

对称与高能物理发展

叶依林 *

2021 年 1 月 5 日更新

摘要

本文参考徐一鸿《可畏的对称：探寻现代物理学的美丽》，整理粒子物理相关内容。

目录

1	对称性与设计	1
2	爱因斯坦的遗产	1
3	来到聚光灯下	2
4	了解他的思想	3
5	跋	7
6	第九章附录	7
7	跋的附录	7

*冬十五，一日速览，夜归月圆。此指粒场，缓增对称，间戏杂谑。翌晚，写湖大，以飨后来。

1 对称性与设计

美的寻求；对称性与单纯；镜子另一端的世界

旋转对称性指：若转动视点，物理定律保持不变；即其并不偏重空间特定方向。如对行星轨道，旋转对称不仅有圆轨道，还是椭圆轨道。我们永远对物理定律对称性感兴趣，而不是具体事物的对称性。

粗略讲，一个质子和另一个质子相互作用之前，它必须先要变成中子；这个变化是由所谓弱相互作用造成的。弱作用造成的过程进行缓慢。1956 年，奇异粒子的衰变确定为由弱力决定；弱力也决定某些放射性原子核衰变。

支持宇称守恒的实验证据或涉及电磁力过程，例如原子发光；或来自强力过程，例如两个原子核的散射。电子射出时能量不总相同：一次衰变中射出的电子可能较慢，另一次衰变中要快。Pauli 建议，一个未知的粒子，既没有强相互作用，也没有电磁相互作用，因此能逃脱检测，带走部分能量；即“中微子”，也是第一个在实验发现前就已被预言存在的粒子。另外，Pauli 还推断中微子没有质量。实验证明，中微子永远左旋。

中微子就是造成宇称破坏的“嫌疑犯”。定义自旋方向和运动方向相同或相反，分别为左手征和右手征。螺旋度 (helicity) 和手征 (chirality)，手征仅对于无质量粒子才能定义为粒子的内禀性质；否则观测者超过粒子运动速度将会得到相反的结果。

Dirac 因预言反粒子存在而震惊了物理界。1956 年，反粒子得到确认，如反电子（即正电子，因电子本身带负电）、反质子。带正电的 π 介子有时会衰变为一个正电子和一个中微子，它的反粒子，带负电的 π 介子衰变为一个电子和一个难以捕捉到的粒子（反中微子）。

K 介子在多数情况下衰变为两个 π 介子，如 CP 守恒所预言。然而，在几千个事例中有一个 K 介子衰变为三个 π 介子！另外，B 介子衰变过程中也会观察到 CP 破坏。

2 爱因斯坦的遗产

时间与空间联姻；一个快乐的思想；对称性指挥设计

法拉第假定电荷在其周围空间产生电场。当另一电荷被引入此空间时，场作用于电荷，对它施库仑力。电场被当作一个独立的实体：由电荷所产生的电场总是存在，不论是否有另一个电荷被引入以感受其的效应。两个电荷并不直接作用于彼此，它们都产生自己的电场，而

电场作用于另一个电荷。

Dirac 在 1929 年预言反物质, 坚持所有的物理应保持 Lorentz 不变。他着手将 Schrödinger 方程改造为 Lorentz 不变, 却惊讶发现 Dirac 方程的解多了一倍。他理解到多余的解描述一种和电子性质相反的粒子; 即正电子。

Einstein 等价原理: 在空间的一个足够小的区域, 一个观察者感知的引力场的物理效应和另一个在没有引力场的地方以匀加速运动的观察者所感知的物理效应相同。

Lorentz 不变性和广义协变性差别微妙。前者主张作相对匀速运动的两个观测者感知相同的物理现实; 这对称和旋转不变性一样。后者不作“一个加速的观测者也看到同样物理现实”这样的显然荒谬的陈述; 它说这个观测者能用引力场存在来诠释它看到的物理现实与非加速的观测者所看到的物理现实的区别。

光子虽无质量, 但等价原理决定了引力一定影响光的传播, 即影响了空间结构。

牛顿假定星体能变得足够硬来抵抗坍缩, 但有硬度便有能量, 和质量等价的能量回产生附加的引力场, 反而会促进坍缩; 即原理上无法阻止黑洞产生。

均匀充满物质的宇宙必定膨胀或收缩!

