



2023秋丁桂军老师力学



力学QQ群： 908489741

力学

主讲人：丁桂军

Email:dinggj@ustc.edu.cn

Tel(O):63603213

Office:中区理化科学实验中心614

助教：

● 王奕洋

Email: wangyiyang@mail.ustc.edu.cn

● 张洪哲

Email: zhanghongzhe@mail.ustc.edu.cn

➤ 答疑课和习题课

每周一次，请同学们和助教尽快商定时间。

在学习过程中会遇到各种问题，要多和同学、助教、老师多讨论、请教，敢于提问，及时解决学习中遇到的问题。

使用教材：

《力学与理论力学》

上册， 杨维纮



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书

主编 杨国桢 副主编 程福臻

力学与理论力学

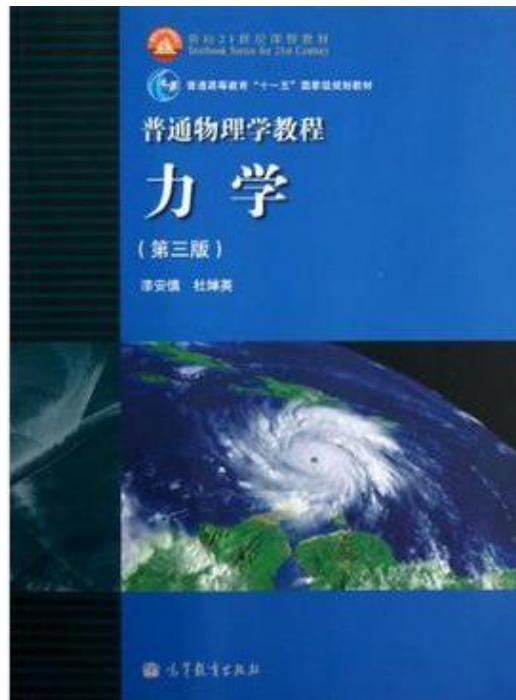
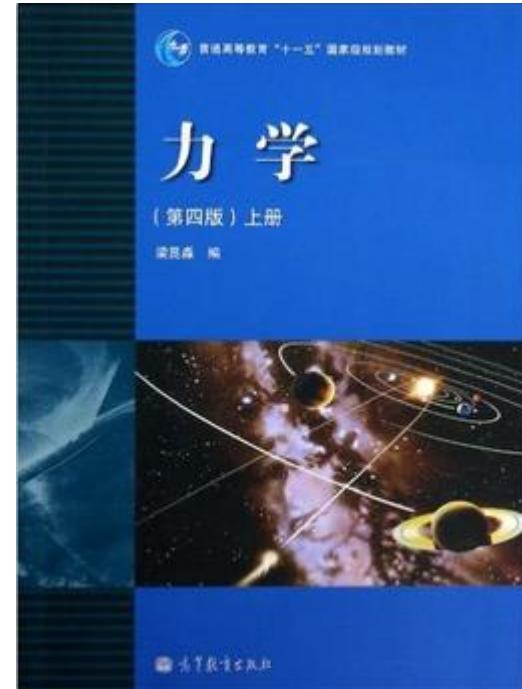
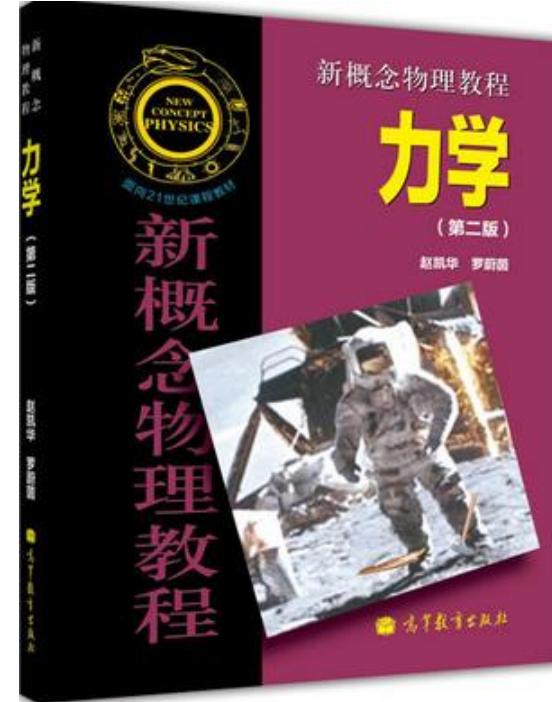
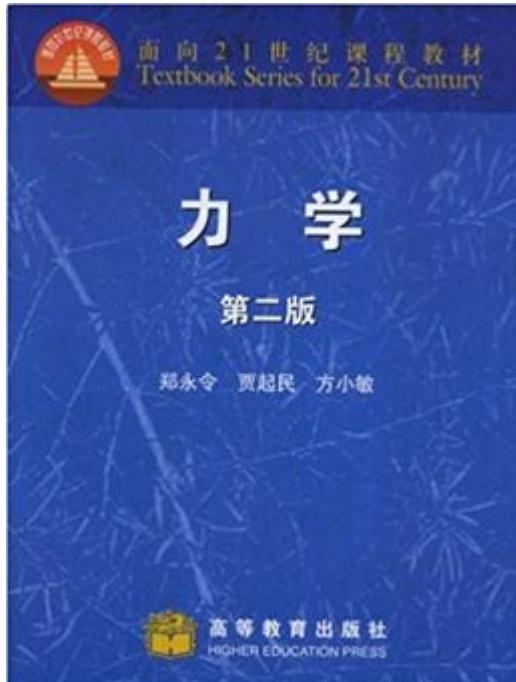
[上册]

(第二版)

