

バリオン共鳴とニュートリノ反応

鎌野 寛之

(大阪大学核物理研究センター)

目次 :

- ✓ バリオン分光とは
- ✓ 昨今のバリオン分光研究の動向、遷移形状因子とバリオン構造
- ✓ バリオン分光の観点から見たニュートリノ反応
- ✓ まとめ

p	$1/2^+$	****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****	Σ^+	$1/2^+$	****	Ξ^0	$1/2^+$	****	Λ_c^+	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	***	Σ^0	$1/2^+$	****	Ξ^-	$1/2^+$	****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$N(1440)$	$1/2^+$	****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****	Σ^-	$1/2^+$	****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***
$N(1520)$	$3/2^-$	****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1620)$	*		$\Lambda_c(2765)^+$	*	*
$N(1535)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(1480)$	*		$\Xi(1690)$	***		$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$N(1650)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	**	$\Sigma(1560)$	**		$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***	$\Lambda_c(2940)^+$	*	***
$N(1675)$	$5/2^-$	****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*	$\Xi(1950)$	***		$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****
$N(1680)$	$5/2^+$	****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	**	$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}?$	***	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***
$N(1685)$	*		$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***	$\Xi(2120)$	*		$\Sigma_c(2800)$	*	***
$N(1700)$	$3/2^-$	***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****	$\Xi(2250)$	**		Ξ_c^+	$1/2^+$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**	$\Sigma(1690)$	*	**	$\Xi(2370)$	**		Ξ_c^0	$1/2^+$	***
$N(1720)$	$3/2^+$	****	$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$	***	$\Xi(2500)$	*		Ξ_c^+	$1/2^+$	***
$N(1860)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**	$\Sigma(1770)$	$1/2^+$	*				Ξ_c^0	$1/2^+$	***
$N(1875)$	$3/2^-$	***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$	****	Ω^-	$3/2^+$	****	$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$	***
$N(1880)$	$1/2^+$	**	$\Delta(2200)$	$7/2^-$	*	$\Sigma(1840)$	$3/2^+$	*	$\Omega(2250)^-$	***		$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$	***
$N(1895)$	$1/2^-$	**	$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**	$\Omega(2380)^-$	**		$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$	***
$N(1900)$	$3/2^+$	***	$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****	$\Omega(2470)^-$	**		$\Xi_c(2930)$	*	*
$N(1990)$	$7/2^+$	**	$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$	***				$\Xi_c(2980)$	*	***
$N(2000)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**	$\Sigma(2000)$	$1/2^-$	*				$\Xi_c(3055)$	*	**
$N(2040)$	$3/2^+$	*	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****	$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****				$\Xi_c(3080)$	*	***
$N(2060)$	$5/2^-$	**	$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*				$\Xi_c(3123)$	*	*
$N(2100)$	$1/2^+$	*	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	**				Ω_c^0	$1/2^+$	***
$N(2120)$	$3/2^-$	**				$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*				$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***
$N(2190)$	$7/2^-$	****	Λ	$1/2^+$	****	$\Sigma(2250)$	*	***				Ξ_{cc}^+	*	*
$N(2220)$	$9/2^+$	****	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(2455)$	*	**						*
$N(2250)$	$9/2^-$	****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(2620)$	*	**						*
$N(2600)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	***	$\Sigma(3000)$	*	*				Λ_b^0	$1/2^+$	***
$N(2700)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(3170)$	*	*				Σ_b	$1/2^+$	***
			$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	****							Σ_b^*	$3/2^+$	***
			$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	***							Ξ_b^0, Ξ_b^-	$1/2^+$	***
			$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	***							Ω_b^-	$1/2^+$	***
			$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	****									*
			$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	****									*
			$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	****									*
			$\Lambda(2000)$	*										*
			$\Lambda(2020)$	$7/2^+$	*									*
			$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****									*
			$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***									*
			$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*									*
			$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***									*
			$\Lambda(2585)$	**										*

Baryons

PDG (2012):
<http://pdg.lbl.gov>

Baryons

p	$1/2^+$	****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****	Σ^+	$1/2^+$	****	Ξ^0	$1/2^+$	****	Λ_c^+	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	***	Σ^0	$1/2^+$	****	Ξ^-	$1/2^+$	****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$N(1440)$	$1/2^+$	****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****	Σ^-	$1/2^+$	****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***
$N(1520)$	$3/2^-$	****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1620)$	*		$\Lambda_c(2765)^+$	*	
$N(1535)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(1480)$	*		$\Xi(1690)$	***		$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$N(1650)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	**	$\Sigma(1560)$	**		$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***	$\Lambda_c(2940)^+$	*	
$N(1675)$	$5/2^-$	****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*	$\Xi(1950)$	***		$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****
$N(1680)$	$5/2^+$	****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	**	$\Xi(2030)$	$\geq 5/2^?$	***	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***
$N(1685)$	*		$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***	$\Xi(2120)$	*		$\Sigma_c(2800)$	***	
$N(1700)$	$3/2^-$	***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****	$\Xi(2250)$	**		Ξ_c^+	$1/2^+$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**	$\Sigma(1690)$	**		$\Xi(2370)$	**		Ξ_c^0	$1/2^+$	***
$N(1720)$	$3/2^+$	****	$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$	***	$\Xi(2500)$	*		$\Xi_c'^+$	$1/2^+$	***
$N(1860)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**	$\Sigma(1770)$	$1/2^+$	*	Ω^-	$3/2^+$	****	$\Xi_c'^0$	$1/2^+$	***
$N(1875)$	$3/2^-$	***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$	****	$\Omega(2250)^-$	***		$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$	***
$N(1880)$	$1/2^+$	**	$\Delta(2200)$	$7/2^-$	*	$\Sigma(1840)$	$3/2^+$	*	$\Omega(2380)^-$	**		$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$	***
$N(1895)$	$1/2^-$	**	$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**	$\Omega(2470)^-$	**		$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$	***
$N(1900)$	$3/2^+$	***	$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****				$\Xi_c(2930)$	*	
$N(1990)$	$7/2^+$	**	$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$	***				$\Xi_c(2980)$	***	
$N(2000)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**	$\Sigma(2000)$	$1/2^-$	*				$\Xi_c(3055)$	**	
$N(2040)$	$3/2^+$	*	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****	$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****				$\Xi_c(3080)$	***	
$N(2060)$	$5/2^-$	**	$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*				$\Xi_c(3123)$	*	
$N(2100)$	$1/2^+$	*	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	**				Ω_c^0	$1/2^+$	***
$N(2120)$	$3/2^-$	**				$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*				$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***
$N(2190)$	$7/2^-$	****	Λ	$1/2^+$	****	$\Sigma(2250)$	***					Ξ_{cc}^+	*	
$N(2220)$	$9/2^+$	****	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(2455)$	**					Ξ_{cc}^0	*	
$N(2250)$	$9/2^-$	****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(2620)$	**					Λ_b^0	$1/2^+$	***
$N(2600)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	***	$\Sigma(3000)$	*					Σ_b	$1/2^+$	***
$N(2700)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(3170)$	*					Σ_b^*	$3/2^+$	***
			$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	****							Ξ_b^0, Ξ_b^-	$1/2^+$	***
			$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	***							Ω_b^-	$1/2^+$	***
			$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	***									
			$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	****									
			$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	****									
			$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	****									
			$\Lambda(2000)$	*										
			$\Lambda(2020)$	$7/2^+$	*									
			$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****									
			$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***									
			$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*									
			$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***									
			$\Lambda(2585)$	**										

