

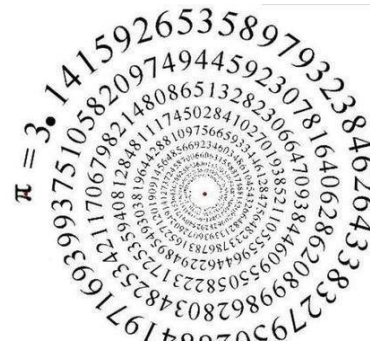
1. 自然常数: $e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$
=2.71828...



$$r = a \cdot e^{b \cdot \theta} \quad \text{等角螺线}$$

2. 圆周率：3.1415926...

如果圆周率是有限的，那么就不会有圆和曲面。



3. 黄金分割:1.618...

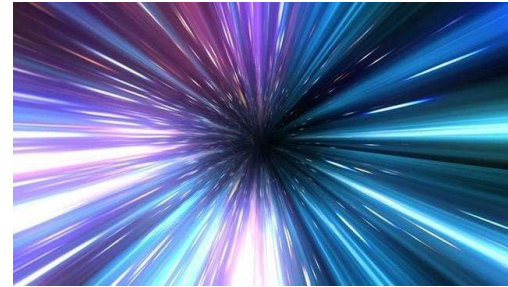
$$\frac{a}{b} = \frac{a+b}{a}$$



4. 质数: 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19...

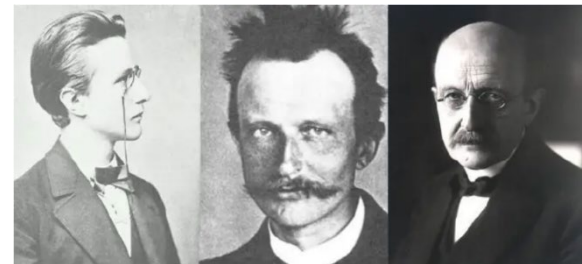


5. 光速: 真空30万公里每秒, 最快的速度。



6. 普朗克常数: $6.626068 \dots \times 10^{-34} \text{m}^2 \text{ kg/s}$

确定 VS 不确定



量子材料（第三代）

——浅谈

刘晓辉

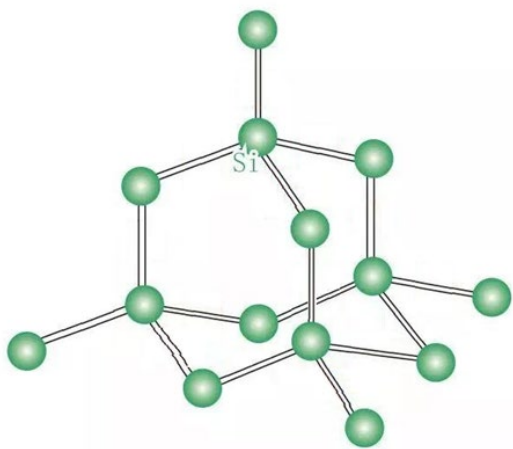
山东大学物理学院

晶体材料国家重点实验室

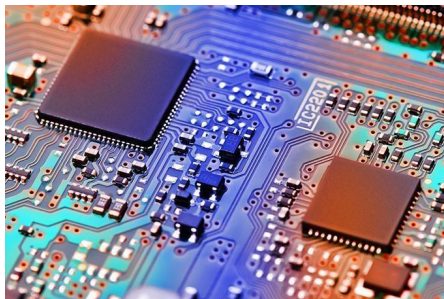
山东大学本科生院，山东大学文学生活馆

山东大学齐鲁青年学者启动经费

国家自然科学基金



主角：半导体



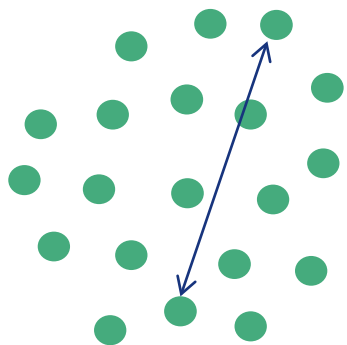
对电子的控制



光电转化

第一代量子材料

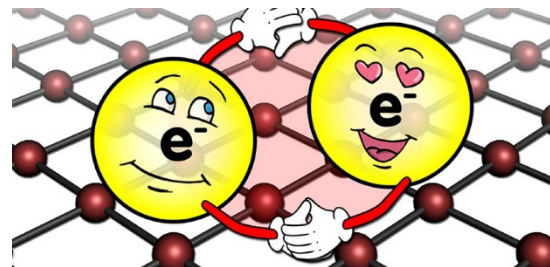
**第一代：基于能带论的单电子模型，主要应用电子的电荷，光电转换…
(1920年代-至今)**



电子关联



电子-电子
磁性，霍尔效应



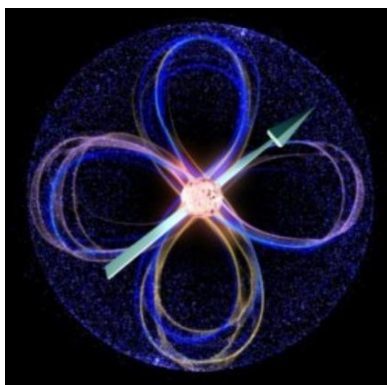
电子-晶格
电阻，超导

第二代量子材料

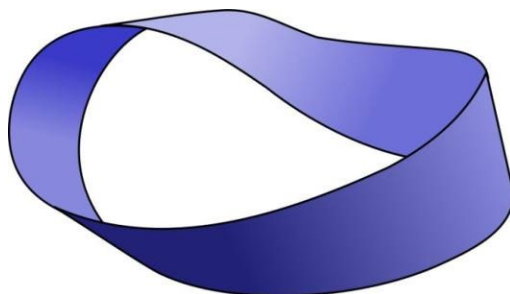
第二代：强电子关联，电子-电子耦合，电子-声子耦合…
(1970年代-至今)

第三代量子材料

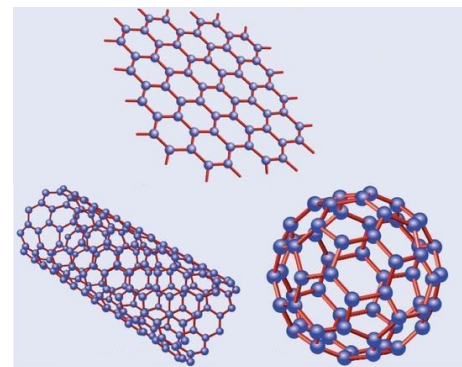
自旋-轨道耦合，拓扑，手性，低维，磁-电耦合... (1990年代...至今)



