

固体物理

固体物理

Solid State Physics

冯 雪

x-feng@tsinghua.edu.cn

罗姆楼2-101B

我和助教联系方式

- 授课教师： 冯雪， x-feng@tsinghua.edu.cn
- 助教： 孔德阳， kdy20@mails.tsinghua.edu.cn
李哲， lizhe21@mails.tsinghua.edu.cn
陈梓铭， czm21@mails.tsinghua.edu.cn
- 答疑
 - 时间： 每周四下午4： 00-5： 00
 - 地点： 罗姆楼2-101B， 2-108
- 使用网络学堂
- Bonus： 找出错误或者更好的解释， 1分/case

参考书

- 黄昆 原著 韩汝琦改编 《固体物理学》
高等教育出版社，1988年版 2004重印
- 韦丹著 《固体物理》
清华大学出版社，2007年版
- C.基泰尔 著 《固体物理导论》
化学工业出版社，原著第八版

考试及作业

- 期中考试：30~35分 （时间：暂定第9周）
- 期末考试：55~50分
- 平时成绩：15分（纸版作业，包括大作业和实验）

实验安排

- 时间：稍后通知
- 地点：中央主楼906
- 完成实验后请在助教处签到

绪 论

固体物理讲什么？

固体物理是物理学的重要分支，研究物体的微观结构、原子及电子运动状态、物理性质及其相互关系

近代物理学按照研究对象分类：

基本粒子物理 (elementary particle physics)

原子核物理 (nuclear physics)

原子分子物理 (atomic and molecular physics)

凝聚态物理 (condensed matter physics)

表面物理 (surface physics)

等离子体物理 (plasma physics)

.....

固体物理讲什么？

固体物理是物理学的重要分支，研究物体的微观结构、原子及电子运动状态、物理性质及其相互关系

近代物理学按照研究对象分类

凝聚态物理的研究对象还包括稠密气体、液体以及介于液态和固态之间的各类居间凝聚相，例如液氦、液晶、熔盐、液态金属、电解液、玻璃、凝胶等

原子核物理 (nuclear physics)

原子分子物理 (atomic and molecular physics)

凝聚态物理 (condensed matter physics)

表面物理 (surface physics)

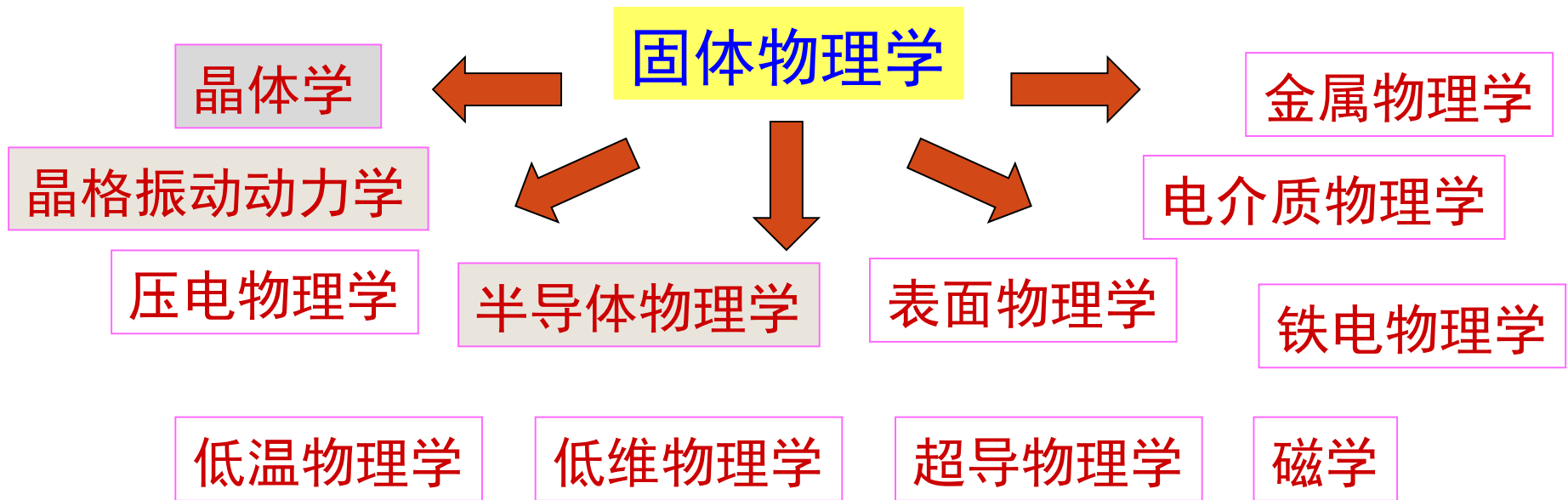
等离子体物理 (plasma physics)

.....

