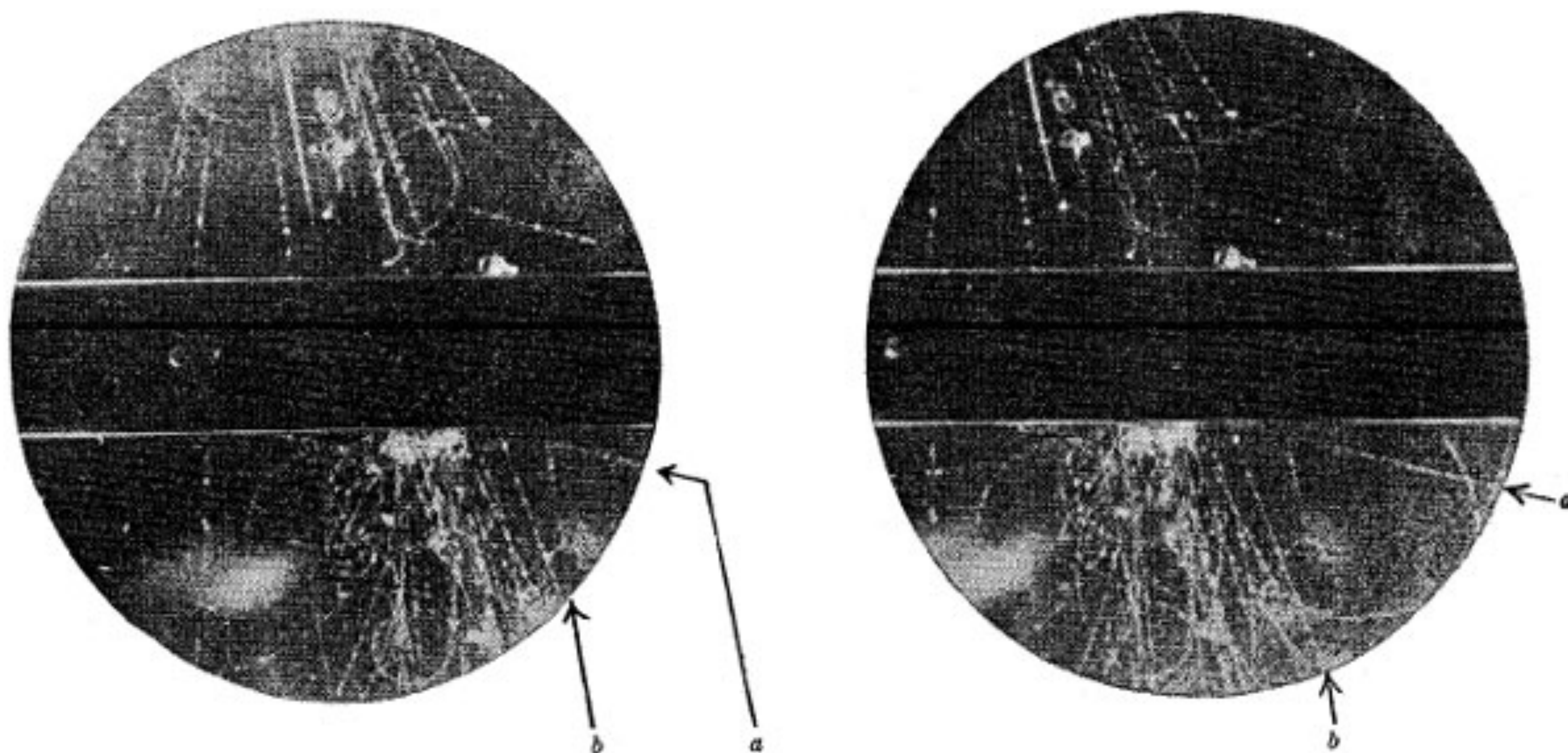


第三节 奇异数和重子数

奇异粒子

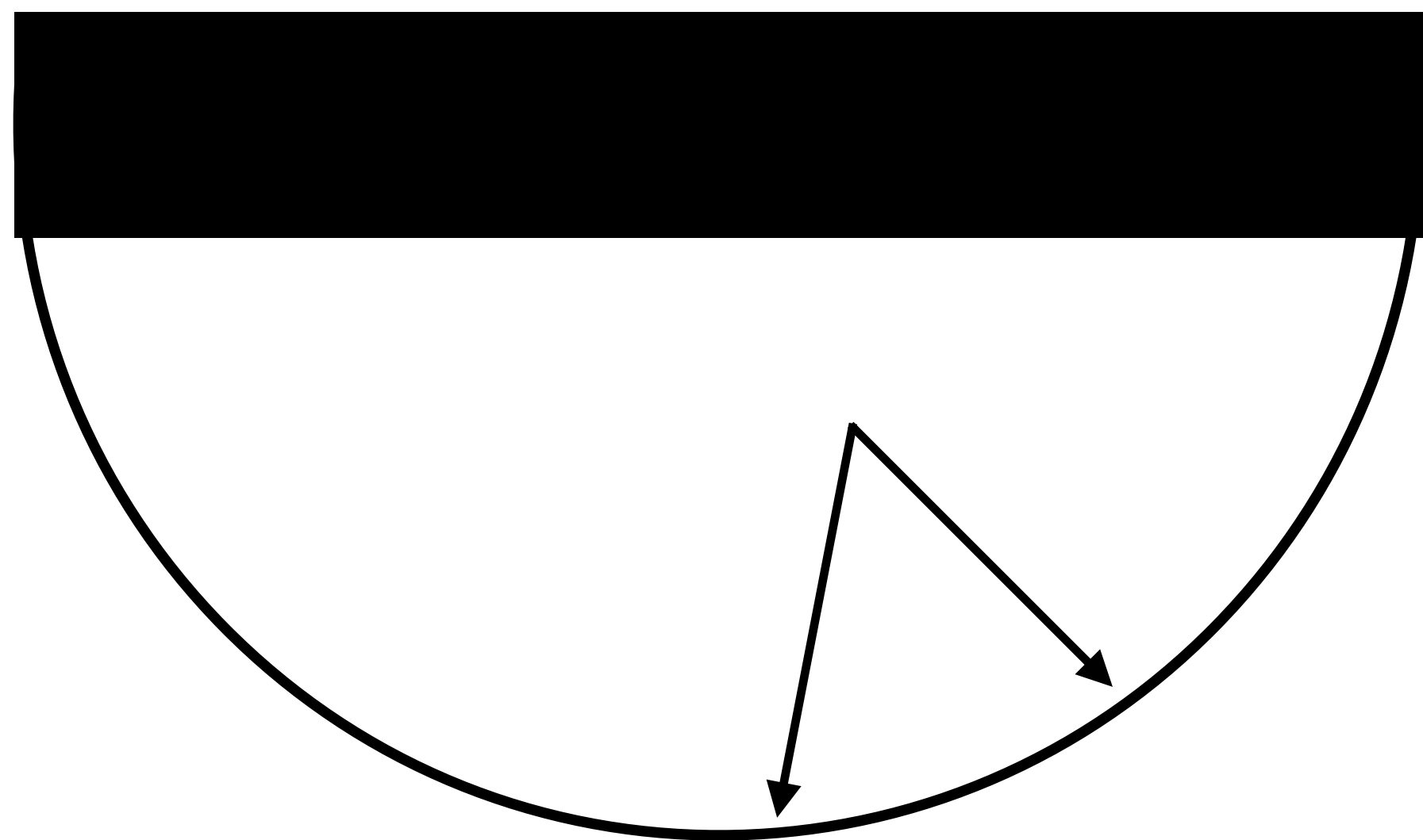
——云室中的“V”型事例

1947年在宇宙射线实验中，Clifford Butler和George Rochester用云室首先观察到了后来被称为奇异粒子的粒子——“V”型事例。



"Evidence for the existence of new unstable elementary particles" G. D. Rochester & C. C. Butler, Nature **160** (1947) 855-857

