

试论秦元勋教授在“两弹”(原子弹、氢弹)突破中的贡献

张锁春

中国的原子弹研制工作是从 1960 年初正式开始探索与研究，直到 1964 年 10 月 16 日首颗原子弹爆炸成功，大致经历了三个阶段：

1960 年底以前，是组织力量和探索研究阶段；

1961—1962 年底；是掌握原子弹基本理论和关键技术，完成理论设计阶段；

1963—1964 年 10 月，是开展大型爆轰试验和次临界试验，并进行原子弹装置的技术设计与制造，最后完成原子弹装置的地面核爆试验阶段。

(一) 1960 年：奉召加入

1960 年 1 月，经中共中央总书记邓小平批准，二机部调郭永怀、程开甲、陈能宽、龙文光、秦元勋、周毓麟等 105 名高中级技术骨干加入核武器研制队伍。要求必须在规定时间到指定的地方去报到上班。秦元勋是奉命在 1960 年 5 月 1 日报到后正式加入的。1959 年 6 月 20 日中苏关系公开破裂，苏联背信弃义，公开撕毁协议，苏联专家开始撤离。当时被称之为“哑吧和尚不唸经”的苏联专家鲍利斯·列杰涅夫还在九所未回国。邓稼先特引荐秦元勋与苏联专家列杰涅夫见面。专家在他的本上写上秦的名字，并注上是美国哈佛大学数学博士。

经过先到九所的研究人员的调研和分析，从国外已经公开发表的一些资料中获得一些初步的认识，对美国掷在日本广岛和长崎的“胖子”和“瘦子”，即“内爆法”和“枪法”的两种原子弹的设计原理有了一定的认识。考虑到“枪法”要耗费比较多的核材料，而且从技术上看也不如“内爆法”先进，因此我国第一颗原子弹决定采用“内爆法”。为了深刻理解和分析原子弹材料在压紧过程中的物理规律，对爆轰波和冲击波的相互作用，冲击波的聚焦和界面不稳定性等要逐一进行研究。1960 年 4 月开始我国第一颗原子弹的理论设计的计算工作。邓稼先带领三个学力学的、三个学数学的大学生和一些辅助人员，分成三个组。开始进行了在原子弹研制史上很有名的所谓“九次计算”工作，即一天三班倒，用 4 台手摇计算器(后用半自动的电动计算器)，利用特征线法解流体力学方程，模拟从启爆到碰靶的物质运动的全过程。全区域要分成上千个网格，每个网点上要解 5—6 个方程式和计算很多个参量，其中有 1/3 个点需要算两套参数，有些网格点还要进行多次迭代。除此之外，对每个网格点还要计算 1 至 2 个检验方程。为了保证计算正确，还采用两人对算的做法，可见其工作量之大。20 多天后取得第一次计算结果，由于缺乏经验，差分网格取大了，没有体现出几何形状的特点，却发现一些新的物现现象，又提出三种解决方法，又进行了三次计算，即二、三、四次计算。如果要算到中心，工作量就更大，领导考虑到人手实在不够，就从中子物理组临时抽调三名同志支援。又苦干了两个来月，三次计算所得结果十分接近，但其中一个很重要的数据却和苏联专家讲课时讲的技术指标不符合。经过反复验证和讨论，又提出了三个重要的物理因素，建立了三个数学模型，形成了第五、六、七次计算，其结果和前三次的结果一样。此时怀疑原数据的正确性，引起激烈的争论，但因缺乏足够的理论证据来否定苏联专家讲的那个指标，搞方程的同志又提供重要的依据，不得又不厌其烦地进行了第八、九计算，结果仍然是一样。这样先后花费近 1 年的时间，共进行了 9 次计算。好处是锻炼了队伍，为核武器研制和设计培养了一批人才。秦元勋是 5 月加入，恰好赶上这“九次计算”的工作，靠手摇计算器或电动计算器来计算，费时多、进度慢、准确度差，原子弹突破要靠它肯定不行；更清醒地体会到需要使用计算机来计算的紧迫性和重要性。美国原子弹过关时，使用了 1944 年制成世界上第一台“自动序列受控计算机”，即 Mark I。这台机器是电动机械式的，

主要部件是普通的继电器，做一次加法需 0.3 秒。但它和人的计算相比，则显示出极大的优越性，不仅速度快，而且可以“不知疲倦地”连续工作。正是这台今天看来水平很低的计算机在美国的原子弹突破中发挥了很关键的作用。。

1960 年 10 月，九所调整，一室成立，室主任是邓稼先，副主任是何桂莲、**秦元勋**、周毓麟。由于何桂莲兼任党支部书记，分管行政事务。故秦元勋实为分管业务的第一副主任，当时一室有四个研究组：状态方程和力学组、中子物理组、数学组和计算组。秦和周都是数学家，但周偏重于流体力学，故业务分工周负责联系状态方程和力学组，而秦负责联系中子物理组、数学组和计算组。

(二) 1961 年：“人为次临界法”

1961 年初原子弹的攻关工作进入了必须确定基本理论和关键技术的重要阶段。在这重要的时刻，必须对已做的大量探索性研究和实验结果进行全面的分析，以便在已有认识的基础上，明确归纳出若干关键技术和理论问题进行深入研究，求得集中突破。此时，为了加强九所核武器研制与试验的力量，又将原子能所的王淦昌、彭桓武调入九所任副所长。至此，从苏联人撤走后不长的时间里，配备了五个技术副所长，即朱光亚(抓科研总管)、王淦昌(抓实验)、彭桓武(抓理论)、郭永怀(抓设计)、程开甲(抓试验)。

王淦昌和彭桓武是 1961 年 4 月 4 日到九所上班的。王老来后马上去 17 号工地，不仅抓厂房建设、炸药的研制、炸药成型研究，而且亲自参加爆炸原理实验和测试工作。彭公来后倡导理论部定期召开专题讨论会，突发奇想、疑义难题提出来，排排队，大家共同探索解决。彭公运用他强有力的理论手段，把复杂的方程组予以简化，完成了原子弹反应过程的粗略计算。科学地划分了反应过程的 6 个阶段，提出了以“突变”为中心，决定各反应过程特性的主要物理量，为掌握原子弹反应的基本规律与物理图象起了重要的作用。彭公称这种“粗略”简化的方式为“穷人的办法”。但进入“真刀真枪地”搞型号产品的理论设计时，就需要用计算机来作精确计算了。**秦元勋**的任务分工就是抓数学、计算和计算机方面的工作。当时九所买了一台乌拉尔机(即 M-103 机)，货刚到还没折箱组装，中科院计算所刚研制成功一台可交付使用的 104 计算机，是电子管的，每秒可运算加法一万次。真是及时雨，恰好赶上为我国第一颗原子弹的设计而计算。两位数学家**秦元勋**和周毓麟及时地组织搞数学的同志编制 104 机上的程序，当然要先解决计算方法问题，才好利用 104 计算机。不仅如此，还高瞻远卓，及时地向国家建议向中科院计算所下达研制更快速的 119 机和向四机部华东计算机下达研制 J-501 机任务，从而使这两台计算机及时地有力地支持我国氢弹突破和研制的过关，这一点也是功不可忘的。