qqq (l=1/2)
[q = u or d]

qqq (l=3/2)
[q = u or d]

qqq (l=1)
[q = u or d]

qqq (l=0)
[q = u or d]

qqs (l=1/2)
[q = u or d]

sss (l=0)

qqb (l=1)
[q = u or d]

ssb (l=0)

qqc (l=0)
[q = u or d]

qqc (l=1)
[q = u or d]

qsc (l=1/2)
[q = u or d]

ssc (l=0)

qcc (l=1/2)
[q = u or d]

qqb (l=0)
[q = u or d]

qsb (l=1/2)
[q = u or d]

PDG (2012):
<http://pdg.lbl.gov>

p	$1/2^+$	****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****	Σ^+	$1/2^+$	****	Ξ^0	$1/2^+$	****	Λ_c^+	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	***	Σ^0	$1/2^+$	****	Ξ^-	$1/2^+$	****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$N(1440)$	$1/2^+$	****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****	Σ^-	$1/2^+$	****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***
$N(1520)$	$3/2^-$	****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1620)$	*		$\Lambda_c(2765)^+$	*	
$N(1535)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(1480)$	*		$\Xi(1690)$	***		$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$N(1650)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	**	$\Sigma(1560)$	**		$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***	$\Lambda_c(2940)^+$	*	***
$N(1675)$	$5/2^-$	****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*	$\Xi(1950)$	***		$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****

qqc (l=0)

[q = u or d]

Baryon Spectroscopy: Understanding nature of baryons and their excitations

Mass, width, spin, parity ...?

Internal structure?

How produced in reaction processes?

How interact with other particles?

Baryons

$\Lambda(2020)$	$7/2^+$	*
$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****
$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***
$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*
$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***
$\Lambda(2585)$		**

qqqs (l=0)

[q = u or d]

PDG (2012):
<http://pdg.lbl.gov>

Baryons

p	$1/2^+$	****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****	Σ^+	$1/2^+$	****	Ξ^0	$1/2^+$	****	Λ_c^+	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	***	Σ^0	$1/2^+$	****	Ξ^-	$1/2^+$	****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$N(1440)$	$1/2^+$	****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****	Σ^-	$1/2^+$	****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***
$N(1520)$	$3/2^-$	****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(1685)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1620)$	*		$\Lambda_c(2765)^+$	*	
$N(1535)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(1680)$	*		$\Xi(1690)$	***		$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$N(1650)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	**	$\Sigma(1660)$	**		$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***	$\Lambda_c(2940)^+$	***	
$N(1675)$	$5/2^-$	****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****	$\Sigma(1680)$	$3/2^-$	*	$\Xi(1950)$	***		$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****
$N(1680)$	$5/2^+$	****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	**	$\Xi(2030)$	$\geq 5/2^?$	***	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***
$N(1685)$	*		$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***	$\Xi(2120)$	*		$\Sigma_c(2800)$	***	
$N(1700)$	$3/2^-$	***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****	$\Xi(2250)$	**		Ξ_c^+	$1/2^+$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**	$\Sigma(1690)$	**		$\Xi(2370)$	**		Ξ_c^0	$1/2^+$	***
$N(1720)$	$3/2^+$	****	$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$	***	$\Xi(2500)$	*		Ξ_c^+	$1/2^+$	***
$N(1860)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**	$\Sigma(1770)$	$1/2^+$	*	Ω^-	$3/2^+$	****	Ξ_c^0	$1/2^+$	***
$N(1875)$	$3/2^-$	***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$	****	$\Omega(2250)^-$	***		$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$	***
$N(1880)$	$1/2^+$	**	$\Delta(2200)$	$7/2^-$	*	$\Sigma(1840)$	$3/2^+$	*	$\Omega(2380)^-$	**		$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$	***
$N(1895)$	$1/2^-$	**	$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**	$\Omega(2470)^-$	**		$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$	***
$N(1900)$	$3/2^+$	***	$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****				$\Xi_c(2930)$	*	
$N(1990)$	$7/2^+$	**	$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$	***				$\Xi_c(2980)$	***	
$N(2000)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**	$\Sigma(2000)$	$1/2^-$	*				$\Xi_c(3055)$	**	
$N(2040)$	$3/2^+$	*	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****	$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****				$\Xi_c(3080)$	***	
$N(2060)$	$5/2^-$	**	$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*				$\Xi_c(3123)$	*	
$N(2100)$	$1/2^+$	*	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	**				Ω_c^0	$1/2^+$	***
$N(2120)$	$3/2^-$	**				$\Sigma(2000)$	$7/2^-$	*				$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***
$N(2190)$	$7/2^-$	****	Λ	$1/2^+$	****	$\Sigma(2250)$	***					Ξ_{cc}^+	*	
$N(2220)$	$9/2^+$	****	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(2255)$	**							
$N(2250)$	$9/2^-$	****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(2220)$	**							
$N(2600)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	***	$\Sigma(3000)$	*							
$N(2700)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(3170)$	*							
			$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	****									
			$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	***									
			$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	***									
			$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	****									
			$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	****									
			$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	****									
			$\Lambda(2000)$	*										
			$\Lambda(2020)$	$7/2^+$	*									
			$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****									
			$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***									
			$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*									
			$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***									
			$\Lambda(2585)$	**										

qqq (l=1/2)
[q = u or d]

qqq (l=3/2)
[q = u or d]

qqq (l=1)
[q = u or d]

qqq (l=0)
[q = u or d]

qss (l=1/2)
[q = u or d]

sss (l=0)

qqb (l=1)
[q = u or d]

ssb (l=0)

qqc (l=0)
[q = u or d]

qqc (l=1)
[q = u or d]

qsc (l=1/2)
[q = u or d]

ssc (l=0)

qcc (l=1/2)
[q = u or d]

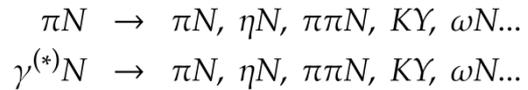
qqb (l=0)
[q = u or d]

qsb (l=1/2)
[q = u or d]

PDG (2012):
<http://pdg.lbl.gov>

バリオン分光研究のアプローチ

Reaction Data



JLab, CBELSA, MAMI,
SPring-8, ELPH,...