“Among some fifty counter-controlled cloud-chamber photographs of penetrating showers which we have obtained during the past year as part of an investigation of the nature of penetrating particles occurring in cosmic ray showers under lead, there are two photographs containing forked tracks of a very striking character. These photographs have been selected from **five thousand photographs taken in an effective time of operation of **1500 hours**. On the basis of the analysis given below we believe that one of the forked tracks represents the spontaneous transformation in the gas of the chamber of a new type of uncharged elementary particle into lighter charged particles, and that the other represents similarly the transformation of a new type of charged particle into two light particles, one of which is charged and the other uncharged”**



因中性粒子在云室中不能留下径迹，所以只观察到两个末态带电粒子留下的叉形径迹。

通过对带磁场的云室中带电粒子径迹的偏转曲率以及电离密度的测量分析，知道这两个末态粒子一个是质子，一个是 π^- 介子

通过测量末态粒子的能量和动量可以定出这个中性粒子质量。它的质量显然比质子大。

这是当时所知的质子、中子、电子、光子和 π 介子之外的一个新粒子。

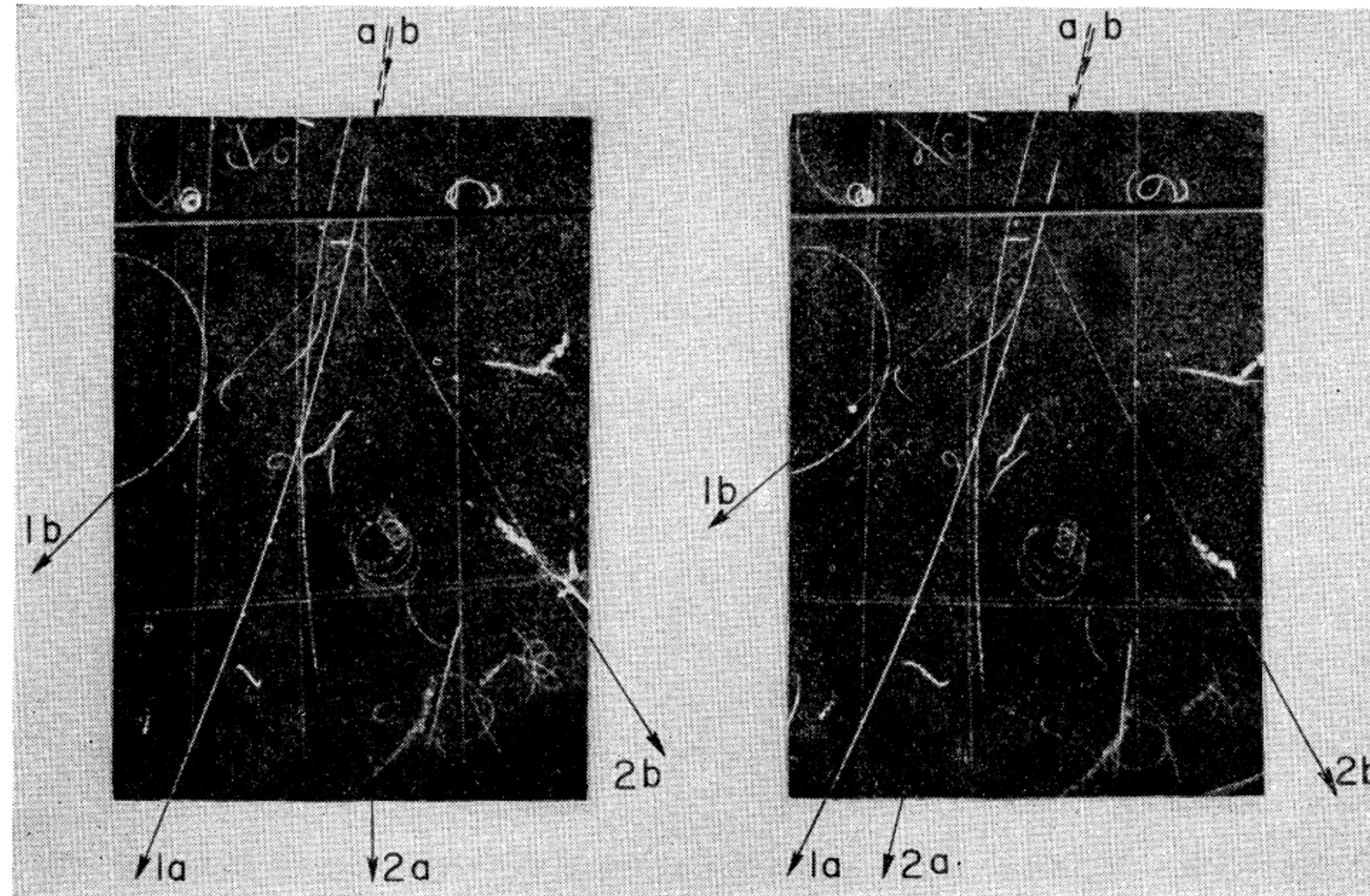
后来称其为 Λ 粒子（超子）。

Clifford Butler和George Rochester观察到的过程为 $\Lambda \rightarrow p\pi^-$

后来又发现了另一类“V”型事例，末态是 π^- 和 π^+ ，其质量是电子质量的1000倍，当时称为 θ^0 介子，其寿命为 10^{-10} 秒，也就是后来的短寿命粒子 K_s^0

在Brookhaven National Lab中的散射过程中产生 (1954)

FIG. 1. Case C. Diffusion cloud-chamber photograph of two neutral V particles (a) and (b), whose lines of flight are almost colinear. (a) is believed to be a Λ^0 decaying into a proton (1a) and a negative π meson (2a). Tracks 1a and 2a practically coincide in the right view. (b) is probably a ϑ^0 decaying into π^+ (1b) and π^- (2b).



