

# 大学物理(下)

华中科技大学

张智

zzhang@hust.edu.cn

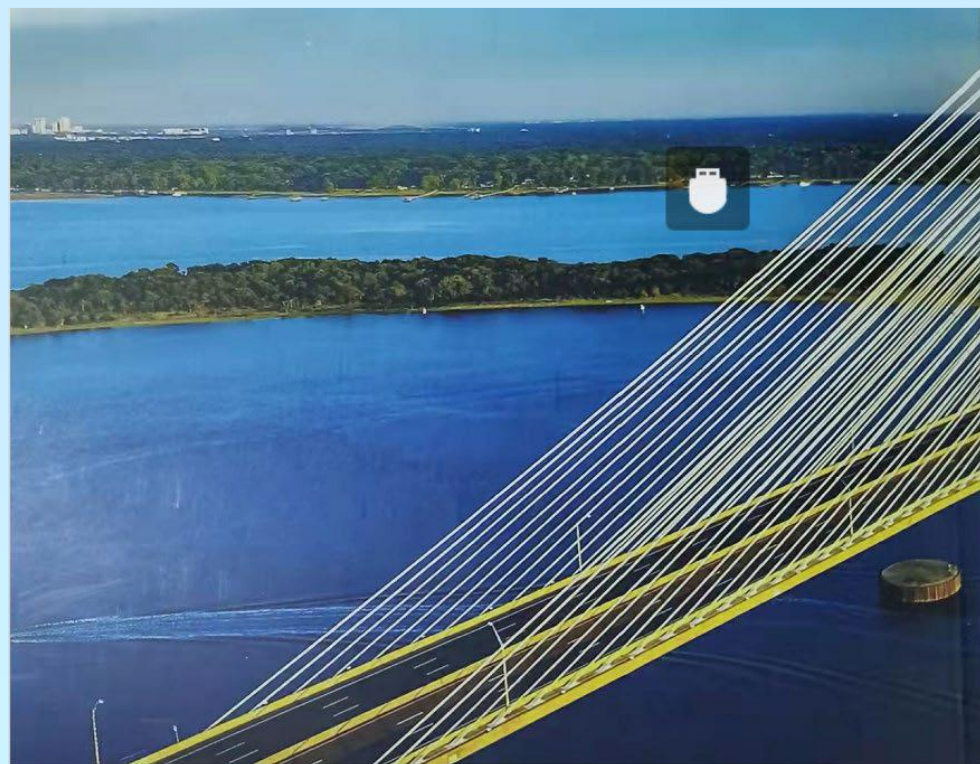


# University Physics

## 大学物理

主 编 项林川  
副主编 朱佑新 王章金

高等教育出版社



数字课程网站

网址: <http://abook.hep.com.cn/12517516>  
<http://abook.hep.edu.cn/12517516>  
数字课程编号 使用说明详见书内数字课程说明页

ISBN 978-7-04-055456-4



定价 73.00 元

# 参考书

物理学 (美) D. 哈里德 R. 瑞斯尼克

大学物理同步辅导 范淑华等 (华中科技大学)

普通物理学(第六版) 程守洙 江之永 (上海交大)

大学物理学(第二版) 张三慧 (清华大学)

定性与半定量物理学 赵凯华 (北京大学)

素质教育在美国 黄全愈

hyperphysics网站:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

# 有关事项

## 成绩:

平时--30% (作业+课堂20分, 网测10分)

考试--70% (期末, 卷面为100分, 闭卷)

## 公共邮箱:

网址: [www.126.com](http://www.126.com)

邮箱: [phys109@126.com](mailto:phys109@126.com) (密码109109)

课件在课后发到公共邮箱[phys109@126.com](mailto:phys109@126.com), 不在课间拷贝。

## 作业要求

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 作业纸上每次都要写姓名、学号。
4. 课代表收作业后按学号排序，并装入透明文件袋。
5. 作业缺交三分之一及以上者综合成绩按零分计。

◆习题册、课本、讲义中的例题

# 网上测验

电磁学、振动与波动： 5分 （第9-10周）

波动光学： 5分 (第13-14周)

■ 题目、时间、形式，在课堂上通知

# 本学期必做演示实验

## ◇电磁学

电流相互作用

巴克豪森效应

楞次定律

自感系数与磁导率的关系

## ◇振动与波动

弹簧纵波演示

音叉演示拍现象

激光垂直振动合成

弦驻波

电磁波演示

## ◇光学

双缝干涉

单缝衍射

光栅色散

起偏与检偏

方解石的双折射

偏振光的干涉

◆ 在课堂上完成《**必做演示实验目录**》中所列的演示实验。

◆ 期末卷面占6分，**2个小题**。

# 演示实验室开放的安排

■ 统一面上开放2周：14-15周，每周两次

◆西五楼111室：振动与波动

◆西五楼112室：光学



# 西五楼111室：振动与波动



振动与波动演示实验项目
音叉（拍）
弹簧纵波（手持式、架子式）
横波
弦驻波
电磁波发射与接收
激光演示垂直振动合成
水波干涉
共振耦合摆
锯条共振
鱼洗
变音钟
磁悬浮地球仪
简谐振动与圆周运动等效演示
激光琴（落地式）
大型能量穿梭机
混沌摆
滴水自激感应起电仪
离心力演示仪漂流环
梦幻时钟
普氏摆

