

# 量子物理B

2023春季学期

中国科学技术大学

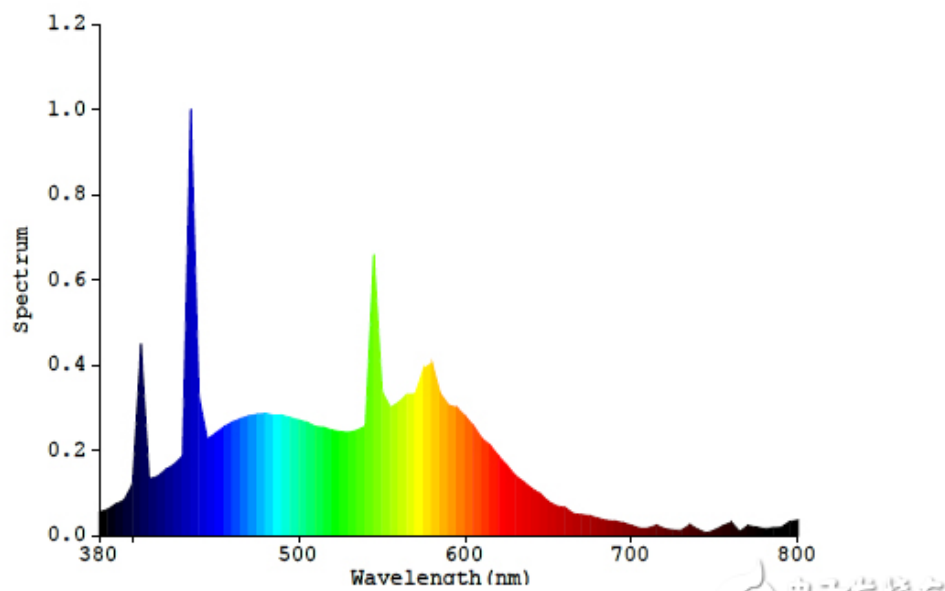
国家示范性微电子学院

# 课程简介

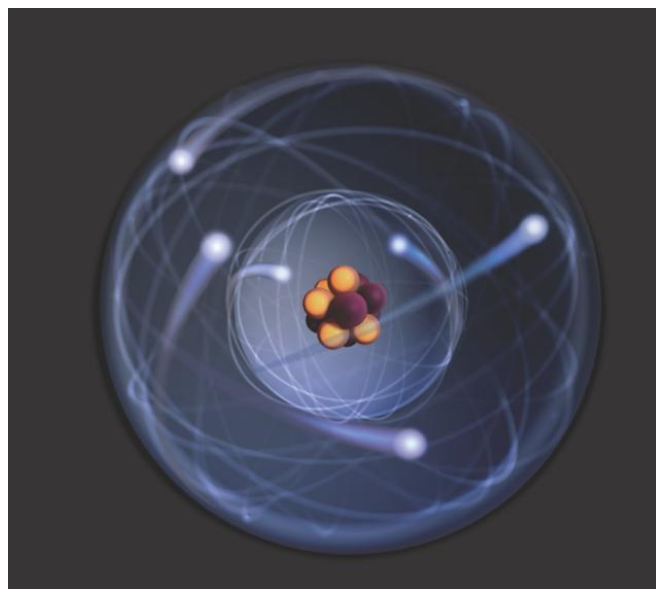
- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学
  - 精确描述微观粒子运动方式的学科

# 课程简介

- 为什么要学习量子物理



日光灯的光谱



原子的结构

# 课程简介

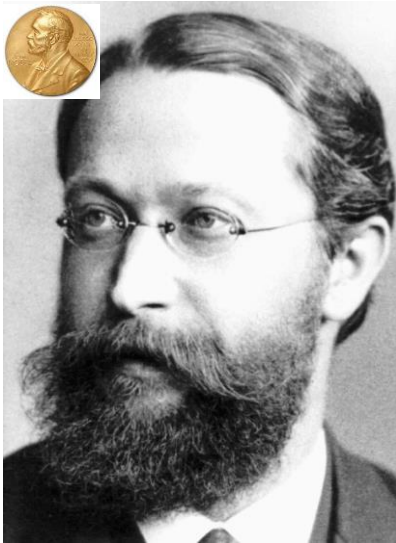
- 为什么要学习量子物理
- (固态) 二极管的发明
- (固态) 晶体管的发明
- 当代与未来微电子技术

# (固态) 二极管的发明

Ueber die Stromleitung durch Schwefelmetalle, 1874

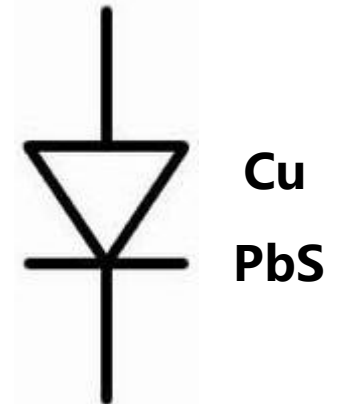
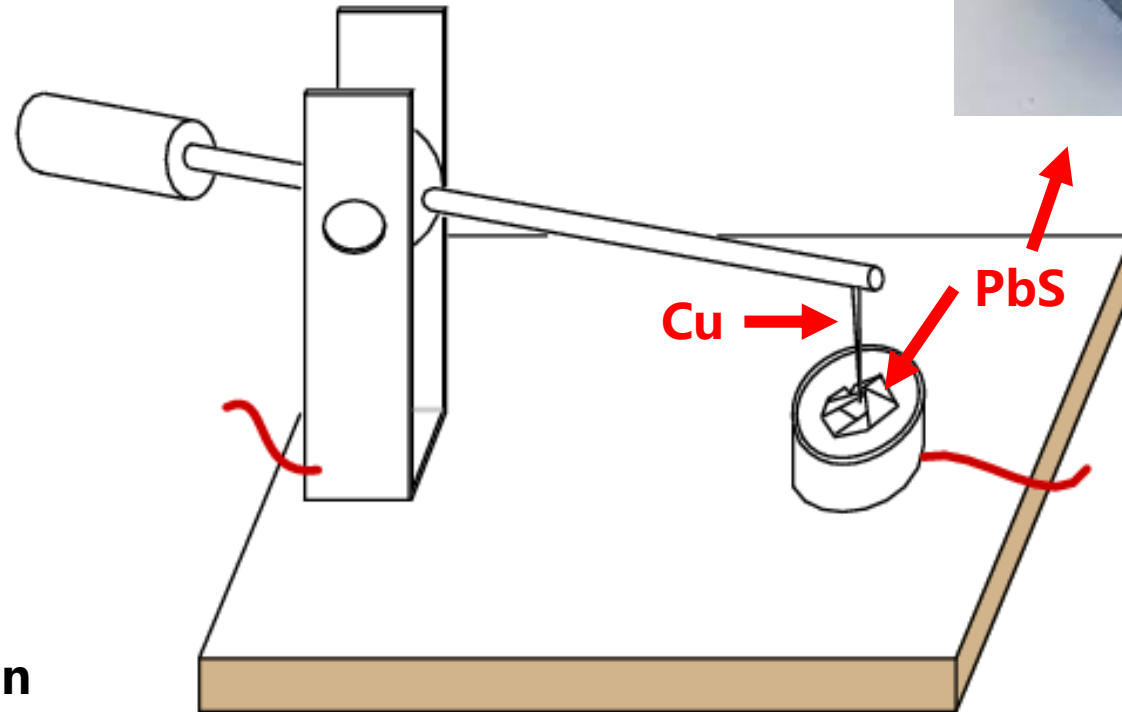
On current conduction in metal sulphides

金属-硫化物体系的 (非对称) 导电特性



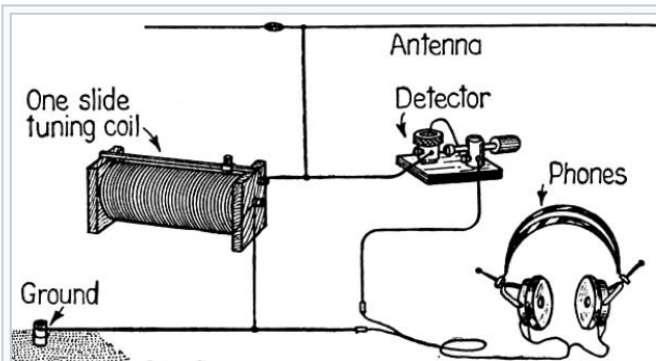
Karl Ferdinand Braun

Nobel prize 1909

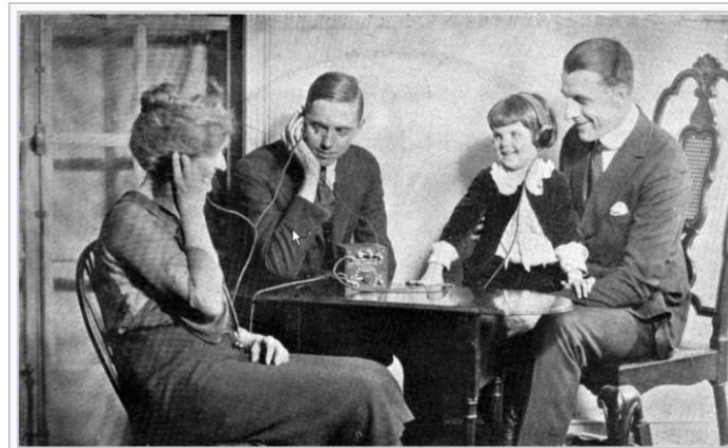


Birth of semiconductor

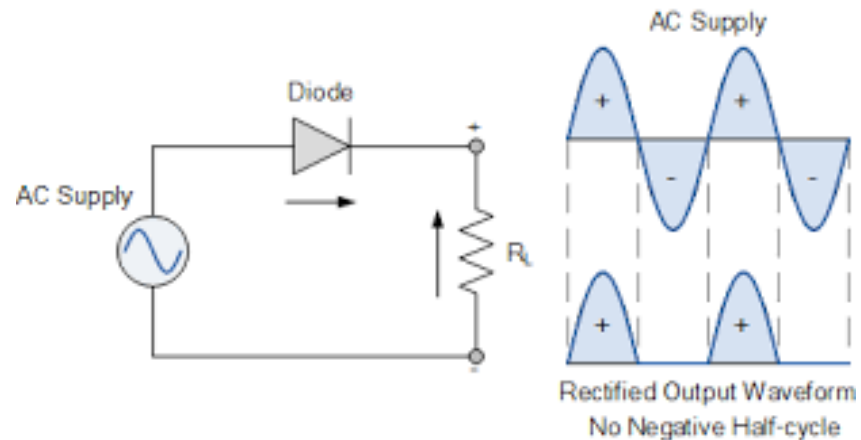
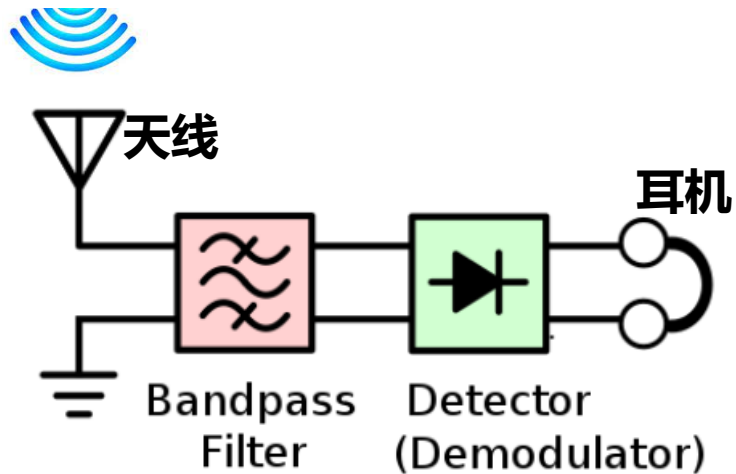
## 应用——无线电接收器 1900s-1920s



Pictorial diagram from 1922 showing the circuit of a crystal radio. This common circuit did not use a tuning capacitor, but used the capacitance of the antenna to form the tuned circuit with the coil. The detector was a cat whisker detector, consisting of a piece of galena with a thin wire in contact with it on a part of the crystal, making a diode contact



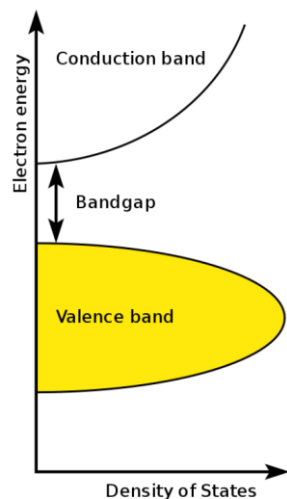
A family listening to a crystal radio in the 1920s



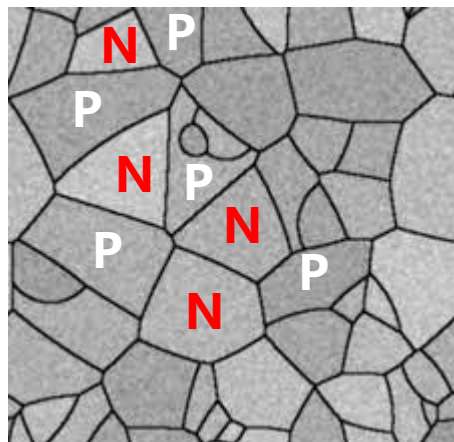
# Why?

