

# 回旋加速器之父——劳伦斯\*

张 会

(中国工程物理研究院北京研究生部,北京 100088)

鲍 淑 清

(中国科学院物理研究所,北京 100080)

## 1 生平简介

欧内斯特·劳伦斯(Ernest Orlando Lawrence)于1901年8月3日出生在美国南达科他州的一个书香之家。他早年就学于南达科他州的坎顿和皮尔国立学校,是一位非常聪明的学生。他从小喜读科学书籍,近九岁就对无线电发生兴趣,喜欢制作一些电报、电话装置。由于劳伦斯刻苦学习和雄心勃勃,他年仅16岁就提前一年从中学毕业。1918年秋,他考入诺思菲尔德的圣奥拉伏学院。一年后,转到南达科他大学。他最初报考的专业是医学。由于受一位堂兄过早病逝以及他父母对他人关心的影响,劳伦斯从小就决心当医生。在学校里,他很快得到电气工程学院院长L.阿克利(Akely)教授的赏识。阿克利以劳伦斯对无线电的兴趣为出发点,引导劳伦斯研究物理学。在阿克利的热情鼓励下,劳伦斯认识到物理学的研究可加深他对无线电的理解,因此劳伦斯开始将他的兴趣转向物理学。在大学里,他决不是书呆子,他对所学的感兴趣的课很快就能掌握。1922年,劳伦斯获得学士学位。同年秋季,他到明尼苏达大学做研究生。劳伦斯的指导教师是W.斯万(Swann)教授。在他的影响下,劳伦斯进一步产生了对物理学研究的热情,并很快打好了电动力学和磁学的坚实基础。1923年,他完成了证实在磁场中椭球体旋转感应理论的实验,并以此获得硕士学位。同年秋天,他随同老师斯万一起来到芝加哥大学继续做研究生。在这里,他先后遇见N.玻尔、A.康普顿、A.迈克耳孙等世界著名物理学家。他还目睹了康

普顿的著名实验——康普顿效应,这一切都深深地激励了劳伦斯对物理学研究的兴趣。

同时,他很快认识到,研究生要完全靠自己干。他懂得了做研究生的真正含义,并全身心地投入到研究中去。1924年秋,他随同斯万来到耶鲁大学。正是在耶鲁,他作为实验者的天赋真正显示出来。他很快完成了关于钾蒸气中光电效应方面的博士论文,他的这一工作给在校的许多教授都留下了深刻印象,他被认为是极有前途的高才生。这时还不满24岁的劳伦斯的名字已开始闻名于科学界。获得博士学位后,1925年7月作为国家研究委员会人员留在耶鲁大学工作,并于1927年被聘为助理教授。在耶鲁工作期间,劳伦斯在光电效应等实验方面取得了许多重要成果,这使他稳固地跻身于新一代物理学家的前列,并获得了最出色实验家的赞誉。

由于劳伦斯杰出的实验工作,他受到了好几所大学的热切聘请。1928年秋,他受聘于加利福尼亚大学伯克利分校物理系副教授。接受这一聘请的部分原因是劳伦斯能够在这里讲授高等课程和指导研究生的研究工作。他的这一举动,曾使他的许多同事感到吃惊,他们认为他从一所著名的老牌大学(耶鲁大学)转到偏远的西部一所不知名的州立大学(伯克利)是不值得的。后来的事实表明,劳伦斯的这一决定是非常重大的。正是劳伦斯和一些其他物理学家,如J.奥本海默等人的工作,使加州大学伯克利分校不久便成为世界上著名的核物理研究中心。正是在伯克利,劳伦斯发明了著名的回旋加速器,

\* 1994年10月5日收到初稿,1995年5月2日收到修改稿。

这使年仅 30 岁的他享誉全世界。1930 年, 年仅 29 岁的劳伦斯被升为正教授, 成为伯克利有史以来最年轻的教授。1932 年 5 月劳伦斯同耶鲁医学院退休院长的女儿莫莉·布卢梅尔 (Molly Blumer) 结婚。他们有两个儿子和四个女儿。劳伦斯感到自己的家庭很幸福。1936 年伯克利分校正式建立辐射实验室, 由劳伦斯出任该实验室主任, 这职务一直担任到他去世。由于劳伦斯杰出的领导才能, 他的实验室成为世界核物理学界的一个“圣地”。

