

· 学术讲座专辑 ·

编号 0005

学 术 报 告 集

清华大学名誉教授 任之恭

北 京 清 华 大 学

1981

前 言

清华大学名誉教授，美国约翰霍普金斯大学应用物理研究所前付所长任之恭先生，于1980年9月及1980年12月至1981年2月（1980年10月至11月在四川讲学）来清华大学第三次讲学。这次讲了8个专题，内容涉及物理学中各个较新的领域。

现将8个专题报告之讲稿印成此文集。本文集是根据任教授在四川讲学后修改过之讲稿印制。图及个别文字订正由清华大学无线电系教师姚敏言完成，（未经任教授审阅）如有错误及不当之处，请读者批评指正。

清华大学无线电系激光教研组

1981.4.

目 录

一、公元 1054 年及 1408 年超新星与其遗迹的比较·····	(1)
二、毫米波及红外线的波源·····	(5)
三、光学纤维与光讯交通·····	(17)
四、双光子与多光子组合现象·····	(25)
五、磁泡·····	(31)
六、光声谱学·····	(38)
七、质子结构及基本粒子的统一理论·····	(43)
八、宇称不守恒在原子与分子中的表现·····	(52)

一、公元 1054 年及 1408 年超新星与其遗迹的比较

I. 引言

公元 1054 年及 1408 年两颗超新星都是中国人在宋朝及明朝观察到的，并且有详细的许多记载。1054 的超新星与它的遗迹如蟹状星云及新近发现的脉冲星是天文物理的轰动全球的事迹。1408 的超新星也是中国当时观察的，但最近才有人注意。其中大部分证据还是由射电（或 X 射线）天文搞出来的。但也有不同形状的星云，还没引起天文界特别的注意，同时它的遗迹相当稀少，也不太惊人。我们在此稍许做一点比较。

II. 1054 超新星及其遗迹

1054 年就是宋至和元年。超新星（当时叫“客星”）出现于天关的东南，其光芒强烈可使人们在白昼看见经长期 23 天以后才衰失。1928 年天文家发现蟹状星云（crab nebula），确定其为 1054 超新星的遗迹。

“天关”在 β_{Tau} 与 ζ_{Tau} 两星之间，何丙郁等认为“天关”就是 ζ_{Tau} 星所在点。

1931 年 Beris 发现……→蟹状星云
(Crab nebula)

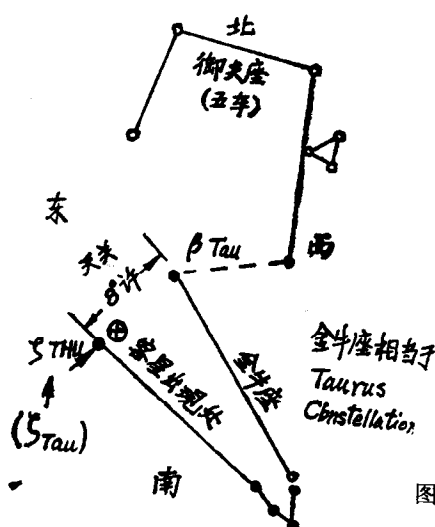


图 1.1



图 1.2 蟹状星云其星云形状称为第一种 (type I)

1967 年英人 Hewish 发现在其中心附近有一个脉冲星 (Pulsar) 其周期准确到 0.033099324 秒, 天文物理家认为它是一个中子星 (neutron star)。它不但是在射电频率内之脉冲, 它在可见光及 X 光也有相等脉冲速度。它的编号为 NP0532, 是所有观察到的 (至少五、六十个) 脉冲星周期最短的一个。

1054 超新星在已往观察到它的各种奇异遗迹, 变成超新星里超群拔类的典型。

II. 1408 超新星

1408 超新星出现于明朝永乐六年。从光度上看, 它远比不上 1054 的超新星那么辉煌, 但历史上记载的词句, 描写它“有星如盏”, 维持亮度 44 天以上。它的表观光度大约是 -3 级 (1054 超新星的表观光度为 -6) 它的位置在天鹅座 (Signus constellation), 相当于古代“辇道”东南地点。

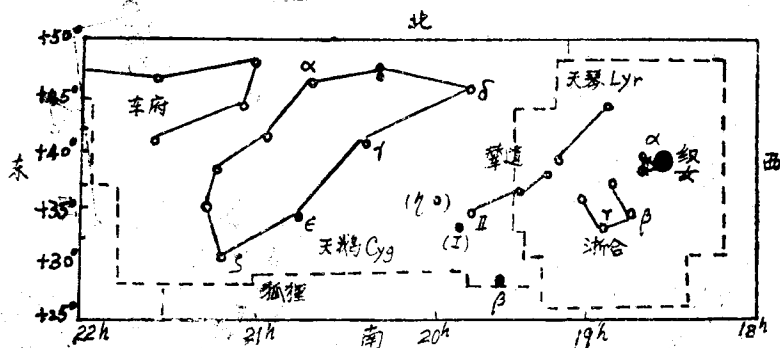


图 1.3 天鹅座里 1408 超新星

现有几种说法

在上图 (I) 的星点, 那里有射电天文星 (radio star) CTB80 适合书载“古代星座‘辇道’东南”的描写。CTB80 有它的射电天文的星云密度, 也有相仿的光线星云图样。CTB80 周围的星云, 似有两片的形状, 它们的编号为 NGC6960 及 NGC6962-5。其形状如图 1.4。

