



走近诺贝尔奖丛书



走近
183
位诺贝尔物理学奖精英

时空的向度

Nobelprize

●
主编／王子安

天津科学技术出版社

时空的向度

——走近200位诺贝尔物理学奖精英

主 编/王子安

Nobel

天津科学出版社

图书在版编目(CIP)数据

时空的向度/王子安主编. —天津:天津科学技术出版社,2010.10

(走近诺贝尔奖. 走近183位诺贝尔物理学奖精英)

ISBN 978-7-5308-6087-8

I. ①时… II. ①王… III. ①诺贝尔奖金—物理学家—生平事迹—世界
IV. ①K816.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第201139号

时空的向度

责任编辑:布亚楠

编辑助理:蔡小红

责任印制:王 莹

天津科学技术出版社出版

出版人:蔡 颢

天津市西康路35号 邮编300051

电话(022)23332401(编辑部) 23332393(发行部)

网址:www.tjkjcs.com.cn

新华书店经销

北京密云铁建印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 150千字

2010年10月第1版第1次印刷

定价:29.80元

前言

哲人云“知识就是力量”，更有人说，知识就是高度。在知识的内涵、外延里，科学技术无疑是最重要的一环。从某种程度上来说，人类文明的动力来源于科学技术的发展，正是由于科技的历史性进步，由此而推动着人类历史由蒙昧走向文明、由刀耕火种走向科学现代。可以说，人类的历史在一定意义上来说，即是人类的科学技术与人类的思想文明的结合。历史因科技的融入而变得可感，社会因科技的融入而变得丰富、多彩。

在人类科学历史的宏观体系中，依据文明的东西方形态也可以划分为东方科学技术体系、西方科学技术体系，其中东方科学技术体系从历史的角度来说，应以中国为代表。比较而言，东方科学技术体系富有深厚的人文科学、社会科学传统，在诸如文学、史学、哲学、宗教、艺术、政治、经济、法律等领域，古籍留存众多，内容博大精深。而西方科学技术体系则深富自然科学、实验科学的传统，因而造就出其最早的工业革命运动，形成实验手段与理论体系丰富的诸如物理学、化学、工程机械等成果。总之，东西方的科学技术传统各有所长。东方的人文与西方的自然，如能够完美结合，则是人类科学技术发展的最好模式。

在西方科学技术体系中，既有宏观的科学门类也有微观的分支科学。从自然科学的科学分类学角度而言，可以细分为物理、数学、化学、生物、地学等属种。在复杂庞大的科学技术体系外，西方还建立起了比较完善的学科标准体系与科技奖惩制度、科技创新制度，由此而推动着西方科学技术的不断更新、发展。诸如西方历史上的第一次工业革命、二次工业革命、信息化社会、知识化社会等，皆是这种科学技术完美发展的结果。在丰富多彩的西方科学技术创新与奖惩制度体系中，诺贝尔科学奖金的设立即是推动西方百年来科学文明发展的重要一点。诺贝尔奖金由瑞典化学家、自然科学家诺贝尔通过捐献毕生的私人财产设立，这种崇尚科学、崇尚知识的精神，值得东方社会认真思索、务实学习。整个诺贝尔奖初期划分为物理、化学、生理医学、文学与和平五个奖项，这充分反映了诺贝尔本人不仅关注自然科学的发展，也关注人类精神世界、人类人文素养的发展。后来随着社会的不断发展，诺贝尔奖项又多出经济学奖、环境奖两种，每

一个奖金项目都紧密结合着人类社会的现实需要。

时至今日，诺贝尔奖已经走过了100多个春秋，即使是迟到的经济学奖也已经走过40年的岁月。作为人类科学技术领域的一种百年知识品牌，其中不仅有许多的科学成就值得我们学习，而且其中的每一个获奖者也值得我们研究。科学家的成果与科学家的精神及方法，相比较而言，最重要的是科学方法，而最核心的则是科学家的精神。所以为了便于中国读者，尤其是今日的中国青少年了解、掌握近现代西方物理科学、化学科学、生理医学、文学艺术、经济理论的过程、成果，我们编辑委员会经过半年多的艰辛策划、编写，终于完成这部多达25册的《走近诺贝尔奖》大型丛书。

