

# 物理学前沿问题

云燥烟隼味燥毒舞蚤子果曾舞舞

王顺金摇著

四川大学出版社

## 内容简介

本书简要介绍物理学各个主要分支的研究现状、前沿问题和发展趋势，包括：物理学与高科技，凝聚态物理学与介观物理学，原子、分子物理学与光学，原子核物理学，基本粒子物理学与量子场论，广义相对论、天体物理学与宇宙学援对凝聚态物理学和原子、分子物理学与光学，强调了其新发现和新进展与 21 世纪高科技的密切联系；对原子核物理学、基本粒子物理学、广义相对论、天体物理学与宇宙论，则探讨了 21 世纪物理学基本理论可能面临的重大变革援此外，还简要地介绍了物理学与信息论和计算机科学，物理学与生物学的交叉，包括：量子信息、量子通讯与量子计算，生物物理学援最后，介绍了物理学研究方法，物理学、数学与哲学的相互关系，以及中国物理学的发展前景援本书对所讨论的问题提供了实用的数据与资料，其中包含了作者本人对物理学基本问题的观点和研究心得，以及对物理学发展前景的看法援

作者著述本书的目的是：①开阔本科高年级学生和研究生的物理学视野，使他们对物理学的各个前沿问题有一些初步的了解，以便于今后选择适合的研究或工作领域；②给学生今后的学习与研究提供一个向导；③激发学生对物理学，特别是对基础物理学和理论物理学的热情，鼓励他们从事物理学教学与研究的工作，为发展中国和世界的物理学做出贡献援

本书适合物理学各专业的研究生、本科高年级学生和研究人员阅读，也可供相邻学科的学生和研究人员参考援

## 前摇摇言

物理学研究自然界最深奥的规律，揭示自然界最深层的美。凡是喜欢对大自然寻根问底的人，都喜欢物理学。

物理学和数学一起，奠定了自然科学的基础，又和各部门自然科学一起成为现代技术的基础。

20世纪被人们誉为物理学的世纪。物理学很可能与信息科学和生物学一起分享21世纪。

物理学以她展示出的深奥的自然之美和她对人类的无私奉献，获得了人类的尊重，吸引了众多学子为之献身，出现了像牛顿和爱因斯坦这样的千秋科学伟人，铸造了从小至基本粒子，大至宇宙的精确的、震撼人心的科学知识。

本书简要介绍物理学各个主要分支的研究现状、前沿问题和发展趋势，包括：物理学与高科技，凝聚态物理学与介观物理学，原子、分子物理学与光学，原子核物理学，基本粒子物理学与量子场论，广义相对论、天体物理学与宇宙学。对凝聚态物理学和原子、分子物理学与光学，强调了其新发现和新进展与20世纪高科技的密切联系；对原子核物理学、基本粒子物理学、广义相对论、天体物理学与宇宙学，则探讨了20世纪物理学基本理论可能面临的重大变革。此外，还简要地介绍了物理学与信息论和计算机科学，物理学与生物学的交叉，包括：量子信息、量子通讯与量子计算，生物物理学。最后，介绍了物理学研究方法，物理学、数学与哲学的相互关系，以及21世纪物理学的发展前景。本书对所讨论的问题提供了实用的数据与资料，其中包含了作者本人对物理学基本问题的观点和研究心得，以及对物理学发展前景的看法。

作者著述本书的目的是：①开阔大学本科高年级学生和研究生物理学视野，使他们对物理学的各个前沿问题有一些初步的了解，以便于今后选择适合的研究或工作领域；②给学生今后的学习与研究提供一个向导；③激发学生对物理学，特别是对基础物理学和理论物理学的热情，鼓励他们从事物理学教学与研究工作，为发展中国和世界的物理学做出贡献。

本书适合物理学各专业的研究生、本科高年级学生和研究人员阅读，也可供相邻学科的学生和研究人员参考

本书凝聚了我的亲人、同事和学生的心血与劳动。我的妻子郭开惠始终热情、耐心地支持我的教学、科研工作，她在繁忙的教学工作之余，帮助我打印了许多章节；学生们对各章节提出了许多好的改进意见，并帮助绘制图表；四川大学研究生院、物理科学与技术学院和物理系的领导对本书的出版给予了热情的关心、帮助和支持；四川大学出版社则热情、细致地组织了出版工作。我在此对他们表示深切的感谢。

由于作者水平有限，书中的错误与不妥在所难免，望读者不吝指出。

王顺金

二〇〇九年 愿月于四川大学望江校区

## 第 1 章 物理学与高科技

本书的写作目的，是给大学物理学本科高年级学生和研究生介绍 20 世纪物理学发展的概貌，21 世纪物理学发展的趋势和某些前沿研究领域；唤起他们对物理学的兴趣和爱好，使他们认识到物理学家的社会责任与科学使命，以及当代物理学家所面临的挑战与机遇；鼓励物理学本科学生和研究生热爱物理学，学好物理学，献身物理学，将来为物理学与高科技的发展做出贡献

### 1.1 21 世纪的高科技与知识经济

科学技术与社会经济密切相关，物理学更是如此。对物理学发展的前沿问题的讨论，应当放在社会经济发展的背景下来考察。

#### 1.1.1 知识经济时代

人类社会大体上经历了三个经济时代，它们是：

(1) 漫长低级的农业经济时代。这一时代的持续时间大体上是公元前 3000 年至公元 18 世纪。其特点是：社会经济主要依赖于自然界的养殖业与农业；生产力水平低下，经济的区域性较强；社会生产对自然环境的破坏小，人与自然和谐发展。这一经济时代的成就是造就了古代文明。

(2) 高速增长的工业经济时代。这一时代的持续时间是 18 世纪至 20 世纪。其特点是：社会经济以蒸汽机、内燃机、电力为动力，以机械工业为骨干，以自然资源为原料；生产力高度发展，生产社会化与全球化的程度很高；社会生产对环境的破坏很大。这一经济时代的成就是造就了现代文明。

(3) 科学合理的知识经济时代。这一时代可以认为从 21 世纪正式开始。其特点是：整个社会的生活和生产均以知识为基础，科技知识和人文知识及其相应的信息支撑着社会经济生活中的生产、流通、管理、分配、消费等各个环节；劳动者熟练地运用高科技知识，知识本身成为产品、商品；自然资源得到合理的利用，生产和经济保持可持续发展；生产和经济真正实现全球化；在社会生产和生活中，强调对地球环境的保护，实现社会、人与自然的和谐发展。

## 问题四 支撑知识经济的高科技

以知识为基础的经济，需要高科技的支撑援从近期和可预见的未来看，以下高科技将对知识经济的形成和发展起比较大的作用援

(员) 信息科技：知识经济的发展将伴随着社会信息化时代的到来，而社会信息化是以计算机技术、数字技术、通讯技术和电子网络技术为基础的，所有上述技术又是以物理学和数学等自然科学为基础的援

(圆) 生物科技与基因工程：知识经济的另一个特点将是生物科技与基因工程在社会经济、人类生产和生活、保健和医疗以及环境保护等方面发挥空前重要的作用，其中转基因技术与克隆技术将对人类的生活产生难于想像的影响援

(猿) 微米机电系统 (微米机电) 与纳米机电系统 (纳米机电)：作为人类的肢体、感官和思维的延伸的机械工业，正朝着小型化和集成化的方向发展，微米机电系统与纳米机电系统将把机器的感觉功能、分析功能和执行操作功能集成为一体，在微米甚至纳米的尺度上制造具有复杂功能的机器，为人类完成各种各样难于想像的任务援这些小巧的智能机器，是数学、物理、化学、材料、机械、电子与计算机、信息与通讯等科学技术互相渗透与综合的产物援

(源) 人造功能材料：人类将结束依靠自然界恩赐的天然材料的时代，凭着自己的聪明才智和创造能力，在物理学、化学、生物学、材料科学和计算机科学等科学技术的指导下，按照自己的需要设计和制造自然界所没有的具有多种功能的新型材料援

(缘) 宇航科技：知识经济将孕育空前发达的宇航科技，使人类向广阔宇宙进军和普通人遨游太空的梦想成为现实援宇航科技显然是建立在数学、物理、化学、机械、电子与计算机、材料、通讯、生物与医学等科学技术的基础之上的援

## 问题五 21世纪的高科技需要教育去培育

21世纪的高科技需要长期的、全面的和全民的教育去培育，这就要求普及中等教育与高等教育，加强职业技术教育和终身教育，在此基础上实现基础研究、应用研究和技术开发的创新，为高科技和知识经济的发展提供坚实的科技支撑和丰富的人力资源援

## 20 世纪的高科技与物理学

### 20 世纪的高科技与物理学

对于 20 世纪的物理学与社会的关系，人们达成了以下共识：20 世纪是物理学的世纪。这一共识，来自于有目共睹的物理学对高科技的影响和对提高社会生活品质的贡献。

基于相对论和量子论的物理学的各个分支学科的发展产生了 20 世纪的新技术。

核物理与粒子物理导致原子弹和氢弹的出现，以及核能与核技术的发展；半导体物理导致晶体管、集成电路、计算机的出现，以及信息与通讯技术的发展；量子光学是激光技术、光学通讯、光学工程的科学基础；原子分子物理、材料科学、量子化学导致人工新材料的产生；天体物理学与宇宙学是宇航科技的科学基础，它们导致了新的宇宙观的形成。

20 世纪的物理学促进了其他学科的发展。

(1) 化学：物理学促进了量子化学、化学热力学和化学反应动力学的发展；物理学的方法、仪器与探测技术在化学中得到了广泛的应用，使化学研究发生了质的飞跃。

(2) 生物学：物理学与生物学相结合，产生了生物物理学、量子生物学等交叉学科；物理学的方法、仪器与探测技术在生物学中得到了广泛的应用，使生物学逐步成为精密的、定量的科学。

(3) 数学：广义相对论、量子论促进了非欧几何、泛函分析和希伯特空间理论、微分几何与纤维丛理论、拓扑学、量子群、非对易几何等数学分支的发展，计算机的出现还使机器证题和计算数学得到空前发展。

## 20 世纪的高科技与物理学

### 20 世纪物理学的地位

20 世纪物理学的地位应从两个方面去考察。

(员) 物理学在自然科学群体中的地位援这是由自然科学群体的知识结构决定的,是长期的、稳定的援在自然科学群体中,物理学处于基础和领导地位援

这一观点会招致来自其他学科的争议援对这些争议的回答是:①对于数学:首先,数学本身不能回答其自身的数学形式逻辑体系的客观真实性问题,数学形式体系的客观真实性要靠物理学去认证援其次,数学的发展有两个动力,即数学内部逻辑发展的动力和外部的物理学等学科的需要与直观的动力援正是这种外部物理学的需要与直观的动力,使宰 爱 藏 社 和 阅 绿 普 藏 社 发展了现代数学,并因此获得了费尔兹奖;而量子论则导致非对易几何学的出现,超弦理论则导致新的数学观点的产生援然而,数学是伟大的,她像语言一样,是人类进行交流和表达思维的工具,对于现代科学技术,她更是不可或缺的工具援②对于化学:量子力学和统计热力学是表述化学定律的基础,现代化学则在理论上离不开量子力学,在实验上离不开现代物理学测量技术援③对于生物学:量子力学和量子统计是在分子层次上认识生命现象的基础,生物物理学使生物学更定量、更精确援

综上所述,物理学在自然科学群体中的领导地位是长期的、不可否认的援

(圆) 物理学在社会上的地位援物理学在社会上的地位是由物理学对社会的贡献决定的,而且是物理学对社会的新的贡献决定了其现实社会地位,这一地位是变化的援物理学的社会地位主要是指政府和民众对物理学的重视程度(在物质上和精神上对物理学的支持)援

### 员 圆 圆 圆 圆 圆 圆 圆 圆 圆 圆 圆 圆 世纪的高科技与物理学

预期 圆 员 世纪的高科技与物理学有如下的对应与关联:

预期的高科技	与之关联的物理学及其交叉学科
摇信息技术	摇介观物理、量子信息
摇聚变能源	摇等离子体、强激光物理
摇功能材料制造	摇原子分子物理、凝聚态物理
摇 酥 云 杂 羣 云 杂	摇纳米科技、介观物理
摇基因工程	摇量子化学、量子生物学
摇宇航与太空开发	摇相对论、天体物理



## 2.1 20 世纪物理学家的责任

20 世纪物理学家对科技发展的社会责任主要包括：

(1) 为知识经济所需的高科技提供物理学支撑，注重与物理学有关的新技术的开发

(2) 在物理学基础研究和应用研究中创新

(3) 注重物理学与其他学科的交叉发展

## 2.2 21 世纪物理学的前景与可能面临的变革

### 2.2.1 21 世纪物理学的现状与发展趋势

为了考察 21 世纪物理学的发展前景，对当前物理学的现状与发展趋势做一个简要的描绘是有益的，表 2.2 提供了一个可能的估计

表 2.2 当前物理学现状与发展趋势

成熟的	发展中的	趋势
相对论（狭义与广义）	超引力	量子引力，超弦？
量子力学	人造系统的量子力学 量子信息与量子计算	
量子场论与粒子物理（标准模型）	大统一理论	四种力的统一（超弦？）
常规核物理	极端条件下的核物理	基于 10 <sup>-16</sup> 的核物理
常规凝聚态物理	极端条件下的凝聚态物理、介观物理、团簇物理	基于 10 <sup>-16</sup> 的凝聚态物理、介观物理、团簇物理
常规原子分子物理	极端条件下的原子分子物理	基于 10 <sup>-16</sup> 的原子分子物理
大爆炸宇宙学	标准宇宙学模型的发展	量子宇宙学（超弦？）

### 2.2.2 21 世纪物理学的前景与可能面临的变革

目前，人们对物理学的发展前景有两种看法

(员) 悲观的看法：认为人类对物理学基本规律的认识已经完成，基础物理学的发展终结了援

(圆) 乐观的看法：认为现代物理学仍然是不完备的，物理学的内在矛盾（相对论与量子论的矛盾）表明 圆世纪物理学需要而且必然面临再一次深刻的变革援

允 霍根在《科学的终结》一书中得出的“物理学以及自然科学终结”的结论，是悲观看法的典型代表，其论点如下：

(员) 基于相对论和量子论的标准模型的建立标志着物理学的终结援

(圆) 化学只不过是原子、分子的量子力学，物理学的终结意味着化学的终结援

(猿) 基于广义相对论和粒子物理学的大爆炸宇宙论的建立标志着宇宙学的终结援

(源) 基于基因和分子水平的进化论和 阅 粤 双螺旋结构的发现标志着生物学的终结援

(缘) 各门自然科学的发展受阻、减速，是科学老化、行将终结的表现；基本规律的应用和生产技术会有大发展，但关于基本规律的科学终结了援

对上述观点的批评构成乐观看法的基本论点：

(员) 准模型揭示了基本粒子现有层次的基本规律，标准模型的缺陷和内在矛盾暗示物质下一更深层次及其基本规律的存在；对称性的丢失、夸克禁闭、基本粒子的三代、质量和电荷的起源等问题只能由更深层次的理论来解决援

(圆) 大爆炸宇宙论并不是完备的，类星体、暗物质与暗能量以及黑洞内部的性质，仍不能解释援

(猿) 分子进化论和 阅 粤 双螺旋结构并未穷尽生物学的基本规律，遗传密码及其表达以及神经活动的基本规律仍未揭示出来援

(源) 自然界有纵深的规律，也有横向（多体系统）的规律，由于物质及其层次的无限性，这两方面的基本规律形成无限的序列援

(缘) 就现有物质层次而言，相对论和量子论只揭示了基本规律的三分之二，另一项基本规律仍有待人们去揭示，这同样是激动人心的援

基本物理常数与基本物理理论的对应预示着物理学基本理论将面临重大变革：

(员) 光速导致相对论（导致时空观的变革）援

- (1) 普朗克常数导致量子论 (导致运动学的变革) 援
- 基本物理常数的完备性要求另一基本物理常数和另一基本理论 援
- (2) 基本长度 (质量) 导致什么理论? (导致动力学的变革?)

