，D和He）中放电时才记录到。在例如氩中放电时，同样的初压力下量子能量不超过几万个电子伏。氩中放电时少量的重气体杂质就使伦琴辐射的能量下降很多。但是在有些场合下，重气体的杂质反而会引起伦琴量子的出现。例如在纯氩中放电，当压力为 10^2 毫米水银柱时，在折断区实际没有发现伦琴脉冲；但当氩中加入1%（按粒子数）的氙时，就出现了伦琴脉冲，而且脉冲是在与纯氩中出现伦琴脉冲同样的气体开始质量时出现。这就证实了大功率脉冲放电发展时关于惯性力作用的理论想法[7]。

进一步研究气体放电的硬辐射，除了有它自己独立兴趣外，还可在解释宇宙线起源上起重要作用。

参 考 文 献

1. Л. А. Арцимович, А. М. Андриянов, Е. И. Даброхатов, О. Ю. Лукьянов, И. М. Подгорный, В. И. Сеницын, Н. В. Филиппов: Атомная энергия 1, 84. (1956).
2. С. Ю. Лукьянов и И. М. Подгорный: Атомная энергия 1, 97 (1956)
3. O. Anderson; W. Baker; S. Colgate; J. Ise, R. Pyle:
Доклад на конференции по Газовому разряду в Венеции Мюньх 1957г
4. S. Berglund; R. Nilsson; P. Ohlin; K. Siegbahn; T. Sundström;
S. Svennerstadt; Nucl. Inst, 1, 233, 1957;
5. L. C. Burkhardt; R. H. Levberg: Nature, 181, 288, 1958
6. Л. А. Арцимович, А. М. Андриянов, О. А. Базилевская, Ю. Ч. Прохарев,
И. Б. Филиппов: Атомная энергия 1, 76, (1956)
7. М. А. Леонтович и С. М. Осовец: Атомная энергия 1, 81, (1956)
8. В. Ф. Демичев, Ю. Ч. Прохарев: Сборник "Физика плазмы" 1V стр. 81.

9. А. М. Андрианов, О. А. Базилевская, С. И. Брачинский, Б. Ч. Брежнев, Н. Ч. Ковальский, И. М. Подгорный, Ю. Ч. Прохарев, Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова, С. Хвощевский, В. А. Храбров-Доклад на II Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии.
10. Д. П. Петров, Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова, В. А. Храбров: сборник "Физика плазмы". Т. 4. стр 170.
11. Н. Ч. Ковальский, И. М. Подгорный, С. Хвощевский: ЖЭТФ 35, 940 (1958)
12. И. М. Подгорный, С. А. Чуватий. ДАН 117, 795 (1958)
- 13. И. М. Подгорный, Н. Г. Ковальский, В. А. Пальчиков: ДАН (в печати)

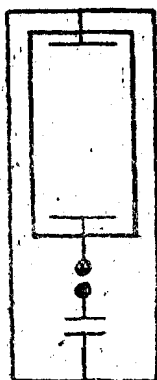


图 1

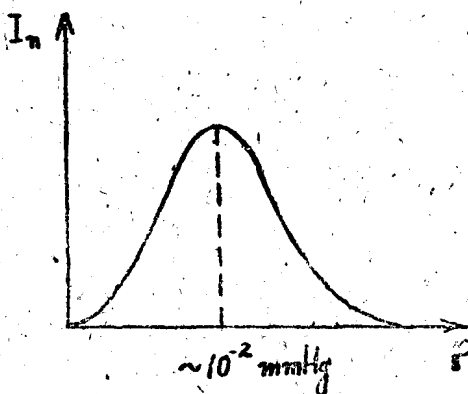


图 2

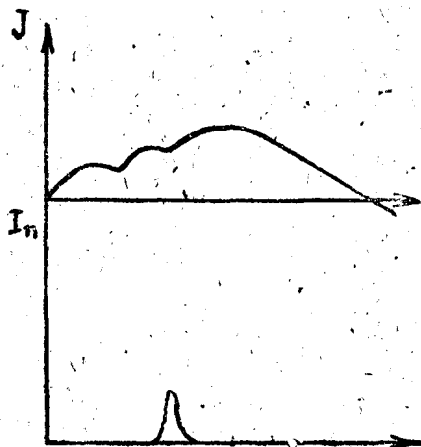


图 3

關於硬輻射的座談會記錄

(蘇聯) H. M. 波德高爾內依

這次座談會主要討論二方面的問題：第一方面是關於直綫放電管中放電機構的問題，第二方面是關於測量硬輻射方面的問題，其它的一些問題在以後的幾次座談會中再進行討論。

1. 測量中子時，為什麼要在計數管外面包一層銀箔而不用其它金屬？

因為作為吸收中子的靶有二個要求：

(1) 對中子的俘獲截面要大；

(2) 要能發射出 β 射綫。因為 β 射綫易于記錄，另外又要求這 β 射綫的半衰期一方面要大，能夠來得及進行測量；同時這半衰期又要求小些。這是對於進行二次放電的時間間隔來說的。

