



2.1 อนุภาคมูลฐาน

2.1.1 ความเป็นมาและการจำแนกชนิดของอนุภาคมูลฐาน

ในราวปี ค.ศ. 1930 อนุภาคมูลฐานที่รู้จักกันดี คือ อิเล็กตรอน, โปรตอน และนิวตรอน งานของดิแรก (Dirac) ในปี ค.ศ. 1928 เกี่ยวกับทฤษฎีสัมพันธภาพของอิเล็กตรอน ให้นำไปสู่การทำนายว่ามีอนุภาคซึ่งเรียกว่าปฏิอนุภาค (antiparticle) ซึ่งมีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับอนุภาคที่เคยมีอยู่ ปฏิอนุภาคตัวแรกที่พบคือ โพสิตรอน (positron) ซึ่งค้นพบในการแผ่รังสีของรังสีคอสมิก (cosmic radiation) โดยแอนเดอร์สัน (Anderson) ในปี ค.ศ. 1932 และ แบลคเคทท์กับออกเชียลินี (Blackett and Occhialini) ในปี ค.ศ. 1933 ต่อจากนั้นก็มีการค้นพบ ปฏิอนุภาคโปรตอนและปฏิอนุภาคนิวตรอน (antiproton and antineutron)

ต่อมาอนุภาคอื่น ๆ นอกเหนือจากที่มีอยู่ก็ถูกทำนายว่ามีอยู่จริง จากการทดลองเกี่ยวกับการสลายตัวเบตา (β -decay) ทำให้พบว่า มีการชดเชยเกี่ยวกับกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมเชิงมุมในขบวนการนี้ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1933 เพลดี (Pauli) ได้ตั้งสมมุติฐานเพื่อแก้ปัญหาที่ว่า จะต้องมียุอนุภาคอีกตัวหนึ่งซึ่งจะต้องมีมวลน้อยเหลือเกิน, ไม่มีประจุและมีสปิน (spin) เป็น $\frac{1}{2}$ ในหน่วยของ \hbar เรียกว่า นิวตริโน (neutrino) การค้นพบอนุภาคนี้เกิดขึ้นภายหลังการทำนายของเพลดี 23 ปี โดย โควาน และคณะ (Cowan et. al.) ในปี ค.ศ. 1956

ปัจจุบัน จำนวนอนุภาคมูลฐานมีอยู่ประมาณ 200 ชนิด และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ การศึกษาบทบาทของมันที่มีต่อกัน เป็นสิ่งที่ทำให้เข้าใจถึงสิ่งที่ประกอบกันเป็นของใหญ่ได้ดีขึ้น ในการศึกษาอนุภาคมูลฐาน มักจะใช้เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อวิจัยและศึกษาอนุภาคใหม่ ๆ เพิ่มขึ้น

พร้อมทั้งพิจารณาคุณสมบัติ จึงถือว่าฟิสิกส์เกี่ยวกับอนุภาคมูลฐานเป็นฟิสิกส์พลังงานสูง
(high-energy physics)

อนุภาคมูลฐานจะถูกบ่งชี้⁽³⁾ (characterized) โดยอาศัยคุณสมบัติ
ต่าง ๆ เช่น มวล (mass) สปิน (spin) ประจุ (charge) โมเมนต์แม่เหล็ก
(magnetic moment) เลขเลพตอน (lepton number) เลขแบริออน (baryon
number) และอื่น ๆ อีก แม้มวลหยุดนิ่ง (rest mass) น่าจะเป็นสิ่งที่ต่ำที่สุด เพราะมี
ค่าคงที่และมีความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานทั้งหมด (E) โมเมนตัม (p) และความเร็ว
ของอนุภาค (v) เช่น

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

การวัดปริมาณข้างบนนี้ จะหาค่ามวลออกมาได้

ส่วนสปิน หมายถึง โมเมนตัมเชิงมุมภายใน (intrinsic angular momentum)
ของอนุภาค มีหน่วยเป็น \hbar ซึ่งเท่ากับ $\frac{h}{2\pi}$ โดย h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's
constant) อนุภาคมูลฐานใดที่มีสปินเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนเต็มคี่ (half-odd integer)
จะประพฤติตัวตามกฎของเพาลี (Pauli exclusion principle) เป็นอนุภาคจำพวก
เฟอร์มิออน (fermion) เป็นไปตามสถิติของ เฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac statistics)
ส่วนอนุภาคมูลฐานใดที่มีสปินเป็นจำนวนเต็มจะไม่ประพฤติตัวตามกฎของเพาลีเป็นอนุภาคจำพวก
โบซอน (Boson) และเป็นไปตามสถิติของโบส-ไอสไตน์ (Bose-Einstein statistics)
อย่างไรก็ตามยังไม่มีตัวพารามิเตอร์ (parameter) ใดที่ใช้จำแนกชนิดและคุณสมบัติของ
อนุภาคมูลฐานใดได้อย่างแน่นอน

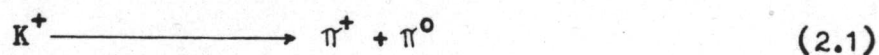
ในที่นี้จะจำแนกอนุภาคมูลฐานออกเป็น 4 ประเภท โดยให้มวลและขนาดที่สำคัญ
เป็นเกณฑ์คือ

1. โฟตอน (photon)
2. เลปตอน (lepton) หรืออนุภาคเบา
3. เมซอน (meson) หรืออนุภาคที่มีมวลปานกลาง
4. แบรีออน (baryon) หรืออนุภาคหนัก

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงชนิดของอนุภาคมูลฐานและคุณสมบัติเกี่ยวกับอายุเฉลี่ย (mean life) รูปแบบของการสลายตัว (mode of decay) ความวลของอนุภาค ซึ่งอยู่ในหน่วยเมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ (mega electron-volts) โดยได้จากการคูณมวลเมื่ออยู่นิ่งของอนุภาคด้วยความเร็วของแสงยกกำลังสองแล้วทำให้อยู่ในหน่วยเมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) ส่วนในแถวที่ 2 แสดงค่า สปิน (J) สเปเชียล แพริตี (spatial parity, P) ไอโซโทปิก สปิน (isotopic spin, I) และ จี-แพริตี (G-parity, G) สำหรับอนุภาคโบซอนที่ไม่ใช่อนุภาคประหลาด) ค่าควันตัม (quantum) เหล่านี้ถูกเขียนอยู่ในรูป $I^G(J^P)$ ตัวอย่างเช่น อนุภาคพาย-เมซอนที่เป็นกลาง (π^0 -meson) มีสัญลักษณ์ $1^-(0^-)$ หมายถึง $J = 0, P = -1, I = 1$ และ $G = -1$ รายละเอียดเกี่ยวกับ ไอโซโทปิก สปิน, ความประหลาด จะอธิบายอยู่ในหัวข้อถัดไป

อนุภาคมูลฐาน ในตารางที่ 2.1 นี้ไม่รวมถึงอนุภาคเรโซแนนซ์ (resonance particle) ซึ่งมีอายุสั้นมากคือประมาณ 10^{-23} วินาทีหรือน้อยกว่านั้น จะเป็นอนุภาคที่มีการสลายโดย นานาภวิทยาแรง (strong interaction) ซึ่งมีทั้ง อนุภาคเรโซแนนซ์ เมซอน และ อนุภาคเรโซแนนซ์ แบรีออน การวัดอนุภาคเรโซแนนซ์ไม่สามารถทำได้โดยตรง เนื่องจากมีอายุสั้นจนไม่ทำให้เกิดร่องรอยที่วัดได้ แต่การหารายละเอียดเกี่ยวกับอนุภาคนี้สามารถทำได้จากอนุภาคที่ได้จากการสลายตัว โดยสังเกตจากการกระจายของพลังงานของอนุภาคเหล่านี้ อาจเขียนกราฟระหว่างภาคตัดขวางกับพลังงาน หรือจำนวนอนุภาคที่โคกับพลังงาน ก็ได้

ตัวอย่างเช่น การสลายตัวของ อนุภาค เค-เมซอนบวก



ตารางที่ 2.1 ชนิดของอนุภาคมูลฐานและคุณสมบัติต่าง ๆ

Stable Particle Table

For additional parameters, see Addendum to this table.

Quantities in italics have changed by more than one (old) standard deviation since April 1978.

Particle	$1^G(J^P)C_n^a$	Mass (MeV) Mass ² (GeV) ²	Mean life (sec) ct (cm)	Partial decay mode		p or P _{max} ^c (MeV/c)
				Mode	Fraction ^b	
PHOTON						
γ	$0,1(1^-)$	$0(<6 \times 10^{-22})$	—	stable		
LEPTONS						
ν_e	$J=\frac{1}{2}$	$0(<0.00006)$	stable ($>3 \times 10^8 m_{\nu_e}$ (MeV))	stable		
e	$J=\frac{1}{2}$	0.5110034 ± 0.0000014	stable ($>5 \times 10^{21}$ y)	stable		
ν_μ	$J=\frac{1}{2}$	$0(<0.57)$	stable ($>2.6 \times 10^4 m_{\nu_\mu}$ (MeV))	stable		
μ	$J=\frac{1}{2}$	105.65946 ± 0.00024 $m^2 = 0.01116392$ $m_\mu - m_e = -33.9074$ ± 0.0012	2.197120×10^{-6} ± 0.000077 $ct = 6.5868 \times 10^4$	$\mu^- \rightarrow$ $e^- \bar{\nu}_e$ $e^- \bar{\nu}_e \gamma$ $e^- \gamma \gamma$ $e^- e^+ e^-$ $e^- \gamma$ $e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu$	(98.6 ± 0.4)% (1.4 ± 0.4)% (<4)% (<1.9)% (<1.9)% (<25)%	53 53 53 53 53 53
τ	$J=\frac{1}{2}$	1784 ± 4 $m^2 = 3.18$	$<2.3 \times 10^{-12}$ $ct < 0.07$	$\tau^- \rightarrow$ $\mu^- \bar{\nu}_\mu$ $e^- \bar{\nu}_e$ $e^- \bar{\nu}_e$ hadron ⁺ neutrals $\pi^- \nu$ $\rho^- \nu$ K ⁻ neutrals $e^- \gamma + \mu^- \gamma$ 3(hadron ⁰) neutrals $\pi^- \rho^0 \nu$ $\pi^- \pi^+ \pi^0 \nu$ (incl. $\nu \nu$) $\pi^- \pi^+ \pi^0 (\geq 0\pi^0) \nu$ (≥ 3 chgd.) neutrals e^- chgd. parts. μ^- chgd. parts.	(17.9 ± 1.5)% (17.0 ± 1.1)% (33 ± 10)% (8.2 ± 2.6)% (22 ± 4)% (small)% (<12)% (35 ± 11)% (4.2 ± 1.3)% (7 ± 5)% (18 ± 7)% (32 ± 5)% (<4)%	889 892 867 723 892 715 864 864
NONSTRANGE MESONS^d						
π^\pm	$1^-(0^-)$	139.5669 ± 0.012 $m^2 = 0.0194789$	2.6030×10^{-8} ± 0.0023 $ct = 780.4$ ($\tau^+ - \tau^-$)/ τ (0.05 \pm 0.07)% (test of CPT)	$\pi^\pm \rightarrow$ $\mu^\pm \nu$ $e^\pm \nu$ $\mu^\pm \nu \gamma$ $e^\pm \nu \pi^0$ $e^\pm \gamma$ $e^\pm \nu e^+ e^-$	100 % (1.267 ± 0.023) $\times 10^{-4}$ (1.24 ± 0.25) $\times 10^{-4}$ (1.02 ± 0.07) $\times 10^{-8}$ (5.6 ± 0.7) $\times 10^{-8}$ (<5) $\times 10^{-8}$	30 70 30 5 70 70
π^0	$1^-(0^-)$	134.9626 ± 0.039 $m^2 = 0.0182149$ $m_\pi - m_\pi^0 = 4.6043$ ± 0.0037	0.828×10^{-16} ± 0.057 S=1.8 ^e $ct = 2.5 \times 10^{-8}$	$\pi^0 \rightarrow$ $\gamma \gamma$ $\gamma e^+ e^-$ $\gamma \gamma \gamma$ $e^+ e^- e^+ e^-$ $\gamma \gamma \gamma \gamma$ $e^+ e^-$	(98.85 ± 0.05)% (1.15 ± 0.05)% (<1.5)% (3.32)% (<4)% (2.2 ± 2.4)% (-1.1)%	67 67 67 67 67 67
η	$0^+(0^-)$	548.8 ± 0.6 S=1.4 ^e $m^2 = 0.3012$	$\Gamma = (0.85 \pm 0.12)$ keV Neutral decays (71.0 ± 0.7)% S=1.1 ^e Charged decays (29.0 ± 0.7)% S=1.1 ^e	$\eta \rightarrow$ $\pi^0 \gamma$ $3\pi^0$ $\pi^+ \pi^- \pi^0$ $\pi^+ \pi^- \gamma$ $e^+ e^- \gamma$ $e^+ e^- \pi^0$ $\pi^+ \pi^-$ $e^+ e^- \pi^+ \pi^-$ $\pi^+ \pi^- \pi^0 \gamma$ $\mu^+ \mu^-$ $\mu^+ \mu^- \gamma$ $\mu^+ \mu^- \pi^0$ $e^+ e^-$	(38.0 ± 1.0)% S=1.2 ^e (3.1 ± 1.1)% S=1.2 ^e (29.9 ± 1.1)% S=1.1 ^e (23.6 ± 0.6)% S=1.1 ^e (4.89 ± 0.13)% S=1.1 ^e (0.50 ± 0.12)% (<4)% (<0.15)% (0.1 ± 0.1)% (<6)% (<0.2)% (2.2 ± 0.8)% (1.5 ± 0.8)% (<5)% (<3)%	274 258 180 175 236 274 258 236 236 175 236 253 253 211 274