自旋轨道耦合



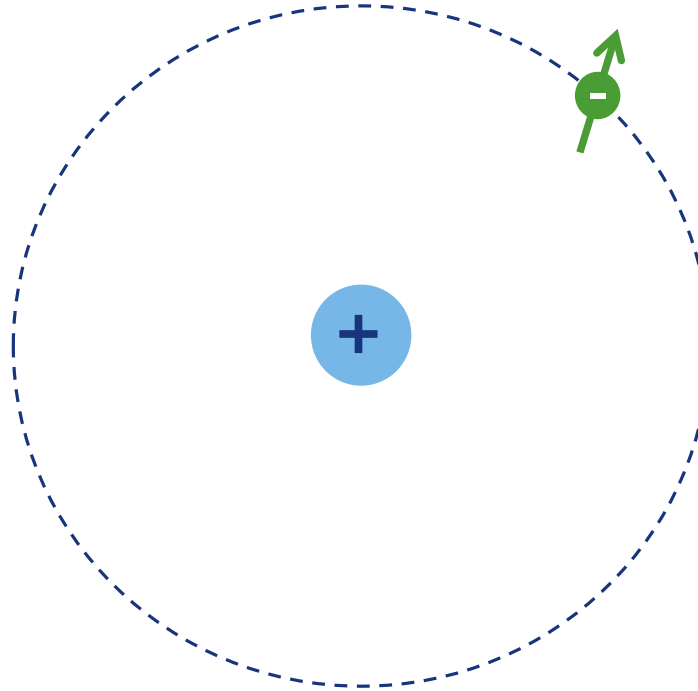
拓扑



低维材料

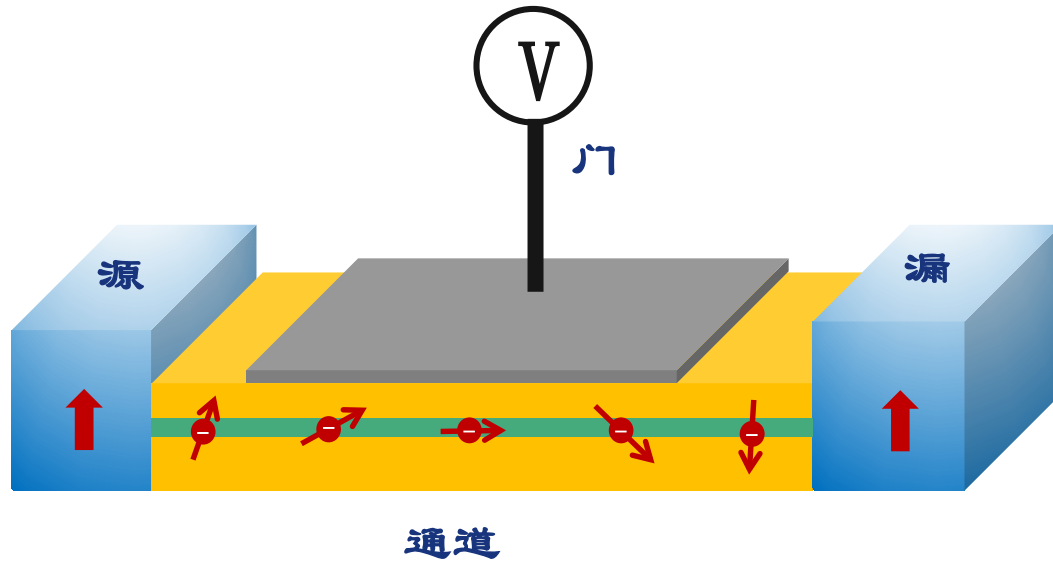
□ 将**自旋**作为信息载体加以操作

自旋轨道耦合



- 原子核的电场，对运动的带自旋的电子产生作用，相对论效应
- 提供了通过电学方法控制自旋的途径

自旋场效应管



□ 自旋场效应管

源：自旋注入

通道：自旋输运

漏：自旋探测

门：自旋控制

□ 传统场效应管

源：载流子注入

通道：载流子输运

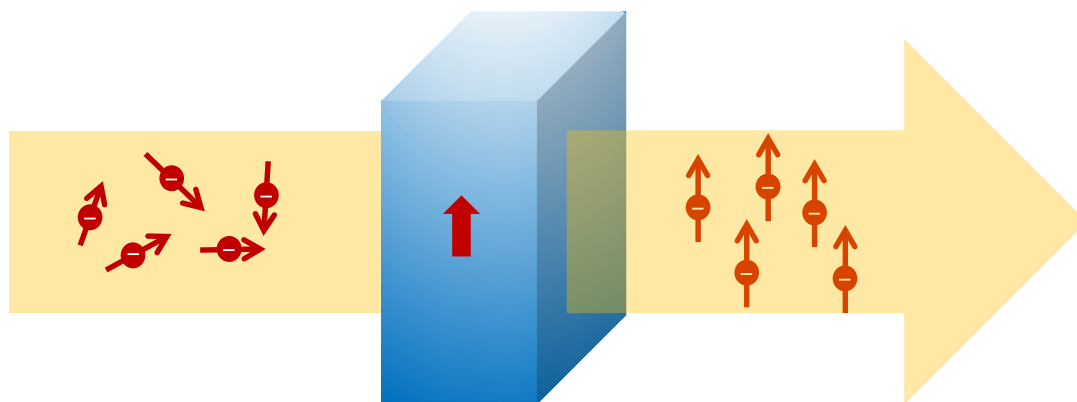
漏：载流子探测

门：载流子控制

□ 由于自旋-轨道耦合，通道中的自旋可以被门电压控制

□ 自旋流代替电流，耗能少，响应快...