这种星云形状常称为第二种 (type II)。早在 1946 年天文学家 Oort 认为三万年前有一个超新星在太阳附近爆发。

今年三月 Strom, Angerhofer 与 Velusamy 在 Nature 杂志撰文认为以前种种说法 (大概包括 Oort 的) 都不近情理。他们估计星云的膨胀接近每秒钟 375km, 并且这超新星的遗迹主要部分为 CTB80, 同时其射电星位置, 正居于星云的中心。他们感觉这超新星的年代并不古老, 依其膨胀速度, 超新星的爆发, 不出数千年。因而他们参考 Clark 与 Stephenson 记录, 在 75 项可能事件中, 只有一项靠近 1408。他们于是参考李启斌“天鹅座 X-1——1408 年超新星的遗迹”的文章 (见参考 1)。他们与李启斌同意 1408 事件确为超新星, 但认为其遗迹为 CTB80, 并不一定是 Cyg X-1。

至于李启斌引证中国古代天象记载, 拿其中九条有关记录, 归纳成同一天象事件。

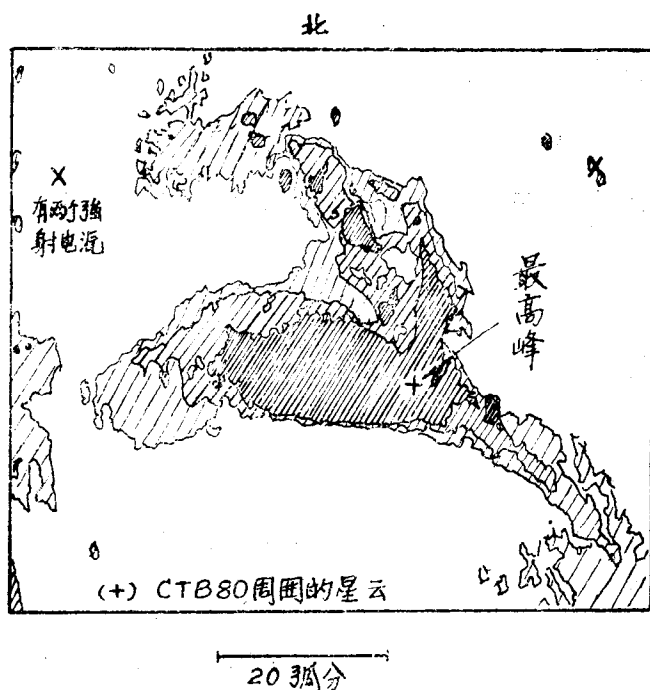


图 1.4 (+) CTB80 周围的星云

他很有理由地认为“明实录”为最准确的记录。既如此，“明实录”的记录如

“永乐六年冬十月庚辰，夜中天，犖道东南有星如盏，黄色光润，出而不行，盖周伯，德星也”
是一个很准确的描写。

李启斌又说：

“从发亮时间看，从八月丙申（阳历 9 月 10 日）爆发到十月庚辰（阳历 10 月 24 日）经过了 44 天仍然光亮‘如盏’，可见发亮的时间应该更长的多，这也可以说明它是超新星”。

只可惜李启斌对于天象图的说明，依照一个相当宽泛的解释。他说（参考 1，第 211 页下段）：

“天鹅座 X-1 的坐标是 $\alpha_{1950} = 19^{\text{h}}56^{\text{m}}$ ， $\delta_{1950} = 35^{\circ}.1$ ，正处于中国古代星座“犖道”的东南”。

严格地说，“犖道”的东南的终点，应为图中所标记的 II 星。II 星的东南应为 (I) 星，正是射电星 CTB80 所在地。但若依李启斌宽泛的解释，1408 超新星爆发在“犖道”星座整体的东南，(η) 星很可以适合超新星爆发所在地的条件，超新星遗迹为与 η 星作伴的 $O_{yg} X-1$ 可能性，就增加了许多。

再论李启斌说 $C_{yg} X-1$ 确是 1408 超新星的遗迹，纵然 $C_{yg} X-1$ 是个发射 X-光星，它与一个黑洞 (black hole) 作伴或合而为一的假设，还要将来更多的观察证明。倘证明确实，这是一件最有意义的发现。

N. 1054 年及 1408 年 超新星遗迹的比较

综上所述, 现在可以列表如下:

超 新 星	1054	1408
1) 超新星突变光源的观察	中国、朝鲜、日本	中国, 日本
2) 遗迹星光源	✓	
3) 膨胀星云	第一种 (1100Km/秒)	第二种 (375Km/秒)
4) 稳定射电源	✓	CTB80
5) 脉冲星射电源 (中子星)	NP0532	
6) 脉冲星光源	✓	
7) X—光源	✓ (脉冲式的)	除非假定遗迹是 Cygnus X-1