Stable Particle Table (cont'd)

Particle $1^G(J^P)C_n^a$	Mass (MeV) Mass ² (GeV) ²	Mean life (sec) ct (cm)	Partial decay mode		
			Mode	Fraction ^b	p or Pmax ^c (MeV/c)
STRANGE MESONS^a					
K[±] $\frac{1}{2}(0^-)$ $m_K^+ - m_K^0 = -4.01 \pm 0.13$ $S = 1.1$	493.669 ± 0.015 $m^2 = 0.24371$	1.2371×10^{-8} ± 0.0026 S=1.9 ^a $\tau = 370.9$ $(\tau^+ - \tau^-)/\tau = (.11 \pm .09)\%$ (test of CPT) $S = 1.2$	K[±] π^0	(63.50 \pm 0.16)%	236
			K[±] π^{\pm}	(21.16 \pm 0.15)%	205
			K[±] $\pi^+ \pi^-$	(5.59 \pm 0.03)% S=1.1 ^a	125
			K[±] $\pi^0 \pi^0$	(1.73 \pm 0.05)% S=1.3 ^a	133
			K[±] $\mu^+ \mu^-$	(3.20 \pm 0.09)% S=1.7 ^a	215
			K[±] $\nu \mu$	(4.82 \pm 0.05)% S=1.1 ^a	228
			K[±] $\nu \pi$	(5.8 \pm 0.7) $\times 10^{-5}$	236
			K[±] $\nu \mu \pi$	(1.8 \pm 0.7) $\times 10^{-5}$	207
			K[±] $\nu \mu \pi \pi$	(3.90 \pm 0.15) $\times 10^{-5}$	203
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi$	(< 5) $\times 10^{-7}$	203
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi$	(0.9 \pm 0.4) $\times 10^{-5}$	151
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 3.0) $\times 10^{-6}$	151
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(1.54 \pm 0.09) $\times 10^{-5}$	247
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(1.52 \pm 0.23) $\times 10^{-5}$	247
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 1.0) $\times 10^{-4}$	247
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(2.75 \pm 0.16) $\times 10^{-4}$	205
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(1.0 \pm 0.4) $\times 10^{-4}$	125
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 6) $\times 10^{-5}$	215
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(3.7 \pm 1.4) $\times 10^{-4}$	228
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(2.6 \pm 0.5) $\times 10^{-7}$	227
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 1) $\times 10^{-8}$	227
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 2.4) $\times 10^{-6}$	172
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 3.5) $\times 10^{-5}$	227
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 3.0) $\times 10^{-4}$	227
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 0.6) $\times 10^{-6}$	227
			K[±] $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 4) $\times 10^{-6}$	227
			K[±] $\nu \mu \pi$	(< 7) $\times 10^{-9}$	214
			K[±] $\nu \mu \pi$	(< 5) $\times 10^{-9}$	214
K[±] $\nu \mu \pi$	(< 6) $\times 10^{-5}$	247			
K[±] $\nu \mu \pi$	(< 6) $\times 10^{-6}$	236			
K[±] $\nu \mu \pi$	(11 \pm 3) $\times 10^{-7}$	236			
K[±] $\nu \mu \pi$	(< 2.0) $\times 10^{-8}$	236			
K[±] $\nu \mu \pi$	(2 \pm 1) $\times 10^{-7}$	247			
K⁰ $\frac{1}{2}(0^-)$ K⁰ $\frac{1}{2}(0^-)$ K_S⁰ $\frac{1}{2}(0^-)$	497.67 ± 0.13 $S = 1.1$ $m^2 = 0.24768$	$50\% K_{Short}, 50\% K_{Long}$	K⁰ π^0	(68.61 \pm 0.24)% S=1.1 ^a	206
			K⁰ π^{\pm}	(31.39 \pm 0.24)%	209
K_L⁰ $\frac{1}{2}(0^-)$ $m_{K_L} - m_{K_S} = 0.5349 \times 10^{10} \text{ h sec}^{-1}$ ± 0.0022	0.8923 $\times 10^{-10}$ ± 0.0022 $\tau = 2.675$	K_L⁰ π^0	(< 3.2) $\times 10^{-7}$	225	
		K_L⁰ π^{\pm}	(< 3.4) $\times 10^{-4}$	249	
		K_L⁰ $\pi^+ \pi^- \gamma$	(1.85 \pm 0.10) $\times 10^{-3}$	206	
		K_L⁰ $\gamma \gamma$	(< 0.4) $\times 10^{-3}$	249	
		K_L⁰ $\pi^0 \pi^0$	(21.5 \pm 0.7) % S=1.3 ^a	139	
		K_L⁰ $\pi^+ \pi^-$	(12.39 \pm 0.18) % S=1.2 ^a	133	
		K_L⁰ $\pi^0 \pi^0 \pi^0$	(27.0 \pm 0.5) % S=1.1 ^a	216	
		K_L⁰ $\pi^+ \pi^- \pi^0$	(38.8 \pm 0.5) % S=1.1 ^a	229	
		K_L⁰ $\nu \mu \pi$ (incl. $\nu \nu \gamma$)	(1.3 \pm 0.8) %	229	
		K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi$	(0.203 \pm 0.005) %	206	
		K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi$	(0.094 \pm 0.018) % S=1.5 ^a	209	
		K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi \pi$	(6.0 \pm 2.0) $\times 10^{-5}$	206	
		K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 2.4) $\times 10^{-4}$	231	
		K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(4.9 \pm 0.5) $\times 10^{-4}$	249	
		K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 2.0) $\times 10^{-9}$	238	
		K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(9.1 \pm 1.9) $\times 10^{-9}$	225	
		K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 7.8) $\times 10^{-6}$	225	
		K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 5.7) $\times 10^{-5}$	177	
K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 2.0) $\times 10^{-9}$	249			
K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 2.8) $\times 10^{-5}$	249			
K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 8.8) $\times 10^{-6}$	206			
K_L⁰ $\nu \mu \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi \pi$	(< 2.2) $\times 10^{-3}$	207			



ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Stable Particle Table (cont'd)

Particle $I^G(J^P)C_n^a$	Mass (MeV) Mass ² (GeV) ²	Mean life (sec) ct (cm)	Partial decay mode		p or Pmax ^c (MeV/c)
			Mode	Fraction ^b	
CHARMED MESONS^a					
D^\pm	$\frac{1}{2}(0^-)$ 1868.3 ^f ± 0.9 $m^2 = 3.491$ $m_{D^\pm} - m_{D^0} = 5.0 \pm 0.8$	$(2.5^{+3.5}_{-1.5}) \times 10^{-13}$ $\tau = 0.007$	$D^{+/-} \rightarrow d$		
			K^- anything	(10 ± 7)%	
			$K^+ n^+ \pi^0$ (incl. $K^+ \pi$)	(3.9 ± 1.0)%	845
			$K^+ (892) 0 \pi^+$	(seen)	456
			$K^- K^+ \pi^+$	(< 0.6)%	743
			R^0 anything	(39 ± 29)%	
			$R^0 \pi^+$	(1.5 ± 0.6)%	862
			e^+ anything	m (8.2 ± 1.2)%	
			$\pi^+ \pi^+ \pi^-$	(< 0.31)%	908
			K^+ anything	(6 ± 6)%	
$K^+ n^+ \pi^-$	(< 0.20)%	845			
D^0 \bar{D}^0	$\frac{1}{2}(0^-)$ 1863.1 ^f ± 0.9 $m^2 = 3.471$ $\frac{\Gamma(D^0 \rightarrow \bar{D}^0 + K^+ \pi^-)}{\Gamma(D^0 \rightarrow K \pi)} < 0.16$	$(3.5^{+3.5}_{-1.7}) \times 10^{-13}$ $\tau = 0.01$	$D^0 \rightarrow d$		
			K^+ anything	(35 ± 10)%	860
			$K^+ n^+$	(1.8 ± 0.5)%	843
			$K^+ n^+ \pi^0$	(12 ± 6)%	812
			$K^+ n^+ \pi^+$	(3.5 ± 0.9)%	
			$K^+ n^+ \pi^-$	(57 ± 26)%	859
			R^0 anything + K^0 any	(< 6)%	841
			$R^0 n^0 + K^0 n^0$	(4.4 ± 1.1)%	
			$R^0 n^+ \pi^- + K^0 n^+ \pi^-$	m (8.2 ± 1.2)%	921
			e^+ anything	(5.9 ± 3.2) $\times 10^{-4}$	790
$\pi^+ \pi^-$	(2.0 ± 0.8) $\times 10^{-3}$				
$K^+ K^-$					
NONSTRANGE BARYONS^a					
p	$\frac{1}{2}(+\frac{1}{2})$ 938.2796 ± 0.0027 $m^2 = 0.880369$	stable ($> 10^{30}$ y)	stable		
			$ q_p - q_n < 10^{-21} q_n ^n$		
n	$\frac{1}{2}(+\frac{1}{2})$ 939.5731 ± 0.0027 $m^2 = 0.882798$ $m_p - m_n = -1.29343 \pm 0.00004$	917 ± 14 $\tau = 2.75 \times 10^{13}$	$pe^- \bar{\nu}$	100 %	1
			$p\nu \bar{\nu}$ (chg. noncons.)	(< 3) $\times 10^{-19}$	1
$ q_n < 10^{-21} q_n ^n$					
STRANGENESS -1 BARYONS^a					
Λ	$0(\frac{1}{2}^+)$ 1115.60 ± 0.05 $S = 1.2^g$ $m^2 = 1.2446$ $m_\Lambda - m_\Sigma = -76.86 \pm 0.98$	2.632×10^{-10} ± 0.020 $S = 1.6^g$ $\tau = 7.89$	pn^0	(64.2 ± 0.5)%	100
			nn^0	(35.8 ± 0.5)%	104
			$pe^- \bar{\nu}$	(8.07 ± 0.28) $\times 10^{-4}$	163
			$p\nu \bar{\nu}$	(1.57 ± 0.35) $\times 10^{-4}$	131
			$pn^- \gamma$	g (0.85 ± 0.14) $\times 10^{-3}$	100
Σ^+	$1(\frac{1}{2}^+)$ 1189.36 ± 0.06 $S = 1.8^g$ $m^2 = 1.4146$ $m_\Sigma^+ - m_\Sigma^- = -7.98 \pm 0.08$ $S = 1.2^g$	0.800×10^{-10} ± 0.04 $\tau = 2.40$	pn^0	(51.64 ± 0.30)%	189
			nn^0	(48.36 ± 0.30)%	185
			$p\gamma$	(1.24 ± 0.18) $\times 10^{-3}$	$S = 1.4^g$ 225
			$nn^+ \gamma$	g (0.93 ± 0.10) $\times 10^{-3}$	185
			$\Lambda e^+ \nu$	(2.02 ± 0.47) $\times 10^{-5}$	71
			$\Lambda \mu^+ \nu$	(< 3.0) $\times 10^{-5}$	202
			$\Lambda e^+ e^-$	(< 0.5) $\times 10^{-5}$	224
$pe^+ e^-$	(< 7) $\times 10^{-6}$	225			
Σ^0	$1(\frac{1}{2}^+)$ 1192.46 ± 0.08 $m^2 = 1.4220$	5.8×10^{-20} ± 1.3 $\tau = 1.7 \times 10^{-9}$	$\Lambda \gamma$	100 %	74
			$\Lambda e^+ e^-$	g (5.45 ± 0.5) $\times 10^{-3}$	74
$\Lambda \gamma \gamma$	(< 3) %	74			
Σ^-	$1(\frac{1}{2}^+)$ 1197.34 ± 0.05 $m^2 = 1.4336$ $m_\Sigma^0 - m_\Sigma^- = -4.88 \pm 0.6$	1.482×10^{-10} ± 0.11 $S = 1.3^g$ $\tau = 4.44$	nn^-	100 %	193
			$ne^- \bar{\nu}$	(1.08 ± 0.04) $\times 10^{-3}$	230
			$n\nu \bar{\nu}$	(0.45 ± 0.04) $\times 10^{-3}$	210
			$\Lambda e^- \bar{\nu}$	(0.61 ± 0.05) $\times 10^{-4}$	79
			$nn^- \gamma$	g (4.6 ± 0.6) $\times 10^{-4}$	193