电磁学发展由事实, 到唯象理论方程, 最后对称性。20 世纪反之, 由对称性, 到引力理论, 最后预测并验证时空弯曲等事实。

3 来到聚光灯下

作用量无处不在; 女士与虎; 学习去读这本伟大的书; 对称性的凯旋之歌;

$F = ma$ 确定粒子在未来的位置和速度, 称“微分表述”, 描述这种变化的方程称为“运动方程”。与此不同, 作用量表述总体考虑粒子所走的路径, 粒子为何选择某一路径而非其他。

$$S = \int d \times \sqrt{g} \left[\frac{1}{G} R + \frac{1}{g^2} F^2 + \bar{\psi} \not{D} \psi + (D\phi)^2 + V(\phi) + \bar{\psi} \phi \psi \right]$$

第一项 R/G 代表引力, 第二项代表其他三种相互作用。

区别连续对称 (转动) 和分立对称 (宇称), 作用量的每一个连续对称中会产生一个守恒量! 对 $SO(3)$ 群, 可用 xyz 三个单位向量表示转动操作, 也称“基础表示”。把两个三维表示粘起来得到的九维表示分裂为一个一维表示、一个三维表示、一个五维表示。如, $SO(3)$ 有三维和五维表示, 但是没有四维表示; 只有群论可以解释为什么此整数而非彼出现!

$$3 \otimes 3 = 1 \oplus 3 \oplus 5$$

$$3 \otimes 5 = 3 \oplus 5 \oplus 7$$

$$5 \otimes 5 = 1 \oplus 3 \oplus 5 \oplus 7 \oplus 9$$

$$10 \otimes 10 = 1 \oplus 45 \oplus 54$$

1. 对称变换的惩罚不是物理学家即兴发明，而是对称操作本身属性；
2. 群乘法结构可以用一定数目客体变换表示，涉及的客体数目称为表示的“维数”；
3. 可能表示的数目固定，由群的结构决定；
4. 我们可以把两个表示粘起来得到其他表示；

量子定律本身并不成为一个理论，而是在量子领域内得到一个理论的处方。用于牛顿力学理论就得到量子力学；用于 Maxwell 电磁学理论就得到 QED；用于 Einstein 引力理论就得到量子引力。QED 作用量依然是 Maxwell 作用量，连同其全部对称性。基本对称性只允许某些跃迁发生，破坏特定对称性的过程被禁止，即破坏有关守恒定律。

4 了解他的思想

夜间森林中的八重路；艺术的复仇；最终设计问题；力的统一；傲气抬头；造物主的思想

1930 年，德国物理学家 W. Bothe 和 H. Becker 发现，当某些物质暴露在放射源前时，会发出一种神秘射线。实验证明这种射线由“中子”组成。中子 (939.5MeV) 和质子 (938.2MeV) 质量几乎相同，却电中性。(neutron)

原子核由一定数量的质子和中子构成，除氢外，没有中子的原子核不可能稳定。质子和中子统称核子，造成核子间吸引力的新相互作用称为“强相互作用”，其比电磁相互作用强约一百倍。电磁力虽然弱，但是有较长的作用范围；核子间的强相互作用随距离减小如此迅速，只有二者挨在一起时才会互相吸引。强作用短程，电磁作用长程。

弱作用力程比强相互作用短一千倍，不在宏观显示。Heisenberg 猜想，忽略较弱的作用，则中子和质子质量就会完全相等；微小的质子-中子质量差的根源在电磁力。他假设，质子可以“转动”到中子，而强相互作用对这种转动不变。（实际上来源于上下夸克质量差）Heisenberg 的对称被称为“同位旋”，相应的群为 SU(2)。

同位旋：反映自旋和宇称相同、质量相近而电荷数不同的几种粒子归属性质的量子数。例如，中子和质子的同位旋相同，但是同位旋的第三分量 I_3 不同，分别为 $-1/2$ 和 $+1/2$ ，且呈现对称。同位旋拥有三个分量，在强相互作用中，同位旋守恒；在弱相互作用中，同位旋不守恒。强子的同位旋反映了组成强子的上夸克和下夸克之间的对称性。强相互作用粒子携带同位旋就像电磁作用的粒子携带电荷一样，不保持同位旋守恒的强相互作用禁阻，其他允许过程的相对几率由群论决定。