从前 (参考 2) 已经把 1054 年超新星遗迹, 与各处发现的 1572, 1604 年超新星以及 Cygnus Loop (当时未发现 CTB80), Cassiopeia A, Vela X 超新星的遗迹如上表比较, 发觉所有其他超新星遗迹种类之多与确定性, 远不如 1054 年的超新星。现在指定以前所提的 Cygnus Loop 确与 1408 年中国观察的超新星并且与射电星 CTB80 有密切联系。上表所列 1408 年超新星遗迹进入天文物理学大致可以接受的范围, 但它的确定性以及遗迹的种类与其中新颖征象 (如脉冲中子星等), 远不如 1054 年超新星遗迹的完善及在天文物理学上的重大意义。

V. 参考文献

- [1] 李启斌, “天鹅座 X-1—1408 年超新星遗迹”, 天文学报第 19 卷第 2 期, 1978 年 12 月。
- [2] 任之恭, “公元 1054 年中国对超新星的记录及其在现代天文物理学上的意义”, 抄撤, 第 5 卷 1974 年 9 月。
- [3] R. G. Strom, P. E. Angerhofer and T. Velusamy, “The unusual supernova remnant CTB80” Nature, Vol. 284, 6 March 1980.
- [4] P. A. Angerhofer, R. G. Strom, T. Velusamy and M. R. Kundu, “AmuHi frequency study of CTB80 with the Westerbork Synthesis Radio Telescope”, a preprint of manuscript submitted to Astronomy and Astrophysics”, Feb. 1980.

二、毫米波及红外线的波源

(甲) 回转电子管与毫米波的产生

1978/8/4

1980/7/18 修订

I. 引言

自从 1885 年 Hertz 首次发现确如 Maxwell 倡言电磁波的存在, 低频电磁波的发展, 逐渐由电花 (spark) 的阶段, 经过交流发电机 (alternator), 真空管 (vacuum tube), 晶体管 (transistor), 速调电子管 (klystron), 行波管 (travelling wave tube), 磁控管 (magnetron) 等等的的应用, 把电磁波频率第一阶段提高至 300MHz ($\lambda = 1$ 米), 第二阶段再提高至 30GHz ($\lambda = 1$ 厘米)。

由上述第一阶段到第二阶段 (波长由 1 米缩短至 1 厘米) 的过程, 当时发生了很大的困难, 因为电子在玻管里行程过渡时间 (electron transit time) 居然在振荡周期 (Oscillation period) 中有破坏性反向作用, 因此有人认为产生波长一米以下的电磁波, 是物理学不允许的一件事。但经过一段时间, 这种电子过渡时间的困难, 都有了适当的解决。此中, 一个很好的办法就是减短电子过渡时间 (如调速电子管), 另一种很好的办法, 就是利用过渡时间为振荡的有效部分, (如行波管或磁控管)。无论如何, 在第二次世界大战当中, 产生一厘米电磁波的工作, 变成科技及电子工业中极其普遍的事体。

在世界大战后, 科学界对于由厘米波长领域走到毫米或亚毫米领域发生很大兴趣, 因为如能做到此点, 射频电磁波 (radio-frequency electromagnetic wave) 与远红外辐射 (farinfrared radiation) 中间的空隙, 就可以更进一步地减少, 这是科学界多年来的热望。为了达到这目标, 科学家们又遇着一个很大的困难; 那就是, 已往所用电子振荡管, 都是同它的波管结构 (wave tube structure) 有密切关系; 当电磁波波长愈短时, 电子振荡器的形状也愈小。结果是, 到了要产生毫米波长领域时, 所要使用的振荡器形状, 相当于一粒小豆的一般大小, 这是事实上做不到的事件 (纵然能做到, 功率必然太小, 也无济于事)。

可幸的是最近数年内, 对于毫米或亚毫米电磁波的产生, 有过一个突破性的发展, 在理论及实验两方面, 都推翻已往的成见与束缚, 结果是科学界不但可以造出毫米或亚毫米微波激射器 (maser), 并且可使其输出功率达到几十KW (CW, 连续波), 或用脉冲 (pulse) 式的操作, 应可达到 MW 之列。

II. 电子回旋激射器 (electron cyclotron maser)

1958 年澳大利亚人 Twiss 首倡自由电子回旋发射 (emission) 的理论, 1959 年美国人 Schneider 用量子力学相对论方式, 推论近乎光速的电子在磁场回旋的发射, 同年俄人 Gaponov 用经典物理讲近乎光速电子回旋运动的辐射。

在实验方面, 在 1960—1976 之间, 有好几方面, 试验上述的现象, 但其成果并不太大。只有在 1977 年有两批人有了很显著的成绩:

(1) 俄国 Gork'ii 大学研究所 Gaponov 等人用稍许近乎相对论速度电子, $V_e \sim \frac{1}{3}C$, 相当于 $[1 - (V_e/C)^2]^{1/2} < 1$, 在磁场中回旋, 波长在毫米范围内, 可以发生很强大功率的连续波。此研究结构用极大力量, 推进此项研究, 已经试用于“受控热核反应”(controlled thermonuclear reaction) 工作。他们命名此项仪器为“回转电子管”(GYROTRON)。因为 Gork'ii 研究所做了这项领先的工作, 特别注意造出最有功效又最实用的“回转电子管”, 到现在别的国家也都承认俄人对此研究最领头, 并且逐渐使用俄人首用的“回转电子管”名字。