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Stable Particle Table (cont'd)

Particle	$I^G(J^P)C_n^a$	Mass (MeV) Mass ² (GeV) ²	Mean life (sec) ct (cm)	Partial decay mode		p or P _{max} c (MeV/c)
				Mode	Fraction ^b	
STRANGENESS -2 BARYONS^a						
Ξ^0	$\frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)^0$	1314.9 ±0.6 m ² =1.7290	2.90×10 ⁻¹⁰ ±.10 ct=0.69	Λπ ⁰	100 %	135
				Λγ	(0.5 ±0.5)%	184
				Γ ⁰ γ	(<7)%	117
				pπ ⁻	(<3.6)	299
				pπ ⁻ ν	(<1.3)	323
				Γ ⁺ e ⁻ ν	(<1.1)	120
				Γ ⁺ e ⁻ ν	(<0.9)	112
				Γ ⁺ μ ⁻ ν	(<1.1)	64
				Γ ⁺ μ ⁻ ν	(<0.9)	49
				πμ ⁻ ν	(<1.3)	309
Ξ^-	$\frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)^0$	1321.32 ±0.13 m ² =1.7459	1.641×10 ⁻¹⁰ ±.016 ct=4.92	Λπ ⁻	100 %	139
				Λπ ⁻ ν	(2.8 ±1.2)	180
				Γ ⁰ e ⁻ ν	(<5)	123
				Λμ ⁻ ν	(3.1 ±1.2)	163
				Γ ⁰ μ ⁻ ν	(<8)	70
				nπ ⁻	(<1.1)	303
				nπ ⁻ ν	(<3.2)	327
				nμ ⁻ ν	(<1.5)	313
				Γ ⁻ γ	(<1.2)	118
				pπ ⁻ π ⁻	(<4)	223
pπ ⁻ e ⁻ ν	(<4)	304				
pπ ⁻ μ ⁻ ν	(<4)	250				
Σ ⁰ e ⁻ ν	(<2.3)	6				
STRANGENESS -3 BARYON^a						
Ω^-	$0(\frac{1}{2}^+)^0$	1672.22 ±.31 m ² =2.7963	0.82×10 ⁻¹⁰ ±.03 ct=2.5	ΛK ⁻	(68.6 ±1.3)%	211
				Γ ⁰ π ⁻	(23.4 ±1.3)%	293
				Γ ⁰ n ⁰	(8.0 ±0.8)%	290
				Γ ⁰ e ⁻ ν	(~1)	319
				Σ(1530) ⁰ π ⁻	(~2)	15
				Λπ ⁻	(<1.3)	449
				Γ ⁻ γ	(<3.1)	314
NONSTRANGE CHARGED BARYON^a						
Λ_c^+	$0(\frac{1}{2}^+)^+$	2273 ±6 S=1.6 ^b m ² = 5.17	~7×10 ⁻¹³ ct=0.02	Λπ ⁺ π ⁺ π ⁻	(seen)	798
				pK ⁺ π ⁺	(2.2 ±1.0)%	814
				pK ⁺ (892) ⁰	(seen)	567
				Δ(1232) ⁺⁺ K ⁻	(seen)	700

↓
↓
↓
↓

Stable Particle Table (cont'd)

- * Indicates an entry in the Stable Particle Data Card Listings not entered in the Stable Particle Table. This is the case for ν_τ , for the charmed-strange meson F^0 , and for listings of searches for heavy leptons other than τ^0 , intermediate boson searches, quark searches, magnetic monopole searches, charm searches, and other particle searches.
- $S = \text{Scale factor} = \sqrt{\chi^2/(N-1)}$, where N = number of experiments. S should be ≈ 1 . If $S > 1$, we have enlarged the error of the mean, $\delta\bar{x}$, i.e., $\delta\bar{x} \rightarrow S\delta\bar{x}$. This convention is still inadequate, since if $S \gg 1$ the experiments are probably inconsistent, and therefore the real uncertainty is probably even greater than $S\delta\bar{x}$. See text, and ideograms in Stable Particle Data Card Listings.
- † Square brackets indicate a subreaction of the previous (unbracketed) decay mode.

a. The baryon number B , strangeness S , and charm C of the hadrons which appear in the tables are as follows:

Mesons ($B=0$)	S	C	Baryons ($B=1$)	S	C
π, η	0	0	p, n	0	0
K^+, K^0	+1	0	Λ, Σ	-1	0
K^-, \bar{K}^0	-1	0	Ξ	-2	0
D^+, D^0	0	+1	Ω^-	-3	0
D^-, \bar{D}^0	0	-1	Λ_c^+	0	+1

- b. Quoted upper limits correspond to a 90% confidence level.
- c. In decays with more than two bodies, p_{max} is the maximum momentum that any particle can have.
- d. For simplicity, decay mode charge states are written for the particle shown. For antiparticle modes all particles must be charge conjugated.
- e. See Stable Particle Data Card Listings for energy limits used in this measurement.
- f. Quantum numbers shown are favored but not yet established. See Data Card Listings.
- g. Theoretical value; see also Stable Particle Data Card Listings.
- h. See note in Stable Particle Data Card Listings.
- i. Structure-dependent part with positive (SD^+) and negative (SD^-) photon helicity.
- j. The direct emission branching fraction is $(1.56 \pm .35) \times 10^{-5}$.
- k. The $K_S^0 \rightarrow \pi\pi$ and $K_L^0 \rightarrow \pi\pi$ rates (and branching fractions) are from independent fits and do not include results of $K_L^0 - K_S^0$ interference experiments. The $|\eta_{+-}|$ and $|\eta_{00}|$ values given in the addendum are these rates combined with the $|\eta_{+-}|$ and $|\eta_{00}|$ results from interference experiments.
- l. Error does not include 0.13% uncertainty in the absolute SPEAR energy calibration. Assumes $m_\psi = 3095$ MeV.
- m. This is a weighted average of D^0 (44%) and D^+ (56%) branching fractions.
- n. Limit from neutrality-of-matter experiments. Assumes $|q_n| = |q_p| = |q_e|$.
- p. J^P not measured for Σ^0 . Assumed same as Σ^+ to allow isotriplet association.
- q. J^P for Σ and J^P for Ω^- not yet measured. Values shown are SU(3) predictions.
- r. J^P for Λ_c^+ not yet measured. Values shown are SU(4) predictions.
- s. $|g_A/g_V|$ defined by $g_A^2 = |C_A|^2 + |C_V|^2$, $g_V^2 = |C_V|^2 + |C_A|^2$, and $\Gamma(\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-) / \Gamma(\psi \rightarrow e^+ e^-) = (g_A/g_V)^2$; ϕ defined by $\cos \phi = -\text{Re}(C_A^* C_V + C_A C_V^*) / |g_A g_V|$ [for more details, see text Section VI A].
- t. The definition of the slope parameter of the Dalitz plot is as follows [see also text Section VI B.1]:

$$|M|^2 = 1 + \delta \left(\frac{s_1 - s_0}{m_{\pi^+}^2} \right)$$
- u. The definition for the CP violation parameters is as follows [see also text Section VI B.3]:

$$\eta_{+-} = |\eta_{+-}| e^{i\phi_{+-}} = \frac{A(K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{A(K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)}, \quad \eta_{00} = |\eta_{00}| e^{i\phi_{00}} = \frac{A(K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0)}{A(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0)}$$

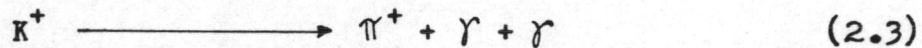
$$\delta = \frac{\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) - \Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) + \Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)}, \quad |\eta_{+-}|^2 = \frac{\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)_{CP \text{ viol.}}}{\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)}, \quad |\eta_{00}|^2 = \frac{\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0)_{CP \text{ viol.}}}{\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0)}$$
- v. The definition of these quantities is as follows [for more details on sign convention, see text Section VI B]:

$$\alpha = \frac{2|s||p|\cos\delta}{|s|^2 + |p|^2} \quad \left| \begin{array}{l} \beta = \sqrt{1 - \alpha^2} \sin\phi \\ \gamma = \sqrt{1 - \alpha^2} \cos\phi \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} g_A/g_V \text{ defined by } (B_1) \gamma_\lambda (B_V - g_A \gamma_5) B_1 \\ \delta \text{ defined by } g_A/g_V = |g_A/g_V| e^{i\delta} \end{array} \right.$$
- w. For limits on electric dipole moment of n and Λ , see Data Card Listings.