成对产生的新粒子！

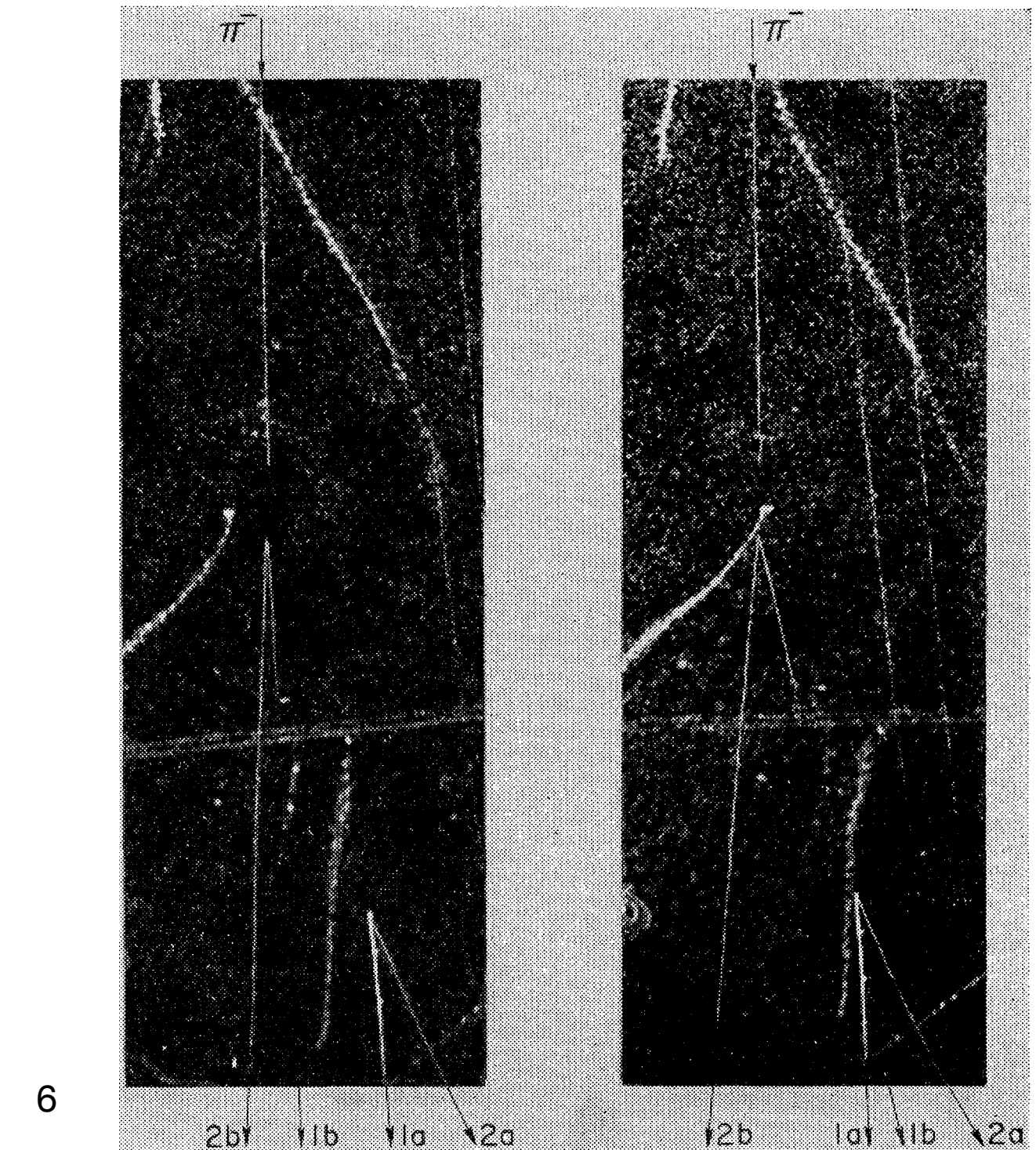
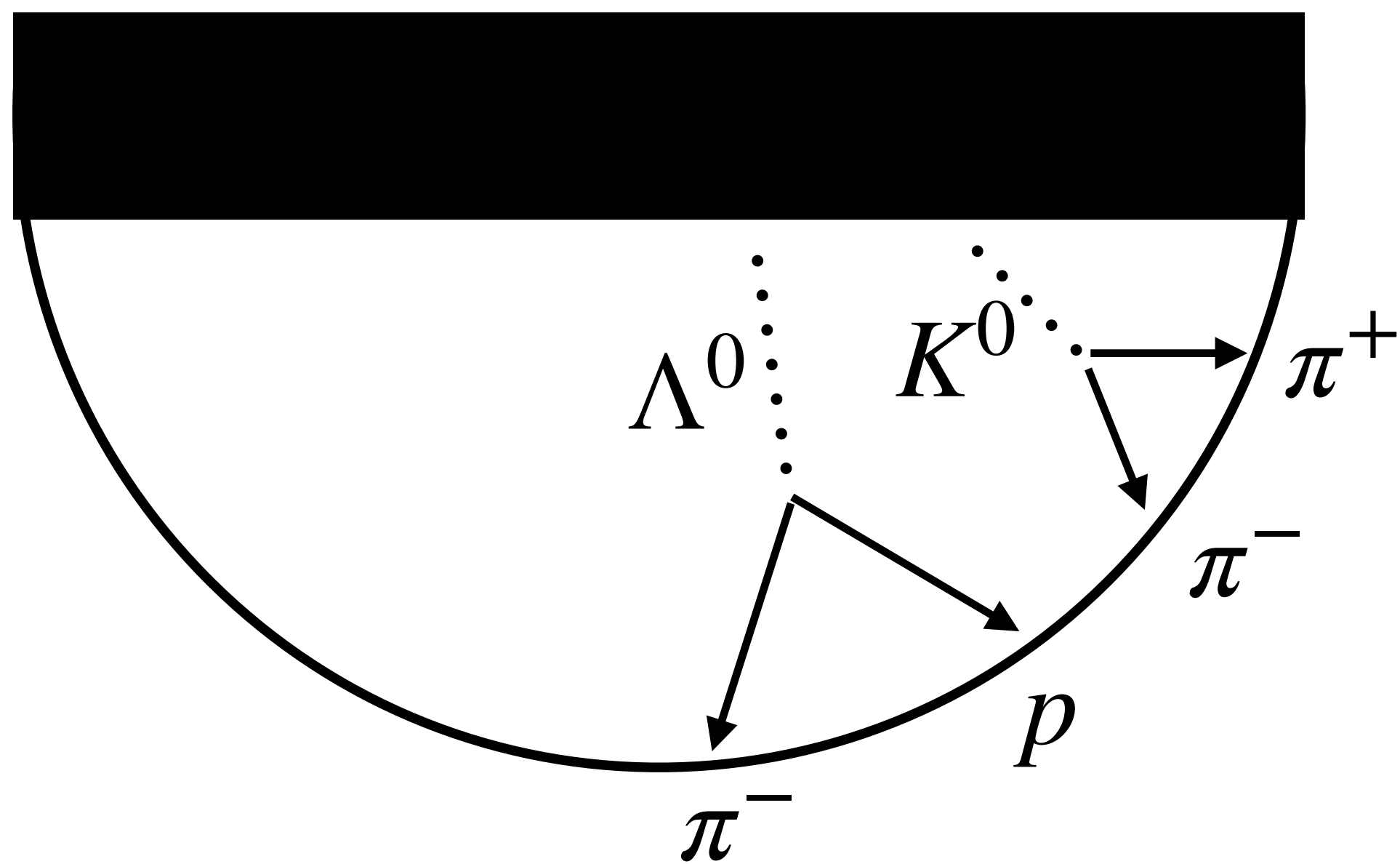
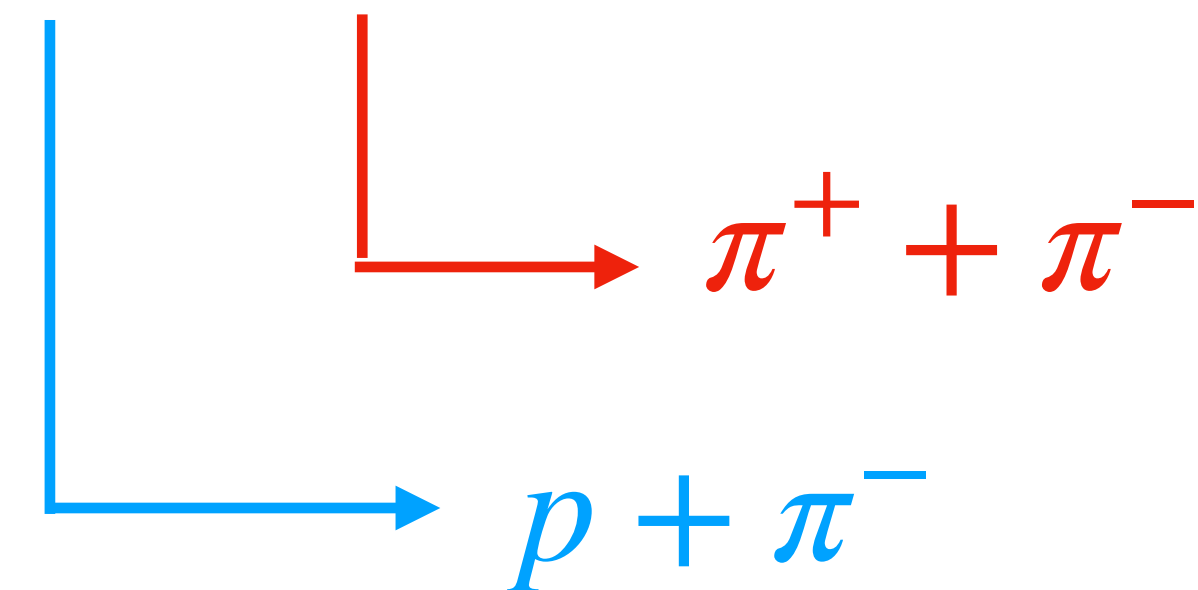


FIG. 2. Case D. Photograph of a 1.5-Bev π^- producing two neutral V particles in a collision with a proton. Tracks 1a and 2a, believed to be proton and π^- , respectively, are the decay products of a Λ^0 . A ϑ^0 is probably seen to decay into π^+ (1b) and π^- (2b). Because of the rather “foggy” quality of this picture tracks 1b, 2a, and 2b have been retouched for better reproduction.



