

# 基础物理学 A1

## 2025年春季学期

谢柯盼

kpxie@buaa.edu.cn

物理学院

# 第二章 牛顿力学的基本定律

§ 2-1 牛顿运动定律

§ 2-2 几种常见的力

§ 2-3 牛顿定律应用举例

§ 2-4 力学相对性原理

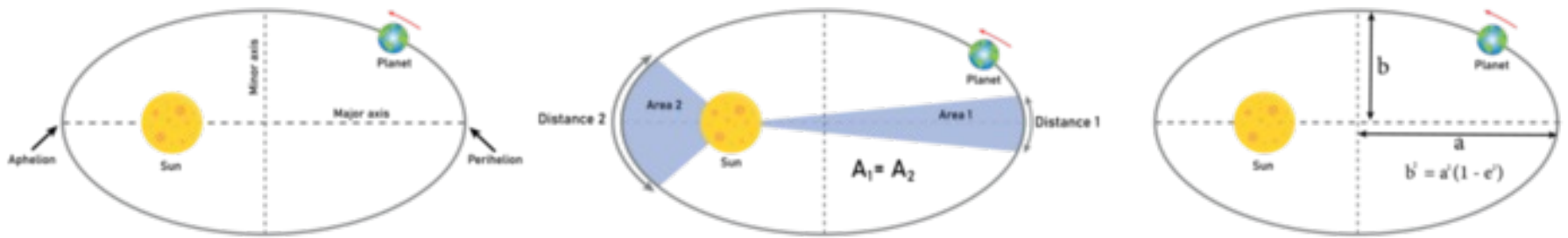
§ 2-5 惯性系与非惯性系 惯性力

## § 2-1 牛顿运动定律

牛顿以前的力学之“天上的运动”

开普勒的行星运动三定律（1609-1619年间）

1. 行星轨道为**椭圆**，太阳位于椭圆的其中一个焦点
2. 行星与太阳的连线，在相同时间内扫过**相同的面积**
3. 各行星公转**周期**的平方与轨道**半长轴**的立方成正比



约翰内斯·开普勒，德国天文学家，在丹麦天文学家第谷·布拉赫的数据基础上继续观测，总结归纳出行星运动三定律，被誉为“天空立法者”。



# 牛顿以前的力学之“地上的运动”

伽利略的实验和**思想实验**：斜面上滚落的小球

在**摩擦力可以忽略**时，小球总是能够回到原有高度

如果把右端放平，小球将不可能回到原有高度，会发生什么事？

伽利略**大胆推断**（1632）：

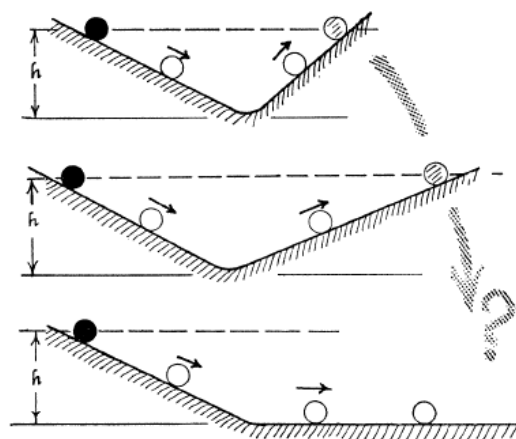
光滑水平面，具有初速的物体将永远运动下去。

惯性定律的**雏形**。但他误以为圆周运动也是惯性运动

如果左边斜面的倾角较小，则小球滚动较慢，可粗略测量出 $s \propto t^2$ ，且这一性质与倾角大小无关

倾角较大时，运动太快，当时的技术难以测量，但伽利略**大胆推断**该定律对任意大的倾角依然成立

由此可推得倾角 $90^\circ$ 时，自由落体 $s \propto t^2$



落体定律：忽略阻力时，地表附近所有物体都以**同样的加速度**下落

亚里士多德的看法：**重的物体下落更快。**

伽利略论证道：

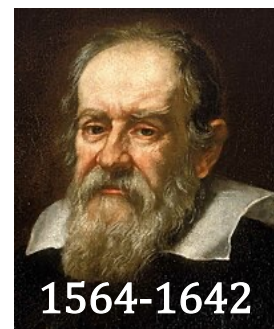
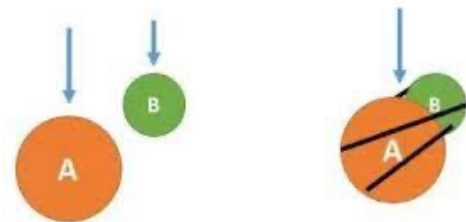
将重物 and 轻物绑在一起，