从本套《走近诺贝尔奖》丛书的编写体例上来说，我们以人物为单元，以时间为线索，以有关每个人物的“生平事迹”“科学成果”等为板块，而对于每个入选诺贝尔奖的获奖者给予解剖。当然这种解剖，既是对其人生历程、生平事迹的叙述，也是对其人生哲学、科学精神、人文情怀的一种铺陈。具体而言，在叙述每个人物时，我们尽量做到一一将人物那种坚定的信念、务实的精神、执着的工作态度，所受到的家庭教育、学校教育、社会教育，以及他们个人的素质、修养、性格、经历等元素，均给予呈现，从而使读者体会到他们那种背后的执着爱好、坚持理想、强烈求知、意志坚强、迎接挑战与勇于创新的人生品质。另外，我们在每一人物的最后部分附上包含涉及与该学科领域相关的学科简史、学科流派等内容的“经典阅读”栏目，以帮助读者较系统地掌握相关学科的必备知识理论。

总之，我们期望广大读者能够通过本套《走近诺贝尔奖》丛书，深思、体味、参照、借鉴这些文学精英、科学精英的生平与精神，而规划出自己的成才之路，并能够在人生的路上“坚持理想、执着奋斗、锲而不舍、勇于创新、戒骄戒躁”，终获成果。有时，一句话可以改变人的一生，成为个人的人生座右铭；相信一套科学、有益的图书，同样具备相似的功能。当然，水平与时间的有限、仓促，使得本套丛书难免会存在一些瑕疵，期待读者给予批评，以期再版时予以改正、更新。

《走近诺贝尔奖》丛书编辑委员会

2010年9月15日



目 录

罗伯特·劳克林	(1)
霍斯特·施特默	(8)
杰拉德·胡夫特	(15)
马丁纽斯·韦尔特曼	(22)
阿尔费罗夫	(30)
赫伯特·克勒默	(39)
杰克·基尔比	(48)
艾里克·科纳尔	(54)
沃尔夫冈·克特勒	(61)
卡尔·威曼	(70)
小柴昌俊	(78)
雷蒙德·戴维斯	(87)
里卡尔多·贾科尼	(95)
维塔利·金茨堡	(103)
阿布里科索夫	(110)
安东尼·莱格特	(117)
戴维·格罗斯	(125)
戴维·波利策	(134)
弗兰克·维尔切克	(142)





罗伊·格劳伯	(151)
约翰·霍尔	(158)
特奥多尔·亨施	(165)
约翰·马瑟	(174)
乔治·斯穆特	(182)
艾尔伯·费尔	(192)
皮特·克鲁伯格	(199)
南部阳一郎	(206)
小林诚	(213)
益川敏英	(222)
附录一 诺贝尔	(235)
附录二 1901—2009 年诺贝尔物理学奖获得者	(242)



罗伯特·劳克林

(Robert Laughlin)

罗伯特·贝茨·劳克林 (1950—), 美国物理学家, 1998 年诺贝尔物理学奖获得者, 劳克林的科学成就是发现并研究电子的分数量子霍尔效应。罗伯特·劳克林 1950 年出生于美国加利福尼亚州。1972 年在 Berkeley 大学获得学士学位。1978 年毕业于 MIT 研究生院。1978 年后, 在 Bell Labs 和 “Livermore Lab 工作, 并且在 Livermore Lab 完成了使他后来获得诺贝尔物理学奖的关于分数量子 Hall 效应理论的工作。1989—2004 年在斯坦福大学任教。



罗伯特·劳克林

2004 年任韩国科学技术大学 (KAIST) 校长。分数量子霍尔效应是继霍尔效应和量子霍尔效应的发现之后发现的又一项有重要意义的凝聚态物质中的宏观量子效应。分数量子霍尔效应的实验发现及其用新的分数电荷激发的不可压缩量子液体作出的理论解释, 导致了我们的认识宏观量子现象的一次突破, 其中包括掌握了电荷的分裂规律。

罗伯特·劳克林 ▼▼▼





劳克林与分数量子霍耳效应

量子流体早在研究极低温状态下的液氦的超导体时就已有所了解。在这些领域里，已经有好几位物理学家获得过诺贝尔物理学奖。这么多的物理学家受到如此殊荣，说明凝聚态物理学在 20 世纪有极大的发展，而低温和超导在这一领域内又具有特殊重要的地位。分数量子霍耳效应正是继高温超导之后凝聚态物理学又一项崭新课程。

