

ユニタリーな多チャンネル反応モデルによる 軽クォークメソン分光 (エキゾチックハドロン系の精密科学)

鎌野 寛之

(大阪大学核物理研究センター)

目次 :

- ✓ u, dクォーク(軽クォーク)セクターのメソン分光研究の動向
(エキゾチックメソン探索を含む)
- ✓ 軽クォークメソン分光研究における問題点
- ✓ 我々の取り組み
- ✓ まとめと今後の課題

Mesons

LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)		STRANGE ($S = \pm 1, C = B = 0$)		CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm 1$)		$c\bar{c}$ $f^G(J^{PC})$			
$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$		
π^\pm	$1^-(0^-)$	$\pi_2(1670)$	$1^-(2^-)$	K^\pm	$1/2(0^-)$	D_s^\pm	$0(0^-)$	$\eta_c(1S)$	$0^+(0^-)$
π^0	$1^-(0^-)$	$\phi(1680)$	$0^-(1^-)$	K^0	$1/2(0^-)$	$D_s^{*\pm}$	$0(?)$	$J/\psi(1S)$	$0^-(1^-)$
η	$0^+(0^-)$	$\rho_3(1690)$	$1^+(3^-)$	K_S^0	$1/2(0^-)$	$D_{s0}^*(2317)^\pm$	$0(0^+)$	$\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^+)$
$f_0(500)$	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^+(1^-)$	K_L^0	$1/2(0^-)$	$D_{s1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$	$\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^+)$
$\rho(770)$	$1^+(1^-)$	$a_2(1700)$	$1^-(2^+)$	$K_0^*(800)$	$1/2(0^+)$	$D_{s1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$	$h_c(1P)$	$?^?(1^+)$
$\omega(782)$	$0^-(1^-)$	$f_0(1710)$	$0^+(0^+)$	$K_0^*(892)$	$1/2(1^-)$	$D_{s2}(2573)$	$0(?)$	$\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^+)$
$\eta'(958)$	$0^+(0^-)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^-)$	$K_1(1270)$	$1/2(1^+)$	$D_{s1}^*(2700)^\pm$	$0(1^-)$	$\eta_c(2S)$	$0^+(0^-)$
$f_0(980)$	$0^+(0^+)$	$\pi(1800)$	$1^-(0^-)$	$K_1(1400)$	$1/2(1^+)$	$D_{sJ}^*(2860)^\pm$	$0(?)$	$\psi(2S)$	$0^-(1^-)$
$a_0(980)$	$1^-(0^+)$	$f_2(1810)$	$0^+(2^+)$	$K^*(1410)$	$1/2(1^-)$	$D_{sJ}(3040)^\pm$	$0(?)$	$\psi(3770)$	$0^-(1^-)$
$\phi(1020)$	$0^-(1^-)$	$X(1835)$	$?^?(?^-)$	$K_0^*(1430)$	$1/2(0^+)$	BOTTOM ($B = \pm 1$)		$X(3872)$	$0^?(?^+)$
$h_1(1170)$	$0^-(1^-)$	$\phi_3(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_2^*(1430)$	$1/2(2^+)$	B^\pm	$1/2(0^-)$	$X(3915)$	$0^?(?^+)$
$b_1(1235)$	$1^+(1^-)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^-)$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$	B^0	$1/2(0^-)$	$\chi_{c2}(2P)$	$0^+(2^+)$
$a_1(1260)$	$1^-(1^+)$	$\pi_2(1880)$	$1^-(2^-)$	$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$	B^\pm/B^0 ADMIXTURE		$X(3940)$	$?^?(?^?)$
$f_2(1270)$	$0^+(2^+)$	$\rho(1900)$	$1^+(1^-)$	$K_2(1630)$	$1/2(?)$	$B^\pm/B^0/B_S^0/b$ -baryon ADMIXTURE		$\psi(4040)$	$0^-(1^-)$
$f_1(1285)$	$0^+(1^+)$	$f_2(1910)$	$0^+(2^+)$	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$	V_{cb} and V_{ub} CKM Matrix Elements		$X(4050)^\pm$	$?^?(?^?)$
$\eta(1295)$	$0^+(0^-)$	$f_2(1950)$	$0^+(2^+)$	$K_1(1680)$	$1/2(1^-)$	B^*	$1/2(1^-)$	$X(4140)$	$0^+(?^+)$
$\pi(1300)$	$1^-(0^-)$	$\rho_3(1990)$	$1^+(3^-)$	$K^*(1680)$	$1/2(2^-)$	$B_J^*(5732)$	$?^?(?^?)$	$\psi(4160)$	$0^-(1^-)$
$a_2(1320)$	$1^-(2^+)$	$f_2(2010)$	$0^+(2^+)$	$K_2(1770)$	$1/2(2^-)$	$B_1(5721)^0$	$1/2(1^+)$	$X(4160)$	$?^?(?^?)$
$f_0(1370)$	$0^+(0^+)$	$f_0(2020)$	$0^+(0^+)$	$K_3^*(1780)$	$1/2(3^-)$	$B_2^*(5747)^0$	$1/2(2^+)$	$X(4250)^\pm$	$?^?(?^?)$
$h_1(1380)$	$?^-(1^-)$	$a_4(2040)$	$1^-(4^+)$	$K_2(1820)$	$1/2(2^-)$	B^*	$1/2(1^-)$	$X(4260)$	$?^?(1^-)$
$\pi_1(1400)$	$1^-(1^-)$	$f_4(2050)$	$0^+(4^+)$	$K(1830)$	$1/2(0^-)$	$B_J^*(5732)$	$?^?(?^?)$	$X(4350)$	$0^+(?^+)$
$\eta(1405)$	$0^+(0^-)$	$\pi_2(2100)$	$1^-(2^-)$	$K_0^*(1950)$	$1/2(0^+)$	$B_1(5721)^0$	$1/2(1^+)$	$X(4360)$	$?^?(1^-)$
$f_1(1420)$	$0^+(1^+)$	$f_0(2100)$	$0^+(0^+)$	$K_2^*(1980)$	$1/2(2^+)$	$B_2^*(5747)^0$	$1/2(2^+)$	$\psi(4415)$	$0^-(1^-)$
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$f_2(2150)$	$0^+(2^+)$	$K_4^*(2045)$	$1/2(4^+)$	BOTTOM, STRANGE ($B = \pm 1, S = \mp 1$)		$X(4430)^\pm$	$?^?(?^?)$
$f_2(1430)$	$0^+(2^+)$	$\rho(2150)$	$1^+(1^-)$	$K_2(2250)$	$1/2(2^-)$	B_s^0	$0(0^-)$	$X(4660)$	$?^?(1^-)$
$a_0(1450)$	$1^-(0^+)$	$\phi(2170)$	$0^-(1^-)$	$K_3(2320)$	$1/2(3^+)$	B_s^*	$0(1^-)$	$b\bar{b}$	
$\rho(1450)$	$1^+(1^-)$	$f_0(2200)$	$0^+(0^+)$	$K_5^*(2380)$	$1/2(5^-)$	$B_{s1}(5830)^0$	$0(1^+)$	$\eta_b(1S)$	$0^+(0^-)$
$\eta(1475)$	$0^+(0^-)$	$f_J(2220)$	$0^+(2^+)$	$K_4(2500)$	$1/2(4^-)$	$B_{s2}^*(5840)^0$	$0(2^+)$	$\Upsilon(1S)$	$0^-(1^-)$
$f_0(1500)$	$0^+(0^+)$	or 4^+		$K(3100)$	$?^?(?^?)$	$B_{sJ}^*(5850)$	$?^?(?^?)$	$\chi_{b0}(1P)$	$0^+(0^+)$
$f_1(1510)$	$0^+(1^+)$	$\eta(2225)$	$0^+(0^-)$	CHARMED ($C = \pm 1$)		BOTTOM, CHARMED ($B = C = \pm 1$)		$\chi_{b1}(1P)$	$0^+(1^+)$
$f_2'(1525)$	$0^+(2^+)$	$\rho_3(2250)$	$1^+(3^-)$	D^\pm	$1/2(0^-)$	B_c^\pm	$0(0^-)$	$h_b(1P)$	$?^?(1^+)$
$f_2(1565)$	$0^+(2^+)$	$f_2(2300)$	$0^+(2^+)$	D^0	$1/2(0^-)$			$\chi_{b2}(1P)$	$0^+(2^+)$
$\rho(1570)$	$1^+(1^-)$	$f_4(2300)$	$0^+(4^+)$	D^*	$1/2(1^-)$			$\Upsilon(2S)$	$0^-(1^-)$
$h_1(1595)$	$0^-(1^-)$	$f_0(2330)$	$0^+(0^+)$	$D^*(2007)^0$	$1/2(1^-)$			$\Upsilon(1D)$	$0^-(2^-)$
$\pi_1(1600)$	$1^-(1^-)$	$f_2(2340)$	$0^+(2^+)$	$D^*(2010)^\pm$	$1/2(1^-)$			$\chi_{b0}(2P)$	$0^+(0^+)$
$a_1(1640)$	$1^-(1^+)$	$\rho_5(2350)$	$1^+(5^-)$	$D_0^*(2400)^0$	$1/2(0^+)$			$\chi_{b1}(2P)$	$0^+(1^+)$
$f_2(1640)$	$0^+(2^+)$	$a_6(2450)$	$1^-(6^+)$	$D_0^*(2400)^\pm$	$1/2(0^+)$			$h_b(2P)$	$?^?(1^+)$
$\eta_2(1645)$	$0^+(2^-)$	$f_6(2510)$	$0^+(6^+)$	$D_1(2420)^0$	$1/2(1^+)$			$\chi_{b2}(2P)$	$0^+(2^+)$
$\omega(1650)$	$0^-(1^-)$	OTHER LIGHT		$D_1(2420)^\pm$	$1/2(?)$			$\Upsilon(3S)$	$0^-(1^-)$
$\omega_3(1670)$	$0^-(3^-)$	Further States		$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$			$\chi_b(3P)$	$?^?(?^+)$
				$D_2^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$			$\Upsilon(4S)$	$0^-(1^-)$
				$D_2^*(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$			$X(10610)^\pm$	$?^?(1^+)$
				$D(2550)^0$	$1/2(0^-)$			$X(11020)$	$0^-(1^-)$
				$D(2600)$	$1/2(?)$			$\Upsilon(10860)$	$0^-(1^-)$
				$D^*(2640)^\pm$	$1/2(?)$			$\Upsilon(11020)$	$0^-(1^-)$
				$D(2750)$	$1/2(?)$				

LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)		STRANGE ($S = \pm 1, C = B = 0$)		CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm 1$)		$c\bar{c}$ J^PC	
J^PC	J^PC	J^PC	J^PC	J^PC	J^PC	J^PC	J^PC
π^\pm $1^-(0^-)$	$\pi_2(1670)$ $1^-(2^-+)$	K^\pm $1/2(0^-)$	D_s^\pm $0(0^-)$	$\eta_c(1S)$ $0^+(0^-+)$	$\eta_c(1S)$ $0^+(0^-+)$	$J/\psi(1S)$ $0^-(1^-+)$	$J/\psi(1S)$ $0^-(1^-+)$
π^0 $1^-(0^-+)$	$\phi(1680)$ $0^-(1^-+)$	K^0 $1/2(0^-)$	$D_s^{*\pm}$ $0(?^?)$	$\chi_{c0}(1P)$ $0^+(0^++)$	$\chi_{c0}(1P)$ $0^+(0^++)$	$\chi_{c1}(1P)$ $0^+(1^++)$	$\chi_{c1}(1P)$ $0^+(1^++)$
η $0^+(0^-+)$	$\rho_3(1690)$ $1^+(3^-+)$	K_S^0 $1/2(0^-)$	$D_{s0}^*(2317)^\pm$ $0(0^+)$	$h_c(1P)$ $?^?(1^+)$	$h_c(1P)$ $?^?(1^+)$	$\chi_{c2}(1P)$ $0^+(2^++)$	$\chi_{c2}(1P)$ $0^+(2^++)$
$f_0(500)$ $0^+(0^++)$	$\rho(1700)$ $1^+(1^-+)$	K_L^0 $1/2(0^-)$	$D_{s1}(2460)^\pm$ $0(1^+)$	$\eta_c(2S)$ $0^+(0^-+)$	$\eta_c(2S)$ $0^+(0^-+)$		
$\rho(770)$ $1^+(1^-+)$	$a_2(1700)$ $1^-(2^++)$	$K_S^*(800)$ $1/2(0^+)$	$D_{s1}(2536)^\pm$ $0(1^+)$				
$\omega(782)$ $0^-(1^-+)$	$f_0(1710)$ $0^+(0^++)$	$K^*(892)$ $1/2(1^-)$	$D_{s^*}(2573)$ $0(?^?)$				