$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$$



Λ^0 : 质量比质子大，后来称为超子。

K^0 : 质量为电子质量的约1000倍，寿命约为 10^{-10} s，当时称为 θ 粒子。

“奇异”粒子及其奇异特性

新粒子的发现引起了人们的广泛注意。后来陆续又发现了 K^+ 介子等。

在1954年美国布鲁克海文实验室3GeV质子同步加速器实验中产生了奇异粒子后，它们的“奇异”特性才展现出来并得到系统的研究。

“奇异粒子”是当时新发现的一批粒子的总称，它们具有以下两个明显特征

- 协同产生 (A. Pais, 1952), 独立衰变。

在碰撞过程中至少有两个奇异粒子一起产生，然后每个奇异粒子再分别独立衰变掉，最终衰变成的粒子都是过去已知的粒子，而且不再有奇异粒子；

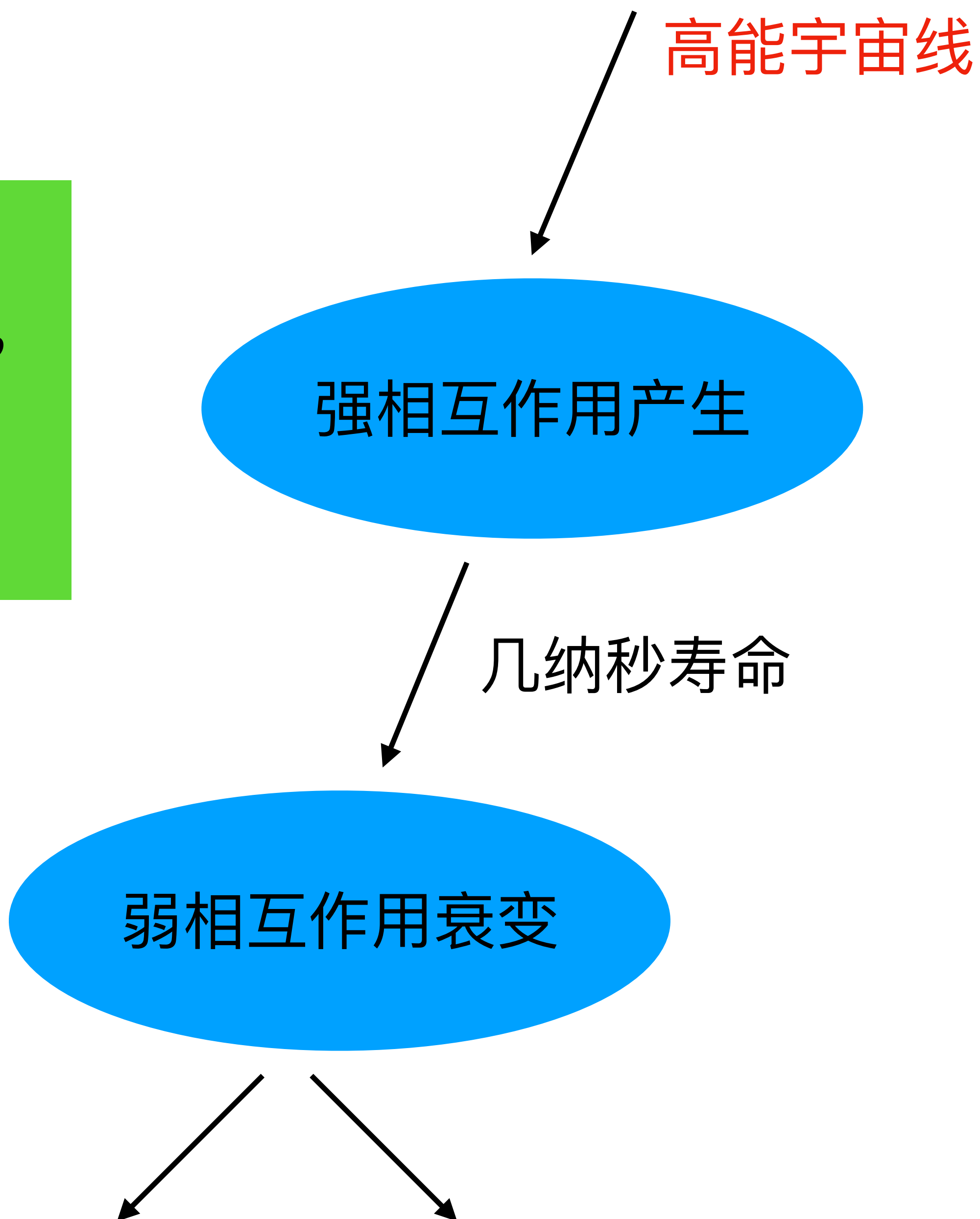
$$\begin{aligned} \pi^- + p &\rightarrow \Lambda + \pi^- + K^+, & \pi^- + p &\rightarrow \Sigma^- + \pi^0 + K^+ \\ \Lambda &\rightarrow p + \pi^-, & \Sigma^- &\rightarrow n + \pi^-, & K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, & K^+ &\rightarrow \pi^+ + \pi^0 \end{aligned}$$

- 快产生，慢衰变 (强产生，弱衰变)

奇异粒子产生于粒子的高能碰撞，碰撞经历的时间量级为 10^{-24} s (强相互作用的典型时间)，而它们衰变的平均寿命时间量级为 10^{-10} s (弱相互作用的典型时间)或更长

“奇异”疑难

既然 Λ^0 和 K 介子能够通过**强相互作用产生**，
为什么只能通过**弱相互作用衰变**？

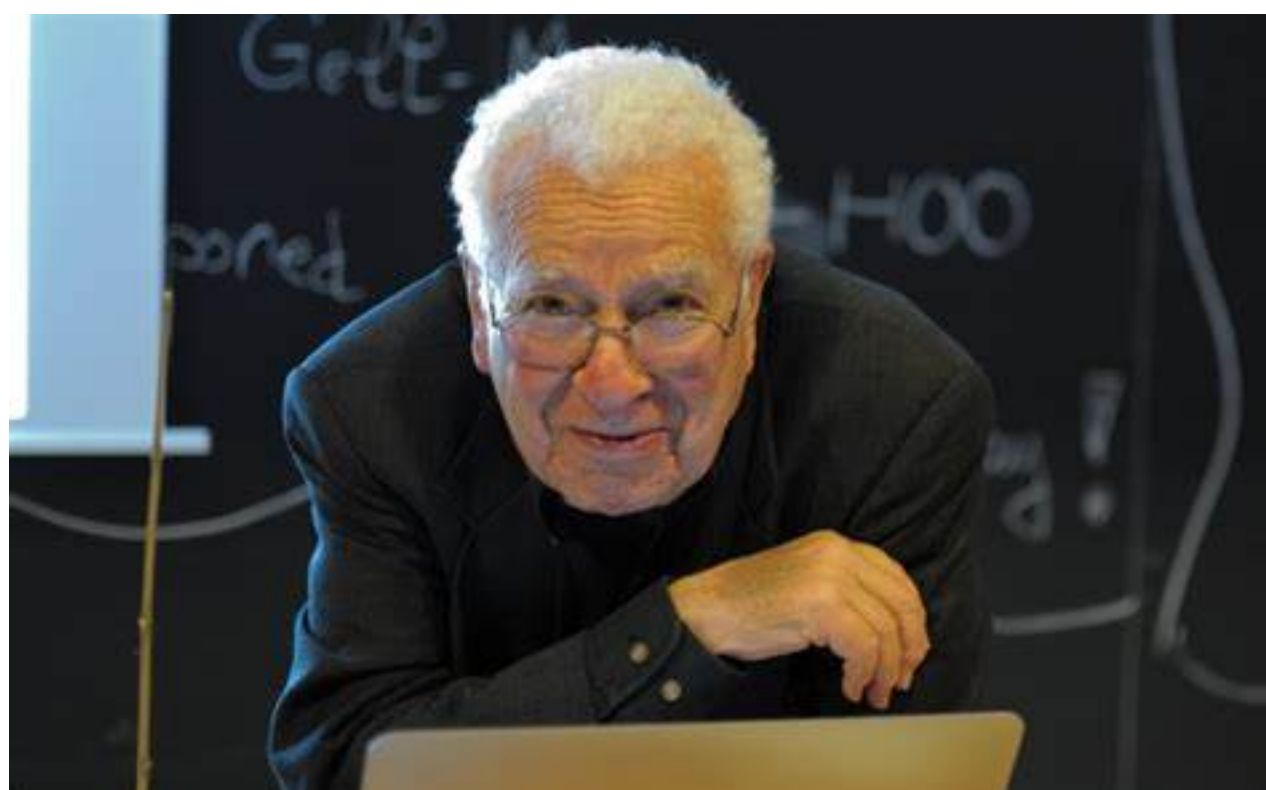


奇异数的引入(1953)

