

物理学中的宇称守恒定律和其它对称定律*

楊振寧

我感到很荣幸能够有这样一个机会同諸位在一起來討論宇称守恒和其它对称定律的問題。我首先要談的是对称定律在物理学中的作用的一般方面，其次要談的是引致宇称守恒被推翻的發展过程，最后討論一下其它的对称定律。这些定律是物理学家通过实验所知道的，不过还没有总合起来形成一个完整的、在概念上是简单的形式。在宇称守恒被推翻以来的有趣而且非常使人兴奋的發展，将包括在李政道博士的講演中^[1]。

对称定律的存在是与我們的日常經驗完全符合的。这些对称中的最简单的空間均匀性和空間各向同性是很早的人类思維历史中就有了的概念。物理定律在匀速的座标变换下的不变性，也就是在伽利略变换下的不变性，这是比較不那么自然的一种对称性，但它很早就为人类所認識了，并且形成了牛頓力学的基石之一。过去几世紀来，物理学家对于这些对称原理的結果曾經大量引用，并且得出了許多重要結果。在这方面很好的一个例子，就是关于在各向同性的固体中只有两个弹性系数的定理。

对称定律另外一种类型的結果是与守恒律有关的。一般來講，一个对称原理（或者不变性原理）产生一个守恒律，这在現在已經成为常識了。例如，物理定律在空間移动下不变的结果就有动量守恒，在空間轉动下不变的结果就有角动量守恒。虽然这些守恒律的重要性过去是完全清楚的，但是它們与对称律的关系看来却一直到了二十世紀初都还没有清楚地被認識出来^[2]。（比較圖1）

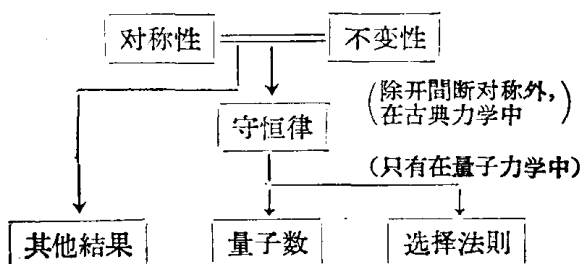


圖 1

随着特殊和广义相对論的發展，对称定律获得了新的重要性：它們与物理学中的力学定律之間的联系比起古典力学來有更多的完整的內在关系，而在古典力学中对称定律只是偶然具有对称性的力学定律在邏輯上的推断。并且在相对論理論中对称定律的領域大大地丰富了，其中包括了从日常經驗来看并不是很明显的一些不变性。它們的有效性更恰切地說是推导出来的或是由以后的复杂实验所証实的。讓我強調一下，这些从复杂的实验中所引出的对称性在概念上的简单以及其中的內在美，对于物理学家來說是受到鼓舞的源泉。这使人知道可以希望自然具有着一定的，為我們所渴望理解的秩序。

然而对称原理的应用一直到量子力学發展以后才开始深入到物理学基本語言中來。表示着系統的态的量子数往往和那些对于系統对称性的表示是等同的。的确，对称原理在量子力学中的作用是再強調也不会过分的。举两个例子：周期表的结构本質上就是庫倫定律的各向同性的直接推断。反粒子的存在——例如，正电子、反質子、反中子的存在，是在理論上从物理定律对于罗倫茨变换的不变性的結果所預言过的。在两种情形中自然都似乎利用了对称定律的简单数学表示。當我們默默考虑一下这中間所包含的数学推理的优美性和它的美丽的完整性，并以此对比它的复杂的、深入的物理結果，我們就不能不深深感到对对称定律的力量的欽佩。

对称原理中的一个左右对称的原理是与我們人类文明同样古老的一个原理。自然究竟是否表现出这样的一个对称性的問題，是过去哲学家长期爭論着的一个問題^[3]。当然，在日常生活中，左和右是完全相互区分的。例如我們的心脏总是在左边。然而，物理学定律經常表示出左右間的完全对称性。日常生活中的非对称可以归因于环境的，或者是有机生命的初始条件的偶然非对称性。要說明这点，我們指出：如果存在一种鏡像人，他的心脏在右边，他的內脏与我們的反一个面，并且他身体中的分子，例如糖分子，确