用銀的同位素 Ag^{108} ，它的半衰期為 24 秒，故可在放電後 10—20 秒後進行測量，這樣可避免放電對測量儀器的干擾。同時在我們的實驗中，自放電後進行抽空、充氣、再進行放電，約需 10 分鐘左右，而這時 Ag^{108} 的 β 射綫都已全部衰減掉了，這樣它不會影響第二次放電時的記錄，所以我們就選用了銀 Ag^{108} 。

2. 如何記錄中子的產額

用一標準中子源放在一定的距離，用一確定的時間來進行實驗，記錄出它對計數管的影響，再定出校正曲綫。

為什麼用計算方法來進行校正呢？

因為這要考慮到中子在石蠟里的碰撞情況，計算很複雜，這計算曾經做過，但不正確，故不採用。

不用銀用錫 In 也可以，它的效率比 Ag^{108} 高一倍，但價格貴。

用銀的特点是簡單易行，故在開始工作時一般都採用這種方法進行測量。

3. 關於中子空間分布的問題

用石蠟或水箱圍以光电倍加管做成准直管（如图 1）來進行測量。

但有一缺點，就是在牆上被散射出來的中子也可能被記錄下來，所以要用標準源來予以校正。故這一方法只有在必要時才用它。

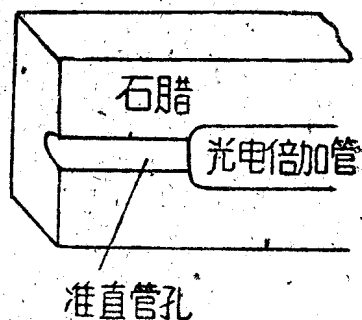


图 1

另外在光电倍增管上加一块閃礫晶体也能測量中子，在中子打進晶体后，即能轟出一个反冲質子，質子使晶体发光，而被光电倍增管記錄下来。

用光电倍增管有一麻煩的地方，就是它很怕电磁干扰，所以要用很厚的金屬屏蔽，并且要尽量避免一切可能的縫，最好沒縫，同时电源接綫和接到示波器上去的電纜接触要很好，一般用的是阻抗为 100 欧的 PK—2 電纜，并在接头处并联一只 100 欧的电阻，以便輸出訊号全部能記錄下来而不致被反射。

光电倍增管的輸出訊号經過放大 200 倍的放大器后，接到 OK—17 型的双綫示波器的二个偏轉板上，示波器的放大器一般不用，因設計得不夠理想。

其次光电倍增管上得到的訊号是否是由中子脉冲所引起的，須經過檢驗性的实验，但这应視各种具体情况而定，一般的是：先把电源拔掉，看是不是还有脉冲存在，或者更基本的是把閃礫晶体拿掉。用这种方法时要小心些，因为中子直接打到光电倍增管上时也能有脉冲出現的，但这脉冲要比沒拿掉晶体时小得多。

但总的說来，当仪器造好后，自己是要慢慢的体会仪器的各种性能。

4. 关于倫琴輻射的角分布問題

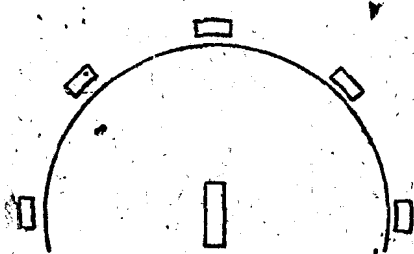


图 2

当我們在实验中发现了倫琴輻射后，首先就研究它的角分布。

实验的装置是以放电管为中心，在它的等距离的四周放置照相軟片，这样做是为了判断它是不是具有对称性。实验的結果，发现倫琴輻射是没有什么对称性的，因为倫琴輻射源不在放电管的中心而在电极的附近：并且从理論上也知道了这一点，当电子的能量达到 300 万电子伏特时，就不具有对称性。