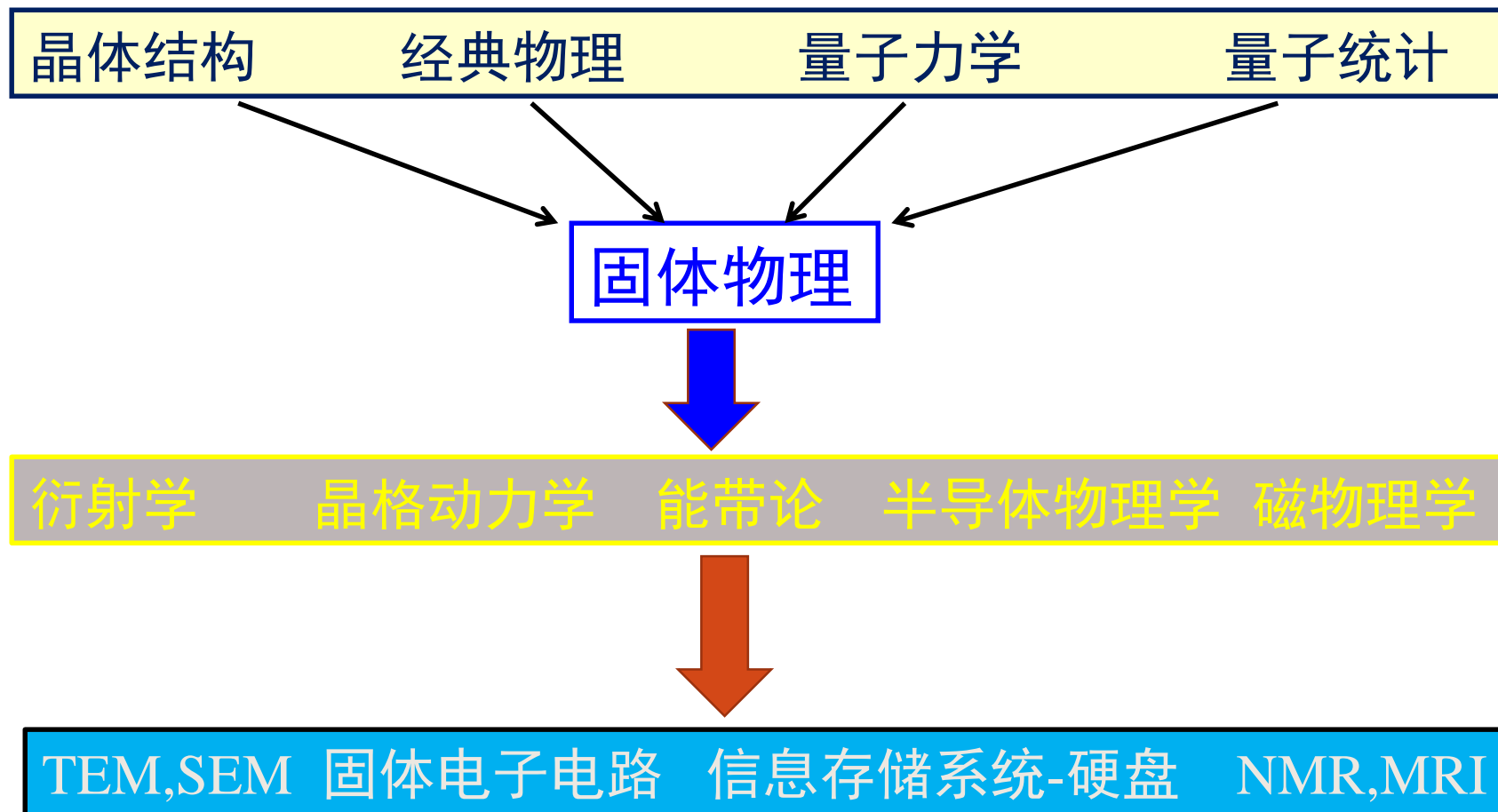
固体物理研究对象：
晶体、非晶体与准晶体等固相物质

固体物理讲什么？

固体物理是物理学的重要分支，研究物体的微观结构、原子及电子运动状态、物理性质及其相互关系



固体物理是宏观和微观世界的桥梁



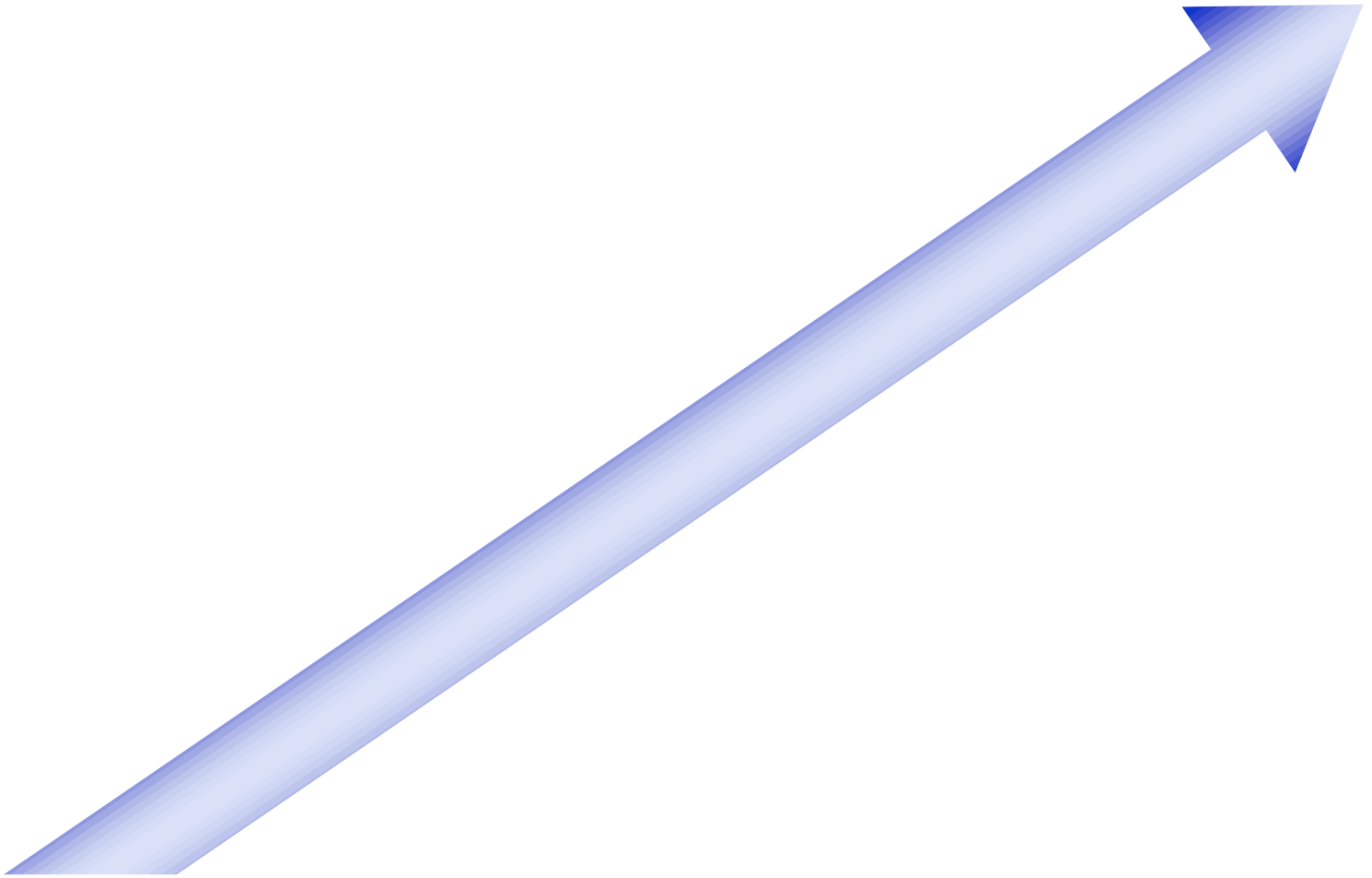
TEM: 透射电子显微镜
SEM: 扫描电子显微镜

NMR: 核磁共振
MRI: 磁共振成像

固体物理

- 电子科学技术的重要基础之一
- 微电子技术
 - 二极管、晶体管
 - 集成电路、微电子学
- 光电子技术
 - 光存储(代替软盘、磁带)
 - 光纤通信(激光代替微波)
 - 固态照明(LED代替电灯)
 - 太阳能电池

人类对物质结构认识的发展简史



- 公元前500年
古希腊原子论

古希腊原子论

- 留基伯 (Leucippus or Leukippos, ~公元前 500—~公元前440年) :
- 世间万物都是由不可分割的物质即原子组成
- 一个整体是由无数粒子组成的, 每个粒子都是刚硬、立体、不可分割, 称为原子
- 德谟克利特 (~公元前 460~公元前370年或公元前356年) :
- 万物的本原是原子和虚空
- 原子是不可再分的物质微粒, 虚空是原子运动的场所
- 每个原子都是毫无空隙的
- 肯定了人们的感觉和思想是客观世界的反映