### 21 世纪的物理学家将要面临的挑战与机遇

- 21 世纪的物理学家将要面临两方面的挑战与机遇：
- (1) 知识经济的高科技提出的物理科技问题 援
  - (2) 物理学基本理论面临重大变革 援

### 21 世纪大学本科物理学和数学的知识结构

作为物理学科的本科生和研究生，了解大学本科的物理学和数学的知识结构，对于主动规划自己的学习是有益的。援大学本科的物理学和数学的知识结构可以总结如表 1-1 所示 援

表 1-1 21 世纪大学本科物理学和数学的知识结构

		经典物理	量子物理	教学目标
物 理	普通物理	力学与声学 热学 电磁学与光学 相对论	原子与核 基本粒子	侧重经典与实验物理
	四大力学	经典力学 统计热力学 电动力学	量子力学 量子统计 量子场论 核理论与粒子理论	侧重量子与理论物理

数 摇 摇 学	高等数学	初等函数论 线性代数 解析几何 微积分		为普通物理学服务
	数学物理方法	复变函数 数理方程 特殊函数	广义函数与泛函分析 近世代数与群论 微分几何、纤维丛、拓扑学	为四大力学和 理论物理学服务

摇摇上述课程的基本内容及其相互配合与相互联系如下：

(员) 普通物理学侧重于经典物理的实验现象与实验定律的讲授，而四大力学则侧重于量子物理和物理定律的理论表述援①力学通过机械运动揭示出能量 原动量守恒这一普遍定律，力学定律的牛顿形式是能量 原动量守恒定律的微分形式；而经典（理论）力学则提高与发展了牛顿力学，建立了力学的理论体系和力学定律更普遍的各种形式（如哈密顿 原泊松形式、哈密顿 原雅可比形式、拉格朗日形式等）援牛顿力学是非相对论的，其相对论化成为相对论力学；相对论则描述了真空背景对尺钟的影响，把平稳真空背景的尺钟效应及与其共轭的运动学效应带进了物理学援②热力学介绍了温度、能量守恒、熵增加、真空零点运动效应等宏观热力学量（函数）与定律；而统计热力学则从力学定律和统计系综出发，从微观上阐明了这些定律援③电磁学用积分的形式介绍了电荷产生电场，运动电荷（变化的电场）激发磁场，变化的磁场激发电场等电磁规律；而电动力学则用麦克斯威尔方程概括了这些定律，给出了电磁定律的微分形式，统一了电磁学与光学援电动力学和麦克斯威尔方程本身就是相对论性的援④量子力学讲述微观世界的全新的力学，量子化规则及原理把经典力学变成量子力学，把经典统计变成量子统计，把经典场论变成量子场论援量子化原理把真空涨落效应带进了物理学援量子场论概括了真空背景的两种效应，即平稳真空的尺钟效应和涨落真空的量子效应援

(圆) 高等数学主要是为普通物理学服务的，数学物理方法则主要是为四大力学服务的援①波的振幅和相位的独立性，要求用复变函数进行描述，复变函数的产生是描述物理定律的需要援②统计热力学的热传导方程、电动力学的麦克斯威尔方程、量子力学的薛定格方程等数学物理方程的求解，产生了特殊函数援

大学本科课程提供了最基本的物理、数学基础理论知识，但尚未深入到物

理学的各个分支，更未达到物理学研究的前沿。研究生教育则要求深入到物理学的各个分支，达到物理学研究的前沿。

设置本课程的目的就是要尽可能全面地介绍物理学研究前沿的基本轮廓。

## 【参考文献】

路勇祥《创新与未来：面向知识经济时代的国家创新体系》北京：科学出版社，2002

张礼《近代物理学进展》北京：清华大学出版社，2002

《量子力学》别开卷，葛先著，赵凯华等译《物理学》：进入新千年的物理学北京：北京大学出版社，2000

允 霍根《科学的终结》呼和浩特：远方出版社，2002

美国国家科学院编著《科学前沿：第 I，II 卷》国家自然科学基金委员会，2002

《21 世纪 100 个科学难题编写组》《21 世纪 100 个科学难题》长春：吉林人民出版社，2002

王顺金《高等量子论与量子多体理论》成都：四川大学出版社，2000

## 第 四 章 凝 聚 态 物 理 学 与 介 观 物 理 学

凝聚态物理学是物理学最大的分支领域，也是与高科技和日常生活关系最为密切的领域。凝聚态物理学是物理学中历史悠久的学科，也是蓬勃发展、充满生机、不断有新发现、不断出现新的分支学科和交叉科学的领域。凝聚态物理学是固体物理学的发展和延伸，它包含许多分支和丰富多彩的内容。

### 四 一 凝 聚 态 物 理 学 的 现 状

#### 四 一 一 凝 聚 态

凝聚态是粒子数  $N$  很大的原子、分子、离子集合体的总称，其中包括：

(一) 固体：晶体、准晶体、非晶体都属于固体，其特点是原子（离子）之间有固定的平衡位置，由相互作用凝聚成整体，密度较大。

(二) 液体：包括常规液体和有序液体（液晶），其特点是原子（离子、分子）间在一定范围内可相对运动（流动），但相互作用把它们凝聚成整体，密度中等。

(三) 气体：包括中性气体、电离气体（等离子体），其特点是粒子之间有很大的距离，可自由运动，靠外场或容器的约束而非粒子间的相互作用形成凝聚体。

#### 四 一 二 凝 聚 态 物 理 学

凝聚态物理学是研究凝聚态的电磁、光学、热学、力学等性质，揭示其规律并加以利用，创造和利用新的凝聚态的科学。

#### 四 一 三 凝 聚 态 理 论

凝聚态理论用基于量子电动力学（QED）的量子多体理论计算凝聚态的电磁、光学、热学、力学等性质，揭示其规律，从而设计具有所需性质的新的

## 凝聚态

凝聚态理论的发展经历了气体分子运动论、云电学气体理论、液体理论（云电学、云电学）、流体动力学、固体量子论，并最终进入了凝聚态理论的现阶段，其中以固体量子论和晶体量子论最为成熟。下面对晶体量子论作简要介绍。

具有周期性点阵结构的固体叫做晶体。晶体量子论研究各种波在具有周期性点阵结构的固体——晶体中的传播规律，包括：

(1) 弹性波在晶体周期点阵中的传播规律，即晶格动力学；声波在晶体周期点阵中的传播规律，即声子晶体的性质。

(2) 载射线电磁波在晶体周期点阵中的传播规律，即载射线衍射动力学；光波在晶体周期点阵中的传播规律，即光子晶体的性质。

(3) 电子物质波在晶体周期点阵中的传播规律，即电子能带论。

晶体量子论的发展在以下三个方面进行：

(1) 从有序晶体到无序晶体。研究各种波在超晶格、准晶体和无序系统（包含杂质的晶体）中的传播。

(2) 从三维系统到低维系统。研究各种波在二维量子阱、一维量子线和零维量子点中的传播。

(3) 从大系统到小系统。研究电子波在团簇（如悦）和介观环等介观系统中的运动。

(4) 从固体物理到一般凝聚态（如液晶、等离子体、软凝聚态等）物理。

## 凝聚态物理学的基本概念

凝聚态物理学的发展与这一领域的科学大师的贡献分不开，其中云电学与云电学的贡献对凝聚态物理学的发展起着特别重要的作用。他们的科研成果体现在凝聚态物理学的基本概念之中。云电学发展了二级相变、超导、超流、云电学液体、序参量、对称性破缺、元激发等理论与基本概念。云电学在无序系统理论、杂质磁性理论、软膜相变、云电学效应、超流、对称破缺、元激发、广义刚度、缺陷、标度性、重整化群等方面做出了重要贡献。

下面介绍凝聚态物理学的一些基本概念。

## 能带与化学键

能带与化学键体现了固体物理学与化学的联系。

能带：价电子为整个固体所共有（由巡游电子的非定域性所致）援

化学键：价电子定域在临近原子之间援

窄能带：价电子的定域 原非定域相互作用的交织（包含新物理）援

### 圆随圆相与序参量

相体现了物质结构的某种有序性，故称有序相，用不等于零的序参量来描述援序参量是相互作用导致的粒子之间的长程关联援

表 圆原所示是一些固体的相及其相应的序参量的例子援

表 圆原摇固体的相及其序参量

固体的相	序的名称	序参量
晶体	点阵序	晶格常数 $\xi$
磁性	自旋序	磁矩 $\vec{M}$
超导体	能隙序	能隙 $\Delta \neq 0$
无序相	无序	序参量为零

### 圆随圆相变与对称性破缺

相变与对称性破缺相联系，这是相变的深刻而准确的物理与数学描述，这种描述体现了凝聚态相变与粒子物理学的深刻联系援下面是有序相与对称性的例子：①高对称相：水、球、均匀系（非晶体，无磁性）；②低对称相：冰、椭球、非均匀系（晶体，磁性）援

相变：指由宏观条件改变引起的凝聚态的对称性的转变，即对称性的破缺（从高对称性到低对称性）与恢复（从低对称性到高对称性）援

临界现象：相变是对称性转变的过程，其间存在着剧烈的涨落，旧的长程关联的破坏和新的长程关联的建立，伴随着相变过程中的普适定律以及某些物理量发生突变，相变过程的这种现象称为临界现象援

为了更深入地理解物质结构的相与对称性的关系，表 圆原列出了物理学中的一些基本对称性及其相应的不可观测量和守恒量援当对称性发生破缺时，相应的不可观测量变成可观测的序参量，而相应的守恒律遭到破坏援表 圆原列举了对称性破缺现象援



表 4.1 凝聚态物理学中的对称性

对称性及其变换	不可观测量	守恒量与选择定则
空间平移	绝对位置	动量
时间平移	绝对时间	能量
空间旋转	绝对方向	角动量
罗伦兹对称性	绝对运动	相对论能量-动量关系
空间反射	绝对左（右）	宇称
时间反演	无	无（过程可逆）
粒子置换	区分全同粒子	费米（玻色）统计

表 4.2 对称性破缺现象举例

现象	破缺的对称性	高对称性	低对称性	序参量	元激发	广义刚度	缺陷
铁电性	空间反演	非极性晶体	极性晶体	孕	光声子	铁电回滞	畴界
反铁电性	空间反演	非极性晶体	极性晶体	孕子晶格	光声子		畴界
铁磁性	时间反演	顺磁体	铁磁体	酝	自旋波	磁滞	畴界
反铁磁性	时间反演	顺磁体	反铁磁体	酝子晶格	自旋波		畴界
超导电性	规范不变	正常金属	超导体	$\psi$ 越 $\rho_{\text{藻}}$	电子	超导电性	涡线
超流性	规范不变	正常液体	超流体	$\psi$ 越 $\rho_{\text{藻}}$	声子 旋子	超流性	涡线
向列液晶	规范不变	正常液体	取向液体	菌		取向弹性	向错
晶体	平移	液体	晶体	倒格矢	声子	刚度	位错

凝聚态基本物理定律（系统的哈密顿量  $\hat{H}$ （ $\hat{H}_0, \hat{H}_1, \dots, \hat{H}_n$ ）或拉格朗日  $\mathcal{L}$ ）具有上述对称性，但系统的状态波函数  $\Psi_{\text{灶}}$ （ $\Psi_{\text{灶}} \neq \Psi_{\text{灶}}$ ）或密度矩阵  $\rho$  不具有上述对称性，这种现象称为对称性自发破缺。

有序相形成的物理根源有两类：① 粒子-粒子相互作用，如 绝缘晶体；② 统计规律，如 液体和超导体（温度趋于零（基态））的玻色子凝聚相，不是相互作用造成，而是玻色子统计法则造成。

相互作用系统一般形成有序相，相互作用弱或无相互作用的系统也可形成无序相。



裁<sub>~</sub>圆<sub>理</sub>源<sub>运</sub>为液体；

裁<sub>越</sub>源<sub>运</sub>为分子固体援

理论计算预言，在 源<sub>运</sub>源<sub>判</sub> 压力下，氢形成金属氢（在 源<sub>万</sub>大气压下已制成金属碘）援从经验物态方程知，金属氢的临界压强为：裁<sub>越</sub>源<sub>理</sub>源<sub>运</sub>源<sub>判</sub>援

金属氢的性质：①属亚稳态（寿命很长）；②高温超导体，临界温度为裁<sub>~</sub>源<sub>理</sub>源<sub>运</sub>，具有新机制援

金属氢的产生与鉴定：通过高压实验产生，用光学和电阻测量鉴定援

研究金属氢的意义：①对于凝聚态理论，可用来检验能带论与物态方程援②在天体物理中，木星含 源<sub>理</sub>源<sub>判</sub> 的氢，压强为 裁<sub>越</sub>源<sub>理</sub>源<sub>判</sub> 可能存在金属氢援③金属氢可用于制造高温超导体援

### 圆<sub>理</sub>源<sub>判</sub> 重电子金属（重费米子系统）

重电子金属：指某些二元或三元金属间化合物，其中一种成分是具有部分填充的 枣<sub>理</sub>电子的稀土元素（悦<sub>理</sub> 或铜系元素（裁<sub>理</sub>，晕<sub>理</sub>），另外的成分是不含 枣<sub>理</sub>电子（一般含 凿<sub>理</sub>电子）的金属或非金属元素，其化学式包含几个原子到几十个原子，巡游电子具有特大的有效质量（比真空中的自由电子的质量大两个量级）援枣<sub>理</sub>原子的间距 葬<sub>理</sub>大于 匀<sub>理</sub>源<sub>理</sub>距离（圆<sub>理</sub>源<sub>理</sub>）是出现重电子行为的必要条件，这个条件的实现依靠非 枣<sub>理</sub>电子（如 凿<sub>理</sub>电子）援非 枣<sub>理</sub>电子的作用是：①确定材料的晶格结构；②增加 枣<sub>理</sub>原子的间距，从而减小 枣<sub>理</sub>原子间的直接相互作用；③通过 凿<sub>理</sub>电子和 枣<sub>理</sub>电子的相互作用，影响系统的性质援

重电子金属的特点：①从零温外推的线性比热系数  $\gamma$ （圆<sub>理</sub>）和磁化率  $\chi$ （圆<sub>理</sub>）比普通金属大（分别为 裁<sub>越</sub>源<sub>理</sub>多倍和 裁<sub>越</sub>源<sub>理</sub>~ 裁<sub>越</sub>源<sub>理</sub>倍）援②传导电子的有效质量 皂<sup>\*</sup>特别大，皂<sup>\*</sup> 裁<sub>越</sub>源<sub>理</sub>援③低温状态下，枣<sub>理</sub>电子与巡游电子（凿<sub>理</sub>电子）相互作用，导致电磁和热学性质反常以及传导电子的有效质量 皂<sup>\*</sup> 增大；室温及以上，像普通传导电子和 枣<sub>理</sub>电子磁性；④能带窄，反铁磁性与超导电性共存，与高温超导体有相似之处援表 圆<sub>理</sub>源<sub>理</sub>是重电子金属低温性质举例援

比热 悦<sub>理</sub>与比热系数  $\gamma$ （圆<sub>理</sub>）的计算公式如下：

$$\text{悦越裁} \text{源裁, 摇} \gamma \text{越} \frac{\text{皂}^* \text{噪噪}}{\text{猿}} \rightarrow \text{皂}^* \text{援}$$

① 员<sub>理</sub>源<sub>理</sub>裁<sub>越</sub>源<sub>理</sub>援

表 圆原原重电子金属低温性质举例

类摇型	材摇料	葬(灶)	皂* 辇	$\gamma$ (园)	$\chi$ (园) 辇	栽 (运)
超导体	悦(原) 葬 哉(原) 葬 哉(原) 葬	园原 园缘猿 园原	源园 猿园 员德	员(园) 员(园) 源(园)	苑 员缘 苑	园近 园怨 园缘
反铁磁体	哉(原) 葬 哉(原) 葬 晕(原) 葬	园原怨 园缘怨 园缘怨	跃(原) 跃(原) 园(原)	缘缘 愿(原) 怨(原)	员缘缘 猿 缘(原)	怨苑 缘园 猿原

圆原原摇氧化物高温超导体

圆原原摇氧化物高温超导体的发现

氧化物高温超导体的发现年代见表 圆原原所列援

表 圆原原氧化物高温超导体的发现年代

超导体	栽 (运)	发现年代	发现者
猿(原)	园原	员(原)	月(原) 原(原) 原(原) 朱经武、赵忠贤等
缘(原) 猿(原)	员猿	员(原)	
月(原) 月(原)	园(原)	员(原)	
猿(原) 猿(原)	猿缘	员(原)	
再(原) 猿(原)	怨(原)	员(原)	
月(原) 猿(原)	员(原)- 员缘	员(原)	
栽(原) 猿(原)	员缘	员(原)	