1961 年 4—6 月，周毓麟主要负责用冯·诺伊曼提出“人为粘性法”解流体力学方程组遇到的问题，而**秦元勋**提出用“人为次临界法”解非定常中子输运方程的问题。

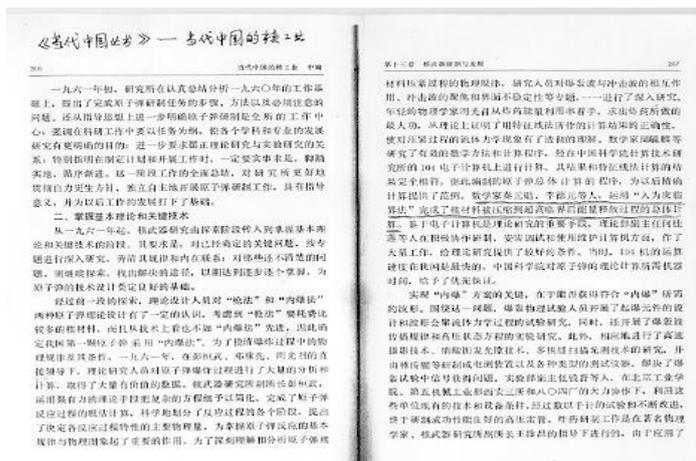
1961 年 5 月，周光召调入九所任一室第一副主任，协助邓稼先主任抓全面的科研组织管理工作。为此一室进行调整，王永任书记，主任邓稼先，副主任周光召、秦元勋、周毓麟、何桂莲，分五个科研组：力学组、中子组、金属组、程序组和电子计算机组。

1961 年 8—10 月，程序组编制并通过冯·诺伊曼“人为粘性法”解流体力学方程组程序；编制并通过“人为次临界法”解非定常中子输运方程的程序。

1961 年 9 月，周光召从炸药能量的利用率入手，求出炸药所做的最大功，从理论上证明了用特征线法所作的九次计算结果的正确性，从理论上证明苏联数据出现的不可能。在这个紧要关口，周光召的证明解决了这个问题，这是一个重大的突破，结束两种方案的争论。使大家对压紧过程的流体力学现象有了透彻的理解。与此同时，数学家**秦元勋**、周毓麟等人

研究了有效的数值计算方法，领导编制出第一个反应前的流体计算程序。在中国科学院计算技术研究所研制的 104 电子计算机上进行九组模拟计算，所得结果都与手算结果很接近，误差在 5% 左右，这等于直接验证所编程序计算结果的可靠性和程序的可行性。其中曾有一次偶然的的机会，在某个时刻的打印纸带上出现了苏联专家曾提到过的数据。原来这个数据是在人为粘性处理冲击波时，在振荡收敛过程中偶然出现的波峰值，其实是一个应被忽略的数据。

1961 年 11 月，数学家秦元勋、李德元等人，运用“人为次临界法”完成了核材料被压缩到超高临界后能量释放过程的总体计算，完成反应前的总体程序编制。



旁证：《当代中国的核工业》一书中 p267 页中提到“数学家秦元勋、李德元等人，运用“人为次临界法”完成了核材料被压缩到超高临界后能量释放过程的总体计算。”

附件一、“人为次临界法”

这是秦元勋在 1961 年提出的。考虑一维球对称情形下，在 Euler 坐标系中的非定态的单群中子输运方程为：

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi(R, \mu, t)}{\partial t} + \mu \frac{\partial \phi(R, \mu, t)}{\partial R} + \frac{1 - \mu^2}{R} \frac{\partial \phi(R, \mu, t)}{\partial \mu} + \alpha(R, t) \phi(R, \mu, t) = Q(R, t)$$

其中

$$Q(R, t) = \frac{1}{2} \beta(R, t) \int_{-1}^1 \phi(R, \mu', t) d\mu' + S(R, t)$$

$$0 \leq R \leq R_K, \quad -1 \leq \mu \leq 1$$

初始条件为： $\phi(R, \mu, 0) = \phi^0(R, \mu)$

边界条件为： 中心处 $\phi(0, \mu, t) = \phi(0, -\mu, t)$

外边界 $\phi(R_K, \mu, t) = 0, \mu \leq 0$

由于中子输运方程是一个微分积分方程，用差分方法数值求解时是首先对时间 t 作中心差分；其次对 μ ：先将 $-1 \leq \mu \leq 1$ 分为 N 等分，并假设 $\phi(R, \mu, t)$ 在 $\mu_{j-1} \leq \mu \leq \mu_j$ 上是 μ

的线性函数，代入后对 μ 从 μ_{j-1} 积分到 μ_j ；最后对 R ：将区间 $0 \leq R \leq R_k$ 分为 K 段，对 R 从 R_{k-1} 积分到 R_k ，采用某种数值积分公式，最后要形成封闭的代数方程组。由于源项中含有未知量，必须用迭代方法求解。要迭代收敛，必须使迭代矩阵的第一特征值 λ_1 满足 $0 < \lambda_1 < 1$ ，导出迭代的收敛条件为：

$$\Delta t < \frac{1}{v(\beta - \alpha)}。$$

这里有一个明显的物理解释：中子输运方程对 t 取中心差分后，将一个高超临界的系统，在时间步长小于一定值的条件下(即 $\alpha + \frac{1}{v\Delta t} > \beta$)，变成一个带源的次临界系统(这是人为次临界系统)。这样的系统是有定态解的，用迭代方法求解就相当于其分布发展到定态解的过程，因而迭代求解是收敛的。这样就可以完成核材料被压缩到超高临界后能量释放过程的总体计算，故此方法命名为“人为次临界法”。这是在原子弹计算中的一个基本方法。(详见秦元勋编著的《计算物理学》，成都，四川科学技术出版社，1984年7月第一版。)

(三) 1962年：“瓦片”个数

1962年中国的原子弹进入攻坚阶段。3月任务进展到“瓦片”的研究阶段，要实现“内爆”方案的关键在于能否获得会聚的同步波形。起爆元件(俗称“瓦片”)的设计极为重要，首先要回答的一个问题是需要多少块瓦片才能拼成一个球形结构。按照“美国原子间谍罗森堡夫妇案件”中透露，原子弹的球形结构是36块拼凑起来的多边形。但中国科学家们在研究时，却发现36块根本合不成那种特定的球形体。数学家秦元勋、周毓麟等人用拓扑方法去论证，解决了这个问题，不是36块而应该是32块。