留基伯



德谟克利特

古希腊原子论

- 留基伯 (Leucippus or Leukippos, ~公元前 500—~公元前440年) :
- 世间万物都是由不可分割的物质即原子组成
- 一个整体是由无数粒子组成的, 每个粒子都是刚硬、立体、不可分割, 称为原子
- 德谟克利特 (~公元前 460~公元前370年或公元前356年) :



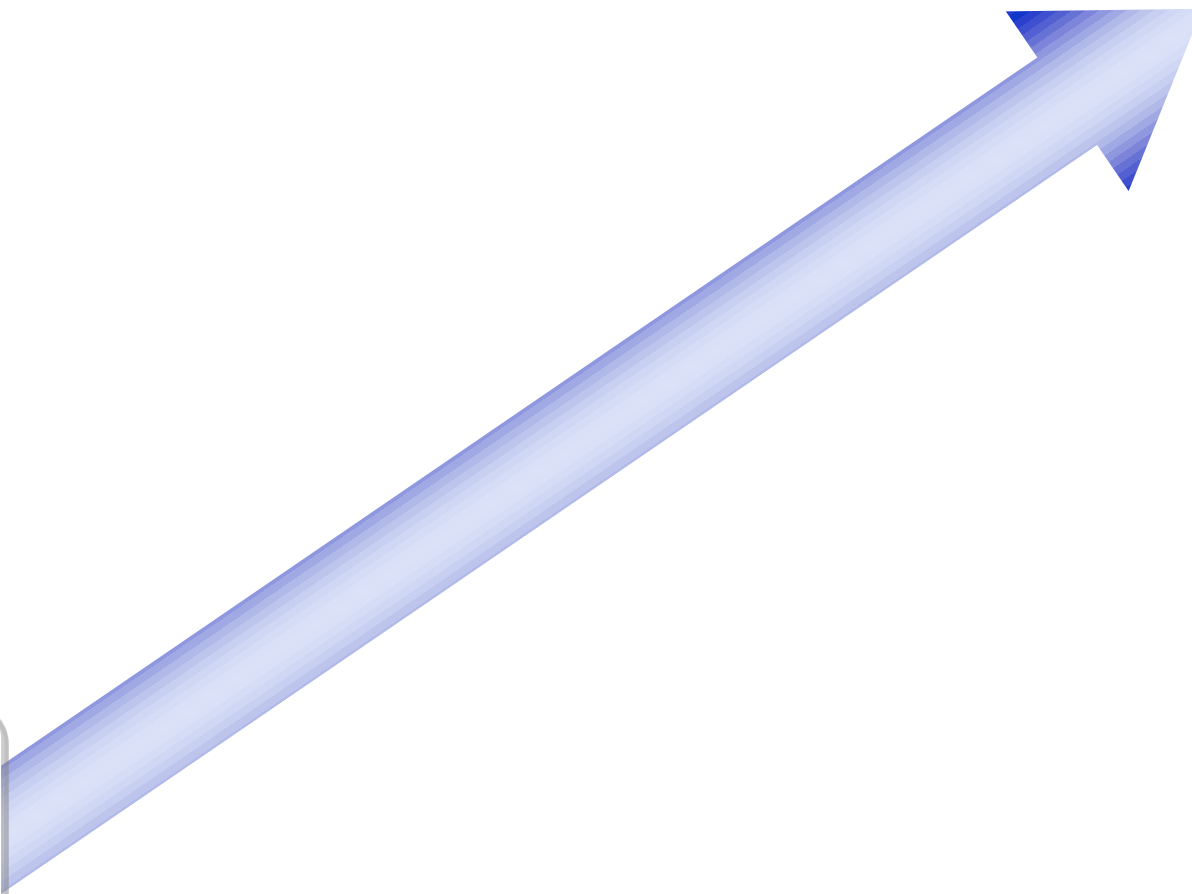
留基伯



德谟克利特

- 费曼: 假如所有的科学知识都在某个灾难中毁灭, 只有一句话能留给后人, 什么样的话能在最少的言辞中包含最多的信息呢?
这句话是: “物质是由原子构成的”

人类对物质结构认识的发展简史

- 
- 1803年道尔顿
原子模型

原子是组成物质的基本的粒子，
坚实的、不可再分的实心球。

公元前
古希腊原子论

道尔顿原子模型

- 西方文艺复兴后原子论在17世纪得以复活
 - 如何在原子论的基础上建立起物理学和化学的基本理论
 - 笛卡尔否认原子的不可分割性，博斯科维奇则试图以原子模型来说明所有已知的物理现象，后来的气体分子运动论
- 道尔顿（英）：原子说引入了科学主流
 - 给出了“原子”现代意义上的定义
 - 结合波义耳、拉瓦锡的研究成果，提出：有多少种不同的化学元素，就有多少种不同的原子
 - 同一种元素的原子在质量、形态等方面完全相同
 - 组成化合物的“原子”的基本原子的数目极为重要
 - 道耳顿认为这是每个原子在牛顿万有引力作用下简单地并列在一起形成的



道尔顿
1766~1844

阿伏伽德罗原子-分子模型

- 阿伏伽德罗（意）：
 - 1811年，阿伏伽德罗提出原子-分子论
 - 在相同的温度和压强下，相同体积的任何气体都含有相同数目的分子。所以又叫四同定律，也叫五同定律（五同指同温、同压、同体积、同分子个数、同物质的量）。
- 阿伏伽德罗常数：

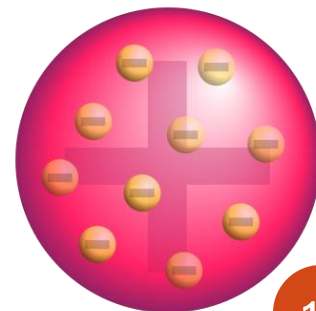
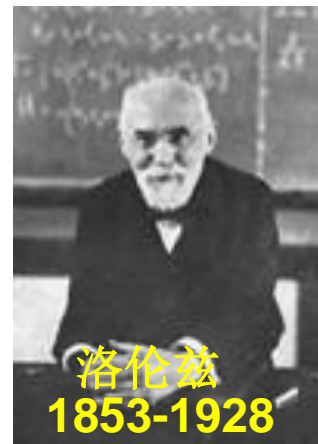
$$N_A = 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$$