Analysis based on reaction theory

Mass, width,
form factors, etc of
 N^* & Δ^*

QCD-inspired
Hadron Models

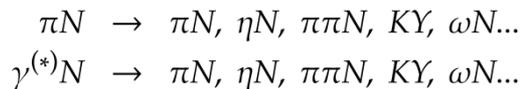
Lattice QCD

QCD

構成クォーク模型
ソリトン模型
ホログラフィックQCD etc

バリオン分光研究のアプローチ

Reaction Data



JLab, CBELSA, MAMI, SPring-8, ELPH,...

Analysis based on reaction theory

Mass, width, form factors, etc of N^* & Δ^*

QCD-inspired Hadron Models

Lattice QCD

QCD

Our approach !!

構成クォーク模型
ソリトン模型
ホログラフィックQCD etc

S行列のユニタリー性に起因する反応チャンネル間の結合を適切に取り入れた反応モデルが必須！！

✓ **Multichannel unitary condition:**

$$T_{ab}(E) - T_{ab}^\dagger(E) = -2\pi i \sum_c T_{ac}^\dagger \delta(E - E_c) T_{cb}(E)$$

$$a, b, c = (\gamma^{(*)}N, \pi N, \eta N, \pi\pi N, K\Lambda, K\Sigma, \omega N \dots)$$

- “確率の保存”を保証。
- 散乱理論から要求される**散乱振幅の解析的構造を規定**。(分岐点、カット)

ANL-Osaka/EBAC-JLab, Bonn-Gatchina, Carnegie Mellon-Berkely, Dubna-Mainz-Taipei, George Washington U, Giessen, Juelich, Karlsruhe-Helsinki, ...

ユニタリーな多チャンネル反応模型

動的結合チャンネル模型 [Matsuyama, Sato, Lee, Phys. Rep. 439(2007)193]

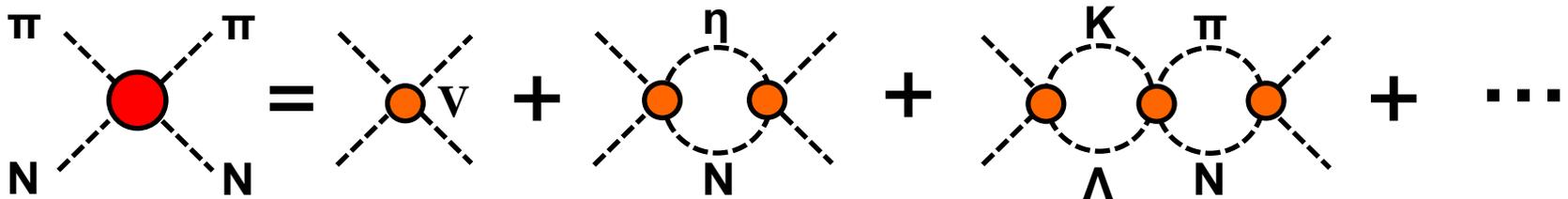
$$T_{a,b}^{(LSJ)}(p_a, p_b; E) = V_{a,b}^{(LSJ)}(p_a, p_b; E) + \sum_c \int_0^\infty q^2 dq V_{a,c}^{(LSJ)}(p_a, q; E) G_c(q; E) T_{c,b}^{(LSJ)}(q, p_b; E)$$

チャンネル結合の効果

$$a, b, c = (\gamma^{(*)}N, \pi N, \eta N, \pi\Delta, \sigma N, \rho N, K\Lambda, K\Sigma, \dots)$$

$\pi\pi N$

例) πN 散乱



中間過程における反応チャンネル間の遷移のあらゆる可能性を
全て足しあげる！！

ユニタリーな多チャンネル反応模型

動的結合チャンネル模型 [Matsuyama, Sato, Lee, Phys. Rep. 439(2007)193]

$$T_{a,b}^{(LSJ)}(p_a, p_b; E) = V_{a,b}^{(LSJ)}(p_a, p_b; E) + \sum_c \int_0^\infty q^2 dq V_{a,c}^{(LSJ)}(p_a, q; E) G_c(q; E) T_{c,b}^{(LSJ)}(q, p_b; E)$$

チャンネル結合の効果

$$a, b, c = (\gamma^{(*)}N, \pi N, \eta N, \pi\Delta, \sigma N, \rho N, K\Lambda, K\Sigma, \dots)$$

$\pi\pi N$

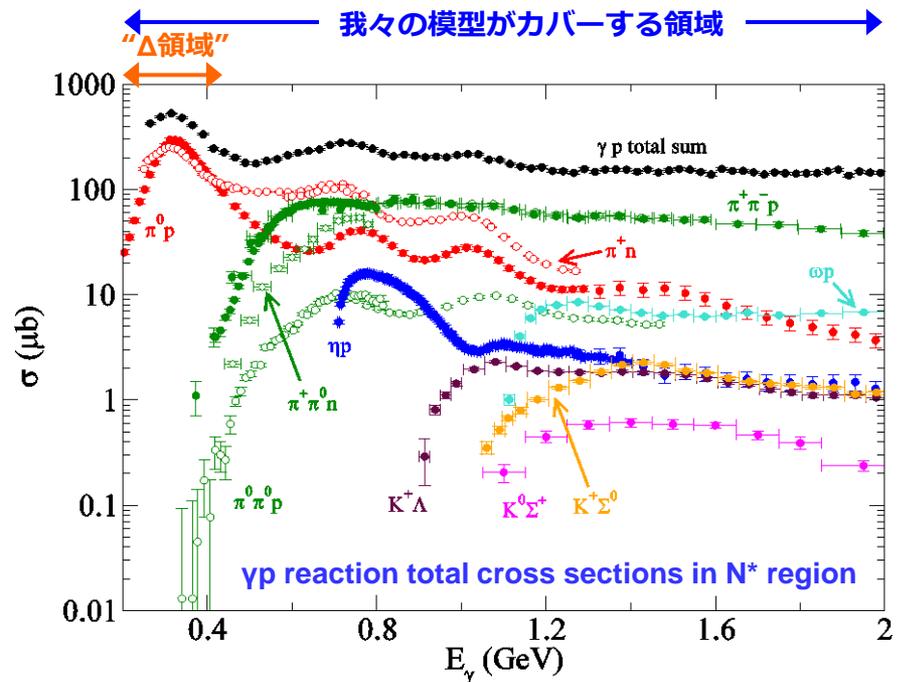
現況 :