则按亚里士多德的理论，以下两种情况都会发生：

- 轻物下落慢，拖累重物，导致整体下落**更慢**；
- 两物体绑在一起得到更重的物体，下落**更快**。

自相矛盾！因此下落速度应与质量无关。

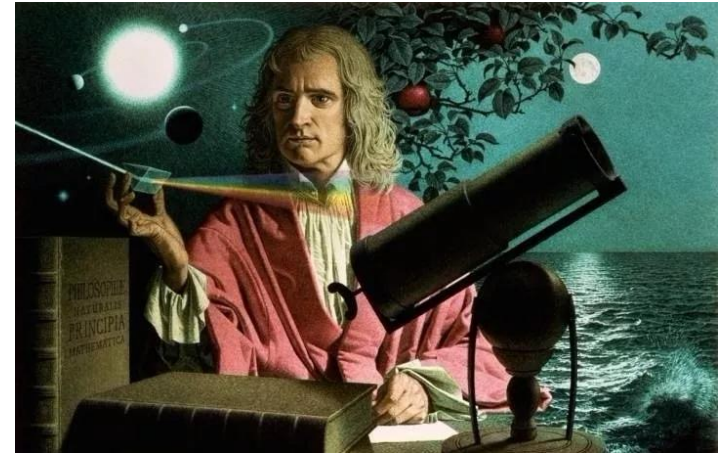
伽利略·伽利雷，意大利物理学家，近代科学之父，是实验与数学推导相结合的物理学研究方法的先驱者。在天文学方面也有重要成就。因日心说遭到教会迫害。



1564-1642

# 牛顿和经典力学的建立

艾萨克·牛顿（1643-1727），  
英国物理学家、数学家，  
提出三大运动定律并据此建立  
**经典力学**的体系，



提出**万有引力定律**，创立**微积分**，  
发现并解释**光的色散**现象，发明**反射望远镜**， .....

自然界对牛顿来说就是一本打开的书，一本他读起来毫不费力的书。——爱因斯坦

经典力学在17世纪建立的**历史必然性**

- 德国的莱布尼茨独立创立了**微积分**
- 英国的胡克、哈雷等人人都已知道**平方反比力**能解释行星椭圆轨道

# 牛顿运动定律（自然哲学的数学原理，1687）

## 第一定律（惯性定律）

物体保持其静止或匀速直线运动的状态，除非有力加于其上迫使它改变这种状态。

## 第二定律

物体运动的变化与施加的力成正比，并沿着力作用的方向进行。

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

## 第三定律（作用力与反作用力）

两个物体之间的相互作用总是相等的，且方向相反。

$$\vec{F} = -\vec{F}'$$

1. 一般认为，第一定律**并不是**第二定律的特例。第一定律定义了**惯性系**的存在，为第二定律提供了适用的场所
2. 第二定律的原始表述是 $\vec{F} = \dot{\vec{p}}$ ，即力等于质点动量 $\vec{p} = m\vec{v}$ 的变化率。如果进一步假定质量为**常量**，则 $\vec{F} = m\vec{a}$ （在不涉及相对论时成立）
3. 作用力与反作用力的施力与受力物体相反

### 一些概念：

- 惯性：物体保持原有运动状态不变的性质
- 质量：物体惯性的量度，SI单位为kg，亦称作**惯性质量**。注意速度**不是**惯性的量度
- 力：物体与物体间的**相互作用**，SI单位为N，并且 $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$

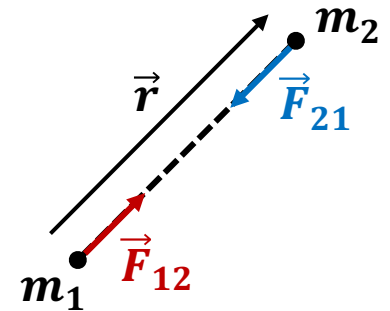


## § 2-2 几种常见的力

万有引力：任何两个质点之间都存在着一**相互吸引**的力，大小正比于其质量的乘积，反比于其距离的平方

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} = \frac{Gm_1m_2}{r^2}\hat{r}$$