Meson spectroscopy: Understanding nature of mesons and their excitations

Mass, width, spin, parity ...?

Internal structure?

How produced in reaction processes?

...

Mesons

J^PC	Further States	J^PC	J^PC
$\omega_3(1670)$ $0^-(3^-)$		$D_1(2430)^0$ $1/2(1^+)$	$\Upsilon(4S)$ $0^-(1^-+)$
		$D_2^*(2460)^0$ $1/2(2^+)$	$X(10610)^\pm$ $?^+(1^+)$
		$D_2^*(2460)^\pm$ $1/2(2^+)$	$X(11030)$ $0^-(1^-+)$
		$D(2550)^0$ $1/2(0^-)$	$\Upsilon(10860)$ $0^-(1^-+)$
		$D(2600)$ $1/2(?^?)$	$\Upsilon(11020)$ $0^-(1^-+)$
		$D^*(2640)^\pm$ $1/2(?^?)$	
		$D(2750)$ $1/2(?^?)$	

PDG:

<http://pdg.lbl.gov>

Mesons

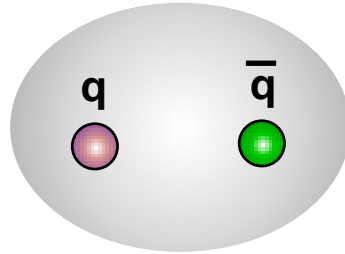
LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)		STRANGE ($S = \pm 1, C = B = 0$)		CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm 1$)		$c\bar{c}$ $f^G(J^{PC})$			
$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$	$f^G(J^{PC})$		
π^\pm	$1^-(0^-)$	$\pi_2(1670)$	$1^-(2^-)$	K^\pm	$1/2(0^-)$	D_s^\pm	$0(0^-)$	$\eta_c(1S)$	$0^+(0^-)$
π^0	$1^-(0^-)$	$\phi(1680)$	$0^-(1^-)$	K^0	$1/2(0^-)$	$D_s^{*\pm}$	$0(?)$	$J/\psi(1S)$	$0^-(1^-)$
η	$0^+(0^-)$	$\rho_3(1690)$	$1^+(3^-)$	K_S^0	$1/2(0^-)$	$D_{s0}^*(2317)^\pm$	$0(0^+)$	$\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^+)$
$f_0(500)$	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^+(1^-)$	K_L^0	$1/2(0^-)$	$D_{s1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$	$\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^+)$
$\rho(770)$	$1^+(1^-)$	$a_2(1700)$	$1^-(2^+)$	$K_0^*(800)$	$1/2(0^+)$	$D_{s1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$	$h_c(1P)$	$?^?(1^+)$
$\omega(782)$	$0^-(1^-)$	$f_0(1710)$	$0^+(0^+)$	$K^*(892)$	$1/2(1^-)$	$D_{s2}(2573)$	$0(?)$	$\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^+)$
$\eta'(958)$	$0^+(0^-)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^-)$	$K_1(1270)$	$1/2(1^+)$	$D_{s1}^*(2700)^\pm$	$0(1^-)$	$\eta_c(2S)$	$0^+(0^-)$
$f_0(980)$	$0^+(0^+)$	$\pi(1800)$	$1^-(0^-)$	$K_1(1400)$	$1/2(1^+)$	$D_{sJ}^*(2860)^\pm$	$0(?)$	$\psi(2S)$	$0^-(1^-)$
$a_0(980)$	$1^-(0^+)$	$f_2(1810)$	$0^+(2^+)$	$K_1(1400)$	$1/2(1^+)$	$D_{sJ}^*(2860)^\pm$	$0(?)$	$\psi(3770)$	$0^-(1^-)$
$\phi(1020)$	$0^-(1^-)$	$X(1835)$	$?^?(?^-)$	$K^*(1410)$	$1/2(1^-)$	$D_{sJ}^*(3040)^\pm$	$0(?)$	$X(3872)$	$0^?(?^+)$
$h_1(1170)$	$0^-(1^-)$	$\phi_3(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_0^*(1430)$	$1/2(0^+)$	BOTTOM ($B = \pm 1$)		$X(3915)$	$0^?(?^+)$
$b_1(1235)$	$1^+(1^-)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^-)$	$K_2^*(1430)$	$1/2(2^+)$	B^\pm	$1/2(0^-)$	$\chi_{c2}(2P)$	$0^+(2^+)$
$a_1(1260)$	$1^-(1^+)$	$\pi_2(1880)$	$1^-(2^-)$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$	B^0	$1/2(0^-)$	$X(3940)$	$?^?(?^?)$
$f_2(1270)$	$0^+(2^+)$	$\rho(1900)$	$1^+(1^-)$	$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$	B^\pm/B^0 ADMIXTURE		$\psi(4040)$	$0^-(1^-)$
$f_1(1285)$	$0^+(1^+)$	$f_2(1910)$	$0^+(2^+)$	$K_2(1630)$	$1/2(?)$	$B^\pm/B^0/B_S^0/b$ -baryon ADMIXTURE		$X(4050)^\pm$	$?^?(?^?)$
$\eta(1295)$	$0^+(0^-)$	$f_2(1950)$	$0^+(2^+)$	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$	V_{cb} and V_{ub} CKM Matrix Elements		$X(4140)$	$0^+(?^+)$