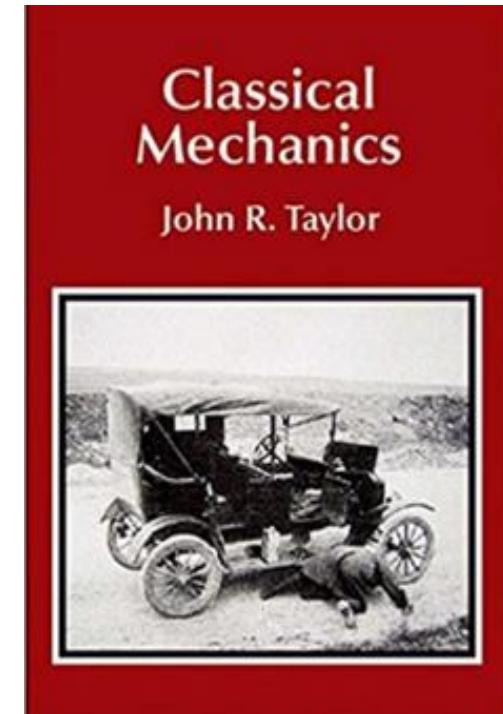
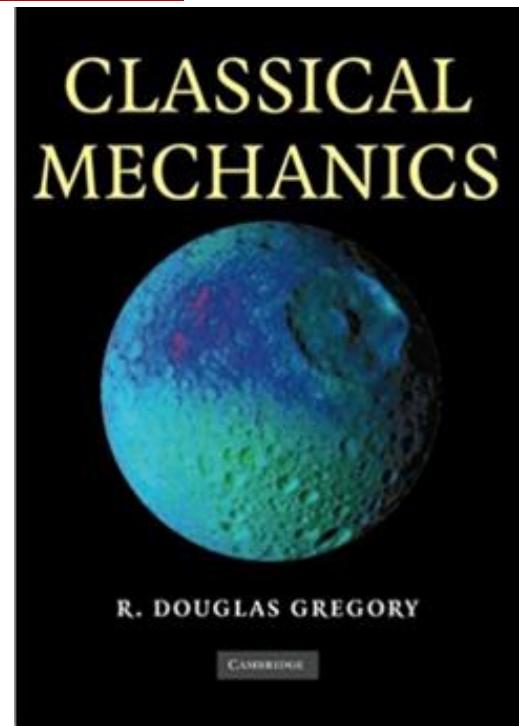
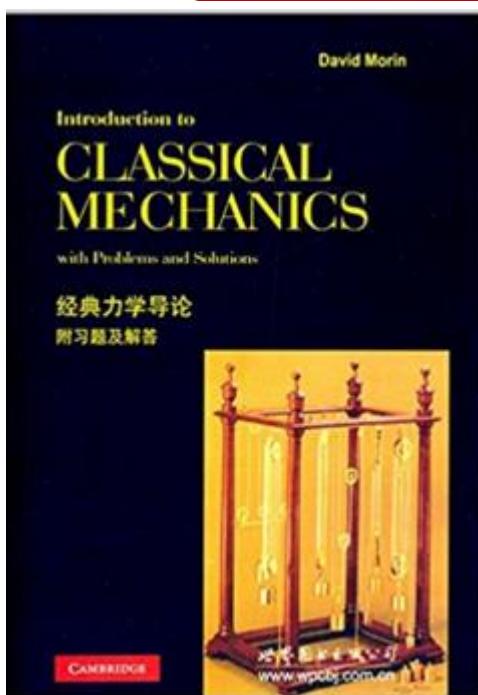
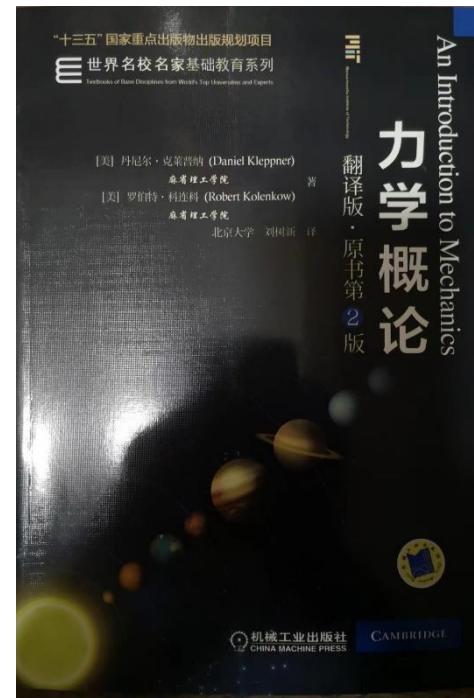
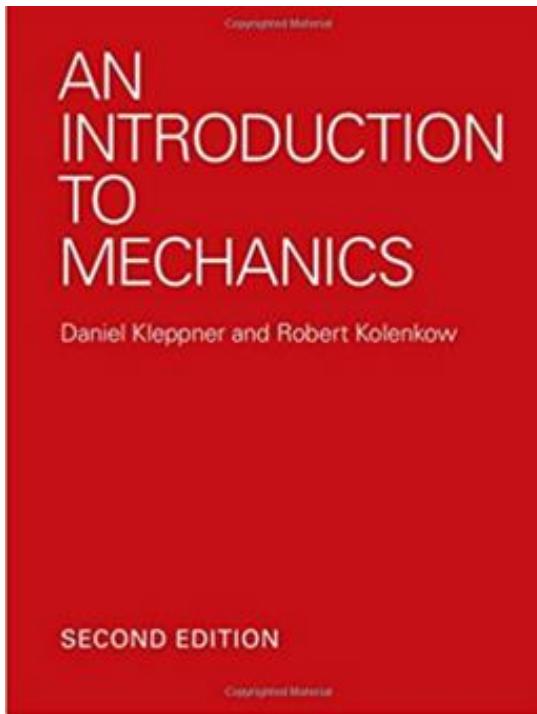
杨维纮 编著

科学出版社

参考教材（中文）



参考教材（英文）



辅导书和习题解答



➤**课程安排**: 由于国庆、中秋、元旦放假造成学时不够，课程组讨论决定适当占用第5节课的时间

➤**作业**

每周二交作业，每次课的讲稿和作业课后放在bb系统中，请不要迟交和抄习题解答，**逾期记为“零分”**

课后小测: 课后10~15分钟，每两周一次小测；计入平时成绩

➤**考试**: 期中考试约在11月的中旬，期末统一命题考试

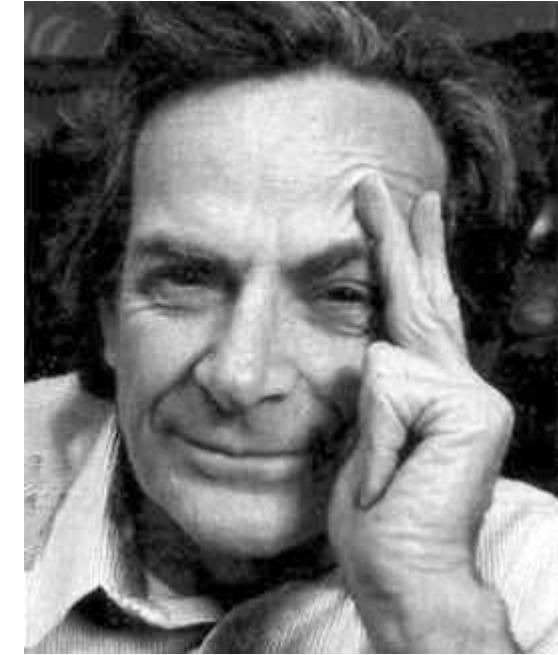
➤**成绩评定**

期中考试:	(20~30) %
平时成绩（ 作业+小测 ）:	(20~40) %
期末考试:	(40~50) %

关于学习方法

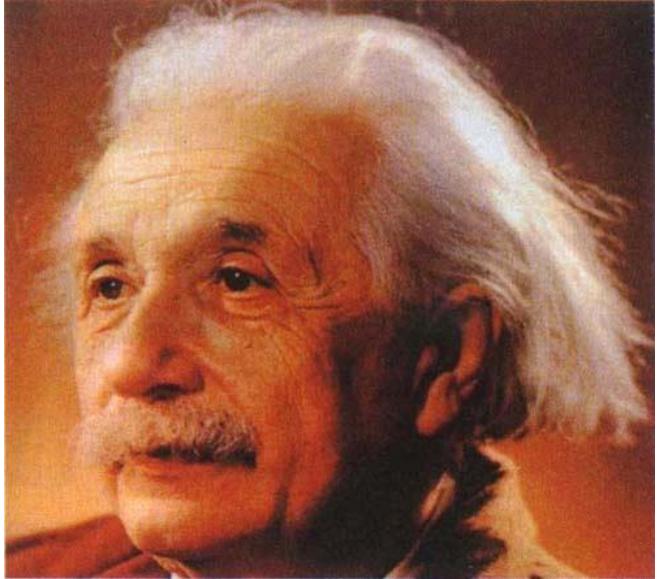
- 改变观念：“物理学不是习题”。理解物理学的基本概念、基本规律和物理学处理问题的基本方法才是关键。

科学是一种方法，它教导人们：一些事物是怎样被了解的，什么事情是已知的，现在了解到什么程度（因为没有事情是绝对已知的），如何对待疑问和不确定性，证据服从什么法则，如何去思考事物，作出判断，如何区别真伪和表面现象。学习物理学，不能仅仅掌握一些知识、定律和公式，更不要把自己的注意力集中在解题上，而应在学习过程中努力使自己逐渐对物理学的内容和方法、工作语言、概念和物理图像，以及其历史、现状和前沿等方面，从整体上有个全面的了解。



Richard Phillips Feynman
(Nobel Laureate in 1965)

学习本课程除了掌握基本知识外，更重要的是学习一种科学的思维方法。



发展独立思考和独立判断的一般能力，应该始终放在首位，而不应当把获得专业知识放在首位。如果一个人掌握了他的学科的基础理论，并且学会了独立地思考和工作，他必定会找到他自己的道路，而且比起那种主要以获得细节知识为其培养内容的人来说，他一定会更好地适应进步与变化。