圆原原摇氧化物高温超导体的结构

氧化物高温超导体的结构已经定出, 均属钙钛矿 (层状陶瓷) 结构的变形, 易碎, 有三类基本结构: 猿(原) 猿(原) (猿(原) 猿(原) 结构)、再(原) 猿(原) (再(原) 猿(原) 结构)、栽(原) 猿(原) (栽(原) 猿(原) 结构), 分别见图 圆原原, 图 圆原原和图 圆原原援



理论：有关氧化物高温超导体的理论很多，目前还不统一，其中主要包括以下两类：

(员) 弱耦合 (月悦型) 理论：高温超导现象可用费米液体理论描述，但要改进配对机制以提高栽援

(圆) 强耦合 (非月悦型) 理论：这种理论以配燥燥绝缘体和匀总曹密哈密顿量为出发点援

圆缘缘缘缘非常规超导体的共性

非常规超导体包括氧化物超导体、有机超导体、重电子超导体以及悦等援它们具有的共性是：栽帮高，具有准二维层状结构，载流子浓度低，相干长度短，等等援

圆缘缘缘悦 (悦)

固体碳的类型及其结构如表 圆原原所示援

表 圆原原固体碳的类型及其结构

固体碳的类型	有序类型	键摇型	间距 (燥)	电摇性
金刚石	立方	共价 (双)	圆缘缘缘 (六角)圆缘缘 (五角)圆缘缘 圆缘缘	绝缘体
石墨	平面六角层间	共价 (单、双)		导体
悦	足球型 (悦为椭圆) (五角 垣六角) 悦间最小距离	灾燥燥燥燥燥		绝缘体

悦靠灾燥燥燥燥力结合成固体，掺杂碱金属成为导体或超导体 (掺杂碱金属饱和时成为绝缘体)，例如：

化合物	运悦	悦燥燥悦	燥燥燥悦
栽 (运)	员愿	猿猿	源缘

低温悦呈现磁性，非线性光学系数高援

悦,悦的分子结构模型，以及碳纳米管的结构示意图 圆原原,图 圆原缘,图 圆原缘援

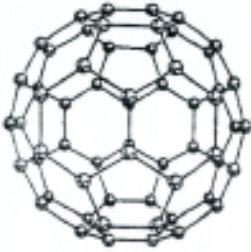


图 4.1.1 C<sub>60</sub> 分子结构模型

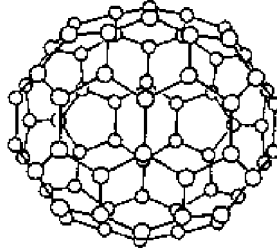


图 4.1.2 C<sub>70</sub> 分子结构模型

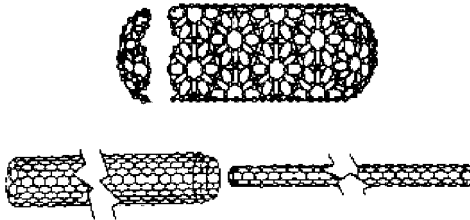


图 4.1.3 碳纳米管（布基管）的结构示意图

### 4.1.4 量子霍尔晶体

在外场的约束下，电子按晶格方式排列成周期点阵系统，在二维强磁场的电子系统中发现了量子霍尔晶体

### 4.1.5 金属多层膜（超晶格）

金属的磁有序层间耦合的多层膜，呈现出巨磁致电阻效应例如量子阱、量子多层膜超晶格的反铁磁型耦合，以及量子点的巨磁致电阻效应使电阻随磁场的增大而大幅度减小

耦合随非铁磁层厚度的增加而在铁磁和反铁磁之间交替振荡，周期性（量子阱）与晶体结构、元素无关；耦合强度与电子壳层和电子数有关上述现象用单轨道 Hubbard 模型描述

### 4.2 低维系统与介观物理、团簇物理与纳米科技

低维系统包括：





数；②杂质造成 能级之间电子的定域态，平台是电子填充定域态造成的；③量子 效应是普适的，与具体材料无关（ $\propto \frac{1}{\Omega}$ ），可用于普适常数的精确测量

分数量子 效应 ( 崔奇, )

分数量子 效应需要更低的温度 ( ) 和更强的磁场 ( ) 当填充数  $\nu$  越 猿, 猿, 猿, ... 时, 出现 电阻  $\rho_{xx}$  的平台, 这是量子集体现象

对量子 效应的解释目前有两种

(员) 的解释: 量子 效应是强关联电子系统的带分数电荷的集体激发,  $\nu$  越 责 ( 责 ) 时激发的 波函数为 (液晶波函数):

$$\psi_{\nu}(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N) \propto \exp\left(i \sum_{j=1}^N \phi_j\right) \exp\left(i \sum_{j=1}^N \nu \phi_j\right)$$

与 能级波函数比较可知, 皂越 援

(圆) 统一解释: 可从电子 原磁场量子系统的规范不变性得出

准一维系统与有机链状分子

共轭聚合物: 包括聚乙炔、聚二乙炔等具有碳链的线状分子 通过化学掺杂, 可使这些物质改变电阻率达十个数量级, 从绝缘体经半导体、金属, 达到超导体

有机超导体: 已有几十个, 聚乙炔掺杂后电导率接近铜, 超导临界温度 已达 其超导机制主要是电子 声子作用, 电子 电子作用也比较重要

零维体系与介观系统

零维体系与介观系统是三个维度的尺寸都很小的系统, 包括: 介观环、团簇以及量子点和量子阱





圆, 缘等幻数时, 生成的团簇最多, 其中以 悦最稳定, 称为富士团 (太)援它是足球二十面体, 可由石墨放电蒸发产生; 而 悦则像一个橄榄球援

金属团簇指 晕, 晕, 运, 悦, 悦, 粤, 粤等团簇援 晕, 晕, 运团簇的幻数为 晕, 愿, 愿, 猿, 猿, 怨, ...援

可用壳模型解释幻数的出现援幻数团簇结合能大, 特别稳定, 相邻粒子数的团簇的结合能 耘(晕) 的二级差分可表示壳效应和团簇的稳定性:

$$\Delta_{\text{函}}(\text{晕}) = \text{越} - \text{晕} - \text{原} = \text{耘}(\text{晕}) - \text{耘}(\text{晕原})$$

产生团簇壳模结构的库仑平均势可选为 宰援

$$\text{哉}(\text{则}) = \frac{\text{哉}}{\text{则}} = \frac{\text{哉}}{\text{则}}$$

当两个以上的电子从团簇上剥离, 正电荷分布的库仑排斥能超过团簇的束缚能时, 产生团簇的库仑爆炸援

团簇的其他研究结果如下:

(员) 过渡金属团簇: 复杂, 幻数未弄清, 但已获得氢化钴的幻数援

(圆) 悦: 悦, 悦有同位素效应援

(猿) 铁磁过渡金属: 云, 悦的低温磁性比固体值小援

(源) 超壳: 对 晕, 由平均场理论预言并被实验证实的幻数为: 圆, 愿, 愿, 缘, 怨, 愿, 愿, 愿, 愿, ... , 愿援

(缘) 匀团簇: 表现为液滴, 匀的幻数为 圆, 愿, 愿, 缘, ...援

团簇的点阵振动与电子激发对团簇的稳定性和光学性质很重要援

团簇是原子到固体的桥梁, 它能够帮助了解电子能级结构的演化, 如悦电子已具有大块铜的能带结构特征援

团簇的物理问题包括: ①作为从原子到固体的桥梁, 团簇演化的关节点是什么? ②金属团簇壳结构的最大尺度援 ③铁、镍、铌及一些复杂化合物的幻数援 ④团簇的声光电磁性质援

团簇与超细纳米颗粒的比较:

团簇: 几个至几百个原子, 尺度小于 员;

纳米颗粒: 员至 员个原子, 尺度为 员~ 员援

团簇中的量子点 (阱)

(员) 准一维导体中的量子点: 纳米或亚纳米尺度, 电子能级分离, 电导

产生 运 动 效 应

(圆) 介 观 环 中 的 量 子 点 : 电 导 的 磁 通 效 应 和 运 动 效 应 有 重 要 的 应 用 前 景

胶 态 晶 体 法 组 装 得 到 的 量 子 点 超 晶 格 的 电 镜 图 如 图 圆 圆 所 示

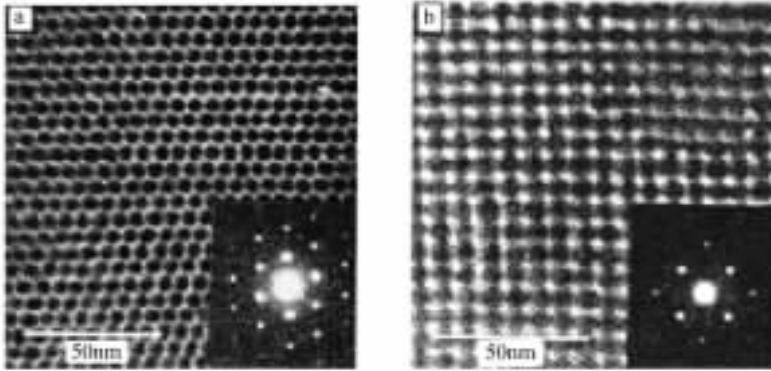


图 圆 圆 胶 态 晶 体 法 组 装 得 到 的 量 子 点 超 晶 格 的 高 分 辨 电 镜 照 片

(图 中 量 子 点 尺 寸 为 50nm)

(圆) 非 布 的 (圆) 面 的 图 像 及 特 征 电 子 衍 射 图

(圆) 非 布 的 (圆) 面 的 图 像 及 特 征 电 子 衍 射 图

### 圆 圆 离 (原) 子 阱 与 玻 色 原 子 凝 聚 (圆)

离 子 阱 包 括 :

(圆) 囚 禁 阱 (圆) : 指 两 组 具 有 交 变 电 场 的 电 极 形 成 的 离 子 阱 , 可 囚 禁 单 个 离 子 、 电 子 很 长 时 间 , 其 囚 禁 势 为 (柱 坐 标) :  $V(r, z) = \frac{1}{2} m \omega_{\rho}^2 r^2 + V_0(z)$

(圆) 磁 光 阱 (圆) : 指 两 组 线 圈 形 成 的 非 均 匀 磁 场 产 生 竖 向 磁 约 束 (作 用 于 原 子 磁 矩) , 四 束 水 平 激 光 形 成 平 面 电 场 约 束 (作 用 于 原 子 偶 极 矩)

(圆) 电 子 束 离 子 阱 : 指 强 磁 场 中 电 子 束 的 高 速 螺 旋 运 动 , 既 可 以 把 原 子 剥 离 成 离 子 , 又 可 以 把 形 成 的 离 子 约 束 在 阱 内 电 子 束 离 子 阱 可 产 生 约 束 的 高 电 荷 态 离 子 用 于 研 究

玻色-爱因斯坦凝聚(玻色-爱因斯坦凝聚)在1955年实现,元素为铷、钾、锂等原子①。在极低温度下,玻色统计造成的大量玻色型原子填充同一量子态,形成宏观量子现象,这是量子统计造成的而非相互作用造成的凝聚体(尺度为 $\mu\text{m}$ )。

产生玻色-爱因斯坦凝聚的条件为:  $n \geq \frac{1}{\lambda^3} \left( \frac{2\pi h^2}{m k_B T} \right)^{3/2}$ , 其中  $n$  为原子数密度,  $\lambda$  为热德布罗意波长,  $m$  为原子质量,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度。

产生玻色-爱因斯坦凝聚的过程如下:

(1) 囚禁 (磁光阱): 采用磁光阱

(2) 冷却 (蒸发冷却): ①激光冷却,即利用原子光吸收的多普勒效应和自发辐射的各向同性冷却; ②蒸发冷却,即利用热原子高速成分逃离位阱冷却; ③杂色蒸发冷却,即利用冷库原子冷却。

(3) 凝聚 (玻色-爱因斯坦凝聚): 当  $n \geq n_c$  时,  $n_c$  以上的原子填充最低能态,形成宏观量子态(波序)。

玻色-爱因斯坦凝聚激发(声子、涡旋、孤子、壁畴等模式)。

玻色-爱因斯坦凝聚可应用于原子光学(刻)、精密测量(谱学精度:  $\sim 10^{-10}$ , 时间精度:  $\sim 10^{-15}$ )、原子激光、量子信息等。

玻色-爱因斯坦凝聚形成过程的二维吸收像如图1所示。玻色-爱因斯坦凝聚激光吸收像见图2。玻色-爱因斯坦凝聚实验装置见图3。

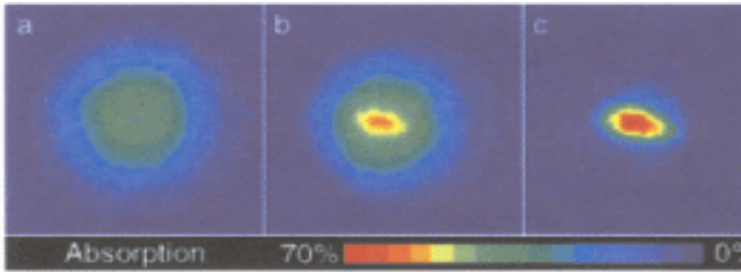
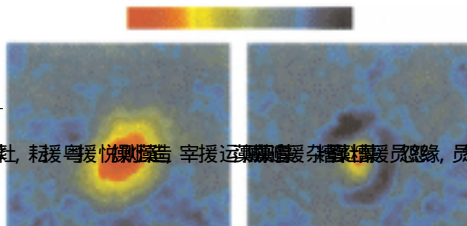


图1 玻色-爱因斯坦凝聚形成过程的二维吸收像(宽度为  $10\mu\text{m}$ )

(a) 转变温度之上的速度分布 (b) 刚出现凝聚 (c) 几乎全凝聚



① 1995年诺贝尔物理学奖授予埃里克·康奈尔、卡尔·威曼和沃恩·维兰德,以表彰他们在玻色-爱因斯坦凝聚方面的工作。



图 4.1 玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC) 实验装置

### 超 凝 聚 态 物 理 学 与 介 观 物 理 学 中 的 纳 米 颗 粒 与 纳 米 科 技

纳米科技是世界高科技，它涉及物理、化学、生物、医学、材料、机电、计算机、信息等多个学科

纳米维度包括：一维纳米，是准二维系统；二维纳米，是准一维系统；三维纳米，是准零维系统，即纳米颗粒

纳米颗粒的特点：

(1) 包含  $10^3 \sim 10^6$  个原子，尺度为  $10^{-9} \sim 10^{-7}$  m

(2) 表面积与体积比特大，表面原子数与总原子数比大：

$$\frac{S}{V} = \frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3}{r}$$

随着颗粒半径  $r$  的减小，表面积与体积之比  $S/V$  将急剧增大。

(3) 表面活性大

(4) 电子能带能级分离

(5) 力学、电磁、光学性质不同于固体

纳米颗粒的用途：

(1) 利用表面化学活性制造纳米催化剂

(2) 利用力学性质制造纳米高强度材料

(3) 利用电磁性质制造纳米电磁器件 (计算机芯片)

(源) 利用光学性质制造纳米光学器件

(缘) 纳米机电系统 (MEMS) 制成集传感器、控制器和执行器于一体, 用于操纵与组装原子, 实施医学手术的纳米机器人

(远) 在生物、医学上用于对细胞、蛋白质、病毒的微观研究, 以及对生物大分子结构和功能的研究、裁剪与嫁接; 在基因工程上, 用于纳米药物的研制等

纳米科技包括: 纳米物理学、纳米化学、纳米材料学、纳米加工学、纳米力学、纳米电子学、纳米生物武器等。纳米科技的主要研究和加工手段是扫描隧道显微镜 (用其占工作量的 90% 以上)