实现自旋场效应管的挑战



自旋漏斗

- 如何控制自旋电流的高效率注入
- 极化如何保持

TMR (第四代磁阻技术)

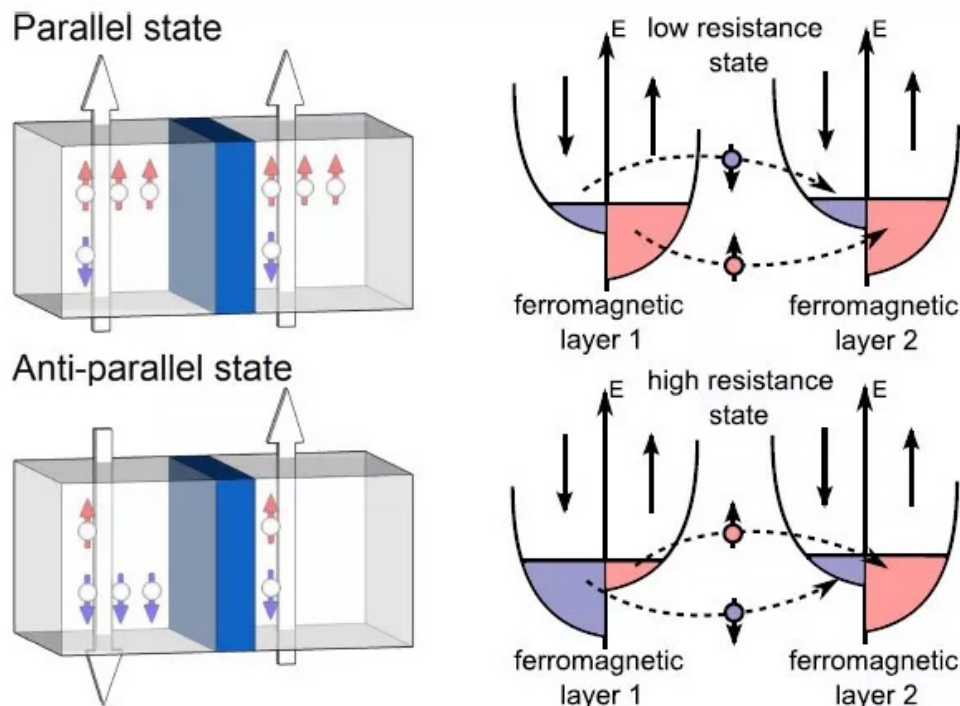


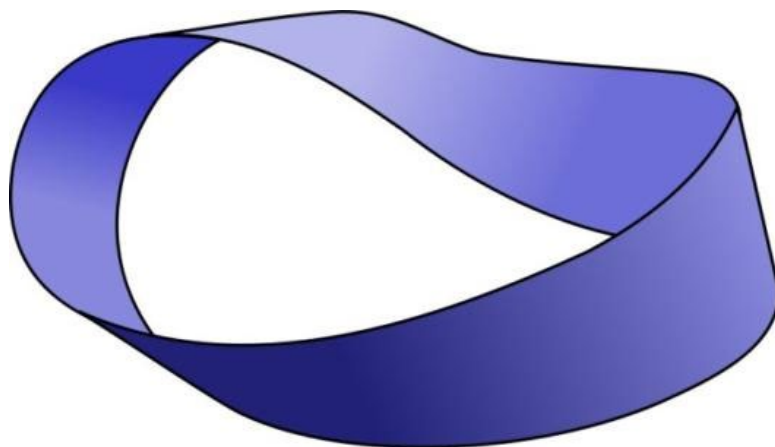
图3 自旋电子隧穿原理

TMR的优势:

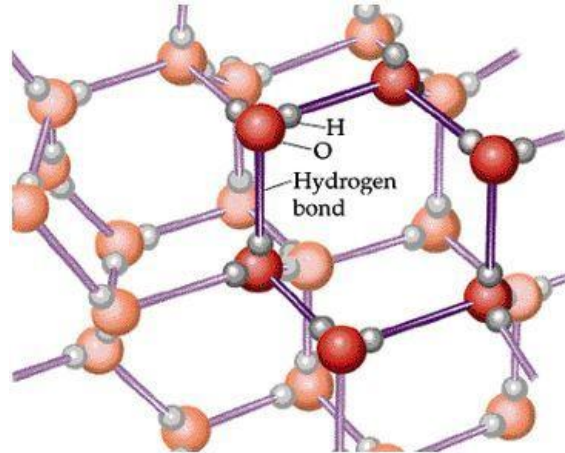
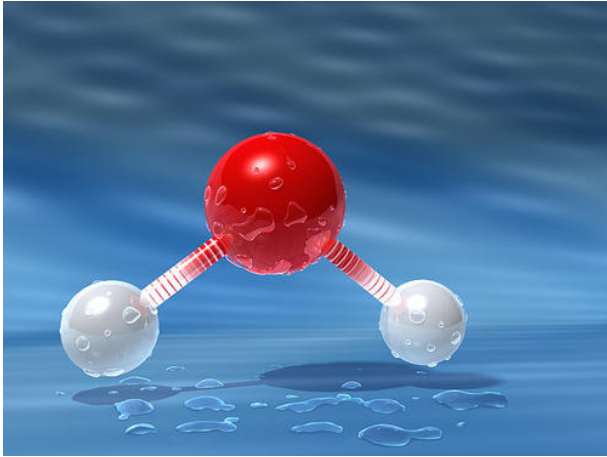
- 功耗低
- 灵敏度/分辨率高
- 工作范围宽
- 工作温度范围大
- 高频响, 可达GHz

- 四代磁阻技术: Hall, AMR, GMR, TMR
- TMR: 利用绝缘体势垒, 电子的量子隧穿, 选择性地透射
- GMR: 电阻取决于在薄膜界面中自旋电子的散射, 散射造成能耗高