# 西五楼112室：光学



## 光学演示实验项目

单缝衍射

双缝干涉、多缝干涉、光栅衍射

光栅色散演示仪

起偏与检偏

方解石双折射

偏振光的干涉

玻璃堆

迈克尔逊干涉仪

光栅光谱（大型）

音频视频光纤通信演示仪

黑体辐射

综合光学演示仪

辉光球

你我换脸（落地式）

同自己握手（落地式）

魔镜

光栅挂画

光学分形

# 重修大学物理（二）的同学请注意

本学期大学物理（二）开设专门的**重修课堂**。重修必须到专门的重修课堂听课、交作业、参加考试，**不能跟普通班听课**。详细情况可咨询自己所在院系的教务员。

重修班开课在即，须**尽早注册**；否则会缺课过多导致丧失考试资格。

请各小班的班长或课代表通知本班要重修的同学**尽早注册**。

◆**民族班的同学, 听课课堂选择**

# 本学期(秋季)面上教学内容

第9-17章：电磁学(部分)、振动与波动、波动光学、量子理论、激光和半导体、核物理

## 大学物理(二)学时分配

内容	总学时（64）
第09章 稳恒磁场（第6、7节）	5学时
第10章 电磁感应	9学时
第11章 振动与波动	16学时
第12章 几何光学简介	0
第13章 波动光学	16学时
第14、15章 量子力学	14学时
第16章 半导体和激光简介	2学时
第17章 原子核物理简介	2学时





# 第三篇

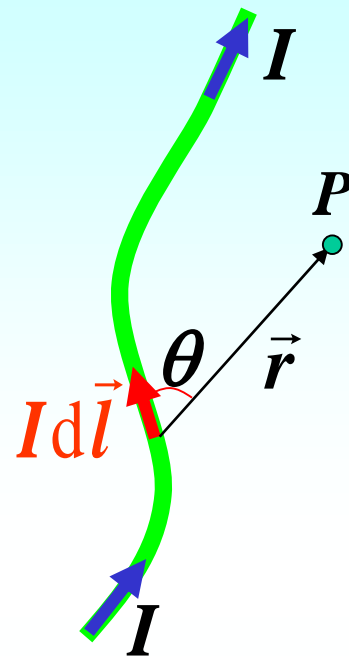
# 电磁学

## 第9章 稳定磁场

- 毕奥 — 萨伐尔定律

电流元  $I d\vec{l}$  在P点产生的磁感应强度为

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$



- 磁偶极矩  $\vec{P}_m = IS\vec{n}$

- 高斯定理  $\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$   $\rightarrow$  无源场

- 安培环路定理  $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I_i$   $\rightarrow$  有旋场

利用安培环路定理可以计算对称性磁场的  $\vec{B}$

## 六、 磁场与实物粒子的相互作用

### 1. 带电粒子的受力

设带电为 $q$ 的粒子处在电场和磁场同时存在的空间，

若  $\vec{v}=0$  则： $\vec{F}_e=q\vec{E}$

$\vec{v}\neq 0$  则： $\vec{F}_e=q\vec{E}$ ，  $\vec{F}_m=q\vec{v}\times\vec{B}$ ——洛仑兹力

$\vec{F}=\vec{F}_e+\vec{F}_m=q\vec{E}+q\vec{v}\times\vec{B}$  ——也称为洛仑兹力。

即：

静止电荷只受电场力作用；

运动电荷，既受电场力，又受磁场力作用。



$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} \perp \vec{v} \quad \text{洛伦兹力不做功}$$

四个诺贝尔物理奖：

回旋加速器（1939年）      电子显微镜（1986年）

量子霍尔效应（1985年）      分数量子霍尔效应（1998年）

◆ 下面分三种情况讨论：

①若  $\vec{v} // \vec{B}$ ，磁场对带电粒子的作用力为零，  
粒子仍以原速度作**匀速直线运动**。

②  $q$  以  $\vec{v} \perp \vec{B}$  进入磁场:

运动方程:  $qvB = \frac{mv^2}{R}$

得:  $R = \frac{mv}{qB}$

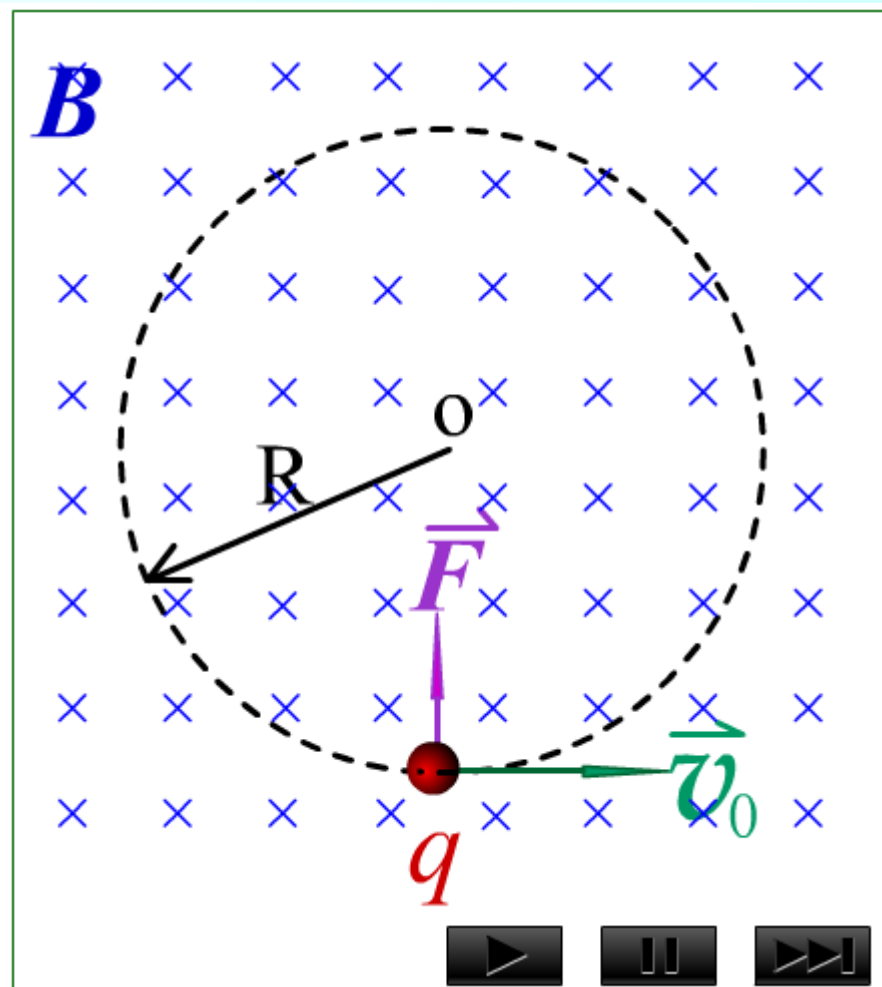
$q$  转一周的时间:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