两电子彼此散射，相互作用几率约 $1/137$ 。实验定出该数字代表电磁作用的强度，称为“电磁耦合常数”。两个电子能作用两次的概率是 $(1/137) \times (1/137)$ ，故可基本忽略两次作用的效应。四种基本相互作用中三种弱耦合，可以用微扰论处理。

但在强作用中，耦合常数基本是 1 ！因此在散射两个核子时，两次、三次作用直至无穷，和一次作用同样可能发生；微扰论根本失效！核物理学家最终放弃了，选择了一种准唯象的方法，把实验确定的两个核子之间的力直接给定，然后尝试计算核的性质。

多数粒子参加不止一种相互作用，例如质子参与所有四种基本相互作用。研究弱作用可凭对称性将强作用忽略。

由场的概念，力的根源在于一个粒子的量子交换。对电磁场这就是光子（无质量），对引力场这就是引力子（未探测到，也应无质量）。1934 年，汤川认为强作用对应 π 介子。考虑 $E = mc^2$ ，发射出的粒子本身带有能量，但质子仍总是质子？不确定原理允许能量不守恒，但只在短暂时间。 π 介子带走的能量越大，其寿命越短；核力的力程决定于 π 介子的质量，约为核子的 $1/10$ 。

奇异粒子在核子高能碰撞时产生。实验证明这类粒子总成对产生。如，产生一个称为 K^0 的奇异粒子，总伴随 Σ^+ 。核子碰撞永远不会只产生 K^0 或者两个 K^0 ，而总是 K^0 和 Σ^+ 。质子、中子和 π 子无奇异性，新发现的粒子被赋予不同的奇异性 $+1, -1$ ，等等。 K^0 奇异性 $+1$ ；因核子奇异性为零，不能产生单个或两个 K^0 。奇异性守恒意味着在同位旋守恒之外还有另一个对称性。

有强作用的粒子称强子 hadrons，核子、 π 子、奇异粒子都是强子。无强作用的粒子称轻子 leptons，电子、中微子。 π 子质量介于核子和电子之间，和 π 子性质相似的新粒子称介子 mesons。核子和它性质相似的新粒子称重子 baryons，重子分核子和超子，超子有 Σ^+ 和 Ξ 。

π^+ 和 π^- 质量 140MeV ， π^0 质量 135MeV ，组成三重态。质子和中子组成二重态，所有强子都组成同位旋的多重态。核子奇异性为 0 ， Σ 和 Λ 为 -1 ， Ξ 为 -2 。

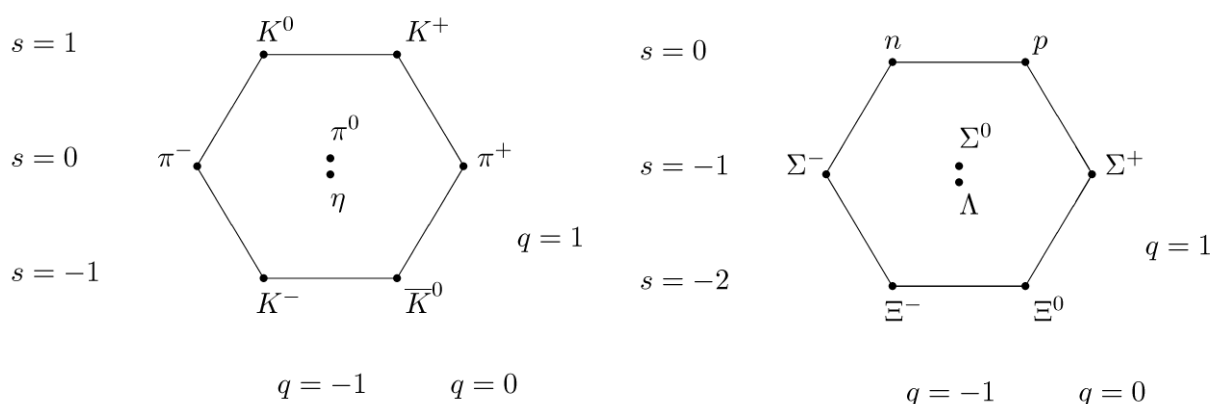


图 1: 介子和强子的八重态

对八重态需要寻找八维表示的群。重子不属于三维的定义表示，而是 $SU(3)$ 的八维表示。 $8 \rightarrow 3 + 2 + 2 + 1$ ，一个三重态、两个二重态、和一个单态。

