



魏宝文 赵红卫 著

离子的喷泉

—— 电子回旋共振离子源



清华大学出版社



暨南大学出版社

(京)新登字 158 号

图书在版编目(CIP)数据

离子的喷泉——电子回旋共振离子源/魏宝文,赵红卫著. —北京:
清华大学出版社;广州:暨南大学出版社,2001.12

(院士科普书系/路甬祥主编)

ISBN 7-302-04961-0

Ⅰ. 离… Ⅱ. ①魏… ②赵… Ⅲ. 电子回旋共振—离子源—普及读物 Ⅳ. TL503.3-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 079817 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

暨南大学出版社(广州天河,邮编 510630)

<http://www.jnu.edu.cn>

责任编辑: 宋成斌

印 刷 者: 北京市清华园胶印厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 **印张:** 5 **字数:** 95 千字

版 次: 2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04961-0/G·231

印 数: 0001~5000

定 价: 12.00 元

《院士科普书系》编委会(第二届)

编委会名誉主任 周光召 宋 健 朱光亚

编委会主任 路甬祥

编委会委员 (两院各学部主任、副主任)

陈佳洱	杨 乐	闵乃本	陈建生	周 恒
王佛松	白春礼	刘元方	朱道本	何鸣元
梁栋材	卢永根	陈可冀	匡廷云	朱作言
孙 枢	安芷生	李廷栋	汪品先	陈 颢
王大中	戴汝为	周炳琨	刘广均	杨叔子
钟万勰	关 桥	吴有生	刘大响	顾国彪
陆建勋	龚惠兴	吴 澄	李大东	汪旭光
陆钟武	王思敬	朱建士	郑健超	胡见义
陈厚群	陈肇元	崔俊芝	张锦秋	刘鸿亮
方智远	旭日干	周国泰	王正国	赵 铠
钟南山	桑国卫			

编委会执行委员 郭传杰 常 平 钱文藻 罗荣兴

编委会办公室主任 罗荣兴(科学时报社)

副主任 周先路(中国科学院学部联合办公室)

白玉良(中国工程院学部工作部)

蔡鸿程(清华大学出版社)

周继武(暨南大学出版社)

总 策 划 罗荣兴 周继武 蔡鸿程

总 责 任 编 辑 周继武 蔡鸿程 宋成斌

提高全民族的科学素质

——序《院士科普书系》

人类走到了又一个千年之交。

人类的文明进程至少已有 6000 余年。地球上各个民族共同创造了人类文明的灿烂之花。中华文明同古埃及文明、古巴比伦文明、古印度文明、古希腊文明等一起,是人类文明的发源地。

15 世纪之前,以中华文明为代表的东方文明曾遥遥领先于当时的西方文明。从汉代到明代初期,中国的科学技术在世界上一直领先长达 14 个世纪以上。在那个时期,影响世界文明进程的重要发明中,相当部分是中华民族的贡献。

后来,中国逐渐落后了。中国为什么落后?近代从林则徐以来许多志士仁人就不断提出和思索这个历史课题。但都没有找到正确的答案。以毛泽东同志、邓小平同志为代表的中国共产党人作出了唯一正确的回答:中国落后,是由于生产力的落后和社会政治的腐朽。西方列强对中国的欺凌,更加剧了中国经济的落后和国家的衰败。而落后就要挨打。所以要进行革命,通过革命从根本上改变旧的生产关系和政

治上层建筑,为解放和发展生产力开辟道路。于是,就有了 80 多年前孙中山先生领导的辛亥革命,就有了 50 年前我们党领导的新民主主义革命的胜利,以及随后进行的社会主义革命的成功。无论是革命还是我们正在进行的社会主义改革,都是为了解放和发展生产力。

邓小平同志提出的“科学技术是第一生产力”的著名论断,使我们对科学技术在经济和社会发展中的地位与作用的认识,有了新的飞跃。我们应该运用这一真理性的认识,深刻总结以往科学技术发展的历史经验,把我国科技事业更好地推向前进。中国古代科技有过辉煌的成果,但也有不足,主要是没有形成实验科学传统和完整的学科体系,科学技术没有取得应有的社会地位,更缺乏通过科技促进社会生产力发展的动力和机制。为什么近代科学技术首先在文艺复兴后的欧洲出现,而未能在我国出现,这可能是原因之一吧。而且,我国历史上虽然有着伟大而丰富的文明成果和优良的文化传统,但相对说来,全社会的科学精神不足也是一个缺陷。鉴往开来,继承以往的优秀文化,弥补历史的不足,是当代中国人的社会责任。