Isotopic Spin and New Unstable Particles

M. Gell-Mann

Phys. Rev. **92**, 833 – Published 1 November 1953



Murray Gell-Mann

Murray Gell-Mann · Winner

Nobel Prize in Physics · 1969

Charge Independence for V-particles^{*} FREE

Tadao Nakano, Kazuhiko Nishijima

Progress of Theoretical Physics, Volume 10, Issue 5, November 1953, Pages 581–582, <https://doi.org/10.1143/PTP.10.581>

Published: 01 November 1953 Article history ▼



Tadao Nakano

中野董夫

(1961提名)



Kazuhiko Nishijima

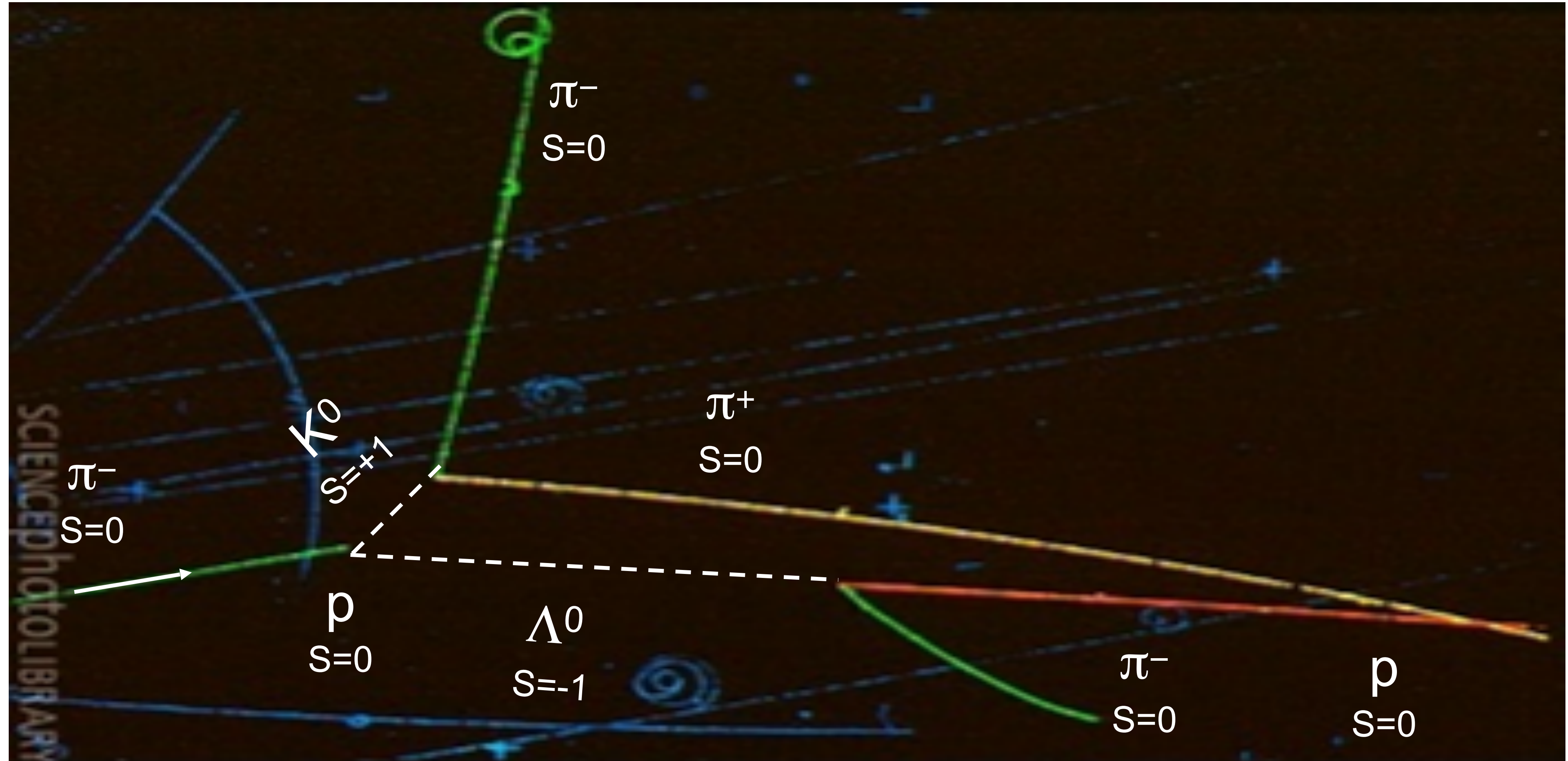
西岛和彦

(多次提名😭)

奇异粒子的这些性质可以用一种新的守恒量子数（奇异数）来解释

- 奇异数只能取**整数**。V型事例前已知的粒子奇异数为0，称为普通粒子。
- 奇异粒子的奇异数不为零。
- 在**强**相互作用和**电磁**相互作用中，奇异数**守恒**。
- 在**弱**相互作用中，奇异数**不一定守恒**， $\Delta S = 0, 1$ 。
- 奇异粒子的产生是通过普通粒子的**散射过程**实现的。
- **强**相互作用过程中奇异数守恒决定了末态中奇异粒子必须**成对**产生。

再次检验V型事例



- 产生过程奇异数守恒（强&电磁），衰变过程奇异数破坏（弱）

- 奇异粒子的衰变是通过弱作用实现的，因为相互作用弱，需要的时间较长，但不再要求奇异数守恒了。
- 奇异数守恒对应于一个内部 $U(1)$ 对称性： $g\Phi g^{-1} = e^{i\alpha Y}\Phi$, $g \in U(1)$
如果运动规律在这个 $U(1)$ 内部变换群的作用下不变，则这个 $U(1)$ 群的生成元 Y 就是一个相加性量子数。
- 奇异数 S 就是一个通过总结大量实验现象的规律性而得出的又一个内部相加性守恒量。

- 奇异数的引入很好地解释了奇异粒子的特性。在这以前，粒子物理学中所认识到的守恒量除能量、动量、角动量、电荷外，按加法计算的守恒量只有同位旋的分量，但是同位旋的概念和粒子的电荷有一定的联系，而奇异数则完全是根据实验的规律性独立地总结出来的客观存在的守恒量。
- 奇异粒子的自旋和宇称量子数可以通过奇异粒子的衰变产物和奇异粒子参与的反应过程来确定。
- 角动量守恒是严格的。因此无论是强作用过程还是弱作用过程，原则上都可以用来确定粒子的自旋。
- 奇异数只在强相互作用和电磁作用下守恒，因此只能通过强作用或者电磁作用过程来确定。

例如 $K^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 衰变,

- 从量子力学知道双粒子系统的空间波函数为球谐函数。
- 从其性质得出全同粒子空间波函数交换对称性系数为 $(-1)^L$ ， L 为轨道角动量。
- π^0 是自旋为0的玻色子，玻色子的交换对称性要求 $(-1)^L$ 为+1，所以 L 必须为偶数。
- 在 K^0 介子衰变的质心系中分析衰变产物 π^0 介子的角分布时，未见各向异性，球谐函数只有在 $L=0$ 时才是各向同性的。
- 因此可以确定两个 π^0 介子之间的轨道角动量 $L=0$ 。
- 再考虑 π^0 介子的自旋为0，所以 K^0 介子自旋也为0。