$\pi N \rightarrow \pi N, \eta N, K\Lambda, K\Sigma$ ($s^{1/2} < 2.1$ GeV)

$\gamma N \rightarrow \pi N, \eta N, K\Lambda, K\Sigma$ ($s^{1/2} < 2.1$ GeV)

の微分断面積・偏極量の現存する全てのデータを包括的に解析し、反応模型を構築 (模型パラメータを決定)。

HK, Nakamura, Lee, Sato, PRC88(2013)035209



ユニタリーな多チャンネル反応模型

動的結合チャンネル模型 [Matsuyama, Sato, Lee, Phys. Rep. 439(2007)193]

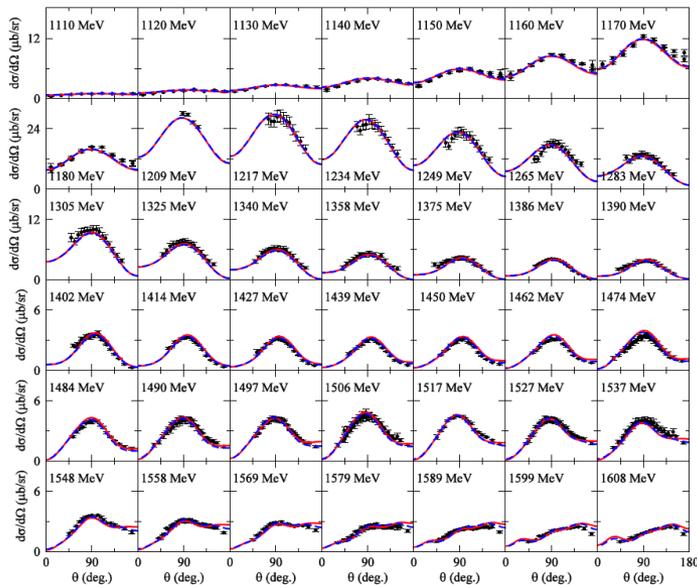
$$T_{a,b}^{(LSJ)}(p_a, p_b; E) = V_{a,b}^{(LSJ)}(p_a, p_b; E) + \sum_c \int_0^\infty q^2 dq V_{a,c}^{(LSJ)}(p_a, q; E) G_c(q; E) T_{c,b}^{(LSJ)}(q, p_b; E)$$

チャンネル結合の効果

$$a, b, c = (\gamma^{(*)}N, \pi N, \eta N, \pi\Delta, \sigma N, \rho N, K\Lambda, K\Sigma, \dots)$$

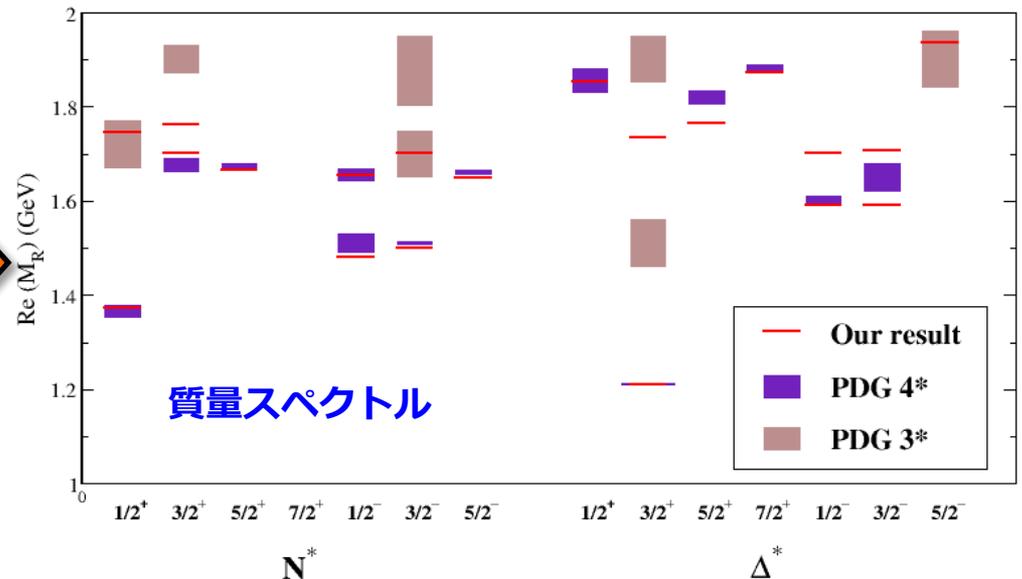
$\pi\pi N$

データにフィットして模型を構築



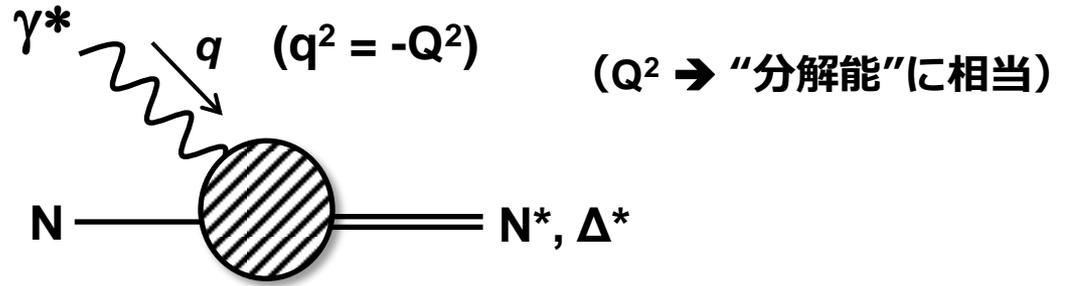
$\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ 微分断面積