在新的世纪中,中华民族将实现伟大的复兴。在一个占世界人口五分之一的发展中大国里,再用 50 年的时间基本实现现代化,这又是一项惊天动地的伟业。为实现这个光辉

的目标,我们应该充分发挥社会主义制度的优越性,坚持不懈地实施科教兴国战略。

科教兴国,全社会都要参与,科学家和教育家更应奋勇当先,在全社会带头弘扬科学精神,传播科学思想,倡导科学方法,普及科学知识。科教兴国也要抓好基本建设。编辑出版高质量的科普图书,就是一项基本建设,对于提高全民族的科学素质,是很有意义的。在《院士科普书系》出版之际,写了上面这些话,是为序。



1999年12月23日

人民交给的课题

——写在《院士科普书系》出版之际

世界正在发生深刻的变化。这一变化是 20 世纪以来科学技术革命不断深入的必然结果。从马克思主义的观点看来,生产力的发展是人类社会发展与文明进步的根本动力;而“科学技术是第一生产力”,因此,科学技术是推动社会发展与文明进步的革命性力量。从生产力发展的阶段看,人类走过了农业经济时代、工业经济时代,正在进入知识经济时代。

知识经济时代,知识取代土地或资本成为生产力构成的第一要素。知识不同于土地或资本,不仅仅是一种物质的形态,知识同时还是一种精神的形态。知识,首先是科学技术知识,将不仅渗透到生产过程、流通过程等经济领域,同时还渗透到政治、法律、外交、军事、教育、文化和社会生活等一切领域。可以说,在新的历史时期,一个国家、一个民族能否掌握当代最先进的科技知识以及这些科技知识在国民中普及的程度将决定其国力的强弱与社会文明程度的高低。科技创新与科普工作是关系到一个国家、一个民族兴衰的

大事。

对于我们科技工作者来说,我们的工作应当包含两个方面:发展科技与普及科技;或者说应当贯穿于知识的生产、传播及应用的全过程。我们所说的科普工作,不仅是普及科学知识,更应包括普及科学精神和科学方法。

我们的党和政府历来都十分重视科普工作。党的十五大更是把树立科学精神、掌握科学方法、普及科技知识作为实施科教兴国战略和社会主义文化建设的一项重要任务提到了全党、全国人民和全体科学工作者的面前。

正是在这样的背景下,1998年春由科学时报社(当时叫“中国科学报社”)提出创意,暨南大学出版社和清华大学出版社积极筹划,会同中国科学院学部联合办公室和中国工程院学部工作部,共同发起《院士科普书系》这一重大科普工程。

1998年6月,中国科学院与中国工程院“两院”院士大会改选各学部领导班子,《院士科普书系》编委会正式成立,各学部主任均为编委会委员。编委会办公室在广泛征求意见的基础上拟出150个“提议书目”,在“两院”院士大会上向1000多名院士发出题为《请科学家为21世纪写科普书》的“约稿信”,得到了院士们的热烈响应。在此后的半年多时间里,有176名院士同编委会办公室和出版社签订了175本书的写作出版协议,开始了《院士科普书系》艰辛的创作过程。

《院士科普书系》的定位是结合当代学科前沿和我国经济建设与社会发展的热点问题,普及科技知识、科学方法。科学性、知识性、实用性和趣味性是编写的总要求。

编写科普书对我国大多数院士来说是一个新课题。他们惯于撰写学术论文。如何把专业的知识和方法写成生动、有趣、有文采的科普读物,于科技知识中融入人文教育,不是一件容易的事。不少院士反映:写科普书比写学术专著还难。但院士们还是以感人的精神完成自己的书稿。在此过程中,科学时报社和中国科学院学部联合办公室、中国工程院学部工作部以及清华大学出版社、暨南大学出版社也付出了辛勤的劳动。

《院士科普书系》首辑终于出版了。这是人民交给科学家课题,科学家向人民交出答卷。江泽民总书记专门为《院士科普书系》撰写了序言,指出科普是科教兴国的基础工程,勉励科学家、教育家“在全社会带头弘扬科学精神,传播科学思想,倡导科学方法,普及科学知识”,充分表达了党的第三代领导集体对科普的重视,对提高全民族科技素质的殷殷期望。

《院士科普书系》将采取滚动出版的模式。一方面随着院士们的创作进程,成熟一批出版一批;另一方面随着科学技术的进步和创新,不断有新的题材由新的院士作者撰写。因此,《院士科普书系》将是一个长期的、系统的科普工程。

这一庞大的工程,不但需要院士们积极投入,还需要各界人士和广大读者的支持——对我们的选题和内容提出修订、完善的建议,帮助我们不断提高《院士科普书系》的水平与质量,使之成为国民科技素质教育的系统而经典的读本。在科学家群体撰写科普书方面,我们也要以此为起点为开端,参与国际竞争与合作,勇攀世界科普创作的高峰。