其中 $\hat{r} = \vec{r}/|\vec{r}|$ 为由1 → 2的方向矢量



$G \approx 6.672 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$  为万有引力常量

万有引力是**最微弱**的基本相互作用。

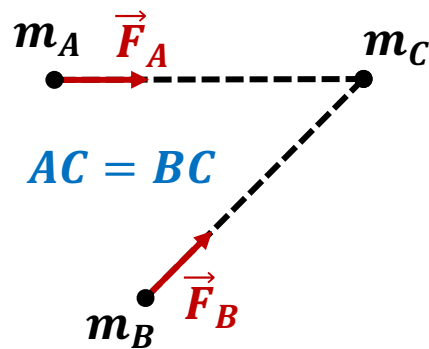
若两个电子相距 $10^{-10} \text{ m}$ （约一个原子直径），则

- 电子质量 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，万有引力约 $5.5 \times 10^{-51} \text{ N}$
- 电荷量 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，静电斥力约为 $2.3 \times 10^{-8} \text{ N}$
- 相差约**42个量级**

出现在万有引力公式中的质量称为**引力质量**，与牛顿第二定律中的**惯性质量**原则上不同

通过实验探究两种质量的差别：

1. 引力大小之比  $F_A/F_B = m_A/m_B$ ，与引力质量相关
2. 通过其他实验测出质点A与B的惯性质量之比  $m'_A/m'_B$



实验表明， $m_A/m_B = m'_A/m'_B$  恒成立，与A和B的材质和质量均**无关**，

故  $m_A/m'_A = m_B/m'_B \equiv C$ ，即任一物体两种质量之比为普适常数，恰当选择单位后可认为其**相等**

注意：这是一条**物理定律**而非一个符号约定

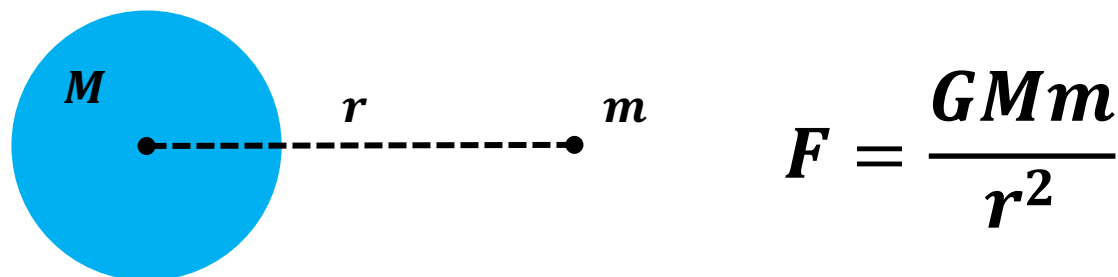
牛顿曾做实验于  $10^{-3}$  精度验证，后数百年一直有实验

2017年MICROSCOPE卫星实验在  $10^{-15}$  精度验证该定律

# 球对称物体的万有引力

- 万有引力公式原则上适用于两**质点**
- 有限大小物体的引力需用**积分**计算得出

在**三维**空间中，**平方反比**力很特殊，对于质量**球对称分布**的物体，有以下性质



实心球等效于质量集中于球心的质点



空心球内部引力为零，  
存在**屏蔽效应**

静电力（库仑定律）也是平方反比力，有类似的推论

为何球对称质量分布的空心球内部引力为零？

- 只需证明**均匀薄球壳**内部引力为零即可

如图， $P$ 为球壳内部任意一点  
以小顶角 $\alpha$ 作锥体，向两端截取出  
球面积元 $S_1$ 及 $S_2$

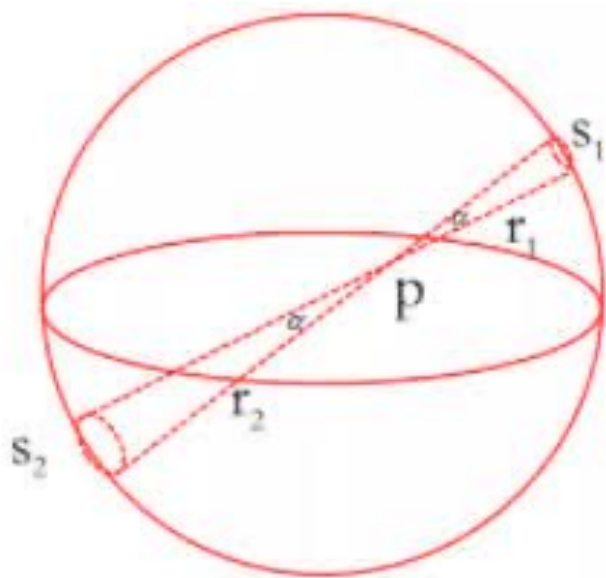
由几何关系， $S_1$ 近似为直径 $r_1\alpha$ 的  
圆，故 $S_1 \approx \pi r_1^2 \alpha^2 / 4$