構築した反応模型から N^* , Δ^* の情報を抽出



質量スペクトル

遷移形状因子とバリオン構造



N-N* 間電磁遷移形状因子

“ハドロン”的描像

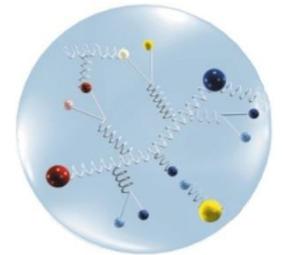
中間子雲

バリオン

“裸”のバリオン

中間子

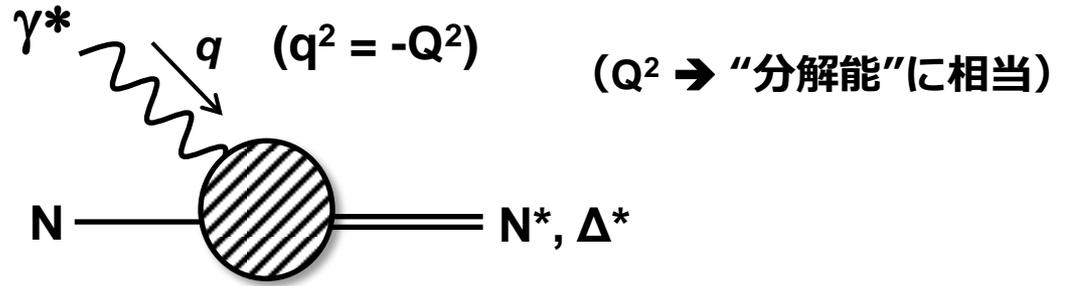
“パートン”的描像



Q^2 : 小

Q^2 : 大

遷移形状因子とバリオン構造



N-N* 間電磁遷移形状因子

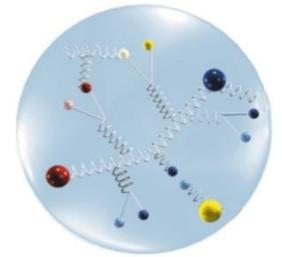
“ハドロン”的描像

中間子雲

バリオン



“パートン”的描像



Q^2 : 小

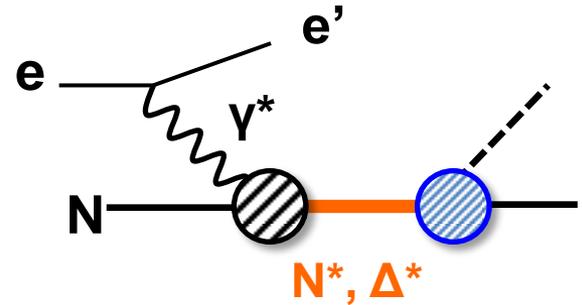
Q^2 : 大

バリオンを記述する“有効自由度”がどのように変化するか？

遷移形状因子とバリオン構造

Measurement of $p(e, e' \pi)N$ &
 $p(e, e' \pi \pi)N$ for $5 < Q^2 < 10$ (GeV/c) 2 .

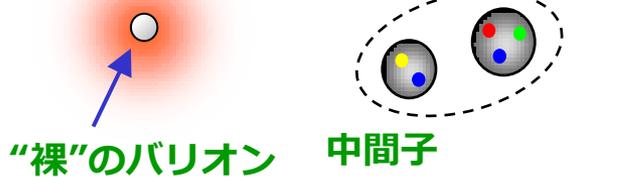
→ JLab CLAS12 experiment
(E12-09-003)



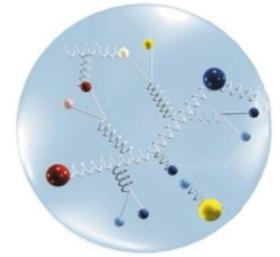
“ハドロン”的描像

中間子雲

バリオン



“パートン”的描像



Q^2 : 小

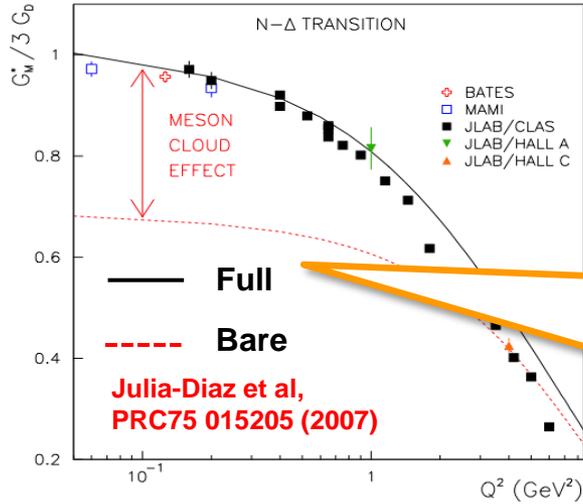
?

Q^2 : 大

バリオンを記述する“有効自由度”がどのように変化するか？

遷移形状因子とバリオン構造

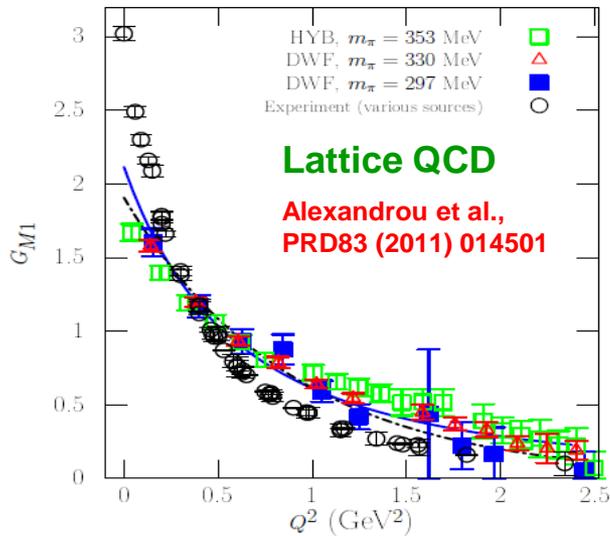
$N \rightarrow \Delta(1232)$ M1 transition form factor