中国科学院院长
《院士科普书系》编委会主任

路甬祥

2000年1月8日

本书前言

现今我们已经明白，人类及其周围的每一样东西都是由分子构成，分子是由原子组成，而原子是由原子核与电子构成。每一个原子都像一个小小的太阳系，电子围绕原子核在一定的轨道上运动。原子核包含了原子的绝大部分质量，原子核携带正电荷，而围绕的电子云带负电荷。一切原子是呈电中性的，也就是说，原子核内的正电荷完全被包围它的电子云的负电荷所抵消。当原子核外层电子被剥掉一个或几个后，原子即变成带有一个或几个正电荷的离子。当代物理学家或工业应用领域兴趣之所在，并不是单个的离子，而是由很多离子形成的离子束。自从人们认识清楚原子核结构后，就有了“人工制造”离子束（有时称离子束为束流）的想法，这种产生离子束的装置叫离子源。离子源就像一个喷泉，通过某种机制，源源不断地喷射出具有一定能量和品质的带电粒子束。

早在 19 世纪末，就出现了利用气体放电的原理产生离子的离子源，然而，直到 20 世纪 30 年代，才开始发展真正高性能的离子源，这主要归功于质谱仪、回旋加速器和高效率电磁同位素分离器的研制成功。到了 50 年代，在核物理研究和加速器发展的推动下，离子源发展极为迅速，这期间发明了许多不同种类的离子源，但主要是以产生单电荷态

离子为主,即只能剥掉原子核外层一个电子。60年代后,多电荷态(原子核外层多个电子被剥掉)离子源成为离子源发展的新宠,开始主要是为满足重离子物理研究的需要,但对多电荷态离子源发展起革命性影响的是70年代诞生的电子回旋共振(electron cyclotron resonance)离子源,简称 ECR 源。这种离子源在其最初的发展阶段,并没有引起人们足够的重视,甚至到了80年代初,国际上还有不少人对它持有怀疑,甚至不屑一顾的态度。在近一二十年内,电子回旋共振离子源突飞猛进的发展,使人们刮目相看。可以说,电子回旋共振离子源赋予各种重离子加速器和重离子物理研究新的生命活力。

电子回旋共振离子源是利用一种高频电磁波(微波)中的电场加热电子,使电子具有足够高的能量,这些电子与气体中的原子碰撞,“打掉”气体原子的外层电子而产生多电荷态离子,并利用磁场来约束电子,使电子不能逃逸,有机会获得更高的能量,与更多的原子或离子碰撞,打掉更多的电子,也就是说,产生更高电荷态的离子。电子回旋共振离子源最大的优点是高电荷态离子束流强(离子束流强度可近似理解为离子数目的多少),电荷态高,有许多原子的外层电子几乎可全部被剥离掉。离子源本身可长期、稳定可靠地工作,没有寿命问题。正因为如此,这种离子源才会如此备受青睐,在各种重离子加速器、原子物理研究、同位素分离、表面物理以及许多工业应用领域有着广泛的应用前景。

更重要的是,电子回旋共振离子源本身具有无穷的魅力,在近20多年的发展过程中,充满着许多戏剧性的传奇

色彩，极具“魔力”和挑战性，就像许多国外同行常说的那样，电子回旋共振离子源本身就像魔术一样，有时神秘莫测，变化无常，但在某些方面又显得相当简洁，富有规则而较易理解。虽然电子回旋共振离子源的发展已近 30 年，目前在国际上各领域有近二三百台这种离子源在运行，还有更多的正在建造之中，但它的许多基本原理和工作机制至今还不甚清楚。一台高电荷态电子回旋共振离子源的设计、建造，特别是调试，还处于半理论和半经验状态，没有完整的理论可遵循，常常是一系列新的实验现象和实验结果使理论研究者大出所料，目瞪口呆，难于置信，在这方面理论研究远远地落后于实验进展。在电子回旋共振离子源的研制中，无权威可言，只要你不断努力、尝试，总会有新的发现。新的进展使你惊喜万分，但又常常迷惑不解。在国际电子回旋共振离子源领域，没有人敢夸口他的离子源所创束流纪录可保持半年。新的思想、新的结果、新的技术，乃至许许多多的小窍门总是层出不穷；相互竞争激烈，而相互交流勾通又是那么广泛，在不到 20 年内，国际电子回旋共振离子源的学术讨论会就已召开了 14 届。至今，几乎每一台电子回旋共振离子源都能一直正常工作，但是，一台好的离子源和另一台差的离子源相比，其性能和束流指标千差万别。