——回旋周期

$$\text{频率: } \nu = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$

为磁聚焦、回旋加速器的基本理论依据。



③普遍情形下  $(\vec{v}, \vec{B}) = \theta$  (任意角)

$\vec{v}$  可分解  $\left\{ \begin{array}{l} v_{\parallel} = v \cos \theta \quad \text{沿磁场方向 匀速直线运动。} \\ v_{\perp} = v \sin \theta \quad \text{\textcolor{red}{\(\perp\)} 磁场平面 \textcolor{red}{匀速率圆周运动}。} \end{array} \right.$

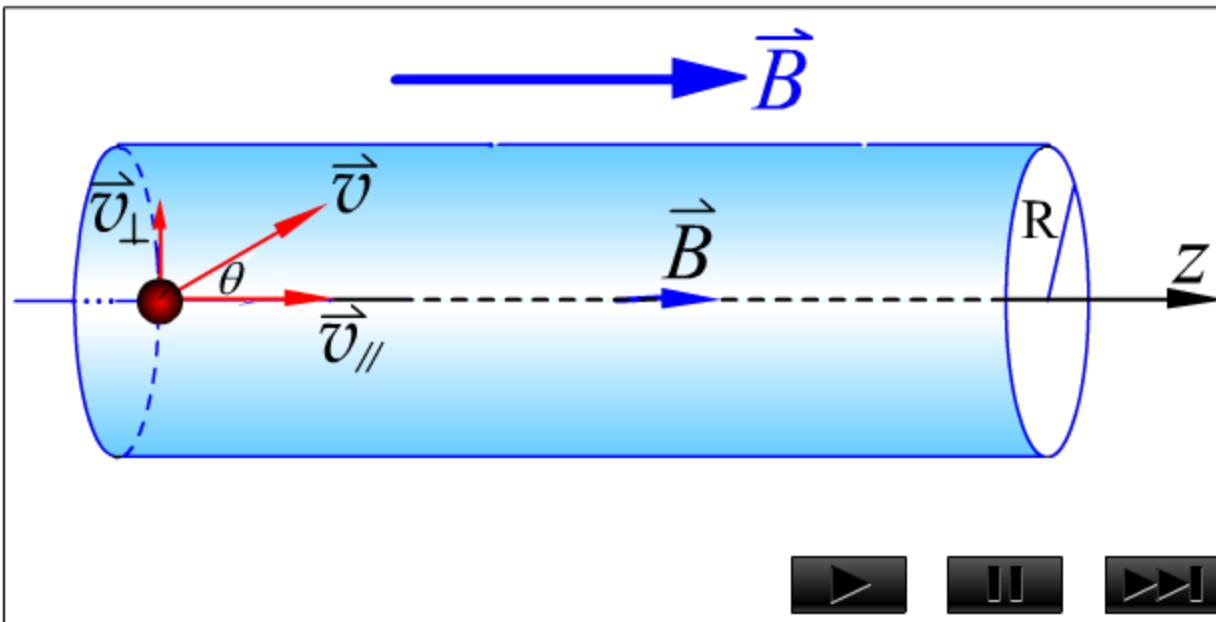
运动合成  $\longrightarrow$  **螺旋线**。

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

螺距:

$$d = v_{\parallel} T = \frac{2\pi m v_{\parallel}}{qB}$$

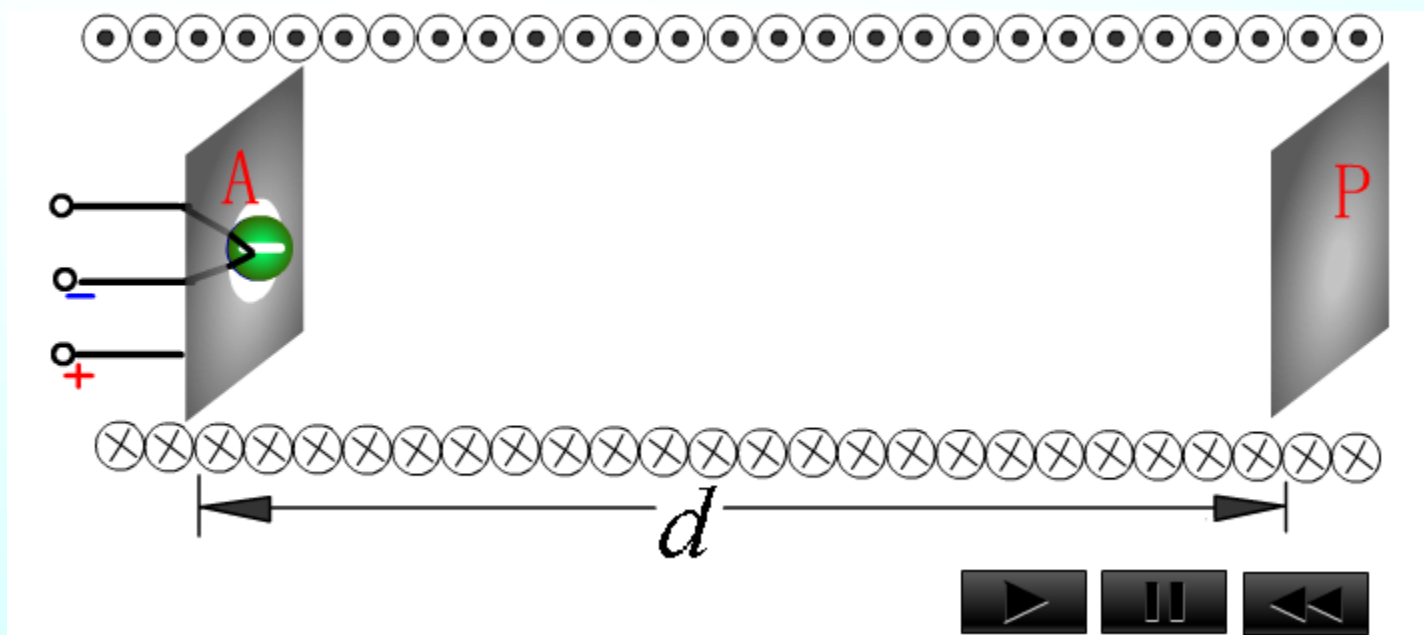


## 2. 磁聚焦

$$v_{\parallel} = v \cos \theta \quad d = \frac{2\pi m v_{\parallel}}{qB}$$

当带电粒子束发散角不太大时，即 $\theta$ 很小： $v_{\parallel} \approx v$

若带电粒子的速度大致相同，则螺距近似相等，



粒子束经过一个回旋周期后，重新会聚。

广泛应用于电子光学特别是电子显微镜中。

### 3. 磁约束

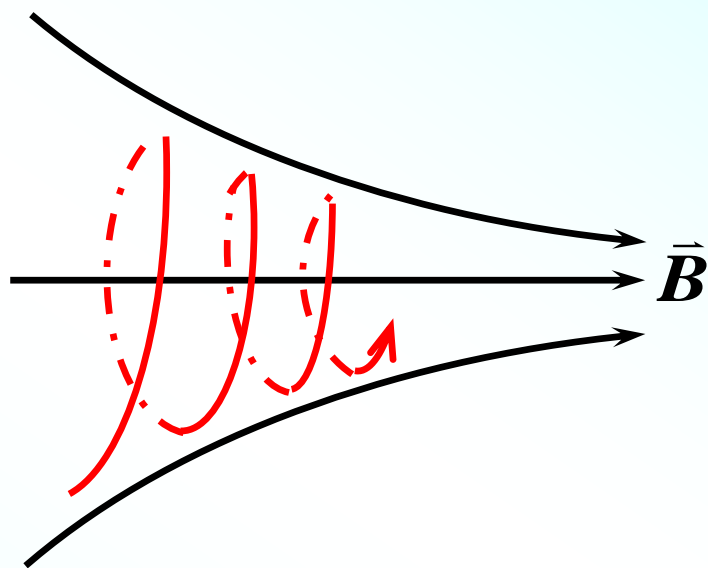
$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} \quad d = \frac{2\pi m v_{\parallel}}{qB}$$

等离子体, 受控热核反应

在非均匀磁场中, 速度方向与磁场方向不同的带电粒子, 也要作螺旋运动, 但 $R$ 和 $d$ 都将不断发生变化。

横向磁约束:

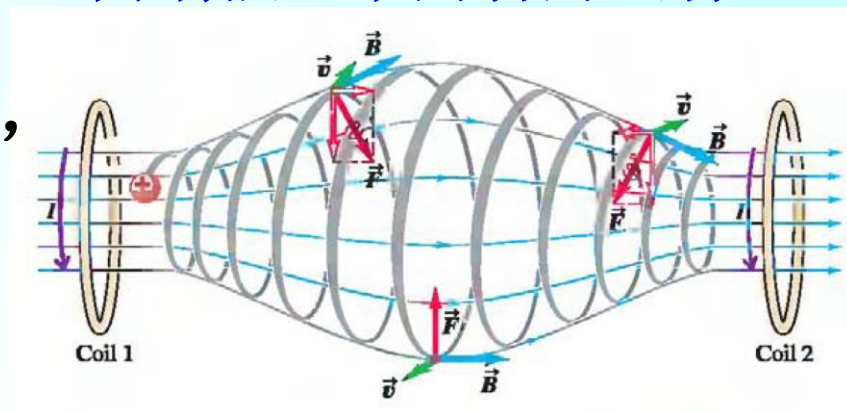
磁场越强, 半径越小。在强磁场中, 带电粒子被约束在一根磁感应线附近很小范围内, 只能沿磁感应线作纵向运动。