1962年10月，在九所院内安装了一台乌拉尔(M—103)电子管计算机，每秒1千次浮点运算速度，可以在“三号院”内进行计算了。

1962年10月10日，所领导向聂荣臻副总理、国防工业办公室罗瑞卿主任及二机部做了汇报。整个规划分为五个阶段，其中用15个月时间完成原子弹产品的技术设计，用21个月时间全部准备完毕，进行试验，进度安排环环相扣，十分紧凑。聂帅提出，第一颗原子弹最好在1964年炸响，因为那一年是建国15周年。

为了加强对原子弹装置和有关的设计试验等的技术指导，研究所专门成立了“产品设计”、“冷试验”、“场外试验”和“中子点火”四个技术委员会。

产品设计技术委员会：主任委员吴际霖，副主任委员龙文光，委员肖逢霖、苏耀光、疏松桂、周毓麟、谷才伟；

冷试验委员会：主任委员王淦昌、副主任委员陈能宽，委员邓稼先、钱晋、周超、李嘉尧、何文剑；

场外试验委员会：主任委员郭永怀、副主任委员程开甲，委员陈学增、赵世诚、张宏钧、秦元勋、俞大光；

中子点火委员会：主任委员彭桓武、副主任委员朱光亚，委员何泽意、胡仁宇、赖祖武、黄祖洽、陈宏毅

从这四个委员会的人员组成中，也可以清楚地看出当时秦元勋在研究所内所处的地位。



旁证：《当代中国的核工业》一书中 p270 页中记载 4 个技术委员会的组成名单

(四) 1963 年：威力计算

1963 年 4 月 2 日毛主席在中南海接见从事原子弹研制的专家们，陪同接见的还有周恩来总理和邓小平总书记，被接见的有邓稼先、黄祖洽、秦元勋、李德元、孙和生、郑绍唐、徐锡申、苏肇冰等人。

1963 年 8 月，二机部部长刘杰赴青海 221 厂基地视察，决定第一颗原子弹的代号取名为“596”，借以此激励全体职工，坚决克服一切艰难险阻，制成原子弹，停止九所内部一直使用的产品代号(A2923)。第一颗原子弹又称“争气弹”，苏联要卡我们的脖子，不让我们搞成，我们就是要争气、发奋图强把它搞出来。同时又可以以让后人永远记住是 1959 年 6 月 20 日苏共中央的来信，拒绝提供原子弹教学模型和图纸资料给中国的。

1963 年 9 月，39 岁的邓稼先在中国第一颗原子弹理论设计方案这个具有历史意义的文献上庄重地签上了自己的名字，中国第一颗原子弹理论设计方案终于诞生啦！

在这个理论设计方案中，必须然要回答被设计出的这颗原子弹的威力究竟有多大的问题？必须要给出一个理论预估值，可由真正的试验来检验。这使秦元勋有了用武之地、大显神手之时。秦元勋不但给出原子弹威力计算的粗估公式，而且还给出原子弹威力计算误差作出整体估计。

附件二、威力计算

秦元勋最善长定性分析，对复杂的非线性问题，在不同区域中的解的定性行为作出分析。他又善长学习理论物理学家彭桓武的量纲分析和量级分析技巧，两者相结合，可以给出较为准确的解的近似表达式。对原子弹的设计是允许在一定的条件下，被设计出的物理参数组是有一定误差的，也有一定的误差容许限度，可以用一种相当粗糙的估计，根据一些关键量的差别来控制性质的变化。秦元勋曾把彭桓武先生的这套“绝活”形象地概括为“3=oo”，意思是两个量相比较，如果其中一个量比另一个量大三倍时，则在它们相加或相减关系时，可以在初步估计时忽略其中较小的量。

更具体化一点, 设有一个方程

$$A+B=C$$

当 $|A| \geq 3|B|$ 时, 则粗略地有解答

$$A=C$$

当 $|B| \geq 3|A|$ 时, 则粗略地有解答

$$B=C$$

这便是 $3=\infty$ 的具体含义.

下面用一个实例来说明, 求解方程

$$T+T^4=Q$$

这是内能 (与 T 成正比)、辐射能 (与 T^4 成正比) 与总能量 Q 的关系的一个粗略写法. 现在已知 Q , 要求 T .

利用 $3=\infty$ 的思想可以解决如下:

当 $T \geq 3T^4$, 则近似解为 $T^* = Q$

当 $T^4 \geq 3T$, 则近似解为 $T^* = Q^{1/4}$

这里条件 $T \geq 3T^4$, 即 $T \leq 1/\sqrt[3]{3} = 0.693$,

或

$$Q \leq \frac{1}{\sqrt[3]{3}} + \left(\frac{1}{\sqrt[3]{3}}\right)^4 = 0.924$$

对于 $T^4 \geq 3T$, 即 $T \geq \sqrt[3]{3} = 1.44$,

或

$$Q \geq \sqrt[3]{3} + (\sqrt[3]{3})^4 = 5.77$$

因此, 得到下面的近似解析解:

当 $Q \leq 0.924$, $T^* = Q$

当 $Q \geq 5.77$, $T^* = Q^{1/4}$

当 Q 在两者之间, 则 T^* 可以用线性插值公式联结: 当 $0.924 \leq Q \leq 5.77$,

$$T^* = \frac{(5.77)^{1/4}(Q-0.924) + (0.924)(5.77-Q)}{5.77-0.924}$$

这里的物理含意是: 当总能量低于一定值时, 能量主要是使物质升温, 而当总能量高于一定值时, 能量主要是辐射能, 即总能量的量变引起能量分配的主次发生质变. 这样便可以从量级上控制住物理特性. 由此作出的粗估公式也就可以作为近似解析解的线索.

还可以进一步估计一下这样作的相对误差,

定义

$$\delta = \left| \frac{T^* - T}{T} \right|$$

则当 $Q \leq 0.924$, 即 $T \leq 1/\sqrt[3]{3} = 0.693$ 时

$$\delta = \left| \frac{T - T^*}{T} \right| = \left| \frac{(Q - T^4) - Q}{T} \right| = T^4 \leq \frac{1}{3} = 33.3\%$$

而当 $Q \geq 5.77$, 即 $T \geq \sqrt[3]{3} = 1.44$ 时,

$$\begin{aligned} T^4 &\geq 3T \\ \text{即 } Q - T = T^4 &\geq 3T \\ \text{从而 } Q &\geq 4T \end{aligned}$$

故

$$Q - T \geq \frac{4}{3}Q$$

$$\delta = \left| \frac{T - T^*}{T} \right| = \left| \frac{\sqrt[4]{Q-T} - \sqrt[4]{Q}}{\sqrt[4]{Q-T}} \right| = \left| \sqrt[4]{\frac{Q}{Q-T}} - 1 \right|$$

$$\leq \left| \left(\frac{4}{3}\right)^{1/4} - 1 \right| = 7.46\%$$

由此可见, 这个近似解析解 T^* 在 Q 小时, 相对误差不超过 $1/3$, 而当 Q 大时, 相对误差不超过 10% .

