

# 固体物理学

任课教师

王冠中 [gzwang@ustc.edu.cn](mailto:gzwang@ustc.edu.cn) Tel: 63603323

曾长淦 [cgzeng@ustc.edu.cn](mailto:cgzeng@ustc.edu.cn) Tel: 63602453

课件下载网址: [staff.ustc.edu.cn/~gzwang](http://staff.ustc.edu.cn/~gzwang)

# 绪 论

## 课程的要求

1. 每周5节课，周二（3、4、5）周四（3、4）
2. 请坚持听课（尽管我们不做记录）
3. 请按时完成作业（作业占20%的总评成绩）
4. 期中考试占总评成绩的30%，期末考试占总评成绩的50%

# 对严济慈班同学的课程要求

1. 请坚持听课
2. 请按时完成作业、参加讨论、完成研讨作业（平时成绩占总评成绩超过50%）
3. 期中和期末考试占总评成绩低于50%
4. 研讨作业对严济慈班同学是必须完成，对其他同学是可选择

# 固体物理的研究对象、研究方法 和相关教材

# 固体物理学的研究对象

主要研究对象：固态物质、固态物质的物理性质

重点不在于描述固体的宏观物理性质，而是去阐明和解释这些性质，并找到调控这些性质的方法。

例如：普通物理中我们就学过欧姆定律，也试图解释这一定律，固体物理将说明固体中电阻的来源，基于几条基本假定推导出欧姆定律，并分析不同固体导电性能差异的原因。

固体是由**大量**原子和分子组成的。典型值 $10^{23}$

固体物理研究的不是单个原子的性质，而是大量原子组成在一起形成固体后所表现出来的**集体**性质。

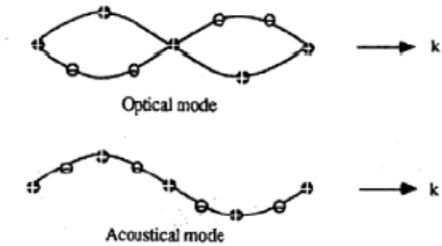
**“More is different”----P. W. Anderson**

固体的性质虽然也和组成固体的原子、分子种类有关，但**更主要**的是和这些原子采用什么方式结合在一起，他们的空间排列方式、相互作用力类型，**特别是和原子形成固体后其价电子的运动状态有关。**

# 固体的特殊性

固体一般维持一定的形状，组成固体的粒子（原子、分子）相互之间保持基本固定的空间关系

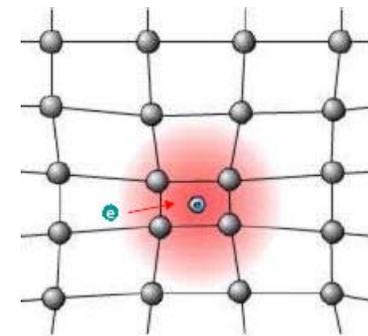
- 固体作为整体具有一些特性——刚性、弹性模量等
- 固体中大量粒子集体运动：



声波、振动格波的量子化（声子）

导电性，以及更典型的现象超导电性（电阻为零的导电行为）

超导电性（BCS机制）是由于电子运动和声子运动耦合的结果



## More Is Different

Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science.

P. W. Anderson

The reductionist hypothesis may still be a topic for controversy among philosophers, but among the great majority of active scientists I think it is accepted without question. The workings of our minds and bodies, and of all the animate or inanimate matter of which we have any detailed knowledge, are assumed to be controlled by the same set of fundamental laws, which except under certain extreme conditions we feel we know pretty well.

planation of phenomena in terms of known fundamental laws. As always, distinctions of this kind are not unambiguous, but they are clear in most cases. Solid state physics, plasma physics, and perhaps also biology are extensive. High energy physics and a good part of nuclear physics are intensive. There is always much less intensive research going on than extensive. Once new fundamental laws are discovered, a large and ever increasing activity begins in order to apply the discoveries to hitherto unexplained phenomena. Thus, there are two dimensions to basic research. The frontier of science extends all

less relevance they seem to have to the very real problems of the rest of science, much less to those of society.