(2) 美国海军研究所 (Naval Research Laboratory) Granatstein 等人对此毫米激射器, 做过许多研究, 他们用的大部是相对论速度电子 ($V_e \sim C$), 于 1977 年也做出微波及毫米波电子回旋激射重要工作。但在 1970—1977 年间, 他们集中于使用近乎光速度电子及高密度的电子柱 (intense electron beam), 做一种基本实验室工作, 并不十分注意合乎应用的激射器。以后在 1977 年附近, 由于与苏联竭力竞争, 也下了许多理论及实验工夫。在目前说, 美国人做的理论工作, 或许比苏联还强些, 但他们做出来实验的成绩, 肯定地稍逊于苏联, 因此在美国方面, 有 Stanford, Columbia, Cornell 等大学及 Varian 公司积极研究及制造微波及毫米波激射器; 在苏联方面进行更深刻的理论工作。不管将来那个国家占先, 毫米与亚毫米领域里能够拥有极其强大功率的回转电子管, 是毫无问题的。

III. 各种产生毫米波的激射器有几个共同的特征

虽然在表面上几个国家 (苏联, 美国, 英国, 法国等) 所采用的毫米激射器有若干不同的细节, 但大体说来, 它们之中有好几个共同的特征。

1. 每个毫米电子管都采用一静磁场, 其柱形磁体轴向 (axis) 与电子柱漂移 (drift) 方向符合。

2. 电子波导管 (waveguide) 波模 (mode) 为 TE 式, 在其截止点 (cut-off) 附近, 适宜于快波 (fast wave) 的传播。快波的相速度 (phase velocity) 超过光速: $V_p > C$ 。一个直径均匀的圆柱金属管, 就可能适合这条件。

3. 电子速度 (V_e) 可以很相近乎光速 ($V_e \sim C$), 可称为相对论速度 (美国许多实验, 采用此法)。但电子速度可以相当低于光速 ($V_e < C$) 仅仅带一点相对论速度意思 (苏联 Gyrotron 开端实验, 采用此法)。

4. 电子在进入磁场前, 其密度是均匀的, 但一经进入磁场后, 就形成回旋行动, 然后与管中的电磁快波相互作用, 结果发生一系列方位角聚束 (azimuthal bunching)。

(俟以下理论部分再加说明)。

IV. 苏联 (Gork'ii 所) 回转电子管的特点

苏联回转电子管当然具有以上所述的毫米激射器的性质, 但在这些基本相同原则之外, 苏联回转电子管成绩能够特出, 自有它独到之处。根据苏联研究者所作文章自述, 有下几点。

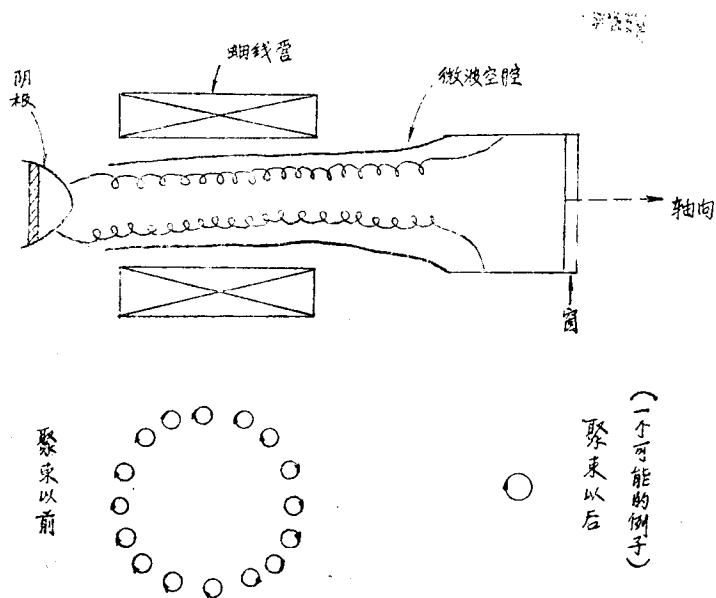


图 2.1 环形电子柱截面

最大目的: 寻求最佳的设计 (optimum design)

注重轴向的对称

阴极发射电子面积要很大

电子速度最小的色散 (dispersion)

电子只有较小的相对论速度效应

求最大毫米波功率与效率

V. 粗浅的理论看法

1. 基本共振公式

$$\omega - \vec{k} \cdot \vec{V}_0 = n\omega_0$$

此中, ω = 电磁波 (角) 频率

$\vec{k}$ = 电磁波矢 (wave vector)

$\vec{V}_0$ = 电子漂移速度

$n = 1, 2, 3, \dots$

$$\omega_0 = \omega_L \sqrt{1 - (V_0/C)^2} \quad \omega_L = \frac{eB_0}{m_0}$$

$\vec{k} \cdot \vec{V}_0$ = Doppler 频移 (frequency shift)