## 纵向磁约束：

如果粒子沿磁场方向的**速度分量不大**，  
则粒子沿着磁场方向的运动因**减速**有  
可能被完全抑制，进而**反向运动**。

两端强，中间弱的磁场

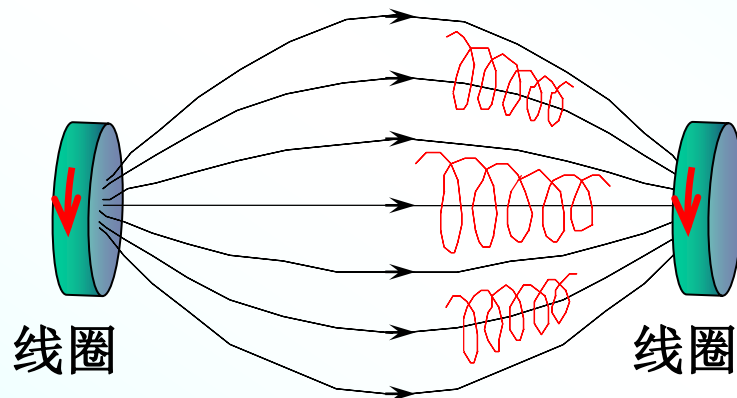


带电粒子会像光在两面镜子间来回反射那样，被限制  
在两磁镜之间的范围内。

磁场两端强，中间弱的配置称为：磁镜。

能约束带电粒子运动的  
磁场分布称为**磁镜约束**。

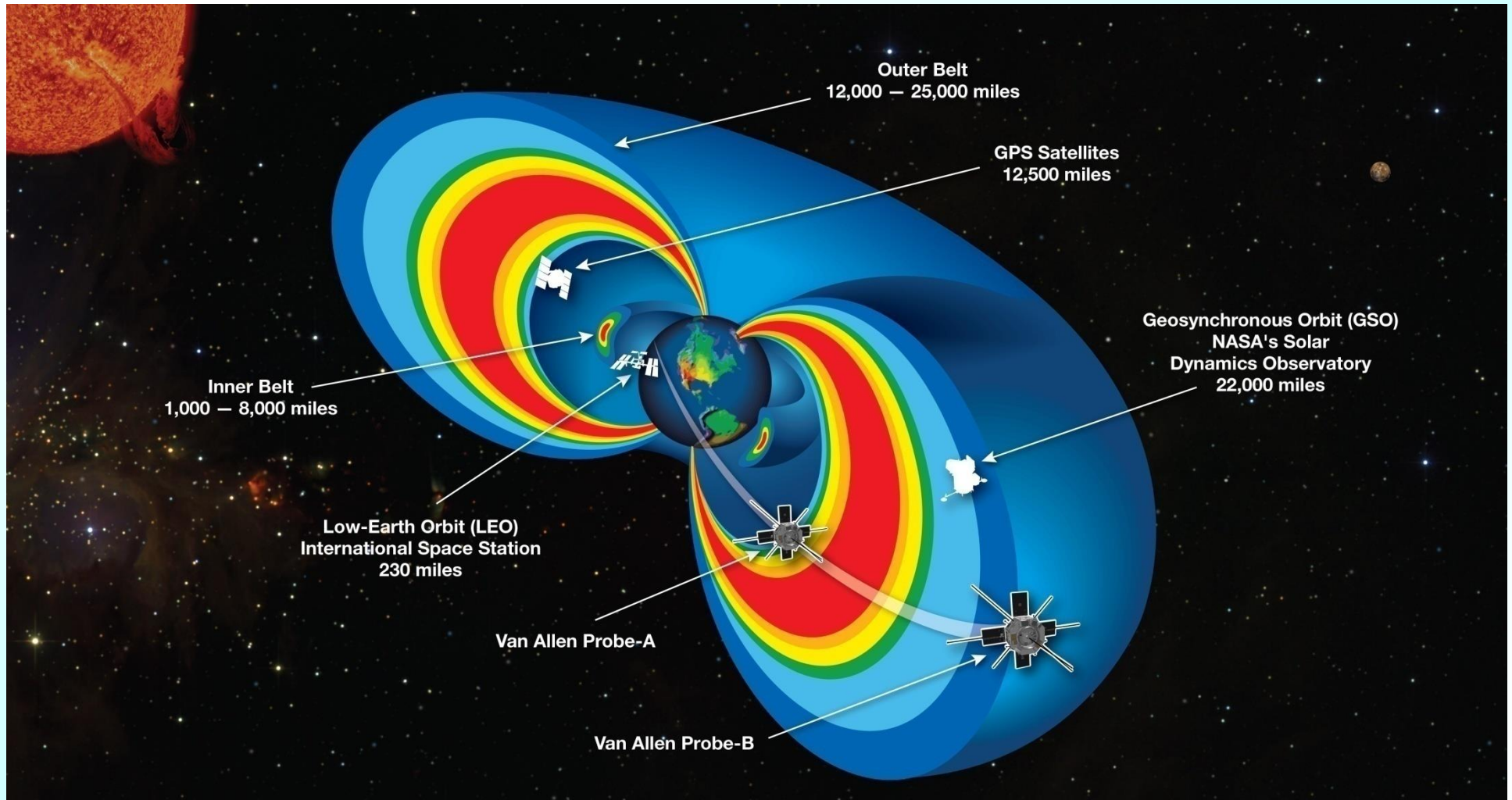
—— **磁瓶**





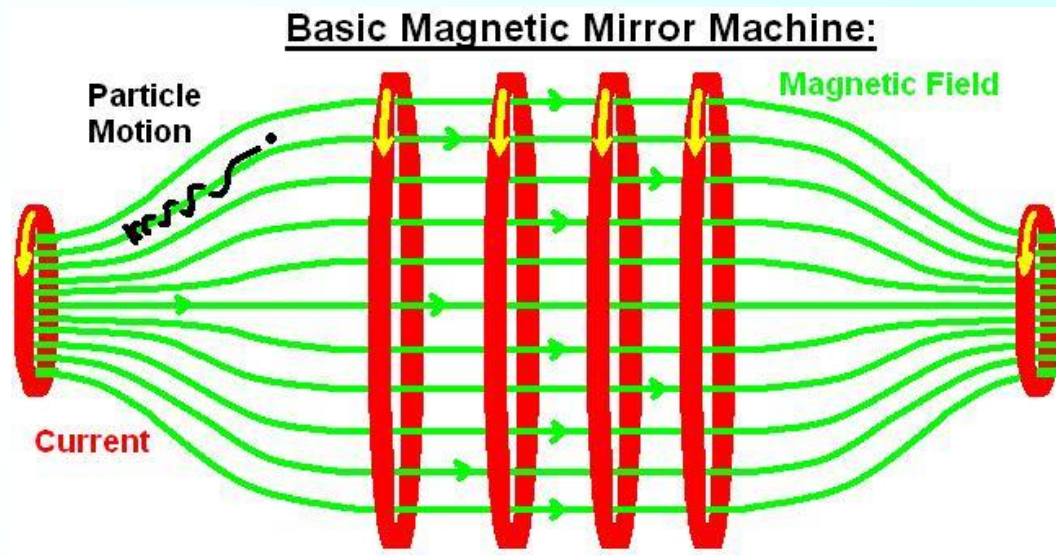
# 地球磁场中间弱、两极强

## 地球的磁约束效应 —— 天然磁瓶



范阿仑辐射带 Van Allen radiation belt  
Science **340**, 186 (2013).