——阿尔伯特·爱因斯坦

态度决定一切！

知之者不如好之者，

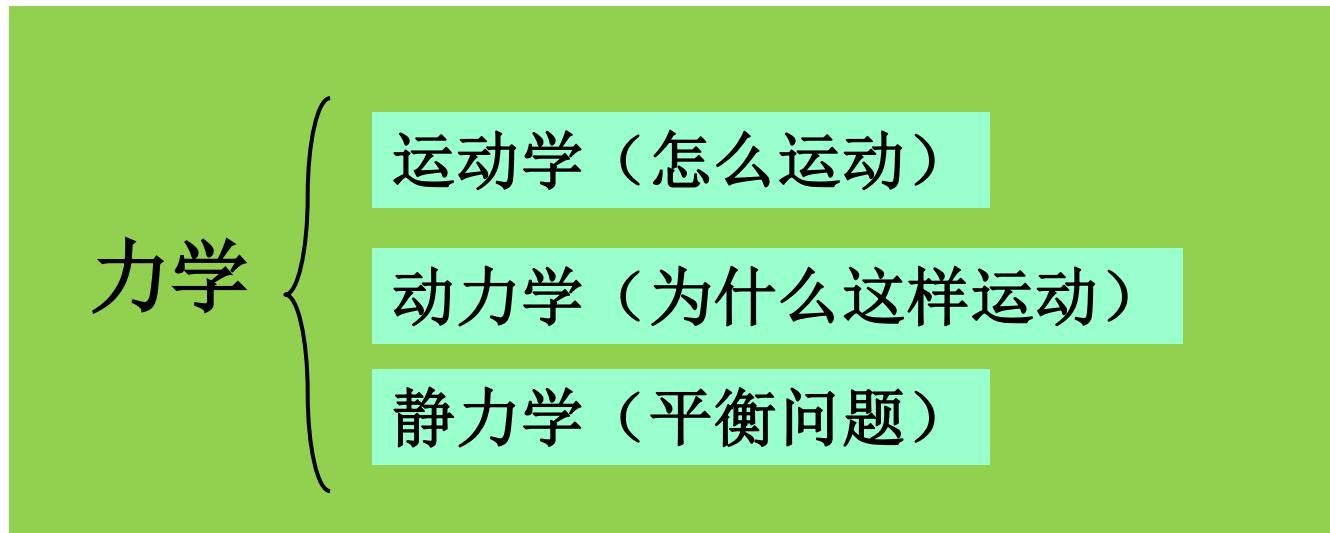
好之者不如乐之者。



引言：时间和空间

● 力学的研究对象——物体的机械运动

机械运动：宏观物体之间（或物体内各部分之间的相对位置变动（具有绝对性和相对性）。



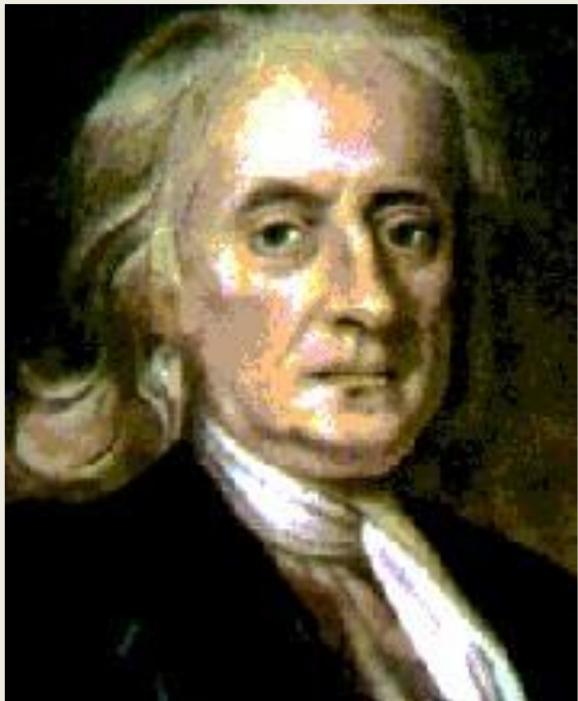
➤ 描述物体的运动即需要指明物体什么时刻在什么位置，因此需要到用时间和空间这两个概念。

什么是时间？什么是空间？

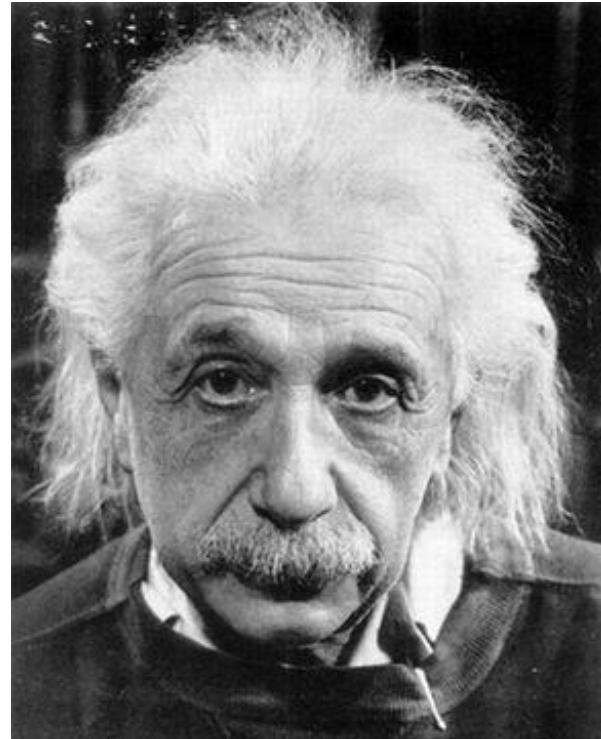
一种或许可以接受的
说法是：时间、空间
是物理事件之间的一
种次序，时间用以表
述事物之间的顺序，
空间用以表述事件之
间的位置。



伟大的神学家及哲学家圣·奥古斯丁 (Augustine, AD354-430)，在说出了他所知道的关于时间的所有问题后——例如，他说这句话就得花费时间——承认他确实“十分抱歉，因为我甚至不知道我所不知道的是什么”！



牛顿
绝对时空观



爱因斯坦
狭义相对论和广义相对论

1. 绝对时空观（牛顿时空观）

牛顿对绝对空间和时间的定义：

Absolute space, in its own nature, without relation to anything external, remains always similar and immovable.

绝对空间，就其本性而言，与外界任何事物无关，而永远是相似的和不可移动的……

Absolute, true and mathematical time of itself and from its own nature, flows equally without relation to anything external.

绝对、真实与数学的时间本身，由于它的本性而均匀流逝，与外界任何事物无关……

- 绝对时空观：时间和空间的测量与物体的存在和运动没有任何关系。对于不同的参考系，长度和时间的测量结果是相同的。
- 在弱引力、低速（远低于真空光速）运动情况下，绝对时空观符合实验结果。

2. 空间的计量

空间反映物质运动的广延性。空间中两点间的距离即为长度。



米尺



游标卡尺和螺旋测微器



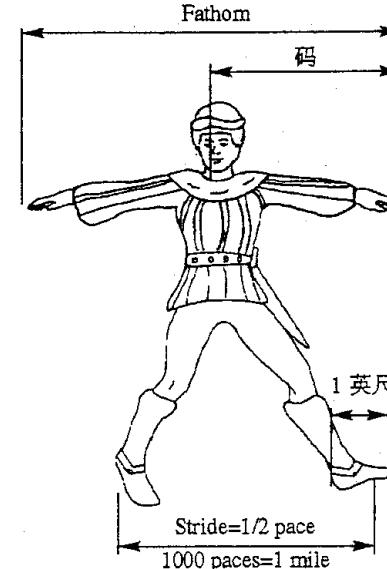
显微镜

码 (yard)



公元9世纪英国国王亨利一世

英尺 (foot)



16个德国成年男子
左脚的平均长度

●长度的单位：米 (m)