ω_0 = 相对论的 Larmor 频率

ω_L = 普通 Larmor 频率

n = 谐波的指数 $n=1$ 指基谐波

在长管行波 (travelling wave) 中, ω = 放大器频率

在空腔 (cavity) 驻波 (standing wave) 中, ω = 振荡器频率

2. 同调 (coherence) 条件

电子须有方位聚束 (Azimuthal bunching)。这种相聚束 (phase bunching) 的形成, 是由于回转电子与波导管中快波 (fast wave) 电磁场力的相互作用, 使电子速度稍有变迁, 因为相对论的要求, 电子质量也得改变, 接着发生 Larmor 频率随着变动。在此情形下, 有些电子转得快, 同时有些电子转得慢。快的于是遇上慢的, 结果构成聚束现象。在许多文章里, 这现象就说成是一种不稳定 (unstable) 状态。

关于上述方位聚束现象, 起源于相对论效应, 对产生出来的电磁波 (在这里是毫米波), 大有同调 (coherence) 的好处, 使得这种辐射有资格被名为激射波。再关于电子束不稳定现象的起源, 完全根据回转电子与振荡管中电磁力的相互作用。但此项不稳定现象的主体作用, 还是为了引起方位聚束的形成。假如这不稳定状态为了什么原因稳定下来, 方位聚束就无法进行, 最后结果就会使得毫米电磁波的发射由强烈状态, 退化到整个无法发射的穷境。

3. 相对论电子速度可使受激发射超过有害的吸收作用

关于相对论电子速度在电子与电磁波相互作用, 必然有受激吸收 (stimulated absorption) 及受激发射 (stimulated emission) 同时存在, 这是 Einstein 理论的要点。为了解释此点, 拿上粗浅的量子力学说明, 理由显得比较简单。依这种说法, 电子在静磁场中的能级, 就是 Landau 所说谐振子 (harmonic oscillator) 一样,

$$W = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega_0$$

此中 ω_0 就等于 Larmor 频率

$$\omega_0 = \frac{eB_0}{m} = \frac{eB_0}{m_0} \sqrt{1 - (V_0/C)^2}$$

所以两个“第一近邻” (nearest neighbor) 的能差就是 $\omega_L = eB_0/m_0$ 。在非相对论速度时 $\omega_0 = \omega_L = eB_0/m_0$ ω_L 是个常数。但在相对论速度情形下, 能级愈高, m 就愈大。因此 $W_n > W_{n+1}$, 如图 2.2 所示。设 P = 功率, 依图 2.3 所示, P (发射) $>$ P (吸收)。所以最后结论是: 在相对论电子速度情形下发射功率可以超过吸收功率。

4. 在高度发射功率情形下, 功率起落是非直线性的

相对论速度电子与振荡管内电磁波场相互作用的结果, 非但有从前所说过的不稳定, 而且在其发射功率增长过程中, 会表现出来它的非线性 (nonlinearity)。

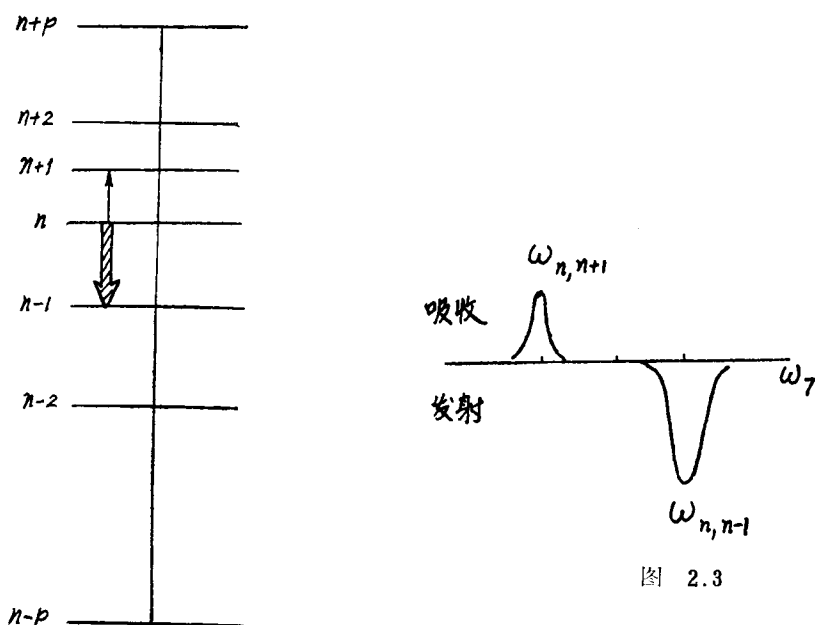


图 2.2 Landau 能级表明相对论效应

这项很有意义的理论分析，是应用电子柱与振荡管中的电磁相互作用基本方程式 (Maxwell—Vlasov equation)，寻求解决。作者们先用较简易的线性分析 (linear analysis)，由此得着一个有意思的结果。这部结果是说：发射功率增长率的最高点，发生在电子柱轴向漂移速度恰与电磁波的群速度 (group velocity) 相等。作者们拿这一观点为起点，进一步分析非线性方程。他们发现整个非线性方程式很难得着一个解析函数 (analytic function) 的答案。他们只得用数值的分析 (numerical analysis) 求得一个答案。他们认为非线性现象总会走到一个饱和 (saturation) 程度。就是说，到了饱和的时候，激励器中的不稳定性就由此逐渐下降。在此情况下，电磁波功率的增长顺序降落。这里所说饱和的原因，有两个可能性：