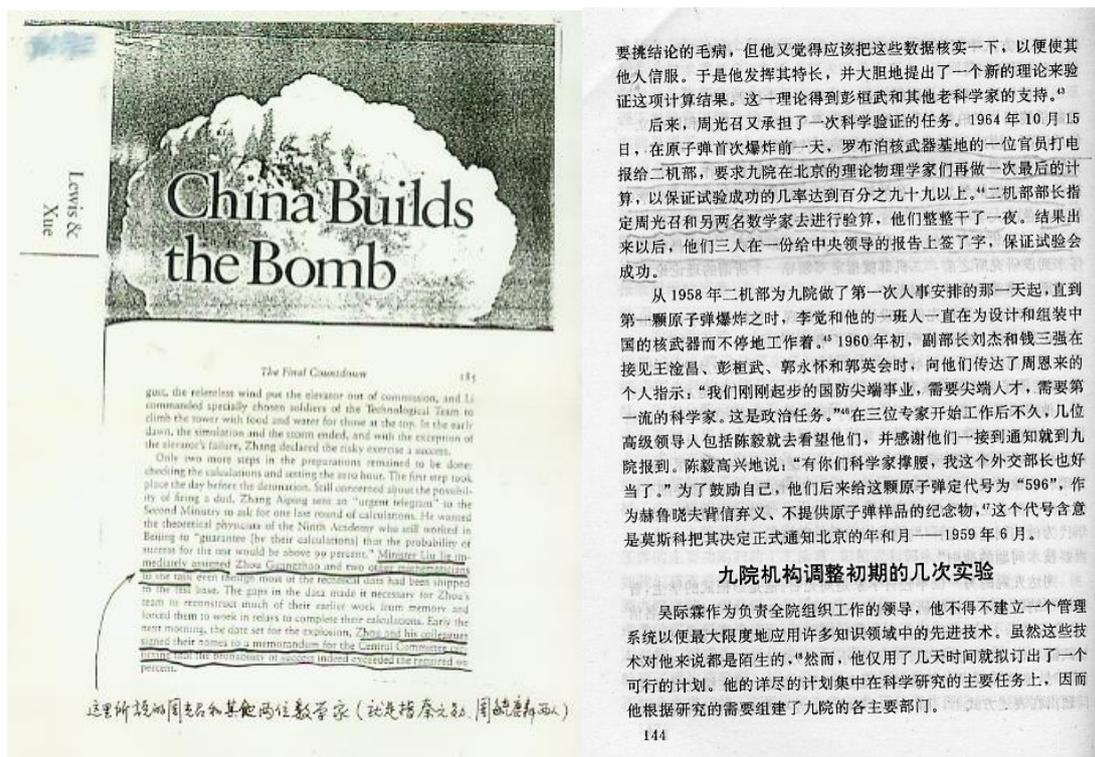
这样便得到简单而有效的粗估公式。类似地，秦元勋不但给出原子弹威力计算的粗估公式，而且还给原子弹威力计算误差作出整体估计。同样，继原子弹之后，秦元勋还给出加强型装置的粗估公式，对氢弹威力计算的误差作出整体估计等等。

(五) 1964年：三人签字

1964年4月11日，在周恩来总理亲自主持召开的第八次中央专委会议上决定：“596”采用塔爆方式，于9月10日前做好试验前的一切准备工作。要求做到“保响、保测、保安全，一次成功”，要求做到“严肃认真，周到细致，稳妥可靠，万无一失”。

1964年10月14日下午，首次核试验委员会在场区召开了全体会议，决定16日15时爆炸。14日深夜，距零爆前只有40多个小时，作为现场总指挥的张爱萍上将心里越发担心由于中子过早点火而导致失败的可能性，于是给二机部发了一份“紧急电报”，要一份最后的计算资料，要九院的科学家们保证：依据他们的计算结果，试验成功的概率在99%以上。这时大多数技术数据资料已经送到试验基地。刘杰部长指派物理学家周光召和黄祖洽，数学家秦元勋去完成这个任务，必须在8小时内作出回答。三位科学家只能凭自己的记忆用计算尺进行核算，花了一整天的功夫，核算完毕，三人同时在送给中央专委的备忘录上签了字，说明成功的概率能够达到99%的要求，交给刘部长上报中央。

(附注：“三人签字”此事在美国人著的《中国原子弹的制造》一书有专门记载，稍有不准确之点。应是两位物理学家和一位数学家，而不是周光召和两位数学家。亦可见此英文书的中文翻译版本。见下面的旁证材料)



旁证：中英文对照

当人类的历史时针指向公元1964年10月16日15时，罗布泊地上蓦起一声巨响，一道比千万个太阳还亮的闪光过后，随之一个通红的火球腾地而起，扑向蓝天；在它后面地面且卷起一个粗壮的尘柱，紧紧地追赶着火球；戈壁滩上冉冉升起翻滚飞腾的蘑菇烟云。根据现场采集的数据表明，爆炸威力初估TNT当量在2万吨以上，科学家们确认这是一次成功

的核爆炸。这是中国人民永远值得骄傲的日子，新中国的原子弹震撼了全世界！

当毛主席接到周总理的报告后，风趣地说：我们要感谢赫鲁晓夫，要不是他撤销援助，激起中国人民奋发的精神，我们很可能不会这么快就造出原子弹。为此，我们要赫鲁晓夫一个一吨重的大奖章。”

当天下午，欢乐情绪笼罩着北京城，几千名男女文艺工作者聚集在人民大会堂的宴会厅，进行一场《东方红》大型歌舞表演。下午4点钟，周总理接见了大家，并宣布：“毛主席让我告诉大家一个好消息，我国的第一颗原子弹已经爆炸成功了！”全场一片沉静，当他们的意识反应过来时，顿时欢呼声响彻了整个大厅，周总理风趣地说：“大家可以尽情地欢庆，但可要小心别把地板蹦塌了！”

就在我国第一颗原子弹成功爆炸的晚上，在罗布泊试验场地的庆功宴会上，朱光亚有生以来第一次，也是惟一的一次，畅怀大饮，喝醉了酒；理论设计大师彭桓武当场即兴赋诗一首，“塔爆有感”：“亭亭铁塔矗秋空，六亿人民愿望同。不是工农兵协力，焉能数理化成功。”此时此刻，周恩来总理又打来电话告诉大家一个振奋人心的大好消息：“赫鲁晓夫下台了”！更是无巧不成书！就是当年那个撕毁中苏合作协议要置中国核事业于死地的赫鲁晓夫下台了，真是大快人心，真解恨！毛主席还风趣地说：“我们给赫鲁晓夫放了送行的一炮”。

10月17日，在人民大会堂周总理向人大常委第127次会议宣布这一特大喜讯时，大家热泪盈眶，长时间地响起暴风雨般的掌声，热烈庆贺我国首次核试验成功，欢呼我国人民打破了核垄断！