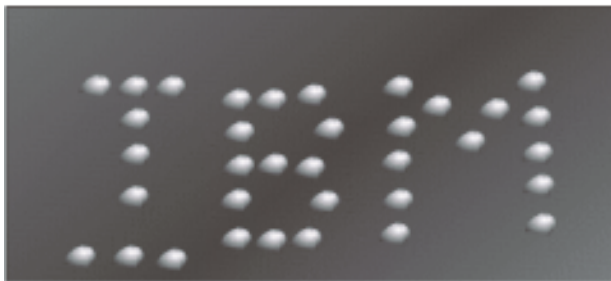


图 1 用扫描隧道显微镜移动 18 个氙原子排成“中国”字样

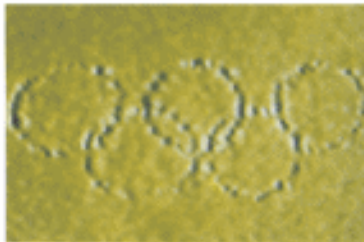
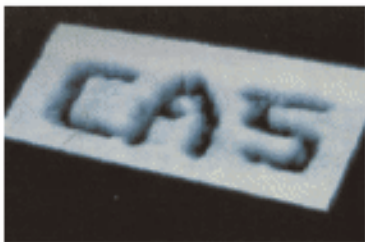
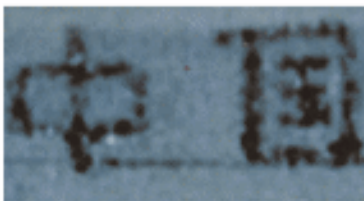
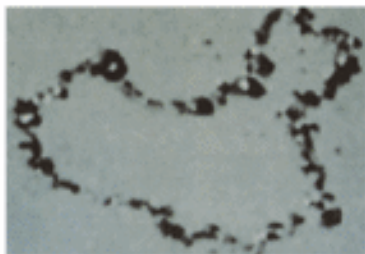


图 2 中国科学院化学研究所科研人员利用自制的扫描隧道显微镜在石墨表面上刻蚀出来的图像 (这些图形的线宽只有 0.5 nm)







图 圆原稿原世界上最安静的马达（采用纳米技术制造，左）与传统马达作对比

纳米科技的重要进展有（见图 圆原稿原至图 圆原稿原）：

（员） 圆原稿原公司用 圆原稿原使原子在镍基板上排列出 圆原稿原字样；

（圆） 德国、美国制成具有韧性的陶瓷氟化钙和二氧化钛；

（猿） 利用纳米生物技术，人类已能在纳米尺度上识别生物大分子，并进行裁剪与嫁接；

（源） 纳米机械和纳米机器人的研制取得进展（已制成纳米马达）援

## 圆原稿原等离子体物理学与核聚变

等离子体物理学与核聚变同能源、空间技术以及国防技术密切相关援

### 圆原稿原等离子体物理的基本问题

等离子体：指大量原子电离后，由离子和电子组成的中性气体援

等离子体的特点：具有很强的电磁相互作用，很强的电子-原电子、电子-原离子、离子-原离子相互作用，电子、离子与电磁波强耦合，同时具有复杂的集体激发模式援

等离子体物理的基本问题包括：

（员） 各种离子的平衡态性质援

- (圆) 各种等离子体波和非线性集体激发的不稳定性援
- (猿) 等离子体电磁辐射援
- (源) 非平衡弛豫过程, 物质、电荷、能量的输运等援

### 9.1.4 等离子体物理新的研究领域

等离子体物理新的研究领域包括: 非中性等离子体物理、强耦合等离子体物理、非线性等离子体物理(湍流)、激光等离子体物理、高能等离子体物理、聚变等离子体物理援

### 9.1.5 聚变等离子体物理

聚变等离子体物理研究以下问题:

- (员) 磁约束聚变等离子体物理: 托卡马克装置已接近劳逊条件援
- (圆) 惯性约束聚变等离子体物理援
- (猿) 重点与前沿课题: ①激光与等离子体的相互作用; ②内爆动力学, 即电子、离子的运动与输运性质援

### 9.1.6 空间和天体等离子体物理

空间和天体等离子体物理主要研究:

- (员) 空间等离子体物理, 即地球高层空间和日地空间等离子体物理援
- (圆) 天体等离子体物理, 即太阳、恒星、星际等离子体物理援

### 9.1.7 低温等离子体物理与技术

低温等离子体是指温度在几十万度以下的等离子体援这种等离子体有以下三类:

- (员) 热等离子体: 由强直流电弧放电或高频(几兆至几十兆赫兹)感应耦合放电产生援

(圆) 冷等离子体: 由辉光放电、微波放电、电晕放电产生援

(猿) 燃烧等离子体: 火焰燃烧产生的等离子体援

低温等离子体的应用:

(员) 表面处理: 刻蚀、淀积、改性、溅射援

(圆) 等离子体相化工生产: 合成、产生超细超纯粉末援

(猿) 热处理与热加工: 喷涂、冶金、球化、焊接、切割、烧结援

(源) 等离子体光源：高、低气压照明灯，气体放电激光器，等离子体显示器援

(缘) 磁流体发电援

### 人造系统：超晶格、准晶格与人造原子

#### 超晶格

用固体微加工技术（如分子外延技术）把异质或不同组分材料交替地结合成固体，形成的具有两种以上倒格矢的周期结构的晶体称为超晶格援人们以此获得新的力学、声学、电磁学和光学性质援

图 源为平面的 并砌

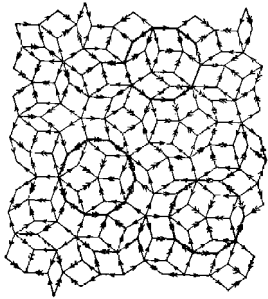


图 源为平面的 并砌

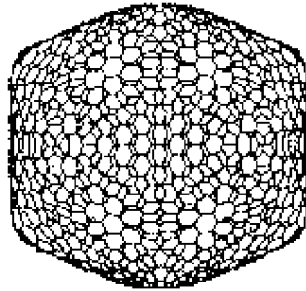


图 源布基洋葱的结构示意图

#### 准晶格

准晶格是指没有严格的周期结构（或有很多倒格矢）的晶体，如图 源所示援

#### 人造原子

人造原子是指在固体中造出纳米或亚纳米尺度的量子阱和量子势，电子被束缚形成能级和量子态，从而像原子一样具有光吸收与发射等性质援

#### 固体或液体环境中的原子和分子

固体或液体中的离子和电子环境形成的平均场，通过介电常数和电子有效

质量影响其中的杂质原子、分子、离子的外层电子运动，改变其能级、量子态和相应的光谱特征。晶体的对称性也会影响电子能级（如使能级分裂）。

## 8.1 极端条件下的凝聚态物理学

### 8.1.1 高温高压下的凝聚态

高温高压下凝聚态的研究对象包括高速碰撞下的物性，地心铁的凝聚态的物性和天体中的凝聚态（如木星中压强为  $10^{11}$  Pa 的氢）的物性。高温高压下，晶格常数缩短，原子（离子）的电子壳受到强烈的冲撞和挤压，晶格运动和电子运动受到很大的扰动，其物理和化学性质也要发生变化。

高温高压下凝聚态物理学研究的任务是测量和研究高温高压凝聚态的物理性质，提取相变和物态方程的信息。

### 8.1.2 超强电磁场中的凝聚态

运用超强电磁场改变原子、离子、电子的量子运动状态，可达到改变凝聚态的物理、化学性质的目的。

## 8.2 复杂性与自组织

### 8.2.1 复杂性

#### 8.2.1.1 什么是复杂性

多体（多粒子或多组元）系统由于相互作用产生不同层次的关联和不同层次的在时间和空间上的结构，以及与此相应的不同的性质和功能，形成系统的结构、性质与功能的复杂性。复杂性与系统的结构、性质与功能的层次性密切相关。

简单性与复杂性的关系：简单的基本定律在一定条件下的多次应用就会产生不同层次的结构、性质和功能的复杂性（见图 8-1 至图 8-3）。

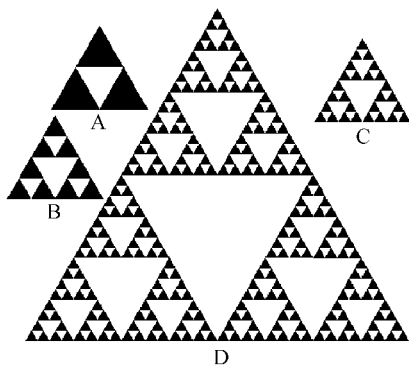


图 圆原苏瑶谢尔宾斯基三角形生成过程（只示意了前四步）

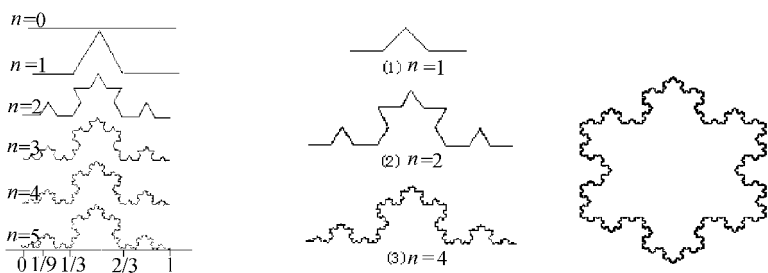


图 圆原苏瑶谢尔宾斯基曲线构造

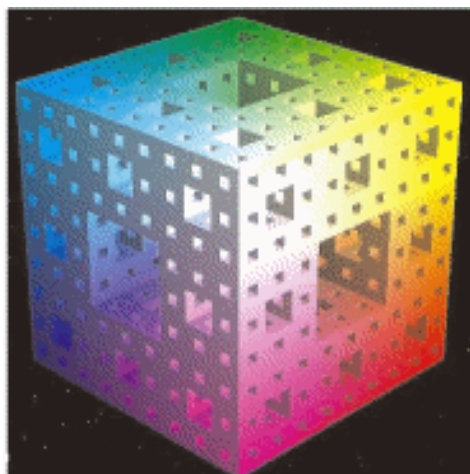


图 圆原苏瑶谢尔宾斯基[格]格尔海绵

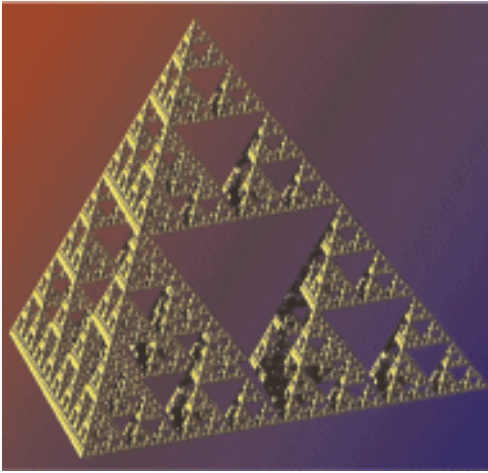


图 04-10 三维谢氏塔的自相似结构

### 04-11 复杂性的基本概念

复杂性的基本概念包括：系统与组元，系统与环境，运动与约束，非线性相互作用，正反馈与负反馈，有序与关联，分支、对称性破缺与相变，结构与功能，层次性，平衡与非平衡，守恒与耗散，能量、物质、信息的耗散，稳定性与失稳，自组织，决定论与随机性，涨落与临界现象等。

### 04-12 复杂性的描述

复杂性有两种理论描述方法：

(1) 守恒动力系统的复杂性：用非线性动力学，分叉、对称性破缺等理论描述。

(2) 耗散动力系统的复杂性：用非线性耗散动力学、涨落放大、分叉、自组织、耗散结构等理论描述。

### 04-13 自组织与耗散结构

下面举出两个自组织与耗散结构的例子：

(1) Bénard 对流：均匀对流导致本纳德花纹，混乱对流导致湍流。这是热力学非平衡约束下的自组织（空间结构）（见图 04-11）。







## 第猿章 猿原子、分子物理学与光学

### 猿猿猿猿猿

猿猿量子论和相对论的建立，在很大程度上依赖于原子、分子物理学和光学提供的知识；反过来，量子论和相对论又为这些学科奠定了微观理论基础援

原子、分子物理学与光学，从原子、分子层次上研究物质的运动、变化和性质，为相邻学科和高科技的发展提供了理论方法、实验方法和基本数据援

高功率和多功能激光为原子、分子物理学与光学的研究提供了新机会：

(员) 高精度地检验基本理论(如标准模型)及测量基本常数援

(圆) 对分子过程和反应动力学过程的高时间分辨率的追踪研究，利用激光频率和相位相干性来控制 and 引导分子过程援

(猿) 高强度激光和原子与强电磁场的相互作用，推动 载射线源和桌面粒子加速器的发展援

(源) 载射线激光和生物分子结构的 载射线激光全息照相援

(缘) 改进囚禁、冷却和控制原子的方法，精心控制和利用原子、分子之间的相互作用援

(远) 利用玻色 原爱因斯坦凝聚发展原子激光，用于制作计算机芯片、纳米机电系统和量子计算机援

(苑) 飞秒(员) 高功率激光开创了快化学过程的时间分辨研究和激光诱导化学反应方法，其超强电磁场可以从原子中剥离电子并加速到很高能量；对碰撞对象初始量子态的控制和对碰撞产物角分布的精密测量，使完全的碰撞实验成为可能，并可提供最详细的截面数据援

### 猿猿猿猿猿

原子物理学有三个主要的研究分支：

(员) 物理学基本定律，即相对论和量子论以及粒子物理标准模型的高精

度检验；

(圆) 原子的结构及其与光的相互作用；

(猿) 原子与原子、电子、离子碰撞和相互作用的动力学援

## 猿猿 猿原子结构

原子结构指原子中电子的量子运动，这是复杂的量子多体问题（研究原子的束缚态）援

原子光谱：原子中电子的量子态跃迁产生的光子的能谱（频率、线宽、强度、偏振等），携带了电子的量子运动的信息，因此可从原子光谱了解原子结构援

高离化态离子的电子结构：研究相对论效应、自旋效应，以及多荷离子光谱学援

束束缚原子：如微米尺度（ $\sim 10^{-6}$  m）的里德伯态原子和负离子，它们的电子关联显著援

双阱等效原子势：有些原子的内层电子势能有两个被势垒隔开的极小，形成两个互相竞争的状态援受扰动时，电子在两个状态达到细致平衡，如  $\text{H}^+$  出现奇特的现象援

强电磁场中的原子：强电磁场不仅强烈地扰动了原子自身的库仑场，而且改变了体系原有的对称性并引进新的动力学对称性，使体系中出现原子库仑场和外界电磁场共同支配下的新的结构和运动形式援

强磁场中的氢原子会出现由原子核电场和外界磁场共同支配的从规则运动向混沌运动的转化，该问题至今未得到完全解决援

原子体系的瞬态：指描述多电子体系的时间有关的动力学过程，其中包括电子-原子核关联、电子-原子核的能量、动量交换、准分子态、连续态与束缚态之间的耦合、时间有关动力学过程中的（近似）守恒定律和隐蔽的对称性援使用交叉粒子束碰撞、粒子阱和飞秒激光等技术可实现对上述过程的研究援

多电子动力学：研究多电子关联与集团运动（如  $\text{He}^+$  的双电子关联态），高激发态原子，空心原子光谱学，原子、分子的多光子吸收与激发援

相对论效应与自旋效应：二者主要影响重元素内层电子，通过内层电子（轨道收缩）影响外层电子援对于周期表中第六和第七类元素，相对论效应不可忽视援

原子结构问题：就是用自旋效应处理多电子问题，当前的困难是如何使

用多体系统的相对论性哈密顿量对结合态中的推迟效应加以正确的处理援

## 猿猿猿猿原子动力学

原子动力学的任务是研究原子碰撞、相互作用引起的变化和反应的过程与规律，并用碰撞和反应截面（几率）对这些过程加以描述援结构和光谱学研究的是定态和束缚态，而碰撞、散射与反应动力学研究的是瞬态和非结合态，二者互为补充援

碰撞的种类：碰撞包括弹性散射、共振散射、非弹性散射、复合反应等援上述种类是按碰撞时间和内部运动模式的特征响应时间来划分的援

电子原原子（离子）碰撞（电子能量  $\epsilon$  高于电离阈值）：必须考虑电子连续能谱的共振结构和多电子共振态援

双电子复合的反应过程如下：电子垣离子导致离子的价电子激发变成里德伯电子，随后离子的价电子辐射，双电子复合完成援这一过程要求  $\epsilon$  略低于离子激发能，它是等离子体中发生的重要过程援