π^0 จะสลายตัวอย่างรวดเร็ว คือประมาณ 10^{-16} วินาที ($\tau = 0.8 \times 10^{-16}$ วินาที) เป็น



ระยะทางที่ π^0 มีชีวิตอยู่และเคลื่อนที่ไปนั้นสั้นมาก ไม่สามารถสังเกตได้ในห้องฟอง จะปรากฏคล้ายกับว่า K^+ สลายตัวทีเดียวเป็น



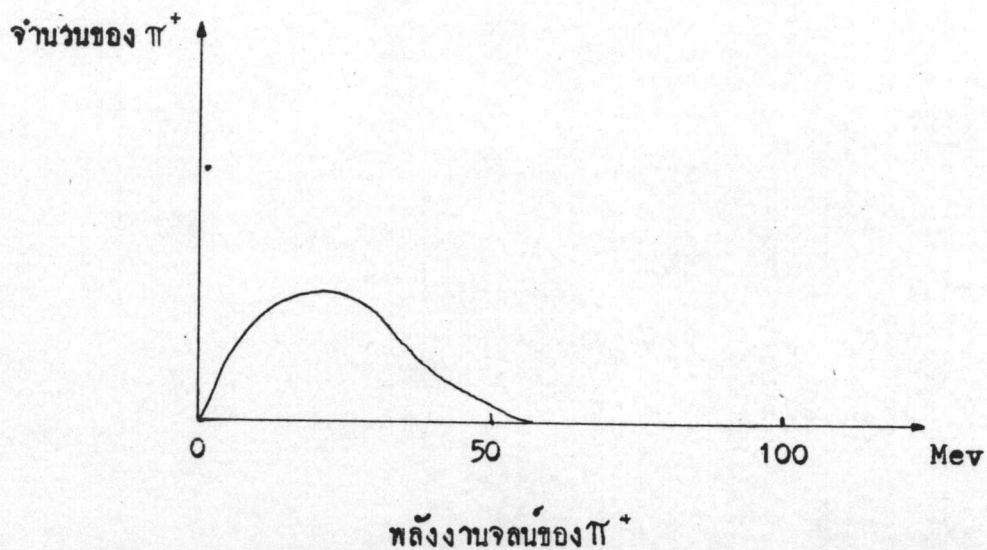
ถ้าเขียนกราฟการกระจายของพลังงานของ π^+ โดยคิดว่าการสลายตัวของ K^+ นั้น เกิดขึ้นขึ้นเดียวตามสมการ (2.3) จะได้กราฟดังรูป (2.1)

แต่ถ้าพิจารณาการสลายตัวของ K^+ เป็นสองขั้นตามสมการ (2.1) และ (2.2) ก็จะได้กราฟดังรูป (2.2) ซึ่งมีผลตรงกับการทดลอง ทั้งนี้จึงสรุปได้ว่า K^+ นั้นมีการสลายตัว 2 ขั้น ให้กราฟที่มีลักษณะเป็นยอดแหลม แม้ว่า π^0 จะไม่ใช่ออนุภาคเรโซแนนซ์ คือเป็นอนุภาค เพราะการสลายตัวใช้เวลามากกว่า 10^{-23} วินาที แต่ก็สามารถอาศัยวิธีการพิจารณาเช่นเดียวกันนี้หาอนุภาคเรโซแนนซ์ได้ เพราะอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคที่ให้กราฟที่มียอดแหลม (sharp peak or resonance) นี้ เรียกว่า อนุภาคเรโซแนนซ์

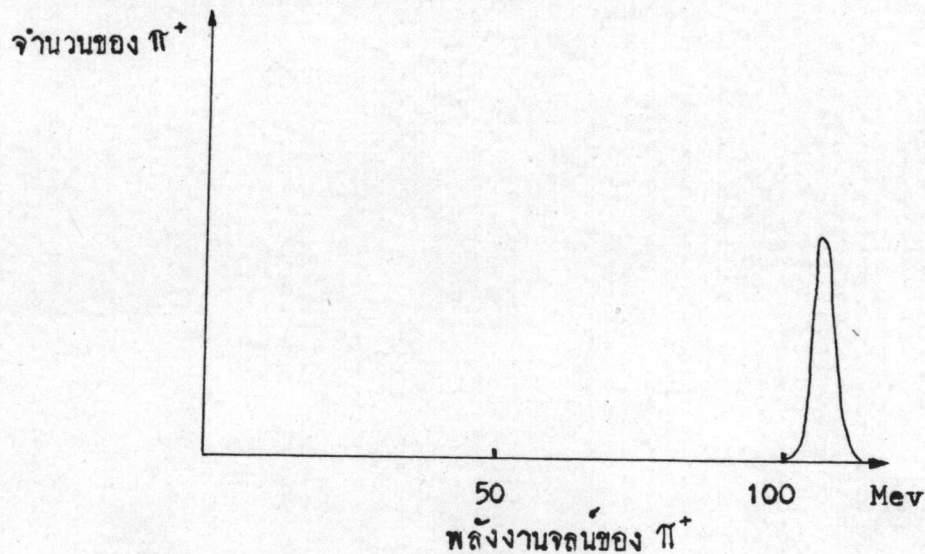
2.1.2 ไอโซโทปิก สปิน และเลขแบริออน

คัมเบิลยู ไฮเซนเบิร์ก (W. Heisenberg) ได้เสนอว่า โปรตอน และนิวตรอน สามารถจะคิดว่าเป็นสถานะ (state) ที่แตกต่างกันของอนุภาคชนิดเดียวกันคือ นิวคลีออน (nucleon) และเพื่อที่จะแบ่งแยกชนิดของโปรตอนและนิวตรอนออกจากกัน เขาจึงเสนอเลขควมัมขึ้นตัวหนึ่งเรียกว่า ไอโซโทปิก สปิน ซึ่งมีค่าเป็น $\frac{1}{2}$ สำหรับนิวคลีออน ใช้สัญลักษณ์ย่อ I

เมื่อไอโซโทปิก สปิน มีค่าเป็น $+\frac{1}{2}$ สถานะนั้นคือ โปรตอน
และเมื่อไอโซโทปิก สปิน มีค่าเป็น $-\frac{1}{2}$ สถานะนั้นคือ นิวตรอน



รูปที่ 2.1 การกระจายของพลังงานจลน์ของ π^+ กับจำนวน π^+ เมื่อ K^+ มีการสลายตัวชั้นเดียวตามสมการที่ (2.3)



รูปที่ 2.2 การกระจายของพลังงานจลน์ของ π^+ กับจำนวน π^+ เมื่อ K^+ มีการสลายตัว 2 ชั้น ตามสมการ (2.1) และ 2.2)

จากการที่มี นิวคลีออน 2 ชนิด คือ โปรตอน และนิวตรอนเรียกว่าเกิด ไอโซโทปิก คัมเบต (isotopic doublet) ค่าไอโซโทปิก สปิน $+\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$ นี้เรียกว่า แชน คอมโพเนนต์ หรือ แชน โปรเจกชัน (z - component or z - projection) ของไอโซโทปิก สปิน—ซึ่งคล้ายกับเรื่อง สปิน ที่มีการโปรเจกชันสปินในทิศทางของสนามแม่เหล็ก ที่เรียกว่า แชน คอมโพเนนต์ ซึ่งเป็นค่าควันไทซ์ (quantized) และเป็นจำนวนเต็ม แชน คอมโพเนนต์ ของไอโซโทปิก สปิน ก็มีค่าควันไทซ์เช่นกัน แต่ไม่จำเป็นต้องเป็นจำนวนเต็ม และแต่ละสถานะจะมีค่าแตกต่างกันอยู่เท่ากับ 1 เสมอ พร้อมทั้งมีการตกลงเกี่ยวกับทิศทางของ แชน คอมโพเนนต์ ในไอโซโทปิก สเปซ (isotopic space) ไว้แน่นอนด้วย

มีข้อสงสัยเกี่ยวกับ ไอโซโทปิก สปิน ว่าทำให้คิดถึงเรื่องไอโซโทป (isotope) และการหมุน (spin) ทั้งที่ความจริงแล้ว โปรตอนและนิวตรอนไม่ได้เป็นธาตุ ไอโซโทปของกันเลย เพราะไอโซโทปนั้นหมายถึง ธาตุที่มีประจุเท่ากันแต่มวลต่างกัน ในขณะที่ โปรตอนและนิวตรอนมีประจุต่างกันแต่มวลเกือบเท่ากัน (แตกต่างกันอยู่ 3 เท่าของมวลอิเล็กตรอน หรือ 0.16 %) ซึ่งน่าจะเรียกว่า ไอโซบาร์มากกว่า ที่มีความหมายถึง ธาตุที่มีมวลเท่ากัน แต่ประจุต่างกัน ดังนั้น ในบางครั้งจึงมีการแทนค่า ไอโซโทปิก สปิน ด้วย ไอโซบาร์ค สปิน (isobaric spin) ส่วนคำว่า สปิน นั้นก็ไม่ได้ให้ความหมายแตกต่างอะไรเกี่ยวกับการหมุนของ ทั้งโปรตอนและนิวตรอนเลย

สำหรับนิวคลีออน ค่าประจุ (Q) จะมีความสัมพันธ์กับ แชน คอมโพเนนต์ ของไอโซโทปิก สปิน ด้วยสมการ

$$Q = \frac{1}{2} + I_z \quad (2.4)$$

โดย I_z คือ แชน คอมโพเนนต์ของไอโซโทปิก สปิน

เมื่อแทนค่า I_z ลงไป ก็จะได้ค่าประจุของโปรตอนเท่ากับ 1 และของนิวตรอนเท่ากับ 0 สำหรับแอนตินิวคลีออนคือ แอนติโปรตอน และแอนตินิวตรอน ก็มีค่า ไอโซโทปิก สปิน เป็น $\frac{1}{2}$ โดยที่

แอนติโปรตอน มีค่า I_z เป็น $-\frac{1}{2}$

แอนตินิวตรอน มีค่า I_z เป็น $+\frac{1}{2}$

ทั้งคู่เป็น ไอโซโทปิก คับเบลท มีความสัมพันธ์ระหว่างประจุและ I_z

ดังนั้นคือ

$$Q = -\frac{1}{2} + I_z \quad (2.5)$$

ส่วน พาย เมซอน (π -meson) มีไอโซโทปิก สปิน เป็น 1 ซึ่งทำให้เกิด แชนท์ คอมโพเนนท์ 3 ค่า ที่มีค่าแตกต่างกันเท่ากับ 1 คือ $-1, 0, +1$ ซึ่งสอดคล้องกับ พาย เมซอน 3 ตัว คือ π^-, π^0, π^+ ตามลำดับ ดังนั้น พาย เมซอน จึงเป็นไอโซโทปิก สปิน ทริเพลท (isotopic triplet)