$\Delta(1232)$
at low Q^2

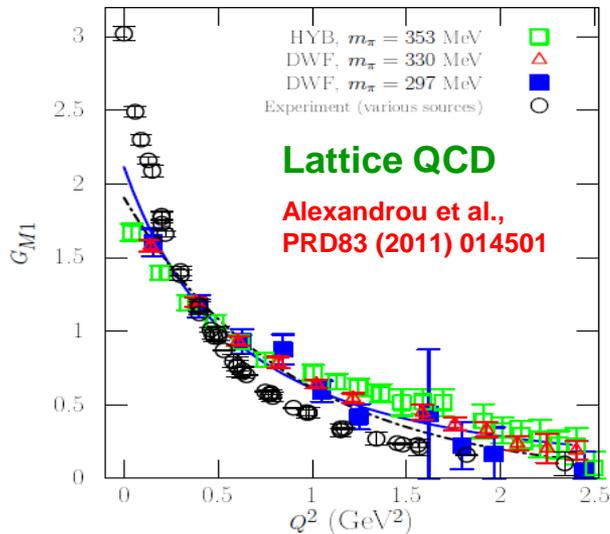
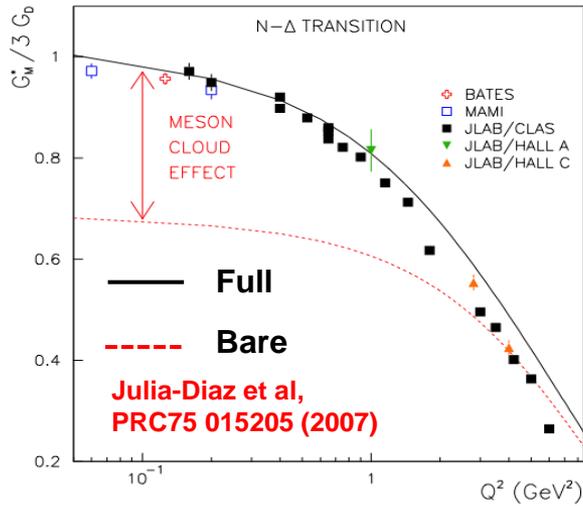


低い Q^2 領域では、 $\Delta(1232)$ が
“コア”+“中間子雲”の形態が
支配的であることを示唆。



遷移形状因子とバリオン構造

N → Δ (1232) M1 transition form factor



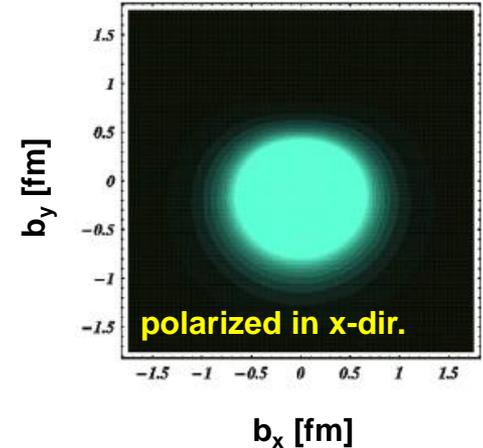
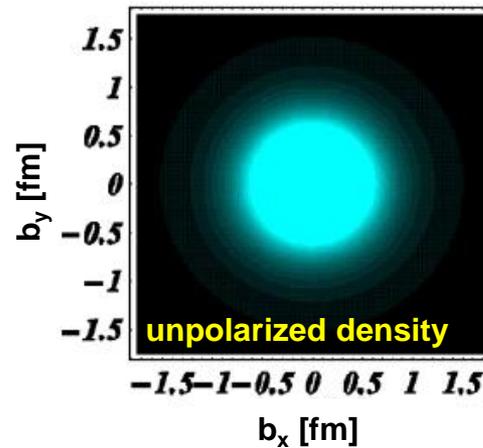
Transverse (transition) charge densities

Tiator et al., EPJST 198 (2011) 141

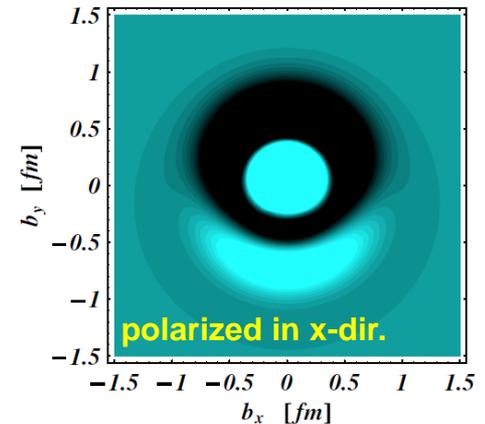
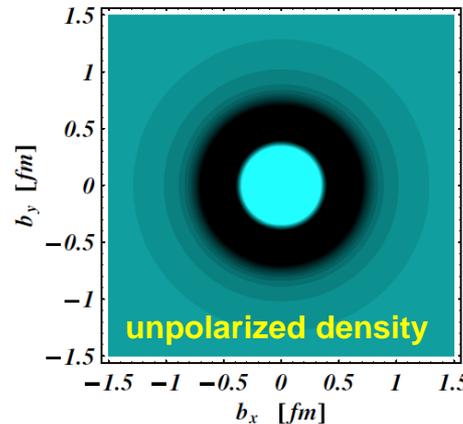
明色 : +電荷