- 为什么点接触二极管能单向导电？

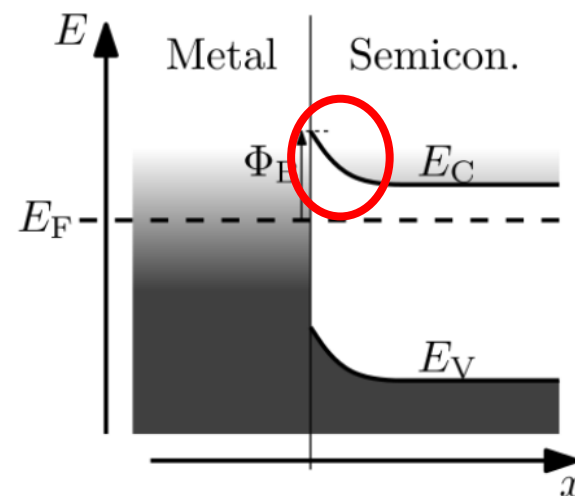
## 现代解释



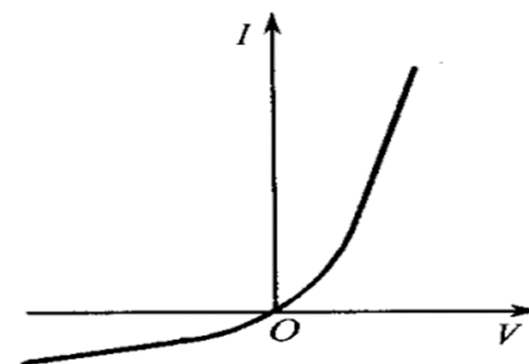
PbS是一种**半导体**  
(直接**带隙**0.4eV)



天然**掺杂**会形成P型和N型的区域

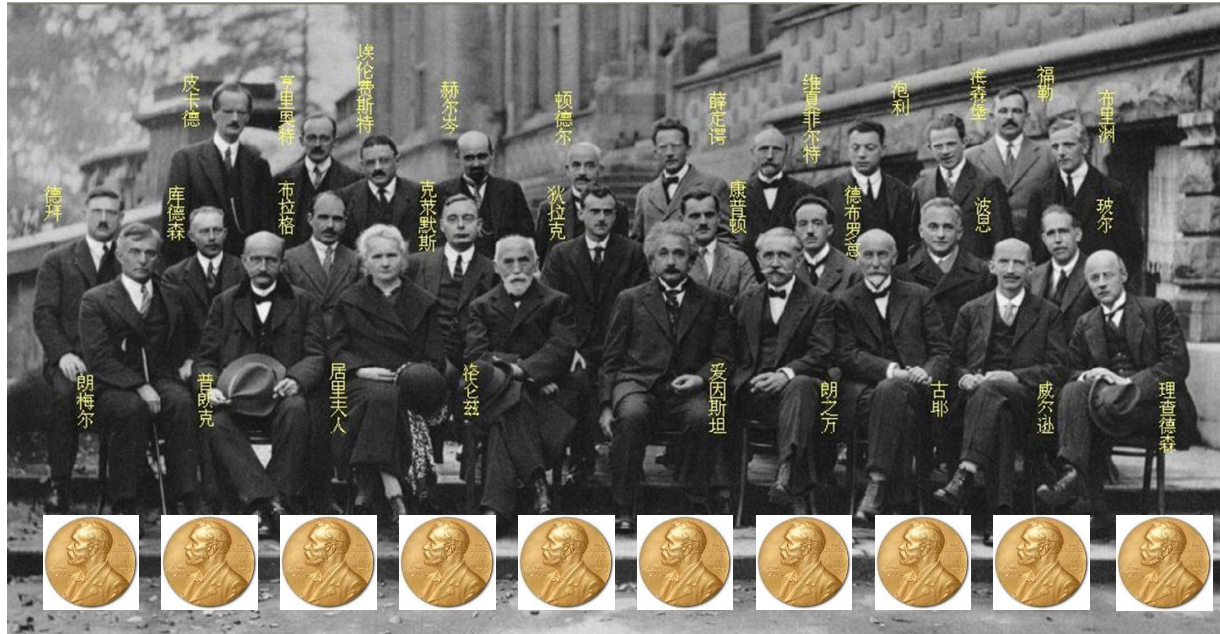
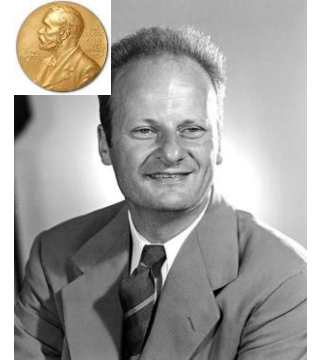
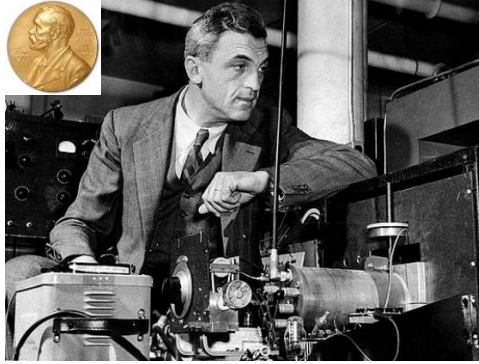


特定金属和特定类型半导体接触可以在界面处形成肖特基**势垒**



肖特基势垒导致了电子的单向导电特性





## 量子力学 1920s

**Nobel prizes 1918, 1921, 1922, 1932, 1933, 1938, 1945, 1954**



## Mott对点接触二极管的解释

### The theory of crystal rectifiers

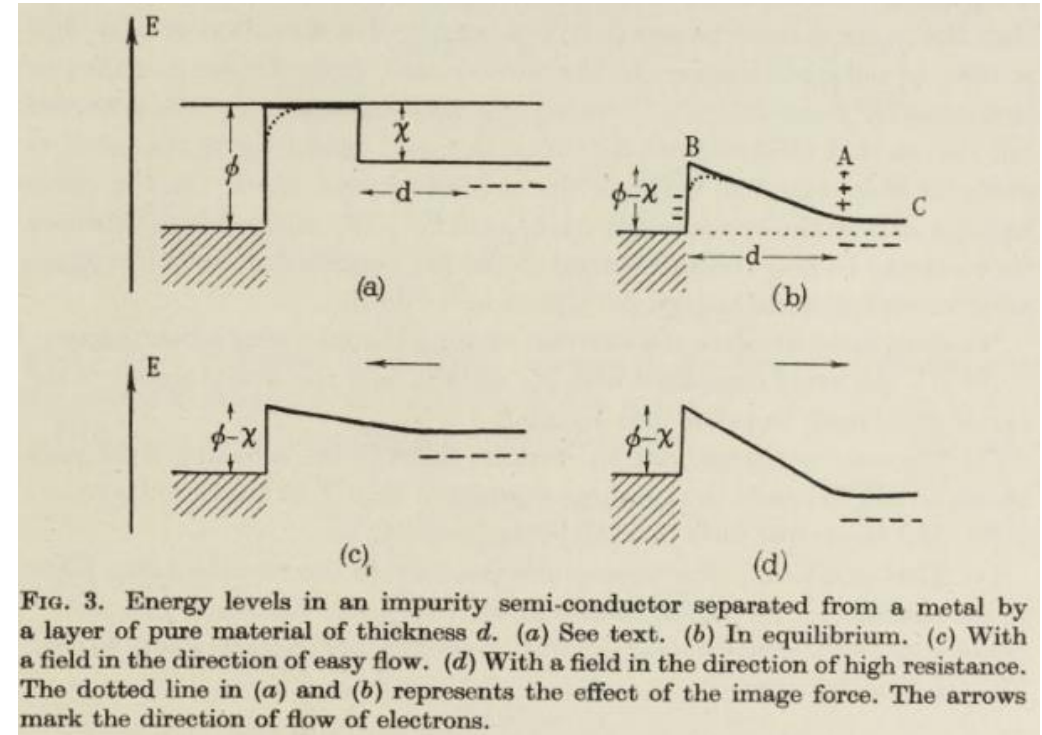
By N. F. MOTT, F.R.S.

*H. H. Wills Physical Laboratory, University of Bristol*

(Received 24 January 1939)

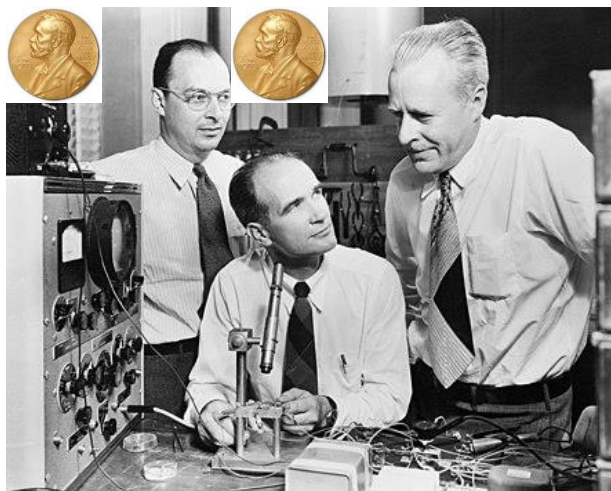
It has long been known that the contact between a metal and a semiconductor has a resistance which varies, in many cases considerably, with the direction of the current. A well-known example is the copper-cuprous oxide rectifier, which consists of a copper plate on which a layer of cuprous oxide has been formed, the oxide being in contact with a lead plate. It is the purpose of this paper to criticize existing theories of this effect and to suggest a new one.

In any crystal rectifier we have two contacts to consider; for instance, in the copper-oxide rectifier there is the contact between the copper and the oxide, and that between the oxide and the lead. We may say at once that a condition for rectification is that at least one of these contacts shall have a resistance which is not equal to the resistance of the oxide layer.