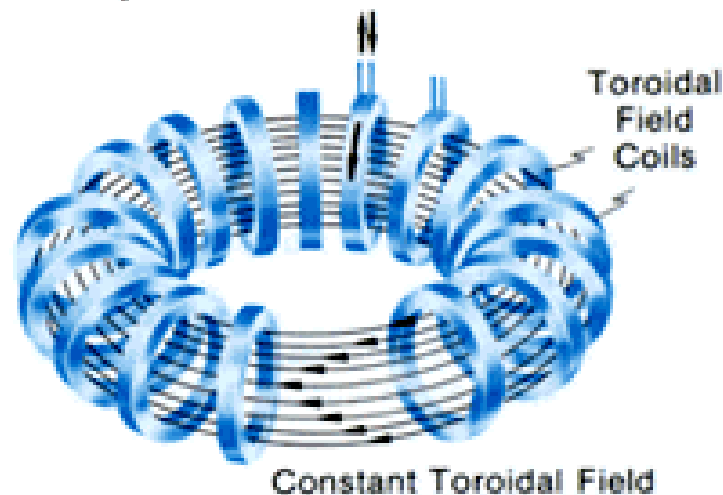
## 磁约束



注：平行磁场方向的**速度分量较大**的粒子，可能从两端**逃逸**出去。

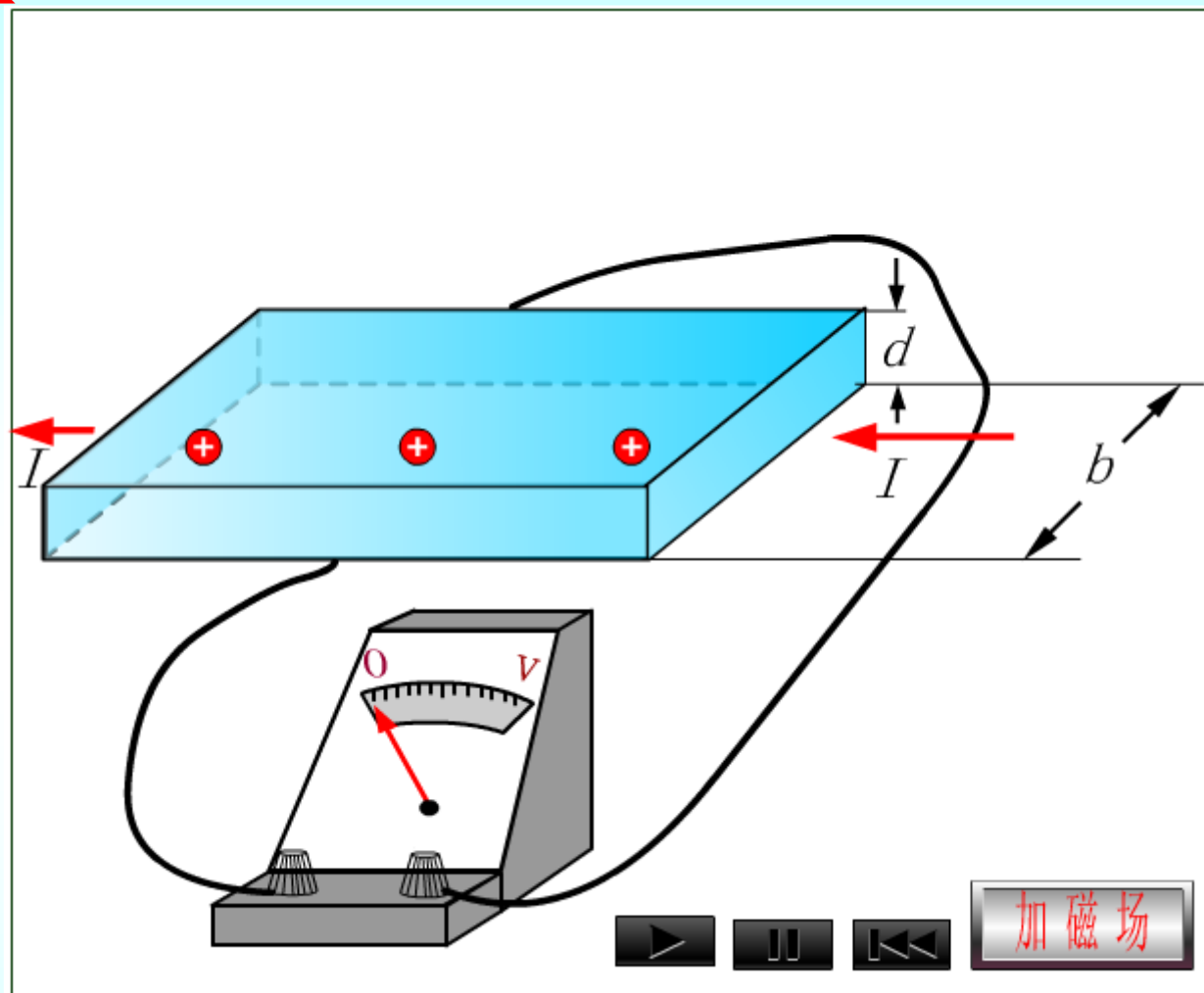
**环形磁场结构**可以避免这个缺点。

Relatively Constant Electric Current





## 4. 霍耳效应



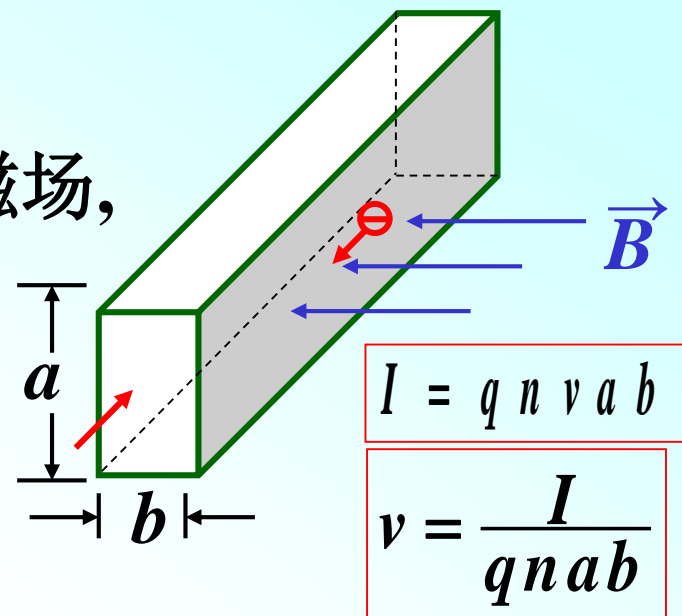
在一个通有电流的导体(或半导体)板上，若垂直于板面施加一磁场，则在与电流和磁场都垂直的方向上，板面两侧会出现微弱电势差。