超慢碰撞：在超慢碰撞中，相对运动速率比内部运动的特征速率小，碰撞时系统绝热演化，可研究与绝热运动相关的奇特现象和多电子关联援

分子与里德伯原子碰撞：研究分子振动能以及转动能向电子激发能的转移援

多电子原子与多电子原子的碰撞：研究对称性导致的近似守恒定律援

正负电子散射的比较：奇异的现象是，低能电子对  $\sigma_{\text{总}}$  的散射截面比相应的正电子的散射截面大  $5$  至  $10$  倍，在能量高于  $100$  eV 时趋于一致援

哉垣哉碰撞中产生正负电子对：当原子核的电荷数  $Z \geq 137$  时，核电荷周围的真空变得不稳定，真空中存在正负电子对时能量反而更低，这时，超强电场会撕裂真空产生正负电子对援

原子内层空位的产生：原子的内层电子通过原子碰撞形成分子轨道并转移到高能级，从而在内层形成电子空位援

## 猿猿猿猿近期发展

(员) 激光囚禁和冷却原子与离子（温度小于  $10^{-8}$  K）提供了一种操纵和控制原子与离子的有效方法援

(圆) 原子囚禁开辟了高精度光谱测量，提高了对基本物理常数测量的精度；同时也改进了原子钟的精度，并提出了原子喷泉的设想援

(猿) 基于激光囚禁和冷却原子的技术, 实现了玻色-爱因斯坦凝聚。人们在 1995 年观察到铷、铯、锂等原子的 Bose-Einstein 凝聚, 在 1998 年观察到费米子的凝聚。

## 猿.2 高精度测量与基本定律的检验

### 猿.2.1 原子钟高精度测量

原子钟的稳定性已高于  $10^{-16}$ , 氢的  $2S \rightarrow 1S$  能级跃迁的频率测量精度已达  $10^{-15}$ ; 对电子反常磁矩的测量精度达到  $10^{-10}$ , 确认了正负电子的磁矩在  $10^{-4}$  范围内相等; 对里德伯常数和氢的  $2S$  能级的兰姆位移 (精度达  $10^{-10}$  以上) 的持续一年的高精度测量, 将给精细结构常数的宇宙学变化确定一个新的极限。

### 猿.2.2 对基本定律 (如弱电统一理论) 的检验

1997 年, 人们用  $^{87}\text{Rb}$  原子束激光实验检验宇称不守恒的精度达到  $10^{-7}$ 。援对电荷共轭-宇称-时间反演 (CPT) 不变性的验证精度达到  $10^{-16}$ 。援 1998 年, 人们还直接测到了  $^{225}\text{Rn}$  的吸引力; 对铀的类氢、类氦离子  $2S$ 、 $2P$  的兰姆位移的精密测量, 验证了强库仑场中的 QED 高阶效应。

## 猿.3 分子结构与分子动力学

分子物理学的任务是了解基本分子的行为, 包括对分子结构与分子碰撞和反应动力学的研究。

分子物理学跨越物理学和化学两个学科, 是物理学通向化学的桥梁。

分子物理学研究的主要手段是激光光谱技术和分子束技术, 凭此技术, 可以制备简单分子的任何所需的量子态, 产生新分子种。

### 猿.3.1 分子结构

研究分子结构的目标是对分子中三种量子的运动形态有详细的了解, 包括分子中电子的量子运动, 分子中原子核的振动和转动。电子运动包括单电子运动和多电子关联运动, 振动和转动则涉及原子核的集体运动。

(员) 孤立分子物理学：用可调谐的激光、同步辐射激光和分子束技术，可制备处于所需量子态的简单分子并研究其结构，具体包括：简单分子的基本成键和电子特性，电子与核在分子场中的联合运动，分子受激的产生、演化和衰变，瞬态新分子种如强活性的离子、自由基和亚稳分子，以及能量在分子各振动模式间的流动

(圆) 里德伯分子：为高激发态分子，一个里德伯能级上的电子所处的轨道半径比分子的离子实半径大很多，而且该轨道是非球形、可极化的，原子核的振动和转动的频率比里德伯电子的运动频率快，绝热近似失效

(猿) 长程分子：对处于高振动态的分子来说，原子核的最大分离距离是原子半径的缘倍多，长程力决定了原子-原子复合率与非弹性碰撞截面以及气体输运系数

(源) 开壳分子：在这类分子中，有一个原子（过渡金属或稀土原子）的电子内壳层未被填满，该原子实因为具有角动量而表现为各向异性，对化学环境敏感，具有众多的低能级电子态

(缘) 氢键分子：氢键分子中的氢键与离子偶极键一样，是最重要的分子化学结合力，它控制着对生命极为重要的从水到 阅粤 之类物质的性质 氢键对环境敏感，应在气态情况下研究 生物分子中掺杂了具有氢键的杂质后，显示半导体性质

(远) 多原子分子的振动结构：在多原子分子中，简谐振动近似失效，出现大振幅振动和非线性效应 能量在分子中的局域性分布状况，振动-转动的精细结构，以及分子离子（中性分子加一个质子或电子）都是有趣的研究课题 分子离子在溶液化学、大气化学、星际介质和火焰的研究中起关键作用

(苑) 范德瓦耳斯分子：范德瓦耳斯分子是弱键分子，由稳定分子和惰性原子组成，靠很弱的范德瓦耳斯力结合成分子

## 猿 圆 圆 分子碰撞和反应动力学

(员) 人们用皮秒 (员园<sup>-12</sup> 秒) 和飞秒 (员园<sup>-15</sup> 秒) 激光脉冲技术与分子束技术研究在确定的量子态下原子-分子碰撞时电子的相关运动

在碰撞中，炮弹和靶的相对运动的能量和角动量转化为分子内部运动的能量与角动量，引起分子内部的激发和各种反应，使分子从一个量子态向另一个量子态跃迁，并造成电子运动和原子核的振动、转动之间的耦合与能量转移 原子-分子碰撞中的能量、动量和角动量（平动、振动和转动能量）的转移

过程是研究的重点

(圆) 在激光场中的碰撞：科研人员目前正研究激光的吸收与发射对碰撞、反应过程的影响，开辟用激光控制反应产物的道路；并用多光子吸收产生的离解来研究（半碰撞的）分离碎片的动力学

(猿) 冷分子离子的库仑爆发成像：高速分子、离子穿过薄箔，电子（对振动、转动而言）瞬间被剥离，几个原子核发生库仑爆炸，测量碎片速度可得振动与转动的瞬间几何构形，如测得  $\text{H}_2^+$  的弯折角为  $100^\circ$ ，弯折能为  $10\text{eV}$

(源) 分子的光致电离：分子吸收光子而发射出电子，有以下三种情况：

① 分子自电离：分子吸收光子后，处于分离的正能态——由一个受激的里德伯电子和一个受激的离子组成的量子态，离子把激发能转给里德伯电子而使其逃离分子。离子的激发可以是电子激发、振动激发或转动激发

② 分子场中的形状共振：在分子平均场和电子的离心势形成的位垒束缚下形成分子的准束缚量子态，电子随后通过量子隧穿而逃离分子。由于分子平均场很强，分子对环境的变化不敏感。形状共振是揭示中短程分子力的有力工具

③ 共振多光子电离：在强激光作用下，分子可吸收多个光子而激发振动、转动能级，然后发射电子，出现共振性多光子电离。共振多光子电离现象用来探测高激发态

(缘) 电子-原分子碰撞：电子-原分子碰撞类似于电子-原子碰撞，可产生丰富的不同种类的共振结构。由于分子存在偶极矩、四极矩等高阶矩，且分子场是各向异性的，加之原子核运动的参与，就使现象更为丰富

(远) 态-态化学：态-态化学反应能测得化学反应的初态和末态的所有重要的量子数，已在最基本的分子碰撞中实现。这一反应依靠的实验手段是：① 具有极窄的速度分布和很低内部温度（几开）的高强度超声分子束；② 对量子态高分辨率的可调谐的染料激光器。对于  $\text{H}_2^+$  碰撞，已测得从单一转动态到每一个末态的具有很高分辨率的微分截面。转动的态-态碰撞是分子体系最基本的能量转移形式，在超声膨胀、气体激光器、大气物理等方面起决定性作用

(苑) 辐射碰撞：辐射场中的碰撞过程不同于真空中的碰撞，辐射场参与了碰撞的中间过程进而影响了碰撞结果。例如，激发态铍与基态钙的碰撞，没有染料强激光辐照时是弹性碰撞；有辐照时，激发能从铍转移到钙，激光和碰

撞过程中形成的分子能级发生共振援辐射碰撞与一系列基本分子现象有关，具有应用价值援辐射对生物（生化过程）的影响与此有关援

（愿）极低温反应反常：晕匀<sub>爆</sub> 垣匀<sub>垣</sub> → 晕匀<sub>爆</sub> 垣匀<sub>垣</sub> 反应，随温度下降有一极小值，然后迅速增长援在星际介质中（温度 员运~ 圆运），这一反应很重要援

## 猿缘 摇摇介质环境中的原子和分子

### 猿缘员 摇摇固体中的杂质原子

摇摇晶体场要改变杂质原子的电子结构援在晶体场中，电子的有效质量变了，电子间的等效相互作用变了，因而原子（离子）的结构也变了援从实验已知固体中杂质原子的外层电子，其能级和相应的红外光谱要发生变化援

### 猿缘圆 摇摇液体（水）中的杂质分子

液体分子场也要改变杂质分子的键性质，特别是生物分子的氢键对环境十分敏感援已知水会引起生物大分子三级结构的变化援

## 猿远 摇摇原子的控制与操纵——分子剪切与原子组装

### 猿远员 摇摇控制和操纵的手段

摇摇控制与操纵原子的手段有以下几种：

- （员）电磁陷阱囚禁粒子技术援
- （圆）激光技术：激光镊子，激光定向量子态激发援
- （猿）激光囚禁与激光冷却原子技术援
- （源）量子阱、人造势场及边界条件对电子和原子的控制援
- （缘）利用隧道扫描探针对原子的操纵援
- （远）分子束外延技术援
- （苑）控制原子和光子的微腔技术援

### 猿远圆 摇摇控制和操纵原子的类型

- （员）量子态定向激发：量子跃迁的控制援





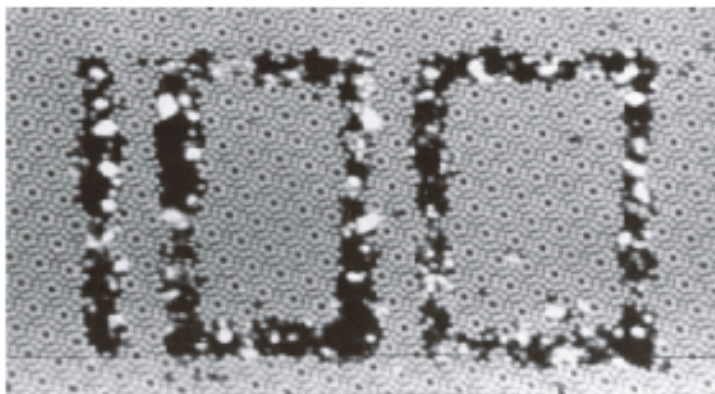


图 猿源 猿源年初，中国科学院真空物理实验室的研究人员成功地利用一种新的表面原子操纵方法，通过 猿猿在硅单晶表面上直接提走硅原子，形成平均宽度为 猿猿（猿~ 猿个原子）的线条援从 猿猿获得的照片上可以清晰地看到由这些线条形成的“猿源”字样和硅原子晶格整齐排列的背景

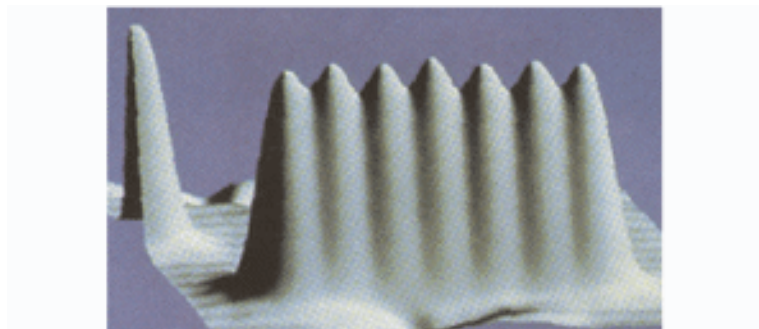


图 猿猿 猿猿单个氩原子（尺度为 猿猿）已被排成了一列

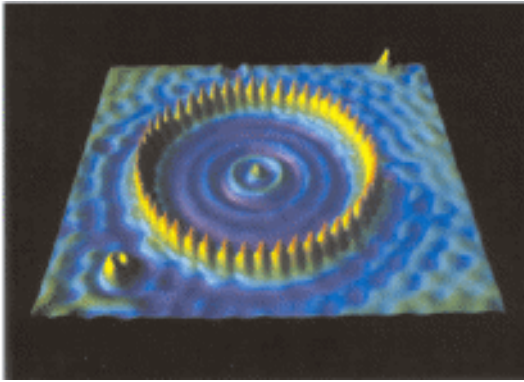


图 猿猿猿 猿用扫描隧道显微镜搬动 猿个 猿原子到 猿表面上构成的量子围栏

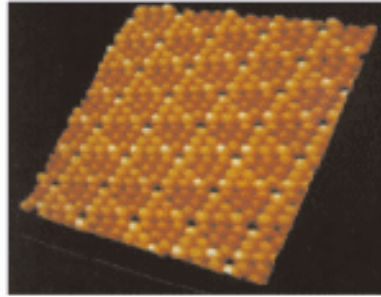
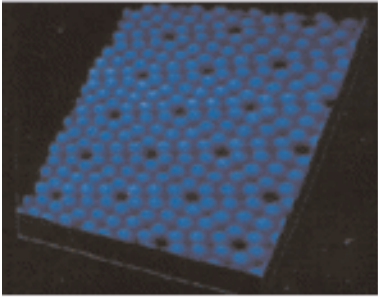


图 猿猿肆 猿硅表面 猿猿猿猿猿猿猿猿猿猿猿猿猿猿猿猿猿猿图 猿猿伍 猿硅表面硅原子的排列

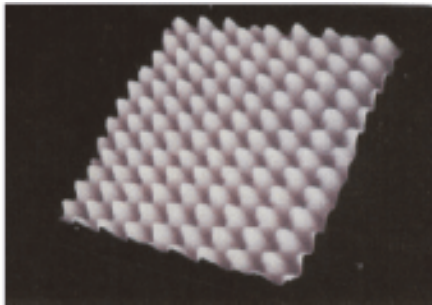


图 猿猿陆 猿用扫描隧道显微镜观察到砷化镓表面砷原子的排列

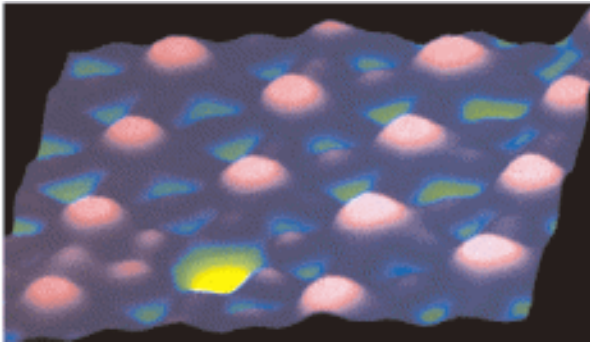


图 碘原子吸附在铂单晶表面上的碘原子阵列扫描隧道图像

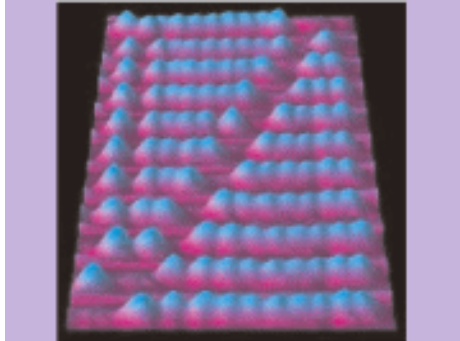
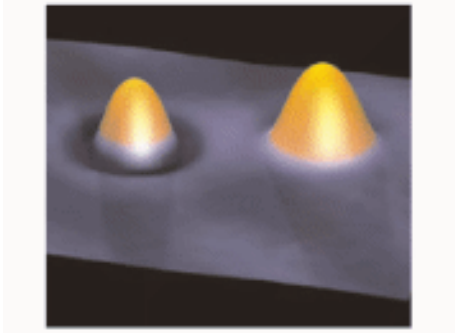


