



物理学家梦想

对自然作统一的描述。

对称性 symmetry

以它强大的力量
把物理学中那些看上去
毫不相关的方面连接起来。



2



对称性无处不在

3



水滴落在水面上荡起的对称波纹

4



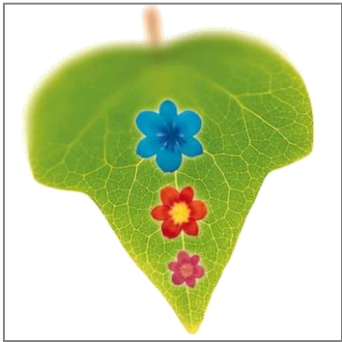
孔雀羽毛中的对称性

5



对称成为社会文化的组成部分

6



对称就是美

1 对称性

1.1 物质世界中的对称性和人类的早期认识



无机世界



有机世界



人类文明

1. 数学中的对称性

$$A + B = B + A$$
$$A + (B + C) = (A + B) + C$$

2. 物理学中的对称性

变化的电场产生磁场

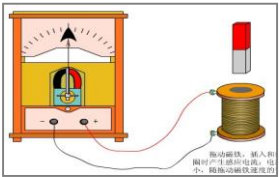
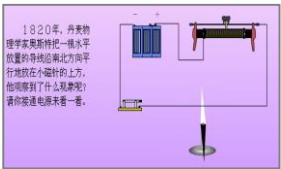
变化的磁场产生电场

光的波粒二象性

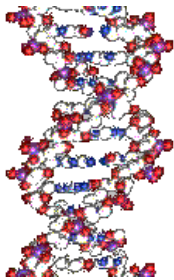
1924年德布罗意提出实物粒子的波粒二象性

电子

狄拉克, 正电子(在宇宙射线观察到)



3. 生命科学中的对称性



DNA双螺旋链

在变化万千的物质世界中, 普遍存在一类现象, 这就是**对称性**;对称的概念已经渗透到人类**生产和生活**的各个方面。对称就是**美**, 对称是**艺术**, 对称成为**社会文化**的组成部分。

4. 中国古代诗歌中的对称性

音节和韵律是诗的原创的唯一的愉悦感官的芬芳气息, 甚至比所谓富于意象的富丽辞藻还重要。
——黑格尔

为什么节律如此重要? 节律中暗含着对称性

平仄

四声: 平、上、去、入
平 仄

平仄有规律的交替和重复, 产生和谐的节奏

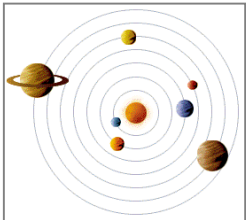
仄 仄 平 平 仄 仄
海内存知己
天涯若比邻
平 平 仄 仄 平

平 平 平 平 仄 仄
微微风簇浪
散作满河星
仄 仄 仄 仄 平

5. 科学中对称概念的引入

古希腊学者

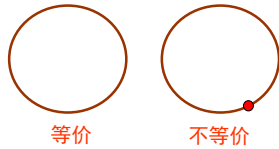
天体的匀速圆周运动, 无论从运动形式上, 还是轨道形状上, 都具有高度的对称性; 星球本身的形状也具有很好的对称性。



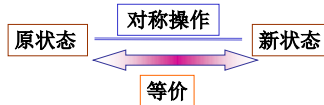
1.2 对称性的普遍意义

• **系统**：所研究的对象

• **变换**：将系统从一个状态变化到另一个状态的过程也称为操作



如果一个操作使系统从一个状态变到另一个与之等价的状态，或者说，状态在此操作下不变，我们就说系统对于这一操作是**对称的**，而这个操作就叫做该系统的一个**对称操作**。



13

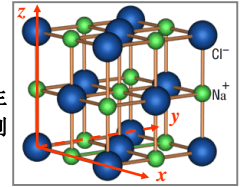
1.3 对称性的分类及常用的时空对称性

对称性的分类 { 系统或具体事物的对称性
物理规律的对称性

常用的时空对称性

1. 空间平移

使某一形体沿某个方向发生一平移后，和原来完全相同，则该形体具有平移对称性。

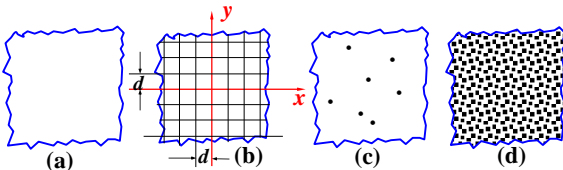


氯化钠结构 (NaCl)
沿 x, y, z 任一方向平移两个晶格，具有平移对称性



14

平移： $\vec{r} \rightarrow \vec{r} + \vec{r}_0$ 的操作。



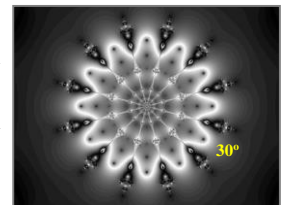
(a) 平移对称 (b) 平移 d 对称 (c) 无平移对称 (d) 宏观上平移对称