$\pi(1300)$	$1^-(0^-)$	$\rho_3(1990)$	$1^+(3^-)$	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$	B^*	$1/2(1^-)$	$\psi(4160)$	$0^-(1^-)$
$a_2(1320)$	$1^-(2^+)$	$f_2(2010)$	$0^+(2^+)$	$K^*(1680)$	$1/2(1^-)$	$B_J^*(5732)$	$?^?(?^?)$	$X(4160)$	$?^?(?^?)$
$f_0(1370)$	$0^+(0^+)$	$f_0(2020)$	$0^+(0^+)$	$K_2(1770)$	$1/2(2^-)$	$B_1(5721)^0$	$1/2(1^+)$	$X(4250)^\pm$	$?^?(?^?)$
$h_1(1380)$	$?^-(1^-)$	$a_4(2040)$	$1^-(4^+)$	$K_3^*(1780)$	$1/2(3^-)$	$B_2^*(5747)^0$	$1/2(2^+)$	$X(4260)$	$?^?(1^-)$
$\pi_1(1400)$	$1^-(1^-)$	$f_4(2050)$	$0^+(4^+)$	$K_2(1820)$	$1/2(2^-)$	$B_J^*(5732)$	$?^?(?^?)$	$X(4350)$	$0^+(?^+)$
$\eta(1405)$	$0^+(0^-)$	$\pi_2(2100)$	$1^-(2^-)$	$K(1830)$	$1/2(0^-)$	$B_1(5721)^0$	$1/2(1^+)$	$X(4360)$	$?^?(1^-)$
$f_1(1420)$	$0^+(1^+)$	$f_0(2100)$	$0^+(0^+)$	$K_0^*(1950)$	$1/2(0^+)$	$B_2^*(5747)^0$	$1/2(2^+)$	$\psi(4415)$	$0^-(1^-)$
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$f_2(2150)$	$0^+(2^+)$	$K_2^*(1980)$	$1/2(2^+)$	BOTTOM, STRANGE ($B = \pm 1, S = \mp 1$)		$X(4430)^\pm$	$?^?(?^?)$
$f_2(1430)$	$0^+(2^+)$	$\rho(2150)$	$1^+(1^-)$	$K_4^*(2045)$	$1/2(4^+)$	B_s^0	$0(0^-)$	$X(4660)$	$?^?(1^-)$
$a_0(1450)$	$1^-(0^+)$	$\phi(2170)$	$0^-(1^-)$	$K_2(2250)$	$1/2(2^-)$	B_s^*	$0(1^-)$	$b\bar{b}$	
$\rho(1450)$	$1^+(1^-)$	$f_0(2200)$	$0^+(0^+)$	$K_3(2320)$	$1/2(3^+)$	$B_{s1}(5830)^0$	$0(1^+)$	$\eta_b(1S)$	$0^+(0^-)$
$\eta(1475)$	$0^+(0^-)$	$f_J(2220)$	$0^+(2^+)$	$K_5^*(2380)$	$1/2(5^-)$	$B_{s2}^*(5840)^0$	$0(2^+)$	$\Upsilon(1S)$	$0^-(1^-)$
$f_0(1500)$	$0^+(0^+)$	or 4^+		$K(3100)$	$?^?(?^?)$	$B_{sJ}^*(5850)$	$?^?(?^?)$	$\chi_{b0}(1P)$	$0^+(0^+)$
$f_1(1510)$	$0^+(1^+)$	$\eta(2225)$	$0^+(0^-)$	CHARMED ($C = \pm 1$)		BOTTOM, CHARMED ($B = C = \pm 1$)		$\chi_{b1}(1P)$	$0^+(1^+)$
$f_2'(1525)$	$0^+(2^+)$	$\rho_3(2250)$	$1^+(3^-)$	D^\pm	$1/2(0^-)$	B_c^\pm	$0(0^-)$	$h_b(1P)$	$?^?(1^+)$
$f_2(1565)$	$0^+(2^+)$	$f_2(2300)$	$0^+(2^+)$	D^0	$1/2(0^-)$			$\chi_{b2}(1P)$	$0^+(2^+)$
$\rho(1570)$	$1^+(1^-)$	$f_4(2300)$	$0^+(4^+)$	D^*	$1/2(1^-)$			$\Upsilon(2S)$	$0^-(1^-)$
$h_1(1595)$	$0^-(1^-)$	$f_0(2330)$	$0^+(0^+)$	$D^*(2007)^0$	$1/2(1^-)$			$\Upsilon(1D)$	$0^-(2^-)$
$\pi_1(1600)$	$1^-(1^-)$	$f_2(2340)$	$0^+(2^+)$	$D^*(2010)^\pm$	$1/2(1^-)$			$\chi_{b0}(2P)$	$0^+(0^+)$
$a_1(1640)$	$1^-(1^+)$	$\rho_5(2350)$	$1^+(5^-)$	$D_0^*(2400)^0$	$1/2(0^+)$			$\chi_{b1}(2P)$	$0^+(1^+)$
$f_2(1640)$	$0^+(2^+)$	$a_6(2450)$	$1^-(6^+)$	$D_0^*(2400)^\pm$	$1/2(0^+)$			$h_b(2P)$	$?^?(1^+)$
$\eta_2(1645)$	$0^+(2^-)$	$f_6(2510)$	$0^+(6^+)$	$D_1(2420)^0$	$1/2(1^+)$			$\chi_{b2}(2P)$	$0^+(2^+)$
$\omega(1650)$	$0^-(1^-)$	OTHER LIGHT		$D_1(2420)^\pm$	$1/2(?)$			$\Upsilon(3S)$	$0^-(1^-)$
$\omega_3(1670)$	$0^-(3^-)$	Further States		$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$			$\chi_b(3P)$	$?^?(?^+)$
				$D_2^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$			$\Upsilon(4S)$	$0^-(1^-)$
				$D_2^*(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$			$X(10610)^\pm$	$?^?(1^+)$
				$D(2550)^0$	$1/2(0^-)$			$X(11020)$	$0^-(1^-)$
				$D(2600)$	$1/2(?)$			$\Upsilon(10860)$	$0^-(1^-)$
				$D^*(2640)^\pm$	$1/2(?)$			$\Upsilon(11020)$	$0^-(1^-)$
				$D(2750)$	$1/2(?)$				