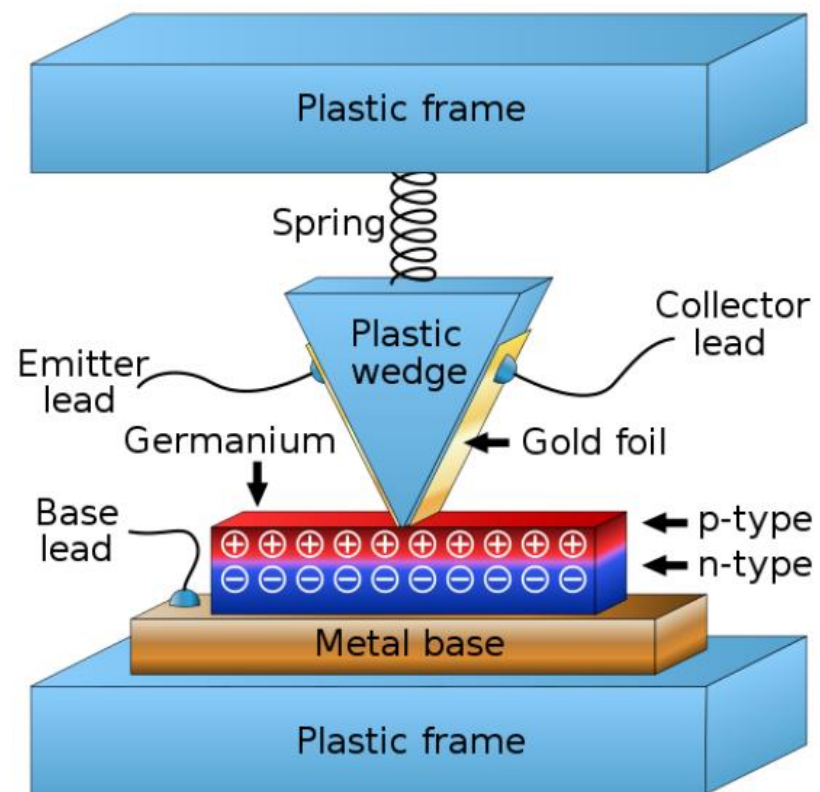
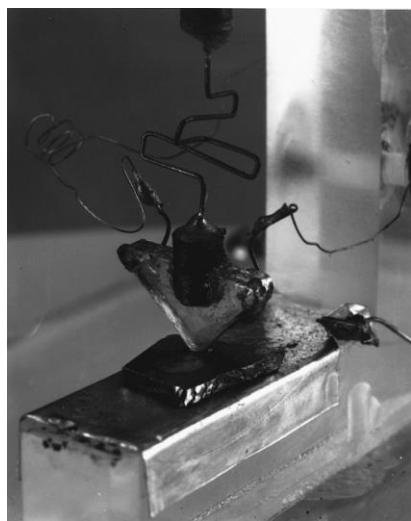


Mott N F. Proceedings of the Royal Society of London. Series A.  
Mathematical and Physical Sciences, 1939, 171(944): 27-38.

# (固态) 晶体管的发明



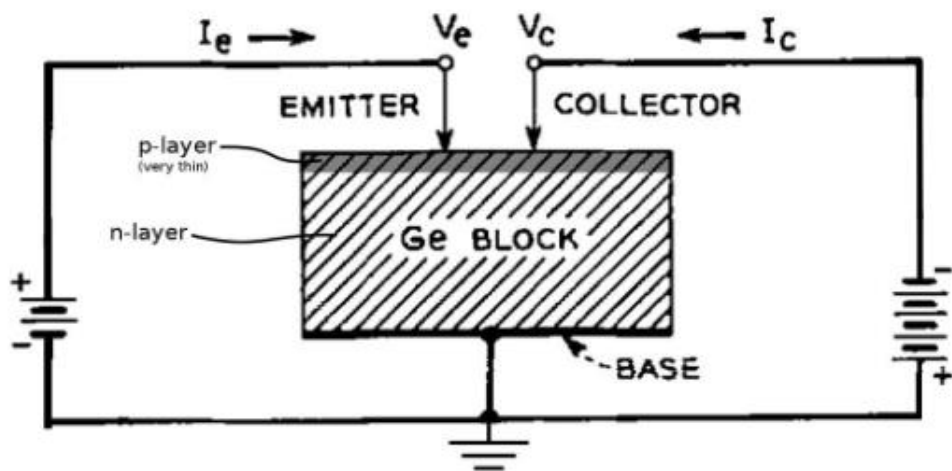
点接触  
晶体管  
1947



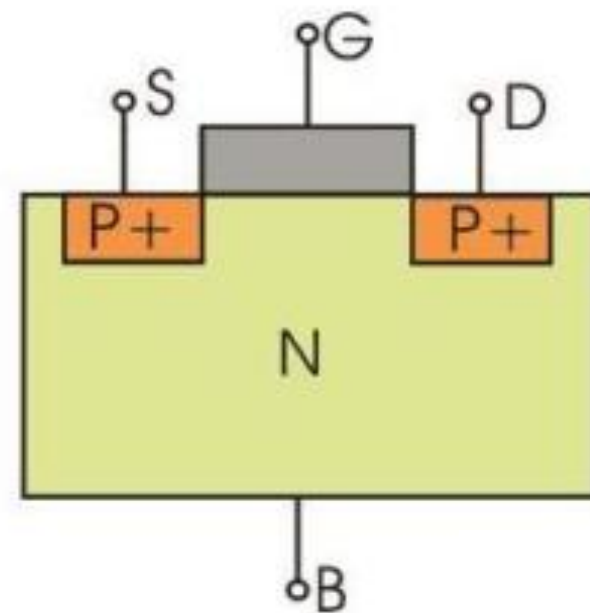
John Bardeen, William Shockley and Walter Brattain, Nobel prize 1956

# (固态) 晶体管的发明

点接触晶体管



MOSFET

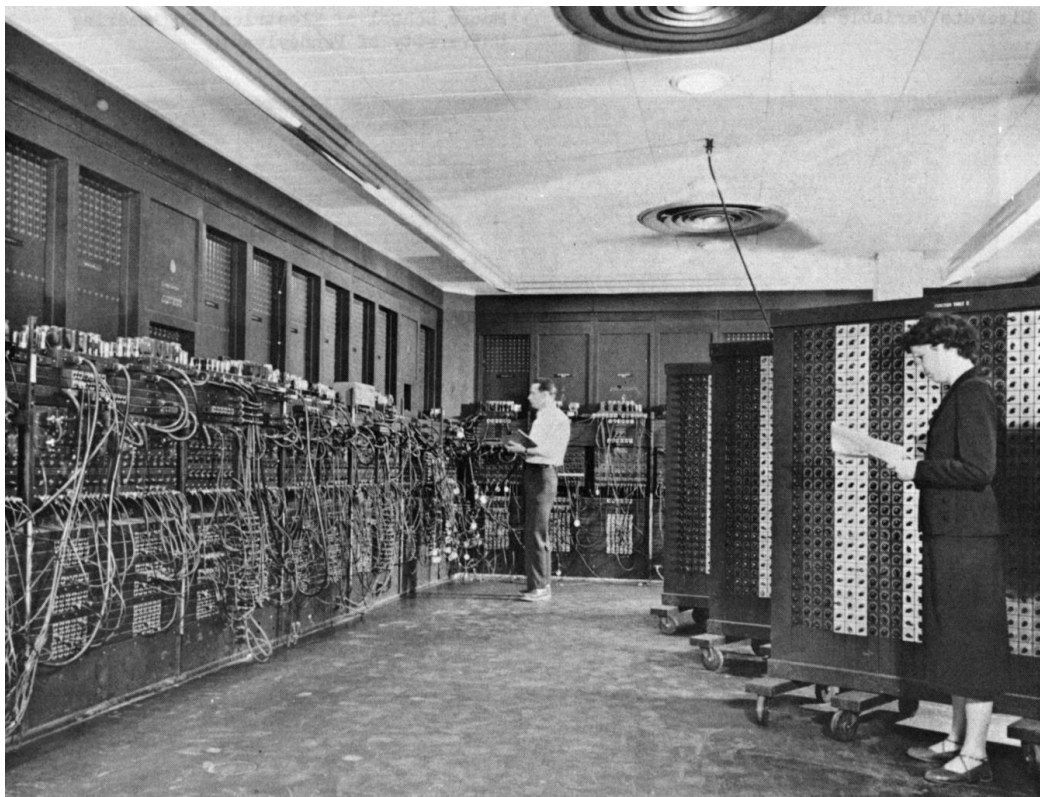


表面态、掺杂、反型、欧姆接触



# (固态) 晶体管的发明

ENIAC, 1946



占地167平方米，重30英吨，耗电150千瓦

5000次/秒 简单加减操作

Intel i5 10400, 2020



Integer Math	42,583 MOps/Sec
Floating Point Math	26,547 MOps/Sec
Typical TDP: 65 W	

26万亿次/秒 浮点运算， 65瓦功耗

# (固态) 晶体管的发明

萨支唐

施敏

Shockley  
Bardeen  
Brattain

Kilby

Noyce

Chih-Tang Sah

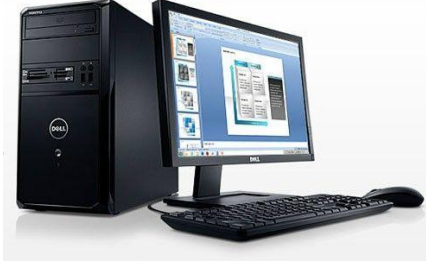
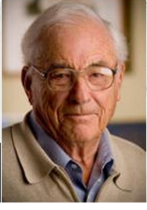
Moore

Dennard

Simon Sze

Smith

Hoff



国家示范性微电子学院  
School of Microelectronics

1947

1958

1959

1963

1965

1967

1967

1969

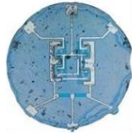
1971



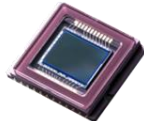
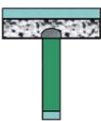
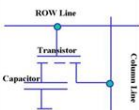
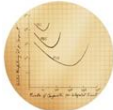
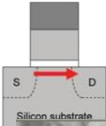
Transistor