从 20 世纪 50 年代早期，物理学家就开始发现极为短寿命的粒子，称为“共振态”。一行中的共振态是由同位旋相联系的，各行之间是由八重路相联系。 $SU(3)$ 也有十维表示！

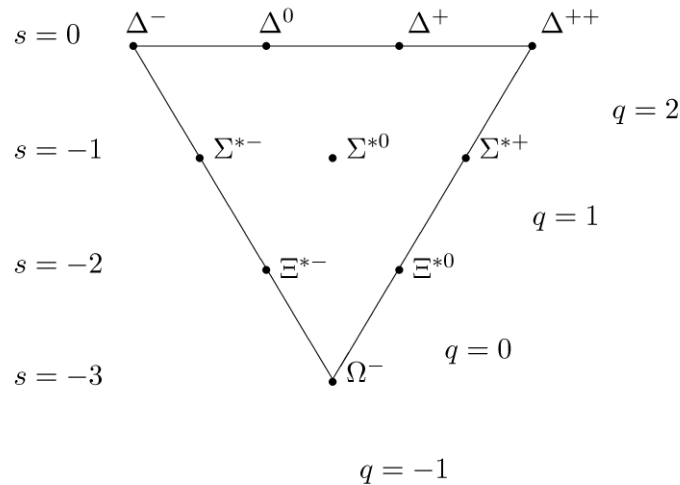


图 2: 根据其同位旋和奇异性，10 个共振态组成一个称为“十重态”的几何图形

考虑无相互作用的粒子，不注意其他粒子存在，描述这种情况的理论称为“自由理论”。盖尔曼认为，恢复相互作用之后，某些对称性可能仍然成立：强作用的正确理论必定和自由理论的对称性相同。

为何不用 $SU(3)$ 三重态，即定义表示？相应的三个基本粒子确实存在，即**夸克**！（上夸克 upside、下夸克 down、奇夸克 strange），三个夸克放在一起，把三个定义表示粘在一起就产生一个一维表示、两个八维表示和一个十维表示，这就指明了八个重子和十个共振态可以由三个夸克构成。

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10$$

类似，介子由一个夸克和一个反夸克构成；如 π^+ 由一个上夸克和一个反下夸克构成。

夸克永久囚禁：两个夸克之间“绳索”就算断开，也会因其积累的能量在两端产生一个夸克和一个反夸克。因此无法得到单独的夸克，只能得到介子。产生一个有质量的粒子，必须提供等于粒子质量的能量。因此产生一个无质量粒子比产生有质量粒子容易得多；光子就很容易产生。（但世界并非充满无质量的规范 Bosons）

一个设计从一点到另一点变化的变换称为定域的。另一种涉及从一点到另一点不变的对称性称为整体的。对一个整体变换，为了使物理现实不变，宇宙中的每一个人都要做完全一样的变换。Yang-Mills 理论，即非 Abel 理论，考虑定域精确对称性。由规范对称，自然得到 Maxwell 方程组。

考虑两电子相撞，重复多次实验来决定这两个电子相互作用的概率；这概率基本上就决定了耦合常数，其与相撞的两个电子的能量有关：耦合强度随着能量尺度变化。强作用耦合太强，无法做任何有意义计算。假定在某个能量尺度，强耦合弱了（微扰插手），且能量增加进一步变弱。零耦合理论称“自由”——粒子可以自由运动，和其他粒子无关。在能量越来越高时，耦合运动趋向零的理论现在称“渐进自由”理论；Yang-Mills 理论正是如此！

正负电子湮灭为强作用粒子的几率随碰撞电子和正电子的能量增高而按一定方式减小。

中性 π 子的衰变振幅和实验值相差一个因子 3。如果有三倍量的夸克数目存在，差别便得到解释——即每种夸克都有三种颜色。上下奇为“味”，红黄蓝为“色”；夸克的质量和色无关，和味有关。Yang-Mills 对称变色不变味。三种色彼此变换，有关群恰是 SU(3)。

8 种规范 Bosons 为“胶子”，夸克之间的力由交换胶子实现。强相互作用理论现称 QCD。当两个夸克彼此远离，耦合强度开始增加；夸克被囚禁了，胶子也如此。胶子把夸克粘成核子、 π 子和其他强子，由交换 π 子形成的核子间的力仅是一个更深入的唯象体现。