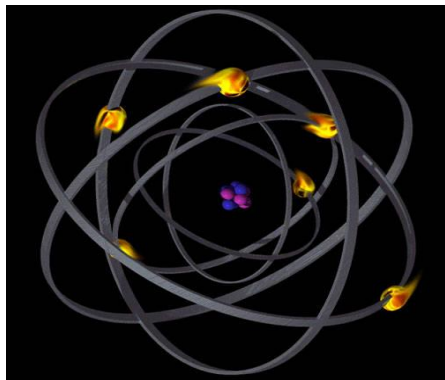
阿伏伽德罗
1776~1856

汤姆生原子模型

- 1895年：洛伦兹创立经典电子论
 - 与塞曼分享1902年诺贝尔物理学奖
 - 1904年提出洛伦兹变换——“狭义相对论”
 - 爱因斯坦说：洛伦兹的成就“对我产生了最伟大的影响”，他是“我们时代最伟大、最高尚的人”。
- 1897年：汤姆生证明了电子的存在
- 1898年：德国物理学家黎开和德鲁德提出金属电子论
- 1904年：汤姆生提出“Plum pudding”模型（“梅子布丁”或“枣糕”）



人类对物质结构认识的发展简史



- 1911 年
- 卢瑟福原子模型
(行星模型)

(梅子布丁)

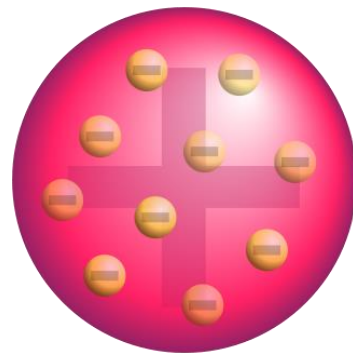
1803年
道尔顿原子模型

原子是一个平均分布着正电荷的粒子，
其中镶嵌着许多电子，中和了正电荷，
从而形成了中性原子

原子是组成物质的基本的粒子，
坚实的、不可再分的实心球。

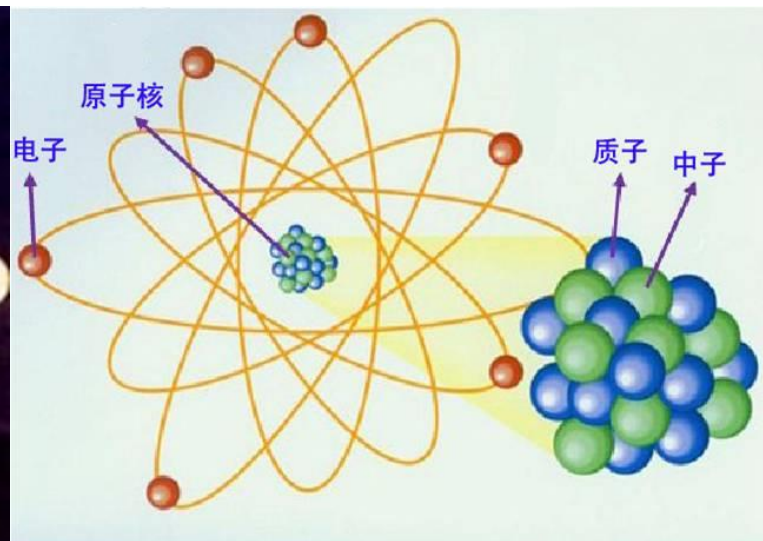
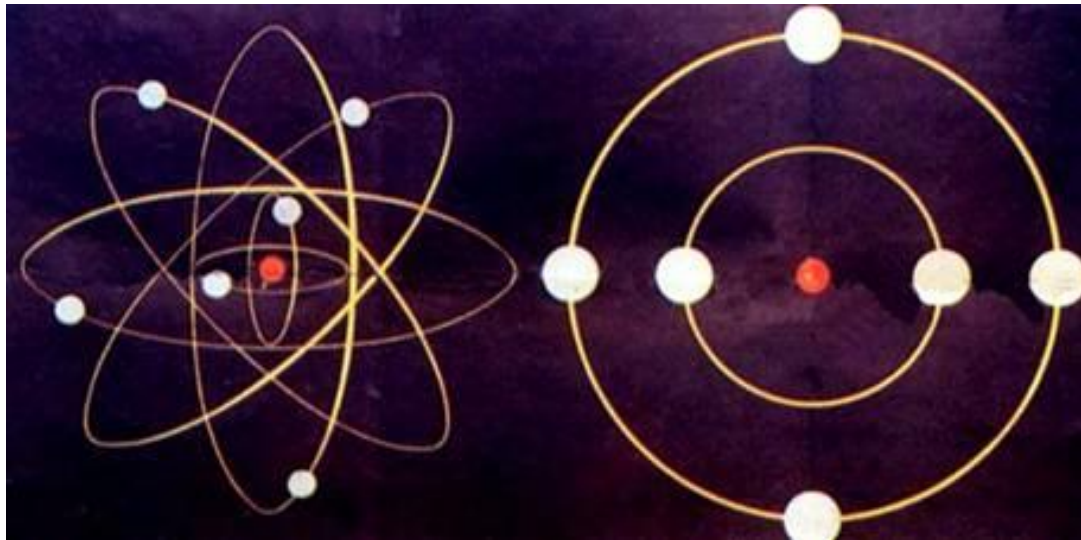
公元前**500年**
古希腊原子论

原子的中心有一个带正电荷的核，
质量几乎等于原子的全部质量，
电子围绕原子核不同的轨道运转。

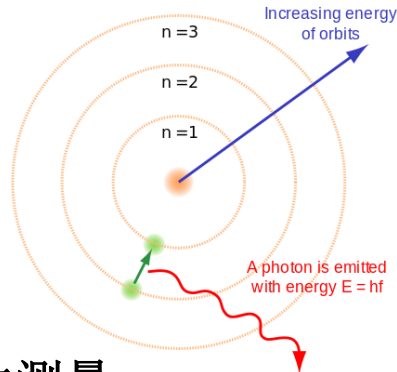


卢瑟福原子模型（行星模型）

- α 粒子散射实验：带正电的 α 粒子穿透金箔时，大部分粒子穿过金箔后，仍沿原方向运动；少数粒子穿过金箔后，发生了一定角度的偏折；而极少数粒子受到大过与入射方向成90度散射的结果；
- 1911年：卢瑟福修改了汤姆生的原子模型



人类对物质结构认识的发展简史



- 1913 年
- 玻尔原子模型
(氢原子模型)

1897年：汤姆生测量了阴极射线粒子的荷质比——电子

1911 年
卢瑟福原子模型
(行星模型)

1904 年
汤姆生原子模型
(梅子布丁)

1803年
道尔顿原子模型

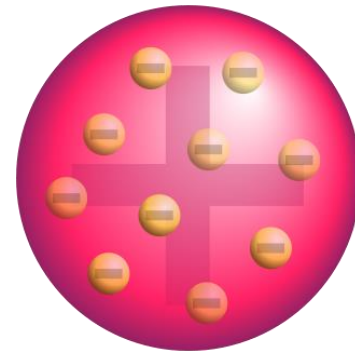
原子是一个平均分布着正电荷的粒子，其中镶嵌着许多电子，中和了正电荷，从而形成了中性原子