ค่าประจุของ พาย เมซอนเกี่ยวข้องกับค่า แชนท์ คอมโพเนนท์ของไอโซโทปิก สปิน คือ

$$Q = I_z \quad (2.6)$$

ได้มีการกำหนดค่าขึ้นอีกค่าหนึ่ง เรียกว่า เลขแบริออน (baryon number) โดยกำหนดว่า

อนุภาคที่จัดอยู่ในจำพวกแบริออนจะมีเลขแบริออน เป็น $+1$

ปฏิอนุภาคของ แบริออน จะมีเลขแบริออน เป็น -1

อนุภาคใดที่ไม่ใช่จำพวกแบริออน จะมีเลขแบริออนเป็น 0

เมื่อพิจารณาถึงโปรตอน และนิวตรอน ซึ่งเป็นอนุภาคแบริออนเป็น 1 ความสัมพันธ์ ซึ่งมีเลขแบริออนเข้ามาเกี่ยวข้องกับ Q ก็จะเป็น

$$Q = \frac{1}{2} B + I_z \quad (2.7)$$

เมื่อ B คือ เลขแบริออน

สมการ (2.7) ก็คือสมการ (2.4) ในกรณีของนิวคลีออนและจะเป็นสมการ (2.5) ในกรณีของแอนตินิวคลีออน ส่วน พาย เมซอน นั้นไม่ใช่แบริออน แต่เป็น เมซอน จึงมีเลขแบริออนเป็น 0 เมื่อแทนค่าลงในสมการ (2.7) ก็จะได้สมการ (2.6) นั้นเอง

สำหรับ เค เมซอนนั้นก็เช่นเดียวกับ นิวคลีออนที่แบ่งเป็น 2 ไอโซโทปิก คัมเบลท คือมี K^+ กับ K^0 เป็นสองสถานะที่แตกต่างกัน มีค่า แชน คอมโพเนนท์ เป็น $+\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$ ตามลำดับ ส่วนปฏิอนุภาคของมันคือ \bar{K}^+ และ \bar{K}^0 มีค่า แชน คอมโพเนนท์ $-\frac{1}{2}$ และ $+\frac{1}{2}$ ตามลำดับ แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง ประจุกับ แชน คอมโพเนนท์ นั้นแตกต่างออกไปจากที่กล่าวมาแล้ว เพราะ เค เมซอน จัดอยู่ในพวกอนุภาคประหลาด (strange particle) จะต้องมี ค่าควันตัมที่กำหนดขึ้นมาเพิ่มอีกตัวหนึ่ง ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.1.3

2.1.3 อนุภาคประหลาดและเลขประหลาด (4)

ภายหลังจากการค้นพบอนุภาค พาย เมซอน ไม่นานนักก็ได้พบอนุภาคอีกชนิดหนึ่ง โดย โรเชสเตอร์ และ บัทเลอร์ (Rochester and Butler) ในปี ค.ศ. 1947 จากภาพรอยวิ่งของอนุภาคบนฟิล์มที่ถ่ายจากห้องเมฆ โดยการวิ่งผ่านของรังสีคอสมิก อนุภาคชนิดนี้มีมวลประมาณ 1000 เท่าของมวลอิเล็กตรอน และสลายให้อนุภาคสองตัว เกิดร่องรอยในลักษณะของรูปตัววี (V) จึงเรียกอนุภาคชนิดนี้ ตามลักษณะการสลายตัวว่า อนุภาควี (V-particle) แต่ต่อมาเรียกว่า อนุภาคประหลาด (strange particle) เพราะอนุภาคนี้จะเกิดขึ้นจาก นานาการियाแรงซึ่งมีพลังงานสูงและไม่เสถียร โดยจะสลายตัวไปโดยนานาการियाอ่อน (weak interaction) เมื่อมีการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูงขึ้น การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับอนุภาคประหลาดนี้จึงสามารถกระทำได้ในห้องทดลอง และพบว่า อนุภาคประหลาดแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ

1. ไฮเปอรอน (hyperon) เป็นอนุภาคที่หนักกว่านิวคลีออน และสลายตัวให้นิวคลีออนมีเลขแบริออนเป็น 1 สปิน เป็น $\frac{1}{2}$ เป็นพวก เพอร์มิออน ได้แก่ อนุภาคแลมดา, ซิกมา, ไช และโอเมกา (λ , Σ , χ and Ω)

2. เคมีซอน (K - meson) หรือ เคออน (Kaon) เป็นพวกโบซอนที่มีสปินเป็น 0 มีมวล 967 เท่าของมวลอิเล็กตรอน ได้แก่ K^+ , K^- และ เคออนที่เป็นกลางอีก 2 ชนิดคือ K_1^0 และ K_S^0 ซึ่งมีอายุเฉลี่ยต่างกัน

จากการที่ทราบว่า อนุภาคชนิดหนึ่งสามารถมีได้หลายสถานะ เกิดเป็น ไอโซโทปิกมัลติเพลท ขึ้น (isotopic multiplet) และในแต่ละสถานะก็มีประจุต่างกันออกไป จึงมีการคิดถึงศูนย์กลางประจุ (charge center) ของแต่ละไอโซโทปิก มัลติเพลท โดยที่

$$\text{ศูนย์กลางประจุ} = \frac{\text{ผลบวกของประจุของอนุภาคทุกตัว}}{\text{จำนวนของอนุภาค}}$$

ถ้าพิจารณากรณีอนุภาคเคมีซอน

$$\begin{aligned} \text{ศูนย์กลางประจุของ พาย เมซอน} &= \frac{(+1) + (0) + (-1)}{3} \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ศูนย์กลางประจุของ เค เมซอน} &= \frac{(+1) + (0)}{2} \\ &= \frac{1}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ศูนย์กลางประจุของ แอนติเคเมซอน} &= \frac{(-1) + (0)}{2} \\ &= -\frac{1}{2} \end{aligned}$$

อนุภาคจำพวกเคมีซอนมีอนุภาคประหลาดคือ เค เมซอน ส่วน พาย เมซอน ไม่เป็นอนุภาคประหลาด เมื่อนำศูนย์กลางประจุของ เค เมซอน เทียบกับของอนุภาคที่ไม่ใช่อนุภาคประหลาดคือ พาย เมซอน จะมี คิสเพสเมนต์ (displacement) เป็น $+\frac{1}{2}$ ถ้าคูณ ค่า คิสเพสเมนต์ด้วย 2 ก็จะเป็น 1 ค่าที่ได้นี้เรียกว่าเลขประหลาด หรือความประหลาด

ถ้าพิจารณากรณีอนุภาคแบรีออน (คือ นิวคลีออนและไฮเปอรอน) การหาเลขประหลาดของไฮเปอรอน จึงจำเป็นต้องหาค่า คิสเพสเมนต์ เทียบกับอนุภาคที่ไม่ใช่อนุภาคประหลาด ซึ่งก็คือ นิวคลีออนนั่นเอง

$$\text{ศูนย์กลางประจุของนิวคลีออน} = \frac{(1) + (0)}{2}$$

$$\begin{aligned} \text{ศูนย์กลางประจุของซิกมา ไฮเปอรอน} &= \frac{(+1) + (0) + (-1)}{3} \\ &= 0 \end{aligned}$$

ค่าคิสเฟสเมนต์ของศูนย์กลางประจุของ ซิกมา ไฮเปอรอน เทียบกับของนิวคลีออน คือ $-\frac{1}{2}$ นั่นคือ เลขประหลาดของซิกมา ไฮเปอรอน เป็น -1

$$\begin{aligned} \text{ศูนย์กลางประจุของ ซิ ไฮเปอรอน} &= \frac{(-1) + (0)}{2} \\ &= -\frac{1}{2} \end{aligned}$$

ค่าคิสเฟสเมนต์ของศูนย์กลางประจุของ ซิ ไฮเปอรอน เทียบกับของนิวคลีออน คือ -1 นั่นคือ เลขประหลาดของซิ ไฮเปอรอน เป็น -2 เป็นต้น

สำหรับ แอนติ เคออน และ แอนติ ไฮเปอรอน การหาเลขประหลาดก็ทำในแบบเดียวกัน คือหาค่าคิสเฟสเมนต์ของศูนย์กลางประจุเทียบกับของ แอนติ พายเมซอน และ แอนติ นิวคลีออน แล้วคูณด้วยสอง จะได้วาเลขประหลาดของแอนติเคออนและแอนติ ไฮเปอรอนนั้นมีค่าเท่ากับ เคออน และไฮเปอรอน แต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม

ค่าต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้นของเมซอนและแบริออน รวบรวมแสดงไว้ในตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 แสดงค่า ไอโซโทปสปิน, แขนง คอมโพเนนต์ของไอโซโทป สปิน และเลขประหลาดของเมซอนและแบรีออน

อนุภาค	ไอโซโทป สปิน (I)	แขนง คอมโพเนนต์ (I_2)	เลขประหลาด (s)
π^+ π^0 π^-	1	+ 1, 0, - 1	0
n	0	0	0
K^+ K^0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$, 0	+ 1
\bar{K}^0 \bar{K}^-	$\frac{1}{2}$	- $\frac{1}{2}$, 0	- 1
p n	$\frac{1}{2}$	+ 1, 0	0
\bar{p} \bar{n}	$\frac{1}{2}$	- 1, 0	0
Λ^0	0	0	- 1
$\bar{\Lambda}^0$	0	0	+ 1
Σ^+ Σ^0 Σ^-	1	+ 1, 0, -1	- 1
$\bar{\Sigma}^+$ $\bar{\Sigma}^0$ $\bar{\Sigma}^-$	1	- 1, 0, +1	+ 1
Ξ^0 Ξ^-	$\frac{1}{2}$	- 1, 0	- 2
$\bar{\Xi}^0$ $\bar{\Xi}^-$	$\frac{1}{2}$	+ 1, 0	+ 2
Ω^-	0	- 1	- 3
$\bar{\Omega}^-$	0	+ 1	+ 3

ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวกับ ประจุ, ไอโซโทปิก สปิน และเลขแมริออนของอนุภาค
ประหลาดคือ

$$Q = \frac{1}{2}B + I_z + \frac{1}{2}S \quad (2.8)$$

จะเห็นว่ากรณีของ พายเมซอน ซึ่งมีค่าเลขประหลาดและเลขแมริออนเป็น 0
สมการ (2.8) ก็จะกลับเป็นสมการ (2.6) นั่นเอง

เลขประหลาดนี้เสนอโดย เอ็ม เกลมาน และ เค นิชิจิม่า (M. Gellman
and K. Nishijima) เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่อนุภาคนี้จะเกิดหรือถูกทำลายเป็นคู่ ๆ
เสมอโดยน่านาการิยาแรง พร้อมทั้งมีการสลายในแบบน่านาการิยาอ่อน ซึ่งนักวิทยาศาสตร์
ไม่สามารถอธิบายได้ แต่ถ้ากำหนดให้เลขประหลาดนี้คงที่ในน่านาการิยาแรง และไม่คงที่
ในน่านาการิยาอ่อน ปัญหานี้ก็จะหมดไป

2.2 ชนิดของน่านาการิยา⁽⁵⁾

ลักษณะของน่านาการิยาระหว่างอนุภาคชนิดต่าง ๆ ถูกแบ่งโดย อินเฮเรนท์ สเตรงค์
(inherent strength) หรือ คอปปลิง คอนสแตนท์ (coupling constant)
ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วยและใช้เป็นตัวอธิบายถึงพลังงานของอนุภาคนั้นในเชิงคณิตศาสตร์ของแรง
ของสนาม (field of force) ที่เหมาะสม โดยที่

$$\text{Coupling constant} = \frac{(\text{interaction constant})^2}{hc}$$

$$\text{เมื่อ } \hbar \text{ คือ } \frac{6.67 \times 10^{-34}}{2\pi} \text{ เฮอร์ก-วินาที}$$

$$c \text{ คือ ความเร็วของแสง}$$

interaction constant คือ ตัวคงที่ในน่านาการิยาแต่ละชนิด ซึ่งมีหน่วยเดียวกัน
ค่า คอปปลิง คอนสแตนท์ เมื่อยกกำลังสองจะเป็นค่าภาคตัดขวางนั่นเอง ชนิดของน่านาการิยา
แบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด เรียงตามลำดับของความแรง (strength) ได้ดังนี้