The constructionist hypothesis breaks down when confronted with the twin difficulties of scale and complexity. The behavior of large and complex aggregates of elementary particles, it turns out, is not to be understood in terms of a simple extrapolation of the properties of a few particles. Instead, at each level of complexity entirely new properties appear, and the understanding of the new behaviors requires research which I think is as fundamental in its nature as any other. That is, it seems to me that one may array the sciences roughly linearly in a hierarchy, according to the idea: The elementary entities of science X obey the laws of science Y.

X	Y
solid state or many-body physics	elementary particle physics
chemistry	many-body physics
molecular biology	chemistry
cell biology	molecular biology
•	•
•	•
•	•

例如：性质完全不同的非晶碳、石墨和金刚石都是由相同的碳原子组成的，是碳原子空间排列和结合方式的差异带来了其物理性质的极端不同。 (Graphene)

因此只有通过**对固体微观结构和组成固体微观粒子之间的相互作用及运动机制**的研究才能理解固体的性质。

巴丁(J.Bardeen)说：

固体物理学依据物质的**电子结构**和**原子结构**来了解固体的各种性质。

固体的分类：按其构成原子空间排列的特点大致可以分为**晶体**和**非晶体**。

固体物理的研究首先是从晶体开始的：

1. 在自然界的矿物中，晶态物质占到**98%**以上，人类最早研究和使用的材料也大都是晶态物质，是各类晶态物质特有的性质引起了研究兴趣和开发利用。

2. 晶态物质原子排列的周期性使的固体理论得以顺利进行，**如今已经成熟并获得巨大成功的固体理论只是建立在对晶体研究的基础上。严格说来应该叫做晶体物理学。**但基于上述原因，过去很长一段时间里，人们把“固体”与“晶体”看成同义词，并不区别它们间的差别，所以早期**Kittel**说：固体物理研究 **晶体和晶体中的电子**。

## 按照固体的其它特性分类:

导体和非导体 (导电性质)

磁性和非磁性 (磁性)

金属、离子晶体、共价键结合晶体、分子晶体 (晶体结合类型)

.....

更常见的分类: 导体、绝缘体、半导体、半金属等:

固体物理和四大力学也不同，后者分别研究物质特定的运动形态.如理论力学研究物体的机械运动等，固体物理则不同，它研究的对象是一类物质——固体，它既是力学系统、又是热学系统和电磁系统，而组成固体的微观粒子又必须服从量子力学规律，所以**固体物理是综合的（相对于演绎的）**，需要我们综合运用各种理论工具，从不同角度、不同侧面去研究**实际固体**的各种运动形态，从而全面地解释固体的**各种**性质，所以四大力学都是固体物理的理论基础课。

## 固体物理学的发展历程

固体物理学作为一门近代科学始于**20**世纪初，虽然晶体学的研究有着悠久的历史，**19**世纪末就已经建立起了完整的对称性理论，但只是在**1912**年**Laue**发现了晶体的**X**射线衍射现象后，晶体结构的研究才得以证实，并从此具备了实验研究固体微观结构的条件。

**20**世纪初量子论，特别是量子力学的逐步建立使正确解释已经发现的关于固体性质的规律成为可能。

自此之后的几十年是创立固体理论的辉煌时期。

**Einstein (1907)** 和 **Debye (1912)**，建立了固体比热的量子理论，解释了低温比热为什么低于 **Dulong-Petit** 值。

**Born**和**Karman (1912)** 首次采用周期性边界条件处理了三维晶格振动问题，建立了晶格动力学理论。

**Sommerfeld (1928)** 采用**Fermi**统计，用量子论观点修正了经典电子论。

**Bloch (1928)** 近似求解周期势场中的**Schrödinger**方程，引入了能带的概念。**Wilson (1931)** 利用能带观点解释了半导体的导电现象，提出了空穴的概念。**Brillouin, Seitz, Slater**等人相继进行研究，从而逐步完善了能带论。