历史上，将通过巴黎的子午线从北极到赤道之间的长度的千万分之一定义为米。

①长度计量的实物基准：

1889年，第一届国际计量大会通过：将藏在法国的国际计量局中铂铱合金棒（米原器）在0°C时，两条刻度线间的距离定义为米。

缺点：这样规定的标准米不易复制，精度又不高

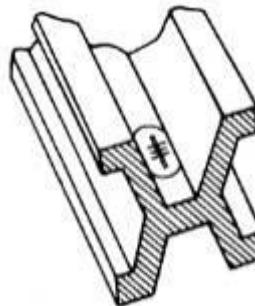
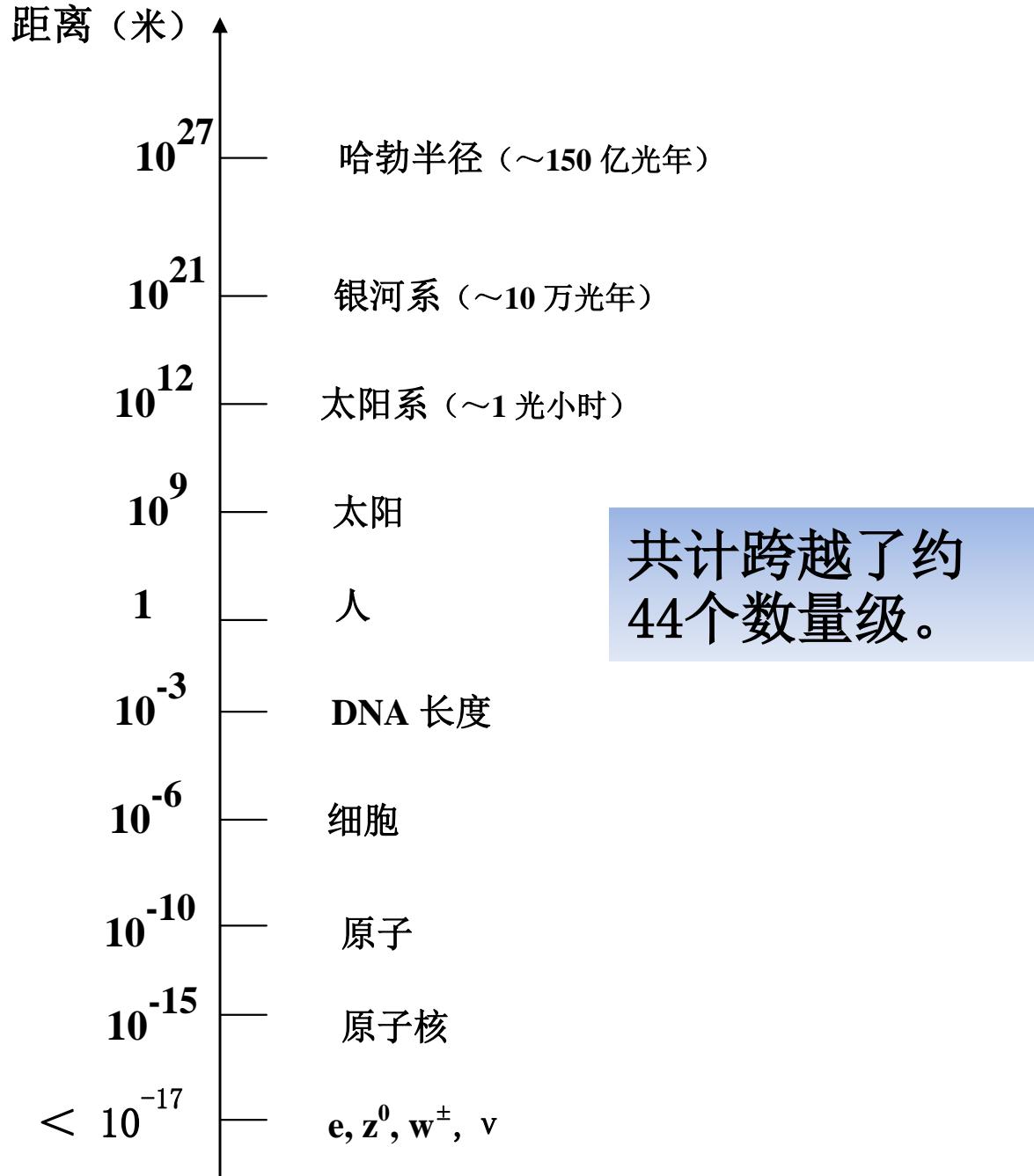
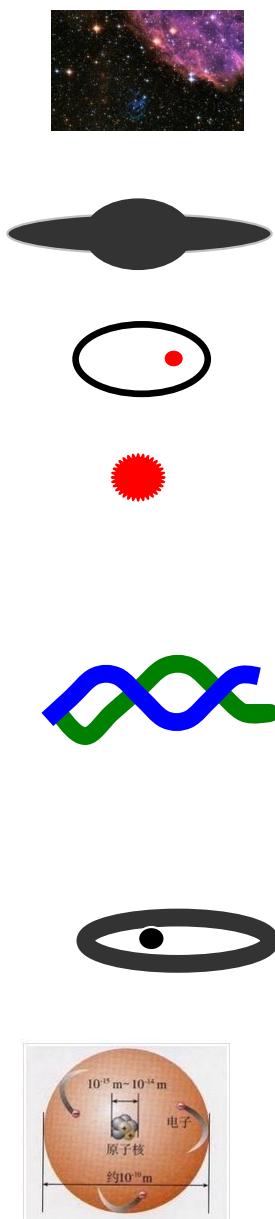


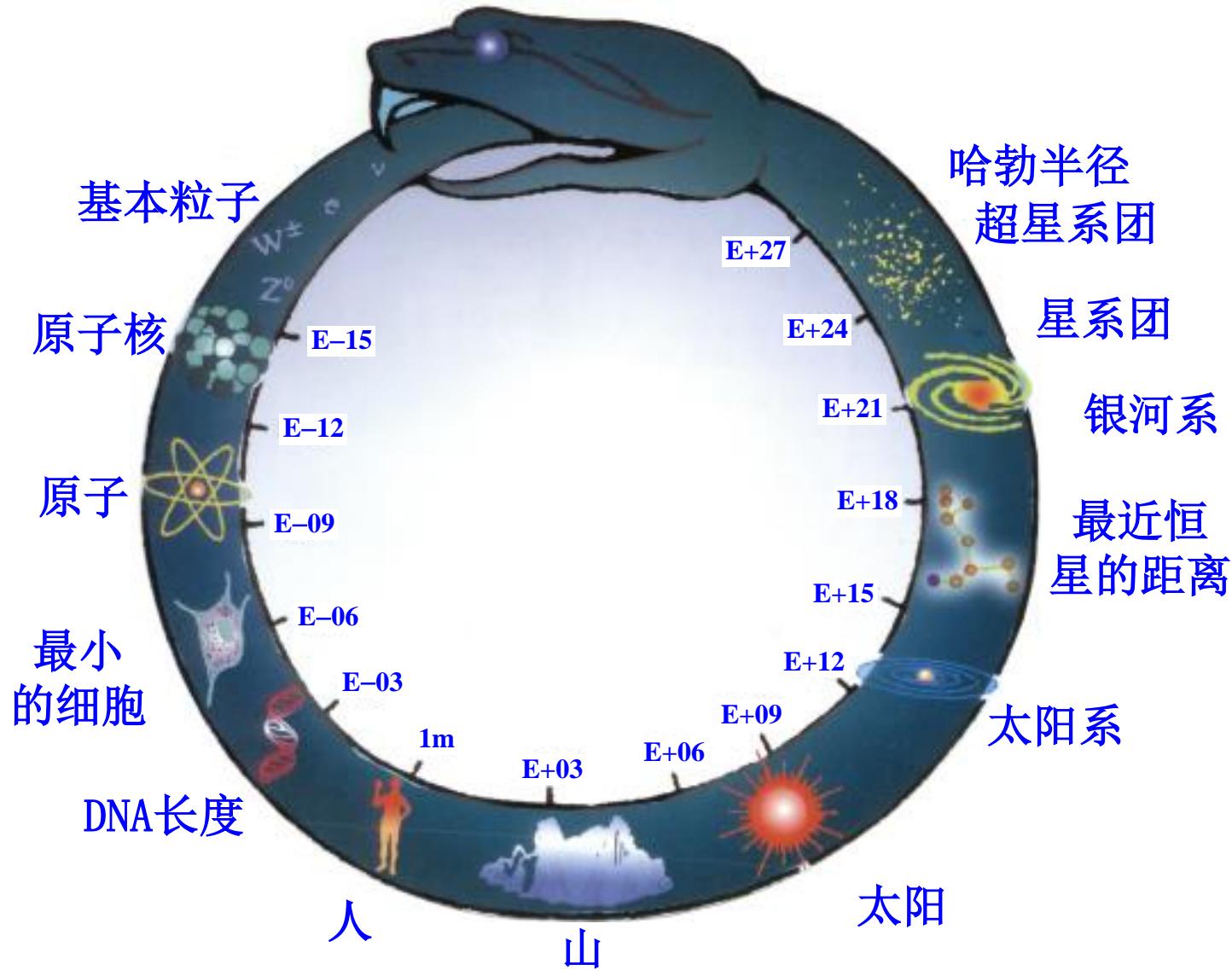
图 15-1 国际米原器

- ②长度的**自然基准**：（1960 年第十一届国际计量大会）氪 86 原子的橙黄色波长来定义“米”，规定“米”为这种光的波长的 $1\ 650\ 763.73$ 倍，这样规定的米叫**原子米**，其精度为 4×10^{-9} 。
- ③ 1983年10月召开的第十七届国际计量大会上已正式通过了新的米的定义，即**用光速值来定义“米”**：米是光在真空中在 $1/299\ 792\ 458$ 秒的时间间隔内所传播的路程长度。光速 c 是一个固定的常数，即 $c = 299792458$ 米/秒。