* 作者在接受諾貝尔奖金时的講演。

实是我们的身体分子的鏡像，而且假定他吃我們所吃的食物的鏡像，那么根据物理学定律，他必定同我們一样。

左右对称定律曾經用于古典物理中，不过在那里并没有什么大的实际重要性。原因之一是由于左右对称与轉动对称不同，它是一种間断对称性，而轉动对称是連續的。在古典力学中連續对称性总是引致守恒律，而間断对称就不会。然而这种間断对称性和連續对称性之間的差別在有了量子力学以后就消失了。左右对称律也同样引致守恒律——宇称守恒律。

这个守恒定律的發現要追溯到1924年，当时拉泡(Laporte)^[4]發現复杂原子的能級可以分为用現代語言来講的奇能級和偶能級两类。吸收或放出一个光子后在这种能級間躍迁时，拉泡發現能級总是从偶变到奇，或是相反。我們在这里指出，能級的偶性或奇性后来就称为能級的宇称。我們定义偶能級具有宇称+1，奇能級-1。我們也定义在一般原子躍迁中所放出的或吸收的光子具有奇宇称。这样拉泡法則就可以表述如下：在放出一个光子的原子躍迁中，初态的宇称等于終态的总宇称，也就是說等于原子終态宇称和所放出的光子的宇称的积。換句話講，在躍迁中，宇称守恒，或是不变。

1927年魏格納(Wigner)^[5]作了深入的研究，証明拉泡的實驗法則是由于原子中庫倫力的反射不变性，或者是左右对称性的結果。这一基本概念很快就被吸收到物理学的語言中去了。由于左右对称性在其它相互作用中并没有被怀疑过，这一概念进一步推广到用于核反应、 β^- 衰变、介子作用以及奇异粒子物理学中。这样人們就像習慣了原子宇称一样，也逐漸習慣了原子核宇称，并且人們討論着并測量着介子的內禀宇称。在所有这些發展中，証明了宇称的概念，以及宇称守恒定律是非常富有成效的，而且这些成功反过来又支持了左右对称性的有效。

二

就在这样的背景上近年来發展了所謂 θ - τ 疑难。在解释这一疑难的意义以前，最好講一講作用在微觀粒子間的力的分类，这种分类是过去50年来物理学家通过實驗所知道的。我們在下面表列出四类作用。这些作用的强度表示在右面的一行中。最强的作用是核作用，它包括把原子核結合在一起的力以及原子核与 π 介子相作用的力。它也包括产生奇异粒子的作用。

1. 核力	1
2. 电磁力	10^{-2}
3. 弱力(衰变作用)	10^{-13}
4. 重力	10^{-38}

第二类作用是电磁作用，物理学家对它知道得最詳細。事实上，十九世紀物理学家的最大的成就就是对于电磁力的詳細了解。随着量子力学的發展，我們对于电磁力的了解在原則上給出了所有我們日常經驗中的物理現象和化学現象的一个准确的、完整的和詳尽的描述。第三类力——弱相互作用，首先是本世紀初从原子核的 β -放射性中發現的。这一現象特別在过去25年中被大力地进行了实验研究，随着 $\pi-\mu, \mu-e$ 衰变以及 μ 俘获的發現，分別^[6]由克萊因(Klein)，由梯奥姆諾(Tiomno)和費勒(Wheeler)，由李政道、罗森卜魯茲和我独立地指出这些作用粗略地与 β^- 作用的强度相等。它們称为弱相互作用，并且由于許多与奇异粒子衰变有关的其它弱作用的發現，它們的地位不断地被提高。它們几乎是相等的强度的这一惊人的情况到今天仍然是一个最最可望而不可及的現象——这是一个我們在以后还要回头来談的一个題目。关于最后一类力，重力，我們只要指出，它們在原子和原子核的相互作用中是如此之弱，以致在現有技术的所有的观察中完全可以忽略。