这里试举一两个例子。在电子回旋共振离子源中，当你向离子源中掺入一种比工作气体较轻的气体时（这种气体一般叫支撑气体，通常的支撑气体是氧气或氦气），你会发现工作物质的高电荷态离子产额可大幅度提高。这种现象叫掺气效应，这种效应是在一次偶然的试验中发现的。现在儿

乎所有的电子回旋共振离子源都在使用这种效应以提高高电荷态离子束流强，这种方法看起来是如此之简单，可效果非常明显。但在过去的 15 年里，有许多实验小组都试图从理论和实验上给予解释，然而到目前为止，还没有一种完善的解释能自圆其说，令人信服。又如，在 1995 年之前，几乎所有的电子回旋共振离子源都只用一种频率的微波加热电子，有人曾提出试图把两种不同频率的微波同时馈入到离子源中，用以提高加热电子的效率，这种想法几乎遭到所有“权威”的否定，他们认为不可能。美国贝克利国家实验室的谢祖棋博士，大胆地从实验上做了尝试，出人意料地发现高电荷态离子产额大幅度提高了，但其详尽的物理解释还不甚明确，以至于两年后，有同行用实验重复证实了这个结果以后，国际电子回旋共振离子源先驱者之一的梯姆·昂塔亚(T. Antaya)博士等人在国际会议上感叹：“我真为双频加热担心，物理机制何在？但它又是确定无误的实验事实！”这便是电子回旋共振离子源魔力之所在。这种魔力驱使人们不断地去探索、思考，不断地提出新的思想、新的概念，去揭示其中的奥妙。这也是本书的宗旨之一。电子回旋共振离子源的创始人、法国著名教授理查德·杰勒(R. Geller)曾说过，在 80 年代人们曾流传着这样的一句玩笑：电子束离子源(另外一种多电荷态离子源)的科学家们至少可以理解他们的电子束离子源为什么工作运行得如此糟糕，而可怜的电子回旋共振离子源的科学家总是不明白他们的电子回旋共振离子源为什么工作运行得如此之好！

本书的目的之一是为了表明：凡具备物理学基本知识的

人,都能理解电子回旋共振离子源的基本原理和机制,以及过去 20 年来,科学家们在这一领域内所取得的研究成果和新的发现;都能按照科学家的推理思路、实验手段,以及有时采取的小窍门,去揭示电子回旋共振离子源的奥秘,去领略科学家在实验过程中的创新思维和智慧的火花,去分享科学家在取得这些成果所感受到的那种喜悦和惊讶之情,去了解电子回旋共振离子源在不同领域内的应用前景。尽管电子回旋共振离子源内容丰富又复杂,而且涉及面极广,它涉及到电磁学、等离子体物理、原子物理、表面物理、材料化学、微波技术及束流光学等诸多学科,然而读者一旦对那些十分新奇,或很不熟悉的概念和研究方法逐渐理解以后,就会意识到它并不令人望而生畏;相反,会对那些既可爱又可恨且反复无常的电子和高电荷态离子着迷。

本书另一宗旨是想向读者表明:电子回旋共振离子源是以实验为主,以基本的物理学原理及概念为根据,依靠创新的物理思想,精巧的实验安排,融合现代高科技,以及构思新颖、巧妙机械设计的实用技术。它不是依赖于优美的数学公式和物理方程。相反,简洁、清晰的物理图像和概念,以及对实验现象不断地分析、思考显得更为重要。因此,本书会引导读者沿着最简洁的物理图像和概念而展开其议题,省去了所有复杂的数学方程。另外,本书中所说的离子源主要是指等离子体正离子源和负离子源,本书不作介绍。

书中开头首先简略地勾画出了离子源的概貌,说明离子是怎样在离子源中产生、消失,最后被引出的。然后,再引导读者循序渐进地了解电子回旋共振离子源的基本物理

过程,以及其中所应用的关键技术和方法,并力图说明一些突破性进展的创新思路和过程。紧接着把读者引入电子回旋共振离子源的广泛应用领域和目前的发展状况,最后展望将来的发展前景。

在编写本书的过程中,得到了刘占稳研究员的大力协助,在此谨致衷心的感谢。

魏宝文

2000年10月

目 录

1 离子源——带电粒子的“喷泉”	1
1.1 离子源一瞥	1
1.2 离子的产生	6
1.3 离子的消亡	11
1.4 离子的引出	19
2 电子回旋共振离子源	27
2.1 等离子体	27
2.2 磁约束	33
2.3 微波	40
2.4 电子回旋共振加热	49
2.5 ECR 源	57
2.6 ECR 源的实验与发展	81
3 ECR 源的“用武之地”	97
3.1 ECR 源与重离子加速器	100
3.2 ECR 源与治癌	109
3.3 ECR 源与洁净核能源	111
3.4 ECR 源与原子物理研究	113
3.5 ECR 源与高科技工业	114