(1) 假如在电磁场发射功率还在直线式增长的领域时，电子的自由能 (free energy) 已经用尽，事实上等于电子在其轨道垂直方向没有动能 (transverse kinetic energy)，它就无法把能源转输到电磁场里。其次，我们谈第 (2) 种可能原因。

电磁波的相速度 $[V_p(\text{波}) = \text{Phase velocity of wave}]$ 与电子轨道平行 $V_p(\text{波}) < C$ 若 V_e (电子在轨道速度) $< V_p(\text{波})$ ，电子就可输能给波场。但每次电子输能到波场，其 $\omega_0 = eB_0/m$ 必然增加，由于 m 变小

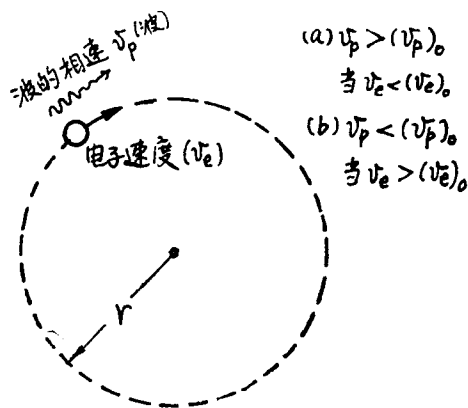


图 2.4

的原故。既然 $V_e = r\omega_0$, V_e 于是增长。结果可能有一情形, $V_e \sim V_p$, 果如此, 电子就无法给能于波场。这就是有些作者叫做相陷井 (phase trapping)。在此情形下, 波场功率自然无法增长, 构成以上所说的饱和现象。

总结的说, 饱和点是波场功率最高峰情形。假若超过了饱和点, 波场功率就可能每况愈下, 一直到零点为止。

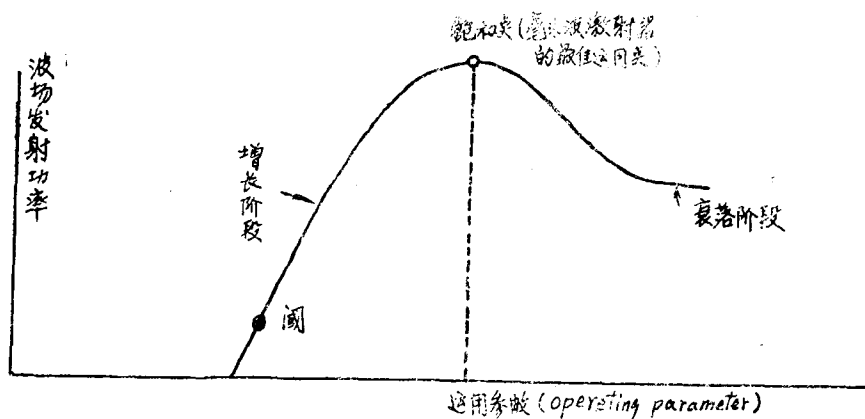


图 2.5

VI. 实际方面的可能应用

1. 用强烈的毫米 (或亚毫米) 脉冲电磁波, 射入重氢及氘核反应器中, 增加热核反应的温度。
2. 用普通毫米 (或亚毫米) 波, 为诊断等离子实验研究。
3. 用于毫米 (或亚毫米) 雷达工作, 又可为地面或海洋上空的遥感的应用。
4. 以毫米 (或亚毫米) 波研究天文物理问题。
5. 以实验室为基地, 研究毫米 (或亚毫米) 波谱学。

简略参考文献

- [1] V. A. Flyagin, A. V. Gaponov, M. I. Petelin and V. K. Yulpatov, IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-25, No. 6, June 1977, pp. 514—521.
- [2] J. L. Hirshfield and V. L. Granatstein, IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-25, No. 6, June 1977, pp. 522—527.

(乙) 自由电子激光

I. 引言

自从 1955 年 Townes 和 Prokhorov 发现微波激射原理并且做成微波激射器, 1960 年 Maiman 依照基本上同样的原理, 做出光线方面的激光器。在这些年中间, 激光的发展在固体、气体、液体各方面, 有过极其盛大的成绩。但它发展的范围, 总是与原子或分子有关, 从来没有单是用电子产生激光的。我们前此讲的回转电子管, 诚然是只靠自由电子, 但其中产生的波属于毫米波长范围, 严格的说, 还不是激光。

在 1977 年 Stanford 大学 Madey 等人首次做出来一种自由电子激光器 (free electron laser), 他们的具体实验虽然是在微米 (micron) 附近, 但这种电子激光器的可调性 (tunability) 包括红外、可见、一直到真空紫外光。同时它可以发射极其强烈的激光, 诚然代表一个非常杰出的发现。

除上述 Stanford 大学贡献外, 近年来有几个实验室有电子同步回旋加速器 (electron synchro-cyclotron), 或者是直线加速度 (linear accelerator) 的存储圈 (storage ring), 不能避免发出很强烈的电子同步加速辐射 (electron synchrotron radiation), 从前一般人认为这是这种加速器不可避免的消耗, 但现在科学界当作它是很珍贵的自由电子激光的来源, 各方面积极用这种激光为科学研究的光源。