現在我們回到 $\theta-\tau$ 疑难。在1953年，达里茲(Dalitz)和法布里(Fabri)^[7]指出，在 θ 和 τ 介子的衰变中

$$\theta \rightarrow \pi + \pi$$

$$\tau \rightarrow \pi + \pi + \pi$$

能够得到若干有关 τ 和 θ 介子的自旋和宇称的知識。这一論証非常粗略地講是下面这样的。过去曾經确定了 π 介子的宇称是奇的(即 $=-1$)。讓我們首先忽略由于 π 介子相对运动的影响。在衰变中宇称要守恒， θ 介子就必需具有两个介子的总宇称，換句話講，必須等于两个介子的宇称的积，而这是偶的(即 $=+1$)。同样， τ 介子必須具有三个介子的总宇称，而这是奇的。实际上由于 π 介子的相对运动，这一論証并不如刚才所說的那样简单清楚。要使得这一論証能够肯定，就需要在实验上研究衰变介子的动量和角度分布。許多实验室进行了这种研究，到1956年春所积累的實驗数据看来已經清楚地指出：根据上面的推理， θ 和 τ 所具的宇称不相同，因此不是同一种粒子。然而这一結論与其他大約是同时被肯定了的实验結果显著地矛盾。这一矛盾以 θ - τ 疑难而著称，它被广泛地討論着。为了回顧那时候的情形，让我从我在1956年9月在西雅圖所开的理論物理国际會議上以“关于新粒子的目前知識”为题所作的报告中的，引述有关 θ 和 τ 不是同一粒子的結論的一段^[8]：

“然而不要輕率地下結論。这是因为实验上 K 介子(即 τ 和 θ)似乎有相同的質量和寿命。我們知道質量的准确性約为2到10电子質量，或百分之一，而

寿命的准确性约为百分之二十。因为不能希望与核子和介子有强相互作用的、具有不同自旋和宇称值的粒子具有相同的质量和寿命，我們不得不承認，上述有关 τ^+ 和 θ^+ 不是同一粒子的推論是否确定的問題仍然是沒有解决的。插句話講，要是沒有反常的质量和寿命退化，我們可以說这一推論肯定地已經被認為是确定了，并且事实上比物理学中許多其他的推論更为牢固。”

那时候物理学家發覺自己是处在这样的一种情况，就像在一个在暗室里的人在找寻着出口一样。他知道在某一方向必定有一扇門引他出去。可是是那个方向呢？

这个方向显出来是在于弱相互作用中宇称守恒定律不对。然而要推翻一个已經被接受了的概念，必須要指出为什么过去有利于这一定律的成立的証据是不充分的。李政道和我仔細研究了這個問題，并且我們在1956年5月得出了下面的結論：1. 过去对于弱相互作用的实验对于宇称守恒問題毫無关系。2. 在强相互作用中，也就是在上述第一、二类相互作用中，确实有許多实验以高度的准确性建立了宇称守恒，不过还没有精确到显示出在弱相互作用中缺乏宇称守恒的影响。

弱相互作用中的宇称守恒并無实验上的支持而为人們如此长期地相信着的这一事实，是非常使人惊奇的。然而对于物理学家了解得如此深刻的时空对称性之一可能被破坏的预想，是更加令人惊奇的。我們并没有这种准确的预想。講起来，我們不过是通过对于 $\theta-\tau$ 疑難的已經作过的各种不同的尝试的失败而被迫走到这一点^[10]。

为什么对于研究得最最穹尽的 β 衰变这一弱相互作用的許許多多的实验中就沒有有关宇称是否守恒的訊息呢？回答是两方面理由結合起来的。首先，中微子沒有可以測量到的質量这一事实，引起了一种不清楚的地方，它划掉了从象 β^- 衰变譜那样简单的实验中获得的有关宇称守恒的間接知識^[11]。其次，要直接研究 β^- 衰变中的宇称守恒，像过去經常所做过的那样討論核宇称是不够的。必須研究整个衰变过程的宇称守恒。換句話講，必須設計一个能够試驗 β^- 衰变中的左右对称性的实验。这种实验在过去并没有做过。

一旦懂得了这几点，这就容易指出，要清楚地試驗过去所沒有試驗过的有关弱相互作用中宇称守恒的假設，究竟需要做怎样的实验。李政道博士和我^[9]在1956年夏季建議了有关 β^- 衰变， $\pi-\mu$ ， $\mu-e$ 和奇异粒子衰变的一系列这样的試驗。包括在这些实验中的基本原理都是相同的：設計两套仪器装置，它們相互是鏡像，它們包含有弱相互作用。然后就要确定这两

个装置是否在标尺的（或計数器的）讀数上指出同一結果。如果結果不同，那么我們不可爭辯地証明了我們通常所了解的左右对称破坏了。这个想法表示在圖2上，其中表示出建議試驗 β^- 衰变中的宇称守恒的实验。