奇异数的提出可以完全解决问题吗？

- $M_{\Lambda} = 1115.683 \pm 0.006 \text{ MeV}$
 $M_{K^0} = 497.611 \pm 0.013 \text{ MeV}$
 $M_p = 938.2720813 \pm 0.0000058 \text{ MeV}$
 $M_{\pi^{\pm}} = 139.57039 \pm 0.00017 \text{ MeV}$
- $\pi^{-} + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$
 $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^{-}$
 $K^0 \rightarrow \pi^{+} + \pi^{-}$
- K^0 是最轻的奇异粒子，因此衰变需要破坏奇异数守恒。
- 然而为什么没有 $\Lambda^0 \rightarrow \bar{K}^0 + \pi^0$?
($S(\Lambda^0) = -1$, $S(\bar{K}^0) = -1$, \bar{K}^0 是 K^0 的反粒子)

重子数 (Baryon Number)

- 质子的质量是电子质量的1836倍，按照已知的守恒定律的限制，质子应能衰变，例如 $p \rightarrow \pi^0 e^+$ 或 $p \rightarrow e^+ \gamma$ 。
- 但质子是稳定的，没有观察到质子的衰变。自由中子虽然可以衰变，但它衰变时转化成比它略轻的质子
- 这提示人们可能还存在一个内部U(1)对称性，相应的相加性守恒量为重子数(b)
- 质子和中子的重子数为1，介子、光子和电子的重子数都是0。
- 实验表明，重子数是一个严格的内部相加性守恒量

- 电荷、重子数、奇异数都是内部相加性守恒量，它们的相同点在于数学结构相同，都是和某种内部U(1)变换不变性相联系的，可取值为整数。
- 它们的不同点表现在物理内容上，而且守恒的程度也不相同。
 1. 电荷和重子数都是严格的守恒量；
 2. 奇异数在弱作用下不守恒
 3. 同位旋第三分量在电磁相互作用下守恒，但在弱作用下不守恒
- 这些相加性量子数的区别还表现在如何测量上：电荷可以通过粒子的电磁相互作用行为测量，因为电荷本身就是电磁相互作用的作用常数；

- 重子数和奇异数没有这种动力学性质，只能根据守恒定律，通过已知的粒子的重子数和奇异数来确定。
- 重子数作为一个严格的内部相加性守恒量，远早于奇异数就被人们所认识。既然重子数和电荷一样，也是一个严格的内部相加性守恒量，那么是否也是某种U(1)规范场的相互作用常数？
- 如果存在这种重子数规范场，这种规范场的量子也应和光子一样，是质量为零的粒子。
- 这种相互作用也应是长程的，静作用力也应和库仑力类似，与两个粒子重子数的乘积成正比，与两个粒子之间的距离平方成反比。

- 由于这种重子数相互作用随距离的变化和引力相互作用完全相同，**两物体之间的重子数相互作用将完全与引力相互作用混在一起**；
- 李政道和杨振宁研究过如何从实验上来检验重子数相互作用是否确实存在：
- 原子核的质量数等于它的重子数，**引力相互作用与质量成正比**，但原子核的质量和数量并不完全成正比，由于质子和中子的质量差以及它们结合成各种不同的原子核时不同的结合能造成的微小的差别。
- 如果重子数相互作用确实存在，利用这个微小的差别，就可以通过精确测量引力相互作用而检测出来。

- 他们分析了当时的实验，发现在相当高的精度下找不到差别，这表明重子数不对应规范相互作用，**没有动力效应**。
- 由此可以看到，粒子物理中遇到的内部相加性守恒量，有些是某种相互作用的动力荷，有动力效应，
- 有些则不是某种相互作用的动力荷；没有直接的动力效应。

盖尔曼－西岛关系

1、奇异数的约定

- 粒子的奇异数 S 的值是根据奇异数守恒的要求以及实验分析赋予的，从这一点来说，粒子的奇异数并没有完全确定下来。
- 事实上，粒子的奇异数乘以任何一个共同常数，并不影响物理结论；
- 粒子的奇异数再加上一个强相互作用中守恒的相加性量子数，重新定义奇异数，也可以满足上述要求。

物理上的约定： $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$

历史上，为了避免这些不确定性带来的任意性，粒子物理学家实际上采取了自然的约定，即以最初发现的上面反应来确定。

根据强相互作用奇异数守恒的要求，上述反应的末态中， Λ^0 和 K^0 的奇异数必须大小相等，符号相反，因此人们规定：

$$S(\Lambda^0) = -1, \quad S(K^0) = +1$$

那么，其他奇异粒子的奇异数就可以通过奇异数守恒的要求相应推出。

按照这样规定的奇异数值，不久就总结出强子的电荷Q、同位旋沿“第三方向”的投影 I_3 、重子数b和奇异数S有以下关系：

2. 盖尔曼－西岛关系

1955年，人们对强子的电荷、重子数、同位旋第三分量和奇异数归纳出以下关系

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(b + S)$$

这个关系被称为盖尔曼-西岛关系。以后的实验充分证明了这个关系的普遍性。

这个关系在六十年代强子分类和探索中是一个基本的关系式。由于b和S总是相加出现，有时人们又引入超荷 $Y=b+S$ 来代替奇异数。

奇异量子数的下述两个特点对粒子物理学的发展是有启示意义的：

- (1) 它是一个“近似”守恒的相加性守恒量，在强相互作用和电磁相互作用下严格守恒但是在弱相互作用下可以不守恒；
- (2) 与电荷不同，奇异数本身不是某种相互作用的“荷”，因此它的确定只能通过实验的分析总结，不能象电荷那样通过它所体现的相互作用性质的动力效应来测定。

奇异数的存在和被认识给人们以启示：粒子物理中丰富多彩的内容表现之一就是自然界中客观上还可能存在其它一些反映粒子内部性质的量子数，它们有可能是“近似”守恒量，有可能并不是某种相互作用的“荷”。

1974年以后先后发现的粲数C和底数B，都是属于这类量子数。考虑到强子物理的这些发展，盖尔曼－西岛关系已经推广为

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(b + S + C + B) = I_3 + \frac{1}{2}Y$$

此后陆续发现了更多的“奇异”粒子，并构成特殊结构

重子八重态 $J^P = \frac{1}{2}^+$

粒子	J	S	b
p	1/2	0	1
n	1/2	0	1
Σ^+	1/2	-1	1
Σ^0	1/2	-1	1
Σ^-	1/2	-1	1
Ξ^0	1/2	-2	1
Ξ^-	1/2	-2	1
Λ	1/2	-1	1

$$\begin{bmatrix} p \\ n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma^+ \\ \Sigma^0 \\ \Sigma^- \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Xi^0 \\ \Xi^- \end{bmatrix}$$

介子八重态 $J^P = 0^-$

粒子	J	S	b
K^+	0	1	0
K^0	0	1	0
π^+	0	0	0
π^0	0	0	0
π^-	0	0	0
\bar{K}^0	0	-1	0
K^-	0	-1	0
η_8	0	0	0

$$\begin{bmatrix} K^+ \\ K^0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \pi^+ \\ \pi^0 \\ \pi^- \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{K}^0 \\ -K^- \end{bmatrix}$$

守恒定律小结

守恒荷	I	I ₃	S	Q	b	L
强	✓	✓	✓	✓	✓	✓
电磁	✗	✓	✓	✓	✓	✓
弱	✗	✗	✗	✓	✓	✓

电磁相互作用下 $|\Delta I| = 0, 1$ ；轻子数和重子数一样也是守恒的。

U 粒子

1986年欧洲核子研究中心(CERN)在用动量为135GeV的 Σ -粒子碰铍核的实验中，发现了一个新粒子 U ，实验的结果如下：

粒子	衰变末态	质量(MeV)	宽度(MeV)
U^+	$\Lambda p^- \pi^+ \pi^+$	3105	<30(90%置信水平)
U^0	$\Lambda p^- \pi^+$	3095	<30(90%置信水平)
U^-	$\Lambda p^- \pi^+ \pi^-$	3115	<80(90%置信水平)