PDG:

<http://pdg.lbl.gov>

イントロ：メソンの存在形態

“Ordinary” メソン



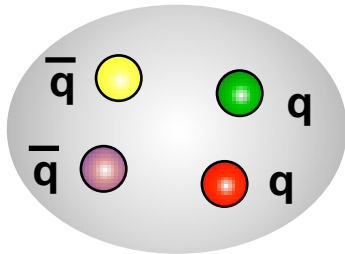
持つことが許される量子数：

$$J^{PC} = 0^+, 0^{++}, 1^-, 1^{+-}, 2^{++}, \dots$$

持つことが許されない量子数：

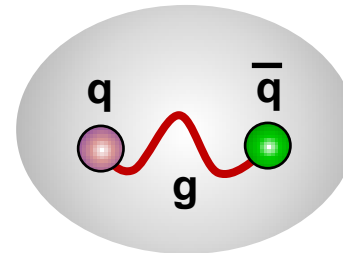
$$J^{PC} = 0^-, 0^{+-}, 1^+, 2^+, \dots$$

マルチクォーク状態



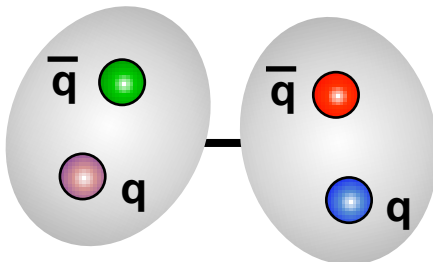
light-scalar mesons?
[σ , κ , $f_0(980)$, $a_0(980)$]

ハイブリットメソン



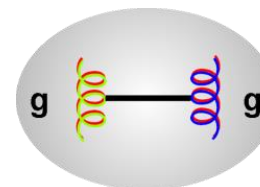
$\pi_1(1600)$?
[$J^{PC} = 1^{+-}$]

分子的共鳴状態



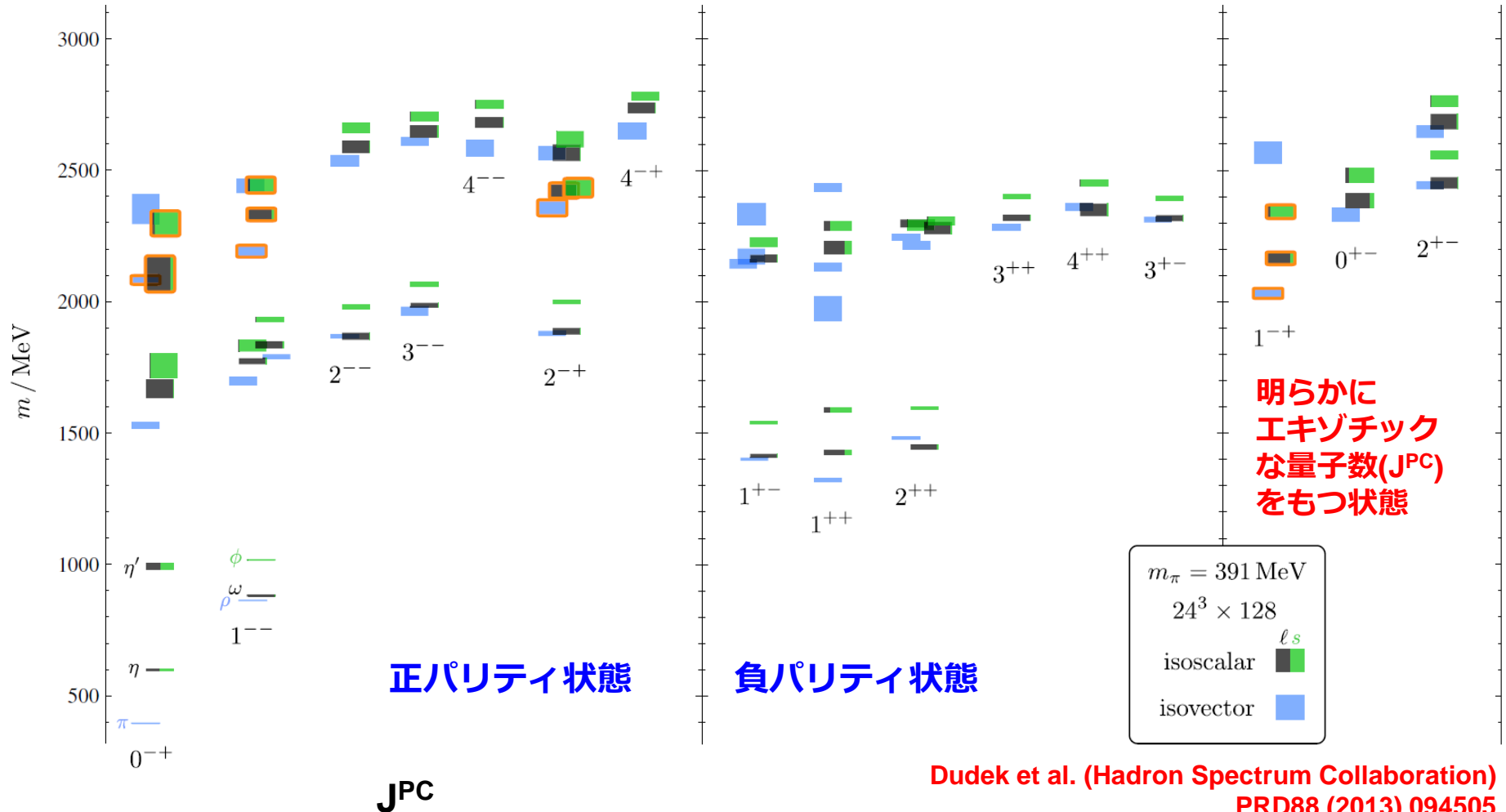
$f_0(980)$, $a_0(980)$?
...