●典型空间尺度



物质世界空间尺寸的层次性和统一性！



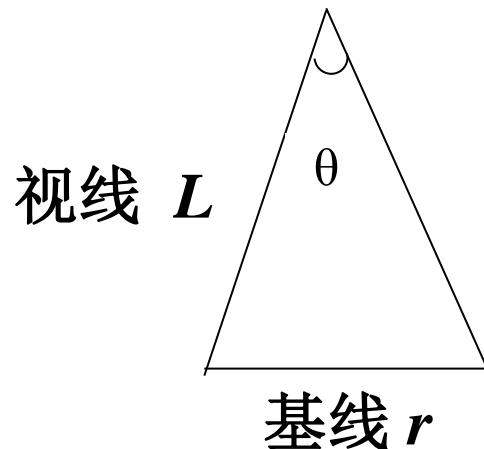
空间单位

①天文单位 (AU) : 日地距离 $1\text{AU} \approx 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$

太阳系的直径约为 80AU , 即约 10^{13} m 。

②光年 (l.y.) : $1 \text{l.y.} \approx 9.4607301 \times 10^{15} \text{ m}$

③秒差距 (pc) : $1\text{pc} = \frac{1\text{AU}}{1''} = \frac{1\text{AU}}{\frac{\pi}{180} \times \frac{1}{60 \times 60}}$



$$\approx 2.06265 \times 10^5 \text{ AU}$$

$$\approx 3.08568 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$\approx 3.2616 \text{ 光年}$$

④埃 (\AA): $1\text{\AA} = 1.0 \times 10^{-10} \text{ m}$

3. 时间的计量

时间是表征物质运动的持续性。原则上，任何具有重复性的过程或现象，都可以作为测量时间的一种钟。

- 太阳的升没表示天；
- 月亮的盈亏是农历的月；
- 四季的循环称作年；
-



为统一使用时间，有必要确定时间的单位和标准。

- 选择一天或一秒作为时间的某个标准单位，并把所有其它的时间表示为这个单位的倍数或分数。
- 选择一只标准的钟，使全世界所有的钟有一个统一的计时（格林尼治时间和时区）。

●时间的单位：秒(s)

①时间计量的实物基准——地球自转

秒： 1秒=平均太阳日×(1/86400)

太阳日：太阳连续两次经过某处子午面的时间间隔；

平均太阳日：一年之内全部太阳日的平均。

②时间的自然基准：1967年10月在第十三届国际度量衡会议上规定于海平面上的铯原子的基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁辐射的周期T与1秒的关系为

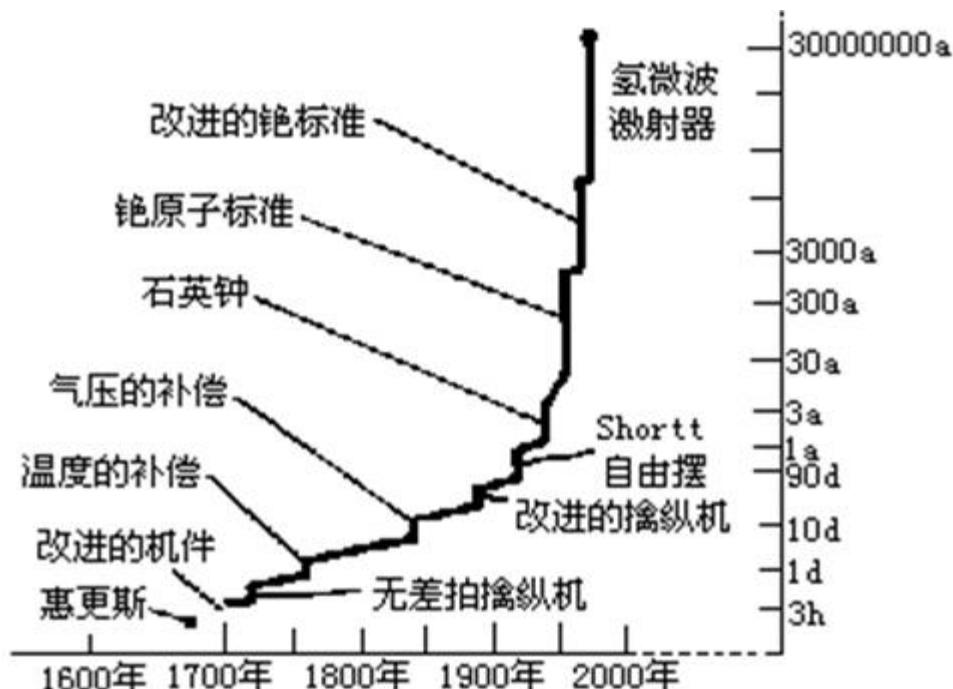
$$1\text{秒} = 9,192,631,770 T$$

这样的时间标准称为原子时



铯原子钟

用铯钟作为计时标准，误差若按一个周期计算，测量精度要比秒表作时计提高 10^{10} 倍，即误差下降到秒表的 10^{10} 之一。



自从人类发明机械计时的时钟以来，400年来时间计量准确度的提高是惊人的，现代的原子钟的计时误差已小于 10^{-12} 秒/天。目前，时间是测量得最准确的一个基本量。

●短的时间

- ① “天”与“小时” 沙漏
- ② “小时”与“秒” 机械摆
- ③电子摆与高频振荡电路
- ④介子寿命



传递弱相互作用的矢量粒子 w^\pm 和 z^0 的寿命寿的只有 $10^{-25}s$ ，大致相当于光通过质子所花时间的百分之一。

目前物理学中涉及的最长时间是 $\sqrt{Gh/c^5} = 1.35 \times 10^{-43}s$ ，称为**普朗克时间**。比普朗克时间还要小的范围内，时间的概念可能就不再适用了。

●长的时间

- ① “天”与“年”
- ② 稍长的时间 树木年轮、沉积物
- ③ 更长的时间 放射性物质半衰期



在这种情况下，并**不出现周期性**，但存在一种“规则性”。

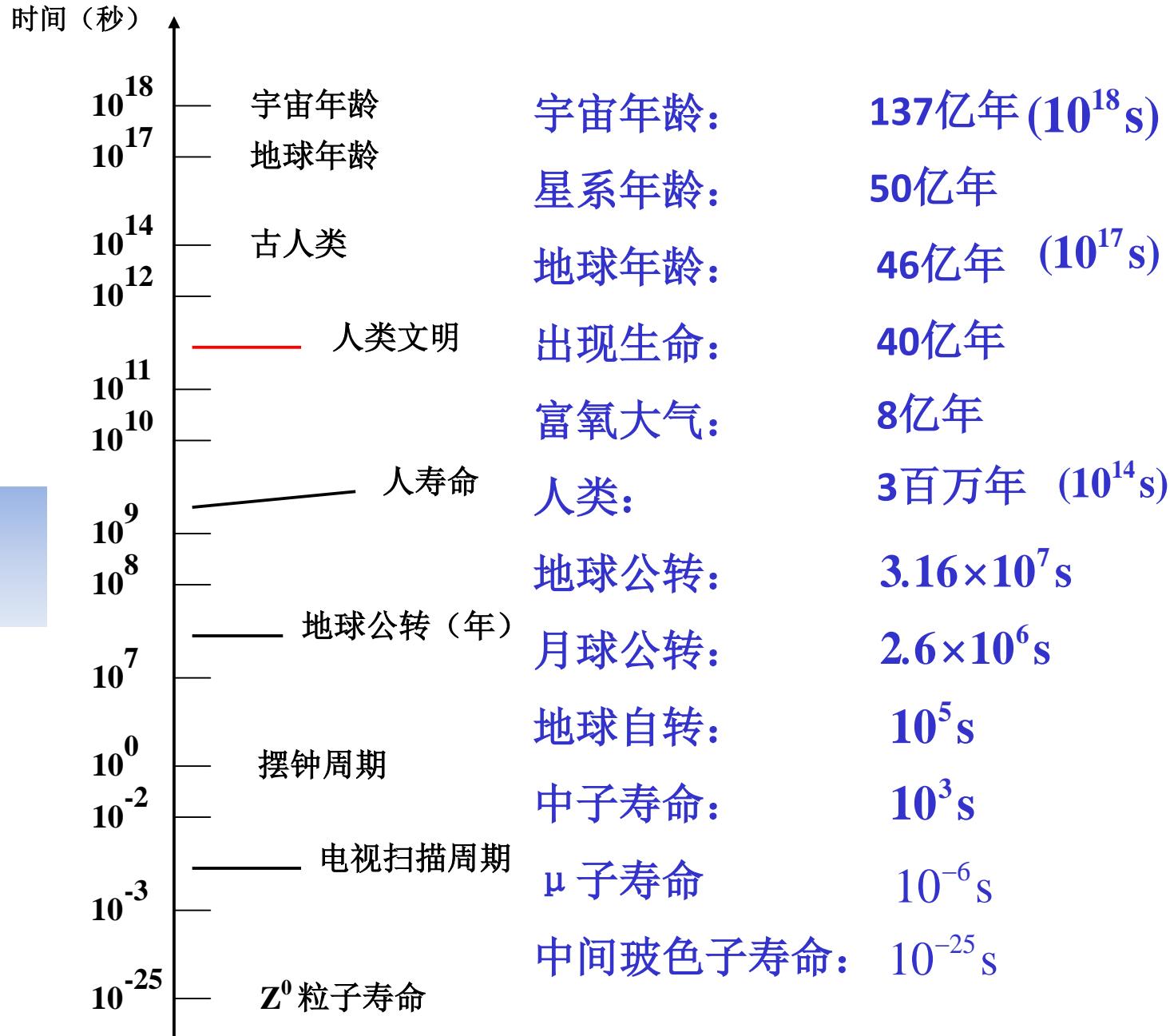
$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{t/T}$$