U 粒子的质量和 J/Ψ 粒子的质量相同，但它绝不是 J/Ψ 粒子。因为 J/Ψ 粒子的电荷为零，奇异数为零，而已发现的 U 粒子的电荷为1，0和-1，奇异数为-1，两者截然不同。

- U 粒子的质量很重，它的衰变产物都是强子
- 按通常的这样重的强子来估计，它的宽度应该是200MeV的量级，实验上测到的值表明 U 粒子的宽度比一般估计要窄，这是使人们对它感兴趣的原因之一。
- 如果 U 粒子是通过强相互作用衰变到实验所观察到的这些衰变道的，我们就可以利用强相互作用所遵循的守恒定律由这些衰变道的性质来推测 U 粒子的性质，结果为：
- 重子数 $b = 1 + (-1) + 0 = 0$
- 奇异数 $S = (-1) + 0 + 0 = -1$
- 同位旋 $I = 1/2 + 0 + 1 = 1/2$ 或 $3/2$

利用盖尔曼-西岛关系可以定出U粒子各分量的同位旋第三分量的值 $I_3 = Q - (b+S)/2$

$$I_3 = 3/2 \Rightarrow U^+$$

$$I_3 = 1/2 \Rightarrow U^0$$

$$I_3 = -1/2 \Rightarrow U^-$$

由此可见， U 粒子的同位旋只能为 $I = 3/2$

同时还应能发现 $I_3 = -3/2$ 的 U^{--} 粒子。其后不久前苏联Serpukhov实验室用中子打靶的实验中看到了 U 粒子，除了CERN观察到的衰变道外，他们在实验中还观察到了

$I_3 = -3/2$ 的 U^{--} 粒子，它衰变为 $\Lambda p^- \pi^-$ ，

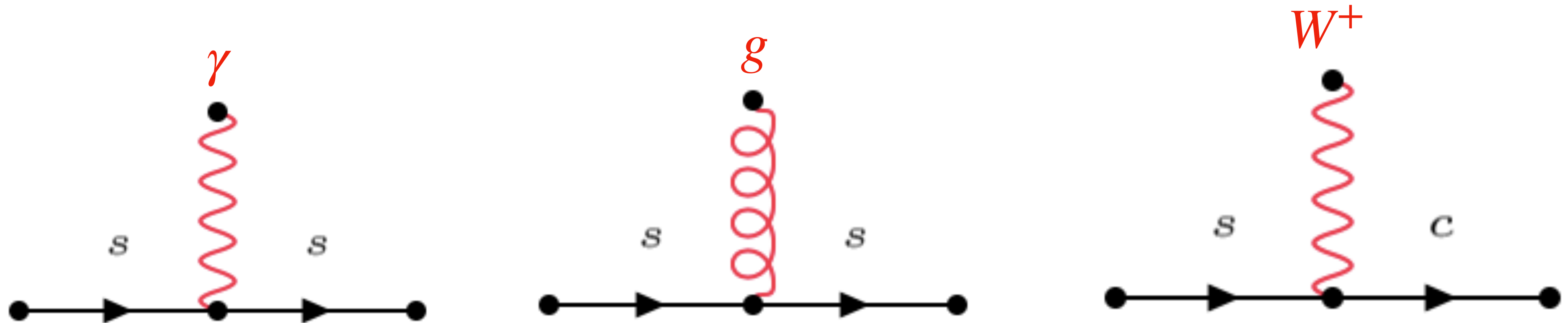
这完全符合根据盖尔曼-西岛关系给出的预言。

基础理论层面对“**奇异数**”的理解（剧透）

- Λ^0 , K^0 等奇异粒子都是**强子**，而在**夸克模型**中强子是由夸克构成的。
- 夸克模型告诉我们奇异数非零的强子都包含有**奇异夸克**（strange quark）。
- 而目前广泛定义的奇异数实际上表示的是**反奇异夸克**的数量。
- 例如：
$$S[\Lambda^0(uds)] = -1, \quad S[K^0(d\bar{s})] = +1$$
$$S[\Xi^0(uss)] = -2, \quad S[K^+(u\bar{s})] = +1$$
- 由于重子是三个夸克构成（qqq），因此重子的奇异数一定有 $S \leq 0$ ，而反重子的奇异数 $S \geq 0$ 。