First IC



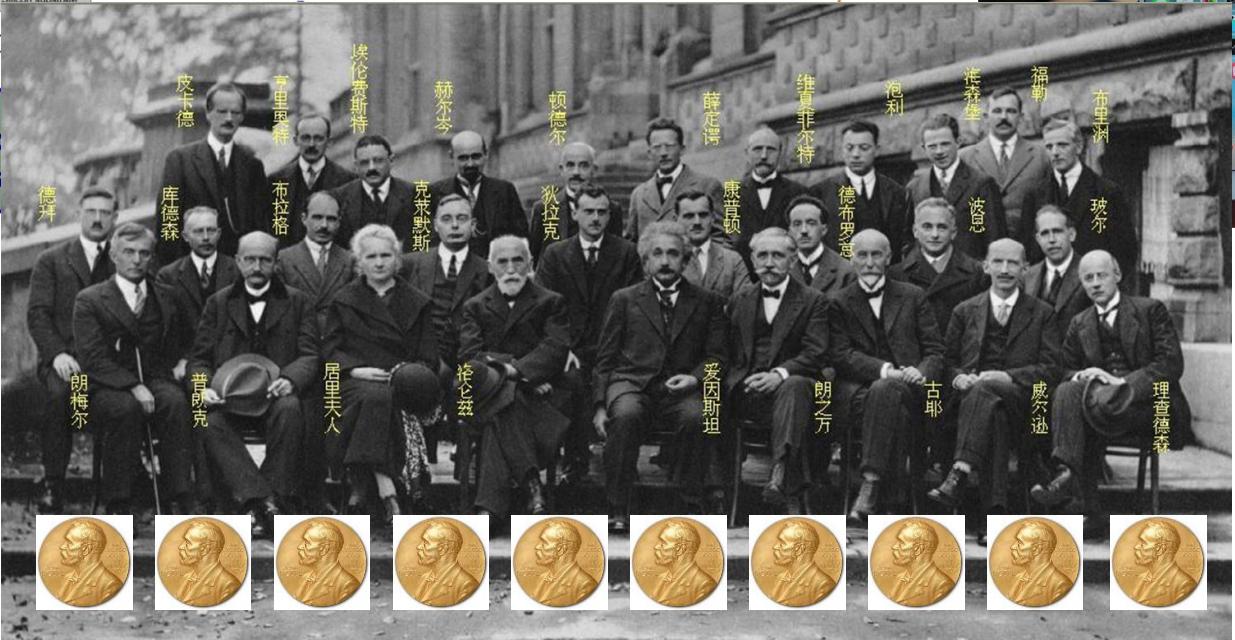
Planar IC



Physics  
to Device

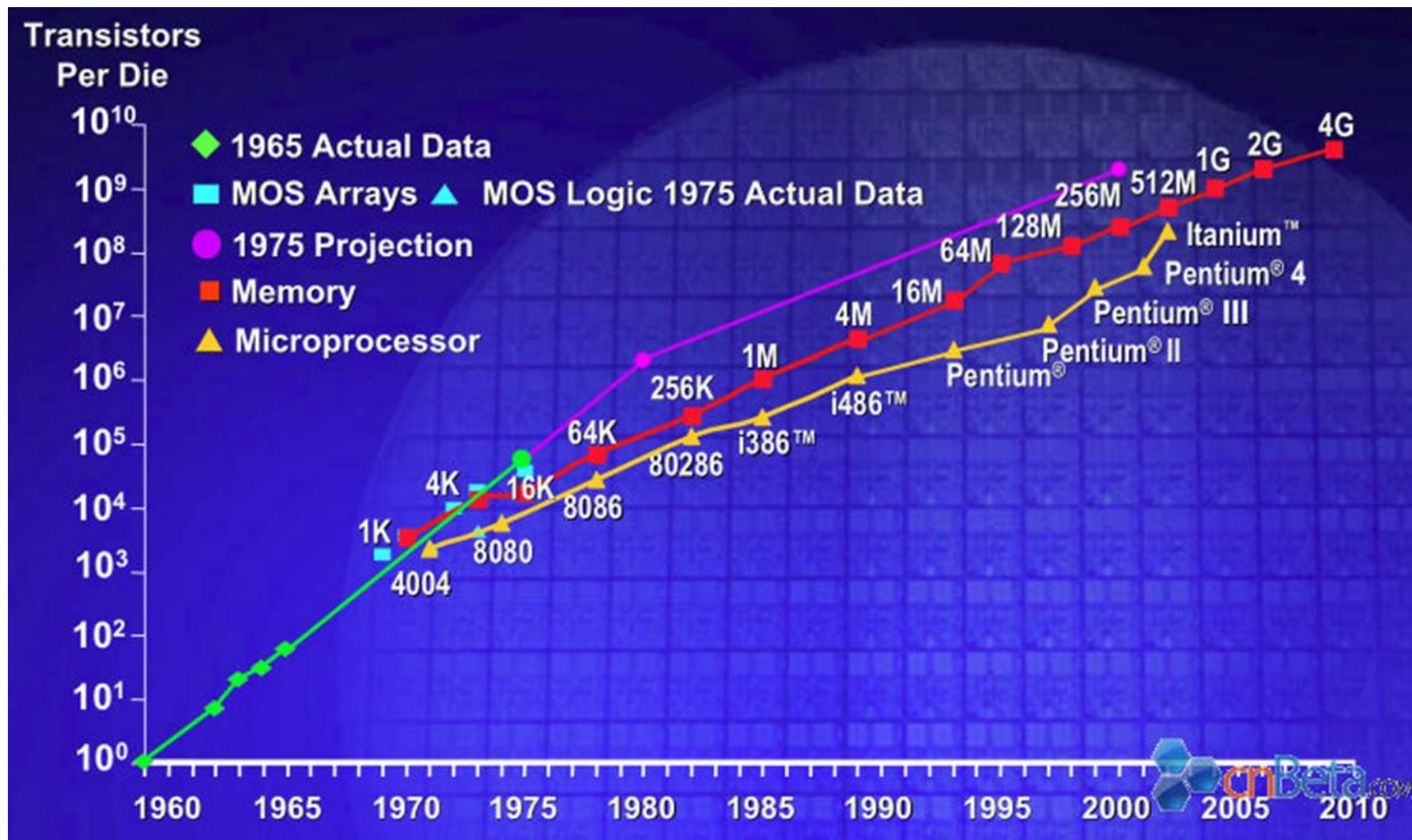
Device to  
Integration

Foundations  
of Process





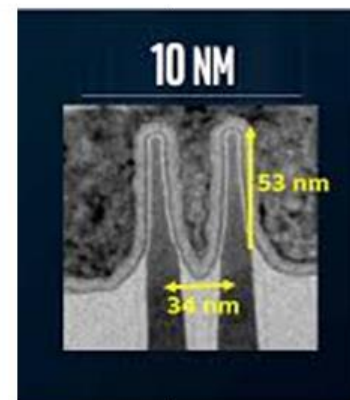
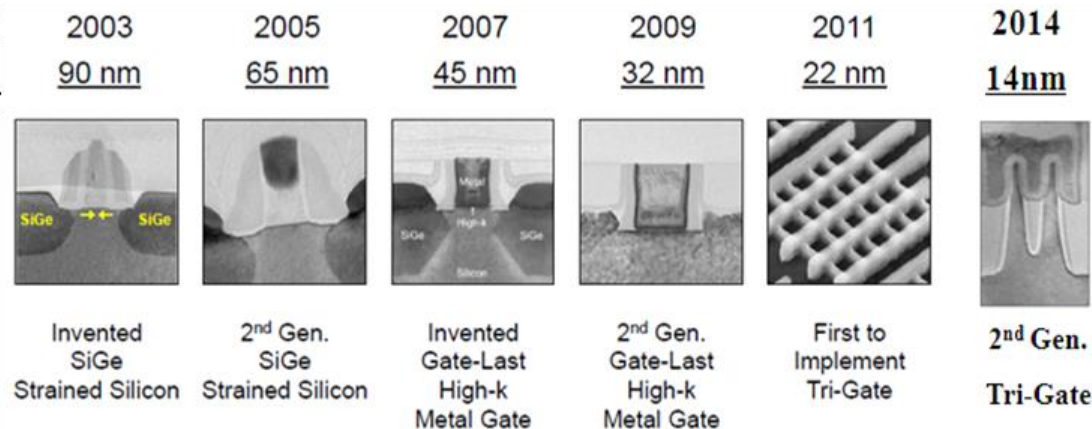
# 当代与未来微电子技术



Moore's Law

# 当代与未来微电子技术

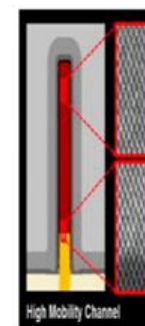
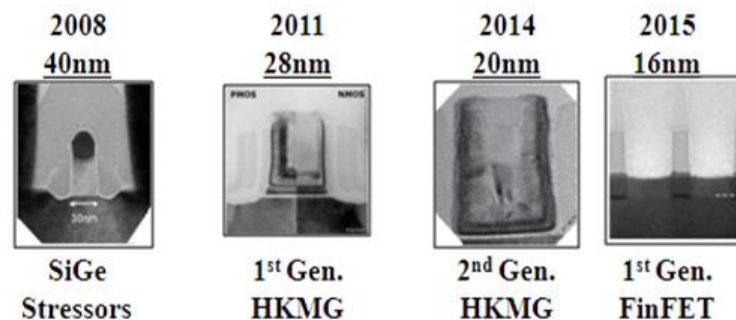
## 美国Intel



2020  
10 nm

3<sup>rd</sup> Gen.  
Tri-Gate

## 台湾TSMC

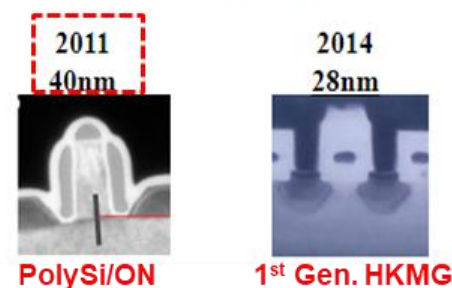


2020  
5 nm

High Mobility Channel  
FinFET  
& EUV lithography

fin pitch ~ 25-26 nm

## 大陆SMIC



→ 2020  
14 nm



# 当代与未来微电子技术

短沟道效应

势垒降低、速度饱和、量子限域、热载流子注入

栅极漏电流

量子隧穿

亚阈值电流

玻尔兹曼极限 (Boltzmann's Tyranny)

迁移率下降

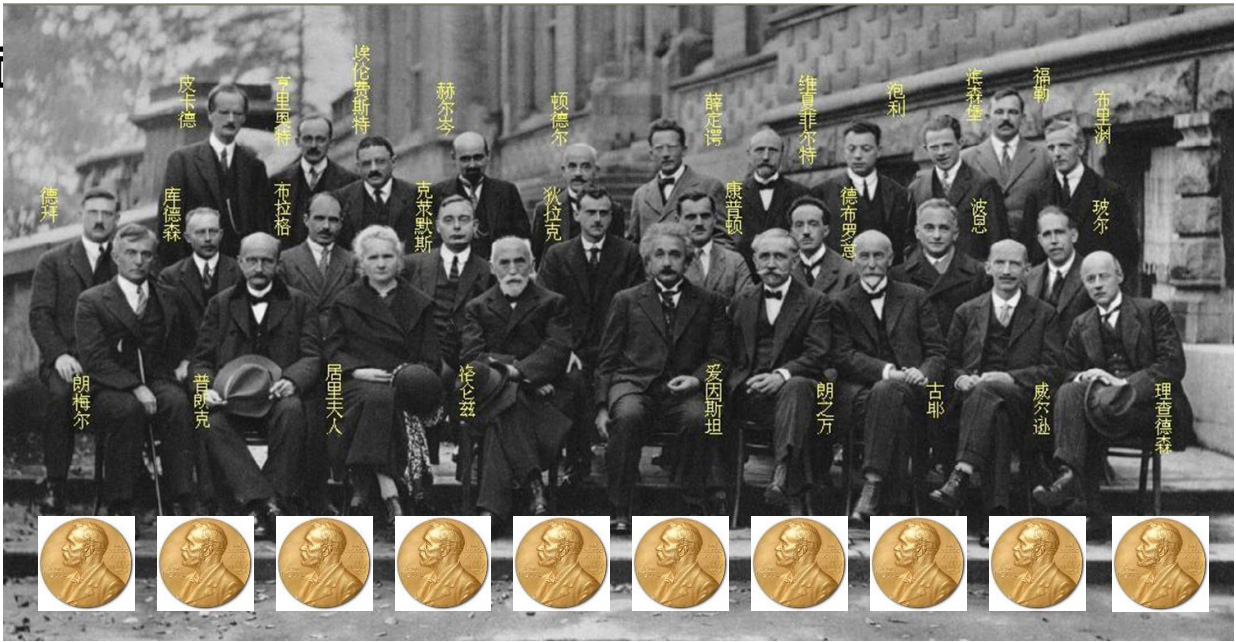
界面



More Moore

More than Moore

Beyond CMOS



# 课程简介

- 什么是量子物理

- **什么是量子物理**
  - **基于量子力学原理的物理学**



**Nobel prizes 1918, 1921, 1922, 1932, 1933, 1938, 1945, 1954**

# 课程简介

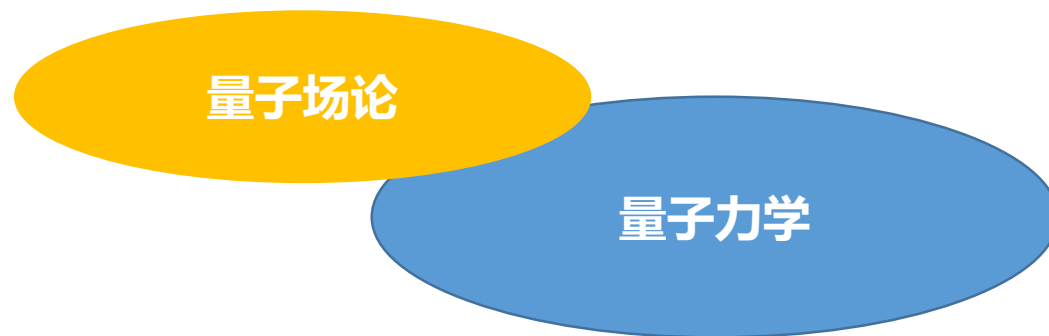
- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学