## ◆ 霍尔电场、霍尔电压、霍尔系数

通电金属条中，电子以平均速度 $\bar{v}$ 漂移。  
加上与电流方向和金属条侧面垂直的磁场，  
则电子受磁场力的作用，且

$$\vec{f} = q\bar{v} \times \vec{B} \quad \text{方向向上}$$

结果在金属条的上下表面分别出现负、正电荷的积累，形成**横向电场**，  
对电子产生向下的电场力，并迅速增加，最终与磁场力平衡。



$$|q\vec{E}_H| = |q\bar{v} \times \vec{B}| \quad E_H = vB \text{ ——称为霍耳电场}$$

处在磁场中的导体，其载流子因受磁场力作用而积累，并建立横向电场的现象称为**霍耳效应**。

在上下两表面间出现稳定的电势差 $V_H$  ——**霍耳电压**

$$V_H = \int \vec{E}_H \cdot d\vec{l} = \int_0^a vB dl = vBa \quad V_H = \frac{1}{nq} \frac{IB}{b} = R_H \frac{IB}{b}$$



$$V_H = R_H \frac{IB}{b} \quad R_H = \frac{1}{nq}$$

说明:

(1)  $R_H$ : 霍耳系数, 与导体材料有关。  
此处  $R_H = 1/(nq)$  只对单价金属成立。

(2) 接通上下表面则有电流

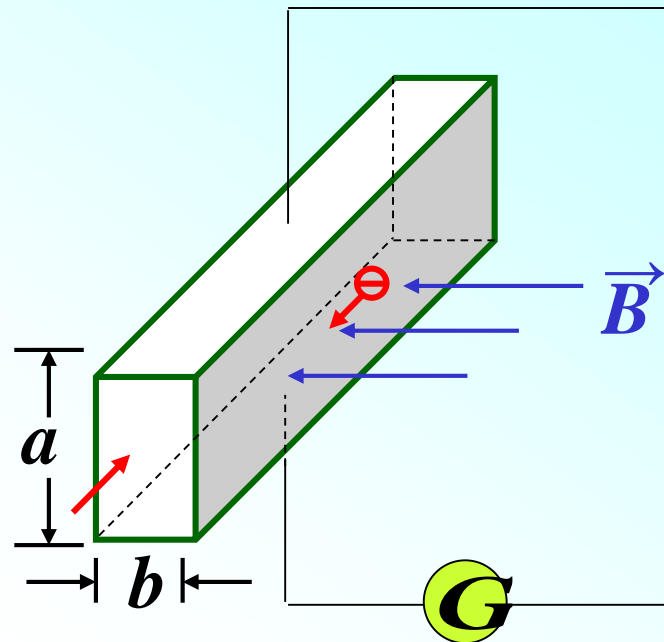
(3) 霍尔效应的应用

1° 测试半导体的类型  $\begin{cases} n \text{型} & \text{电子导电} \\ p \text{型} & \text{空穴导电} \end{cases}$

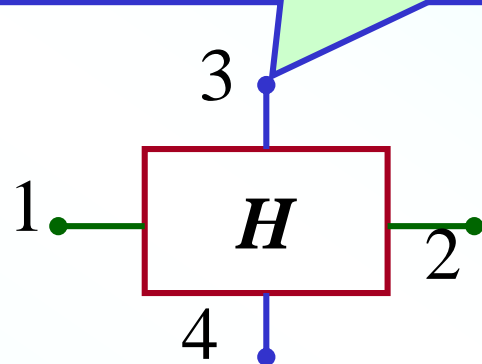
2° 测磁场: 测磁场常用高斯计

3° 可计算载流子浓度

4° 测大电流, 转换交直流信号等



通过测  $V_H \rightarrow$  测  $B$

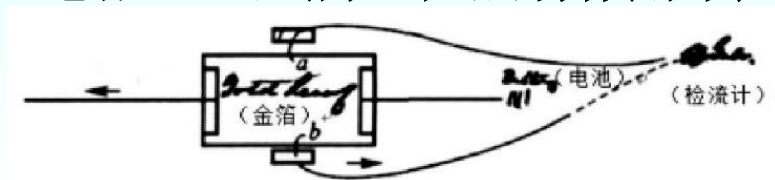


# 霍尔效应的科学发展历程

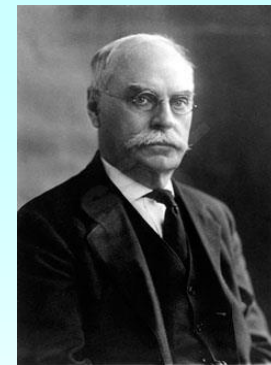
## ➤ 霍尔效应

1879年，24岁的霍尔发现：

“电流通过金属，在磁场作用下产生横向电动势”