暗色 : 0 or -電荷

proton → proton

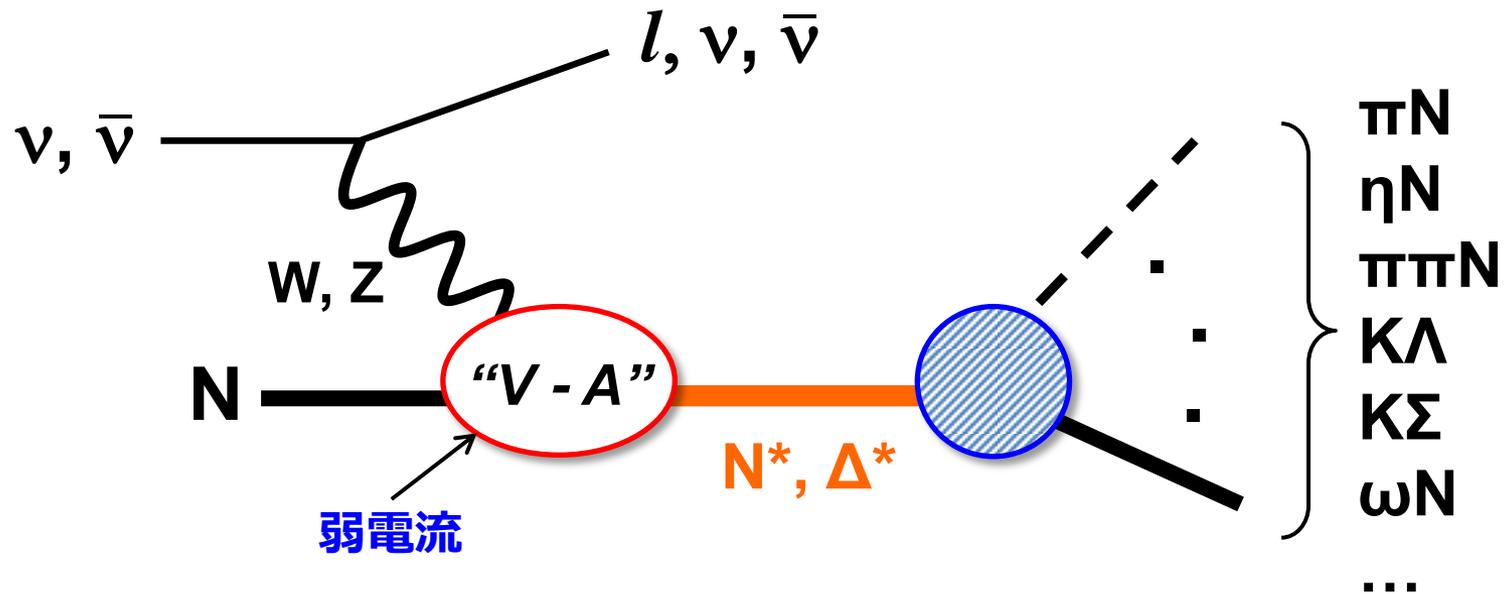


proton → N*(1440)[Roper resonance]



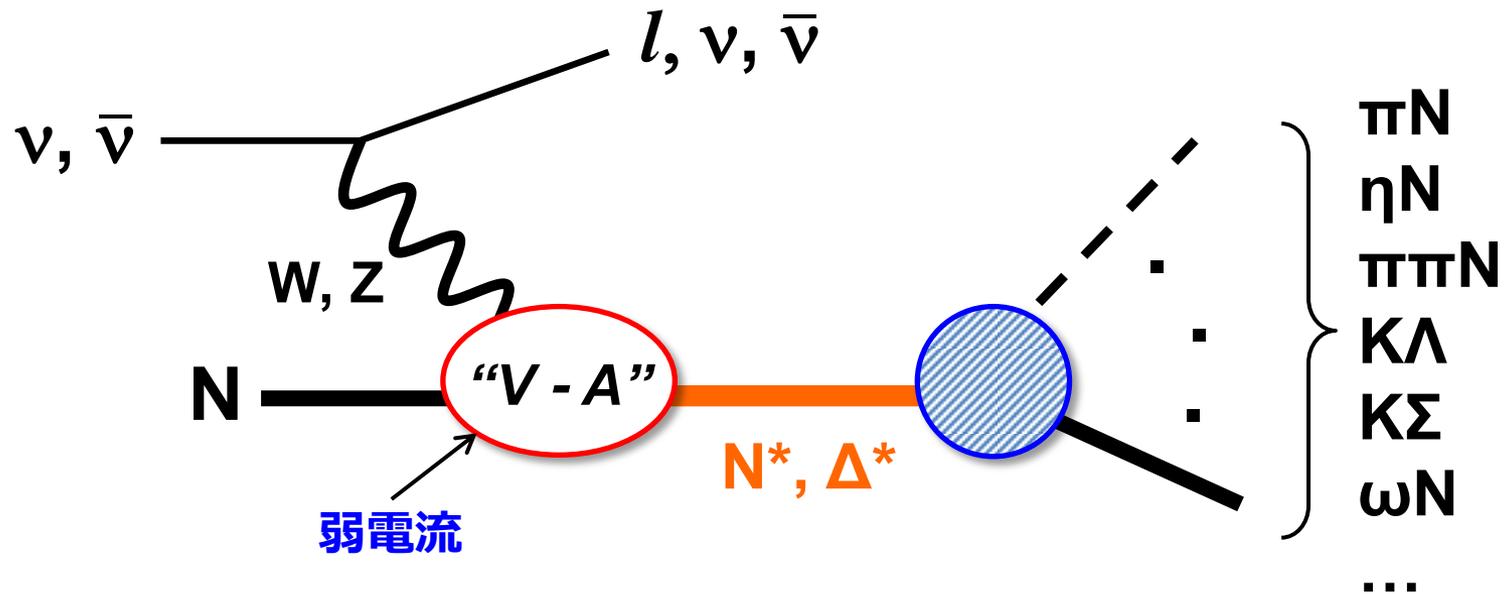
バリオン分光の観点から見たニュートリノ反応

- ✓ N^* , Δ^* 共鳴領域におけるニュートリノ - 核子反応
(\rightarrow strangeness-conserving process)



バリオン分光の観点から見たニュートリノ反応

- ✓ N^* , Δ^* 共鳴領域におけるニュートリノ - 核子反応
(\rightarrow strangeness-conserving process)



軸性カレントによる遷移形状因子を直接調べられるほぼ唯一の反応 !!

- 電磁(ベクトル)カレントによる遷移形状因子とは独立した情報を提供。
- 格子QCDによる計算も行われている。[e.g., Alexandrou et al., PRL107,141601 (2011)]