拓扑材料



对称性和相变



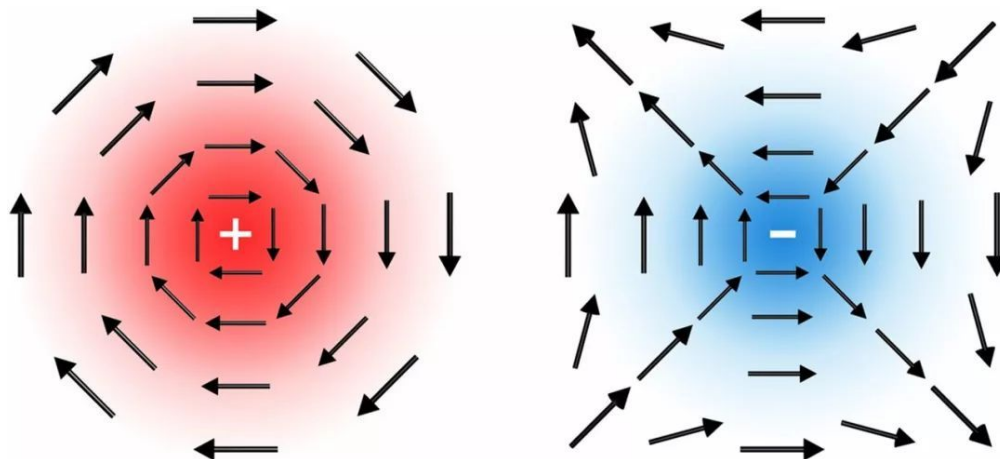
对称性改变，对称破缺理论

水：水分子杂乱无章排布

冰：水分子有秩序的排布

“序”来描述，如磁有序，电有序…

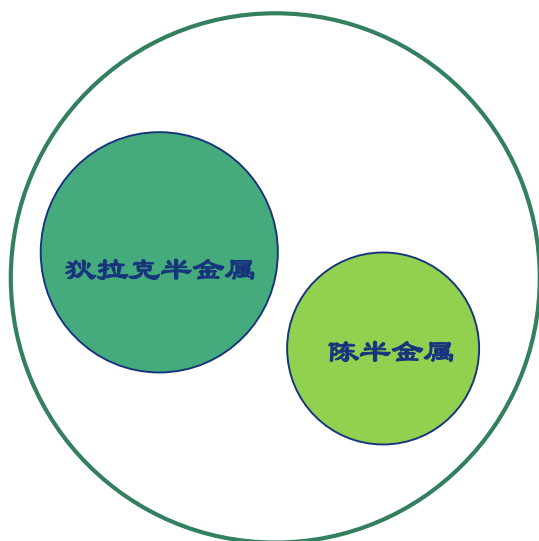
拓扑相变



- 二维体系中的涡旋，低温下成对出现，高温下分开自由运动。
- 不破坏经典对称性

对材料进一步划分

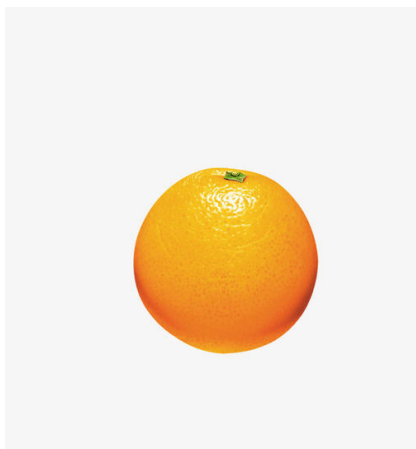
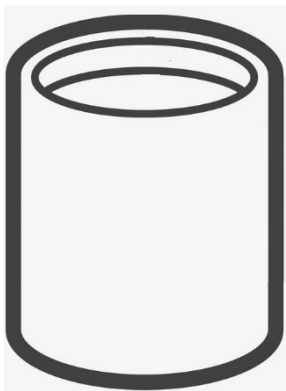
金属



绝缘体



拓扑结构



几何形状在连续形变中所不改变的性质。

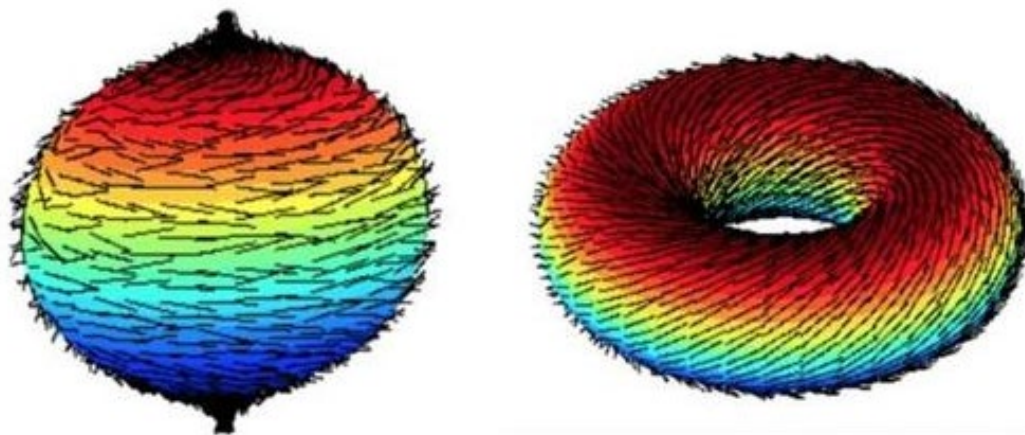
拓扑

七桥问题



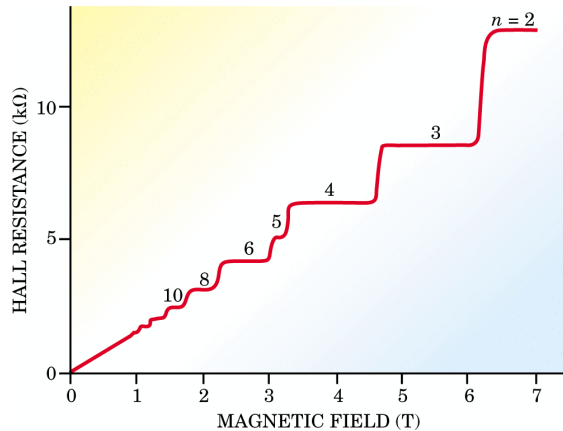
- 研究几何图形或空间在**连续改变形状**后还能保持不变的一些性质的学科。
- 只考虑**物体间的位置关系**而不考虑它们的形状和大小。