$S_2$ 同理，故

$$\frac{S_1}{r_1^2} \approx \frac{S_2}{r_2^2} \approx \frac{\pi \alpha^2}{4}$$

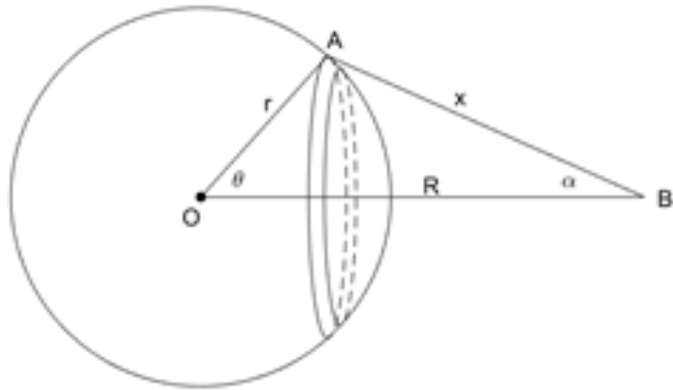
故两**对侧面元**提供的引力彼此抵消

对所有面积元积分，得到全球壳的力相互抵消， $P$ 点所受合力为零



为何球对称质量分布的实心球等效于质点？

- 只需证明**均匀薄球壳**有这一性质即可



如图， $B$ 为球壳外任意一点  
定义  $\rho_S = M/(4\pi r^2)$  为球壳面  
密度，则  $B$  点受力可视为对**焦圈**  
积分

力微元  $dF = Gm \frac{\rho_S \cdot 2\pi r \sin \theta \cdot r d\theta}{x^2} \cos \alpha$ ；考虑到

- $x = \sqrt{r^2 + R^2 - 2Rr \cos \theta}$

- $\cos \alpha = \frac{R^2 + x^2 - r^2}{2Rx}$

积分技巧：令  $\xi = \cos \theta$  换元

可得  $dF = Gm \cdot \frac{\rho_S \cdot 2\pi r \sin \theta \cdot r d\theta (R - r \cos \theta)}{(r^2 + R^2 - 2Rr \cos \theta)^{3/2}}$

完成对  $\theta$  的积分得到  $F = GMm/R^2$

结论要掌握，  
推导过程了解即可

重力：地表附近的物体**扣除**地球自转向心力之后剩下的万有引力**分量**

特别注意重力与万有引力是**不同**的概念

一个极端例子：太空中的“失重”



地球半径 $R_E \approx 6371$ 千米

天宫空间站高度约389.4千米

宇航员所受**万有引力**约为地表的89%

引力完全充当绕地球转动的向心力，**重力**为零

如果认为地球为完美球形且不自转，地表质量为 $m$ 的物体重力为 $GM_E m / R_E^2$

则重力加速度 $g = GM_E / R_E^2$ ，其中 $M_E$ 为地球质量

由地球 $\bar{R}_E \approx 6.371 \times 10^6$  m及 $M_E \approx 5.972 \times 10^{24}$  kg  
给出“完美地球”重力加速度

$$g = \frac{GM_E}{\bar{R}_E^2} \approx 9.817 \text{ m/s}^2$$

地球是椭球，两极稍**扁**

极半径 $R_{\text{极}} \approx 6.357 \times 10^6$  m，故在南北极点

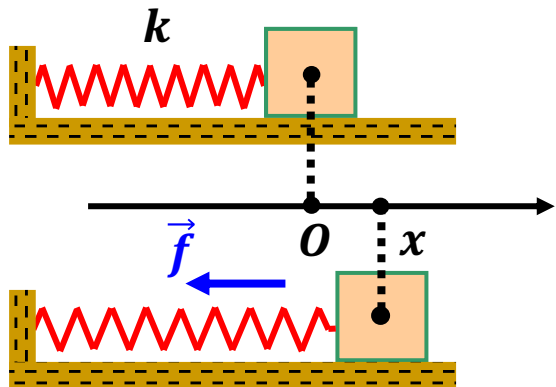
$$g \approx \frac{GM_E}{R_{\text{极}}^2} \approx 9.860 \text{ m/s}^2$$