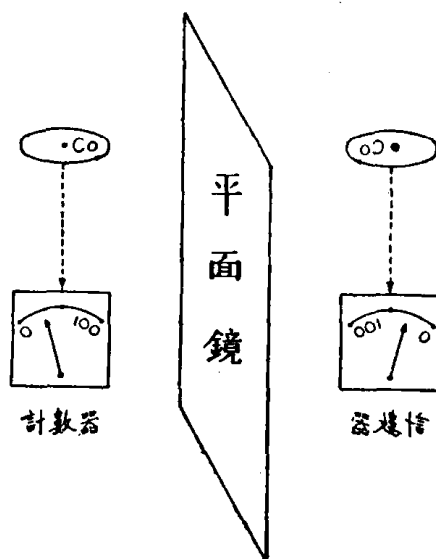


圖 2

这个实验首先由吳健雄、安卜勒 (Ambler)、海瓦 (Hayward)、霍浦斯 (Hoppes) 和亨德生 (Hudson)^[12] 在1956年下半年开始到1957年初做成。实际的实验装置是很复杂的，因为为了要消除外界影响，就得在非常低的温度下来做实验。 β^- 衰变测量与低温仪器相結合的技巧在过去是不知道的，它成了实验中的主要困难，这些都被这些科学家成功地解决了。由于他們的勇敢和技巧，物理学家才在去年有了有关宇称守恒的令人鼓舞的發展。

吳健雄博士、安卜勒以及他們的同事們的实验結果是这样的：在圖2的两个标尺上的讀数有很大的差別。因为他們的仪器的其它部分的行为都遵守左右对称，因此發現实验結果的不对称是由于鈷的 β^- 衰变的原故。在这一結果發表以后，很快地进行了許多的实验来进一步証实在各种弱相互作用中宇称守恒的破坏。在李政道博士的講演中将要討論这些有趣而重要的發展。

三

宇称守恒的破坏使大家的注意力都集中在有关物理学中的对称定律的若干問題。我們現在来对这些問題作一簡短的一般討論。

1. 正如李政道博士将要談到的^[1]，吳健雄和安卜勒以及他們的同事們^[13,14] 的实验同时也証明了在 β^- 衰变中电荷共轭不变性^[15] 也破坏了。另外一个称为時間反演不变的对称性^[16] 現在还在对弱相互作用进

行实验研究。

这三个间断不变性——反射不变性、电荷共轭不变性以及时间反演不变性——被一个称为 CPT 的定理联系着^[17]。用了这一定理，就可以证明^[13]一系列有关用实验来表明弱相互作用中这三个对称性可能破坏的一般结果。

特别有趣的是时间反演不变性在弱相互作用中可能有效的可能性。如果情形是这样的，那么虽然宇称守恒破坏了，只要使所有粒子换成反粒子并取镜像，左右对称仍然会成立^[18]。用图 2 来讲，这表示着：如果把所有右边仪器中的物质换成反物质，只要时间反演不变成立，则两边标尺的读数将相同。重要的是要注意在反射的通常定义下，电场是矢量，磁场是膺矢量，而在上述更改了的定义下它们的变换性质更换了。电荷与磁荷的变换性质也更换了。思索一下宇称不守恒与电磁场所起的对称的或非对称的作用之间的可能关系将是很有兴味的。

连续时空对称律的有效性问题在去年曾经进行大量的讨论。这种对称律在弱相互作用没有被破坏，这是有很好证明的。

2. 另外一个被广泛讨论过的对称律，是引起了同位旋守恒的对称律^[19]。近年来，用了这一对称律已经在有关奇异粒子现象中产生了可观的实验秩序^[20]。然而可以肯定这是在所有对称定律中了解得最少的一个。它不像罗伦茨不变性或反射不变性，它不是与时空不变性有关的“几何”不变性。它不像电荷共轭不变性^[21]，它不是由于在量子力学中所碰到的复数的性质而产生的。在这方面，它有些像电荷守恒律和重粒子数守恒律。然而后者是准确的守恒律，而同位旋守恒律在导入电磁相互作用和弱相互作用后就要被破坏。对于同位旋守恒的根源的了解，以及了解如何把它与其它守恒律联系在一起，这些毫无疑问是今天的高能物理学中突出的问题。