毛球定理

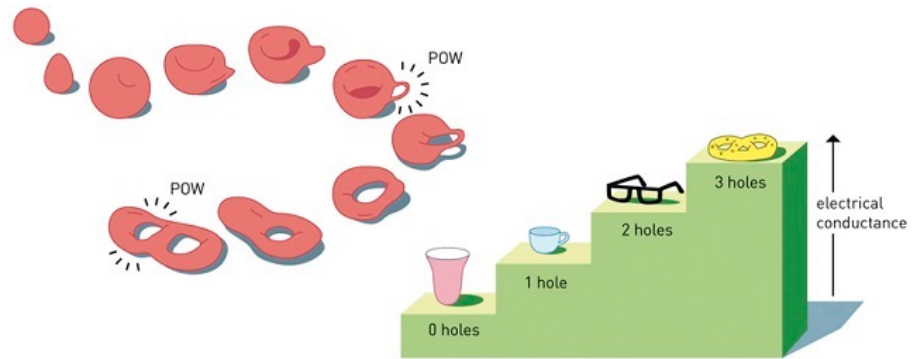


- 毛球上的总存在“涡旋”，环面上可以不存在“涡旋”。
- 地球上始终存在气旋。
- 物理上很多物理量通过球面上的矢量描述，不同的拓扑结构有不同的性质。

量子霍尔效应

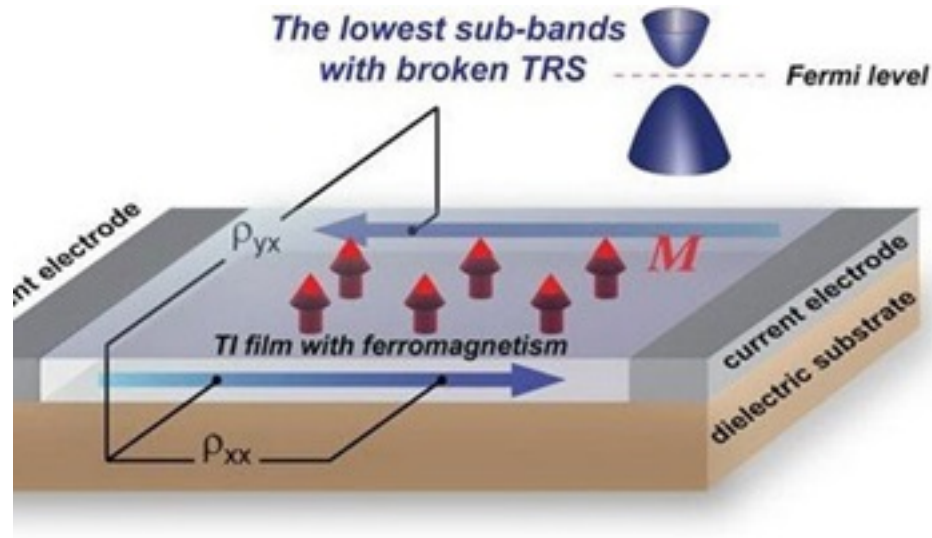


霍尔电阻随着磁场改变跳跃



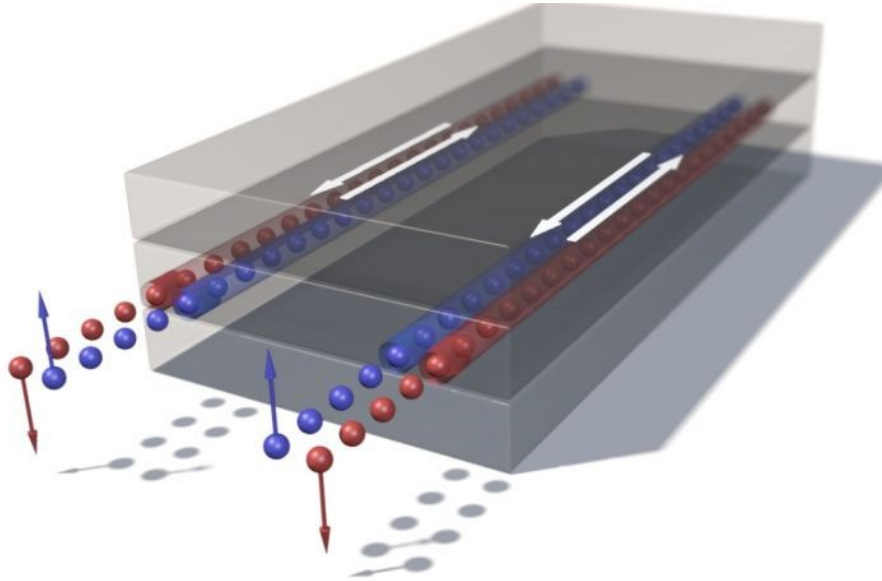
- 整数量子霍尔效应开始，拓扑进入物理领域。
- 分数量子霍尔效应，也可以用拓扑来解释。
- 电子特性用拓扑学描述：“拓扑量子流”。
- 电子的整体性质描述电导率。
- 预言反常量子霍尔效应的预言和证实，确立拓扑的意义。

量子反常霍尔效应



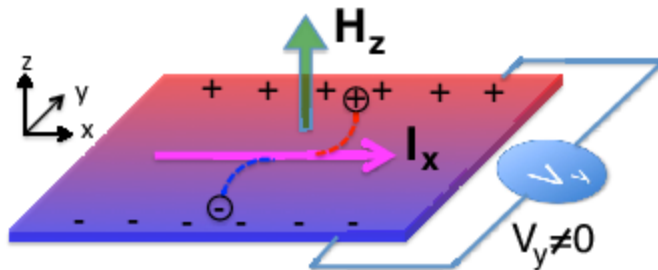
- 不加外磁场获得量子霍尔效应。
- 三维体系。
- 未来电子器件中发挥特殊的作用，可用于制备低能耗的高速电子器件。