地球的年龄约为46亿年；太阳系的年龄也为46亿年；宇宙的年龄大约为100亿年到200亿年（ 6×10^{17} s），最新成果认为是约137亿年。**宇宙是有起点的，谈论更早的时间似乎是没有意义的。**

物理学中涉及的最长时间是 10^{38} s，它是质子寿命的下限。

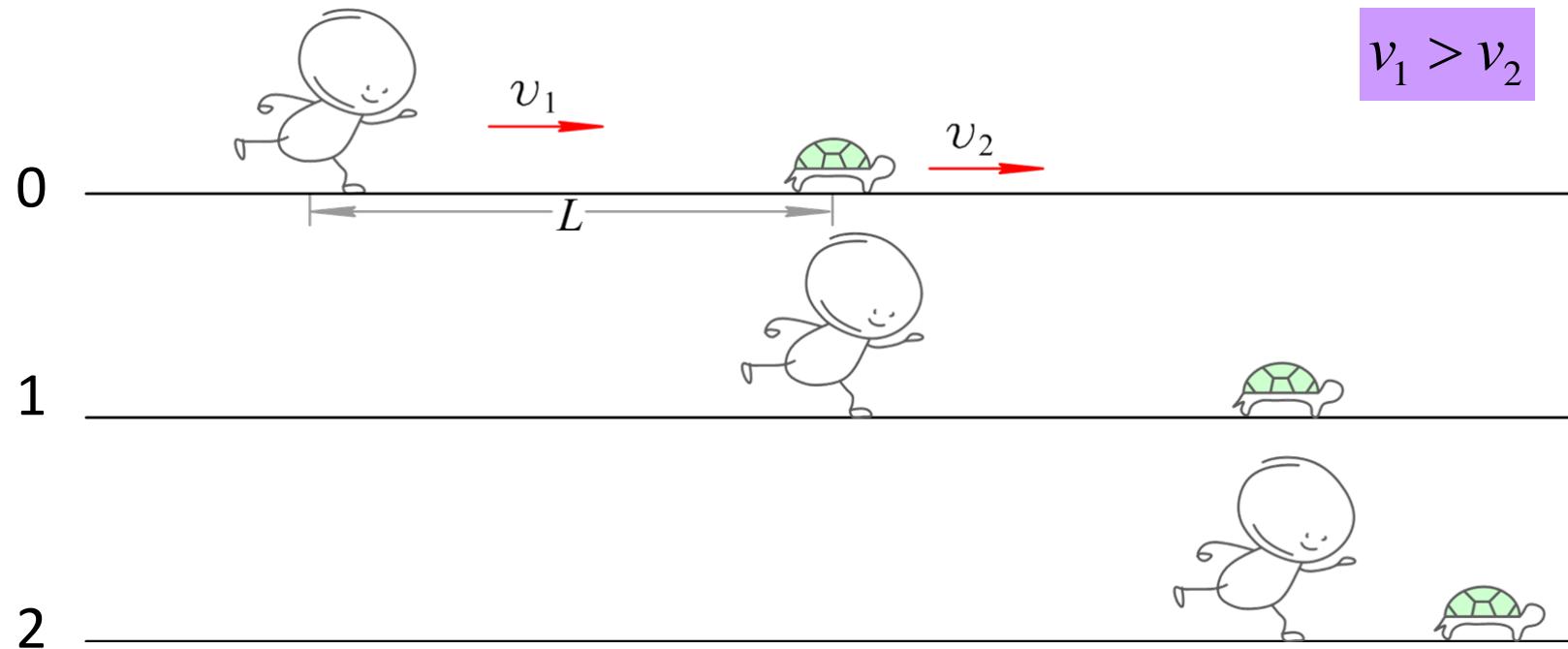
●典型时间尺度

共计跨越了约
43个数量级



例题1：芝诺佯谬

古希腊哲学家芝诺有一个很著名的论证 “**阿基里斯追不上乌龟**”。



解：关键是在芝诺佯谬中用了两种不同的时间度量。

阿基里斯逐次地到达乌龟在前一次的出发点。我们称这种钟叫**芝诺钟**，它测得的时间为 τ 。

普通时：阿基里斯将在 $t = \frac{L}{v_1 - v_2}$ 时赶上乌龟；当 $t > \frac{L}{v_1 - v_2}$ 时，阿基里斯就超过乌龟了。

普通时 t 与芝诺时 τ 之间的变换关系：

芝诺时 (τ)	普通时 (t)
0	0
1	$\frac{L}{v_1}$
2	$\frac{L}{v_1} + \frac{L}{v_1} \cdot \frac{v_2}{v_1}$
.....
n	$\frac{L}{v_1} + \frac{L}{v_1} \cdot \frac{v_2}{v_1} + \dots + \frac{L}{v_1} \cdot \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1} = \sum_{m=0}^{n-1} \frac{L}{v_1} \cdot \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^m$

即有

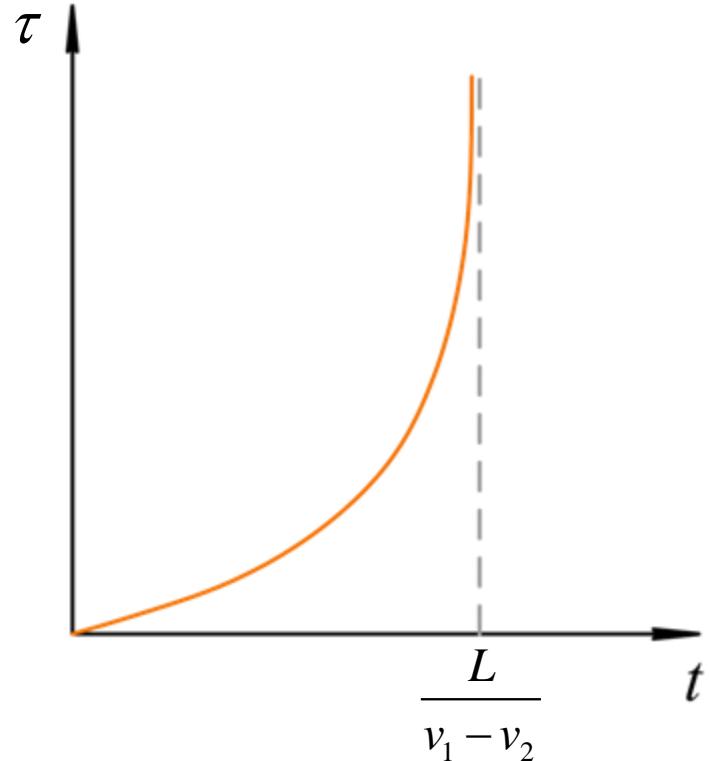
$$t = \sum_{m=0}^{n-1} \frac{L}{v_1} \cdot \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^m = \frac{L}{v_1} \frac{1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^n}{1 - \frac{v_2}{v_1}} = \frac{L}{v_1 - v_2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^n \right]$$