(狭义) 相对论 量子力学

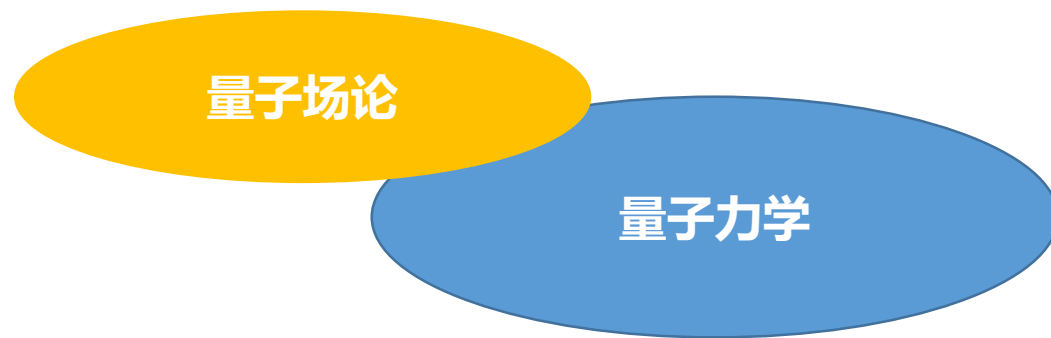
# 课程简介

- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学



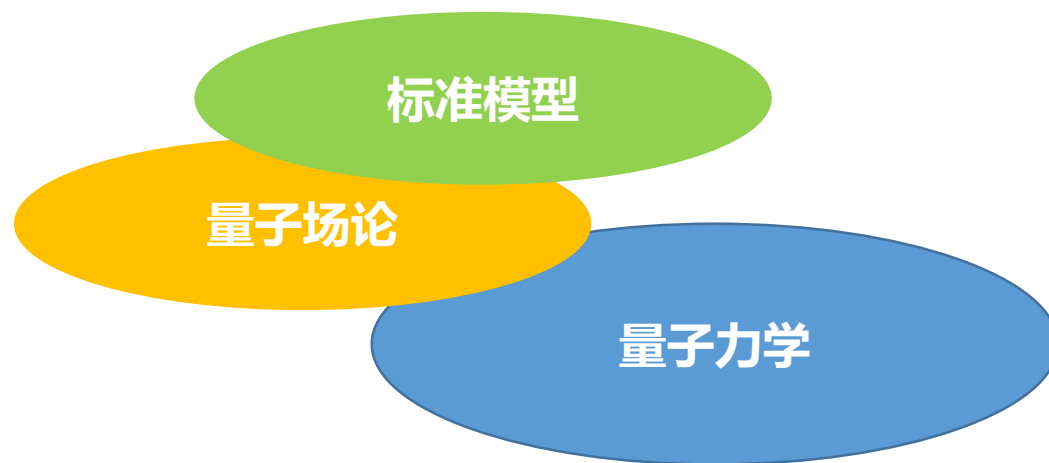
# 课程简介

- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学



# 课程简介

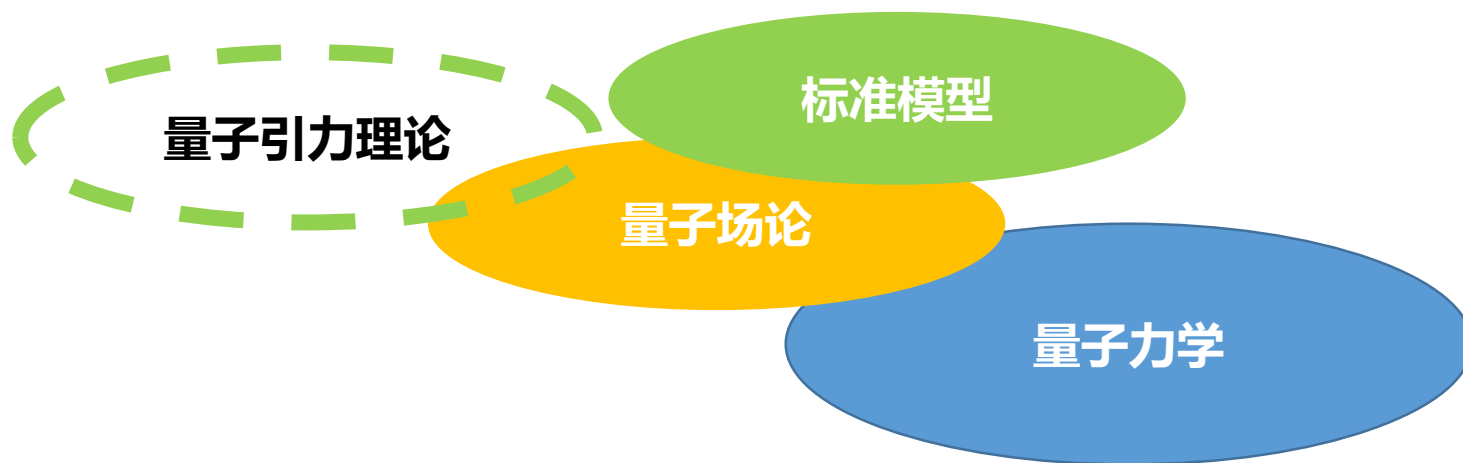
- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学