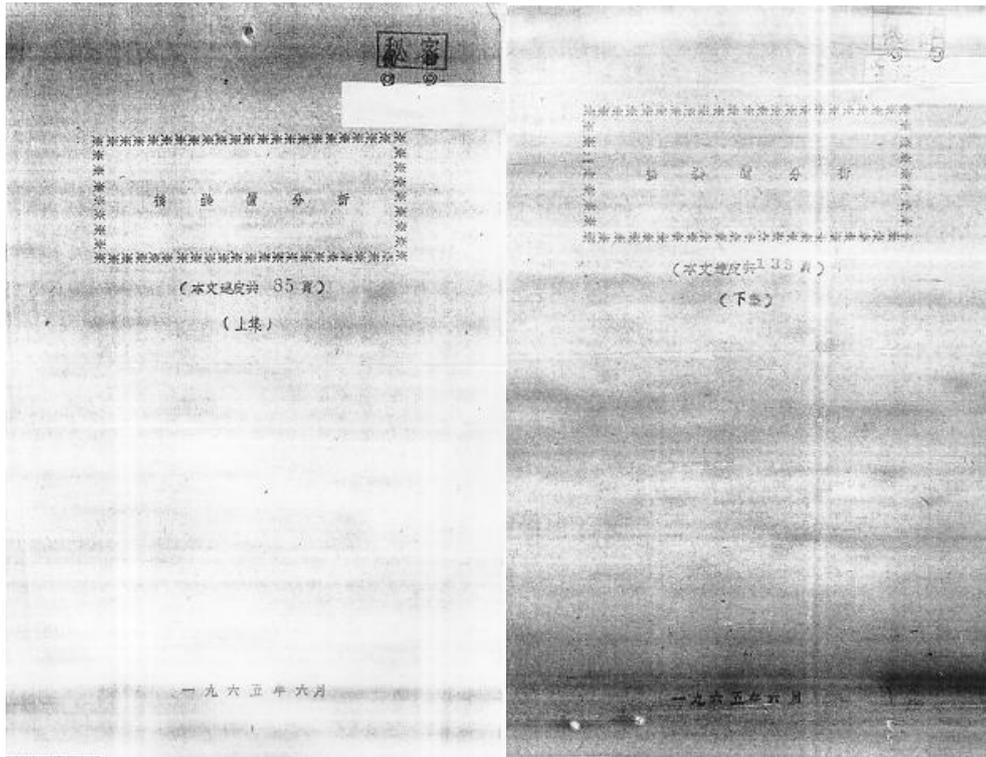
中国的首颗氢弹研制是在1965年氢弹原理突破、1966年氢弹原理试验、1967年6月17日氢弹试验成功爆炸。从首颗原子弹爆炸到首颗氢弹实现爆炸，仅用了二年零八个月时间，比任何国家都快，是世界第一。

(六) 1965年：《核装置分析》

1965年是氢弹原理突破年。元月初，二机部决定将原子能所预先探索氢弹原理的一部分力量，即由黄祖洽、于敏领导的“轻核理论组”的大部分人马，共有31人合并到九所，以便集中力量突破氢弹。于敏亦被任命为理论部副主任之一。

1965年1月9日，朱光亚副院长传达全国三届首次人大会议精神，周恩来总理在政府工作报告中提出了工业、农业、国防和科技四个现代化的宏伟目标，从而大大激励了科研人员攀登氢弹高峰的勇气和信心。同时在1月底抽调一部分科研人员去参加河南“灵宝”的“四清”运动，其中就有理论部副主任**秦元勋**。

秦元勋利用离京去河南参加“四清”半年的时间，临行前把手中已修订定稿的《**核装置分析**》手稿交付给研究所正式打印成内部资料。这是**秦元勋**自1960年5月1日参加工作以来，将亲自参加第一颗原子弹的理论设计过程中遇到和解决的一些主要的技术问题及时地加以记录。由于**秦元勋**思维敏捷，反应灵活，手又勤快，善于把自己的理解和数学上的推导和证明，与物理学家们的想法结合起来，归纳整理，及时地写成文字材料，这样逐步形成一份比较完整的资料。部分初稿在1962年完成，马上用于每年大批大学生进所工作的入门学习材料，成为培养干部的好教材。反复讲课、反复修改、及时补充。1964年核试验成功后，又加以修订，最终定稿，交付打印。在1965年6月打印完的百万字的《核装置分析》一书分上、下两集。上集有85页，下集有135页。有6章外加6个附录组成。



这份材料为培养我国第一代核武器研制和威力计算的队伍起了很大的作用。后来还应邀到哈尔滨军事工程学院二系去讲学，直接为培养和输送核武器的科研人才作出贡献。时间越长，其价值越为凸现，这是**秦元勋**为我国核武器事业的发展留下的一笔宝贵的精神财富。

1965年8月20日，二机部向中央专委呈报了《关于突破氢弹技术的工作安排》：一方面进行理论上的探索，另一方面要进行若干次核试验，以求通过试验，检验理论是否正确，提高理论认识。因为当时经过几个月的“练兵”摸索，认识到像“1100”这样的热核弹头难以一步到位，理论部领导及时调整了突破氢弹的途径和步伐，决定在确保主力11室和12室继续进行理论探索的前提下，决定把次年进行的小规模加强弹爆炸试验的设计任务交给了1室，并把打算两年后进行的百万吨级氢航弹热试验用的弹头优化设计任务交给了13室。

1965年8月27日邓稼先主任在理论部召开的大会上将任务重新作了布置，并将部分科研人员作了调整。理论部大会后，邓稼先主任和主管十三室的**秦元勋**副主任给十三室下达任务：首先是利用原子弹研究成果与计算程序，进行ALU系统(即加强型装置)的物理模型计算，探索氢弹的基本物理规律。给出具体的三项技术指标，要求在这三个指标内作最优化的设计。这就是第一，考虑到我国轰六飞机最大载重量为8吨的限制，允许在设计时将主炸药球的外半径由现有原子弹的外尺寸向外扩大至1.34倍，即允许炸药总装量可以增加1.4倍；第二，装置总威力要达到100万吨梯恩梯当量；第三，聚变比(聚变能/裂变能)可以在xx%左右。在下达任务的会上讨论十分热烈，刘西尧副部长也亲自参加，并风趣地说：“我个子高，就很容易摸到门框了”。意思是鼓励尽可能加大尺寸，多装核材料，先搞出一个氢弹核装置，下一步再设计更先进的氢弹。为此十三室物理组的九位同志在孟昭利副组长(正组长储连元被派往河南农村去搞“四清”了)带领下，在北京事先设计好一百多个理论计算模型。

1965年9月27日，13室的大队人马(约有50人左右)，在室主任孙和生、副室主任蔡少辉和彭清泉率领下浩浩荡荡地开进华东计算所，理论部副主任于敏也随同前往。主要是想利用国庆假日期间全部机时归“五班”使用的大好机会，集中突击算一批模型。到达上海后，