这一实验仅具有历史性的了，从这里并没得到什么新的有趣的結果。

5. 放电管中有其它气体时放电管的輻射过程

首先从許多的实验中发现，放电管中放电的过程，不是决定于粒子的性質，而是决定于

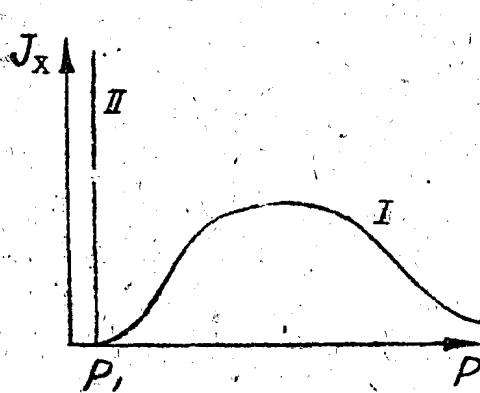


图 3

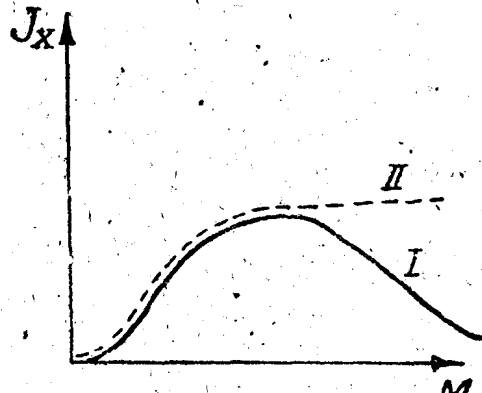


图 4

气体的質量。当管中有質量大的气体时，沒有发现輻射，这可能是因为質量大了不易击穿，也可能是因为没有象报告中所說的那样的不稳定性存在，故没有什么輻射产生。

在重气体中的研究，还有很多的工作可做，可能这还不完全决定于質量，而和其它因素有关。当然質量也起着很大的作用。如在图 3 中：

曲綫 I 表示在純氙中得到的；

若在 $P=P_1$ 处加入少量的氙 (Xe)，則发现曲綫几乎垂直上升 (曲綫 II)。

若將横坐标换成質量的單位，則在图 4 中发现曲綫 I 与图 3 中的曲綫 I 相一致，这二条曲綫仅在上升的部分是符合的，若在最高点以后再加进氙，則曲綫不下降而成水平的了 (图 4 中曲綫 II)。

这一結果現在已經发表，但其原因还未知。唯一可能的解釋 (也是一次近似的解釋) 是：在氙中加入了少量的氙后，从压力方面來說变化是不大的，但是从質量方面來講却是增加了，所以中子就停止輻射。因为这方面的知識很少，故不再多講了。

6. 关于測量正确度的問題：

首先講一講石蜡块中測量中子产額的准确度。它的准确度，决定于二个因素：一是中子源发射出中子的准确度，另一是測量仪器的系統誤差，一般它决定于 $\sqrt{N^2}$ (N 是測量次数)。在我們的實驗中正确度是 10—15%，这已是足夠的了，因为每次放电时中子产額的起伏是很大的。

其次关于中子空間分布的問題：一在管的二端分別放置乳膠片，感光后，发现其中一块能量較大，而另一块較小，这說明了中子在沿放电管軸的分布是不对称的 (图 5 下)。另一在放电管的四周也放乳膠片 (图 5 上)，感光后发现中子在这方面是对称的。

7. 設備裝置的原理

在不考虑指数項阻尼的情况下，

$$J_0 = k \frac{V}{\sqrt{L/C}}, \quad (k \text{ 是比例常数})$$

在一定的电压和电容量的情况下，要获得强电流，就要求电感 L 越小越好，在我們的裝置中 (见图 6) 如何来使电感小些？

放电管的上电极与金屬外壳 (銅質) 相連，由于 $J=2J'$ ，所以在金屬外壳外面的磁場为零，而金屬外壳的内壁应尽量靠近放电管壁，以减少充滿磁場的空間，电容器 C 的联接法也是根据这一原則。

常用接法见图 6：图示的斜綫部分，即是充有磁場的空間 (又叫做寄生空間)，但这二者不能太靠近，因为太靠近了，怕被击穿，所以中間可以填橡皮以絕緣，但一般不填也可以。

一般的标准接法，采用 12 只电容器时，接成如图 7 的样子。它有二个好处：

(1) 由于电容器对放电管对称，这样导綫可以减少些，因而也就减少了电感；

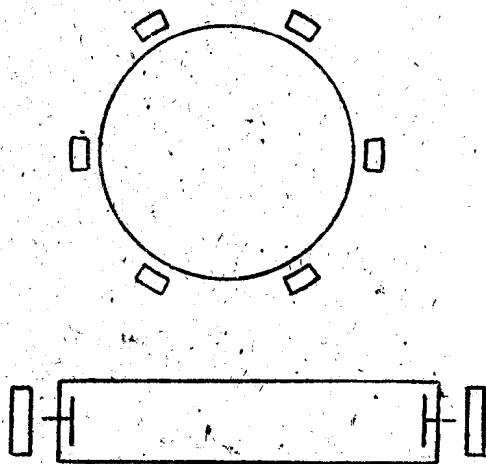


图 5