グルーボール



$f_0(1500)$?

イントロ：格子QCD計算による 軽クォークメソンのスペクトル



 = ハイブリットメソンと同定

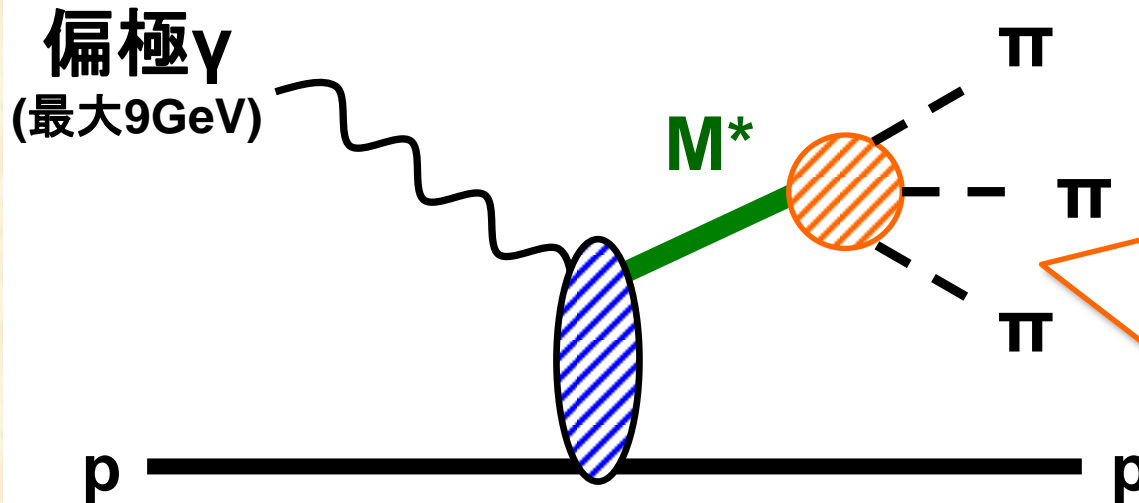
格子QCD計算はエキゾチックな量子数をもつ
軽クォークメソンの存在を示唆する。

イントロ：軽クォークメソン分光（ M^* 分光）に関連した最近の実験的研究

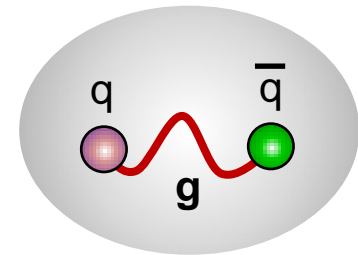
例えばHADRON2013国際会議の講演スライド参照：<http://hadron2013.kek.jp/>

- ✓ BES (IHEP@China) : $e^+ + e^- \rightarrow M^* + \dots \rightarrow (\text{hadrons}) + \dots$ 反応
- ✓ COMPASS (CERN) : $\pi + p \rightarrow M^* + N \rightarrow 3\pi + N$ 反応

✓ GlueX (JLab)



- 広範囲のエネルギー領域を網羅する軽クォークメソンスペクトルの確立。
- エキゾチックハイブリットメソンの探索。



イントロ：軽クォークメソン分光（ M^* 分光）に関連した最近の実験的研究

例えば

13.kek.jp/

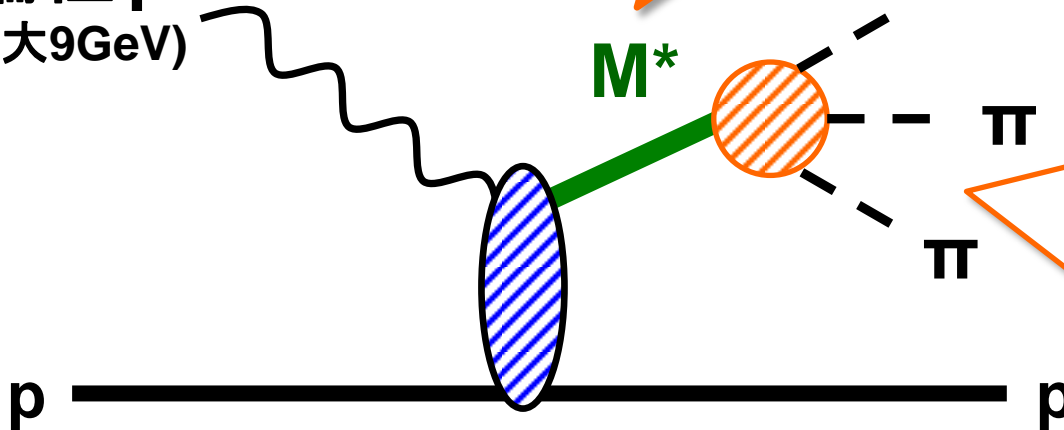
✓ BES (IHEP@China)