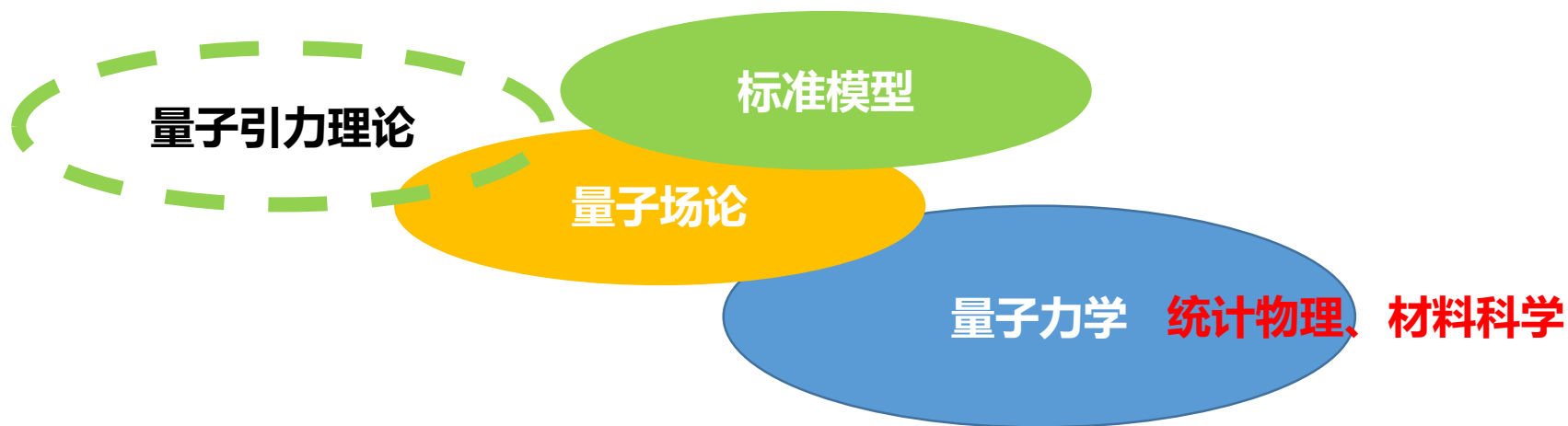
# 课程简介

- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学



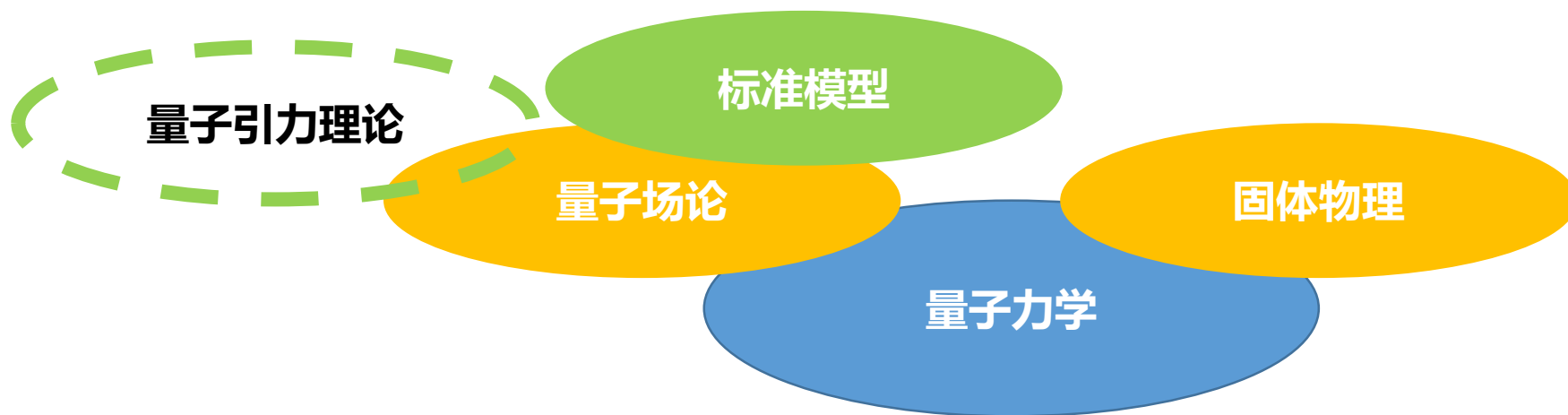
# 课程简介

- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学



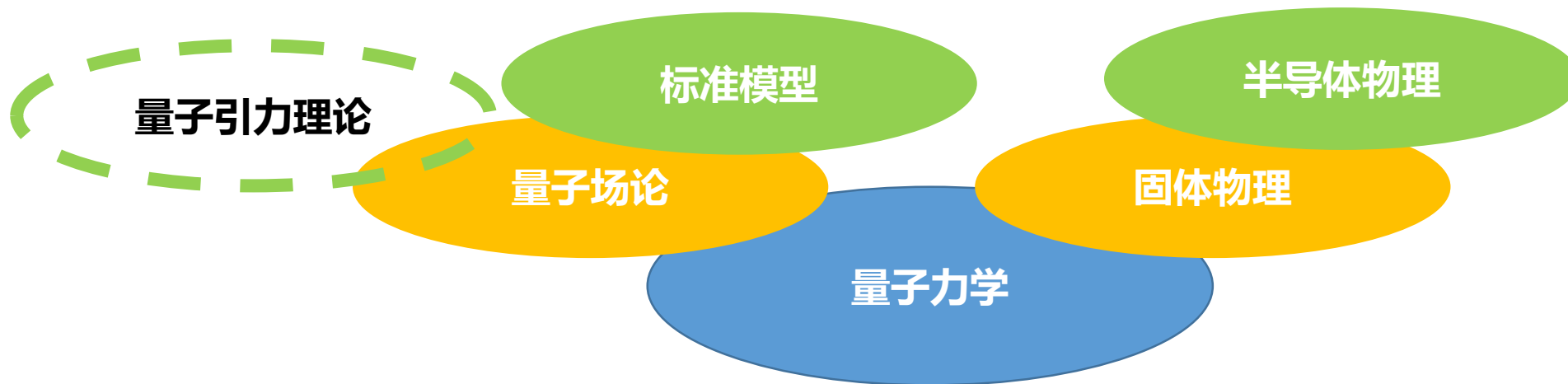
# 课程简介

- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学



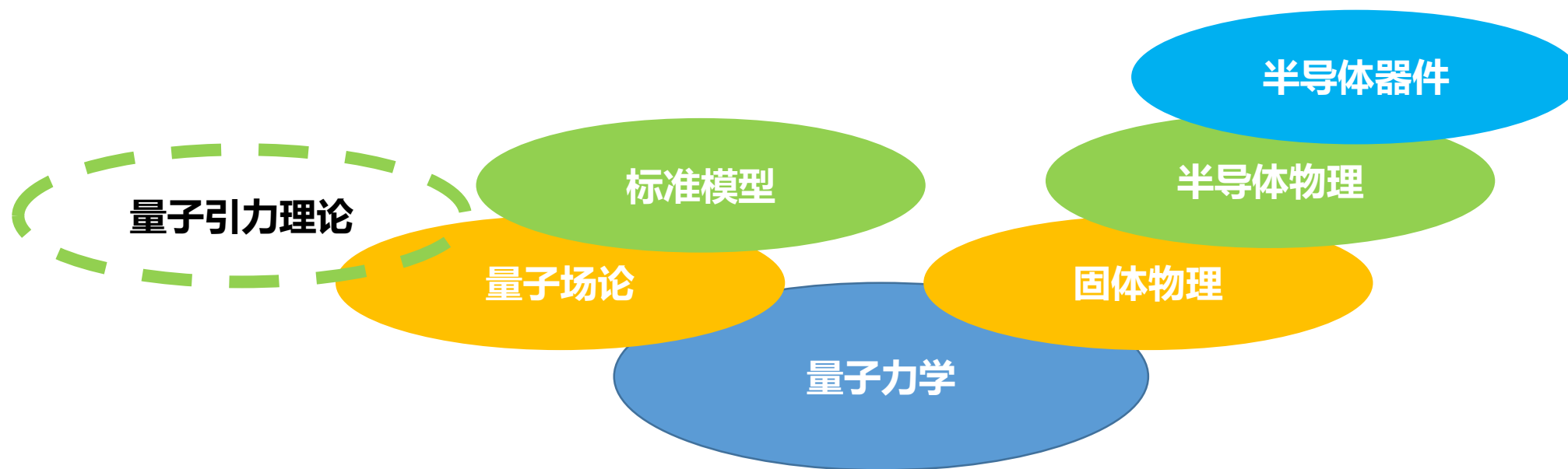
# 课程简介

- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学



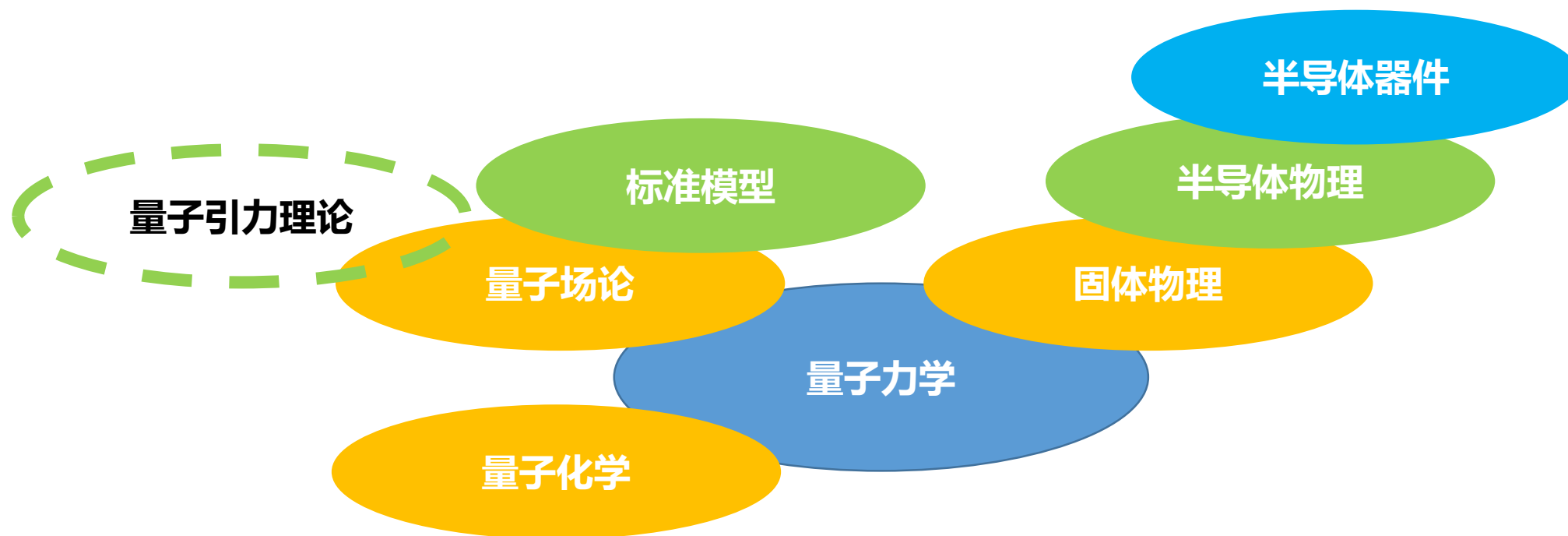
# 课程简介

- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学



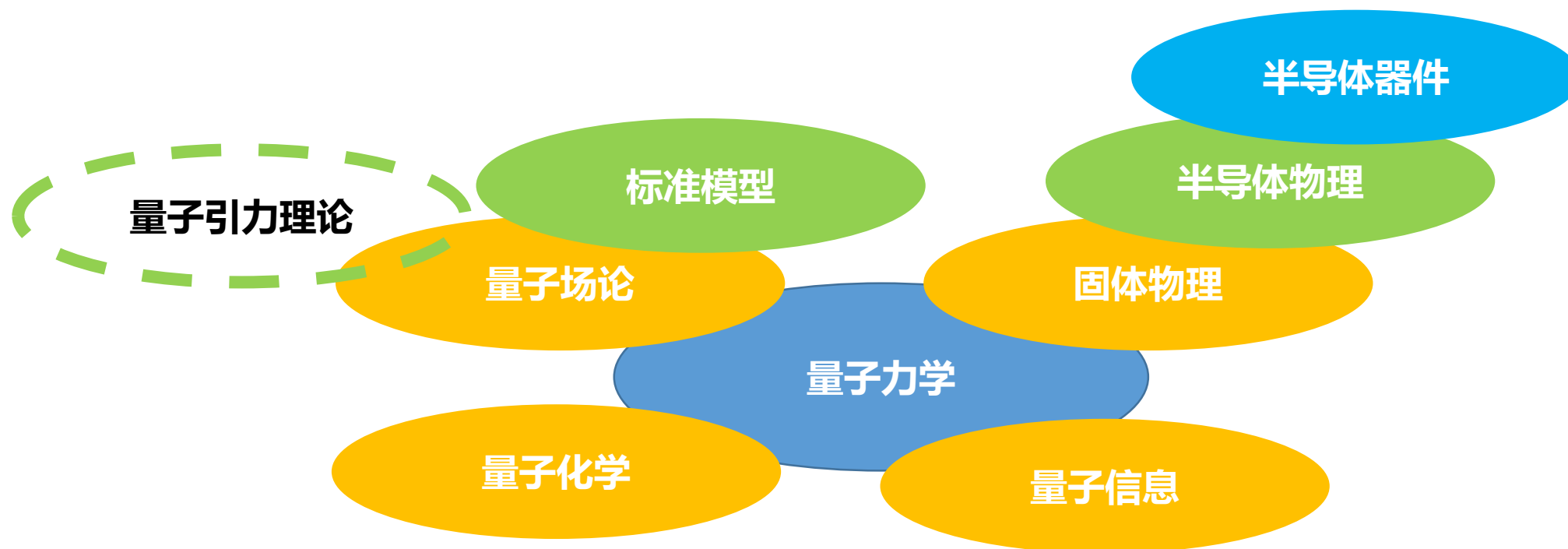
# 课程简介

- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学



# 课程简介

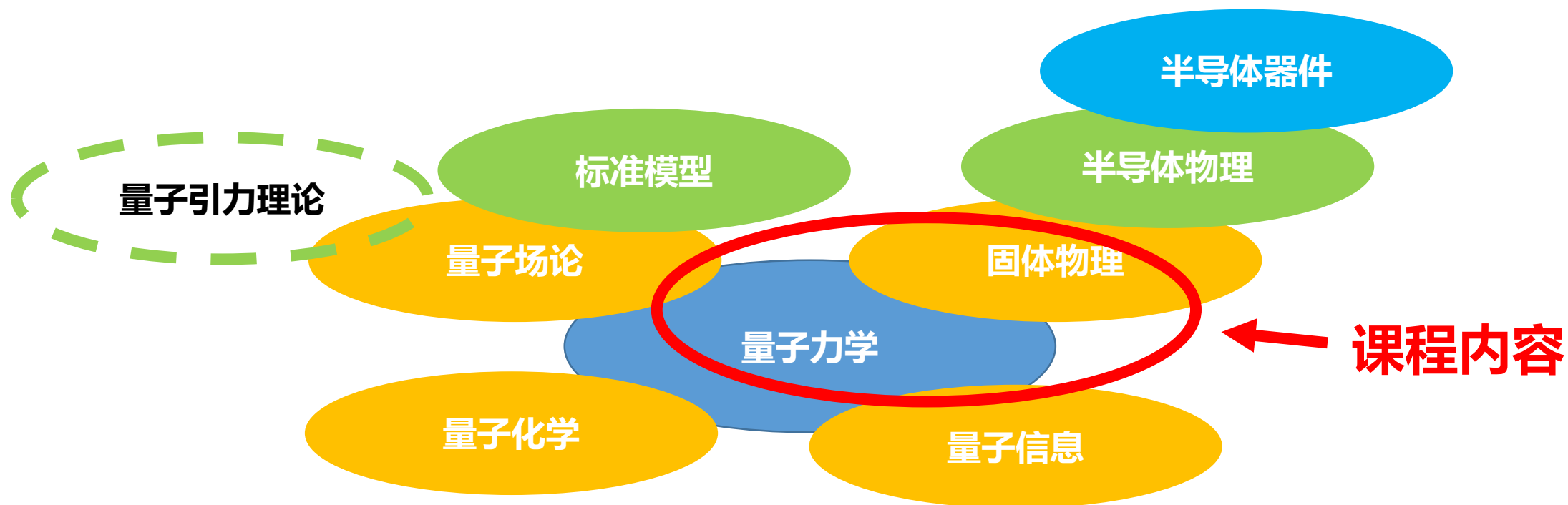
- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学