3. 我们在前面讲过，所有各种不同种类的弱相互作用有一共同性质，就是它们的强度接近相同。去年有关宇称守恒的实验工作揭示出来，它们很可能也具有都不遵守宇称守恒和电荷共轭不变的共同性质。因此一旦我们确定了物质和反物质的区别，它们就可以用来区分左和右。同样只要我们一旦选择了左和右的定义，我们可以用它们来区分物质和反物质。如果时间反演不变性也破坏了，弱相互作用甚至可以用来同时区分左和右、物质和反物质。这使我们感到弱作用的产生是和左与右、物质与反物质的可区别性密切联系着的。

〔李文鏞译〕

- [1] 李政道，诺贝尔奖金演讲，1957。
- [2] 关于这方面的文献参考 E. P. Wigner, Proc. Am. Phil. Soc. **93**, 521 (1949)。
- [3] 参考 H. Weyl 关于左右对称的有趣的讨论 *Symmetry*, Princeton University Press (1952)。
- [4] O. Laporte, Z. Physik **23**, 135 (1924)。
- [5] E. P. Wigner, Z. Physik **43**, 624 (1927)。
- [6] O. Klein, Nature **161**, 897 (1948); J. Tiomno and J. A. Wheeler, Rev. Mod. Phys. **21**, 144 (1949); T. D. Lee (李政道), M. Rosenbluth and C. N. Yang (楊振宁), Phys. Rev. **75**, 905 (1949)。
- [7] R. Dalitz, Phil. Mag. **44**, 1068 (1953); E. Fabri, Nuovo Cimento **11**, 479 (1954)。
- [8] C. N. Yang (楊振宁), Rev. Mod. Phys. **29**, 231 (1957)。
- [9] T. D. Lee (李政道) and C. N. Yang (楊振宁), Phys. Rev. **104**, 254 (1956)。
- [10] T. D. Lee (李政道) and J. Orear, Phys. Rev. **100**, 932 (1955); T. D. Lee (李政道) and C. N. Yang (楊振宁), Phys. Rev. **102**, 290 (1956); M. Gell-Mann, 未发表; R. Weinstein, 私人通讯; 关于这些概念的一般讨论可以在 Proceedings of the Rochester Conference, Session VIII 找到 (April 1957, Interscience Publishers)。
- [11] C. N. Yang (楊振宁) and J. Tiomno, Phys. Rev. **79**, 495 (1950)。
- [12] C. S. Wu (吳健雄), E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes, and R. P. Hudson, Phys. Rev. **105**, 1413 (1957)。
- [13] T. D. Lee (李政道), R. Oehme and C. N. Yang (楊振宁), Phys. Rev. **106**, 340 (1957)。
- [14] B. L. Ioffe, L. B. Okun and A. P. Rudik, J. E. T. P. (USSR) **32**, 396 (1957)。
英譯文見 Soviet Phys. JETP, **5**, 328 (1957)。
- [15] 电荷共轭不变性是与狄拉克方程的空穴理论解释密切联系着的。后者的发展是由狄拉克首先提出来的。P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. **A126**, 360 (1930); J. R. Oppenheimer, Phys. Rev. **35**, 562 (1930) and H. Weyl, *Gruppen theorie und Quantenmechanik*, 2nd edition, p. 234 (1931)。这方面的发展的叙述可以看 P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. **A133**, 60 (1931)。电荷共轭不变性的详细立式和应用开始于 H. A. Kramers, Proc. Acad. Amst. **40**, 814 (1937) and W. Furry, Phys. Rev. **51**, 125 (1937)。
- [16] E. P. Wigner, Nachr. Akad. Wiss. Cöttingen, Math-physik. 1932. p. 546。这篇文章用时间反演不变性阐明了 H. Kramers 的早期工作。H. Kramers, Prox. Amsterdam, **33**, 959, (1930)。
- [17] J. Schwinger, Phys. Rev. **91**, 720, 723 (1953); G. Lüders, Kgl. Danske Videnskab. Selskab, Mat-fys. Medd. **28**, No. 5 (1954); W. Pauli 的文章在 *Niels Bohr and the Development of Physics* (Pergamon Press, London, 1955)。参见参考文献[21]。
- [18] 这种可能性曾经由李政道和楊振宁加以讨论，并且在