立即开始工作，按在北京事先设计好的要计算的模型，先计算一批模型。在分析第一批计算结果时发现中子不守恒、能量不守恒现象。分析原因是由计算机内存限制，氢弹比原子弹结构复杂，要求分点增多，尤其是轻核物质被压缩后尺寸过小，采用中心差分格式计算就会产生中子和能量不守恒，严重影响计算结果的准确性。为此，需修改和编制程序。决定在理论部的 532 程序的基础上作局部修改，在很短时间内先后完成 1301、1302 程序的编制工作，解决了中子数不守恒等问题。又很快算出一批模型，从结果上看，离领导要求并不太远，只要加入少量贵重材料，威力就能提高到 100 万吨，这一点并不太难。问题在于聚变份额都很低，说明核材料并没有充分燃烧。面对这批计算结果，于敏同志并不感到意外。原因他在原子能所轻核理论组进行探索研究时，曾对原子弹中加入聚变材料的加强型原子弹进行过探索，不过当时是缺乏真实的原子弹知识的情况下进行的，当时就认识到聚变材料燃烧不充分，故加强作用不明显的问题存在。这次他受理论部主任会议之托，来到上海出差就是要研究如何把加强型原理和现实的原子弹结合起来，完成加强型装置的优化设计任务。于敏从众多的计算模型中挑出三个用不同核材料设计的模型，进行深入细致的系统分析，结合他过去四年來探索氢弹机理结累的物理知识，结合物理粗估，对内爆动力学、中子学、热核反应动力学、辐射流体动力学等有关现象进行系统分析，给大家作系列报告。

1965 年 10 月 13 日于敏开始了在上海持续两周的系列报告的第一讲，他从炸药起爆开始，将加强型的原子弹的全过程划分为原子阶段、热核爆震阶段和尾燃阶段。并对其中每一阶段的特征物理量进行分析，抓主要矛盾和矛盾的主要方面。通过分析，发现加强型弹内中子造氙的过程太慢，中子造氙循环过程赶不上弹体解体过程，从而导致在热核爆震阶段中，“火球内的能量释放率干不过能量损耗率，差了几倍！”。要解决这一困难，“要么设法减慢火球的传播速度，要么提高能量释放率”。其途径不外乎有两条道路：高温度和高密度。高温道路已经过探索知道其中的困难所在。只有走高密度之路。通过分析知道加强型装置中热核材料没有充分燃烧是因为中子造氙循环次数没有达到足够多次数，是因为没有达到足够高的密度，是因为仅靠炸药的有限能量來压缩是永远达不到的。只有依靠原子弹爆炸的能量才有可能。如何控制和利用原子弹的能量这又是一个高难度的问题。为了解决这一难题，于敏经过苦思冥想，几天几夜的估算。分析原子弹爆炸时所释放的各种能量形式、特性及其在总能量中的比例，找到一种易控制，可驾驭的能量形式。然后想出一种减少这种能量损失、提高其利用率的精巧的结构，估算有多少能量被利用，有多少可用未压缩氘化锂-6，氘化锂-6 压缩到什么程度就可使之点火和自持燃烧，等等。此时于敏的头脑中已初步形成两级氢弹原理和构形的设想。

11 月 5 日在华东计算所主楼五层东侧的大教室里，13 室全体出差人员安静地坐在大黑板前，由理论部于敏付主任介绍他分析三个典型模型的打印纸带结果而产生的新的设计思想，随着他的深入浅出的语言、严密的逻辑思维、无懈可击的推理和充分的论据，从原理、材料、构形三要素把大家带进了一个氢弹王国，使大家如梦初醒，意识到一个新的氢弹原理诞生了！氢弹的“牛鼻子”今日终于被揪住了！

在氢弹原理突破过程中于敏同志解决了核武器物理中的一系列基础问题，发现了热核材料燃烧过程中几个特征量和释放能量的关系，并从中找到了造成自持热核反应的关键，从而提出了从原理到材料到构形基本完整的构想。邓稼先作为领导从中及时沟通、协调、下达任务；组织专家反复论证，集思广益，使方案更臻完善。终于在 1965 年底提出了利用原子弹來引爆氢弹的新的理论方案。

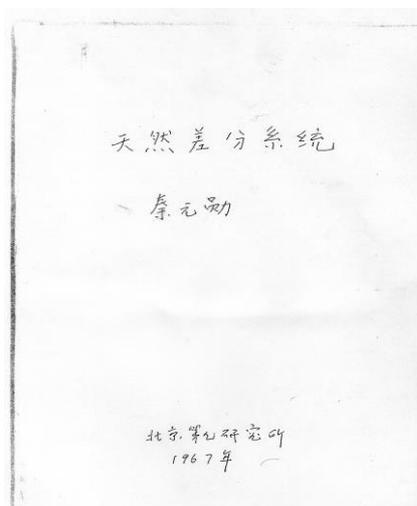
(七) 1966 年：“天然差分方法”

1966 年是氢弹原理试验年。为了确保 1967 年使氢弹能赶在法国人之前炸响，为稳妥起

见，在 1966 年初九院的工作会议上，决定在年内临时增加一次氢弹原理试验。为了抢时间，决定以当时现有的备用型号产品 A2923 与 596L 中间加管子连接起来，作为新的试验产品。这种球柱球结构产品行不行？仍需要通过计算机上的数值计算来验证，来提供理论依据和相关的数 据，就需要有二维程序来计算。但是当时理论部的实际情况是尚没有一个能用于计算的二维计算程序可用，正在编制的二维程序有十一室的“椭球”程序、十二室的“三角网格”程序和十三室的“锥流管”程序；更何况当时交付可使用的最快的计算机有北京的 119 机和上海的 J-501 机，每秒五万次运算速度。计算机的内存和运算速度都限制上不了真正的二维程序。秦元勋作为专门负责抓数学、计算、计算机的副主任，面对无程序可用的窘境，感到压力很大，感到内疚。促使他下决心，狠抓二维方法过关。他在总结前阶段二维方法探索的经验基础上，大胆地创新，提出“天然差分”的崭新思想。写出完整的很有前瞻性、非常有新意的《天然差分系统》的计算方法。但这时是“远水解不了近渴”，急紧关头是蒙特卡罗方法组的同志用半年时间编制出可适用的“切片程序”，用于氢弹原理试验模型和氢弹试验模型的计算，提供了二维效应的数据，解了“燃眉”之急。