对平移操作状态不变的系统具有**平移对称性**。

15

2. 转动对称

如果某一物体绕某一固定轴转动某一角度，从表面上看该物体和未转动前完全相同，这种对称叫做转动对称，或轴对称。



绕垂直纸面的轴转动30度，具有**转动对称性**。

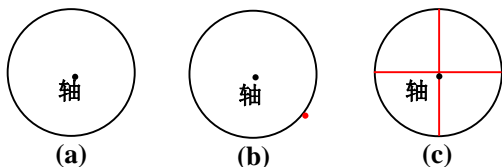
球对称性和各向同性

如果一个物体对通过某一定点的任意轴线都具有转动对称性则该物体具有**球对称性**。

具有球对称性的物体，从对称中心出发，向各个方向的性质都一样，称为**各向同性**。

16

转动：绕某个定轴旋转一个角度的操作。



(a) 轴对称 (b) 一次轴 (对称) (c) 四次轴 (对称)

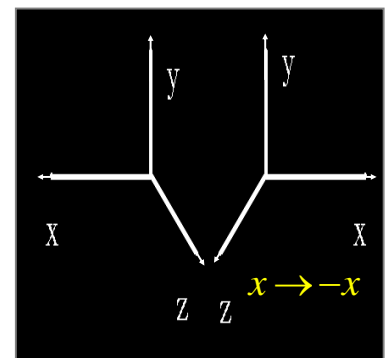
对转动操作状态不变的系统具有**转动对称性**。

对绕空间一固定点作任意旋转都不变的系统具有**球对称性**。

17

3. 镜像对称

就是通常所说的左右对称，相应的操作为空间反射或镜面反射。



18

镜象反射：相当于“照镜子”的变换。

(a) 上下、左右均对称 (b) 只左右对称 (c) 坐标系反射

根据镜象反射的性质可将物理学中的矢量分成两类：**极矢量** 和 **轴矢量**

19

极矢量：镜象反射中**垂直**反射面的分量**反向**，**平行**反射面的分量**不变向**。

如： \vec{r} , \vec{v} , \vec{a} , \vec{E} , ...

反射面

$$\begin{cases} \vec{v}'_{\parallel} = \vec{v}_{\parallel} \\ \vec{v}'_{\perp} = -\vec{v}_{\perp} \end{cases}$$

20

轴矢量(赝矢量)：镜象反射中**垂直**反射面的分量**不变向**，**平行**反射面的分量**反向**。

如： $\vec{\omega}$, \vec{L} , \vec{p}_m , \vec{B} , ...

反射面

$$\begin{cases} \vec{L}'_{\perp} = \vec{L}_{\perp} \\ \vec{L}'_{\parallel} = -\vec{L}_{\parallel} \end{cases}$$

$\vec{r} \times \vec{p} = \vec{L}$ (极) (极) (轴)

可以证明：**极矢量** × **极矢量** → **轴矢量**

21

4. 空间反演

空间反演就是把空间的三个坐标轴都反向的操作。如果一个物体经过空间反演变换和原来一模一样，则该物体具有空间反演对称性。

$\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$

22

空间反演： $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$ 的操作称为对原点O的空间反演。

直角坐标系中的空间反演 $\begin{cases} x \rightarrow -x \\ y \rightarrow -y \\ z \rightarrow -z \end{cases}$

空间反演不变的系统具有对O的**点对称性**。

例如，立方体对其中心具有点对称性。

反映空间反演对称性的物理量叫**宇称 (parity)**。

点对称性

空间反演 = 镜面反射 + 绕镜面法线旋转 180°

23

▲ **文学创作中也有镜象反射和空间反演对称**

回文词（镜像反射） 纳兰性德

雾窗寒对遥天暮	暮天遥对寒窗雾
花落正啼鸦	鸦啼正落花
袖罗垂影瘦	瘦影垂罗袖
风剪一丝红	红丝一剪风

镜象反射面

24

回文诗（镜像反射）

《题金山寺》

（宋）苏东坡

潮随暗浪雪山倾 远浦渔舟钓月明 明月钓舟...
桥对寺门松径小 巷当泉眼石波清 清波石眼...
迢迢远树江天晓 蔼蔼红霞晚日晴 晴日晚霞...
遥望四山云接水 碧峰千点数鸥轻 轻鸥数点...