原子是组成物质的基本的粒子，坚实的、不可再分的实心球。

电子在原子核外
特定轨道上绕核
做高速的圆周运动。

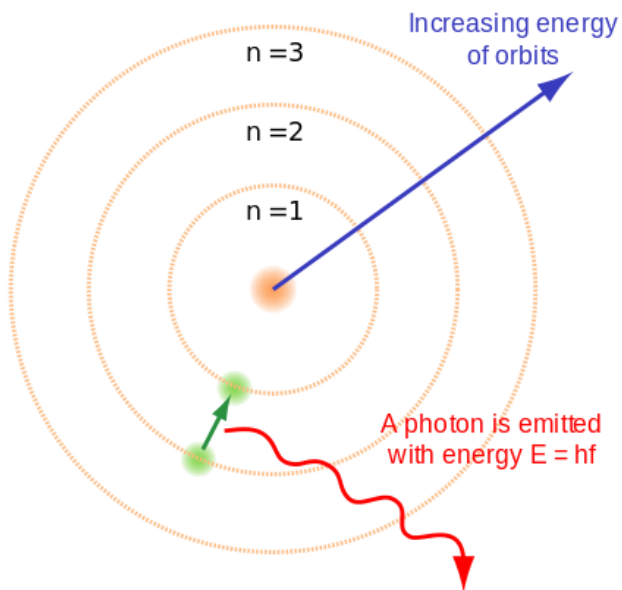
原子的中心有一个带正电荷的核，质量几乎等于原子的全部质量，电子围绕原子核不同的轨道运转。

公元前**500年**
古希腊原子论



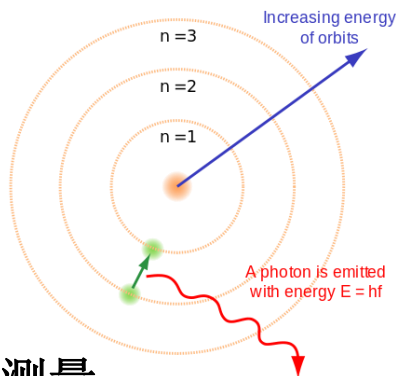
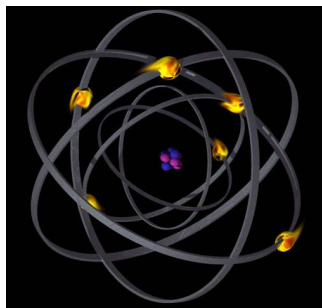
玻尔原子模型

- 原子核位于原子的中心
- 电子不停地绕原子核作轨道运动，处于稳定状态，不辐射出也不吸收能量
- 当一个电子从一种状态变到另一状态时，这个电子就会损失或获得能量，它就会发射或吸收能量
- 光谱中的每一根谱线都与一个电子从某一稳定状态变到另一个状态有联系



玻尔 (Bohr, 1885~1962)

人类对物质结构认识的发展简史



1897年：汤姆生测量了阴极射线粒子的荷质比——电子

1911年
卢瑟福原子模型
(行星模型)

1904年
汤姆生原子模型
(梅子布丁)

1803年
道尔顿原子模型

原子是一个平均分布着正电荷的粒子，其中镶嵌着许多电子，中和了正电荷，从而形成了中性原子

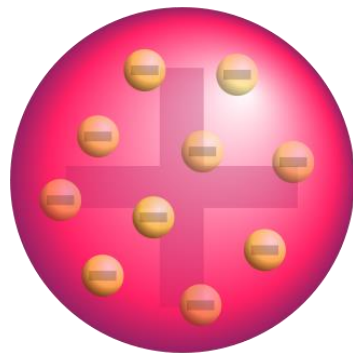
原子是组成物质的基本的粒子，坚实的、不可再分的实心球。

公元前**500年**
古希腊原子论

• 1927年——1935年
• 基于**量子力学**的电子云模型
(现代物质结构学说)

电子在原子核外特定轨道上绕核做高速的圆周运动。

原子的中心有一个带正电荷的核，质量几乎等于原子的全部质量，电子围绕原子核不同的轨道运转。



1927年第五届索尔维会议合影

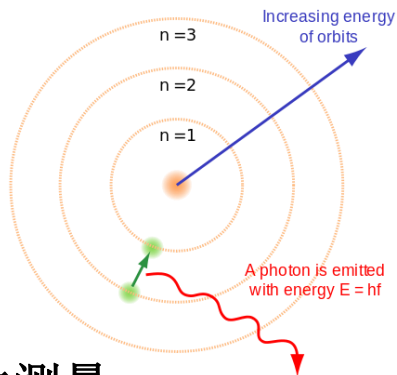


1927年第五届索尔维会议合影



A. EINSTEIN H. WILSON P. DUBOIS E. HERZEN TH. DE DONDER L. COMOLONGHI E. VIGORWITZ W. PAULI W. FENSTADT R. TOWLER L. HILGOUN
 P. DENTY M. KNUSEN W. L. BLOOM H. A. HARRIS K. A. OWE J. L. COMPTON L. de BROGLIE M. BOSE P. A. B. B.
 I. LANGMUIR M. PLANCK M. S. WILSON H. A. LORENZ A. EINSTEIN P. A. DUBOIS O. E. DUTTE C. J. WILSON P. A. B. B.

人类对物质结构认识的发展简史



1897年：汤姆生测量了阴极射线粒子的荷质比——电子

1911 年
卢瑟福原子模型
(行星模型)

1904 年
汤姆生原子模型
(梅子布丁)

1803年
道尔顿原子模型

原子是一个平均分布着正电荷的粒子，其中镶嵌着许多电子，中和了正电荷，从而形成了中性原子

原子是组成物质的基本的粒子，坚实的、不可再分的实心球。

公元前**500年**
古希腊原子论

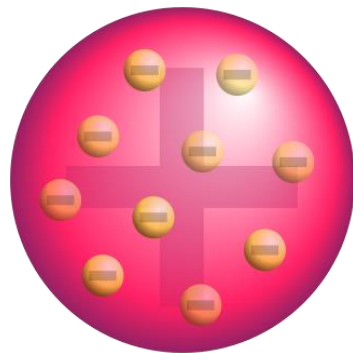
1927 年—— 1935 年

电子云模型（现代物质结构学说）

1913 年
玻尔原子模型
(氢原子模型)

电子在原子核外特定轨道上绕核做高速的圆周运动。

原子的中心有一个带正电荷的核，质量几乎等于原子的全部质量，电子围绕原子核不同的轨道运转。



固体物理的发展史

固体物理是比较晚近发展起来的物理学的分支

- 1611年 开普勒提出固体结构的对称概念

即兴写了一本未完成的书：《六角形的雪》：通过对六角的雪的观察使他得出了对称的观念，并推想到雪是由许多球体紧密堆积而成。这本书可视为晶体学的发轫



约翰尼斯·开普勒

固体物理的发展史

固体物理是比较晚近发展起来的物理学的分支

- 1611年 开普勒提出固体结构的对称概念
- 1669年 丹麦人斯台诺（Steno, N. 1638-1686）晶面夹角守恒定律

在此之后“晶体”（德语Kristall）一词开始被使用

固体物理的发展史

固体物理是比较晚近发展起来的物理学的分支

- 1611年 开普勒提出固体结构的对称概念
- 1669年 丹麦人斯台诺（Steno, N. 1638-1686）晶面夹角守恒定律

在此之后“晶体”（德语Kristall）一词开始被使用

19世纪 几何晶体学发展起来:

晶体原子论——晶体的空间点阵是由化学原子组成的
晶类、点阵、空间群....