2.2.1 นานาการิยาแรง (strong interaction) เป็นปฏิการิยาที่เกิกระหว่าง นิวคลีออน อนุภาคที่หว่านานาการิยาแรงเรียกว่า ฮาดรอน (hadron) ตัวอย่างของ ปฏิการิยาชนิดนี้ ได้แก่ แรงกระหว่าระหว่างโปรตอนและนิวตรอนในนิวเคลียสนั้นเอง นานา การิยาแรงมีขอบเขตจำกัด คืออยู่ในช่วง 1.4 เฟอริ และจะมีค่าเป็นศูนย์ที่ระยะมากกว่านี้ อนุภาคที่หว่าตัวเป็นเสมือนตัวกลางหรืออนุภาคสนามเสมือน (virtual field particle) คือ โฟตอนเสมือน (virtual photon) ในกรณีของแรงกระหว่างนิวคลีออน ซึ่ง ยูกาวา (Yukawa) เป็นผู้หว่านายว่าอนุภาคชนิดดังกล่าวอยู่โดยมีมวลอยู่ระหว่างมวลของ อิเล็กตรอนและโปรตอน ซึ่งค้นพบต่อมาในภายหลัง

$$\begin{aligned} \text{ค่า coupling constant} &= \frac{g^2}{hc} \\ &\approx 15 \end{aligned}$$

โดย g คือ ประจุของเอกเซนจ์ฟิลด์ (Exchange field)

ถ้าในกรณีปฏิการิยาของยูกาวา g ก็คือ ประจุของพาย เอกซ์เซนจ์ฟิลด์ (π exchange field charge) ในนานาการิยาแรง จะปรากฏว่ามี การอนุรักษ์ ไอโซโทปิก สปิน, เลขประหลาดและแพริตี

2.2.2 นานาการิยาแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction) เป็นปฏิการิยาของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า และโฟตอน ปฏิการิยาชนิดนี้ที่พบกันอยู่เสมอ เช่น โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric) คอมพ์ตันเอฟเฟกต์ (compton effect) การผลิตสารคู (pair production) การประลัย (pair annihilation) เป็นต้น ซึ่งอธิบายได้ด้วยการแลกเปลี่ยนตัวกลางของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งก็คือ โฟตอนเสมือน (virtual photon) นานาการิยาชนิดนี้หว่ากันในระยะทางที่ยาวกว่า นานาการิยาแรง และเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางกำลังสอง ความแรงของนานาการิยาแม่เหล็กไฟฟ้า คือ

$$\begin{aligned} \text{coupling constant} &= \frac{e^2}{hc} \\ &\approx \frac{1}{137} \end{aligned}$$

$$\text{โดยที่ } e = 4.8 \times 10^{-9} \text{ e.s.u.}$$

จะเห็นว่า คอปลิง คอนสแตนท์ ของนาฏิกวิทยาแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือ โฟน สตรักเจอร์ คอนสแตนท์ (fine structure constant) นั้นเอง สำหรับนาฏิกวิทยาแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ปรากฏว่า กฎการอนุรักษ์ ไอโซสปิน ใช้ไม่ได้

2.2.3 นาฏิกวิทยาแบบอ่อน (weak interaction) โดย อี เพอร์มี ในปี ค.ศ. 1940 เพื่ออธิบาย การสลายตัว เบตาจากสารกัมมันตรังสีนาฏิกวิทยาชนิดนี้มีความแรงน้อยกว่าสองชนิดแรกที่กล่าวมาแล้ว คาดว่าอนุภาคสนามที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางคือ อินเทอร์มีเดียท เวกเตอร์ โบซอน (intermediate vector boson, W) ซึ่งมี ช่วงอายุ (lifetime) น้อยกว่า 10^{-17} วินาที และมวลเมื่ออยู่นิ่งเป็น 1,500 เท่าของมวลอิเล็กตรอน แม้ว่าอนุภาคสนามชนิดนี้ยังค้นไม่พบก็ตาม

$$\begin{aligned} \text{ค่า coupling constant} &= \frac{G^2}{\hbar c} \\ &\approx 5 \times 10^{-14} \\ \text{โดย } G &\approx 1.3 \times 10^{-15} \text{ (เออร์ก-เซนติเมตร)}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

2.2.4 นาฏิกวิทยาแบบโน้มถ่วง (gravitational interaction) เป็นปฏิริยาการดึงดูดซึ่งกันและกันที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคทุกชนิดที่มีมวล และเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางกำลังสอง มีความสำคัญและคุ้นเคยกันดีในระบบใหญ่ (macroscopic) แต่ไม่สำคัญในปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์อนุภาค แต่ที่กล่าวในที่นี่ก็เพื่อความสมบูรณ์เท่านั้น ด้วยวิธีที่คล้ายกัน เราก็สามารถสร้าง คอปลิง คอนสแตนท์ สำหรับนาฏิกวิทยานี้ได้เป็น

$$\begin{aligned} \text{coupling constant} &= \frac{K m^2}{\hbar c} \\ &\approx 2 \times 10^{-39} \end{aligned}$$

ในที่นี้ให้ m เป็นมวลของ นิวคลีออน มีค่าเป็น 1.67×10^{-24} กรัม

และ K คือ นิวตันเนียน แกรวิแทชัน คอนสแตนท์ (Newtonian gravitation constant) มีค่าเท่ากับ 6.67×10^{-8} คายน² - เซนติเมตร² - กรัม⁻²

ถ้าให้ m เป็นมวลของอิเล็กตรอนจะได้อ่า คอปลิง คอนสแตนท์เป็น 2×10^{-45}

จะเห็นว่าปริมาณของแรงชนิดนี้มีค่าน้อยมากจนสามารถหักทิ้งได้เมื่อพิจารณาในระบบขนาดเล็ก (microscopic) อนุภาคสนามของนามากาเรียชนิดนี้คือ แกรวิตอน (graviton) ซึ่งมีพิสัย (range) ถึง อินฟินิต (∞) และมีมวลเมื่ออยู่นิ่งเป็น 0

นามากาเรียทั้ง 4 ชนิด สามารถสรุปและเปรียบเทียบค่าความแรงโดยประมาณได้ โดยกำหนดความแรงของนามากาเรียแรงเป็น 1 ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปและเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของนามากาเรียทั้ง 4 ชนิด

ชนิดของนามากาเรีย	คอปลิง คอน- สแตนท์	ความแรง	อนุภาคสนาม	ช่วงอายุ	ภาคตัดขวาง
แรง	$g^2/\hbar c \sim 10$	1	โฟตอน	10^{-23} s	10^{-24} cm ²
แม่เหล็กไฟฟ้า	$e^2/\hbar c \sim 1/137$	10^{-2}	โฟตอน	10^{-16} s	10^{-29} cm ²
อ่อน	$\sim 10^{-14}$	10^{-13}	เวคเตอร์โบซอน	10^{-8} s	10^{-38} cm ²
โน้มถ่วง	$\sim 10^{-39}$	10^{-38}	แกรวิตอน	-	-

กฎการอนุรักษ์ของเลขควันตัมต่าง ๆ ในนานาภริยาแรง, แม่เหล็กไฟฟ้าและแบบอ่อน
รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การรวบรวมเกี่ยวกับกฎการอนุรักษ์เลขควันตัมต่าง ๆ ในนานาภริยา 3 ชนิด
ไม่รวมถึงนานาภริยาโน้มถ่วง

ปริมาณที่พิจารณา	นานาภริยาแรง	นานาภริยาแม่เหล็กไฟฟ้า	นานาภริยาแบบอ่อน
เลขแบริออน (B)	✓	✓	✓
เลขเลพตอน (L)	✓	✓	✓
ไอโซโทปิก สปิน (I)	✓	X	X
จี แพริตี (G)	✓	X	X
สปิน (S)	✓	✓	X
แพริตี (P)	✓	✓	X
ชาร์จ คอนจูเกชัน (C)	✓	✓	X
C.P.	✓	✓	✓
C.P.T	✓	✓	✓

สัญลักษณ์ ✓ หมายถึง การอนุรักษ์
X หมายถึง การไม่อนุรักษ์

แพริตี หมายถึงการแสดงความสมมูลของการทดลองทางฟิสิกส์เหมือนกับการสะท้อน
ของกระจกเงา การอนุรักษ์แพริตีเหมือนกับเมื่อทำการทดลองแล้วภาพที่เห็นในกระจกเงา
ไม่สามารถแยกความเป็นชายหรือขวาได้ ในทางควันตัมแมคานิค แพริตีของอนุภาคใดพิจารณา
จาก เวฟ ฟังชัน (wave function) $\psi(\vec{r})$ ที่มีการกลับของตำแหน่งในอวกาศโดย
การสะท้อนผ่านจุดเริ่มต้น (คือการเปลี่ยนจาก \vec{r} เป็น $-\vec{r}$ คล้ายกลับซ้ายเป็นขวานั้นเอง

ถ้าให้ P เป็น ปฏิวัติ โอปอเรชัน (parity operation)

$$\text{คือ } P \psi(\vec{r}) = \psi(-\vec{r})$$

ใช้ P โอปอเรชันอีกครั้งหนึ่ง

$$P(P\psi(\vec{r})) = P\psi(-\vec{r})$$

$$= \psi(\vec{r})$$

$$\text{นั่นคือ } P^2\psi(\vec{r}) = 1\psi(\vec{r})$$

ถ้าค่า ไอเกน (eigen value) ของ P^2 มีค่าเป็น ξ^2

$$\text{ดังนั้น } \xi^2 = 1$$

$$\xi = \pm 1$$

ตัว ξ นี้คือ เลขควันตัม ปฏิวัติ (parity quantum number, P) ก็จะได้

$$P\psi(\vec{r}) = \xi\psi(\vec{r})$$

ถ้า ξ เป็น $+1$ หมายความว่า

$$P\psi(\vec{r}) = +1\psi(-\vec{r})$$

$$= \psi(\vec{r})$$

เป็นปฏิวัติคู่ (even parity)

ถ้า ξ เป็น -1 หมายความว่า

$$P\psi(\vec{r}) = -1\psi(-\vec{r})$$

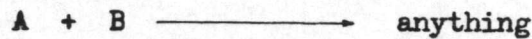
$$= -\psi(\vec{r})$$

เป็น ปฏิวัติคี่ (odd parity)

ปฏิวัติของปฏิกิริยาใดไม่เปลี่ยนแปลงหมายความว่า ถ้าก่อนเป็นปฏิวัติคู่ หลังปฏิกิริยา ก็จะมีปฏิวัติเป็นคู่ด้วย ต่อมาพบว่า ปฏิวัติในนามาการิยาแบบอ่อนนั้นไม่อนุรักษ์ โดย ซี. เอน. ยิง และ ที. ดี. ลี. (C.N. Yang and T.D. Lee) ในปี ค.ศ. 1956 ซึ่งศึกษาจาก การสลายตัวของ K^- เป็น พายเมซอน 2 ตัว และ 3 ตัว