与此同时，**Heisenberg, Wigner, Mott**, 朗道，夫伦克尔，佩尔斯，肖特基，范弗莱克等当时一流的理论物理学家都曾投入到固体理论的研究中并取得了丰富的成果。

赛兹**1940**年出版的《现代固体理论》一书,标志着固体物理的成熟并形成了固体物理理论的第一个范式。（**建立在对晶体认识的基础上**）

**Seitz F, Modern Theory of Solids , McGraw-Hill 1940**

这本书是固体物理学作为独立学科出现的奠基性著作，目前我们固体物理课程所讲述的固体理论依然处在该书建立的体系中，它处理问题的基本方法取得了辉煌的成就，并一直普遍使用到今天，而且还将会继续使用下去，因此**理解并掌握好这种方法是学好固体物理课的关键之处**。（适用条件，使用方法，局限性等）。

固体理论的第一个范式：固体物理研究周期结构中波的传播问题，无论是弹性波、电磁波，**de-Broglie**波相关理论的共同点是：充分利用了晶体结构中的平移对称性，使问题得到简化，因此作为实空间**Fourier**变换而得到的波矢空间的重要性就被突出出来，波矢空间的基本单位是布里渊区，因此了解布里渊区内部和边界上的能量波矢关系就成为解决具体问题的关键。

**Hall**曾比喻：

倒易空间和布里渊区是固体物理的**Maxwell**方程

周期势场中的弹性波——晶格动力学

X射线在周期势场中的传播——X射线衍射学

周期势场中电子德布罗意波——能带论

应用上述理论可以正确地阐明晶体的电性质、磁性质、光学性质，热性质、超导性等各种物理性质，并开启了晶体材料在各种新技术中，特别是信息技术中的应用，使固体物理在二十世纪后半叶得到了飞速的发展。

固体物理学是二十世纪物理学中**发展最快、影响最大、领域最广**的一门学科。统计表明，现今四分之一的物理工作者从事固体物理研究，每年发表的物理科学论文中三分之一属于固体物理领域。(广义地说凝聚态物理学)

**Shockley, Bardeen, Brattain**1947年12月23日发现了半导体晶体管的放大效应，由此带来的巨大影响是固体物理和高科技发展关系的最典型的说明。**1950**年晶体三极管，**1954**年硅晶体管，**1959**年集成电路，之后大规模集成电路，超大规模集成电路相继问世，极大地推动了计算机的发展，促成了人类历史上的第**3**次技术革命。

上世纪六七十年代后，固体物理的发展更为迅速，不但晶体材料的研究更加完美，而且逐渐走出大块晶体的范畴，开始了对微细材料和无序固体的开发和利用，新发现、新进展接踵而来。