分数量子霍耳效应是继霍耳效应和量子霍耳效应的发现之后的又一项有重要意义的凝聚态物质中的宏观量子效应。冯·克里青由于在 1980 年发现了量子霍耳效应而于 1985 年获得诺贝尔物理学奖。整数效应发现两年后，美国新泽西州姆勒山 AT&T 贝尔实验室的崔琦和施特默在研究霍耳效应中用质量极佳的砷作为基片的镓样品做实验。样品的纯度是如此之高，以至于电子在里面竟可以像子弹一样运动。也就是说，它在相当长的路程中不会受到杂质原子的散射影响。为了获得这样的样品，导体样品要经过“调制”——在传导层旁边的一层特别予以掺杂，他们用的样品是哥萨德制备的。

散射长度在低温下会增大，因此实验要在 1K 以下和非常强的场中进行。在原始的实验中，磁场的强度高达 20T。出乎他们意料的是，这一实验所得的霍耳台相当于填充因子要取的分数值。他们最早发表的论文中公布子 $f = 1/3$ 的平台。他们还发现有迹象表明在 $2/3$ 处也有平台。根据最低朗道能级的粒子空穴对称性，他们认为可能相当于空穴的 $1/3$ 填充因子。

分数量子霍耳效应的发现使凝聚态物理学界更为惊奇。因为从来没有预言过以分数填充的朗道能级有什么特殊的值得注意的特性。崔琦



和施特默完全知道，与整数量子霍尔效应相反，用忽略电子间相互作用的模型是无法对分数量子霍尔效应作出解释的。他们设想，理解整数效应的论据不能用于这种情况。然而，他们注意到，如果为了某种理由还要用到那些论据，就必须承认有携带分数电荷的准粒子存在，例如当 $f = 1/3$ 时，准粒子所带电荷为 $e/4$ 。然而，为什么会出现携带分数电荷的准粒子呢？

劳克林证明，当电子体系的密度相当于“简单”分数填充因子为 $f = 1/m$ (m 是奇整数，例如 $f = 1/3$ 或 $1/5$) 时，电子体系凝聚成了某种新型的量子液体。他甚至提出了一个多电子波函数，用以描述电子间有相互作用的量子液体的基态。劳克林还证明，在基态和激发态之间有一能隙，激发态内存在分数电荷 $\pm e/m$ 的“准粒子”。这就意味着霍尔电阻正好会量子化为 m 乘 h/e^2 。

劳克林认为，从基态到基本激发会产生特殊的旋涡。在劳克林的图像中，有 m 个旋涡未受束缚，每个“准粒子”带一负 $1/m$ 电荷，即被移走的整数电荷的 $1/m$ 。类似地，如有一普通电子加到劳克林的液体中，就会立刻分出奇数的准粒子，每个准粒子带着电子电荷的同一分。由于电子倾向于在基态中相互联系，这样库仑斥力可减到最小。增加或减少一个电子或磁通量子都会干扰这一次序，并造成相应的能量损失。正因为如此， $f = 1/m$ 量子态代表了凝聚的多粒子基态。

由于电子的位置是不固定的，像在固体中那样，劳克林态成了一种新型量子流体态，它是一种不可压缩的液体，电子间的库仑相互作用为这种不可压缩性提供能隙。极强的外磁场强迫奇数个单位磁通量子与电子复合成玻色子。复合玻色子在接近绝对零度时发生玻色爱因斯坦凝聚，从而形成量子霍尔液体。由于复合玻色子由电子和磁通量子组成，这种量子流体的准粒子激发具有很奇特的性质：这种准粒子带有分数电子电荷，而且满足分数统计。

1997 年，法国和以色列的物理学家们用巧妙的实验手段直接观察到了这种奇妙的准粒子，从而证实了劳克林、施特默和崔琦的发现和理



论预言。这样，分数量子霍尔效应的研究就发展成为当今凝聚态物理的主流领域之一，其实验和理论上的许多成就，成为研究强关联系统的典范，并对现代物理学中许多其他分支的发展有重要的借鉴作用。