或者

$$\left(\frac{v_2}{v_1} \right)^n = 1 - \frac{v_1 - v_2}{L} t$$

把 n 换成 τ , 得

$$\tau = \frac{\ln \left(1 - \frac{v_1 - v_2}{L} t \right)}{\ln \frac{v_2}{v_1}}$$



✓ 当阿基里斯追上乌龟时, 普通时 $t = \frac{L}{v_1 - v_2}$, 芝诺时 $\tau \rightarrow \infty$ 。芝诺的论证得到解释。

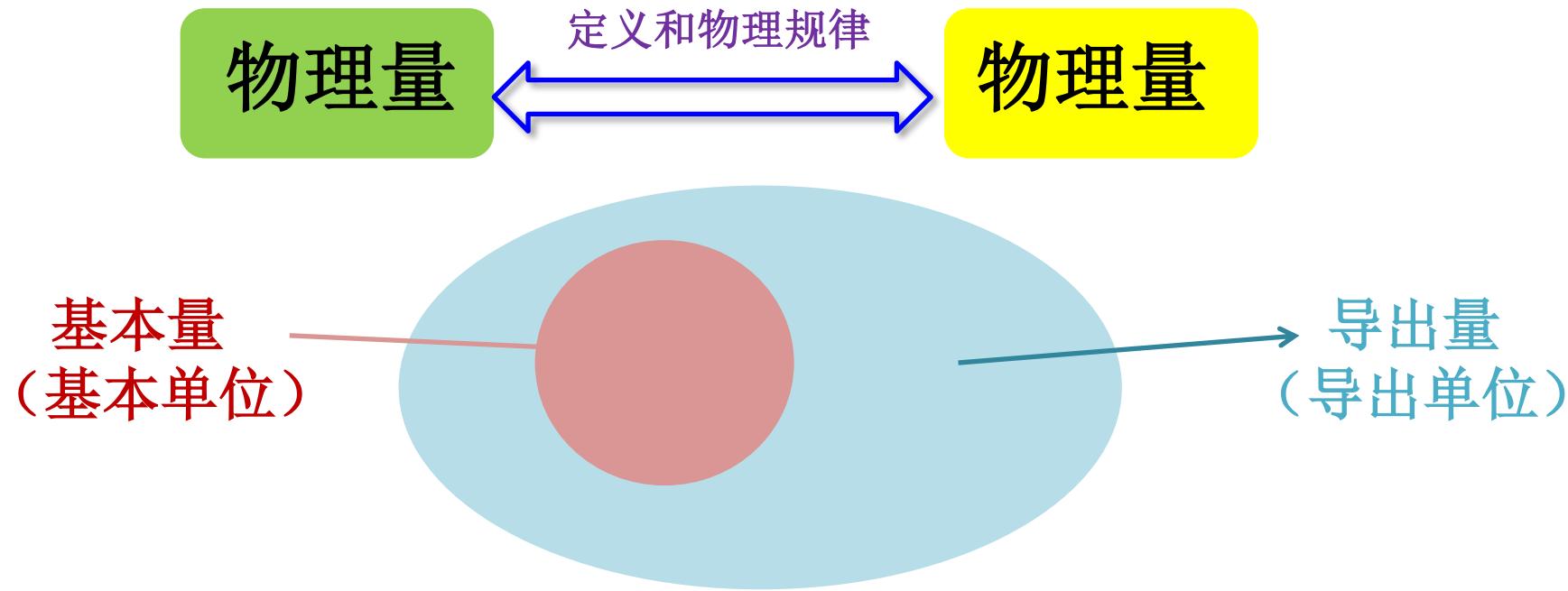
✓ $\tau \in [0, \infty) \leftrightarrow t \in \left[0, \frac{L}{v_1 - v_2} \right)$ 。当 $t > \frac{L}{v_1 - v_2}$, 用芝诺钟已经无法度量。

讨论:

- 芝诺的佯谬，来源于芝诺时的局限性，芝诺时不可能度量阿基里斯追上乌龟之后的现象。
- 芝诺佯谬给我们的启示是：**时间与时间的度量不同，一种时间的度量达到无限之后，还是可以有时间的；一种时间的度量达到无限，从其它的度量看，可能是有限的。**
- 如果飞向黑洞的宇航员的固有时是普通时的话，则地球上的观察者所用的时间就是某种芝诺时。

4. 单位制和量纲

物理学中，物理公式总是和一定的“单位制”相联系，“单位制”就是各物理量间相互配套的一组单位。



基本单位：选定几个物理量作为基本量，人为地规定其单位，称为基本单位制。

导出单位：从基本量导出的量称为导出量，其单位是基本单位的组合，称为导出单位。

●国际单位制(SI: Le Système International d'Unités)

➤ 基本量: 长度 质量 时间 电流 温度 物质的量 光强度

单 位: m kg s A K mol cd

➤ 导出量: 速度 加速度 力 动量 ...

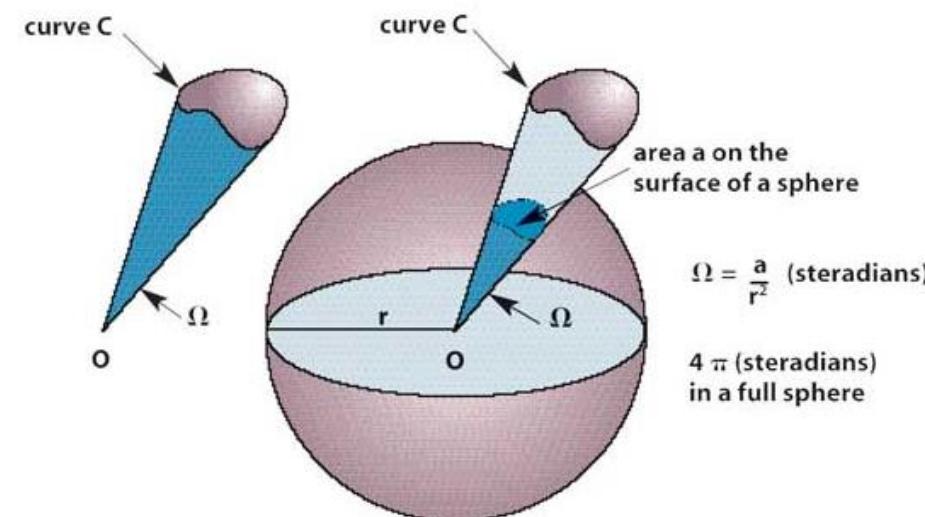
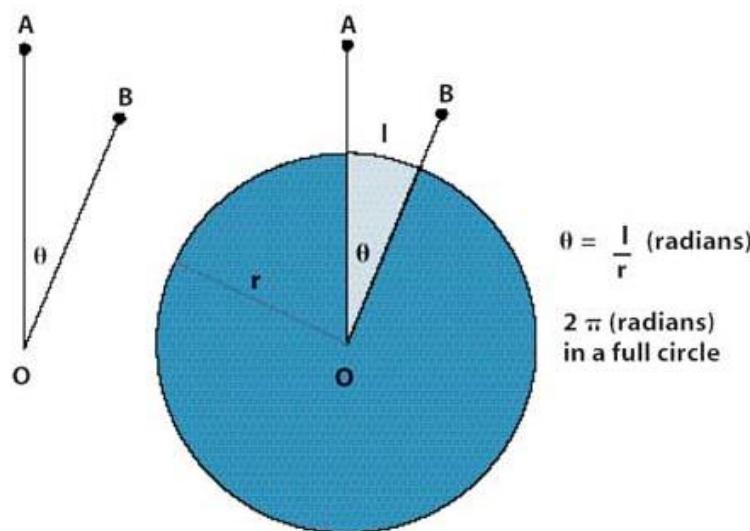
单 位: m/s m/s² N kg · m/s ...