固体物理的发展史



Laue 1879-1960



Sommerfeld
1868~1951

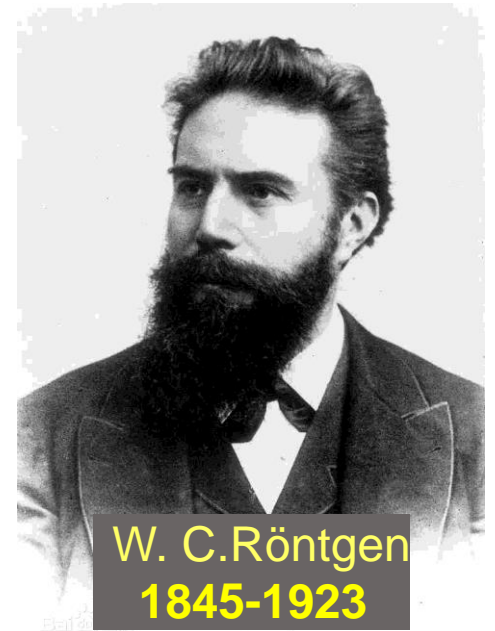
- 1912年 根据劳厄(M.Laue,1879-1960,德)的预言, 索末菲(Sommerfeld,1868~1951, 德) 的研究组在实验中发现了美丽的衍射图样, 证实了晶体的点阵结构和X射线的波动性

- 晶体的X射线衍射也许可以认为是固体物理的开端

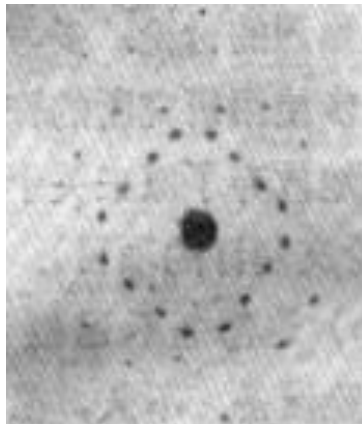
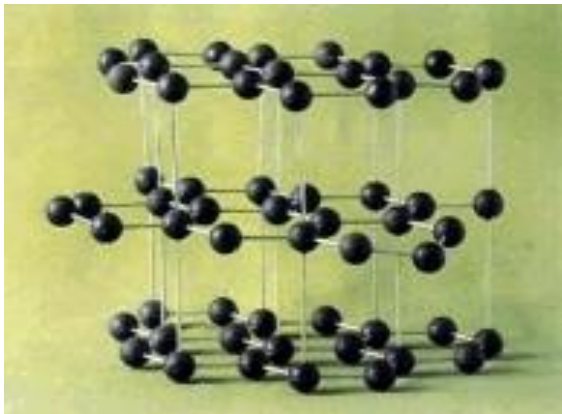
——韦丹书P5

X射线晶体学

德国物理学家伦琴1895年11月8日发现了X射线，为开创医疗影像技术铺平了道路，1901年被授予首次诺贝尔物理学奖。



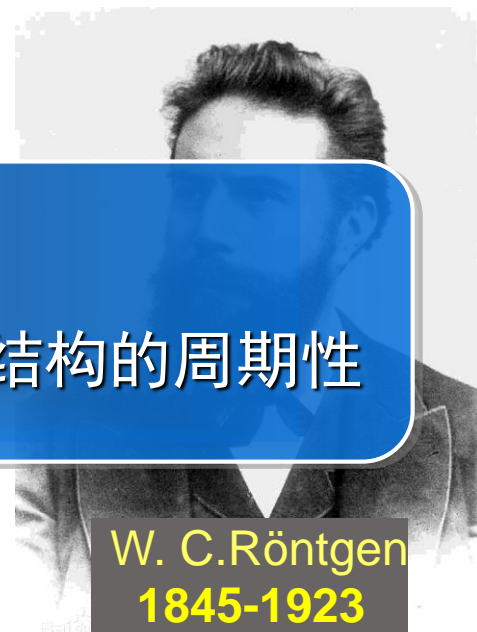
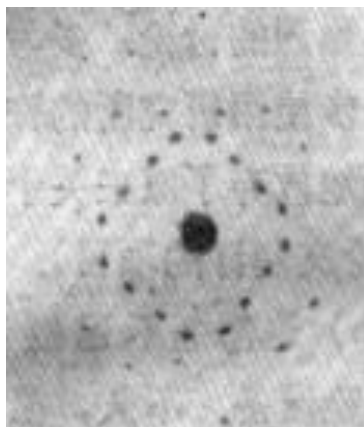
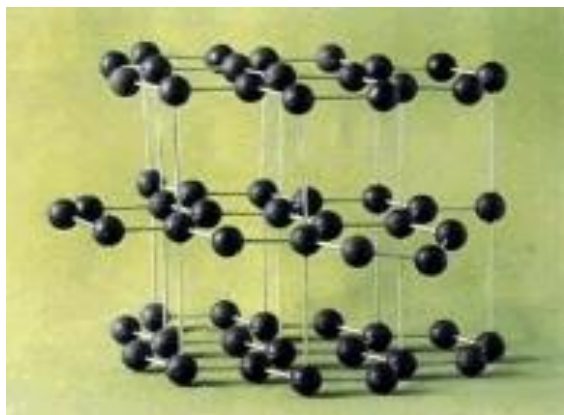
索末菲研究组的弗里德里希和克尼平在1912年4月21日以五水合硫酸铜晶体为光栅进行了劳厄推测的衍射实验，并于1912年5月4日宣布实验成功。



X射线晶体学

- “物理学最美的实验”——爱因斯坦路，它一箭双雕地解决了X射线的波动性和晶体结构的周期性

索末菲研究组的弗里德里希和克尼平在1912年4月21日以五水合硫酸铜晶体为光栅进行了劳厄推测的衍射实验，并于1912年5月4日宣布实验成功。



固体物理的发展史

固体物理是比较晚近发展起来的物理学的分支

- 1611年 开普勒提出固体结构的对称概念
- 1669年 丹麦人斯台诺 (Steno, N.1638-1686) 晶面夹角守恒定律
- 1912年 根据劳厄(M.Laue, 1879-1960, 德)的预言, 索末菲(Sommerfeld, 1868~1951, 德)的研究组在实验中发现了美丽的衍射图样, 证实了晶体的点阵结构和X射线的波动性
- 1914年劳厄 因发现了晶体的X射线衍射 而获得诺贝尔物理学奖