反射面

回文对联（镜像反射）

上海自来水来自海上 上海自来水来自海上
南山长生松生长山南 南山长生松生长山南

25

回文诗（空间反演）

《虞美人》(1) （清）朱熹（字杏孙）

秋声一夜凉灯瘦 寂寂愁新逗
病蛩悲蟀小庭中 落月悄垂帘影翠房空
轻烟黛锁双眉恨 背镜情无准
粉残脂剩酒醒难 靠遍皱痕罗袖倚天寒

空间反演（倒过来掉一下句读）

寒天依袖罗痕皱 遍靠难醒酒
剩脂残粉准无情 镜背恨眉双锁黛烟轻
空房翠影帘垂悄 月落中庭小
蟀悲蛩病逗新愁 寂寂瘦灯凉夜一声秋

26

回文诗（空间反演）

《虞美人》(2) （清）朱熹（字杏孙）

孤楼倚梦寒灯隔 细雨梧窗逼
冷风珠露扑钗虫 络索玉环圆鬓凤玲珑
肤凝薄粉残妆悄 影对疏栏小
院空芜绿引香浓 冉冉近黄昏月映帘红

空间反演（倒过来掉一下句读）

红帘映月昏黄近 冉冉浓香引
绿芜空院小栏疏 对影悄妆残粉薄凝肤
珑玲凤鬓圆环玉 索络虫钗扑
露珠风冷逼窗梧 雨细隔灯寒梦倚楼孤

27

回文诗（空间反演）

《虞美人》(2) → 七律 （清）朱熹（字杏孙）

孤楼倚梦寒灯隔 细雨梧窗逼冷风
珠露扑钗虫络索 玉环圆鬓凤玲珑
肤凝薄粉残妆悄 影对疏栏小院空
芜绿引香浓冉冉 近黄昏月映帘红

空间反演（倒过来掉一下句读）

红帘映月昏黄近 冉冉浓香引绿芜
空院小栏疏对影 悄妆残粉薄凝肤
珑玲凤鬓圆环玉 索络虫钗扑露珠
风冷逼窗梧雨细 隔灯寒梦倚楼孤

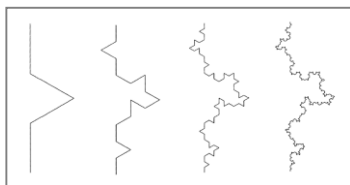
28

5. 标度变换

即放大或缩小后呈现的自相似性，或局部与整体的相似性。

在标度变换中形成的自相似性现象（分形）示例。

随机科赫曲线（海岸线的模拟）



鹦鹉螺
(天然对数螺线)



29

康托集合

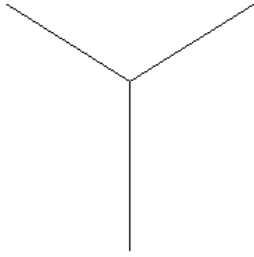


谢尔宾斯基
基线垫



分形就是这些有趣的东西，它的每一个小小的组成部分，都和整体一样，只是进行了一定的缩小。在上面的图中，某个部分和整个图长得很像。这种特性也叫做“自相似”，正是因为这个特性，分形才非常有用，自然界中许多东西都具有这种特性。

30



开始时，首先画一个大写字母“Y”，接着在“Y”的两个分岔上再分别画上两个“Y”，大小大约是原来的一半。紧接着，再在每个“Y”的分岔上再画上更小的“Y”。再接下来就按照上面的方法，不停地添加越来越小的“Y”，直到整个图形看上去象一棵树。