✓ COMPASS (CERN)

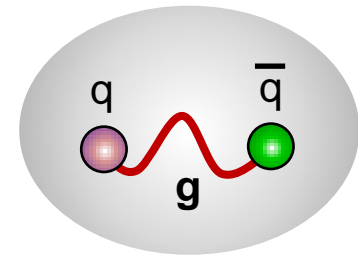
✓ **GlueX (JLab)**

アップグレード後のJLabにおける
highest-priority 実験プログラム。
軽クォークメソン分光の
著しい進展が期待される！！

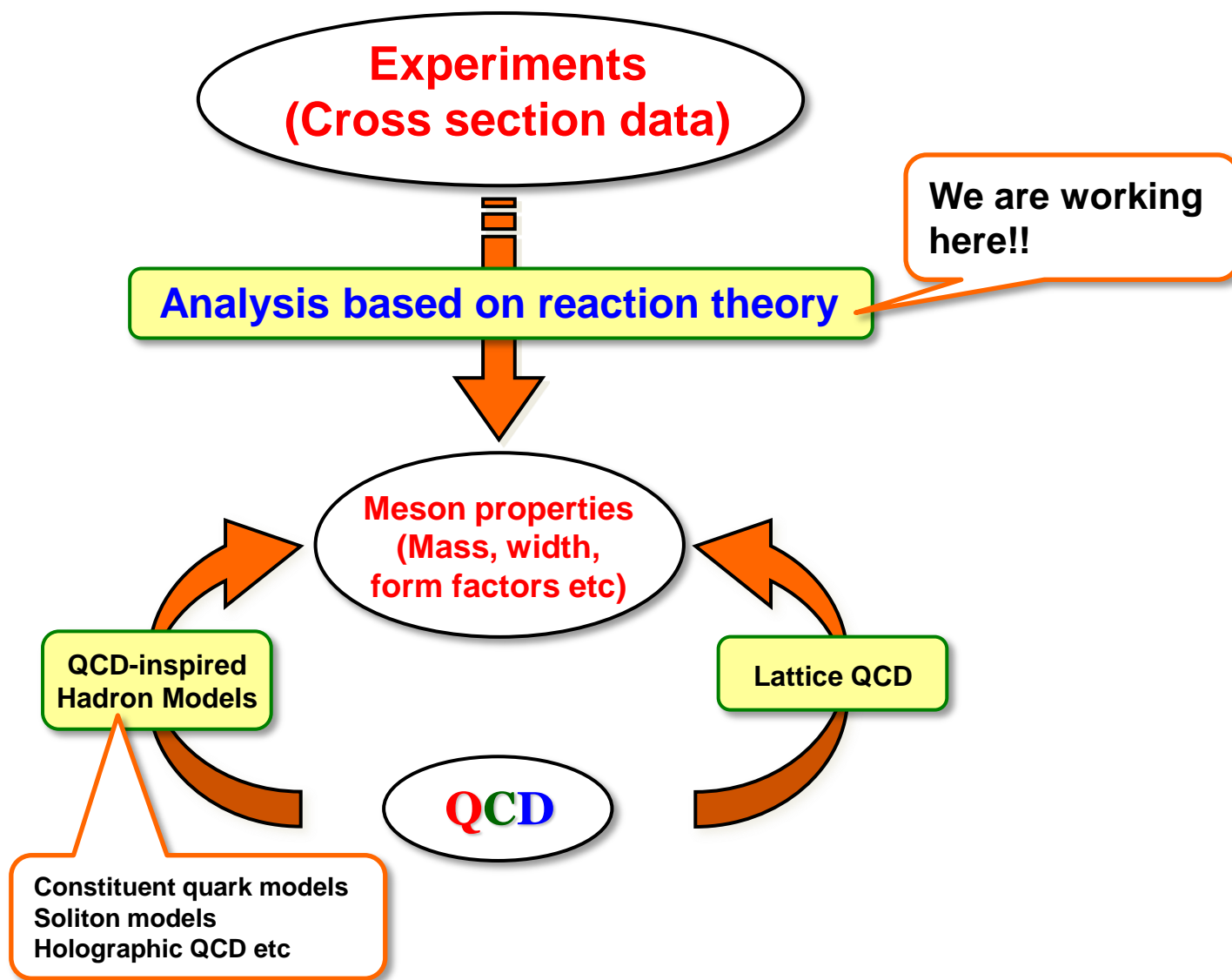
偏極 γ
(最大9GeV)