量子自旋霍尔效应

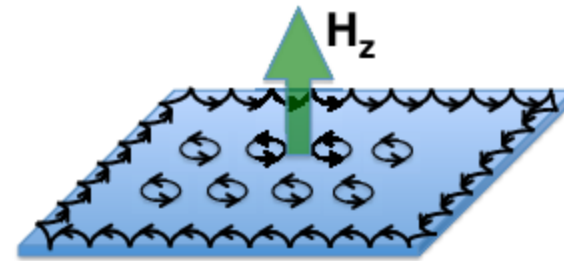


- 不需要外加磁场
- 电流和电子自旋关联
- 边缘处电子有秩序地运动
- 散射小，能耗低
- 自旋作为信息载体

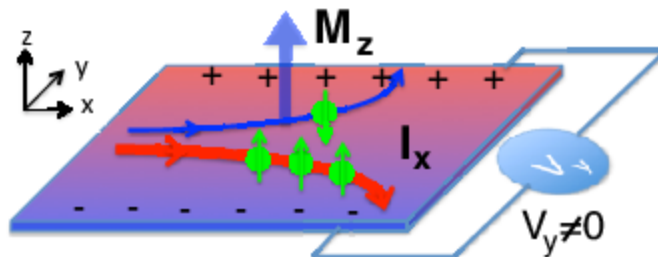
霍尔效应和量子霍尔效应



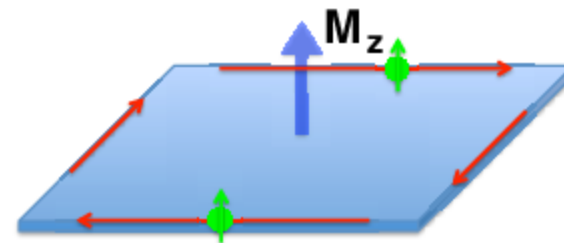
(a) Hall effect



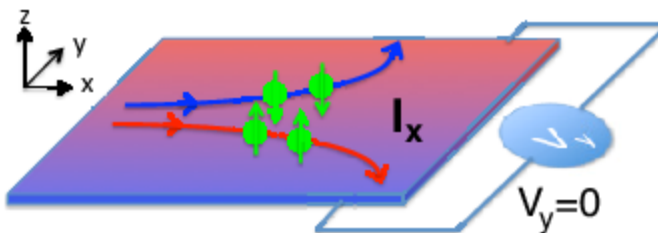
(b) Quantum Hall effect



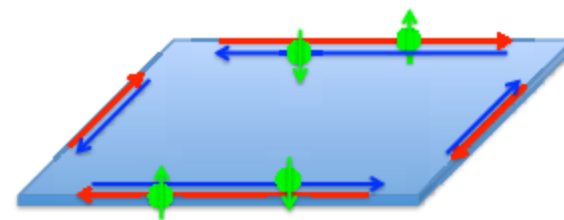
(c) Anomalous Hall effect



(d) Quantum Anomalous Hall effect



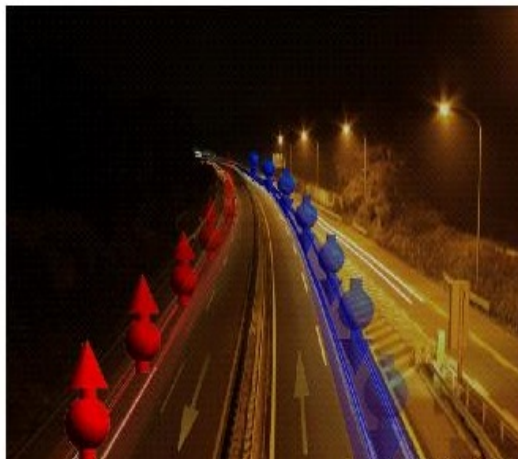
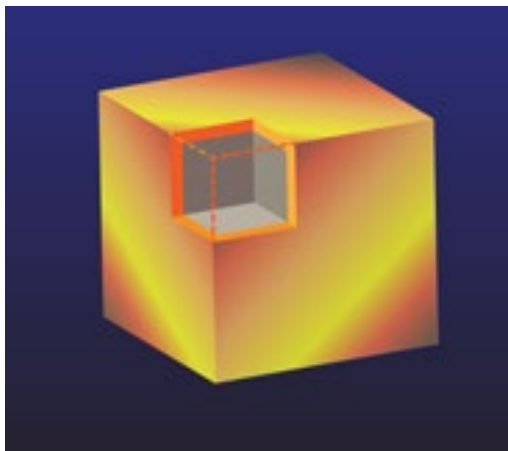
(e) Spin Hall effect



(f) Quantum Spin Hall effect

边缘态：材料和真空拓扑性质不同，导致有特殊性质的边缘态

拓扑绝缘体

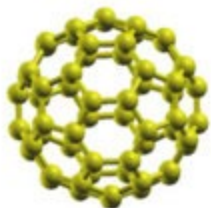


电子-杂质散射	普通导体	拓扑绝缘体表面的导体
散射前		
散射后		

- 内部绝缘，边界导电，电阻小，携带自旋信息。
- 由于材料和真空的拓扑性质决定的

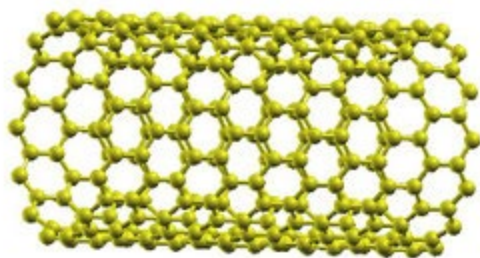
低维材料

(a)



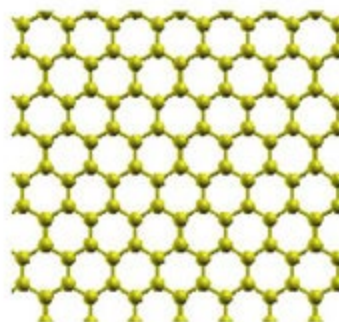
富勒烯

(b)



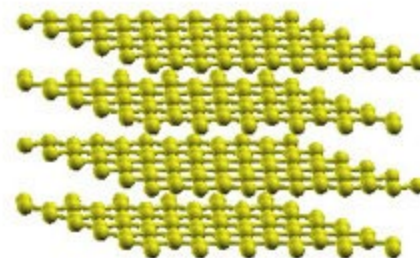
碳纳米管

(c)