经典阅读

生物质能

生物质是指通过光合作用而形成的各种有机体，包括所有的动植物和微生物。而所谓生物质能，就是太阳能以化学能形式贮存在生物质中的能量形式，即以生物质为载体的能量。它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用，可转化为常规的固态、液态和气态燃料，取之不尽、用之不竭，是一种可再生能源，同时也是唯一一种可再生的碳源。生物质能的原始能量来源于太阳，所以从广义上讲，生物质能是太阳能的一种表现形式。目前，很多国家都在积极研究和开发利用生物质能。依据来源的不同，可以将适合于能源利用的生物质分为林业资源、农业资源、生活污水和工业有机废水、城市固体废物和畜禽粪便等五大类。

1. 林业资源。林业生物质资源是指森林生长和林业生产过程提供的生物质能源，包括薪炭林、在森林抚育和间伐作业中的零散木材、残留的树枝、树叶和木屑等；木材采运和加工过程中的枝丫、锯末、木屑、梢头、板皮和截头等；林业副产品的废弃物，如果壳和果核等。

2. 农业资源。农业生物质能资源是指农业作物（包括能源作物）；农业生产过程中的废弃物，如农作物收获时残留在农田内的农作物秸秆（玉米秸、高粱秸、麦秸、稻草、豆秸和棉秆等）；农业加工业的废弃物，如农业生产过程中剩余的稻壳等。能源植物泛指各种用以提供能源的植物，通常包括草本能源作物、油料作物、制取碳氢化合物植物和水生植物等几类。



3. 生活污水和工业有机废水。生活污水主要由城镇居民生活、商业和服务业的各种排水组成，如冷却水、洗浴排水、盥洗排水、洗衣排水、厨房排水、粪便污水等。工业有机废水主要是酒精、酿酒、制糖、食品、制药、造纸及屠宰等行业生产过程中排出的废水等，其中都富含有机物。

4. 城市固体废物。城市固体废物主要是由城镇居民生活垃圾，商业、服务业垃圾和少量建筑业垃圾等固体废物构成。其组成成分比较复杂，受当地居民的平均生活水平、能源消费结构、城镇建设、自然条件、传统习惯以及季节变化等因素影响。

5. 畜禽粪便。畜禽粪便是畜禽排泄物的总称，它是其他形态生物质（主要是粮食、农作物秸秆和牧草等）的转化形式，包括畜禽排出的粪便、尿及其与垫草的混合物。

生物质能的特点：可再生性，生物质属可再生资源，生物质能由于通过植物的光合作用可以再生，与风能、太阳能等同属可再生能源，资源丰富，可保证能源的永续利用；低污染性，生物质的硫含量、氮含量低，燃烧过程中生成的 SO_2 、 NO_2 较少。生物质作为燃料时，由于它在生长时需要的二氧化碳相当于它排放的二氧化碳的量，因而对大气的二氧化碳净排放量近似于零，可有效地减轻温室效应；广泛分布性，缺乏煤炭的地域，可充分利用生物质能；生物质燃料总量十分丰富，生物质能是世界第四大能源，仅次于煤炭、石油和天然气。根据生物学家估算，地球陆地每年生产 1000 ~ 1250 亿吨生物质；海洋年生产 500 亿吨生物质。生物质能源的年生产量远远超过全世界总能源需求量，相当于目前世界总能耗的 10 倍。我国可开发为能源的生物质资源到 2010 年可达 3 亿吨。随着农林业的发展，特别是炭薪林的推广，生物质资源还将越来越多。

生物质能一直是人类赖以生存的重要能源，它是仅次于煤炭、石油和天然气而居于世界能源消费总量第四位的能源，在整个能源系统中占有重要地位。有关专家估计，生物质能极有可能成为未来可持续能源系



统的组成部分，到下世纪中叶，采用新技术生产的各种生物质替代燃料将占全球总能耗的40%以上。

目前人类对生物质能的利用，包括直接用做燃料的有农作物的秸秆、薪柴等；间接作为燃料的有农林废弃物、动物粪便、垃圾及藻类等，它们通过微生物作用生成沼气，或采用热解法制造液体和气体燃料，也可制造生物炭。生物质能是世界上最为广泛的可再生能源。据估计，每年地球上仅通过光合作用生成的生物质总量就达1440~1800亿吨（干重），其能量约相当于20世纪90年代初全世界总能耗的3~8倍。但是尚未被人们合理利用，多半直接当薪柴使用，效率低，影响生态环境。现代生物质能的利用是通过生物质的厌氧发酵制取甲烷，用热解法生成燃料气、生物油和生物炭，用生物质制造乙醇和甲醇燃料，以及利用生物工程技术培育能源植物，发展能源农场。