赤道半径 $R_{\text{赤}} \approx 6.378 \times 10^6$  m，扣除地球自转后

$$g \approx \frac{GM_E}{R_{\text{赤}}^2} - R_{\text{赤}} \omega^2 \approx 9.761 \text{ m/s}^2$$

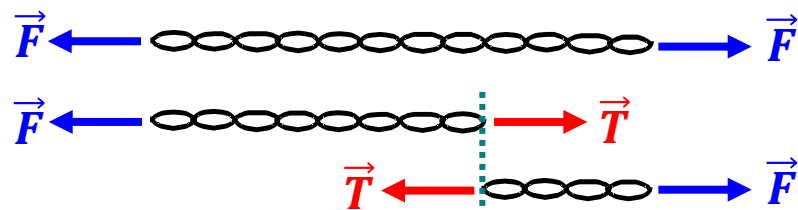
**实测**地球上不同地点的重力加速度数值在 $9.764 \text{ m/s}^2$   
到 $9.834 \text{ m/s}^2$ 之间变化，符合估算

# 弹性力：物体**变形后**企图恢复原状时所产生的力



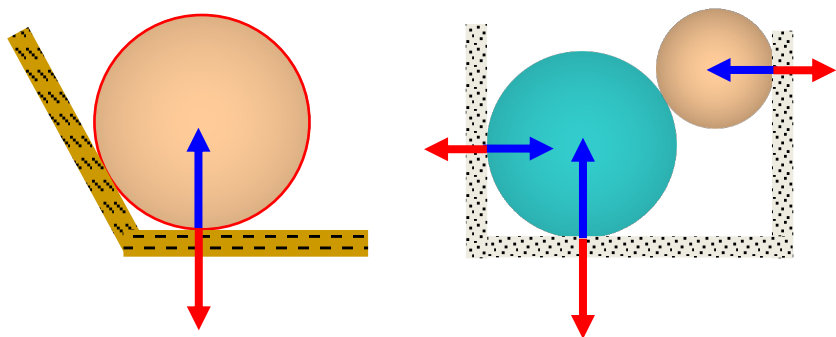
弹簧的**弹力**

胡克定律  $f = -kx$



绳中的**张力** $T$

可抽象出不可伸长的  
**理想绳子**模型



正压力和支撑力

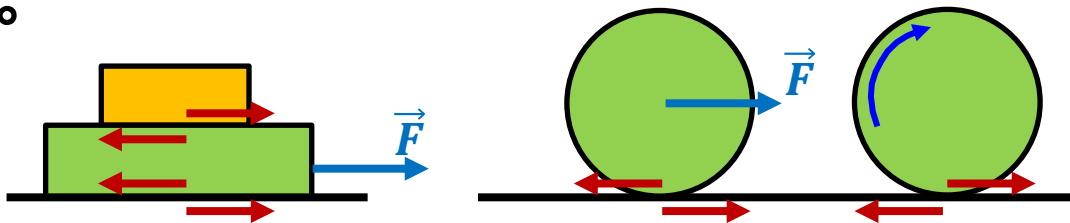
可抽象出坚硬、不会  
形变的理想**刚体**模型

弹性力是分子/原子之间**电磁力**的宏观体现



**摩擦力**：分布于相互接触的粗糙物体表面，倾向于**阻止**相对运动或相对运动趋势的力  
其本质也是电磁力。

判断力的方向：



**静摩擦力**阻止相对运动的趋势

$$f_s \leq \mu_0 N$$

$N$ 为正压力， $\mu_0$ 为静摩擦系数，由接触面的性质决定

**滑动摩擦力**阻止相对运动

$$f = \mu N$$

$\mu$ 为滑动摩擦系数，由接触面的性质决定

最大静摩擦力**略大于**滑动摩擦力，但一般求解题目时可认为它们相等

# 人们对力（相互作用）的认识演变

早期朴素认知：力必须靠物体相互接触才能发生



笛卡尔（17世纪上半叶）：宇宙中存在粒子**漩涡**，天体在其间，被推着运动。

Hypotheses non fingo.