由于劳伦斯在物理学、生物医学和国际服务等领域的杰出贡献, 他曾先后获得多种奖励和荣誉。为了纪念劳伦斯, 人们分别将伯克利和利弗莫尔实验室命名为劳伦斯伯克利实验室和劳伦斯利弗莫尔实验室, 并且建立了劳伦斯科学礼堂, 这是为改进科学教育而建立的伯克利展览馆和研究中心。美国原子能委员会还颁发一年一次的劳伦斯奖, 这是为表彰四十五岁以下的青年科学家而设立的。并将伯克利发现的第 103 号元素命名为镭 (Lawrencium), 以纪念劳伦斯。

工作之余, 劳伦斯喜欢划船、滑冰、听音乐, 观看一些体育比赛。特别是, 他将网球作为他的终生爱好。他深信要有机警的头脑, 必须要有健康的身体。

## 2 科学生涯

### 2.1 在耶鲁大学工作时期

劳伦斯的重要科学生涯开始于 1925 年。这一年他出色地完成了博士论文, 他为完成这一工作所做的实验表明他是一个高质量的实验物理学家。在耶鲁大学工作期间 (1925 年 6 月至 1928 年 8 月), 他如饥似渴地对许多问题进行研究和探索。1925 年底, 他研究了法拉第筒对电子吸收的问题。1926 年他在实验中证明了一个电子能够使一个原子电离, 并用电子碰撞法测量了汞原子的电离电位。这是所做过的各种测量方法中最准确的一种。这对普朗克常数  $h$  值的测量是十分重要的。正是这一重要工作, 使

劳伦斯在取得学位还不到一年的时间里, 成为新一代的重要物理学家。劳伦斯在建造仪器的同时, 还继续进行光电方面的研究。在耶鲁, 他还常与在那里做研究员的 J. 比姆斯合作。1926 年, 他们用实验证明了光打到光电池时, 只需大约十亿分之三秒时间就可以从钾金属薄膜上击出电子。这使他们成为获得十亿分之三秒时间方法的发明者。他们的这一工作对观测原子激发态的寿命是很有用的。该工作被许多物理学家认为是该年度最重要的一项研究。劳伦斯在耶鲁的工作, 显示了他对物理学的直觉, 以及他想要取得成就的强烈愿望。他将科学研究视为极大的乐趣, 而不只是工作。

### 2.2 在加州大学伯克利分校工作时期

1928 年, 劳伦斯告别了耶鲁大学, 来到加州大学伯克利分校。刚到伯克利时, 他继续研究光电效应等问题。与此同时, 他开始注意迅速发展的原子核物理。1919 年, 卢瑟福用天然  $\alpha$  粒子从氮原子核中打出质子, 这标志着人类第一次实现了改变化学元素的人工核反应。卢瑟福的发现, 使人们认识到要成功地完成打碎原子核的实验的先决条件是把粒子加速到很高能量。1927 年, 卢瑟福曾提出用加速器提供足够的能量以实现原子核嬗变是可能的。在 1929 年前后, 人们纷纷开始发展各种加速设备。为了获得高速粒子, 当时人们主要是研究如何产生高压以及研制能够经受这样高压的加速管。英国剑桥大学卡文迪什实验室的 J. 考克饶夫和 E. 瓦耳顿在卢瑟福的建议下, 利用高压倍加器发展了线性粒子加速器, 并于 1932 年, 用 770 kV 的高压倍加器加速质子, 实现了一个由人工加速的粒子束引起的核反应。然而这些研究工作都是把从各种装备上获得的高压加到一个放电管上, 为了得到很高能量的粒子, 将需要极高的电压, 这在技术上存在一定的局限; 绝缘介质在高压下可被击穿, 高压通过周围空气要放电等。正是在这种背景下, 劳伦斯开始思考用其他方法来实现粒子的加速。