1956年9月于西雅圖所开的国际理論物理會議上由楊振宁作了报告(参考文献[8])。它与CPT定理的关系也在同一會議上的一次討論会上作了报告。这种預測以后發表在 T. D. Lee (李政道) and C.N. Yang (楊振宁), Phys. Rev. **105**, 1671 (1957)。这种可能性被苏联朗道独立地正确地加以發展, L. Landau, JETP (USSR) **32**, 405 (1957)。英文譯文可見 Soviet Phys. JETP, **5** 336 (1957)。

【19】首先討論总同位旋量子数的概念的是 B. Cassen and E. U. Condon, Phys. Rev. **50** 846 (1936) 以及 E. P. Wigner, Phys. Rev. **51**, 106 (1937)。从p-p和n-p

力的相等得出来的物理基础是由 G. Breit, E.U. Condon and R. D. Present, Phys. Rev. **50**, 825 (1936)。同位旋較早是由 Heisenberg 作为形式上的数学参数引出来的。W. Heisenberg, Z. Physik **77**, 1 (1932)。

[20] A. Paris, Phys. Rev. **86**, 663 (1952) 提出了奇异粒子結合产生的思想。提出以同位旋守恒来解释这一現象的是 M. Gell-Mann, Phys. Rev. **92**, 833 (1953) 和 K. Nishijima, Progr. Theoret. Phys. Japan, **12** 107 (1954)。这两个作者也指出了同位旋守恒引出称为奇异性的量子数。

[21] R. Jost, Helv. Phys. Acta **30**, 409 (1957)。

弱相互作用和宇称不守恒*

李 政 道

提要 我們簡短地总结了基本粒子及其相互作用的現代知識, 并且概括了各种弱相互作用的宇称不守恒的新实验。从这些实验中可以得出通常的电荷共轭不变也是不适用的結論。关于这些新發現的某些推論以及可能的理論上的关联也作了一些探討。

在楊振宁教授以上的談話^[1]中, 曾經扼要地介紹了直至1956年底以前人們所知道的物理学方面各种对称原理的状况。可是在这短短的一年当中, 在各种物理过程中, 这些原理的适用范围是大大地弄清楚一些了。这种惊人迅速的發展, 只有通过全世界各个实验室的物理学家们的智慧和努力才是可能的。为了理解这些新的实验結果和瞻望将来, 我們先簡短地温習一下有关基本粒子及其相互作用的某些知識。

現时我們所知道的基本粒子包含了好几类。基本粒子具有很多特性, 但每一类粒子都由它們的質量、电荷、自旋作为它們的标志。它們主要分为两大类: 重粒子类和輕粒子类。在重粒子方面大家都知道的例子是質子和中子; 而輕粒子是光子和电子。以上分类, 除了基于重粒子要重于輕粒子这种明显的理由以外, 还由于实验观察到一个单个的重粒子是不能衰变为輕粒子的, 即使当它們和电荷、能量、动量、角动量等守恒定律不相矛盾时也是如此。这个事实更精确地就表述为“重粒子守恒定律”, 它說明如果对每一个重粒子給予了一个重粒子数+1, 对于每一个相应的反粒子給予一个重粒子数-1, 对于每一个輕粒子却給予数0, 那末在所有已知的物理过程中, 重粒子数的

代数和是絕對地守恒的。証实这个定律的明显的例証之一就是我們本身和我們的銀河系并没有衰变成为光辐射以及别的輕粒子。

圖1給出了所有已知的重粒子除了核子以外的所有重粒子都称为超子, 用大写的希腊字母来表示。括弧內表示根据某些理論上的推断而可能存在的某些粒子。(所有这些重粒子理論上都可能存在反粒子。)所有已知的重粒子具有半整数的自旋。圖2表示所有已知的輕粒子, 其中 $e^\pm$, $\mu^\pm$ 以及 ν , $\bar{\nu}$ 具有半整数自旋。他們被称为輕子^{**}。其余的如光子、 π 和 K 介子具有

重粒子	質量
P^+	1836.12
N	1838.65
$\bar{P}$	$m_{\bar{P}} \sim m_P$
$\bar{N}$	$m_{\bar{N}} \sim m_N$
Δ^0	2181 ± 2
Σ^+	2327.4 ± 1
Σ^-	2340 ± 1
Σ^0	$\sim m_{\Sigma^\pm}$
Ξ^-	2580
(Ξ^0)	

圖 1

* 作者在接獲諾貝爾獎金时的講演。

** 輕子和輕子不同, 輕子是指自旋为半整数的輕粒子。——譯者