➤ 辅助单位: 平面角 立体角

单 位: rad sr (球面度)



➤ 辅助单位可以参与导出单位, 如角速率 rad/s



● SI词冠

我们研究的对象跨越如此巨大的数量级范围，单一的单位（如秒、米），用起来就很不方便了，通常的做法是采用一些词冠来代表一个单位的十进倍数或十进分数，如千（kilo）代表倍数 10^3 ，厘（centi）代表分数 10^{-2} 。

➤国际单位制所用的词冠 (<1)

数量级	英文名	缩写符号	中译名
10^{-1}	deci	d	分
10^{-2}	centi	c	厘
10^{-3}	milli	m	毫
10^{-6}	micro	μ	微
10^{-9}	nano	n	纳[诺]
10^{-12}	pico	p	皮[可]
10^{-15}	femto	f	飞[母托]
10^{-18}	atto	a	阿[托]
10^{-21}	zepto	z	仄[普托]
10^{-24}	yocto	y	幼[克托]

➤国际单位制所用的词冠 (>1)

数量级	英文名	缩写符号	中译名
10	deca	da	十
10^2	hecto	h	百
10^3	kilo	k	千
10^6	mega	M	兆
10^9	giga	G	吉[咖]
10^{12}	tera	T	太[拉]
10^{15}	peta	P	拍[它]
10^{18}	exa	E	艾[克萨]
10^{21}	zeta	Z	泽[塔]
10^{24}	yota	Y	尤[塔]

5. 测量的精度与有效数字

- 我们不可能绝对地测量出一个物理量的值，**测量结果都存在一定程度的不确定性**。测量结果的精度取决于所用的设备以及测量者的细心程度。例如，用米尺度量长度，米尺的最小刻度是毫米，如进行估计还可以得到0.1mm，但是百分之几、千分之几毫米的读数是不可能得到的。
- 测量的结果包括：①**数值**（即度量的倍数）②**单位**（即所选定的比较标准）③**结果可信赖的程度**（用不确定度表示）
- ✓ 可靠数字：通过直接读取获得的准确数字；
- ✓ 存疑数字：通过估读得到的数字；
- ✓ **有效数字**：测量结果中能够反映被测量大小的带有1位存疑数字的全部数字。

例如：2.503g表示2.50g是明确知道的可靠的数字，最后一位3是不确定的数字，有效数字总共4位

➤ 有效数字与“0”

- ✓ 0.05: 一位有效数字 (“0” 不算有效数字)
- ✓ 0.0096: 两位有效数字 (“0” 不算有效数字)
- ✓ 15.40: 四位有效数字 (“0” 算有效数字)

15.40g ≠ 15.4g

- ✓ 3.600×10^3 位表示有四位有效数字

➤ 有效数字的运算

- ①两个物理量的相加减，有效数字由小数点后最短的位数决定，

$$123.62 + 8.9 = 132.5$$

- ②乘除结果的有效数字个数等于有效数位数最小的那个

$$(1.32578 \times 10^7) \times (4.11 \times 10^{-3}) = 5.45 \times 10^4$$

6. 量纲式

基本量选定后，导出量的量纲可由基本量的量纲的组合而得。

量纲：表示一个物理量由基本量的幂次组合的式子。

在国际单位制中，表示力学量 Q 的量纲式为

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma \quad \alpha, \beta, \gamma \text{ 为量纲指数}$$

L 为长度的量纲， M 为质量的量纲， T 为时间的量纲。

如：速度的量纲 $\dim v = LT^{-1}$

加速度的量纲 $\dim a = LT^{-2}$

力的量纲 $\dim F = LMT^{-2}$

圆心角的量纲 $\dim \phi = L^0 M^0 T^0$

量纲法则：①只有量纲相同的才能相等，相加减！
②指数函数、对数函数、三角函数的宗量量纲必须为0。

●量纲分析的实用意义

①在量纲相同的单位制之间进行单位转换。

例如：牛顿（N）与达因（dyn）的换算关系

$$\dim F = \text{LMT}^{-2}$$

$$\because 1m = 100cm, 1kg = 1000g$$

$$\therefore 1\text{牛顿} = 100 \times 1000 \text{达因} = 10^5 \text{达因}$$

②验证公式：等式两边量纲必须相同

$$v^2 = 2ax \quad \text{等式两边量纲相同，可能正确}$$

$$v^2 = 2ax^2 \quad \text{等式两边量纲不相同，一定不正确}$$

③为推导某些复杂公式提供线索

用量纲分析的方法，甚至不知道定律和物理机制的细节，就可以进行一些定性的判断。

例题2：当直升飞机停在空中时，其消耗的功率取决于机翼的长度 l ，机翼提供的垂直向下的推力 F 和空气的密度 ρ 三个因素。试问，若由于飞机负荷增加而使整个机身重量增加1倍，直升飞机的功率应该增大为原来的几倍？

解：题目不要求导出直升机的功率与 l 、 F 、 ρ 的确切关系式，只要求当 F 增加1倍时功率增大的倍数，故可用量纲分析法解本题。

1. 分析影响因素，列出函数方程

根据题意可知，飞机消耗的功率 P 与机翼的长度 l ，机翼提供的垂直向下的推力 F 和空气的密度 ρ 有关，用函数关系式表示为

$$P = f(l, F, \rho)$$

2. 将 P 写成 l 、 F 、 ρ 的指数乘积形式，即

$$P = kl^a F^b \rho^c \quad \text{其中 } k \text{ 为无量纲的常数}$$

3. 写出量纲表达式

$$\dim P = (\dim l)^a (\dim F)^b (\dim \rho)^c$$

4. 选用L、T、M作为基本量纲，表示各物理量的量纲为

$$\dim P = ML^{-2}T^{-3}, \quad \dim l = L, \quad \dim F = MLT^{-2}, \quad \dim \rho = ML^{-3}$$

带入功率P的量纲表达式，可得

$$ML^2T^{-3} = L^a M^b L^b T^{-2b} M^c L^{-3c} = M^{b+c} L^{a+b-3c} T^{-2b}$$

5. 根据量纲法则（等式两边量纲相同）

$$\begin{cases} b + c = 1 \\ a + b - 3c = 2 \\ -2b = -3 \end{cases} \quad \rightarrow \quad a = -1, \quad b = \frac{3}{2}, \quad c = -\frac{1}{2}$$

6. 带入指数乘积式

$$P = kl^{-1}F^{\frac{3}{2}}\rho^{-\frac{1}{2}}$$

由此可知当F增大1倍时，功率P应增大 $2^{\frac{3}{2}} = 2\sqrt{2}$ 倍。

7. 数量级估计

- 在未知现象的探索中，数量级的估计常很有意义。例如，著名物理学家费米在第一颗原子弹引爆被引爆时，他撒出了一些小纸片。根据纸片漂浮过的距离就估计出原子弹的当量（即释放的能量），和经仪器测量计算出的数据相符。费米将这种数量级估计的方法称作“**back-of-the-envelope calculations**”
- 数量级在物理学中很重要，研究对象在空间尺度上属于不同数量级，便可能属于不同研究领域。例如：宇宙论研究空间尺度在 10^{26}m 的量级的现象，而研究尺度为 10^{-15}m 量级的则属于粒子物理的范畴。
- 物理学家对正在探索的问题作数量级估计，**需要对有关事实接规律有很好的了解以及在此基础上的假设**。如果估计结果和在数量级上的预言比较符合，表明可能已抓到事物的一些本质，可以做进一步的研究。若估计结果与实验结果大相径庭，往往需要对基本假设作根本性的改动。



例题2：根据已掌握的物理知识和自己的常识，估计出下面这些物理量的量级：

- ①地球的半径；
- ②地球的质量；

解：①根据之前介绍的“米”的定义，可以知道北极到赤道的距离为 10^7 米，这个长度是地球大圆圆周的 $1/4$ ，因此地球大圆周长为

$$C = 4 \times 10^7 \text{ m}$$

从而可以得到地球的半径为

$$R = \frac{C}{2\pi} = \frac{4 \times 10^7}{2\pi} \approx 6 \times 10^6 \text{ m}$$

②根据地球表面上重力加速度的大小为 $g=9.8\text{m/s}^2$ ，地面上一个质量为 m 的物体受到的地球引力为 mg ，

$$mg = \frac{GMm}{R^2} \quad \longrightarrow \quad M = \frac{gR^2}{G}$$

万有引力常数的数值为 $G=6.67 \times 10^{-11}\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ ，所以可估算得

$$M \approx 5.29 \times 10^{24} \text{ kg}$$