再说直线加速器的附带作用, 就是利用其产生出来相对论电子经过透光的物体, 由此收获 Corenkov 辐射, 这也是一种很可贵的自由电子激光。

II. Stanford 自由电子激光器

先说 Stanford 大学首次做出来的自由电子激光器的结构, 如图 2.6 示

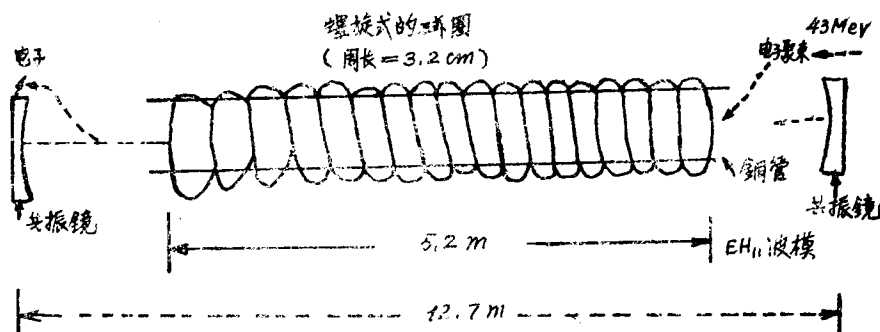


图 2.6 双绕螺旋式 (double helical magnetic coil) 线圈细图

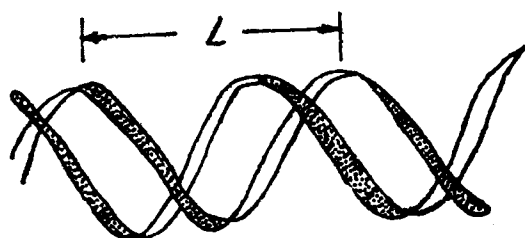


图 2.7 磁场右旋由右边看圈切面

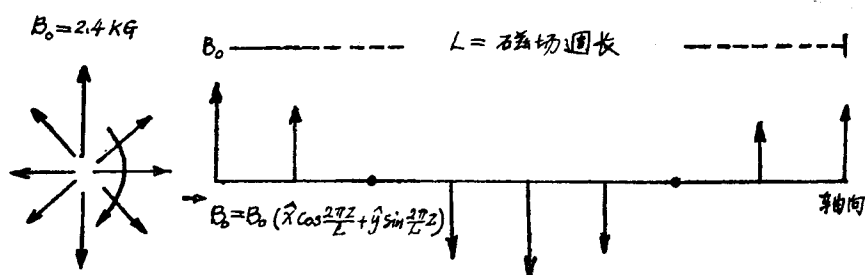


图 2.8

上述螺旋式磁圈所供给的在空间有周期性的横过磁场 (spatially periodic transverse magnetic field)，其布置如图 2.7、2.8 所示。设有一个有 43MeV 高能电子聚束柱 (high energy bunched electron beam) 由图的右边顺着磁圈中心轴穿过，以相对论速度 ($V_e \sim C$)，于穿过线圈后，就在仪器的某处消失殆尽。当电子柱在铜管 (有 EH_{11} 波模) 中速进时，它受到横过螺旋磁场的影响，会有很复杂的螺旋和行进运动 (spirally traveling motion)，其速度可能或增或减。当电子速度遭受减缩时，它的动能就转换成 EH_{11} 式的波能 (energy of electromagnetic wave)。这种现象，就叫做磁场韧致辐射 (magnetic bremsstrahlung)。Stanford 的自由电子器，所以能够振荡以至产生电磁辐射的原故，基本上就是起源于这种磁场韧致辐射。

具体说来，当 Stanford 自由电子激光器还没有振荡时 [因为振荡的条件，需要有适当够高的电子柱能量及横过磁场等。这临界点，叫做振荡阈 (oscillation threshold)]，但它仍然有一种自发发射 (spontaneous emission)。换言之，自发发射出生在振荡阈量以下，这种发射没有同调 (coherence) 性质而又弱小不堪，不能称其为激光。这情形如图 2.9。

但若电子柱能量及横过磁场都适当的够大时，就有超过振荡阈的可能。果如此，就可产生自由电子激光。这种情形如图 2.10。

根据 Madey 等理论，自己电子激光波

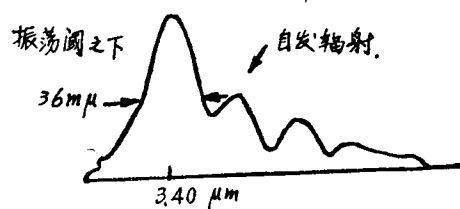


图 2.9

长公式如下:

$$\lambda = \frac{\lambda_q}{2r^2} \left[1 + \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda_q^2 r_0 B^2}{mc^2} \right) \right]$$

此中, λ = 自由电子激光波长

λ_q = 横过磁场周长

rmc^2 = 电子能量,

$$r = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_e}{c} \right)^2}},$$

m = 电子静质量

r_0 = 依经典理论电子半径 (在量子力学中无意义)