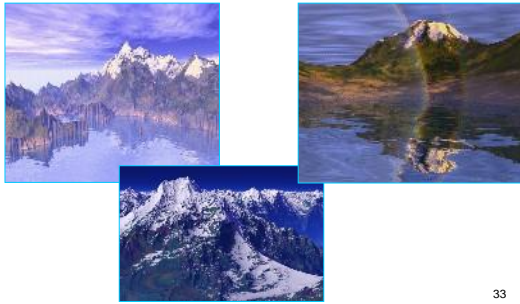
31



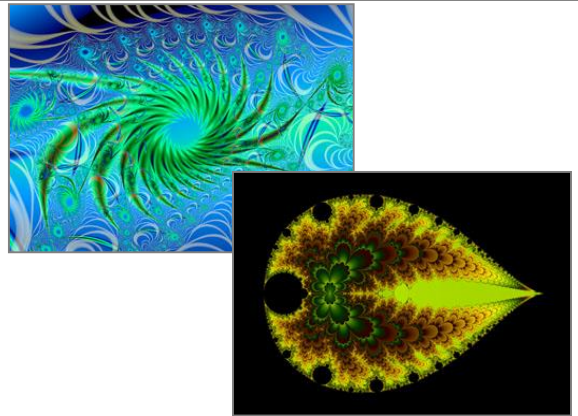
植物中整体与局部的相似性

32

分形用于自然景物制图时非常有用。在自然界中，从小溪的流水，到袅袅的炊烟，还有连绵的山脉，很多景物如果用通常的方法，都很难做出优美逼真的图画来。但是，如果使用分形技术，则一切都变得非常容易。下面的三幅图是外国科学家作品：



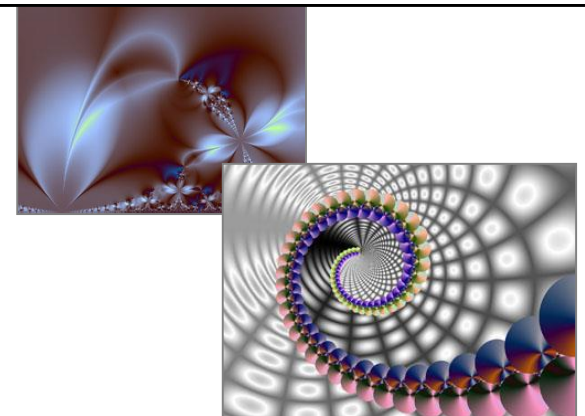
33



34



35



36

6. 时间平移

如果一个物体, 在时间上平移某一时间间隔后, 和原来的完全相同, 则称该物体具有时间平移不变性, 或时间平移对称性。

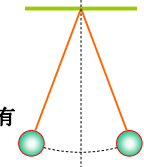
静止不变的体系: 对任意 Δt 都具有时间平移不变性

周期性变化的体系: 如右图中的单摆

7. 时间反演

时间反演就是把 t 变成 $-t$ 的变换。

具有时间反演不变性的现象, 称为具有时间反演对称性。



单摆对周期 T 的整数倍的时间间隔平移具有时间平移不变性

37

现实中, 时间不会倒流! 但是, 具有时间反演不变性的体系是存在的! 比如, 无阻尼的弹簧振子。



在时间反演操作下, 不同的物理量表现出不同的性质

速度不具有时间反演不变性而加速度则具有时间反演不变性, 因而牛顿第二定律具有时间反演不变性。

	自由落体	竖直上抛
速度	↓	↑
加速度	↓	↓

38

时间平移: $t \rightarrow t + t_0$ 的变换。

- ▲ 静止物体对时间平移具有对称性;
- ▲ 匀速运动物体的速度对时间平移具有对称性;
- ▲ 周期系统对时间平移整数周期具有对称性。

时间反演: $t \rightarrow -t$ 的变换 (时间倒流)

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \xrightarrow{t \rightarrow -t} -\vec{v}$$

\vec{v} | $-\vec{v}$
↑ | ↓
 \vec{g} | \vec{g}
上抛 | 下落

$$\vec{a} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \xrightarrow{t \rightarrow -t} \vec{a}$$

39

▲ 力对时间反演变换有两种情况:

保守力只与物体相对位置有关, 故对时间反演不变。

耗散力与速度方向有关, 故对时间反演变化。

- ▲ 牛顿第二定律对保守系统时间反演不变, 对非保守系统则不具有时间反演不变性。
- ▲ 统计规律 (如扩散) 没有对时间反演的不变性。研究系统时间反演的性质要区分宏观和微观。

40

武打片

动作的真实性



紧身衣

真实

大袍

不真实

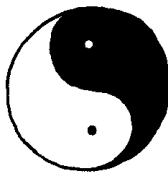


41

8. 联合操作与对称性

有的系统对某种操作可能不具有对称性, 但对几种操作的联合却可能具有对称性。

例如:



阴阳鱼

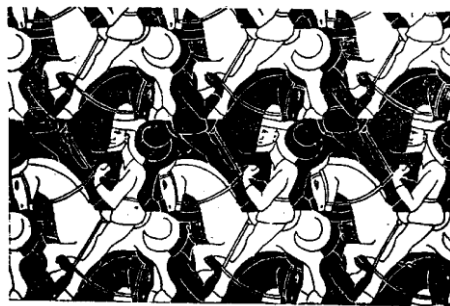
对绕中心转 180° 和黑白置换的联合操作具有对称性。



42



阴阳鱼也称作太极图



Escher 的骑士图案

对镜像反射加上黑白置换也许还要加上必要的平移操作才构成对称操作。

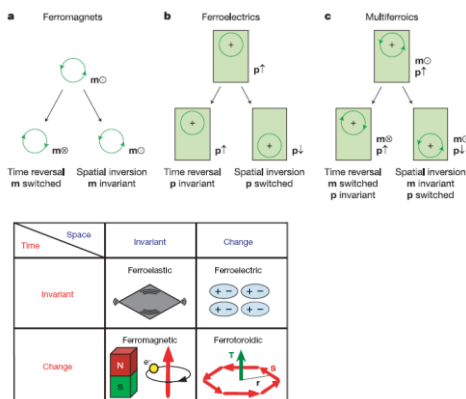


Figure 2 | All forms of ferroic order under the parity operations of space and time. For the toroidal moment, spins replace the current loops of Fig. 1.

Nature 449 (2007) 702

伽里略变换是一种时空联合操作，牛顿定律对此联合操作是不变的。

同样，洛伦兹变换也是一种时空联合操作，但牛顿定律对此联合操作就不是不变的了。

物理学中除上述的时间、空间操作外，还涉及到一些其它的操作，例如：电荷共轭变换（粒子与反粒子间的变换），规范变换，全同粒子置换等等。它们也和系统的某些对称性相联系。

2 物理定律的对称性

物理定律的**对称性**是指：经过一定的对称操作后，物理定律的形式保持不变。

存在一种对称性就必定存在一条相应的物理守恒定律，若存在一条物理守恒定律就必定能找到一种对称性与之对应。

2.1 时间均匀性和能量守恒定律

当把研究物体运动的时间起点进行平移时，物理规律（运动方程）的具体形式不会改变。即物理规律对于时间平移变换具有不变性。

几百年前星体间的万有引力和今天的万有引力不一样么？

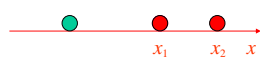


时间均匀性和力学体系的能量守恒定律的联系

时间均匀性

两个粒子组成的体系，只有保守力作用

对于同样的相对位置，体系相互作用势能不随时间变化



$$E_p = E_p(x) \text{ (不是 } t \text{ 的函数)}$$

$$F = -\frac{dE_p}{dx} \text{ 保守力与势能间的关系}$$

相互作用力所做的功：

$$\begin{aligned} A_{12} &= \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx = - \int_{x_1}^{x_2} \frac{dE_p}{dx} dx \\ &= - \int_{E_{p1}}^{E_{p2}} dE_p = E_{p1} - E_{p2} \end{aligned}$$

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2} = \text{const}$$

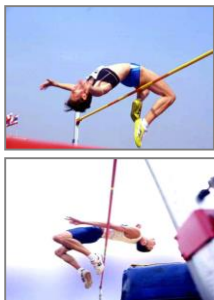
系统机械能守恒

由动能定理 $A_{12} = E_{k2} - E_{k1}$

2.2 空间均匀性和动量守恒定律

空间均匀性意味着：当用坐标和运动方程表示物体运动时，移动坐标原点，物理规律（运动方程）的形式不会改变。即物理规律对于坐标平移变换具有不变性。

在世界不同地方进行的体育运动所遵循的物理规律不一样么？

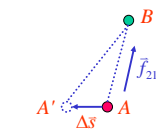


空间均匀性和力学体系的动量守恒定律的联系

考虑两个粒子A,B组成的系统，相互作用势能为U。

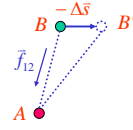
用 \vec{f}_{12} 表示A对B的作用力，用 \vec{f}_{21} 表示B对A的作用力。49

B不动，移动A



\vec{f}_{21} 做的功 $\Delta U = \vec{f}_{21} \cdot \Delta \vec{s}$

A不动，移动B



\vec{f}_{12} 做的功 $\Delta U' = \vec{f}_{12} \cdot (-\Delta \vec{s}) = -\vec{f}_{12} \cdot \Delta \vec{s}$

两粒子间相互作用势能，仅与相对位置有关

$$U + \Delta U = U + \Delta U' \Rightarrow \Delta U = \Delta U' \Rightarrow \vec{f}_{21} = -\vec{f}_{12}$$

$$\vec{f}_{12} + \vec{f}_{21} = \frac{d\vec{p}_2}{dt} + \frac{d\vec{p}_1}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{p}_2 + \vec{p}_1) = 0$$