2.3 ภาคตัดขวาง⁽⁶⁾

โอกาสของการเกิดปฏิกิริยาจะแสดงโดยค่าภาคตัดขวาง (cross section) พิจารณาปฏิกิริยา



ถ้าให้ออนุภาค A มีพลังงานค่าหนึ่งยิงอย่างตั้งฉากกับเป้า B ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด F และมีความหนา d เป้า B มีอนุภาคอยู่ทั้งหมด b ตัว

$$\text{ความหนาแน่นของอนุภาคเป้า B (n)} = \frac{b}{F \times d}$$

ในกรณีนี้ d มีค่าน้อย ๆ คือเป้าหมายมากจนคิดว่าอนุภาคเป้าไม่มีการซ้อนกัน และให้ออนุภาคเป้าแต่ละตัวมีพื้นที่ทำปฏิกิริยา (effective target area) เป็น σ ก็จะได้ว่า

พื้นที่ทั้งหมดของอนุภาคเป้า ที่เกิดปฏิกิริยา คือ $b\sigma$

และถ้า P คือโอกาสที่อนุภาค B จะถูกชนทำให้เกิดปฏิกิริยา ก็จะเป็น

$$P = \frac{b\sigma}{F} = n d \sigma$$

ให้ N_0 เป็นจำนวนอนุภาคยิง A ต่อเวลา ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยา (R)

ก็คือ

$$R = P \cdot N_0 = n d \sigma N_0 \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.9) สามารถคิดกลับในแง่ของการเกิดปฏิกิริยาบนเป้าเพียงตัวเดียว (ซึ่งก็คือค่าพื้นที่ทำปฏิกิริยาของแต่ละตัวนั่นเอง) เป็น

$$\sigma = \frac{R}{N_0 \cdot n \cdot d} \quad (2.10)$$

มีความหมายถึงพื้นที่ที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นบนอนุภาคเป้า 1 ตัวที่วางอยู่ใน 1 หน่วยฟลักซ์ (flux) ของอนุภาคยิง เรียกอีกอย่างว่า ภาคตัดขวางของปฏิกิริยา

มิติ (dimension) ของ

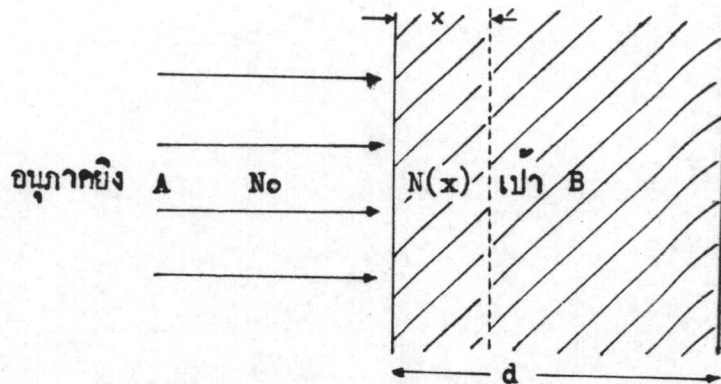
$$\sigma = \frac{\text{จำนวนอนุภาคที่เกิดปฏิกิริยา/เวลา}}{\frac{\text{จำนวนอนุภาคยิง}}{\text{เวลา}} \times \frac{\text{จำนวนอนุภาคเป้า}}{\text{พื้นที่}} \times \text{ความหนา}} = \frac{\text{พื้นที่}}{\text{อนุภาค}}$$

ซึ่งกำหนดหน่วยของ σ ในหน่วยของ บาร์นหรือมิลลิบาร์น (barn or milibarn)

$$\begin{aligned} \text{โดย } 1 \text{ บาร์น} &= 10^3 \text{ มิลลิบาร์น} \\ &= 10^{-24} \text{ ตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

ค่า σ สามารถจะนิยามให้อยู่ในรูปของพื้นที่หน่วยปริมาตร, คอกรัม, หรือต่อเหตุการณ์ ดังเช่นในการวิจัยนี้ หรือในเคมีใด ๆ ก็ได้ที่สะดวกในการคิดและวัด

ในกรณีของเป้าหนาจะต้องพิจารณาพื้นที่ทำปฏิกิริยาของเป้าที่ซ้อนกัน จะนำมารวมกันตรง ๆ นั้นไม่ได้ เมื่อเวลาอนุภาคยิงเข้ามาและผ่านชั้นของเป้าหนา x จะเกิดความหน่วง ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยากับเป้า จำนวนของอนุภาคยิงต่อเวลา ($N(x)$) ก็จะน้อยกว่า N_0 ในตอนเริ่มแรกด้วย โดยที่ จำนวนปฏิกิริยาต่อเวลาในช่วงความหนาถัดมา จะเท่ากับ อัตราการลดลงของอนุภาคในชั้นถัดไป ก็คือ



$$- d N(x) = N(x) n \sigma dx$$

$$\frac{dN(x)}{N(x)} = - n \sigma dx$$

อินทิเกรต ตลอด

$$N_0 \int \frac{dN(x)}{N(x)} = \int_0^d - n \sigma dx$$

เมื่อ N คือ จำนวนอนุภาคนิวตรอนที่ผ่านเนื้อ B ทั้งหมดโดยไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ จะได้ผลว่า

$$N = N_0 \exp(-n \sigma d)$$

$$\frac{N}{N_0} = \exp. (-n \sigma d)$$



2.3.1 ภาคตัดขวางทั้งหมดและภาคตัดขวางพาร์เทียล (total and partial cross section) เรื่องราวที่กล่าวในหัวข้อ 2.2 เป็นกรณีที่เหมาะสมที่คิดว่าเกิดปฏิกิริยาหรือเหตุการณ์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น จากการยิงอนุภาค A ไปชนเป้า B การคิดภาคตัดขวางก็เป็นการศึกษาเฉพาะเหตุการณ์ที่น่าสนใจ ในขณะที่จริง ๆ แล้ว มีปฏิกิริยาหลายอย่าง หลายเหตุการณ์เกิดขึ้นพร้อม ๆ กันในเวลาเดียวกัน เช่น การกระเจิง (scattering) การดูดกลืน (absorbtion) หรือการแผ่รังสี (emission) เป็นต้น เราสามารถที่จะรวมภาคตัดขวางเหตุการณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันเป็นโอกาสที่เกิดปฏิกิริยาทั้งหมด คือภาคตัดขวางทั้งหมดได้เป็น

$$\sigma_{total} = \sum \sigma_{partial}$$

2.3.2 ภาคตัดขวางกึ่งเฟอเรนเทียล (differential cross section)

การตรวจนับผลของปฏิกิริยา สามารถทำได้โดยการจกเครื่องตรวจนับ (detector) ให้จับผลของปฏิกิริยา ที่ตำแหน่งของมุมต่าง ๆ ซึ่งกระทำกับทิศของอนุภาคยิง ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดภาคตัดขวางกึ่งเฟอเรนเทียล เพื่อที่จะแสดงถึง โอกาสในการแผ่รังสี (emission probability) ในทิศทางเฉพาะนั้น ๆ เป็นการอธิบายการกระจายออกเป็นมุมต่าง ๆ (angular distribution) ของอนุภาค หรือการแผ่รังสีออกมาโดยเป้าตัวหนึ่ง เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้น ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$R_{\Omega} = \frac{\text{No. } n \, d\Omega \cdot d}{d\Omega}$$

เมื่อ R_{Ω} คือ อัตราที่ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นถูกส่งออกมาในทิศทางที่กำลังพิจารณาคือ 1 หน่วยมุมตัน (solid angle)

$\frac{d\Omega}{d\Omega}$ คือ ภาคตัดขวางกึ่งเฟอเรนเทียล อาจเขียนเป็น $\sigma(\theta)$

ปริมาณกึ่งเฟอเรนเทียล $d\Omega = \sigma(\theta)d\Omega$ หมายถึงโอกาสของการแผ่รังสีที่จะให้ออกมาในส่วนของมุมตัน $d\Omega$ ที่ตำแหน่งเฉลี่ยเป็นมุม θ กับทิศทางของอนุภาคที่ยิงเข้ามา หน่วยของ $\sigma(\theta)$ จึงเป็น พื้นที่ต่อสเตอเรเดียน (steradian) หรือบาร์นต่อสเตอเรเดียน

การหาภาคตัดขวางทั้งหมด ก็จะเป็นการอินทิเกรตภาคตัดขวางกึ่งเฟอเรนเทียลทั้งหมดในอวกาศ (space) คือ

$$\begin{aligned} \sigma &= \int \left(\frac{d\Omega}{d\Omega} \right) \cdot d\Omega \\ &= \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\Omega(\theta, \phi)}{d\Omega} \sin \theta \, d\theta \, d\phi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma &= 2\pi \int_0^\pi \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) \sin\theta d\theta \\ &= 2\pi \int_0^\pi \sigma'(\theta) \sin\theta d\theta \end{aligned}$$

2.3.3 การแบ่งชนิดของปฏิกิริยาที่ได้จากฟิล์มภาพฉายในห้องฟอง

ในการหาคะแนนที่ตรวจพบที่เกิดจากปฏิกิริยาในห้องฟอง พิจารณาได้เป็น 3 แบบ ตามลักษณะที่กำหนดขึ้นดังนี้ (7, 8, 9)

1. ชนิดของโทโพโลยี (topology type) แบ่งลักษณะของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ตามลักษณะของรอยทางของเหตุการณ์ที่ปรากฏบนฟิล์ม โดยใช้สัญลักษณ์ $lmns$ เมื่อ

- l คือ จำนวนรอยทางที่ออกมาจากรูคยอก (vertex)
- m คือ จำนวนคิง (kink) ซึ่งหมายถึง การสลายตัวของอนุภาคที่มีประจุตัวหนึ่ง ออกเป็นอนุภาคใหม่ที่มีประจุ 1 ตัวกับอนุภาคเป็นกลาง (neutral particle) 1 ตัว หรือมากกว่า
- n คือ จำนวนอนุภาคอนุภาคที่ที่เกิดขึ้น
- s คือ ชนิดของประจุของอนุภาคใหม่ที่เกิดจากการคิง แสดงโดยเครื่องหมาย บวก หรือ ลบ

จำนวนรอยทางที่ปรากฏบนฟิล์ม อาจเป็น 2, 4 6 หรือ 8 แฉกก็ได้ เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นการชนกันของอนุภาค และไปรคอน ตามหลักของการอนุรักษ์ประจุ (charge conservation) ทำให้ได้รอยทางในแต่ละเหตุการณ์เป็นจำนวนคู่เสมอ

ลักษณะของการคิงในรอยทางวงลำดับที่ 2 (secondary track) ออกเป็นอนุภาคที่มีประจุใหม่ 1 ตัว และอนุภาคเป็นกลางนั้น อนุภาคเป็นกลางจะสลายตัวให้อนุภาค

ที่มีประจุบวกและลบอย่างละ 1 ตัว เกิดเป็นรอยทาง 2 แฉกในลักษณะของตัววี โดยจะทาบมุมกันเห็นโคซซิคเจน (มากกว่า 0 องศา) โดยที่จุดที่อนุภาควกและลบ แยกออกจากกันนั้น จะชี้ไปยังจุดยอดที่เกิดน่านากรียา เมื่อลากเส้นต่อระหว่างจุดยอด, จุดที่เกิดการคิงและจุดที่เกิดอนุภาควี จะอยู่บนเส้นตรงเดียวกัน