1929 年春的一天晚上, 劳伦斯在大学图书馆翻阅期刊时, 在一本德国电工杂志上, 看到挪

威工程师 R. 维德罗的论文“关于产生高压的新原理”(1928)。该文作者利用瑞典物理学家 G. 艾星在 1924 年提出的一种加速粒子的方案,讨论了钠和钾离子当通过两个排列在一条直线的加速管后,可加速到两倍于所施加电压的速度。劳伦斯虽然阅读德文很吃力,但他通过看示意图,立刻注意到,维德罗解决问题总的方法是把高频振荡电压适当加到一连串的圆筒形电极上来加速正离子。这个离子多次加速的新思想使劳伦斯意识到,这正是他长期寻找的加速正离子技术问题的真正答案。他没有进一步看这篇文章,当时就在那里估计了一下能量超过 1 MeV 的这种直线质子加速器的一般特征。简单的计算表明,加速管的长度可能达数米。他认为,这样的长度在当时似乎很不适合于实验室使用。因此,他开始思考,能否不用在一条直线上的许多圆筒形电极,而使用两个电极,通过某种适当的磁场装置使正离子反复通过这两个电极。以达到多次加速的目的。经过分析,他发现,均匀磁场正好有这些性能。就是说,如果把两个半圆形的空盒(由于类似于字母 D 型,所以常称 D 型盒)相对拉开一定距离,放在垂直的均匀磁场中,并在两 D 型盒(作为两个电极)上加上高频振荡的电压,由此在两盒间隙之间产生垂直于磁场的变化电场。在电场变化的半周期内,离子获得加速并进入一 D 型盒内,盒内的运动离子在均匀磁场中将作圆周运动。离子在该盒内经过半圆周运动后重新进入两盒间隙,如果此时电场正好改变方向,使离子再次得到加速并进入另一盒内,同样离子在该盒内经过半圆周(半径增大)运动后再次进入两盒间隙,此时电场再次反向,使离子继续加速并进入另一盒内,如此反复。由于离子运动的轨道周期与半径和速度无关,所以可选择离子运动周期与振荡的电场周期相同,以使离子多次和连续地通过两盒间隙不断得到加速,从变化的电场获得越来越多的能量,即可实现粒子不断加速的目的。这便是劳伦斯回旋加速器的思想(见图 1)。这种加速器最初称为磁的谐振加速器,直到 1935 年劳伦斯及其合作者在—篇论文

中正式采用了“回旋加速器”(cyclotron)的名称。这样劳伦斯回旋加速器提供了一种方法:不用高压,而通过多次加速使粒子获得高能,并且只需要相对小的空间即可加速高能粒子。其他物理学家之所以没有想到这个原理,是因为他们仅局限于考虑直线的加速方法。

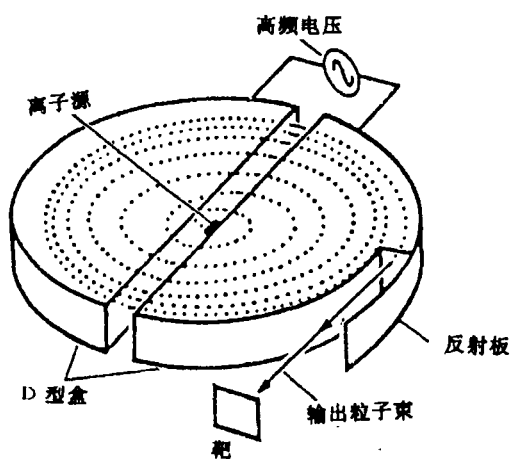


图 1 劳伦斯回旋加速器原理示意图

回旋加速器的想法在 1929 年产生后,劳伦斯积极着手把这种想法付之实施,并表现了极大的热情和坚定性。建造回旋加速器的实验工作是在 1930 年春开始的。在劳伦斯的建议和指导下,作为他的研究生 N. 埃利森 (Edlefsen) 首次制造了一个较为粗糙的回旋加速器原理的模型,其直径只有 4 in。他们将这一重要工作写成论文“关于高速质子的产生”并发表在《科学》杂志上,这成为后来回旋加速器发展的基础。1930 年夏,劳伦斯建议另一位研究生 M. 利文斯顿进一步改进回旋加速器。1932 年春,他们已成功地建造了直径为 11 in 的回旋加速器,并能够将质子加速到能量为 1 MeV 以上。同年 10 月,他们还在回旋加速器上成功地用高能质子轰击锂,从而证实了考克饶夫和瓦耳顿所做的这一工作。劳伦斯并不满足已有的成果,早在设计和指导建造 11 in 加速器时,他已在开始考虑如何向更高能量进军。为了实现他的目标,他成功地说服了美国联邦电报局把他们原来想制造无线电弧光发电机而没有用上的 80 t 重的大物理