1979年发现量子霍尔效应

1984年在人工合成材料中发现**准晶体**；

1984年首次合成了**纳米**金属晶体Pd, Fe等。

1985年发现了以C<sub>60</sub>为代表的**团簇**化合物；

1986年新型高温超导材料的发现；

1988年发现**巨磁电阻**效应(GMR)；

1991年发现碳纳米管；

1994年发现**超大磁电阻**效应(CMR)；

1995年**TMR** 的再发现；

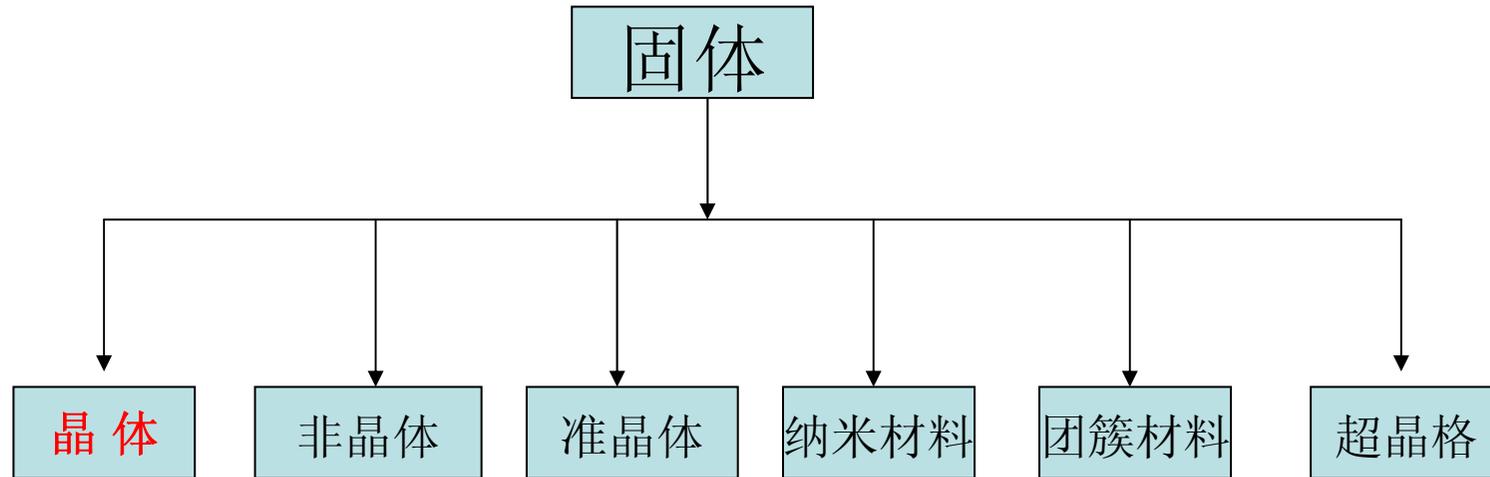
2004年Graphene制备；

2004年提出拓扑绝缘体和随后拓扑绝缘体材料发现

2008年铁基高温超导体发现

还应特别指出：这个期间中，人工微结构材料和微器件研究取得重大进展，过去，新材料制造方面的工作虽然也包括人工合成、人工提纯和人工拉制单晶等，但所得到的材料还是自然界中可能存在的，只是通过人工条件得到比自然条件下某种性能更优异的材料。20世纪70年代开始的人工超晶格材料的研究，则**开创了完全由人工设计和制备全新材料的新纪元**，这些材料的性能往往可以从理论上预先估计，从而有目的的进行研究。它得到的是全新的材料，一维量子阱效应和巨磁电阻效应就是在超晶格（多层膜）材料中发现的。

# 固体物理和凝聚态物理



目前固体物理的研究已经从传统的晶状固体拓展到非晶固体、薄膜和小颗粒体系、以及**量子流体**，这一更宽的研究领域人们称之为**凝聚态物理学**

Solid State Physics

Condensed Matter Physics

上世纪六七十年代后的发展，极大地扩展了固体物理的研究对象和研究领域，丰富了固体理论的内容。这时再使用已经当作晶体同义词的“固体”一词表述该领域显然是不妥当的，人们提出了“凝聚态物理”的概念。然而至目前为止，已经成熟并获得巨大成功的固体理论体系仍然还是建立在对晶体研究的基础上，只完全适用于对晶态块状物质的讨论。无序、纳米体系材料物理性质的理论研究显然不能沿用上述理论体系，它们的理论研究仍处在起步和发展阶段，其理论体系尚在建立之中，因此至目前为止，虽已有《凝聚态物理》的论著，但真正建立起

对所有固体普遍适用的统一理论还有很大困难。

从固体物理到凝聚态物理一方面是传统固体物理的向外扩展，使研究对象不再局限于晶体，还包括非晶态、超晶格、液态物质如：液氦，液晶，液态金属，电解液等，另一方面这种扩展也是传统固体物理学中一些基本概念深化的结果，这些深化了的概念对传统固体物理学的内容做了更高度的概括，可以推广应用于比晶态物质更复杂的体系中。尽管研究范围扩展了，传统固体理论仍然是我们理解和处理新现象的基础。另一方面，传统固体理论基本框架也面临一些新挑战。

# 固体物理的研究方法

1. 固体物理与四大力学处理问题的方法区别很大
2. 理论与实验密切结合
3. 固体由大量原子组成，是多粒子体系，相互作用非常复杂。  
对于这样的多体问题，通常只能近似求解，因此固体理论中充满了各种近似方法。
4. 固体物理中的两类问题：  
理想完整晶体， 近完整晶体。  
基态问题， 低激发态问题。