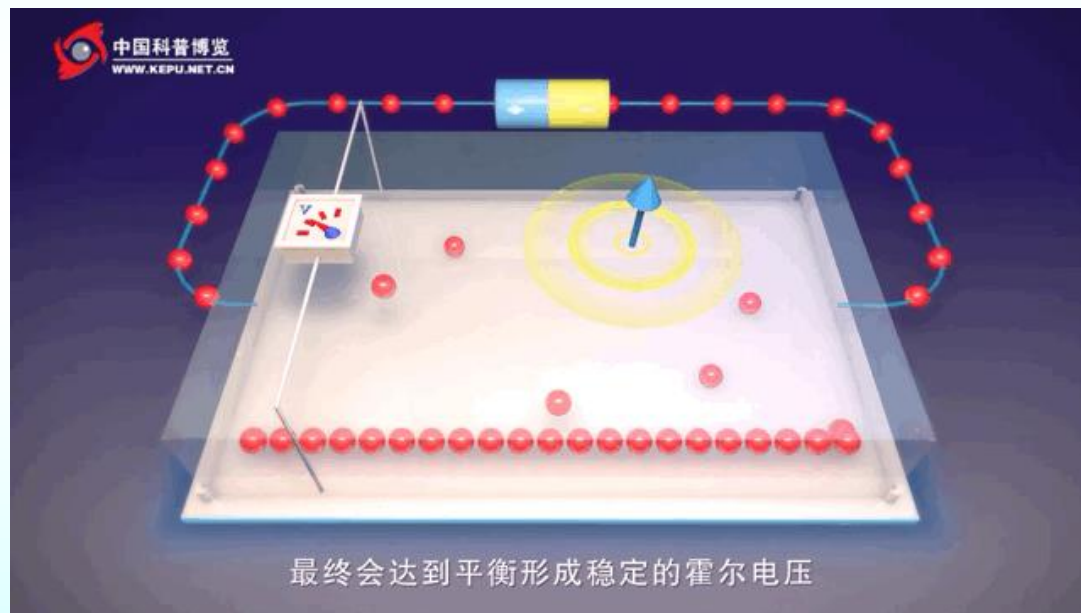
-----霍尔效应



Edwin Hall

## ➤ 反常霍尔效应

1880年，霍尔在**铁磁性的金属平板**中发现，在没有外加磁场（或弱磁场），也可以看到霍尔效应-**反常霍尔效应**。



新闻界：“过去50年中电学方面最重要的发现”

## ➤ 量子霍尔效应--1985年诺贝尔物理学奖

- 1980年，德国物理学家**冯·克利青**
- 超强磁场（18T）和极低温(1.5K) 条件下
- **霍尔电阻量子化**



冯·克利青

## ➤ 分数量子霍尔效应--1998年诺贝尔物理学奖

- 1982年，美国AT&T贝尔实验室的**崔琦**和**斯特默**；
- 极纯的半导体材料；
- 超低温(0.5K)和超强磁场(25T)；
- 1983 年，同实验室的**劳克林**提出准粒子理论模型。



劳克林



施特默



崔琦



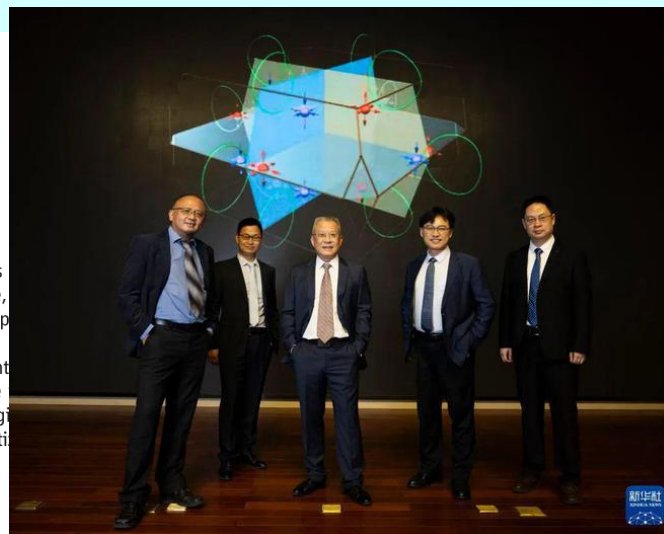
# 我国科学家的科学贡献

## ➤ 量子反常霍尔效应

### Quantized Anomalous Hall Effect in Magnetic Topological Insulators

Rui Yu,<sup>1</sup> Wei Zhang,<sup>1</sup> Hai-Jun Zhang,<sup>1,2</sup> Shou-Cheng Zhang,<sup>2,3</sup> Xi Dai,<sup>1\*</sup> Zhong Fang<sup>1\*</sup>

The anomalous Hall effect is a fundamental transport process in solids arising from the spin-orbit coupling. In a quantum anomalous Hall insulator, spontaneous magnetic moments and spin-orbit coupling combine to give rise to a topologically nontrivial electronic structure, leading to the quantized Hall effect without an external magnetic field. Based on first-principles calculations, we predict that the tetradymite semiconductors  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , and  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  form magnetically ordered insulators when doped with transition metal elements (Cr or Fe), in contrast to conventional dilute magnetic semiconductors where free carriers are necessary to mediate magnetic coupling. In two-dimensional thin films, this magnetic order gives rise to a topological electronic structure characterized by a finite Chern number, with the Hall conductance quantized in units of  $e^2/h$  (where  $e$  is the charge of an electron and  $h$  is Planck's constant).



#### ◆ Cr或Fe等磁性掺杂

$\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 族拓扑绝缘体薄膜

理论预测

实验观测

- ◆ 清华大学薛其坤院士，1000多个样品
- ◆ Cr掺杂 $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ 拓扑绝缘体磁性薄膜，从实验中首次观测到量子反常霍尔效应；
- ✓ 物理学领域基础研究的一项重要科学发现；

SCIENCE 329, 61-64 (2010)  
SCIENCE 340, 167-170 (2013)

- ◆ 2023年度国家最高科学技术奖；

- ◆ 711院士；



- ◆ 2023年度国家自然科学一等奖；
- ◆ 1991年本科毕业于华中理工大学物理系，1996年获该校博士学位；



# 霍尔效应在生活中的应用



1. 信号传感器;
2. 速度传感器;
3. 汽车速度表和里程表: 霍尔效应传感器也用于汽车的速度表和里程表, 提供实时的速度和里程读数;
4. 电流检测及工作状态诊断;
5. 发动机转速及曲轴角度传感器;
6. 霍尔加速度传感器;

$$V_H = \frac{1}{nq} \frac{IB}{b} = R_H \frac{IB}{b}$$

- ◆ 霍尔元件在扫地机器人中起到**控制开关**和内部无刷电机**测速换向**的作用;
- ◆ 安装在机器人的霍尔开关传感器, 可以感知地面上的磁性物体或**磁性边界**;
- 例如, 充电座对位: 充电座上的磁场传感器和机器人上的霍尔开关相互作用, 实现精确的对位和自动充电功能;