磁铁捐献出来. 利用这块大磁铁, 他们成功地建成了直径为 27 in、能量更高的回旋加速器. 劳伦斯和他的合作者利用回旋加速器, 使许多原子核发生嬗变, 他不仅用高能质子轰击各种原子核, 而且在 1933 年最早用加速的氘粒子来轰击锂, 使他们观察到了射程和能量比以往任何时候在天然放射性物质中发现的都要大的  $\alpha$  粒子. 1936 年, 在劳伦斯的主持下, 伯克利的 27 cm 回旋加速器进一步改装成 37 cm, 使粒子能量达到 6 MeV, 用它产生了第一个人造元素钷. 1939 年又建造了 62 in 的回旋加速器, 并由此发现了许多超铀元素. 劳伦斯在构想和建造一个又一个加速器的同时, 还不断地到处忙于筹备所需的资金. 由于他的科学能力, 真诚和热情, 他的个性, 乐观精神以及对实现他的主张所采取的极其负责的态度, 使资助者们提供了一笔又一笔的资助金. 这也显示了劳伦斯有着很强的社会活动能力.

劳伦斯所发明的回旋加速器带来的重要成果之一是产生人工放射性物质. 虽然放射性同位素是约里奥-居里夫妇于 1934 年用天然放射性物质放出  $\alpha$  粒子而发现的, 但是, 直到有了回旋加速器才可能大量地生产放射性同位素. 这是放射性同位素能够应用于生物学和医学的一个重要条件. 劳伦斯在发展加速器的同时, 还利用他的加速器来研究和生产放射性同位素. 他们还发现了已知元素的几百种放射性同位素, 为科学研究和实际应用放射性同位素开辟了一个崭新的领域. 此外, 劳伦斯还致力于加速器的生物和医学的应用. 他曾同弟弟约翰密切合作研究用中子治疗癌症, 包括对他们自己母亲的治疗, 这使他们的母亲又存活了 20 年. 为了奖励他在医学物理方面的重要工作, 1954 年劳伦斯被授予美国癌症学会奖章.

自 30 年代开始以来, 劳伦斯所领导的实验室已成为核物理研究领域的一个主要中心. 在这里产生了一大批重要的实验结果, 越来越多的科学家和各界名流纷纷到实验室参观和访问. 回旋加速器的发明使年仅 32 岁的劳伦斯当选为美国科学院院士, 并且在 1933 年作为美国

唯一的代表被邀参加了第 7 届索尔维国际会议. 1939 年, 劳伦斯“因发明和制造回旋加速器以及由它所获得的成果, 特别是在人工放射性元素方面的工作”而获诺贝尔物理学奖. 瑞典皇家科学院的 M. 西格巴恩 (Siegbahn) 教授在介绍劳伦斯的工作时指出, “回旋加速器在实验物理发展史上有着特殊的地位. 回旋加速器的结构之庞大和复杂是目前任何仪器不可相比的, 用它取得的实验成果也是其他物理实验仪器无法比拟的”.

回旋加速器的发明对原子核结构的认识有着重要作用. 在此之前, 人们对于原子核的研究, 最初主要靠天然放射性得到的有限的几种粒子 (电子,  $\gamma$  射线和  $\alpha$  粒子), 其能量极其有限, 且强度很小, 由此限制了原子核物理的发展. 此外, 当时建立的各种粒子加速设备均依靠高压使粒子一次性获得能量, 由于高压存在严重的困难, 使粒子获得的能量受到限制. 劳伦斯回旋加速器则另辟途径, 不用高压, 而是通过 D 型电极对粒子多次加速, 可在相对小的空间产生很高能量的粒子. 由于加速器产生的粒子源强度大, 品种多, 能量高以及速度方向可选择, 使人们能够有目的地进行各种核反应, 导致了原子核物理的许多重大发现, 促使原子核物理迅速地发展和成熟起来. 值得指出, 劳伦斯回旋加速器的最高能量是有限制的, 这主要是根据狭义相对论的质能关系, 高速运动的粒子的质量随能量增加而增加, 导致粒子运动周期相应增大, 由此与振荡电场的周期不能同步. 尽管如此, 劳伦斯回旋加速器为后来加速器的发展奠定了基础, 而且更重要的是, 它为人们认识物质微观结构提供了一个基本实验物理方法; 发展和建立各种高能加速器以揭示更深层次物质的运动规律. 自 40 年代以来, 人们利用高能加速器发现了上百种“基本粒子”, 为粒子物理学的形成和发展打下了坚实的实验基础.

### 2.3 在第二次世界大战期间

随着第二次世界大战的爆发, 劳伦斯又积极投入到战时的科学研究工作, 并对原子武器的发展作出了重要贡献.