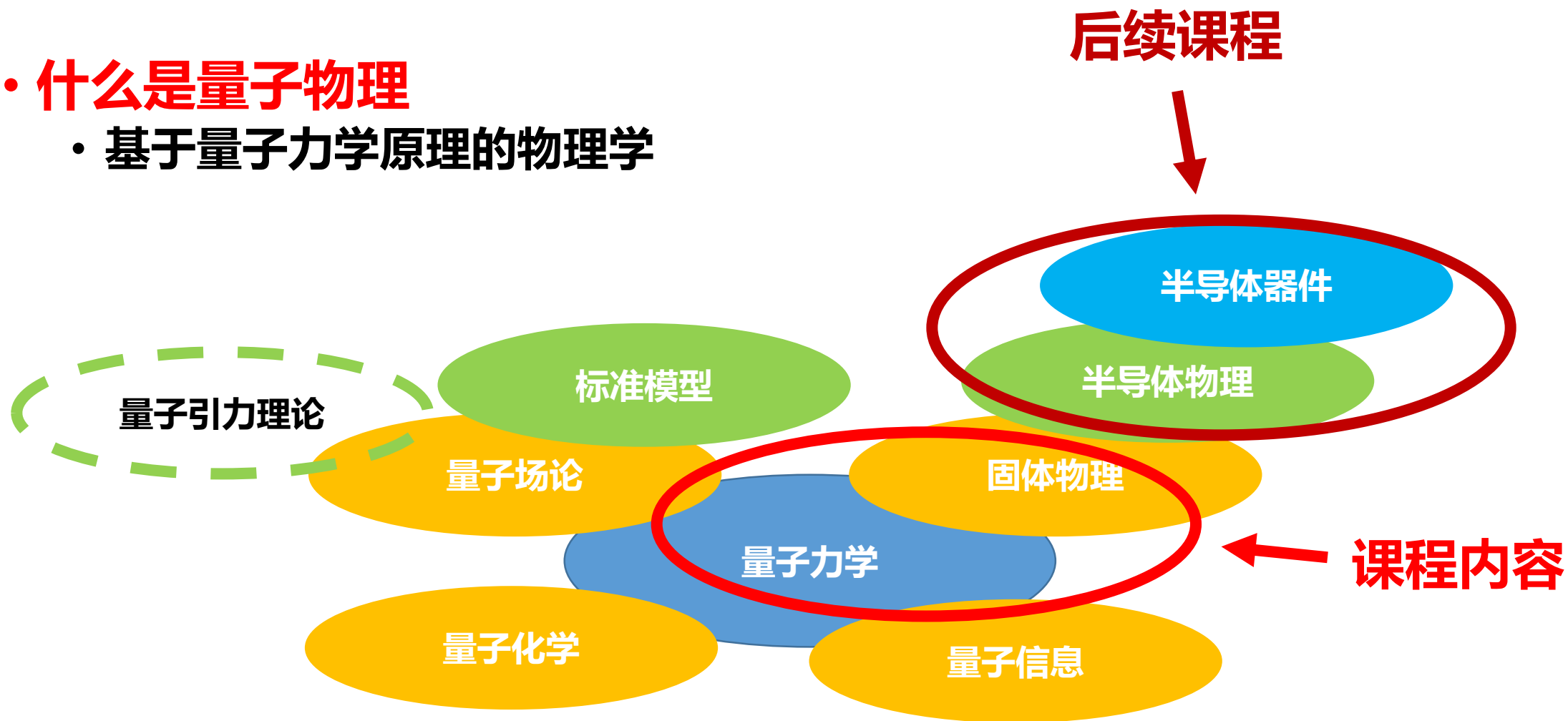
# 课程简介

- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学



# 课程简介

- **什么是量子物理**
  - 基于量子力学原理的物理学



# 课程简介

- 什么是量子力学

# 课程简介

- 什么是量子力学

自然界（特别是微观世界）的事件按照一定的几率发生

# 课程简介

- 什么是量子力学

自然界（特别是微观世界）的事件按照一定的几率发生

事件发生的几率通过一个复数 $\Phi$ 来间接获得， $\Phi$ 叫做事件发生的几率幅， $|\Phi|^2$ 是通常的几率

# 课程简介

## • 什么是量子力学

自然界（特别是微观世界）的事件按照一定的几率发生

事件发生的几率通过一个复数 $\Phi$ 来间接获得， $\Phi$ 叫做事件发生的几率幅， $|\Phi|^2$ 是通常的几率

如果一个事件可以通过几种方式发生（几率幅分别是 $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$ 、...），那么这个事件发生的几率是

$$P = |\Phi_1 + \Phi_2 + \dots|^2 \quad \text{量子干涉}$$

# 课程简介

## • 什么是量子力学

自然界（特别是微观世界）的事件按照一定的几率发生

事件发生的几率通过一个复数 $\Phi$ 来间接获得， $\Phi$ 叫做事件发生的几率幅， $|\Phi|^2$ 是通常的几率

如果一个事件可以通过几种方式发生（几率幅分别是 $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$ 、...），那么这个事件发生的几率是

$$P = |\Phi_1 + \Phi_2 + \dots|^2 \quad \text{量子干涉}$$

如果可以通过某种方式观察到这个事件到底是以哪种方式发生，那么（观察之前）这个事件发生的几率是

$$P = |\Phi_1|^2 + |\Phi_2|^2 + \dots \quad \text{普通的概率叠加}$$



# 课程简介

## • 什么是量子力学

自然界（特别是微观世界）的事件按照一定的几率发生

事件发生的几率通过一个**复数 $\Phi$** 来间接获得， $\Phi$ 叫做事件发生的**几率幅**， $|\Phi|^2$ 是通常的几率

如果一个事件可以通过几种方式发生（几率幅分别是 $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$ 、...），那么这个事件发生的几率是

$$P = |\Phi_1 + \Phi_2 + \dots|^2 \quad \text{量子干涉}$$

如果可以通过某种方式观察到这个事件到底是以哪种方式发生，那么（观察之前）这个事件发生的几率是

$$P = |\Phi_1|^2 + |\Phi_2|^2 + \dots \quad \text{普通的概率叠加}$$



波函数与波粒二象性

量子态与叠加

力学量与算符

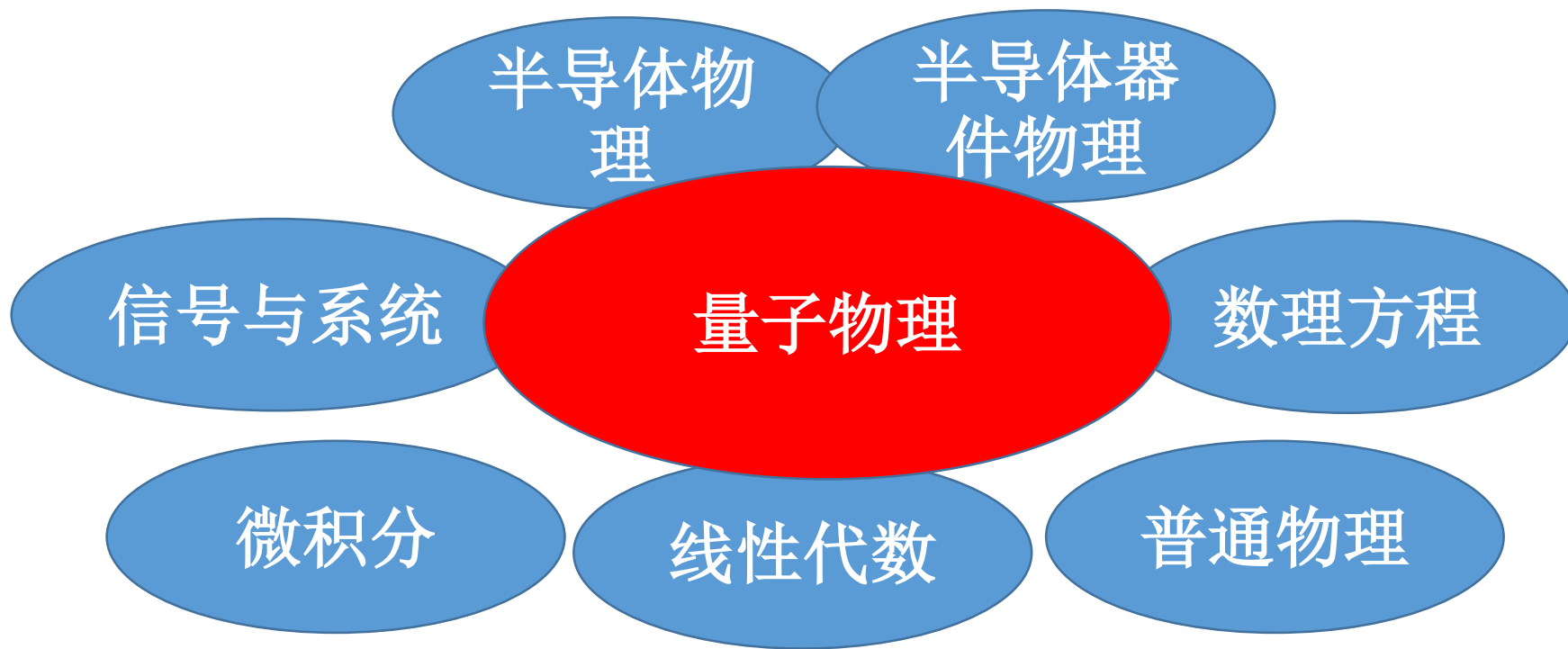
基矢与表象

纠缠、测量与塌缩

不确定原理

# 课程简介

- 什么是量子力学



# 课程目录

## 第一章 绪论(6学时)

- 1.1 课程简介
- 1.2 牛顿力学与经典光学
- 1.3 几率幅与量子物理的基本假设

## 第二章 量子物理的基本概念与框架(14学时)

- 2.1 波函数与薛定谔方程
- 2.2 力学量与算符
- 2.3 基矢与表象
- 2.4 测量与不确定原理
- 2.5 本章总结

## 第三章 简单体系的薛定谔方程(12学时)

- 3.1 自由电子及平面波
- 3.2 量子阱、量子线与量子点
- 3.3 自旋与二能级体系
- 3.4 谐振子与氢原子简介

## 第四章 散射与隧穿(4学时)

- 4.1 势垒散射
- 4.2 隧穿及共振隧穿

## 第五章 周期势场体系的薛定谔方程(10学时)

- 5.1 定态微扰方法
- 5.2 布洛赫定理
- 5.3 电子能带
- 5.4 电子、空穴及声子

## 第六章 半导体器件中的量子物理(14学时)

- 6.1 全同粒子的统计分布
- 6.2 开放体系与跃迁

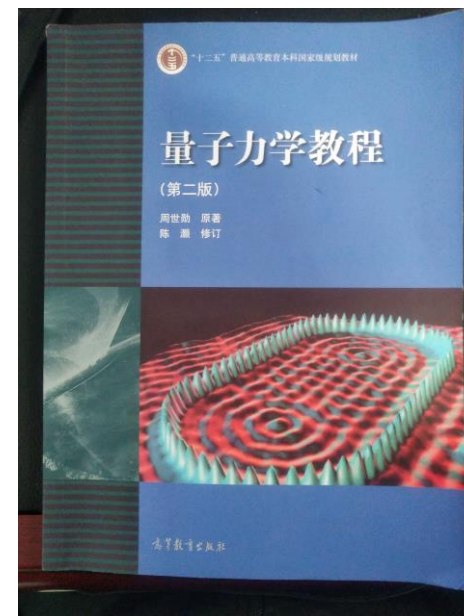
# 课程简介

- **教材（参考）**

- **《量子力学教程第二版（或者第三版）》，周世勋，高等教育出版社**

- **参考书**

- **《费曼物理学讲义》，第三卷**
- **《量子力学概论》，Griffiths**
- **《固体物理学》教材（例如黄昆版）**
- **《热力学·统计物理》教材（例如汪志诚版）**



# 课程简介

- **考核方式（根据实际情况调整）**

- 习题40%+期中考试（半开卷）30%+期末考试（半开卷）30%

- **联系方式**

- gaonan@ustc.edu.cn

- **答疑**

- 每周一 课后 **3A111**

- **助教**

- 汪亚龙, [wangyalong@mail.ustc.edu.cn](mailto:wangyalong@mail.ustc.edu.cn), 18838462553

- 黄小林, [huangxiaomumu@outlook.com](mailto:huangxiaomumu@outlook.com), 17344077324

- 强馨予, [Qxinyu@mail.ustc.edu.cn](mailto:Qxinyu@mail.ustc.edu.cn), 15609689608

# 课程简介

- 电子参考书下载地址

- <http://book.sciencereading.cn/> (校内访问)
- <https://www.feynmanlectures.caltech.edu/> (费曼物理学讲义)
- <http://lib.ustc.edu.cn/> (科大图书馆, 借阅纸质版)