バリオン分光の観点から見たニュートリノ反応

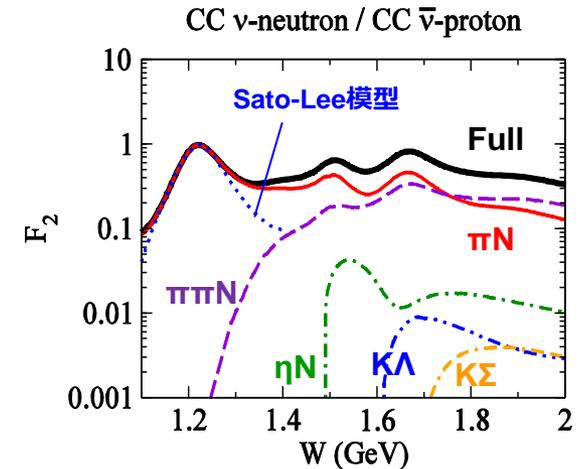
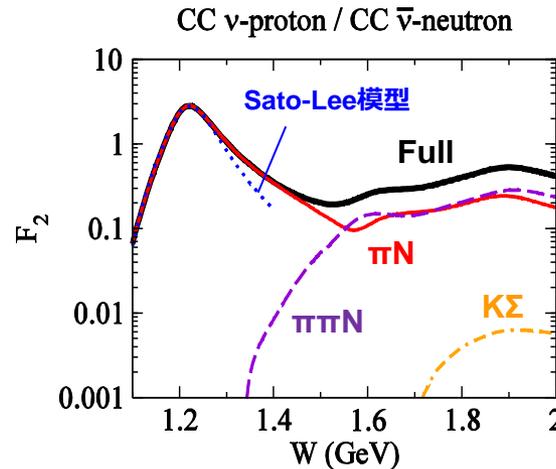
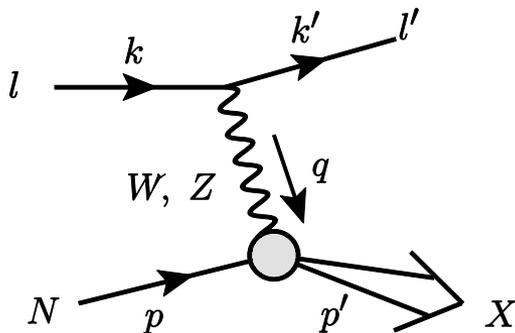
動的結合チャンネルモデルのニュートリノ反応への最初の応用：

HK, Nakamura, Lee, Sato, PRD86(2012)097503

前方極限($\rightarrow Q^2=0$)におけるニュートリノ - 核子反応(共鳴領域)の評価

\rightarrow PCACを利用すると、 πN 反応振幅を用いて求められる。

\rightarrow πN , γN 反応の包括的解析から得られた πN 反応振幅を用いて**予言**。



Finite Q^2 に適用できる反応モデルを現在開発中
(HK, Lee, Nakamura, Sato)

バリオン分光の観点から見たニュートリノ反応

ニュートリノ反応実験に期待するデータ

原子核媒質効果のない(少ない)陽子、重陽子標的の
ニュートリノ反応(exclusive)データ

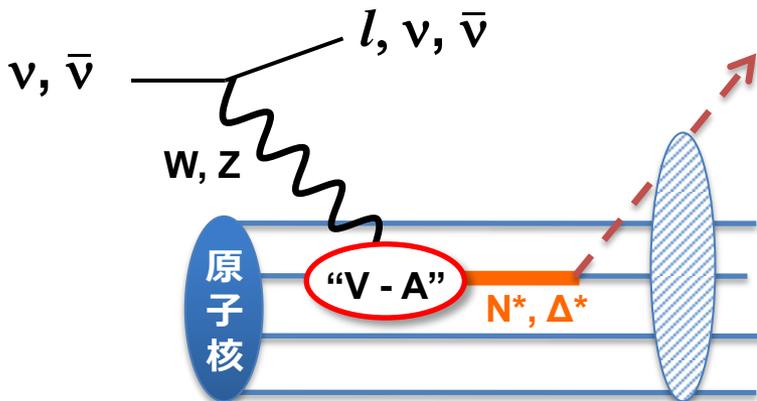
データ数の少なさは、抽出される遷移形状因子の不定性にダイレクトに反映される。

バリオン分光の観点から見たニュートリノ反応

ニュートリノ反応実験に期待するデータ

原子核媒質効果のない(少ない)陽子、重陽子標的の
ニュートリノ反応(exclusive)データ

データ数の少なさは、抽出される遷移形状因子の不定性にダイレクトに反映される。



- ✓ 素過程の信頼できる反応モデルを作ることは
ニュートリノ-原子核間相互作用を理解する
うえでも重要！！
- ベクトルカレントの形状因子や原子核媒質効果は、
原理的には電子/光子 - 原子核反応から決められる。
- 一番の不定性は素過程の軸性カレントによる
形状因子部分と予想される。

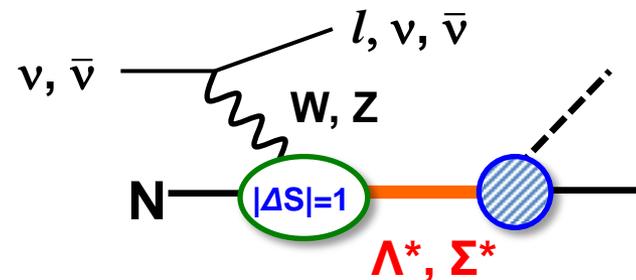
まとめ

- ✓ 質量スペクトルや崩壊幅の研究に加え、バリオン内部構造のより定量的/系統的な研究が近年活発に行われるようになった。
 - 電子/光子ビームによる中間子生成反応の高統計データが次々に報告。
 - 多反応チャンネル間の動的結合を適切に取り入れたハドロン反応モデルが登場。スパコンを用いた大規模数値解析が可能になった。
 - 格子QCD計算の進展により、QCDとの“直接的”な比較も可能になりつつある。

まとめ

- ✓ 質量スペクトルや崩壊幅の研究に加え、バリオン内部構造のより定量的/系統的な研究が近年活発に行われるようになった。
 - 電子/光子ビームによる中間子生成反応の高統計データが次々に報告。
 - 多反応チャンネル間の動的結合を適切に取り入れたハドロン反応モデルが登場。スパコンを用いた大規模数値解析が可能になった。
 - 格子QCD計算の進展により、QCDとの“直接的”な比較も可能になりつつある。
- ✓ ニュートリノ反応は、**軸性カレント**や **strangeness-changingカレント**による遷移形状因子の情報に直接アクセスできる唯一の反応。

Strangeness-changing neutrino reaction



まとめ

- ✓ 質量スペクトルや崩壊幅の研究に加え、バリオン内部構造のより定量的/系統的な研究が近年活発に行われるようになった。
 - 電子/光子ビームによる中間子生成反応の高統計データが次々に報告。
 - 多反応チャンネル間の動的結合を適切に取り入れたハドロン反応モデルが登場。スパコンを用いた大規模数値解析が可能になった。
 - 格子QCD計算の進展により、QCDとの“直接的”な比較も可能になりつつある。
- ✓ ニュートリノ反応は、**軸性カレント**や **strangeness-changingカレント**による遷移形状因子の情報に直接アクセスできる唯一の反応。
- ✓ 遷移形状因子の研究には、**陽子・重陽子標的**のニュートリノ反応断面積データが不可欠！！
 - ニュートリノ-核子反応モデルの精密化は、ニュートリノ-原子核間相互作用の理解にも直結。