固体物理的发展史

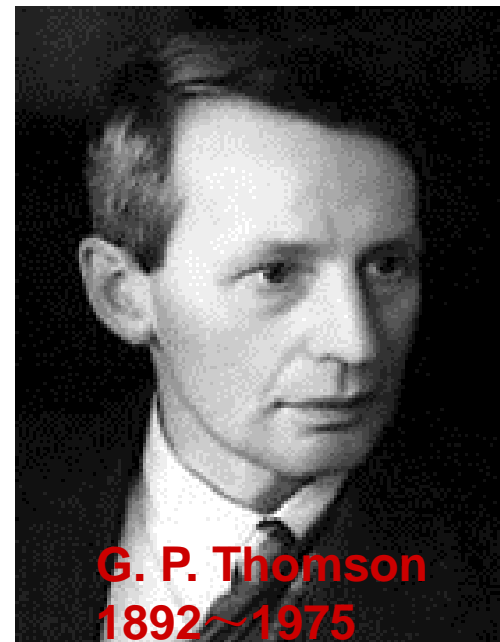
- 1913年：布拉格父子根据小布拉格提出的公式和老布拉格的X射线波谱仪的实验结果，准确测定了晶格常数和X射线的波长

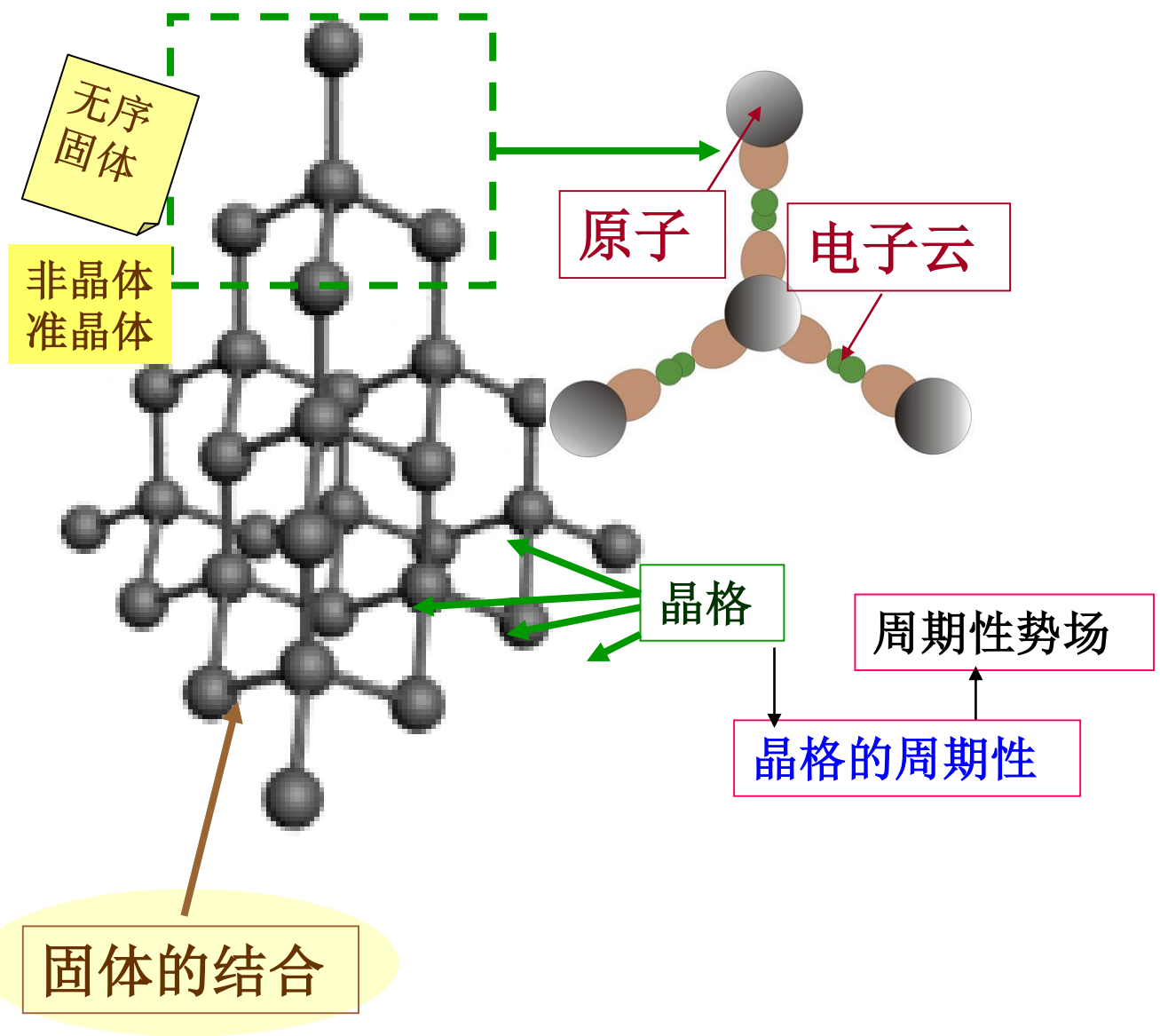
1915年诺贝尔物理学奖授予布拉格父子。在科学史上是仅有的一例；小Bragg获奖时年仅25岁，成为“最年轻的获奖者”；从得到成果到获奖所经时间之短，在历史上也是不多见的。



固体物理的发展史

- 1913年：布拉格父子根据小布拉格提出的公式和老布拉格的X射线波谱仪的实验结果，准确测定了晶格常数和X射线的波长
- 1927年和1928年：美国的戴维逊和英国的G.P.汤姆逊研究组分别使用反射电子束和薄膜透射电子束发现了晶体的电子衍射花样实验验证了德布罗意关于微观粒子波粒二象性的假设