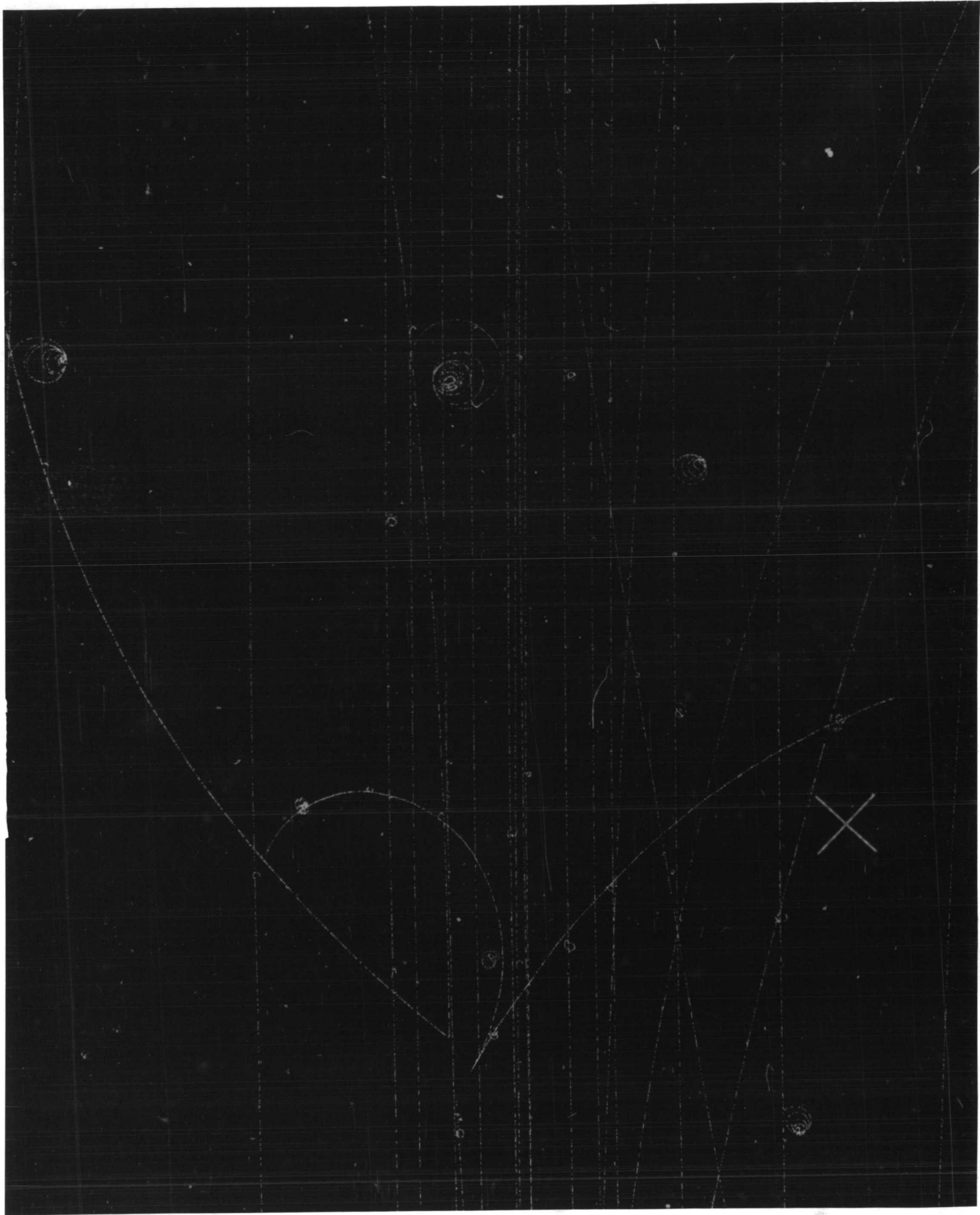
จุดที่อนุภาควกและลบแยกออกจากกันเป็นตัววี โดยทาบมุมกันมากกว่า 0 องศา เป็นสิ่งที่แยกอนุภาควีออกจากรังสีแกมมา (γ -ray) ซึ่งทำให้เกิดรอยทาง 2 แฉกออกจากจุดเดียวกันเช่นกันคือ รอยทางของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน ลักษณะของอนุภาควีและรังสีแกมมาเปรียบเทียบให้เห็นได้ ดังรูปที่ 2.3

ตัวอย่างของการกำหนดเหตุการณ์โดยใช้โทโฟโลยี เช่น

400	คือ เหตุการณ์ 4 แฉก
410-	คือ เหตุการณ์ 4 แฉก และเกิด 1 คิงที่ให้อนุภาคลบ
201	คือ เหตุการณ์ 2 แฉก และอนุภาควี 1 ตัว

2. นานากรียาแบบช่อง (interaction channel) ของ (channel) กำหนดคัยอนุภาคที่เสถียรหรือกึ่งเสถียร (stable or semistable) ในสถานะสุดท้าย (final state) โดยรวมถึง สถานะก่อนที่จะเป็นสถานะสุดท้าย (intermediate state) กว และสถานะสุดท้ายที่กำหนดนี้จะต้องมีชีวิตยาวพอที่จะทำให้เกิดรอยทางที่วัดได้ในห้องฟอง นั่นคือ จะต้องมีการตั้งสมมติฐานให้สอดคล้องกับโทโฟโลยีแต่ละชนิด เพื่อจะบ่งว่าโทโฟโลยีชนิดนั้นประกอบคัยอนุภาคใด คือช่องใดนั่นเอง ตัวอย่างของช่องแบบต่าง ๆ ในโทโฟโลยี 400 และ 410- จากการชนกันของ K^- กับ p ที่ 4.2 GeV/c แสดงอยู่ในตารางที่ 2.5⁽⁸⁾

รูปที่ 2.3 ลักษณะของอนุภาควี และรังสีแกมมา



ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของช่องต่าง ๆ จากโทโพโลยี 400 และ 401-

โทโพโลยี 400	โทโพโลยี 410-
1 $K^- \pi^+ \pi^- p$	1 $K^- \pi^+ \pi^- p$
2 $K^- \pi^+ \pi^- p \pi^0$	2 $K^- \pi^+ \pi^- p \pi^0$
3 $K^- \pi^+ \pi^- p$	3 $K^- \pi^+ \pi^+ \pi^- n$
4 $\pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- K^0$	4 $K^- K^+ \pi^+ \pi^- \Lambda$
5 $\pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- \Lambda$	5 $K^- K^+ K^- p \pi^0$
6 $K^- \pi^+ \pi^+ \pi^- n$	6 $K^- K^+ \pi^- p K^0$
7 $K^+ \pi^+ \pi^- \pi^- \Xi^0$	7 $K^- K^- \pi^+ p K^0$
8 $K^+ K^- K^- p$	8 $K^- K^+ K^- \pi^+ n$

3. ปฏิกริยา (reaction) หมายถึง สถานะที่เกิดขึ้นโดยตรงจากการชนกันนั้น คือพิจารณาอนุภาคที่ได้ออกมานั้นว่าเป็นสถานะสุดท้าย ในบางครั้งรอยทางที่ไคบนพีธัมไม่ได้เกิดโดยตรงจากปฏิกริยา แต่เนื่องมาจากการสลายตัวของอนุภาคเรโซแนนท์ที่มีอายุสั้นมากอีกต่อหนึ่ง

จะเห็นว่าในแต่ละนാനุกรยาแบบช่อง ประกอบด้วยหลาย ๆ ปฏิกริยา ถ้าเป็นกรณีที่เกิดอนุภาคเรโซแนนท์มีการสลายตัวออกเป็นหลายแบบ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นก็จะต้องศึกษาเป็นปฏิกริยาแบบช่อง (reaction channel) ที่แตกต่างกันออกไป การหาภาคตัดขวางของปฏิกริยาแบบนี้ หาได้จากวิธีการทางสถิติ

ภาคตัดขวางที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการพิจารณาถึงนานุกรยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดโดยไม่มีการแบ่งแยกประเภท เป็นโทโพโลยี ช่องหรือปฏิกริยาใด ๆ แต่ใช้วิธีการพิจารณาคามลักษณะรอยทางที่สามารถเห็นด้วยตาเปล่าจากจุดยอดแล้วแยกประเภทหาภาคตัดขวางสำหรับเหตุการณ์ 2, 4, 6 แฉก, การกระเจิง และอนุภาควี เป็นต้น

2.3.4 สมการภาคตัดขวางที่ใช้ในการคำนวณในปฏิกิริยา $K^- p \rightarrow \text{anything}$

เมื่อให้ลำอนุภาค K^- มีโมเมนตัม 4.2 GeV/c ยิงเข้าไปใน ห้องฟองไฮโดรเจนเหลว ที่มีความหนาแน่น 0.0583 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มี ความหนาขนาดหนึ่งคือ 92 เซนติเมตร เนื่องจากความหนาแน่นของไฮโดรเจนเหลวมีค่าต่ำ โอกาสที่ลำอนุภาค K^- จะทำปฏิกิริยากับโปรตอนจึงมีน้อย ดังนั้นการสูญเสียพลังงานหรือลดจำนวนลงของอนุภาคจึงในระยะทางดังกล่าว จึงถือว่าไม่เกิดขึ้น ภาคตัดขวางของนานาภิกษาสามารถหาได้ตามสมการ (2.10) คือ

$$\sigma = \frac{R}{N n d}$$

ทั้งนี้กล่าวแล้วว่า ภาคตัดขวางสามารถแสดงอยู่ในหน่วยโคกโก๋ ในกรณีนี้ให้เป็น พื้นที่ต่อเหตุการณ์ก็ยอมได้ว่า

$$\sigma = \frac{\text{เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น/วินาที}}{\frac{\text{จำนวนอนุภาคยิง}}{\text{วินาที}} \times \text{ความหนาแน่นของเป้า} \times \text{ความหนาของเป้า}}$$

เมื่ออนุภาค K^- วิ่งผ่านเข้าไปในห้องฟองจะเกิดการไอออนไนซ์ (Ionization) ทำให้เกิดรอยทางตลอดแนวที่อนุภาคผ่านไป ซึ่งก็คือความหนาของเป้านั้นเอง อนุภาค K^- 1 ตัว จะทำให้เกิดความยาวของรอยทางเป็น d เซนติเมตร ดังนั้น จำนวนรอยทางทั้งหมดที่เกิดขึ้นในห้องฟอง เมื่อยิงอนุภาค K^- จำนวน N_0 ตัวก็คือ $N_0 \cdot d$ สมการ (2.10) ก็จะกลายเป็น

$$\sigma = \frac{\text{จำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น}}{\text{ความยาวทั้งหมดของลำอนุภาค} \times \text{ความหนาแน่นของเป้า}}$$

จากสมการนี้ ทำให้สรุปได้ว่า

ภาคตัดขวางคือ จำนวนเหตุการณ์ที่พิจารณาที่เกิดขึ้นต่อ 1 หน่วยความยาว
ของลำรยทาง คือความหนาแน่นของอนุภาคเป้า

$$\sigma = \frac{N}{n L} \quad (2.11)$$

เมื่อ N คือ จำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น
 n คือ ความหนาแน่นของอนุภาคเป้า
 L คือ ความยาวทั้งหมดของลำรยทาง

เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นโมเลกุลที่มี 2 อะตอม (di-atomic molecule)
เราจึงได้ จำนวนอนุภาคเป้าในห้องฟองต่อปริมาตร เป็น

$$n = \frac{2 \rho \cdot A}{M}$$

เมื่อ A คือ เลขอวกาโคร (Avogadro's number)
 ρ คือ ความหนาแน่นของไฮโดรเจนเหลวในห้องฟอง
 M คือ น้ำหนักโมเลกุลของไฮโดรเจนเหลว

แทนค่า n ลงในสมการที่ (2.11) ก็จะได้

$$\sigma = \frac{N \cdot M}{2 \rho A L} \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาภาคตัดขวางในการ

วิจัยนี้