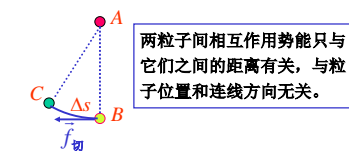
$$\vec{p}_2 + \vec{p}_1 = \text{const} \quad \text{动量守恒}$$

50

2.3 空间各向同性和角动量守恒定律

在平直空间中任何方向上发生的物理现象都服从相同的客观规律，即物理规律对于空间旋转变换具有不变性。

假定有切向力 $dE_p = -f_{\text{切}} ds$



$$dE_p = 0 \Rightarrow f_{\text{切}} = 0$$

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{f}_{\text{切}} = 0 \Rightarrow \text{角动量守恒}$$



沿不同方向投掷标枪所遵循的物理规律不一样么？



51

随着物理学的发展，人们认识的对称性和守恒量也越来越多。除能量、动量和角动量外还有电荷、轻子数、重子数、宇称等守恒量。

对称性原理是超越物理各个领域的普遍法则，在未涉及一些具体定律之前，我们往往可能根据对称性原理作出一些判断，得出某些有用的信息。这些法则不但不会与已知领域中的具体定律相悖，而且还能指导我们去探索未知的领域。

52

3 宇称守恒与不守恒

3.1 宇称与宇称守恒定律

宇称的概念

是用来描述物体的运动状态和它在镜子里的像的运动状态是否相同的一个物理量。宇称就是与空间反演操作相对应的守恒量。

P: 空间反演

$$P^2 = 1$$

$$P = \begin{cases} 1 & \text{偶宇称} \\ -1 & \text{奇宇称} \end{cases}$$

宇称具有可乘性而非可加性

镜面



偶宇称
 $P = +1$

完全重合



奇宇称
 $P = -1$

53

举例：

在量子力学中用波函数描述粒子的运动。如果某粒子的运动状态用 $\psi(x) = \cos x$ 来描述，进行一次空间反演，即 $P \cos x = \cos(-x) = \cos x$ 也就是处于**正宇称**的状态，宇称值为+1。

如果某粒子的运动状态用 $\psi(x) = \sin x$ 来描述，进行一次空间反演，即 $P \sin x = \sin(-x) = -\sin x$ ，也就是处于**负宇称**的状态，宇称值为-1。

宇称守恒定律：

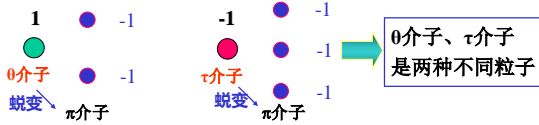
在没有外界影响的条件下，量子体系的内部无论其运动如何复杂，无论发生如何剧烈的变化，其宇称不变。在很长一段时间内，宇称守恒被作为自然界的普遍规律为人们所接受。