目前，生物质能技术的研究与开发已成为世界重大热门课题之一，受到世界各国政府与科学家的关注。许多国家都制定了相应的开发研究计划，如日本的阳光计划、印度的绿色能源工程、美国的能源农场和巴西的酒精能源计划等，其中生物质能源的开发利用占有相当的比重。目前，国外的生物质能技术和装置多已达到商业化应用程度，实现了规模化产业经营，以美国、瑞典和奥地利三国为例，生物质转化为高品位能源利用已具有相当可观的规模，分别占该国一次能源消耗量的4%、16%和10%。在美国，生物质能发电的总装机容量已超过10000兆瓦，单机容量达10~25兆瓦；美国纽约的斯塔滕垃圾处理站投资2000万美元，采用湿法处理垃圾，回收沼气，用于发电，同时生产肥料。巴西是乙醇燃料开发应用最有特色的国家，实施了世界上规模最大的乙醇开发计划，目前乙醇燃料已占该国汽车燃料消费量的50%以上。美国开发出利用纤维素废料生产酒精的技术，建立了1兆瓦的稻壳发电示范工程，年产酒精2500吨。

中国是一个人口大国，又是一个经济迅速发展的国家，21世纪将面临着经济增长和环境保护的双重压力。因此，改变能源生产和消费方



式，开发利用生物质能等可再生的清洁能源资源对建立可持续的能源系统，促进国民经济发展和环境保护具有重大意义。开发利用生物质能对中国农村更具特殊意义。中国 80% 人口生活在农村，秸秆和薪柴等生物质能是农村的主要生活燃料。尽管煤炭等商品能源在农村的使用迅速增加，但生物质能仍占有重要地位。1998 年农村生活用能总量 3.65 亿吨标煤，其中秸秆和薪柴为 2.07 亿吨标煤，占 56.7%。因此，发展生物质能技术，为农村地区提供生活和生产用能，是帮助这些地区脱贫致富、实现小康目标的一项重要任务。

1991 年至 1998 年，农村能源消费总量从 5.68 亿吨标准煤发展到 6.72 亿吨标准煤，增加了 18.3%，年均增长 2.4%。而同期农村使用液化石油气和电炊的农户由 1578 万户发展到 4937 万户，增加了 2 倍多，年增长达 17.7%，增长率是总量增长率的 6 倍多。可见随着农村经济发展和农民生活水平的提高，农村对于优质燃料的需求日益迫切。传统能源利用方式已经难以满足农村现代化需求，生物质能优质化转换利用势在必行。

生物质能高新转换技术不仅能够大大加快村镇居民实现能源现代化进程，满足农民富裕后对优质能源的迫切需求，同时也可在乡镇企业等生产领域中得到应用。由于中国地广人多，常规能源不可能完全满足广大农村日益增长的需求，而且由于国际上正在制定各种有关环境问题的公约，限制二氧化碳等温室气体排放，这对以煤炭为主的我国是很不利的。因此，立足于农村现有的生物质资源，研究新型转换技术，开发新型装备既是农村发展的迫切需要，又是减少排放、保护环境、实施可持续发展战略的需要。



霍斯特·施特默

(*Horst Stormer*)



霍斯特·施特默

霍斯特·路德维希·施特默(1949—),德国物理学家,1998年诺贝尔物理学奖获得者。1949年出生在德国法兰克福,父亲经营一家装饰店,母亲是初级中学的教师。施特默从小喜欢数学和科学。1967年中学毕业后进入达姆施塔特工业大学学习建筑学,后转学到法兰克福大学学数学,第二年转为物理学专业。他的研究方向是高敏感超导探测器,擅长发明和构造复杂的仪器设备来解决物理问题。1974年施特默硕士毕业后,前往法国格勒诺布尔的高强度磁场实验室攻读博士,研究高强度磁场中的电子孔滴

特性。

1977年来到美国新泽西州的贝尔实验室做博士后。1981年10月6日,施特默和崔琦研究一种调制掺杂芯片,寻找电子晶体迹象时,发现了电子的分数量子霍尔效应。1983年成为固体电子与光学性质部门的主管,1991年被任命为贝尔实验室的物理学研究实验室主任。发明了