“切片程序”不能算是一个真正的二维程序，至多算是一维半程序，甚至是 1.25 维程序。因为开始仅在引光管和引光层中计算轴向、切向维，其它壳层皆不算，而且分点分得很粗。其原因是节约内存和“计时”。在求解二维方程时也采用双向一维交替隐式格式：即在算径向时，把轴切向的量认为已知；而算轴切向时，把刚算出的径向量和原先量取平均作为已知，这样交替算一遍后的结果就作为二维计算的结果。故“切片法”又称“双向一维法”。不要小看这维数上只比一维增加“一点点”，可在氢弹理论设计过程中起到别的程序无法替代的决定性作用。像“喇叭口”，“戴帽子”，“削屁股”，“偏心”等二维效应只能靠“切片程序”来计算。试验成功后于敏对这个程序给出高度的评价：“使我尤其高兴的是当时我们使用的计算方法精度不高，但是在几个关键物理量上，试验结果却与设计值十分符合。”

附件三、“天然差分方法”



秦元勋对多维可压缩流体的“天然差分方法”，完整地提出而且印成有 60 页文本是在 1967 年，其基本思想是从物理模型直接建立差分方程，故称为“天然(或原始)差分”，而不是常规的从物理模型通过“原始差分”变成数学模型(微分方程)，再经过“再次差分”变成离散模型(差分方程)。这种做法的优越性在于每一项都有极强的物理背景，便于对每一步计算结果的分析。此方法突出三个关键字：“活”(可变邻域的选定)、“精”(对称化)、“快”(辐射扩散计算的整体迭代)，有一个独特的创新点是提出一种“质点带壳”或“有心带壳”的模式，即“质团”的概念。意思是每个质点可以单独行动，解决了混合介质的问题；每个质

点又带着一个“壳”运动，这样有体积，可计算密度、温度、压强等物理量，分界线或分界面也明确了，故又俗称“质团法”。

二维柱坐标系下动量方程是

$$M_i \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = \sum_j (p_{i,j}^n - p_i^n) S_{i,j}^n \pi_{i,j}^n$$

设 i 和 j 之间的角点为 $C_{i,j-1,j}^n$ 和 $C_{i,j,j+1}^n$, $S_{i,j}^n$ 为 $C_{i,j-1,j}^n$ 和 $C_{i,j,j+1}^n$ 两点连线绕 z 轴而形成的旋转面积, 则

$$S_{i,j}^n = \pi(R_{i,j-1,j}^n + R_{i,j,j+1}^n) \sqrt{(R_{i,j-1,j}^n - R_{i,j,j+1}^n)^2 + (Z_{i,j-1,j}^n - Z_{i,j,j+1}^n)^2}$$

将 $S_{i,j}^n$ 代入到动量方程中得到

$$M_i \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = \sum_j (p_{i,j}^n - p_i^n) \pi (R_{i,j-1,j}^n + R_{i,j,j+1}^n) (R_{i,j-1,j}^n - R_{i,j,j+1}^n)$$

$$M_i \frac{v_i^{n+1} - v_i^n}{\Delta t} = \sum_j (p_{i,j}^n - p_i^n) \pi (R_{i,j-1,j}^n + R_{i,j,j+1}^n) (Z_{i,j,j+1}^n - Z_{i,j-1,j}^n)$$

位移方程为

$$Z_i^{n+1} = Z_i^n + \Delta t u_i^{n+1}$$

$$R_i^{n+1} = R_i^n + \Delta t v_i^{n+1}$$

有了质心位置, 则有了交界点 $\bar{R}_{i,j}^{n+1}$ 和角点 $\bar{C}_{i,j,k}^{n+1}$ 的位置, 设 i 的邻域表为 (j, k, l, \dots, j) , 则体积为

$$V_i^{n+1} = \frac{\pi}{3} \sum_{(j,k,l,\dots,j)} \{ (Z_{i,j,k}^{n+1} - Z_{i,j,l}^{n+1}) [(R_{i,j,k}^{n+1})^2 + (R_{i,j,k}^{n+1})(R_{i,j,l}^{n+1}) + (R_{i,j,l}^{n+1})^2] \}$$

密度分式为

$$\rho_i^{n+1} = \frac{M_i}{V_i^{n+1}}$$

能量守恒分式为

$$M_i \cdot \frac{1}{2} (\vec{u}_i^{n+1} \cdot \vec{u}_i^{n+1}) + M_i \cdot e_i(T_i^{n+1}, \rho_i^{n+1}) + V_i^{n+1} \alpha(T_i^{n+1})^4$$

$$= M_i \cdot \frac{1}{2} (\vec{u}_i^n \cdot \vec{u}_i^n) + M_i \cdot e_i(T_i^n, \rho_i^n) + V_i^n \alpha(T_i^n)^4$$

$$+ \Delta t \sum_j F_{j \rightarrow i}^{n+1} + \Delta t \sum_i W_{j \rightarrow i}^{n+1}$$

其中作功项是

$$W_{j \rightarrow i}^{n+1} = p_{i,j}^n \frac{\pi}{2} (R_{i,j-1,j}^n + R_{i,j,j+1}^n) (R_{i,j-1,j}^n - R_{i,j,j+1}^n) (u_i^{n+1} + u_j^{n+1})$$

$$+ p_{i,j}^n \cdot \frac{\pi}{2} (R_{i,j-1,j}^n + R_{i,j,j+1}^n) (Z_{i,j,j+1}^n - Z_{i,j-1,j}^n) (v_i^{n+1} + v_j^{n+1})$$

$F_{j \rightarrow i}^{n+1}$ 是辐射输运项, 由能量方程可以求出温度 T_i^{n+1} . 再计算出压强 $(p_n^{n+1})_i$, 总压强是

$$p_i^{n+1} = (p_n^{n+1})_i + \frac{1}{3} \alpha(T_i^{n+1})^4$$

这样便完成了一次计算的周期。这种有心带区域的运动一方面照顾了不同物质的运动, 另一方面也区分了它们的边界, 有利于计算压力等。

此方法实现的关键是邻域的选取问题, 即由心求边界问题。问题可归结为: 已给一批离散质点 $P_i (i=1, 2, \dots, N)$, 求每个质点所控制的区域, 这些区域必须布满整个求解空间, 并且不同的点的区域不能有公共内点。

秦元勋提出的做法是: 规定空间中任何一点 Q , Q 离 $P_i (i=1, 2, \dots, N)$ 中最近的一点为

P_{i0} ，则 Q 属于 P_{i0} 的控制区 V_{i0} ，如果 Q 离 P_{i0} ， P_{i1} 两点同样近，则 Q 属于 P_{i0} 及 P_{i1} 的控制区的交界面上，这样确定的 V_i 有下述性质：

- (1) P_i 在 V_i 中；
- (2) V_i 是凸体；
- (3) V_i 的边界为若干张平面(三维)或直线(二维)；
- (4) 交界处是相邻两点的垂直平分面(三维)或垂直平分线(二维)；
- (5) V_i 是惟一确定的。