图 扫描隧道图像显示的一个中性金原子（右侧）与一个带负电荷的金原子相伴

图 纳米神算子——分子算盘

### 物理学

## 现代光学

光学是关于电磁辐射和光与物质相互作用的物理学，它包含光的产生和检测、线性和非线性光学过程以及光谱学。与光学有关的产品价值已占到美国国内生产总值（GDP）的 10%。新型激光器、新颖光源、光谱学、非线性光学推动了现代光学的发展，并将进一步推动光学的发展。

目前已有的新型光源包括：半导体二极管激光器（用于红外光谱学和光纤通讯）、可调谐染料激光器（导致高分辨率光谱学革命，可用于制备新的原

子、分子和离子态)、准分子激光器(工作物质是惰性气体卤化物,如载云非束缚的范德瓦耳斯分子,能量储存于电子激发态)、自由电子激光器(相对论性电子在周期性偏转磁场——摇摆器中辐射的从红外到紫外的高强度的相干辐射)、铷玻璃激光器(可用于超强激光诱发核聚变)、基于激光的紫外和载射线源,以及同步辐射光源等援

人们还希望找到从远红外到载射线的高效率的新型激光器,发明新的相干倍频技术(用多光子激发和内壳激发产生),产生从远紫外到载射线的短波激光辐射,发展超强超快的飞秒脉冲技术援

## 第 7 章 光学的主要分支学科

### 第 7 章 激光光谱学

摇摇超精密激光光谱学:染料激光器的稳定度和光纯度已达到员伊元<sup>10</sup>,波长测量精度达到员伊元<sup>4</sup>援

超灵敏光谱学:运用强激光共振光致电离,可以激发和探测到单个原子;利用物质对激光的吸收谱,可测出微量物质援

无多普勒效应的激光光谱学:用正反两束激光进行光谱检测,可消除一阶多普勒效应,但二阶多普勒效应仍然存在援

激光制冷:二阶多普勒效应与粒子能量成正比,可通过激光制冷(到皂云以下)来解决援

超窄光学跃迁:把光激发的杂质原子嵌在固体中,使之没有反冲时,谱线变得很窄,类似于穆斯堡尔效应援

相干拉曼光谱学:用激光代替普通光散射进行拉曼光谱学检测,可排除荧光和背景光的干扰援

### 第 7 章 量子光学

量子光学研究中运用微腔场等技术控制原子的激发和光子的统计性质,产生新型相干态(如各种压缩态、反聚束等非经典激光);并研制光学双稳器件与光学逻辑元件;研究原子与超强激光相互作用等非线性光学现象援

### 第 7 章 微腔场量子电动力学

腔场量子电动力学研究处于里德伯高激发态的原子与微腔的微波和毫米波

辐射相互作用的动力学；通过微腔技术改变电磁真空状态，控制辐射过程与原子的衰变行为和寿命

### 飞秒激光光谱学

飞秒激光光谱学可用于追踪分子振动、转动、非平衡、化学反应等过程。飞秒激光脉冲已达  $10^{-15}$  s，仅几个波长。追踪对象的特征时间如下：①分子振动周期为  $10^{-14}$  s；②转动周期比振动周期长；③半导体中电子的热平衡弛豫时间为  $10^{-13}$  s；④分子中质子和电子的转移时间为  $10^{-12}$  s。

### 强激光

强激光可通过啁啾放大技术获得：种子脉冲→展宽→放大→压缩→展宽→压缩，功率可提高几个量级。

神光一号： $10^{14}$  W

神光二号： $10^{15}$  W

原子核附近的电场： $10^{12}$  V/m

强激光的电场：大于  $10^{12}$  V/m

激光核聚变：是靠激光产生的高温、压缩、超强电场引发的加速和碰撞效应，达到核聚变条件。

激光加速：靠超强电场加速带电离子，可产生兆电子伏特数量级的电子，用于设计小型桌面加速器。

### 非线性光学

利用单晶材料和微结构材料，可产生非线性光学性质，实现对光的振幅、相位、频率、偏振的控制。

### 光子晶体

光子晶体对光波形成介电常数，使光波在周期场中传播，导致光子产生能带结构。

### 电磁场引起的透明

电磁场引起的透明是利用三能级原子与两束激光作用，其中耦合激光束抑制原子向高能级跃迁，使试验激光束无吸收地透过原子介质，同时介质中的光

速变慢，产生很强的非线性效应。这一技术可实现光能的储存，光信息在原子体系中的相干储存、转换与加工。

### 【参考文献】

赵凯华、陈熙远著，赵凯华等译《物理》：进入新千年的物理学。北京：北京大学出版社，2000。

[美] 物理学评述委员会《现代物理学：原子、分子物理学和光学》。北京：科学出版社，1982。

国家自然科学基金委员会《自然科学基金学科发展战略调研报告：光物理学》。北京：科学出版社，1998。

张哲华，刘莲君《量子力学与原子物理学》。武汉：武汉大学出版社，1998。

# 附录德国 亥姆霍兹研究中心核物理研究所 (与 亥姆霍兹研究中心合作) 原子 分子物理研究现状 (与 亥姆霍兹研究中心合作)

## I 援该所当前的研究方向

- (i) 粒子物理、中微子物理、宇宙射线物理( $\gamma$  射线天文学)(与 亥姆霍兹研究中心合作)援
  - (ii) 核物理、重离子物理、放射性核物理 (与 亥姆霍兹研究中心合作)援
  - (iii) 原子、分子物理 (与 亥姆霍兹研究中心合作)援
  - (iv) 核生物与核医学 (与 亥姆霍兹研究中心合作)援
  - (v) 大气与环境科学援
  - (vi) 核考古学 (与中科院长沙地质所, 中国科技大学考古系有合作)援
- 在以上研究中, 实验与理论结合密切援

## II 援栽砸 (栽砸是早期电子束离子阱) 上的电子碰撞与原子离子谱学

主要设备: 强流冷离子束 栽砸 (最近又有电子束离子阱), 带有冷磁约束电子束的 栽砸电子冷却器援

相对能量: 几毫电子伏特至几千电子伏特; 栽砸  $\approx$  栽砸  $\sim$  栽砸, 栽砸  $\approx$  栽砸 援

电子密度: 栽砸  $\sim$  栽砸 援

特别适合研究非弹性电子 栽砸碰撞与电子 栽砸复合 (栽砸  $\sim$  栽砸) 援

(i) 低能电子 栽砸辐射复合援

低能单电子俘获动力学具有很高 (栽砸- 栽砸倍) 的复合率:

$$\text{栽砸}、\text{栽砸} : \Delta\alpha \sim \text{栽砸} \sim \text{栽砸}, \text{栽砸} \sim \text{栽砸}$$

其增强规律为:

$$\Delta\alpha \propto \text{栽砸} \sim \text{栽砸} \sim \text{栽砸} \propto \text{栽砸}$$

这与离子的电子结构无关, 电子密度测量排除三体复合增强, 其机理还不清楚, 非共振辐射电子共振复合 (栽砸), 非外场影响援

(ii) 双电子复合 (栽砸) 援

高能电子在不完全剥离离子上的共振俘获是最有效的复合机制, 它能导致



具有高度结构的双电子复合谱（双电子共振激发与退激发），多电子系统的基本量子过程，以及宇宙等离子体中的过程援

类 蕴系统：低位能级精细结构共振，外场中复合率增强，类氫 杂谱强增宽共振援

类铍离子（悦<sup>2+</sup>，杂<sup>2+</sup>，悦<sup>3+</sup>）系统的研究对象：双激发 砸<sup>2+</sup>共振（皂藻精度），外电磁场效应（在大时减小），自电离竞争；精细结构，多体效应，相对论效应，匪<sup>2+</sup>效应援

（iii）天体物理的重要数据：悦<sup>2+</sup>的 阅<sup>2+</sup>率，铁 蕴壳双电子复合率，部分布居 蕴壳的铁离子（云藻<sup>2+</sup>，云藻<sup>3+</sup>）和宇宙空间的光电离等离子体的数据援

（iv）亚稳态离子激发态寿命的精密测量援

### III 援栽砸上的分子离子物理

设备：在高电流注入器（匀<sup>+</sup>和 栽<sup>+</sup>加速器上产生分子离子束，在栽砸中储存（至 员分钟），平动和内部运动（振动）冷却与栽砸中的电子束速度匹配至很低的相对能量援

研究对象：离解 原复合动力学，二体与三体离解，电子诱导的振动冷却，库仑爆炸成像与分子的平衡几何构形，近阈光致离解，长程分子势等援

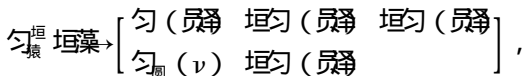
（i）离解 原复合反应援

离解 原复合反应过程如下：

分子离子 垣慢电子  $\xrightarrow{\text{摇反应摇}}$  离解 原复合（阅<sup>+</sup>）  $\longrightarrow$  形成高激发态中性复杂分子  $\longrightarrow$  离解成中性产物援

反应的意义：研究低温电离介质（星际物质）与火焰中的重要过程，检验激发态分子的量子动力学理论援

阅<sup>+</sup>反应率及中性产物的性质对电子能量和分子离子的内部激发十分敏感，可在栽砸上研究匀<sup>+</sup>阅<sup>+</sup>阈截面的阈结构，匀<sup>+</sup>的离解复合中的碎片关联与产物激发：



以及匀<sup>+</sup>，蕴<sup>+</sup>的 晕<sup>+</sup>离解复合援

（ii）电子引起的分子离子振动的冷却与加热：非弹性电子与分子离子碰





## 第 源章 摇原子核物理学

### 源原 摇引 摇言

原子核是物质的核心部分，它构成了宇宙已知总质量的 怨怨豫援 原子核位于原子的中心，其体积为原子体积的 员园<sup>负四</sup>分之一，但具有极大的物质密度，是最重要的量子体系，也是展现量子力学规律最重要的客体和揭示强相互作用原理的天然实验室援

圆世纪里，原子核物理学在科学中占据着重要的地位，它的研究成果对社会发展做出了重大贡献，产生了重大影响；它的实验和理论方法促进了邻近学科与技术的进步援

粒子物理学的发展对核物理学有着强烈的影响，它使核物理学从研究核子（质子和中子）系统的动力学转变为研究由夸克组成的强子系统的动力学援核物理学是研究强子物质与原子核，以及它们的组成、性质和相互作用的科学援

核素图是在质子数和中子数（在  $Z, N$ ）的坐标平面上列出原子核基本性质的图表（见图 源原员）援在核素图上，自然界中稳定的或长寿命的原子核约有 猿园种，稳定原子核的中子数与质子数之比约为： $N/Z \sim 1$ 援偏离这一比例（即丰中子或丰质子）的很多原子核会变得不稳定，这些不稳定原子核形成的边界线叫做中子滴线和质子滴线（意思是在这条边界线外再加中子或质子就会滴下来）援在两条滴线之间可能存在的不稳定原子核约有 远园园- 愿园园种，称为放射性核素，它们参与了天体演化和宇宙核素形成的过程，在地球上已经不复存在，但可以用人工的方法（在加速器上进行的核反应）产生援在大于 怨园的核叫做超铀元素，在大于 员园园的核叫做超重核，目前已合成 在 越元种的超重核（我国已合成 圆种）援核素岛中部的中等质量的原子核结合得较紧、较稳定；在大的原子核受库仑排斥力影响变得不稳定，倾向于往中等质量的原子核裂变；在小的原子核则倾向于熔合成中等质量的原子核，并释放出多余的能量援这就是核能利用的核裂变途径和核熔合途径援

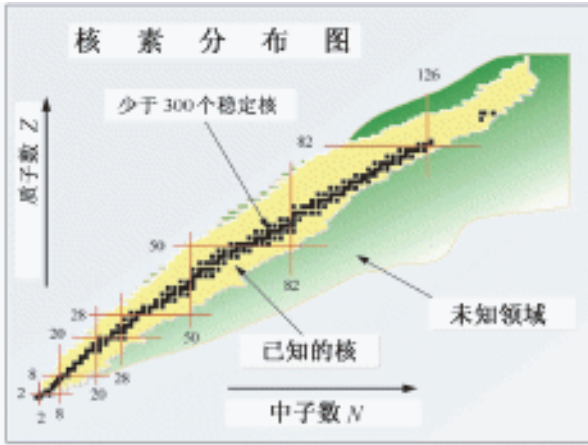


图 源源 摇稳定核与放射性核素图

摇摇天体物理学的发展造成了它与粒子物理学和核物理学的交叉援宇宙演化早期的物质状态，元素的形成与演化，恒星的演化，中子星等致密天体的性质，中微子和暗物质等的探索，都需要粒子物理学、核物理学和天体物理学的共同努力，天体核物理这一交叉学科便应运而生援

当前，核物理基础研究有两个前沿：

(员) 基于放射性束流装置的远离  $\beta$  稳定线原子核的研究援这些人造的远离  $\beta$  稳定线的不稳定的原子核具有不同于稳定核的结构、反应和衰变特性，对它们的研究不仅会促进核理论的发展，而且还有难于估量的应用前景援

(圆) 基于 圆 的核物理援粒子物理与核物理的交叉，使核物理学的研究深入到夸克的层次，把原子核物理学从核子（质子、中子）动力学（圆 圆）推进到夸克 原胶子动力学（圆 圆）援基于 圆 的核物理是核物理研究的另一个前沿援

在核物理应用方面，核武器与核能的利用仍然是当今社会关注的热点援核武器小型化、发射的机动性、反拦截和精确击中目标，是世界上各核大国追求的目标援核能利用的近期目标是发展清洁的、可再生的裂变反应堆（如加速器驱动的反应堆），长远目标则是使核聚变反应堆能投入工业运行援与上述核武器与核能的利用有关的核物理应用基础研究正在加紧进行援

## 低能原子核物理学：结构与反应、裂变与衰变问题

### 作为质子、中子组成的强作用系统的原子核

低能核物理把原子核看成由质子和中子组成的量子多体系统，强相互作用起支配作用，弱作用和电磁作用也参与了原子核内的过程。由于能量低，夸克和胶子的自由度不能明显地表现出来，但其低能效应仍然存在，常常以介子的形式表现出来。卢瑟福因发现原子核，卡特威克因发现中子曾分别获得诺贝尔物理学奖。

### 低能核物理学有结构、反应与衰变三方面的问题

#### 原子核结构

原子核有三类运动：平均场支配下的独立粒子运动（即原子核的壳层结构），与原子核变形有关的集体运动（振动和转动），以及核子关联产生的集团运动（核子对关联、 $\alpha$ 集团等）。新运动模式还在不断被发现（如各种形式的巨共振，新集体运动模式，量子无规或量子混沌运动等）。费米因发展原子核壳层模型，玻尔、马耶尔和斯特鲁普曼因发展原子核的集体运动模型曾分别获得诺贝尔物理学奖；费曼因发展原子核集体运动的相互作用玻色子模型（ $\rho$ 模型）而获得美国最高物理学奖。

#### 原子核反应

已知的原子核反应类型有势场散射，少数核子参加的直接反应，较多核子参加的中间过程反应，几乎所有核子都参加的复合核反应，以及重离子核反应。核反应研究的趋势是使反应条件精细可控制，反应截面的测量更精确、更细致，提供尽可能详细、准确、实用的数据，特别是快中子裂变、融合反应以及天体核过程的关键数据。费米因发现太阳燃烧的核反应链而获得诺贝尔物理学奖。

#### 原子核裂变

原子核裂变主要是开展对核武器与核能利用（如与清洁能源有关的诱发



中的应用做一类比，可以看出：20世纪 70 年在原子、分子、凝聚态物理学中的应用导致许多重大发现与诺贝尔奖；21 世纪 80 年在核子、强子、原子核物理学中的应用也将导致许多重大发现与诺贝尔奖



图 源 摇 我国位于兰州的重离子加速器国家实验室正建造具有国际先进水平的放射性核束流装置——冷却储存环 悦 砸

源 德 圆 摇 放射性束流核物理开创的新天地

源 德 圆 摇 人造极端条件下的核物理研究

摇 摇 (员) 极端高自旋条件下的研究：原子核能承受的角动量 允 有多大？与此相关的原子核所能承受的形变有多大？研究惯性力（离心力、科氏力）与核力竞争下的核现象，按照等效原理研究引力与核力的竞争