一个可把所有振幅加起来的量子场论称为 normalizable，作用量只有三四种可能形式。

自发对称性破缺：在中心对称酒杯中放入石头，总会得到不对称结构。称在平静中不为零的场为 Higgs 场，相当于选定了一个方向。弱作用的媒介粒子称为“中间矢量 Bosons”，用 W 表示，其质量比 π 子要大几百倍。W 和光子自旋相同，说明弱、电以某种方式联系。

群的选择决定规范 Bosons 的数目和性质，如 SU(2)×U(1)。其名下还有另一个规范 Bosons，用 Z 表示。当中微子发射或吸收 Z 时，它仍保持为中微子。Z 像光子：一个粒子在发射或吸收光子时保持不变，但发射吸收 Z 宇称破缺。

在自发破缺的规范理论中，一些规范 Bosons 有了质量 (W、Z)，另一些保持无质量 (光子)！W、Z、光子作为 Yang-Mills 规范 Bosons 实际上相互联系，并在对称群下相互转变。

大统一的理念是把光子、W、Z 和八个胶子带到一起，作为一个单一的 Yang-Mills 理论的规范 Bosons。W、Z、光子是群 SU(2)×U(1) 理论的规范 Bosons，胶子是群 SU(3) 理论的规范 Bosons；因此我们需要一个把五个物体彼此变换的群，如 SU(5)。

在大统一尺度时，对称性自发破缺到色 SU(3) 和 SU(2)×U(1)，此时大约为 10^{15} 倍核子质量，胶子、W、Z、光子保持无质量。能量尺度下降到几百倍核子质量时达到电弱尺度，SU(2)×U(1) 自发破缺，W、Z 有了质量。在所有的 SU(5) 规范 Bosons 中，只有光子和 8 个胶子在低能时以无能量的激发出现。（胶子在红外囚禁中，只有光子到处漫游）

质子能衰变为一个正电子和一个 π 子，但质子的寿命约为 10^{30} 年。（宇宙寿命只是其 1/300）产生质子要靠 X、Y 两个 Bosons，这就是使质子衰变的 Bosons；二者质量非常大， 10^{15} 倍核子质量，故质子衰变很慢。

电子、 μ 子、 τ 子。 μ 子质量为电子 200 倍，可通过弱作用衰变为电子，被 W 作用时也变为中微子。不重复，但押韵。夸克 6 种，上下奇粲顶底。

时空五维？Theodor Kaluza 和 Oscar Klein 假定，我们所在三维空间中的每个点如果仔细观察，实际上都是圆。若圆的半径比我们能够测量的距离小很多，我们便会错误认为我们生活在三维空间而非四维。描述五维时空物理的作用量在四维时空近似时分裂为两块，即引力和电磁力。Kaluza-Klein 理论最令人吃惊的特点，即引力诞生电磁，现在已经被理解为定域对称的结果；然而强弱相互作用，两种看起来和定域对称性没有关系的相互作用将该理论丢去垃圾桶。若将五维时空变为六维，即每个三维空间点实际上是二维球面，如此正好产生了 Yang-Mills 作用量！虽然如此，Kaluza-Klein 理论还远未成立。。。

沟通 fermions 和 bosons？弦理论认为：基本粒子用一小段振动的弦表示，若其比探测仪器的分辨能力还小，看起来就和点粒子一样。弦以不同方式振动，看起来就是不同的粒子。

5 跋

一维弦，二维膜。弦理论，膜理论；p 膜理论。超弦理论的数学一致性需要 p 膜存在。假定开始构造一个只包括弦的理论，最后会发现，想要理论的各个片段能在数学上结合到一起，必须把 p 膜包括进来。

人们发现不是一个超弦理论，而是有着五个不同的超弦理论！五个不同的理论是一个单一的神秘理论不同方面，Edward Witten 搞 M 理论，membrane、mystery、magic、mother，宗教圣战。。。

6 第九章附录

若世界真基于 SO(10) 规范理论描述，应有 45 个规范 bosons，54 个 fermions，还有一个偶组合变换为其本身。

$$10 \otimes 10 = 1 \oplus 45 \oplus 54$$

7 跋的附录

若一个理论包含具有和引力子性质全同的粒子，这理论就包含 Einstein 理论；如弦理论总可通过振动实现引力子。

Kaluza-Klein 理论计算出电子的质量竟为 Planck 质量， 10^{19}GeV ，实际只有半个 MeV。内空间越小，粒子（如电子）的质量就越大。

$$\overline{ABiliCD}$$