自 1940 年以来,他经常参加国防研究委员会的工作.在他的大力支持下,在麻省理工学院正式建成了雷达实验室.1941 年,他还积极帮助推进在圣迭戈的反潜战计划.这两项工作在第二次世界大战中都发挥了重要作用.1941 年 9 月,他开始认识到美国研制原子弹的必要性.他最早相信,铀的裂变可制造原子弹,并积极向官方建议研究这项计划的重要性.1942 年正式成立了包括劳伦斯等少数人组成的铀研究执行委员会,并将研制原子弹的计划称为“曼哈顿计划”,劳伦斯在这个计划中承担并负责铀燃料的分离工作.他将 37 in 的回旋加速器改建成质谱仪,以使用电磁分离法来获得裂变材料铀-235,他成功地实现了同位素的分离.劳伦斯在用质谱仪分离铀燃料的同时,还强调进行离心法和气体扩散法的试验工作.由于劳伦斯的工作,结果在田纳西州的橡树岭建造了数百台质谱仪,由此生产了当时所需要的几乎所有的铀燃料.

1945 年,随着第二次世界大战的结束,伯克利辐射实验室又转到科学研究之中.1946 年辐射实验室成功地运行了 184 in 的同步回旋加速器.1948 年辐射实验室用这台加速器第一次实现了人工制造介子,这开始了用加速器研究基本粒子的新时期.50 年代初,他又积极倡导美国发展和研制氢弹.正是在劳伦斯和 E.特勒的支持下,在加州又建成了研制核武器的第二个实验室——利弗莫尔实验室(现称劳伦斯利弗莫尔实验室).该实验室于 1952 年开始工作.它起初是作为伯克利辐射实验室的一个分支,后来成为氢弹研制的研究中心.劳伦斯在奔忙于利弗莫尔实验室和辐射实验室的同时,还忙于研制和生产电视显像管的工作.他曾发明了一种新型的彩色电视显像管,并在 1954 年被授予基本显像管的专利.同时,他还忙于建造更大加速器的工作.早在 40 年代末,他就宣传建造数亿电子伏能量加速器的重要性.该加速器于 1954 年在伯克利建成,命名为 Bevatron,能量为 6.4 GeV,成为当时世界上最高能量的加速器.

### 3 劳伦斯的精神及其他

第二次世界大战后,劳伦斯还积极倡导原子能的和平利用.他认为原子能在战后将成为一种新的力量,应着重强调其和平利用.自 1955 年,他越来越多地卷入原子能的非军事使用和国际裁军问题中去.他曾担任裁军委员会中一个专题组的主席,其任务是研究武器核查方面的各种问题,以便达成裁军协议.1958 年 7 月,劳伦斯随同美国代表团参加了在日内瓦同苏联关于禁止核试验问题的会议.正是在此会议期间,过度的劳累,使他的结肠炎发作.他不得不中途回到美国,从此他再也没有从疾病中恢复过来,于 1958 年 8 月 27 日晚在保罗阿尔托医院病逝,终年 57 岁.8 月 30 日在伯利最大的公理教堂为劳伦斯举行了追悼会.在追悼会仪式上,加州大学校长克拉克·克尔指出:“…世界所能给予科学的最高尚荣誉,欧内斯特·劳伦斯都得到了,这些只不过是他在生前所得到的荣誉,…但是,只要科学的历史继续写下去,他就会永远得到荣誉”.

劳伦斯有着非凡的科学领导能力.由于他的个人能力和品格,他的实验室对许多年轻有为的物理学家具有很强的吸引力,并将一大批杰出人才聚集在他的周围.他们对他忠心耿耿,十分尊敬.劳伦斯善于对他们进行细心观察,并冷静地作出判断.让他们为了实验室的利益而充分发挥各自的独特才能.他让他们在工作中有相当的自由,但却要求他们对工作应具有无限的献身精神.在劳伦斯的鼓舞和启发下,他们都做出了巨大的贡献.在他的领导下,辐射实验室成为一个团结共进的集体,并成为物理学界的一个重要研究中心.劳伦斯在伯克利创立的“大科学”和大规模物理学风格后来推广到世界各地所设立的机构中.1968 年诺贝尔奖获得者 L.阿耳瓦雷茨曾这样评价劳伦斯对他们的影响:“欧内斯特的影响标志之一就是这样一个事实:我是他实验室工作人员中(下转第 249 页)