54

3.2 宇称不守恒的发现

20世纪中期，发现弱相互作用中宇称不守恒。

1954~1956： θ - τ 疑难



实验结果：

质量、寿命及其他性质都相同

杨振宁和李政道从理论分析预言

吴健雄等人的实验验证

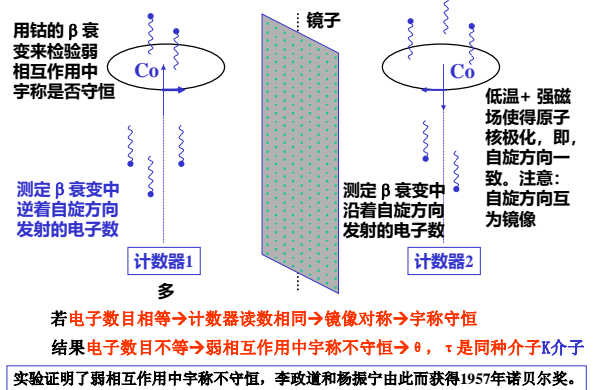
θ 介子、 τ 介子是两种不同粒子

θ 介子、 τ 介子是同一种粒子
弱相互作用中宇称不守恒

55

检验弱相互作用中宇称不守恒的实验

用钴的 β 衰变来检验弱相互作用中宇称是否守恒



若电子数目相等 \rightarrow 计数器读数相同 \rightarrow 镜像对称 \rightarrow 宇称守恒

结果电子数目不等 \rightarrow 弱相互作用中宇称不守恒 $\rightarrow \theta, \tau$ 是同种粒子 K 介子

实验证明了弱相互作用中宇称不守恒，李政道和杨振宁由此而获得1957年诺贝尔奖。

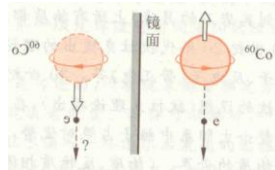
56

▲ 镜像反射对称性与宇称守恒定律



图 C.12 偶宇称

宇称值=1



弱相互作用中宇称不守恒

李正道

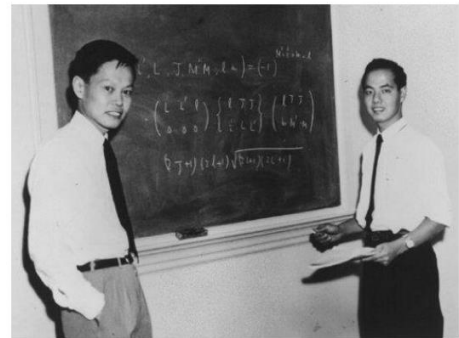
杨振宁

1957年诺贝尔奖



吴建雄

57



58

弱相互作用中宇称不守恒的意义

宇称守恒定律是空间左右对称的必然结果

弱相互作用中宇称不守恒

空间的左右并非完全对称

推翻了一个定律和发现一个定律同等重要

需要更加深入地认识时间、空间的基本性质。

3.3 不完整的对称性

现实世界中，并不是所有的事物都具有非常完美的对称性。

所有的物理定律都是对称的吗？弱相互作用中宇称不守恒。

行星轨道是完美的圆形吗？行星轨道是椭圆的，不是完美的圆形，只是接近圆形。

人体是左右对称的吗？心脏通常靠近左侧。

对称性能够稳定存在吗？自然界存在对称性破缺的现象。

59

对称性从何而来？为什么自然界近于对称？

传说

没有人能够回答

人类故意在对称的建筑中留下小小的错误
上帝就不会嫉妒人类的完美了……

上帝故意让物理定律只是接近完美
人类就不会嫉妒上帝的完美了……

有对称，就有不对称，
如果把不对称看成是对称的镜像反射，
那么对称性就在更高的层次上保存了下来。

60

对称的结构更适合于 飞翔 奔跑 游泳



61



62



63

对称的结构更利于生存

在自然情况下，雄燕的尾羽长度比雌燕长出大约20%。尾巴最长的雄燕比其他雄燕能吸引更多雌燕。它们的长尾羽也比短尾燕的尾羽更对称。动物学家安德斯·穆勒提出这样的设想：把尾长和对称性分开，看它们是否会独立影响雌性动物的选择。结果证明雌燕同时既在乎大小又在乎对称性：尾巴长但不对称的雄燕，不如尾巴长而对称的雄燕受欢迎。

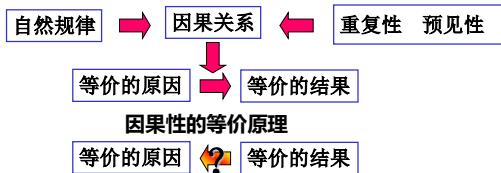
动物学家爱斯坦·马库森和爱沃·弗斯泰德发现处于发情期的驯鹿，个头儿最大的鹿，鹿角也最对称。马库森和弗斯泰德还提出鹿角的情况清楚地告诉我们驯鹿体内寄生虫的情况。鹿角明显不对称说明该动物的免疫系统遭到了破坏。

“优胜劣汰”的自然选择过程，使得对称性固化在基因中，保存了下来。

64

4 对称性原理的意义

4.1 对称性原理



对称性原理：

原因中的对称性必然反映在结果中，即结果中的对称性至少有原因中的对称性那样多；或者反过来应该说：结果中的不对称性必在原因中有反映，即原因中的不对称性至少有结果中的不对称性那样多。——皮埃尔·居里