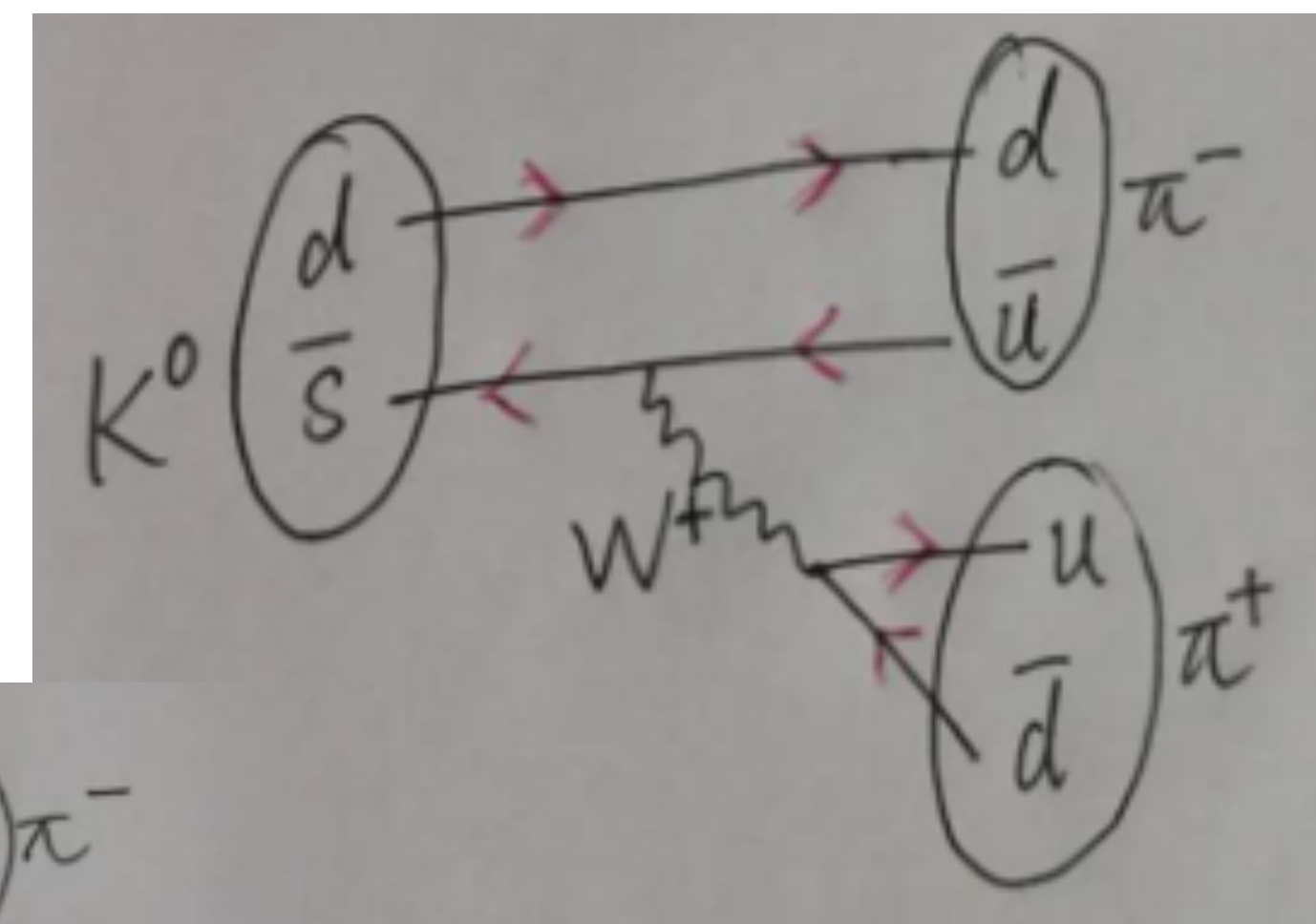
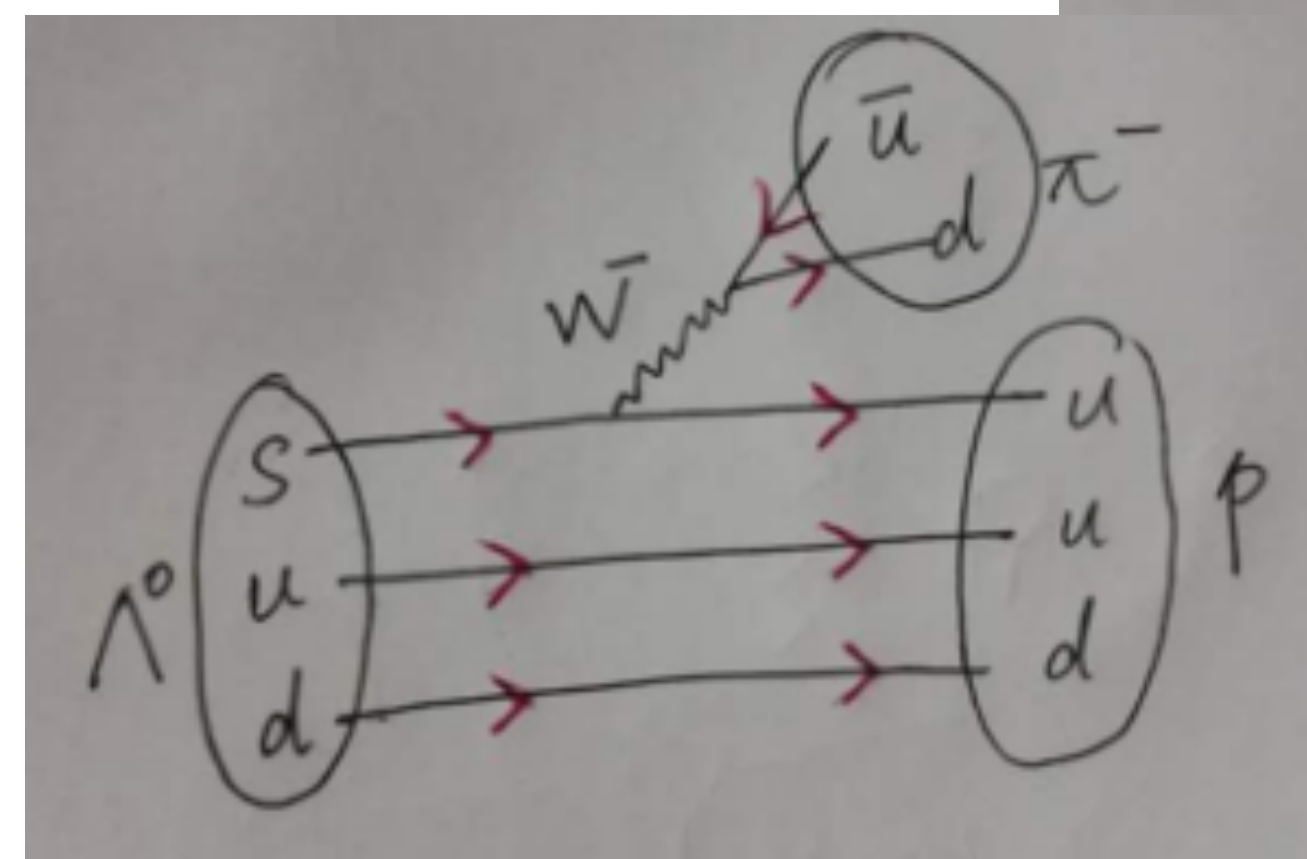
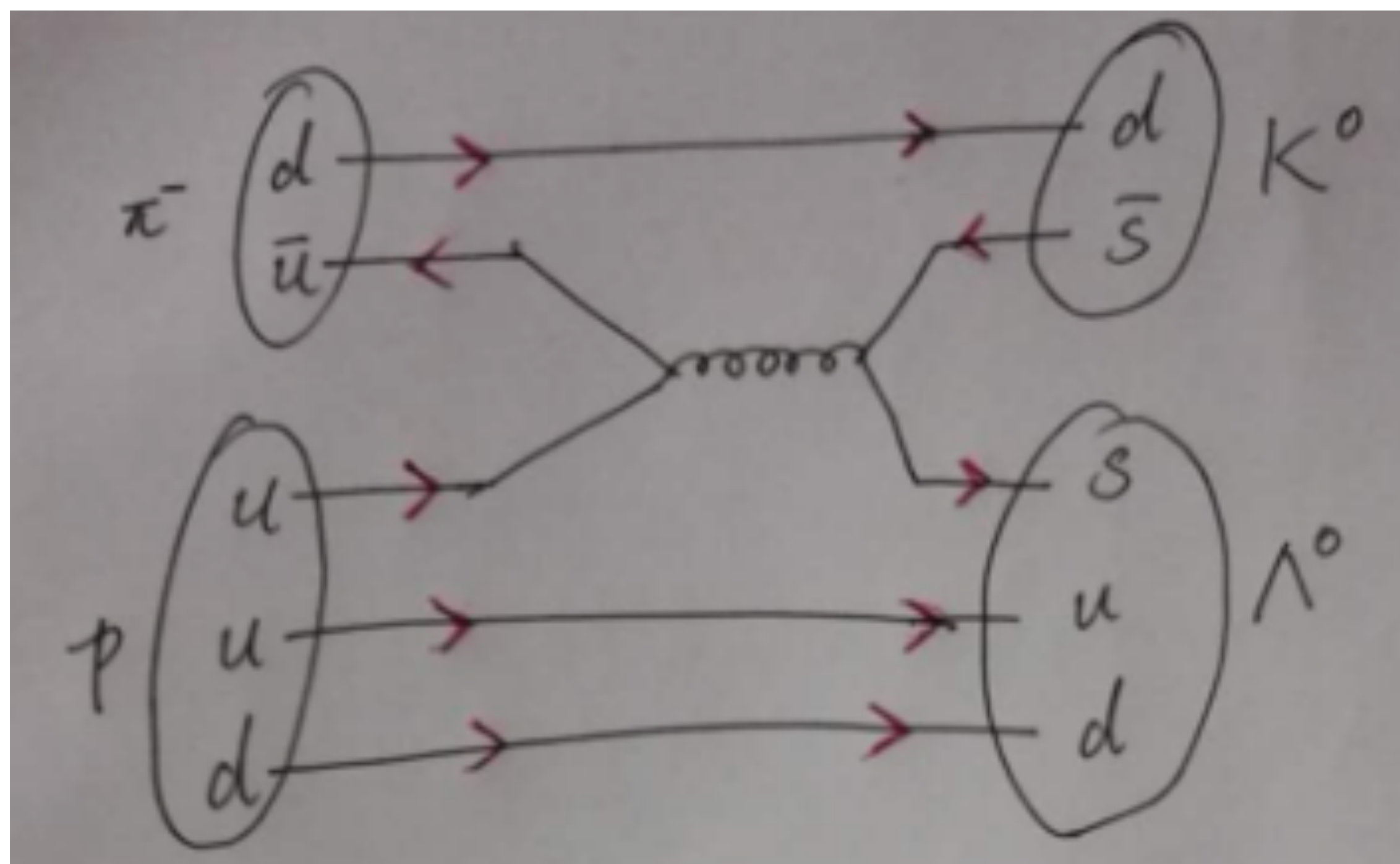
基础理论层面对“奇异数”的理解（剧透）

- 也正因为强相互作用和电磁相互作用不会改变夸克味道，则也就保持有奇异数守恒。
- 而弱相互作用中的带电流会改变夸克味道，因此也就会破坏奇异数守恒。



基础理论层面对“奇异数”的理解（剧透）

- 那么 $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ 过程中发生了什么？
- $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ 和 $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ 的过程中又发生了啥？



基础理论层面对“重子数”的理解（剧透）

- 夸克模型中，重子是 qqq ，介子是 $q\bar{q}$ ，因此重子数守恒某种程度上就是费曼图中的费米子线守恒。