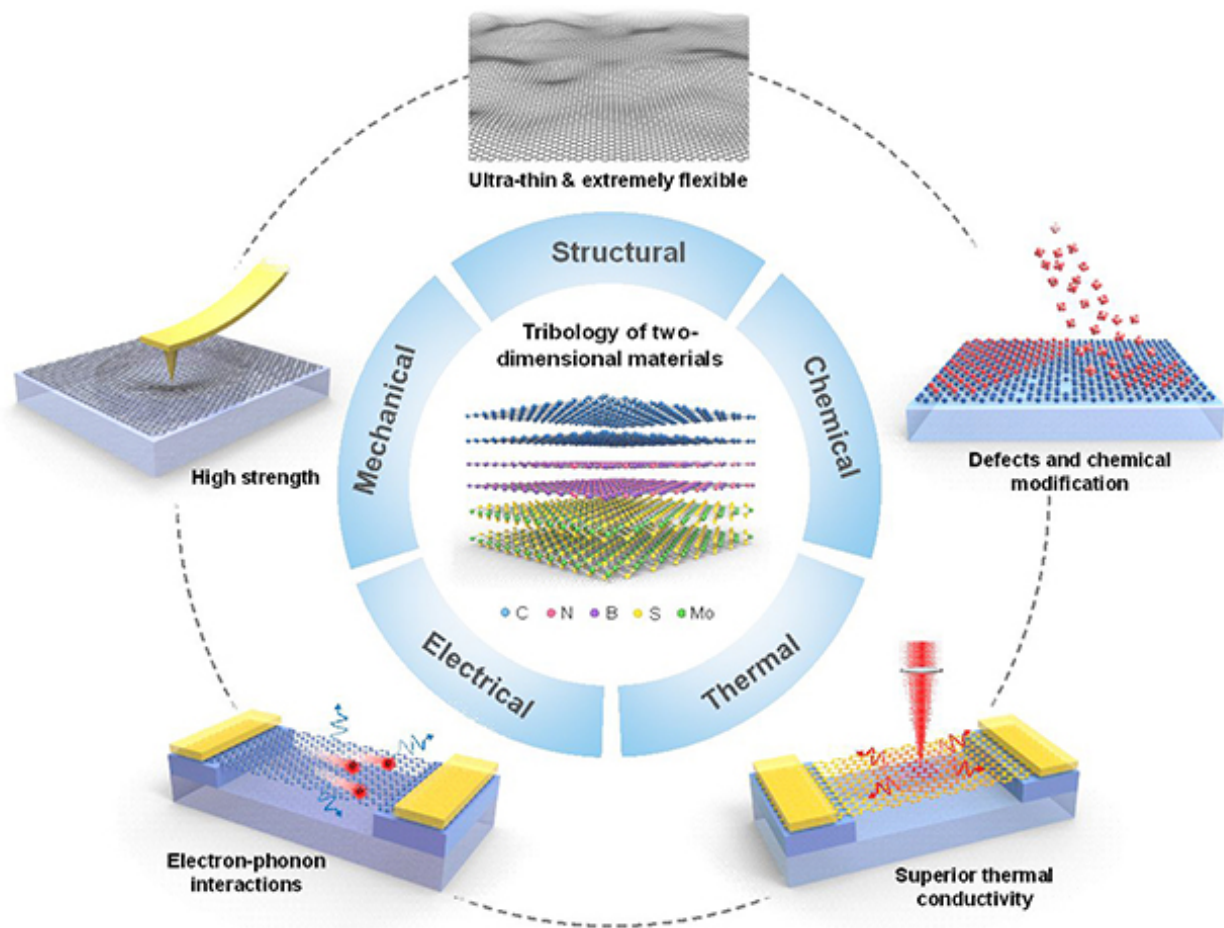


石墨烯

(d)



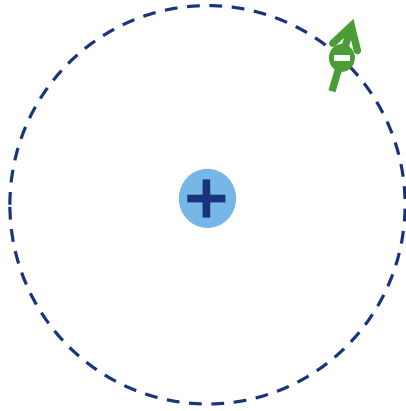
石墨



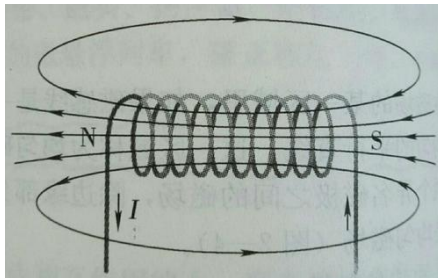
□ 性质丰富，可控性强

电和磁

电

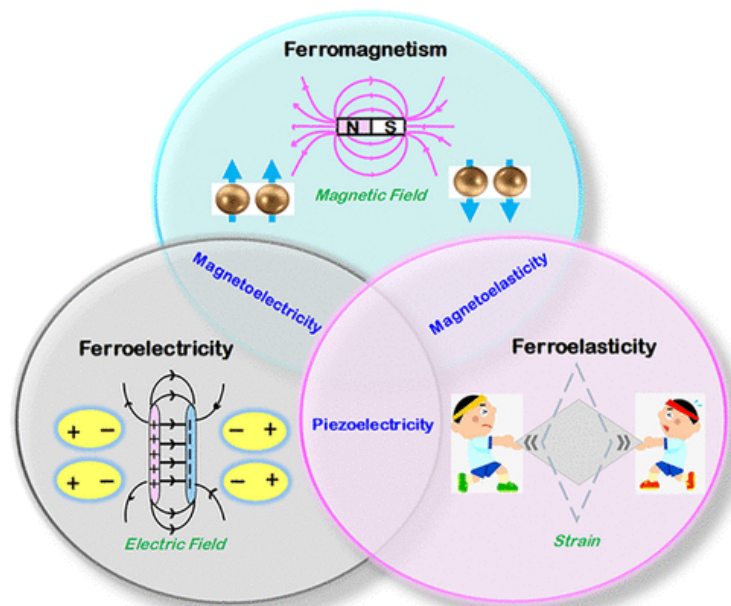
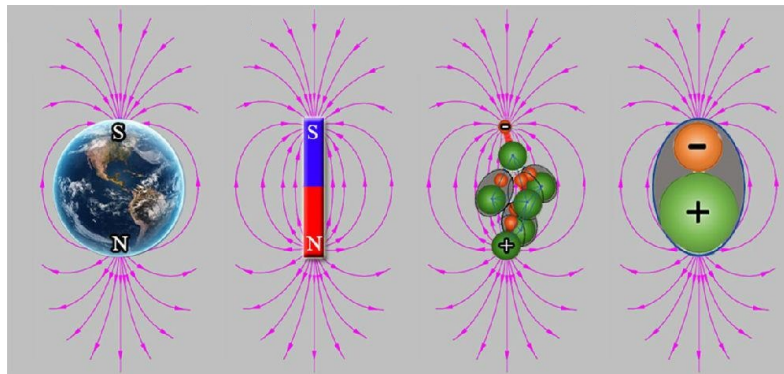