B = 横过磁场力 (以 G 为单位)

上式表示自由电子激光波长与电子能量平方成反比例, 同时, 除掉一部分为常数外, 这项波长与横过磁场力 B 平方成正比例。由此可见自由电子激光的波长, 可依横过磁场或电子能量随意调谐, 其可变范围可长至许多 $m\mu$ (红外线领域), 短至 $1200\text{\AA}$ (真空紫外线领域)。

只以 stanford 首次做成的自由电子激光器为例, 其较为重要的特征如下:

平均功率 = $0.36W$

峰 (peak) 功率 = $7000W$ (按所用脉冲方式)

效率 = 0.01% $\left(\frac{\text{按激光输出能量}}{\text{电子柱能量}} \right)$

限于电子单向通过 (one-way pass)

至于自由电子激光器 (Stanford 式) 的理论, 有量子力学与经典物理两种相似而并不完全相同的看法。

(1) 根据量子力学理论——为简单起见, 暂以 Stanford 大学 Madey, Schwettman, Fairbank 为这派人的代表。他们认为自由电子激光的发生是由于受激磁场轫致辐射 (stimulated magnetic bremsstrahlung)。当相对论速度电子与横过磁场及波导管电磁波 (EH_{11}) 相互作用时, 电子一边发射电磁波, 另一边吸收电磁波。发射波的波长比吸收波长较长一些。因为发射功率较大于吸收功率, 所以总结起来, 自由电子变成一个发射激光源。

上述的学者认为他们的立论的物理根据与受激 Compton 散射 (stimulated Compton scattering) 的理论, 非常相似。既然 Compton 散射理论, 经过多年的发展, 他们很倾向借用后者理论根基与技术, 来对付自由电子激光发射问题。

(2) 经典物理用行波放大器的理论——这派人可以 Kroll (Univ. of Calif. at San Diego) 为代表。他认为既然 Stanford 诸人理论中可以在结论中不牵连 Plank 常数 h ,

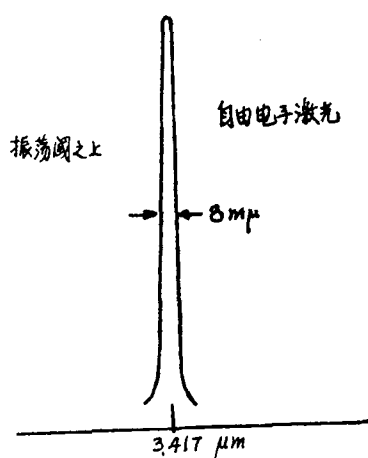


图 2.10

表明经典物理可以解释自由电子的激光, 就如 Lamb 可用经典物理解释许多激光现象。Kroll 认为横过磁场对高速度电子的作用, 等于一个磁性的泵 (magnetic pump), 把电子起初的平移 (translation) 能, 转换成一种回旋的能, 所以可有自发发射 (spontaneous emission), 也可以有受激发射 (stimulated emission) 当电子穿过磁场时, 其经过与普通行波放大器 (travelling wave amplifier) 很有相同之处。

我觉得这两种理论, 可说是大同小异。我们可以采取他们相同的地方, 至于细节不相同的地方, 我们可以临时不特别重视。

(丙) 由毫米波到红外线领域中的应用

在最近时代以前, 这一段电磁波因为种种原因未曾发达。但在近来二、三十年中, 这门学术与技术蓬勃到“热门”的地步。它的应用也是非常广泛的。现在仅仅列出几项比较重要的如下:

(1) 分子波 (光) 谱学——有许许多多分子的振动及转动波 (光) 谱线, 正是落在这一段电磁波范围里。譬如极其普遍的氨 (ammonia) 分子的转动波谱就在毫米与亚毫米波领域中。它的振动光谱就在远红外及红外线当中。除掉正规振动及转动波与光谱外, 还有许多特殊现象如受激喇曼发射 (stimulated Raman emission), 或超荧光 (superfluorescence) 等等新鲜现象, 很值得研究的。

(2) 在许多热核反应 (thermonuclear reaction) 装置如 TOKOMAK 中, 氘与氚氢分子已经达到很高的温度, 但仍然欠缺聚变 (fusion) 所需的条件。现在国际间许多实验室已经采用很强大的毫米波功率注入高温等离子体里面, 让反应温度更能提高。

(3) 在许多等离子体实验中, 工作者常用微、毫、亚毫米波等, 当做它们是诊断装备 (diagnostic instrumentation), 用以测定离子的密度, 迁移率 (mobility), 温度等等。

(4) 地面与海洋上空的遥感工作——这种工作可用人造卫星, 在地面上空为 Landsat, 可探察地面的形状, 地质结构与资源, 大气流动、军事行动等等。在海洋上空可用 Seasat 探察海洋形状、水流情况、海洋资源、航海条件等等。

(丁) 关于毫米及红外波发射器的新近参考资料

[1] Kenneth J. Button, Editor, "Infrared and Millimeter Waves"
Vol. 1: Sources of Radiation
Vol. 2: Instrumentation
Academic Press, 1979

[2] International Journal of "Infrared and Millimeter Waves" published by
Plenum Press
Vol. 1, No. 1, March 1980