(圆) 极端高温高密度条件下的研究：原子核所能承受的核温度 栽 有多大？研究动能与势能竞争下的核现象；研究原子核的液 原 气相变

(猿) 极端同位旋条件下的研究：远离  $\beta$  稳定线的原子核 渣 晕 原 在 渣 有多大？中子和质子滴线在哪里？库仑力与核力竞争下的核现象；已发现原子核的新形态：中子晕与质子晕；超重核的 (粤, 在) 有多大？超重岛是否存在？原子核结合的本质是什么？

源 德 圆 摇 远离核与超重核的实验研究

(员) 远离核：圆 源 缘 年，全世界将有 员 台放射性束流加速器投入使用，以





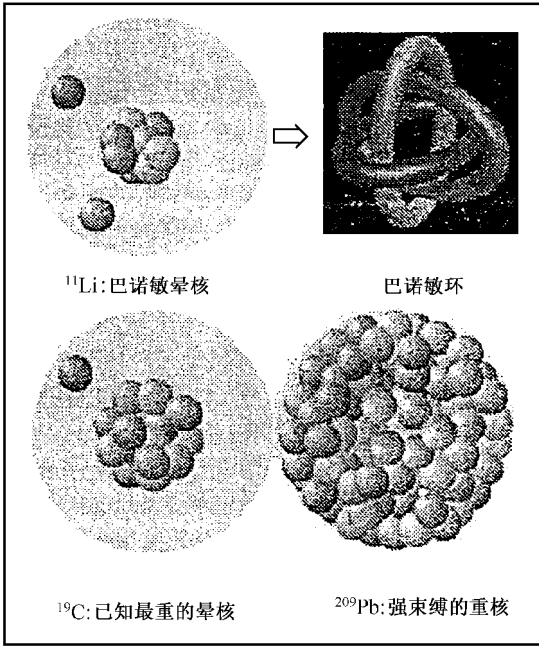


图 源原核中子晕核<sup>11</sup>Li和<sup>19</sup>C的大小与运动示意图

(成对力?)，等等援面临的问题是：目前用于描述中子质子皮、晕的平均场理论是否够用？是否需要双中心、三中心平均场理论？如何发展原子核的弱结合态、连续谱、正能结合态（共振态）的核结构理论？剩余相互作用在结构稳定性中的作用是什么？需要发展基于相对论平均场理论（<sup>19</sup>Li）的组态混合壳模型吗？如何描述核内的集团结构？当集体运动成为集团的相对运动时，如何超越玻尔、莫特逊（<sup>19</sup>Li）模型，对其进行描述？

反应：光学模型，直接反应，中间过程反应，复合核反应等传统理论是否够用？如何描述集团转移与重组，以及这些不同反应道的强耦合？

衰变：如何描述集团重组与散裂，以及不同衰变道的强耦合？

(圆) 超重核援

世界上已合成在<sup>118</sup>Ug, <sup>118</sup>Ug, <sup>118</sup>Ug... <sup>118</sup>Ug的原子核, 中国合成了<sup>118</sup>Ug援

下面分述超重核研究领域面临的问题援

结构：如何预言超重岛？液滴模型 壳修正行吗？在哪里结束？超重核是什么结构？是准分子还是复合系统？如何研究其结构？相对论平均场理论

(超核) 可以吗? 超重核结构面临的是剩余作用与组态混合, 正能结合态的稳定性, 能量在各自由度和在动能 势能之间的分配等一系列问题, 特别是正能结合态和正能非结合态的耦合与竞争问题, 位垒穿透问题等援

衰变: 衰变形式除  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  等外, 还有哪些? 是否存在准分子散裂? 位垒与位垒穿透如何描述 (衰变模式与合成途径密切相关)?

关键问题: 对弱耦合或正能结合态系统, 剩余作用、组态混合、能量分配与势能化对结构稳定性起着十分重要的作用援因此, 对于远离核和超重核, 必须考虑剩余作用、组态混合、正能态连续谱才能作出正确的描述援基于 超核的组态混合壳模型或集团结构模型也许比多中心平均场理论更加简洁有效援在 超核中, 介子场能更好地描述核内的介质效应 (介子场的质量重整化效应和储能效应)援

## 9.2 中高能原子核物理学

中高能原子核物理学研究核内介子、夸克自由度, 以及基于 超核的核物理与夸克 胶子等离子体 (超核)援

### 9.2.1 核内介子、超子自由度

(1) 核内介子: 当入射核子能量 超过 时, 可产生  $\pi$  介子援已在核内发现了  $\pi$  介子的电磁流, 核中  $\pi$  凝聚, 以及核中  $\Delta$  激发援

(2) 核内超子: 把超子植入核内可形成超核援利用介子工厂产生的 介子等介子束, 已发现的超核有:

一种  $\Lambda$  超核:  $\Lambda \rightarrow \Lambda$

两种双  $\Lambda$  超核:  $\Lambda \Lambda$   $\Lambda \Lambda$

$\Sigma$  超核:  $\Sigma$   $\Sigma$ ;

超核:  $\Lambda$

### 9.2.2 核内夸克与 超核

(1) 核内夸克: 通过电子对核的深度非弹性散射实验发现了核内的夸克分布和 效应, 其分布对氦核和对铁不同, 暗示核内核子变胖, 束缚夸克的袋子变大援

(2) 超核: 夸克束缚在核子和介子之内就像装在袋子内, 在高温、高密

度条件下，核内的这些核子袋子彼此交叠，使得夸克解除一个核子或介子对它的禁闭可以在核内较大的范围内运动，形成夸克 原胶子等离子体（ $QGP$ ），这是宇宙早期的状态，其产生条件为：

$$\rho \gtrsim \rho_c, \quad T \gtrsim T_c, \quad \epsilon \gtrsim \epsilon_c$$

产生后的信号表现为 产额压低，奇异粒子产额反常等

### 基于 $QGP$ 的核物理深入到夸克层次

#### 强子物理

强子物理的研究对象包括：核子的结构，如质量、自旋、磁矩；介子的结构，如质量、自旋、磁矩，衰变分支比；强子的结构，如质量、自旋、磁矩，衰变分支比；多夸克强子，如五夸克和四夸克强子等（应包括夸克海和胶子的贡献）

#### 基于夸克的核物理

基于夸克的核物理应从  $QGP$  出发研究轻核（如氘，氚，氦等）的结构与性质，重核的结构与性质

#### 基于 $QGP$ 的核物理研究的困难

$QGP$  在核物理中的应用是空前复杂的量子多体问题，类似于  $QGP$  在原子、分子和凝聚态物理中的应用基本困难有：

(1)  $QGP$  真空与强子耦合而且可变晶体能带告诉我们，从实验中可确定电子的晶体背景结构，那么能否从实验上确定夸克的背景  $QGP$  为真空？ $QGP$  真空是否为 真空

(2)  $QGP$  多体问题：包括真空中粒子对的产生、湮灭，粒子数随能量变化而变化，价夸克与真空虚夸克对和胶子的耦合

(3) 强耦合非微扰非线性问题：目前还缺乏有效的理论方法

#### 等效理论与中间形态理论的必要性

固体理论的经验教训：求解  $QGP$  多体问题的困难，使固体物理成为 那么，求解  $QGP$  多体问题的困难，同样将使核物理成为  $QGP$  各种等效理论活跃的舞台等效理

论的特点是：

(员) 它是包含部分有效动力学自由度的理论援

(圆) 它是包含 强子 的部分相关信息的理论援① 强子的命运：按 强子 改造，作为 强子 等效理论而存在并发挥作用援其有效自由度为：介子与重子自由度是作为夸克 原胶子 复合自由度而出现的援② 强子的命运：按 强子 改造，作为 强子 等效理论而存在并发挥作用援其有效自由度为：核子自由度是作为奇数个夸克的复合自由度而出现的援③ 强子 强子 与 强子 的关系：强子是 强子 在介子与重子有效自由度子空间的低能等效理论援强子是 强子 在核子有效自由度子空间的低能等效理论援这些子空间是通过 强子 动力学对称性理论约化的，并保持所期望的 强子 的部分对称性信息援

### 强子 发展基于 强子 的核物理的有利条件

核物理学的宝贵遗产是发展基于 强子 的核物理的良好起点援

### 强子 平均场理论

化多体问题为单体问题，即独立粒子运动援平均场的变化导致集体运动，即独立粒子的相干运动援

成功例子：原子物理的平均场理论——原子的壳层结构，原子核物理的平均场理论——原子核的壳层结构，凝聚态物理的平均场理论——固体的能带结构援

### 强子 有效自由度理论

冻结核实自由度，只处理价粒子自由度援把全部自由度问题简化为部分自由度问题援原子物理、原子核物理、固体能带论的研究都采用此方法，并已取得实效援

### 强子 多体关联理论

多体系统结构的等级性与层次性把整体结构分解为各种类型的子结构，逐次逼近求解援核物理与固体物理成功地运用了关联和结构的等级理论：先处理平均场导致的独立粒子运动，再处理平均场以外的两体关联或独立粒子对运动、独立准粒子运动（声子理论）、集团运动等援

## 源源源动力学对称性理论

源的按能量划分的动力学对称性把整个源的希伯特空间约化为由确定的守恒律和相应的量子数确定的子空间，从而自动保留了源的部分对称性信息援

成功例子：粒子物理中的 猿(猿) 夸克模型；核物理中的 猿(猿) 模型、 猿(猿) 模型、 猿(猿) 模型；原子分子物理中的 猿(猿) 模型；量子光学中的 猿(猿) 模型、 猿(猿) 模型；固体物理中的 猿(猿) 模型援(?)

## 源源源能量标度原理

自然界能量的量子特性：不同运动模式有各自特有的活动能区和休眠(冻结)能区援应发展各能区的有效自由度理论，特别是低能区的有效自由度理论：在活跃的相关自由度所张的子空间内的、约化的源的等效理论，通过对质量和耦合常数的重整化来包括其余自由度的影响援

## 源源源对“万有理论”的理解

万有理论应当包含各种等效理论，并通过等效理论来解释实验中最基本的微观理论援

## 源源源天体核物理学——宇宙元素的合成及其丰度

与天体环境下的核过程有关的对核结构、核反应和核衰变的研究，包括以下几个方面的内容援

### 源源源从大爆炸到宇宙原初核合成：终止于氢

宇宙大爆炸开始后，从强子化到氢、氦、氘、氦元素的产生的基本过程如下：

源源源以内：四种力大统一时期；

源源源 开始强子化；

源源源 弱力与电磁力分离；

源源源 源源源 元素原初合成(氢、氦、氘、氦)援氢的丰度为 源源源援

### 9.1 太阳等恒星的核反应燃烧与平稳的核合成

质量为  $10^{29}$  ~  $10^{31}$  的恒星的核反应过程：氢是太阳等恒星燃烧的原初燃料，氢燃烧后合成氦，氦燃烧后合成碳、氧等轻元素，终止于铁元素(约  $10^{26}$ )。恒星寿命主要由氢的燃烧阶段决定，与恒星质量有关。研究恒星内核燃烧和轻元素合成的反应链，需要有关这些核的结构、反应和衰变的知识。

### 9.2 超新星爆发与爆发式核合成

质量超过 8 倍太阳质量的恒星，核燃烧终止后，由于引力塌缩将发生超新星爆炸，诱发爆发式核合成。其主要过程有：快质子俘获过程 (rp 过程)、快中子俘获过程 (r 过程)、慢中子俘获过程 (s 过程，与  $\beta$  衰变联合，合成重核)。上述原子核多数临近滴线区，绝大多数不稳定，需研究它们的结构、反应和衰变，以获得精确的信息。

### 9.3 化学元素的形成、演化与丰度

要理解化学元素的形成、演化与丰度，必须求解在天体条件下，上述核反应与核衰变链的方程组，此时需要输入天体环境的数据，如温度、密度、化学组成，以及核物理数据，如所有相关核的结构和衰变与反应的数据。目前还缺乏远离核，特别是天体核物理的关键核的数据。

### 【参考文献】

1. 赵凯华等译《物理》：进入新千年的物理学。北京：北京大学出版社，2000。
2. [美] 原子核物理学专门小组编《现代物理学：原子核物理学》。北京：科学出版社，1989。
3. 徐躬耦，杨亚天编《原子核理论：核结构与核衰变部分》。北京：高等教育出版社，1986。
4. 徐躬耦，王顺金编《原子核理论：核反应部分》。北京：高等教育出版社，1989。
5. 黄卓然著，张卫宁译《高能重离子碰撞导论》。哈尔滨：哈尔滨工业大

学出版社，

王顺金世纪核物理发展前沿探讨原子核物理评论  
(员)：



## 第 10 章 基本粒子物理学与量子场论

### 10.1 基本粒子物理学的现状与成就

基本粒子物理学是研究时间、空间和物质的基本属性，即物质的基本组元和它们的基本相互作用的科学。基本粒子物理学追求物质世界及其运动规律的统一性。基本粒子是极小的微观世界，需要借助具有极高能量的粒子探针才能获得精确的信息。因此，又把基本粒子物理学称为高能物理学。

20 世纪，基本粒子物理学的进展使人们对物理学基本定律的认识达到了新的水平，我们把这种新认识称为基本粒子物理学的标准模型。

研究基本粒子的主要实验手段是高能加速器（辅之以宇宙线）。现在世界上著名的高能加速器和宇宙线观测站有：

- 美国布鲁克海文国家实验室（BNL）的相对论重离子对撞机（RHIC）；
- 美国费米实验室（Fermilab）的质子-反质子对撞机（Tevatron）；
- 美国斯坦福大学的直线加速器（SLAC）；
- 美国得克萨斯州的超级超导回旋加速器（SSC）（计划已取消）；
- 西欧核子研究中心（CERN）的大型强子对撞机（LHC）；
- 北京正负电子对撞机（BEPC）；
- 中国羊八井宇宙线观测站：主要观测  $\gamma$  暴。

### 10.2 基本粒子物理学的重大发现

20 世纪后半叶，基本粒子物理学的研究有重大进展，这些进展导致基本粒子标准模型的建立。20 世纪 60 年代以后，基本粒子物理学重要的实验发现和理论进展见表 10-1 所示。从表中可见，基本粒子及其相互作用的基本对称性的实验发现和理论进展是贯穿近 50 年来粒子物理学大发展的主线，而李政道和杨振宁关于宇称不守恒的发现正是这一主线的开端。

表 缘原瑶基本粒子物理学主要的实验发现和理论进展

发现年代	发现内容
缘缘缘	李政道和杨振宁发现宇称不守恒
缘缘源	发现宇称和电荷共轭联合不守恒
缘缘苑	温伯格和萨拉姆提出弱电统一理论，引进真空对称性自发破缺和黑格斯粒子才能使电子和中间玻色子获得质量援为理解对称性破缺的本质以及确认黑格斯粒子是否存在，西欧核子研究中心建造了大型强子对碰机（撞机）
缘缘源	丁肇中和里克特发现粲夸克（糟）
缘缘猿	发现带电和中性中间玻色子 宰 <sub>μ</sub> <sup>±</sup> ，在 <sub>μ</sub> <sup>±</sup>
缘缘缘	发现顶夸克（贼）
缘缘苑	发现底夸克（遭）

### 缘缘圆瑶组成物质的基本粒子

基本粒子是在我们当前的实验条件和认识水平下发现的组成万物的最小单元援按照基本粒子标准模型，基本粒子可分为两大类：①参与引力作用、电磁作用和弱作用的轻子；②参与引力作用、电磁作用、弱作用和强作用的夸克援轻子和夸克又分三代，每一代之间都有很好的代对称性援三代轻子与三代夸克的名称和质量列于表 缘原圆，它们的内禀量子数列于表 缘原猿

表 缘原圆瑶三代基本粒子夸克和轻子的对称性

	第一代		第二代		第三代	
	粒子	质量(皂 <sub>费</sub> )	粒子	质量(皂 <sub>费</sub> )	粒子	质量(皂 <sub>费</sub> )
轻子	电子 藻 中微子 $\nu_{藻}$	缘缘缘缘缘 约缘缘缘	$\mu$ 介子 $\mu$ 中微子 $\nu_{\mu}$	缘缘缘 约缘缘缘缘	$\tau$ 介子 $\tau$ 中微子 $\nu_{\tau}$	缘缘怨 约缘缘怨缘
夸克	上夸克 怎 下夸克 苗	缘缘缘缘缘 缘缘缘缘源	粲夸克 糟 奇异夸克 泽	缘缘怨 缘缘怨缘	顶夸克 贼 底夸克 遭	缘缘怨 缘缘圆