电、磁、光特性



电子的运动



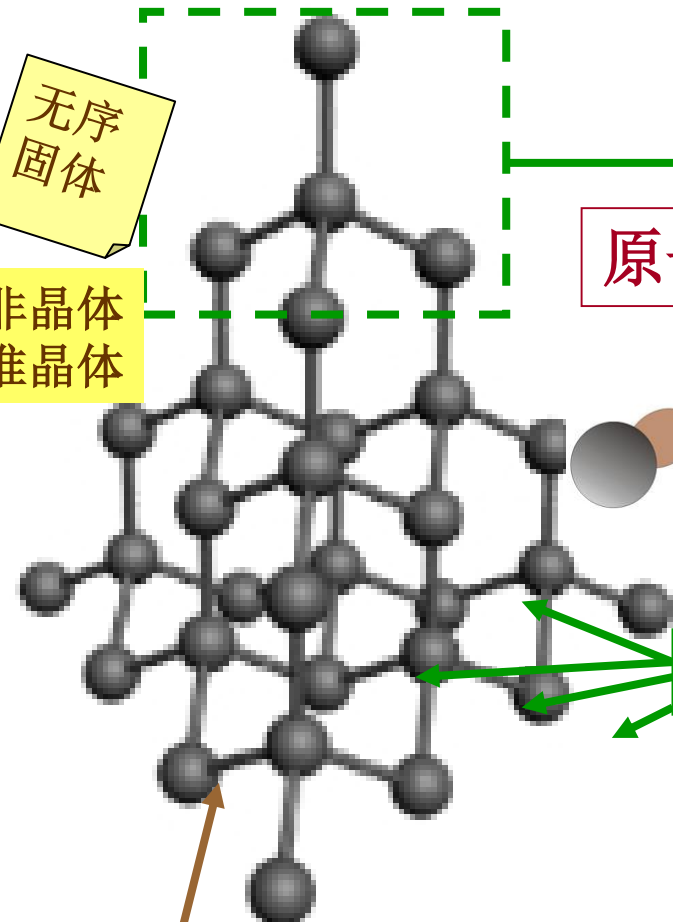
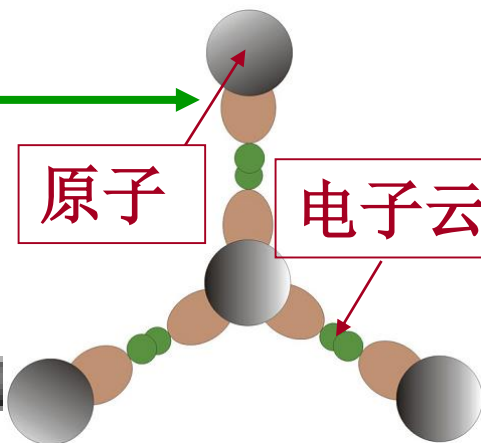
周期性势场

晶格的周期性

晶格

原子

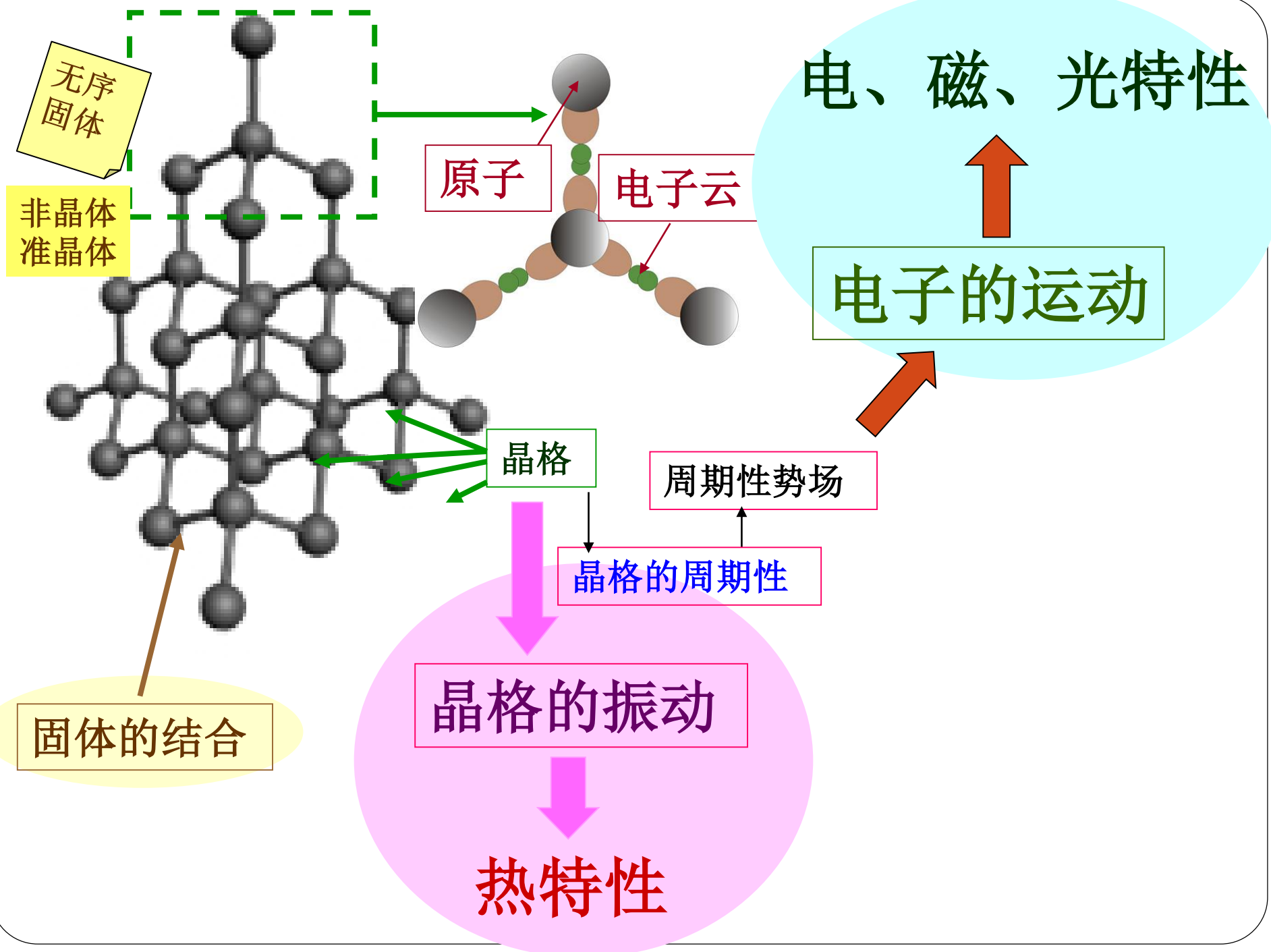
电子云



固体的结合

非晶体
准晶体

无序
固体



课程安排

- 固体的结构 (6) 黄昆书 第1章, 韦丹书 第3章
- 固体的结合 (3) 黄昆书 第2章, 韦丹书 第2章
- 固体能带理论 (6) 黄昆书 (§ 4.1~4.2, § 5.1~ § 5.3)
- 固体的电特性 (12) 黄昆书 第6, 7章 韦丹书 第6章
- 固体的磁特性 (3) (介绍)
- 晶格振动和固体热性质 (6)
 - 黄昆书 第3章, 韦丹书 第4章
- 场与物质的相互作用 (3) (介绍)

课程安排

- 固体的结构 (6)
- 固体的结合 (3)
- 固体能带理论 (6)
- 固体的电特性 (12)
- 固体的磁特性 (3*)
- 晶格振动和固体热性质 (6)
- 场与物质的相互作用 (3*)

金属电子论初步 (3)

韦丹书:

§ 5.1

§ 5.2.1~5.2.2

黄昆书: § 6.1, § 4.7