**课程QQ群：**作业发布，答疑



# Questions?



# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 1. 牛顿力学

### ① 牛顿力学中运动状态的概念

- a. 牛顿三定律是什么？最核心的是牛二律
- b. 物体的运动：位置随时间的依赖关系 一维：  $x(t)$ ，三维：  $\mathbf{r}(t)$
- c. 已知  $x(t_1)$ ，如何得到  $x(t_2)$ ？速度的概念：同时知道  $x(t_1)$  和  $v(t_1)$  可以得出  $x(t_2)$
- d. 如何得出  $v(t_2)$ ？加速度的概念：同时知道  $x(t_1)$ ， $v(t_1)$  和  $a(t_1)$  可以得出  $x(t_2)$  和  $v(t_2)$
- e. 牛二律的意义：给出了任意时刻的  $a(t)$ ：  $a(t) = F\{x(t), v(t)\}/m$ ，终结了这一无限循环
- f. 举例：太阳系中行星的  $F$  形式；弹簧滑块系统的  $F$  形式
- g. 对于给定的系统(即  $m$  和  $F$  的形式)，知道了任意时刻  $t_0$  的  $(x_0, v_0)$ ，就可以推演出质点运动的历史与未来
- h. 推广到三维体系
- i. 推广到多质点体系
- j. 完全确定的自然观



# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 1. 牛顿力学

### ② 运动曲线

- a. 运动曲线：横轴是 $t$ ，纵轴是 $x$   
对于给定的系统，知道运动曲线上一个点，并不足以画出整个曲线  
但是如果同时知道了运动曲线上的一个点和它的斜率，就可以画出整个曲线  
( $x, v$ )共同决定了系统的状态，缺一不可
- b. 举例：匀速直线运动的运动曲线、匀加速直线运动的运动曲线
- c. 作业：弹簧滑块系统的运动曲线
- d. 推广到三维多粒子体系
- e. 给定了系统参数（质量、 $F$ 形式），运动曲线的形式（即对应的曲线簇）就确定了；而具体取哪一条曲线，取决于初态

# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 1. 牛顿力学

### ③ 最小作用原理简介

- a. 知道运动曲线上的一个点和它的斜率，就能得到整条曲线的原因：可以通过微分的方式逐步获得下一（前一）时刻的状态，这是一种局部方法
- b. 运动曲线的确定也有整体方法：最小作用原理
- c. 定义拉格朗日量  $L\{x(t), \dot{x}(t), t\} = T - V$ ，对任意运动曲线，都对应一个作用量

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L\{x(t), \dot{x}(t), t\} dt$$

- d. 在给定  $x(t_1)$  和  $x(t_2)$  的所有运动曲线中，实际的轨迹对应的作用量取极值（为简单起见，我们只讨论取极小值的情况）

# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 1. 牛顿力学

### ③ 最小作用原理简介

- f. 一个类似的例子：[最速降线](#)
- g. 最速降线的问题描述：给定起点和终点位置，要求小球从起点到终点的运动时间最短
- h. 给定曲线的形状，总能通过积分算出这个时间；再去比较不同的曲线的时间，就可以得到最速降线
- i. 最小作用原理与此类似，不同之处在于要优化的量不是时间，而是作用量
- j. 最小作用原理与牛顿第二定律等价
- k. 牛二的自然观：大自然是一台精密的机器，从一个时刻推算下一个时刻  
最小作用原理的自然观：大自然是聪明的决策者，要求系统选择“最经济”的运动方式

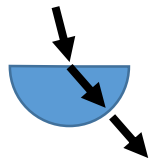
# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 1. 牛顿力学

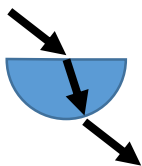
### ④ 作业（下周一提交）

- a. 弹簧滑块系统的运动曲线：  
假设一个质量为 $m$ 的质点在 $F = -kx - c\dot{x}$ 形式的作用力下作一维运动，初始位置为 $x_0$ ，初始动量为0，对于 $k \gg c$ 和 $k \ll c$ 两种情况，分别写出该质点的运动方程，即 $x(t)$ 的形式，并且画出它的运动曲线
- b. 复习高中光学课的内容，并回答以下问题：光由空气入射到半圆柱形玻璃砖中再回到空气，下面哪些光路是可能的？

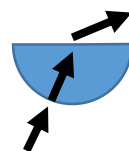
(A)



(B)



(C)



(D)



# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 2. 经典光学

### ① 几何光学与费马原理

- a. 反射、折射定律回顾
- b. 费马原理回顾：固定起始和终止位置，光线总是走光程取极值的点
- c. 从费马原理导出反射定律
- d. 课后思考：证明折射定律也遵循费马原理
- e. 费马原理的数学形式： $S = cT = c \int_A^B dt = c \int_A^B ds/v = \int_A^B nds$  对实际路径取极值，与牛顿力学的最小作用原理形式类似
- f. 类似的自然观：大自然作为聪明的决策者，要求光线选择最快路径
- g. 哲学批评：费马原理似乎意味着大自然有主观意识，与笛卡尔主义“精神与物质世界严格对立和分离”的观点矛盾：

# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 2. 经典光学

### ① 几何光学与费马原理

h. 费马原理提出的同年，光学专家，笛卡尔主义者Clearselier批评：

“The principle ... is merely a **moral** principle and not a physical one...”

“when a ray of light must pass from a point in a rare medium to a point in a dense one, is there not reason for nature to **hesitate** if, by your principle, it must choose the straight line as soon as the bent one, since if the latter proves shorter in time, the former is shorter and simpler in length? **Who will decide and who will pronounce?**”

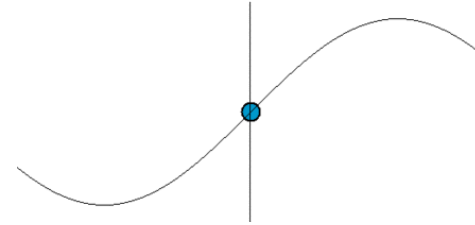
**核心问题：光线如果不实际走过所有的路径，又怎么会知道哪条路径最快？**

# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 2. 经典光学

### ② 波的概念复习

- a. 波是一种集体运动方式 [绳波](#) [弹簧波](#)
- b. 空间中每个点都在做周期振动  
周期运动可以用复平面上的圆周运动来抽象化，周期运动的“迟”与“早”用复振幅的相位表示。**相位是波的核心概念。**
- c. 波的结构中，空间上不同点的振动的周期相同，但是相位不同：后面的点比前面的点运动得“迟”，体现了波（作为一种运动方式）的传播过程
- d. 平面波的数学表达： $\psi(x, t) = e^{i(kx - \omega t)}$   
 $\omega$ ：圆频率； $k$ ：波矢； $\lambda = 2\pi/k$ ：波长
- e. 三维情况
- f. 波阵面（波前）：相位相同的平面
- g. 点波源的波阵面 [水波](#)
- h. 波的叠加（干涉） [水波的叠加与干涉](#)



# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 2. 经典光学

### ② 波的概念复习

- i. 波的叠加是运动模式的叠加，不同的波对应不同的物理量
- j. 由于运动是有时间依赖关系的，波的叠加需要考虑相位，一个方便的描述是用复数的求和来描述
- k. 波叠加的数学表述：
  - [双缝干涉1](#)
  - [双缝干涉2](#)
  - [驻波1](#)
  - [驻波2](#)
  - 双缝干涉的强度分布关系
  - 驻波的边界条件，波矢、频率关系及其离散特性



# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 2. 经典光学

### ③ 惠更斯原理

- a. 惠更斯提出光是一种波动，并且要满足波的传播特性：波前上每一点都是一个小的点光源（次级光源），光作为整体的传播是这些点光源发射出的波之间叠加的结果
- b. 从惠更斯原理导出反射与折射定律
- c. 惠更斯原理解决了费马原理的哲学困难：“光线如果不实际走过所有的路径，又怎么会知道哪条路径最快？”
  - 光确实是走过了所有的路径，只不过是以波动的形式，因为每个次级光源发射的光是可以传播到空间任何位置的
  - 是这些次级波之间的叠加（干涉）导致了其余路径的贡献为零，只有费马原理确定的路径贡献不为零

# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 2. 经典光学

### ③ 惠更斯原理

d. 数学表示 (驻定相位原理) :

- 回顾平面波:  $\psi(x, t) = e^{i(kx - \omega t)}$ , 如果跟随波阵面的运动, 可以理解为光线上的点始终在做形式为  $e^{i\omega t}$  的周期运动, 相位随着波的传播不断积累, 相因子为  $e^{ikx}$
- 平面波的传播路径是直线, 所以相位因子又可以写作  $e^{ik \int ds} = e^{ik_0 \int n ds} = e^{ik_0 S}$
- 相位因子的这一表达式对于曲线的路径也是成立的, 因为曲线可以分段近似为直线, 所以假设光波初始在A处的相位为0, 并且沿从A到B的任意一条路径传播到B点, 那么在B点的相位为  $e^{ik_0 S}$ , 其中  $S = \int_A^B n(P) ds$  就是费马原理里面接触到的光程
- 由于光的波动性, 光从A点传播到B点, 所有的路径都是可能的, 并且均对B点的复振幅产生贡献; 每个路径的贡献 (复振幅) 互相叠加, 得到B点总的复振幅

$$\psi_B = \psi_A \sum_{\text{all paths}} e^{ik_0 S(\text{path})}$$

- 由于  $\lambda_0 = 2\pi/k_0$  远小于几何光学的关注尺度,  $S(\text{path})$  的一点点变化就会导致相位因子  $e^{ik_0 S(\text{path})}$  的巨大变化
- 如果一条路径不是S的极值, 那么它的贡献总会被其余相似的路径抵消 (相消干涉)

# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 2. 经典光学

### ③ 惠更斯原理

d. 数学表示 (驻定相位原理) :

- 只有使得 $S$ 取极值的路径, 才会与它附近的所有路径相长干涉 (上次作业最后一题)
- 此消彼长, 最后只有 $S$ 取极值的路径具有非零贡献, 从而导致费马原理

### ④ 牛顿力学与波粒二象性

- a. 牛顿力学的最小作用原理与费马原理形式上非常类似, 所以存在类似的哲学困难: “如果质点体系不实际走过所有可能的运动曲线, 它们又怎么知道哪条运动曲线具有最小的作用量呢?”
- b. 大胆的假设: 类比于惠更斯原理, 对于质点体系, 是否有类似的波动理论, 通过波的干涉去解决这一哲学困难?
- c. 答案是肯定的, 物质体系对应的波叫做物质波, 定量描述这一物质波的学科就是量子物理
- d. 量子物理的早期历史: 乌云-》光的粒子性-》物质波
- e. 当前的观点: 所有的物质, 包括光 (电磁场)、粒子、宏观质点等等在内, 都是既具有粒子属性, 又具有波动的属性, 即波粒二象性

# 1.2 牛顿力学与经典光学

## 2. 经典光学

### ⑤ 物质波简介

- a. 波矢与动量, 频率与能量  $\hbar k = p, \hbar \omega = E$   
其中  $\hbar = 1.05 \times 10^{-34} J \cdot s$ , 约化普朗克常数
- b. 定性解释了原子的能量离散特性-》光谱离散特性
- c. 物质波的波长举例:  
质量1克的物体, 以1毫米每秒的速度运动, 物质波波长为  
 $2\pi \times 1.054571817 \times 10^{-28}$  米  
质子质量为  $1.6726219 \times 10^{-27}$  千克, 假如运动速度为1米每秒, 那么它的物质波波长大约为400nm
- d. 波粒二象性: 什么时候更多体现粒子性 (驻定相位原理成立), 什么时候更多体现波动性 (干涉) ?