调制掺杂的方法，可以使得超流动性的二维电子系统成为半导体，打开了通往许多二维电子系统上的光学物理实验的大门，也促成了后来分数量子霍尔效应的发现。1998 年年初前往纽约哥伦比亚大学任应用物理学教授。

德国物理学家施特默

1998 年诺贝尔物理学奖授予美国加州斯坦福大学的劳克林，美国纽约哥伦比亚大学与新泽西州贝尔实验室的施特默和美国新泽西州普林斯顿大学电气工程系的崔琦，以表彰他们发现了一种具有分数电荷激发状态的新型量子电子流，这种状态起因于所谓的分数量子霍尔效应。量子流体早在研究极低温度状态下的液氦和超导体时就已有所了解。在这些领域里，已经有好几位物理学家获得过物理学奖。

例如，卡末林昂内斯由于液氢的研究和超导电性的发现获 1913 年诺贝尔物理学奖；朗道由于液氦和超流理论获 1962 年诺贝尔物理学奖；巴丁、库伯和施里弗由于提出超导电性的 BCS 理论获 1972 年诺贝尔物理学奖；卡皮查由于发现氦的超流动性获 1978 年诺贝尔物理学奖；柏诺兹和米勒由于发现高温超导获 1987 年诺贝尔物理学奖；戴维李、奥谢罗夫和 R. C. 里查森则因为发现氦-3 的超流动性获 1996 年诺贝尔物理学奖。这么多的物理学家受到如此殊荣，说明凝聚态物理学在 20 世纪有极大的发展，而低温和超导在这一领域内又有特殊重要的地位。分数量子霍尔效应正是继高温超导之后凝聚态物理学又一向展新课题。

霍斯特·施特默于 1949 年出生在德国法兰克福，父亲经营一家装饰店，母亲是初级中学的教师。施特默从小喜欢数学和科学，但在中学中德语、英语和法语科目却勉强及格，1967 年中学毕业后进入达姆施



塔特工业大学学习建筑学，他很快发现自己在这一专业没有天赋，便转学到法兰克福大学，但因为错过了物理学的注册时间，只能从数学开始学习，第二年转为物理学专业。

施特默的硕士毕业论文是在维尔纳·马丁森的物理研究所完成的，由年轻的助理教授埃克哈特·赫尼希任导师，他的研究方向是高敏感超导探测器，擅长发明和构造复杂的仪器设备来解决物理问题。后来发明扫描隧道显微镜的格尔德·宾宁（1986年诺贝尔物理学奖），是当时赫尼希的4个学生之一，在同一个小组工作。

1974年施特默硕士毕业后，前往法国格勒诺布尔的高强度磁场实验室攻读博士，研究高强度磁场中的电子孔滴特性，他在那里第一次结识了来自贝尔实验室的崔琦。施特默的导师曾在美国贝尔实验室工作，1976年施特默访问了贝尔实验室，这促成了他在获得博士学位后，于1977年来到美国新泽西州的贝尔实验室做博士后。他1978年获得了贝尔实验室的固定职位，1983年成为固体电子与光学性质部门的主管，1991年被任命为贝尔实验室的物理学研究实验室主任，领导8个部门的约100名科研人员。在贝尔实验室从事科研20年后，施特默于1998年初前往纽约哥伦比亚大学，任该校的应用物理学教授。

施特默在新泽西州的贝尔实验室研究二维费米气体模型，他发明了调制掺杂的方法，可以使得超流动性的二维电子系统成为半导体，将以前仅适用于硅的二维电子系统，拓展到适用于砷化镓，这一研究成果打开了通往许多二维电子系统上的光学物理实验的大门，也促成了后来分数量子霍尔效应的发现。

在剑桥麻省理工学院的高强度磁场实验室，施特默与崔琦合作，1980年克劳斯·冯·克利青（1985年诺贝尔物理学奖）发现的量子霍尔效应，是施特默和崔琦的一个主要研究课题，另一个课题是已被理论预言存在于高强度磁场中的超低电子密度的电子晶体。1981年10月6日，施特默和崔琦研究一种调制掺杂芯片，寻找电子晶体迹象时，发现了电子的分数量子霍尔效应，他们因此获得1998年的诺贝尔物理学奖，