首先应肯定**秦元勋**在当时提出其方法的思想是很新颖，前瞻的，对以后的二维流体力学计算方法的发展产生很深远的影响。其次，由于当时计算机的发展水平所限，1967 年可使用的北京 109 丙计算机，速度是每秒 10 万次；上海 655 机速度是每秒 50 万次。尽管单位领导很重视，1967 年氢弹试验成功后，立即举办全所的“天然差分”学习班，组织投入大量的人力财力去研制程序，但实现过程中迂到的实际的困难是很大的，难以想象的。故暂且不论当时未能赶上后续的氢弹研制过程中发挥作用，以至于后来有以雷昌镇为代表的人，投下毕生的精力，孜孜不倦地做工作，坚持近二十多年的努力才出成果，才研制成功可以用于国家型号任务计算的实用程序，使秦元勋的这一原始思想得以实现。可见，研制出一个可真正实用的二维流体力学程序是多么地不容易！

(八) 1967 年：氢弹试验现场一人签字

1967 年是氢弹试验年。1967 年 2 月，理论部提前完成了全威力氢弹的理论设计任务。部件设计完成后由 221 厂第一生产部组织加工生产。6 月 5 日完成试验用的氢弹的加工，6 月 8 日运抵国家试验场的机场装配厂房。实验队由李觉带领抵达试验现场。理论部派出由**秦元勋**带领的五人小组和参试人员，与兄弟单位的参试人员密切合作，共同完成了试验前的准备。

1967 年 6 月 16 日聂荣臻元帅再一次亲临核试验场主持这次试验，这是聂帅在八个月内第三次去核试验基地。核试验基地司令员张蕴钰任现场总指挥，国防科委副主任张震寰、二机部副部长李觉参加试验的领导工作。

当张蕴钰司令听说**秦元勋**是负责理论计算的，就问秦：“你算准确了没有？”秦答：“对于氢弹，国际上标准：一是威力在百万吨以上；二是聚变能要高于裂变能，这两点我们都可保证。”张司令员严肃地说：“这还不够，如果你的数据算少了，实际爆炸大多了，也要出问题。”**秦元勋**马上意识到张司令讲这话的意思：1954 年 3 月 1 日美国在太平洋上的比基尼岛(马绍尔群岛北端)附近试验氢弹，事前曾划好安全区，但因爆炸当量比计算结果大了一倍，使航行在公海上的日本渔船“福龙丸第 5 号”的船员 23 人受害，并有死亡，引起了日本和世界人民的抗议。接着，张司令员要求**秦元勋**在一张保证书上签字。虽然上一次原子弹爆炸时秦也签过字，但那次签字是 3 个人，而这一次是仅他一个人签字。时间紧迫，不容许有什么犹豫，只好硬着头皮在保证书上签了字。

1967 年 6 月 17 日上午 8 时，担任空投任务的是空军机组组长徐克江、负责投弹的第一领航员孙福昌，由徐克江驾驶 726 号轰-6 飞机从核试验基地马兰机场起飞，进行中国第一

颗氢弹进行全当量试验，比预定计划还多飞一圈 20 分钟后才投下，在距靶心 315 米、高度 2960 米处爆炸。顿时在我国西北大漠上空出现一颗“人造太阳”，一道强烈的闪光后，一声巨响，一个巨大的火球托起一朵硕大的蘑菇状烟云。瞬间变成五光十色的草帽式的光环，奋力向上奔向苍穹。两个太阳在蓝天上并排高挂，这一奇特的景象，令人叹为观止。

秦元勋在观察的掩体内感觉到被冲击波打了一几耳光似的，手中抓纸屑被冲击波吹走。理论部的小组成员立即从三个方面加以目测：一是冲击波由闪光开始到达观察点的时间；二是观看烟云高度，氢弹要上升到距地 10 公里的平流层，形成一个大的白圆盘，不是原子弹的蘑菇云；三是两次最小亮度的时差。三项指标都表明是氢弹。秦元勋立即到附近的掩体中去向聂荣臻元帅报喜，报告成功爆炸的消息。聂帅立即叫一位参谋拿出一张预先写好的准备成功后向中央报喜的电报稿，要秦在上面签字。

氢弹爆炸试验获得圆满成功(第六次核试验)，威力为 330 万吨 TNT 当量，实测爆炸高度为 2930 米。这是我国从事核武器研制工作的广大科技人员、工人、干部，为实现国防现代化的伟大目标，刻苦钻研，勇攀科学高峰所取得的又一个重大成就。使我国提前一年多多实现了毛泽东和中央专委提出的要在 1968 年爆炸一颗氢弹的要求！我国首次氢弹爆炸试验，赶在了法国的前边，在世界上引起了巨大反响，公认中国核技术已进入世界核先进国家的行列。

1967 年 12 月 31 日，全体参战人员在北京人民大会堂受到毛主席等中央首长的接见，秦元勋当然是其中的一位重要的被接见对象。

(九) 最高奖赏与荣誉

因秦元勋负责我国首颗原子弹(“596”)、首颗氢弹(“639”)任务的威力计算问题，荣获 1978 年全国科学大会个人重大成果奖状(#0011424)；而《原子弹氢弹设计原理中的物理力学数学理论问题》荣获 1982 年度国家自然科学一等奖，这是一项集体成果奖。秦元勋是荣誉证书(#100019)上 9 名代表者之一（其排名顺序是彭桓武、邓稼先、周光召、于敏、周毓麟、黄祖洽、秦元勋、江泽培、何桂莲）。



注：当时一等奖的奖金是一万元。证书九名列名者每人获奖金 50 元，其他参战人员每人获奖金 10 元。

一九八四年十月十六日召开隆重的庆祝“我国首颗原子弹试验成功二十周年纪念大会”。除北京九所、〇二九所职工外，还邀请了核工业部的新老领导，国防科工委新老领导，九院新老领导，还有从理论部调出去的部分同志。首先是党中央、国务院、中央军委领导同志接见单位的主要领导并合影留念。



一排坐左起：4 张爱萍、5 余秋里、7 杨尚昆、8 邓稼先、9 赵紫阳(中间穿西服)、10 朱光亚、11 万里、12 陈能宽、13 杨得志、14 彭桓武、15 胡启立、16 张劲夫、17 刘杰、
二排站右起：6 秦元勋

庆祝大会会场设在新影礼堂，秦元勋在庆祝大会主席台上就座，发言时当场朗诵他新作的一首诗。



右一发言者**秦元勋**、右二 于敏、右三 李德元

七律： 中华火球照人寰
(1984年10月16日)
秦元勋

三家定约莫斯科，
世界无赖原子何。
七亿神州翘首盼，
试验何日奏凯歌。

百战将军穿戈壁，
七旬元帅临楼兰。
万众齐心核子裂，
中华火球照人寰。

同时对有功参战人员颁发军功纪念章。对**秦元勋**还颁发“核事业开拓者”证明书。



敬贈

核事业的开拓者秦元勳同志：

紀念我國第一顆原子彈爆炸成功二十
周年存念。

北京第九研究所政治部

一九八四年十月十日



件一

(2011.3.28)