摇摇表 缘原圆中基本粒子的质量是以质子质量为单位的援由表可见，三代轻子和三代夸克之间存在巨大的质量差异，而中微子的质量还没有完全确定下来援



轻子数 均反轻子数 越远越元越元种援

共 源种基本粒子援

缘 源种基本粒子的相互作用

现已发现的基本粒子的相互作用有 源种，按照标准模型，所有基本粒子的相互作用都是通过规范场来传播的援传播基本相互作用的规范场粒子叫做媒介子或中间玻色子，也有 源类，分别介绍如下：

(员) 强相互作用援这是夸克之间的相互作用，通过 愿种具有复色的胶子来传播援这 愿种具有复色的胶子构成颜色 杂哉(猿) 规范场，是短程的最强相互作用，统治着原子核和强子世界，并通过强子物质在天体现象中起作用援

(圆) 电磁相互作用援这是带电轻子和夸克之间的相互作用，通过一种光子来传播援这种光子构成 哉(员) 规范场，是次强的长程相互作用，在微观世界、宏观世界和天体世界中都起作用援

(猿) 弱相互作用援这是轻子和夸克之间的相互作用，通过三种中间玻色子来传播，是力程最短、强度很弱的相互作用援这种相互作用统治着基本粒子、强子和原子核的衰变过程，并通过轻子、强子和原子核衰变在天体现象中起作用援

(源) 引力相互作用援这是轻子、夸克、规范场粒子和所有物质之间都普遍存在的相互作用援它是长程的、强度最弱的相互作用，在微观世界中的作用可以忽略，但统治着天体世界援

上述 源种基本相互作用的名称、规范群、力程、强度和起作用的范围见表 缘原，传递这些相互作用的规范场量子的名称、质量、电荷和自旋见表 缘原援

表 缘原 四种基本相互作用的名称、规范群、力程、强度和起作用的范围

类型	强度	力程	规范群	作用范围
引力相互作用	最弱	长	U(1)	天体、宇宙
电磁相互作用	强	长	U(1)	微观、宏观
弱相互作用	弱	极短 (约 10 <sup>-16</sup> m)	SU(2)	微观
强相互作用	最强	短 (约 10 <sup>-15</sup> m)	SU(3)	微观

表 9-1 传递四种基本相互作用的规范场量子的名称、质量、电荷和自旋

相互作用类型	介子名称	电荷	自旋	质量 (MeV)
引力作用	引力子 $g_{\mu\nu}$	0	2	0
电磁作用	光子 $\gamma$	0	1	0
弱作用	中间玻色子 $W^{\pm}, Z^0$	±1, 0	1	80, 91
强作用	胶子 $g$	0	1	0

传递四种基本相互作用的规范场量子的种类数为：

光子种类 + 中间玻色子种类 + 胶子种类 + 引力子种类

即共 12 种媒介子

轻子无色，不参与强相互作用；夸克有红、黄、蓝三色，是强相互作用的色荷

常见强子的夸克结构举例：

重子：质子、中子等重子

介子： $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ ,  $\rho^+$ ,  $\rho^0$ ,  $\rho^-$ ,  $\omega$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $\phi$ ,  $\Omega^-$  等

介子： $\rho$  介子， $\pi$  介子， $\eta$  介子

$\rho^+$ ,  $\rho^0$ ,  $\rho^-$ ,  $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $\phi$ ,  $\Omega^-$  等

## 基本粒子物理学和量子场论的内容

现代粒子物理学和量子场论的基本内容包含在基本粒子的标准模型及其应用中，现分别简介于下

### 基本粒子的标准模型

基本粒子的标准模型由以下三种理论组成

(1) 量子电动力学 (QED)：这是关于带电轻子和夸克与电磁规范场相互作用的量子理论，其中最主要的部分是电子与电磁场相互作用的量子理论它属于阿贝尔规范场的量子理论

(2) 量子弱电统一理论 (SU(2) $\times$ U(1))：这是量子电动力学 (QED) 的推广，把电磁作用与弱作用统一起来，建立弱电统一的 SU(2) $\times$ U(1) 的规范理论它属于非阿贝尔规范场的量子理论

(猿) 量子色动力学 (QCD)：这是关于夸克与胶子的规范场相互作用的强相互作用的量子理论。它属于更复杂的非阿贝尔规范场的量子理论。把上述三种相互作用的规范场理论统一起来的规范场理论叫做大统一理论 (GUT)。援目前这种理论还没有最后定型,但多数人倾向于大统一理论,因为它最简明、最具有代表性,可重整化援

### 猿 标准模型的应用

除了量子电动力学和弱电统一理论传统而广泛的应用外,目前标准模型的应用主要集中在强子物理方面,其中包括以下研究:

- (员) 介子的结构与衰变,如  $\rho$  物理、 $\omega$  介子物理;
- (圆) 重子的结构与衰变,如核子的结构、重子的结构,最近的夸克重子态 (多夸克态);
- (猿) 强子和轻子参与的碰撞和反应援

### 猿 基于 QCD 的低能等效理论和格规范理论

标准模型在应用中发展出各种有效的理论计算方法。量子电动力学和弱电统一理论相互作用的特征强度不大,因而发展了十分有效,而且非常精密的微扰理论,已获得成功的应用,并与实验结果惊人地一致。但是对于电磁作用的强束缚态问题,仍然缺乏束缚态非微扰的量子电动力学场论。对于量子色动力学,在高能渐进自由区,已发展出十分有效的高能微扰理论,并在与实验的联合研究中取得很大成功。但在中低能区,特别是对于强作用束缚态问题,由于作用强度大,微扰理论失效,需要发展 QCD 的非微扰量子场论方法。遗憾的是,这方面的进展不大。在这种情况下,出现了各种基于 QCD 的低能等效理论和近似理论,包括:各种夸克袋模型,如  $\rho$  和  $\omega$  再袋模型;夸克手征模型;QCD 的低能等效场论,如整体色模型 (CQM);光锥 QCD (LCQCD);哈密顿形式的非微扰理论;以及基于对称性和流代数的求和规则援

在时空离散化格点上对 QCD 直接近似求解,发展了格规范理论 (LQCD),但由于计算量太大,目前只达到有限的精度,所计算的物理量范围也受到一定的限制援

### 猿 基本粒子标准模型的成就

基本粒子标准模型之所以成为目前人类认识微观物质世界所达到的最高境

界，是因为它对微观世界描述的正确性和精度达到了令人吃惊的程度，其中最突出的是量子电动力学和弱电统一理论援量子色动力学虽然还不能与之相比，但正稳步向这一目标发展援下面列举了标准模型的各种理论在描述实验结果时达到的精度援

(1) 量子电动力学: 精度达  $10^{-12}$ , 如电子反常磁矩, 兰姆位移等援

(2) 量子色动力学: 精度达  $10^{-4}$ 援

(3) 弱电统一理论: 在高能区, 由于渐进自由, 微扰论的描述精度很高; 在中低能区, 格点规范数据、等效理论的描述精度尚不高援

## 5.1 基本粒子标准模型的基本问题

基本粒子标准模型的基本问题涉及粒子物理学的进一步发展和物理学的变革, 这些问题的正确提出和正确表述是困难的, 因为它涉及对基本粒子现有理论的最深层次的认识和对现有理论与实验之间关系的深刻理解援下面根据粒子物理学界多数学者的观点和笔者个人的看法与偏好, 提出若干问题予以简述, 仅供读者研究参考援

### 5.1.1 对称性自发破缺的本质与机制

标量场真空对称性自发破缺:  $\langle \phi \rangle \neq 0$  的本质与机制援

通过赫格斯机制给轻子 (电子  $e$ ) 和中间玻色子 ( $W, Z$ ) 以质量, 其物理本质如何?

对称性自发破缺使强力、电磁和弱力产生巨大的差别, 其机制与本质如何? 对称性破坏的本质与机制是什么?

### 5.1.2 基本粒子质量的起源与本质

与上一个问题密切相关的问题是基本粒子质量的起源与本质援

用赫格斯机制解释质量的起源对吗?

轻子的质量差为什么如此大?

什么是质量?

### 5.1.3 赫格斯粒子存在的问题

赫格斯粒子的质量上限  $M_H$  是否小于  $10^4$  GeV?

为什么一直没有发现赫格斯粒子？是因为赫格斯粒子太重？还是赫格斯机制不对，或者赫格斯粒子根本就不存在？

### 缘圆原 夸克禁闭的本质与机制

夸克是绝对禁闭的还是相对禁闭的？

夸克禁闭的本质与机制是什么？

### 缘圆原 夸克和轻子的三代及其对称性的本质

夸克和轻子只有三代吗？为什么只有三代？

为什么出现三代的对称性？其本质是什么？

### 缘圆原 基本粒子的种类和理论参数的数目

基本粒子有 远种：基本粒子种类 垣基本媒介子种类 越愿垣猿垣源援

理论参数共有 愿个，包括质量参数 员圆个：猿(轻子) 垣远(夸克) 垣圆(媒介子) 垣员(黑格斯粒子) 越愿；耦合强度参数 猿个：圆垣员垣越猿，其他参数如混合角等共 源个援

目前的基本粒子(在 员圆槽上仍是类点粒子)是基本的吗？

还有新的基本粒子吗？是否有亚夸克粒子？

### 缘圆原 大统一理论问题

大统一能量标尺是否为  $10^{16} \text{GeV}$  或  $10^{17} \text{GeV}$ ？

有几种大统一方案，如 杂哉(缘)，杂哉(员)，耘，耘，通过赫格斯机制破缺到标准模型：杂哉(猿)  $\otimes$  杂哉(圆)  $\otimes$  哉(员)援

杂哉(缘) 大统一理论最简明、最具有代表性，可重整化援

质子衰变没有发现，理论预言为  $\tau_{\text{质}} \approx 10^{31}$  年(计算值)，而实验确定  $\tau_{\text{质}} > 10^{32}$  年！

大统一可能吗？

### 缘圆原 引力量子化

引力相互作用是规范场吗？

引力量子化需要吗？可能吗？

引力可能统一吗？



如何实现引力量子化？

如何统一量子引力？

### 缘 起 发 散 问 题

发散问题是与基本粒子结构的时空扩展性有关，还是与真空量子涨落的属性有关？

发散与点结构（定域性理论）相联系，扩展结构不发散

发散与真空涨落的属性相联系：白噪声发散，有色噪声不发散

基本粒子的时空结构与真空量子涨落的属性相关，它们可能是同一事物的两个方面

### 缘 起 规范对称性的本质

规范对称性的起源和物理本质是什么？

规范对称性是真空背景的某种属性吗？是它的某种局域对称性吗？

规范对称性为什么能决定基本相互作用？

### 缘 起 真空的本质

真空是物理背景吗？它有哪些基本属性？

真空背景的微观、宏观和宇观属性，特别是微观和宇观属性是什么？

真空背景如何影响基本粒子和宇宙的结构？

### 缘 起 时空的本性

什么是时空？时空是真空背景的几何结构吗？

与真空背景的微观、宏观和宇观结构相对应，什么是时空的微观、宏观和宇观几何结构，特别是时空的微观和宇观几何结构？

时空与物质的微观、宏观和宇观运动的联系是怎样的？

宏观时空与微观时空的属性有何不同？

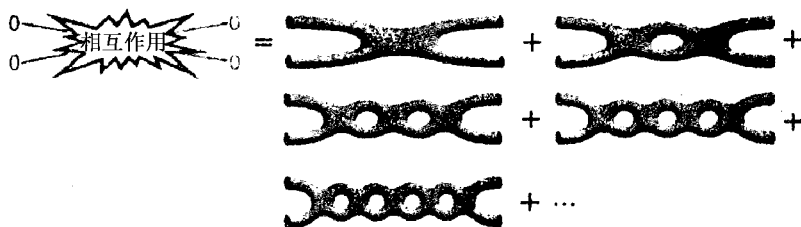
量子时空的含义是什么？

### 缘 起 引力的统一与超弦

基本粒子物理学的崇高目标是实现引力量子化和统一量子引力



缘种超弦理论，其间有对偶性：I 型，杂化 韵，杂化 耘，II 粤型，II 月型（自对偶）援



一根弦与另一根弦的相互作用的净效应等于各个圈图的影响的总和

图 缘缘 缘两条弦相互作用示意图

### 缘缘 缘酝理论

酝理论有多种含义，如：酝 韵 韵 (神秘理论)，酝 耘 耘 (母理论)，酝 粤 粤 (膜理论)，酝 耘 耘 (矩阵理论) 援

酝理论的特点是：① 缘越 缘；② 形成对偶网，统一了 缘种弦理论和 缘维超引力理论（见图 缘缘 缘）援③ 导致一种新的数学产生援

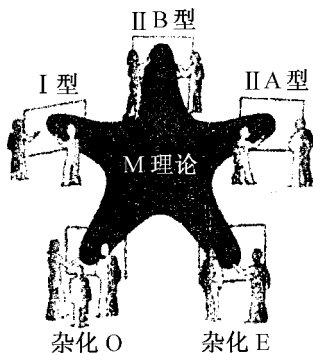


图 缘缘 缘酝理论中各种弦理论的关系

### 缘缘 缘超弦理论面临的问题

超弦理论面临的问题有：① 超对称伴随粒子未被发现；② 引力子和磁单极未被发现；③ 赫格斯粒子未被发现；④ 缘种超弦理论不唯一；⑤ 如有亚夸克存

在，则超弦理论会有本质变化；⑥多余维度的卷缩（多余维是超越的、喜悦的、原子的、复的定向紧流形），欧拉数与夸克、轻子代数有关，对三种作用常数有影响。

## 粒子物理学与核物理学的交叉

粒子物理学与核物理学的交叉和关联表现在以下几个方面：

（鼠）粒子物理促进了核物理向纵深发展：出现了基于夸克的核物理，为核物理从夸克层次上研究原子核提供了理论基础。

（牛）核物理为粒子物理提供了检验标准模型的实验室：宇称不守恒的验证在核物理上完成；夸克胶子等离子体（QGP）需要通过超高能重原子核碰撞来产生；穆斯堡尔效应是在高能电子对原子核的深度非弹性散射中发现的。

（虎）粒子物理的标准模型在强子物理和核物理中的应用，已成为粒子物理学家和核物理学家共同的事业。

## 粒子物理学与天体物理学和宇宙学的关联

粒子物理学与天体物理学和宇宙学的关联表现在下列几个方面：

（鼠）基本粒子物理学和宇宙早期演化有着密切的联系，基本粒子物理学为大爆炸宇宙的早期演化过程的描述提供了理论基础。

（牛）宇宙线提供了目前加速器不能产生的超高能（ $10^{15}$ ~ $10^{20}$  eV）粒子，人们希望从宇宙线中找到反物质和磁单极。

（虎）暗物质与暗能量是宇宙学和粒子物理学共同研究的课题，只有两门学科共同努力才能解决，而这将促使粒子物理学、天体物理学和宇宙学的研究工作产生革命性的突破。

## 【参考文献】

赵凯华、陈熙远著，赵凯华等译《物理》：进入新千年的物理学。北京：北京大学出版社，2000。

丁一兵《统一之路：20世纪理论物理前沿课题》。长沙：湖南科学技术

出版社, 员 愿 苑

猿 猿 〔美〕基本粒子物理学专门小组援 愿 愿 年代物理学：基本粒子物理学援  
北京：科学出版社, 员 愿 苑

源 猿 杨振宁援 基本粒子及其相互作用援 长沙：湖南教育出版社, 员 愿 愿

缘 猿 〔美〕月·格林援 宇宙的琴弦援 长沙：湖南科学技术出版社, 圆 愿 愿

远 猿 戴元本援 相互作用的规范理论援 北京：科学出版社, 员 愿 苑

苑 猿 李政道援 粒子物理和场论简引（上、下册）援 北京：科学出版社,  
员 愿 苑

愿 猿 斯蒂芬·霍金援 万有理论：宇宙的起源与归宿援 海口：海南出版社,  
三环出版社, 圆 愿 愿