元激发是传统固体物理给出的最重要的概念，并在凝聚态物理得到推广应用。它有两层含义：

1. 基态的总结合能并不是一个很重要的物理量，和物理系统的行为没有很大关系，物理上重要的是**相对于基态的低激发态**行为，这些态可以在相对低的温度和微弱的外场下就会被激发，是它们决定着固体的绝大多数性质。
2. 这些低激发态往往（几乎的确如此）具有特别简单的性质，比起其它他状态来说，数学上可以做严格处理，而且物理上也容易被理解。原子振动的格波和晶体中运动的电子都可以归结为元激发，即声子和准电子。

光子 —— 电磁波

### 固体中的元激发 (excitation)

**Bloch**电子 —— 周期势场中的电子

声子 —— 弹性波

等离子激元 —— 电子集体波动

磁振子 —— 磁化强度波

极化子 —— 电子 + 弹性波

激子 —— 极化强度波

# 固体物理国内几本教材

1. 黄昆：固体物理学，北京大学出版社
2. 黄昆，韩汝琦，固体物理学 高等教育出版社 1988第1版，  
（根据黄昆，固体物理学 人民教育出版社 1966版扩充改编）
3. 阎守胜，固体物理基础\* 北大出版社 2000
4. 方俊鑫，陆栋，固体物理学（上，下两册） 上海科技出版社1980，1981  
（根据谢希德，方俊鑫，固体物理学 1965版扩充改编）
5. 顾秉林，王喜坤，固体物理学 清华大学出版社 1990

# 国外有影响的几本教材

Kittel C. **Introduction to Solid State Physics**, 8th ed.

John Wiley & Sons Inc., 2005

（作者是在固体物理研究领域有过重要贡献的美国加州大学伯克利分校物理学教授，该书1953年首次出版后受到广泛重视，后于1956，1966，1971，1976，1986，1996年不断修订再版，成为大学固体物理的标准教材之一，2005年是第8版。我国曾先后翻译出版了1956年的第2版和1976年的第5版。）固体物理导论 化学工业出版社，2005

Ashcroft, Mermin **Solid State Physics** 1976

康乃尔大学，权威的固体物理教材）

Giuseppe Grosso and Giuseppe Pastori Parravicini, **Solid State Physics**  
Academic Press, 2006

M A Omar **Elementary Solid State Physics: Principle and Applications**

中译本：固体物理学基础 北京师范大学出版社 1987

H E Hall **Solid State Physics** John Wiley & Sons Ltd 1974

(英国曼彻斯特大学教材)

Blakemore , **Solid State Physics**, Cambridge University Press, 1986

## 更深入的教材

1. 冯端, 金国钧, 凝聚态物理学 (上卷) 高等教育出版社 2003
2. J Callaway, **Quanyum Theory of The Solid State** , 1976  
中译本: 固体量子理论 科学出版社 1984
3. O Madelung, **Introduction to Solid State Theory**, Springer 1978
4. J M Ziman, **Principles of the Theory of Solid**, Cambridge University Press 1972
5. William Jones, Norman H March, **Theoretical Solid State Physics**,  
Vol 1: The equilibrium properties of perfect crystalline solid  
Vol 2; The non-equilibrium properties and Disorder  
John Wiley & Sons Ltd 1973
7. 李正中, 固体理论 高等教育出版社 1985
8. 冯端, 金国钧, 凝聚态物理新论 上海科技出版社 1992

## 通论部分:

1. 晶体结构和晶体结构的测定
2. 晶体结合和弹性性质
3. 晶格振动和热学性质
4. 晶格缺陷和位错理论
5. 金属自由电子论
6. 晶体中的电子——能带论
7. 金属电导理论

针对晶态物质的传统固体物理内容。

专题部分:

半导体

超导电性

固体的磁性

光学过程与激子

磁共振

介电体与铁电体

表面与界面物理

纳米结构

非晶固体