磁



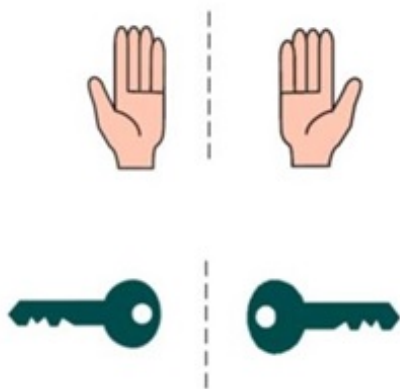
- 电更容易控制。
- 自然界存在电荷，不存在磁单极子。
- 如果通过电控制磁？

多铁材料



- “铁性”：铁磁，铁电，铁弹...
- 多种性质耦合在一起，丰富了控制材料物性的手段。
- 电控磁提供了一个方向。

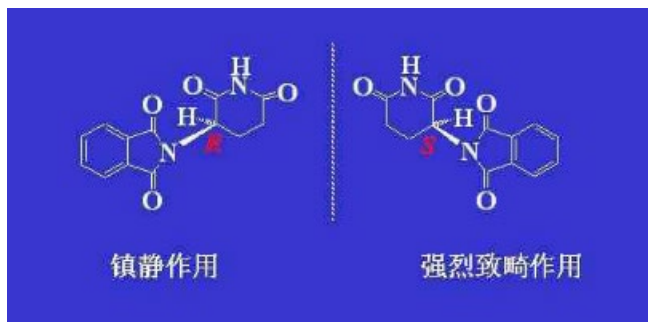
手性材料



照镜子



海螺螺旋方向

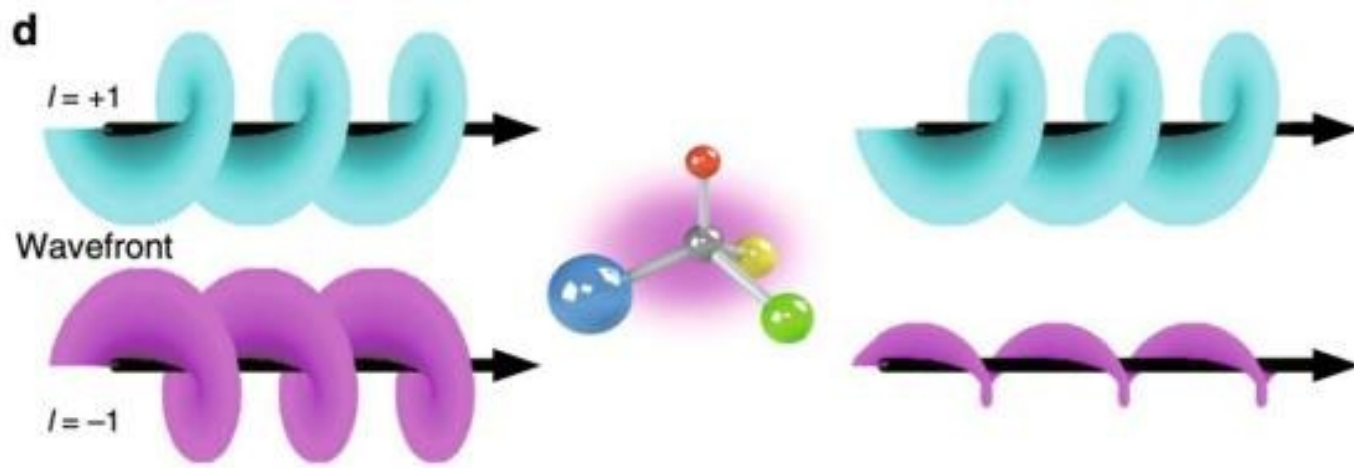


不同手性的药物

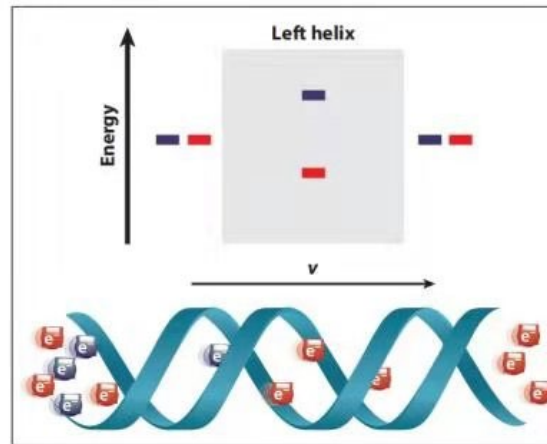
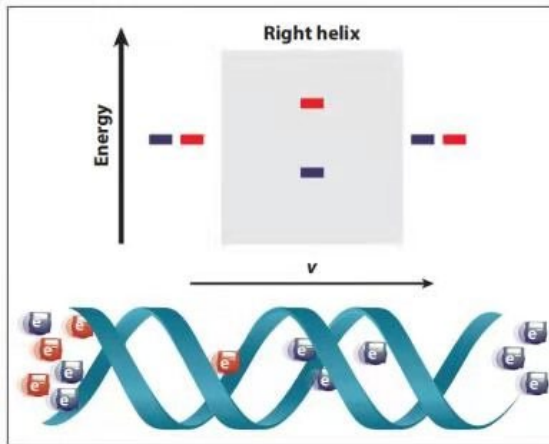
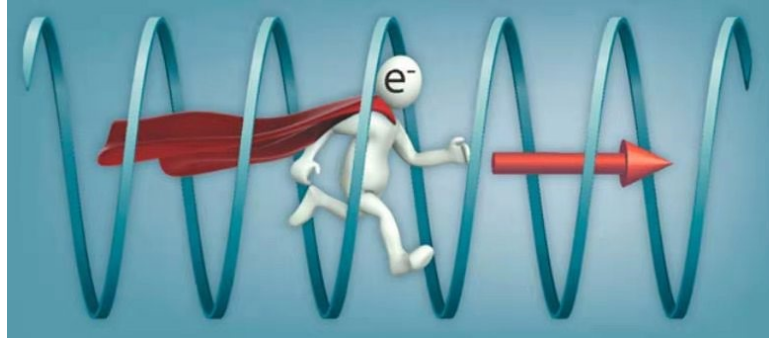


生物有机分子的手性

手性材料的光性质



手性材料的电性质



小结