65

对称性原理是分析物理问题的有力武器！

例1 均匀带电球面电场的分布特征

电荷（原因）—— 球对称性

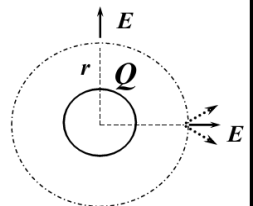
电场（结果）—— 至少具有球对称性，且必沿径向。

用反证法证明：

若不沿径向，设任一方向

绕半径旋转：原因未变，结果变，

违反对称性原理！不可能！

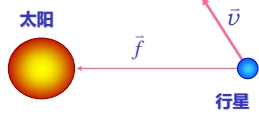


电场分布的定性结论！

66

例2 用对称性原理论证在有心力作用下，行星的轨道一定在一个平面内。

解 原因： \vec{f} 和 \vec{v} 组成的平面（纸面）具有镜像反射对称性
结果：行星的运动轨道，至少也具有这种对称性



香蕉球



不对称的结果产生了
导致对称破缺的力存在

球是旋转（不对称的因素）引起球和空气的相互作用

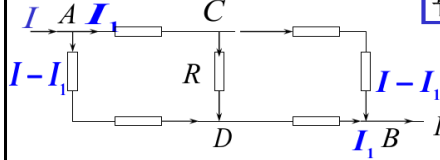
球旋转（不对称因素）
的原因是什么？

67

例3 复联电阻

已知 $R = 1\Omega$ 求: R_{AB}

利用:
置换对称;
节点电流关系



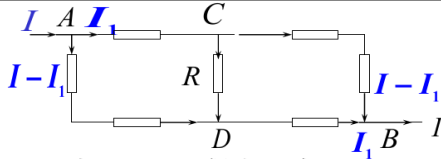
解：节点 B 与 A 有置换对称，设电流如图。

节点电流方程：由流出电流： $I_1, (I-I_1)$

同理 C \rightarrow D 的电流为

$$I_1 - (I - I_1) = 2I_1 - I$$

68



由 ΔU_{AD} 得出下式

$$2R(I - I_1) = RI_1 + R(2I_1 - I) \rightarrow I_1 = \frac{3}{5}I$$

$$R_{AB} = \frac{\Delta U_{AB}}{I} = \frac{I_1 R + (I - I_1) \cdot 2R}{I}$$

$$R_{AB} = \frac{7}{5}R$$

方便！

69

4.2 对称性是基本规律之上更高层次的法则



70

4.3 对称性原理在物理学的发展中起着重要的指导作用

奥斯特：电流的磁效应

法拉第：变化的磁场产生电场

爱因斯坦：光的粒子性

德布罗意：粒子的波动性

4.4 20世纪扩大了对称性的作用

1. 量子力学

在量子力学建立之后，对称性的作用越来越广泛。例如在量子力学中，动力学系统的态是用指明态的对称性质的量子数标记的，随后还出现了选择定则，它支配着在各态之间跃迁时量子数的变化。

71

2. 原子物理

在开始发展量子力学的1925年之后，对称才开始渗入原子物理学的语言中。后来，随着对核现象和基本粒子现象研究的深入，对称也逐渐渗入了这些新领域的语言中。

3. 元素周期表

周期表的发现是人们对对称性深刻认识的另一个例证。周期2、8、18等数字最初都是凭经验发现的，直到量子力学建立后人们才逐渐明白这些数可以从库仑力的转动对称中直接得出。

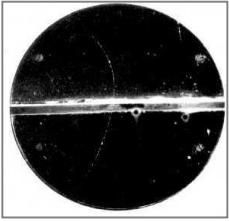
72

元素周期表																	
H																	He
Li	Be	固体					人造元素					B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	气体					液体					Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Unq	Unp	Unh	Uns	Uno	Unu	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo		
镧系元素		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
锕系元素		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	
名称:		序号:		重量:		排列:		轨道:		熔点:		沸点:					

元素周期表

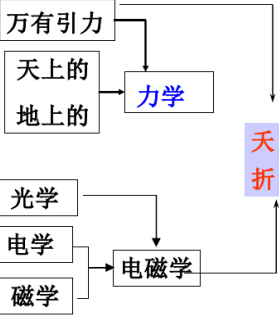
4. 反粒子的预言和发现

对称的概念具有深远意义的另一个例子是狄拉克关于存在着反粒子的大胆的具有独创性的预言。1931年，狄拉克根据数学方程式的对称性作出了存在反电子的预言，结果在1932年的实验中所拍摄的宇宙射线的照片证实了反电子的存在。

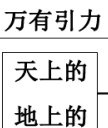


安德森拍到的第一张正电子轨迹照片,正电子从上往下运动。

对称性（不变性）——规律的普适性、统一性 物理学的各个分支逐渐走向统一



20世纪初，爱因斯坦统一万有引力和电磁学的尝试，因当时尚未认识强作用和弱作用。



20世纪向大统一的行进

超弦是最后的吗？

参考书目

- ▲新概念物理教程《力学》赵凯华、罗蔚茵
- ▲定性与半定量物理学 赵凯华，高教出版社
- ▲《基础物理学》上卷 陆果
- ▲《对称》H. Weyl 商务印书馆 1986
- ▲《大学物理学》(力学 热学) 张三慧 主编
- ▲“Lecture on Physics” R.Feynman. Vol.1