牛顿（1687）：漩涡论不能给出平方反比力；要解释天体运动，须假定物体之间能通过**真空**产生**超距**的引力。



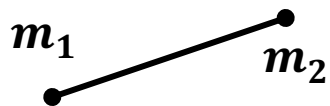
牛顿引力的巨大成功使得人们逐渐接受了超距作用

电磁学的早期研究中，库仑、安培等人纷纷**基于超距作用**进行理论和实验的研究

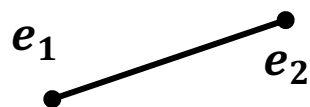
19世纪下半叶，法拉第、麦克斯韦等人的工作促使经典电磁理论建立，揭示了电磁力不是超距作用，而是通过**场**来传递的

**注意：**牛顿引力场与电磁场实际上**相当不一样**！

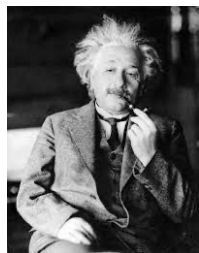
# 引力与电磁力的区别：牛顿引力场并非动力学场



作为超距作用的引力： $m_1$ 的位置变化时， $m_2$ 会立即感知到这一改变，变化的传递是瞬时的



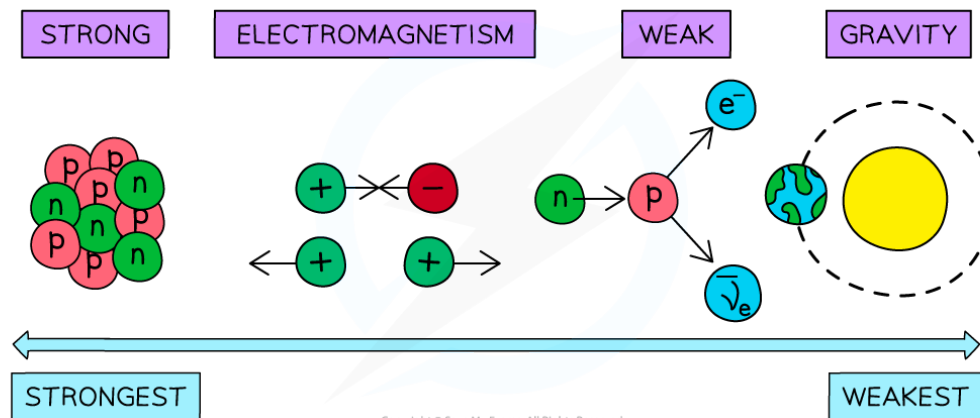
作为动力学场论的电磁力： $e_1$ 的位置变化时，会引发电场和磁场的交替变化，以电磁波的形式将扰动传播至 $e_2$ ，变化的传递需要时间



爱因斯坦（1915）：引力不是超距作用，而是时空弯曲导致的几何效应。在低速、小质量情况下，引力可近似为超距平方反比力。

广义相对论描述动力学的引力场，扰动通过引力波以光速传递，实验于2016年验证，引力波天文学诞生

# 自然界的**可见物质**之间有**四种**基本相互作用



均由**场**作为媒介来传递。现代物理认为场对应着粒子

相互作用	强力	弱力	电磁力	引力
相对强度	$10^2$	$10^{-10}$	1	$10^{-38}$
作用范围	$10^{-15}$ m	$10^{-17}$ m	长程	长程
媒介粒子	胶子	$W^{\pm}$ & $Z$	光子	待发现

在**经典物理水平**（即本课程除相对论以外的章节），**可以认为**电磁力由电磁场传递，而引力是超距作用

# 本节课小结

牛顿之前的物理学：

- 开普勒总结行星运动三定律；
- 伽利略对惯性定律、落体定律的总结

牛顿三定律，引力定律

- 引力的平方反比特性带来的**质量球对称分布**物体的简单公式
- 弹性力、摩擦力的方向判断和大小计算
- 宏观层面，除万有引力以外的绝大部分力的本质都是**电磁力**

## 第二章作业

本次课暂不布置作业，可先通过下次课的预习PPT熟悉第二章的习题类型

本周五（3月7日）课将讲解大量例题并布置作业，并讲完第二章

时间节点：下周二（3月11日）将开始讲第三章