- 広範囲のエネルギー領域を網羅する軽クォークメソンスペクトルの確立。
- エキゾチックハイブリットメソンの探索。



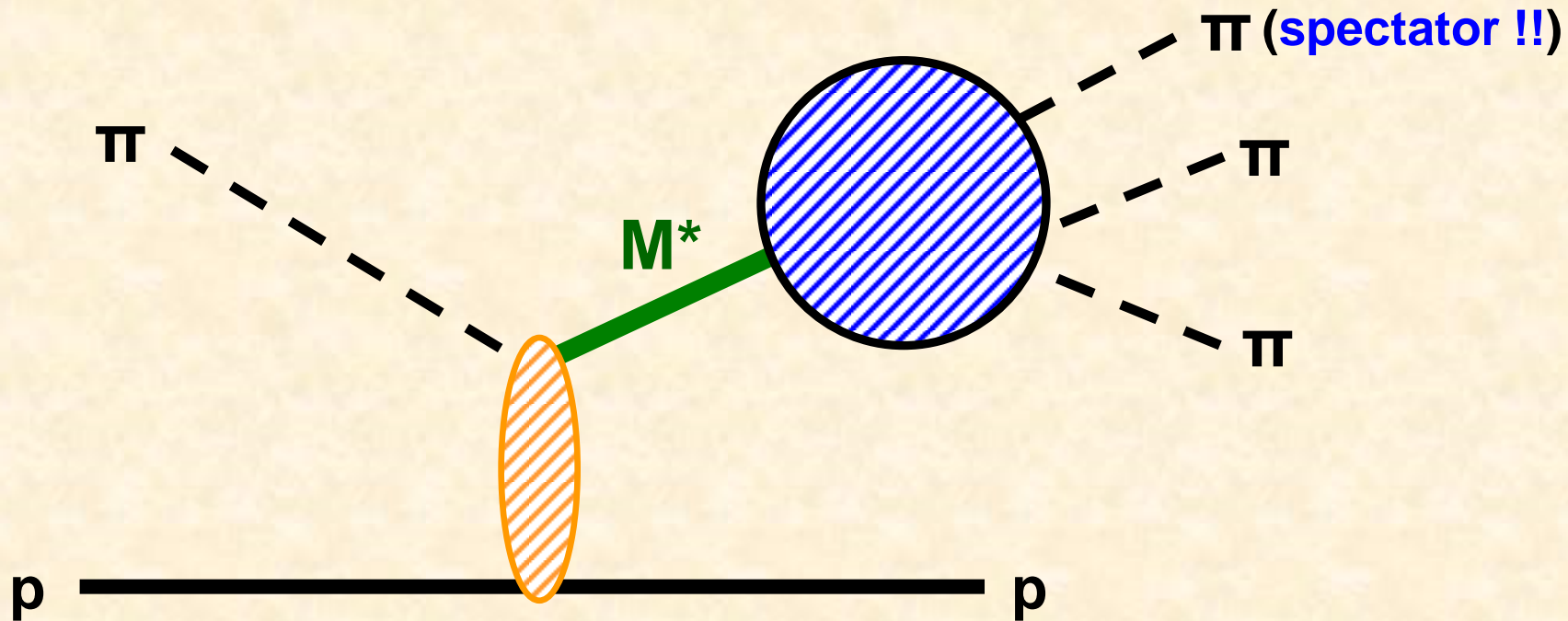
イントロ：メソン分光研究のアプローチ



軽クォークメソン分光研究における問題点

Example:

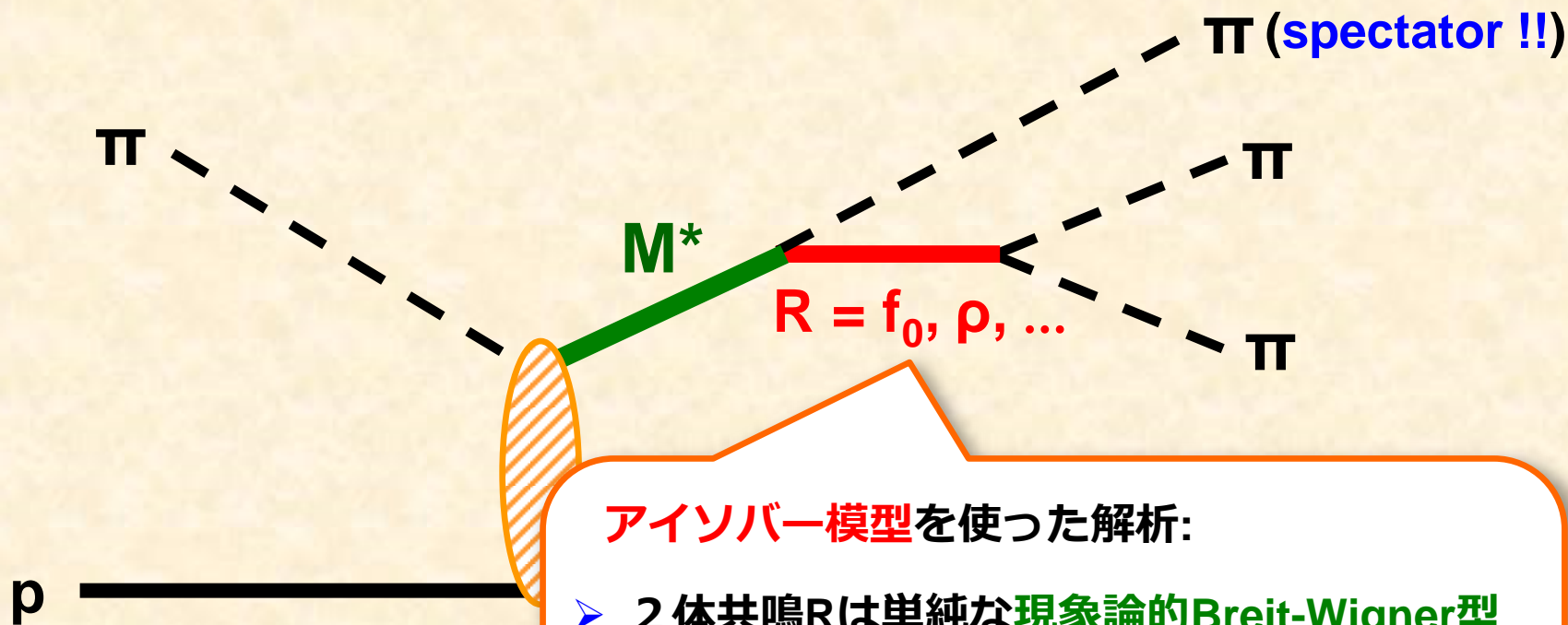
COMPASS $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- p$ (e.g., B. Ketzer's talk at Hadron2013)



軽クォークメソン分光研究における問題点

Example:

COMPASS $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- p$ (e.g., B. Ketzer's talk at Hadron2013)



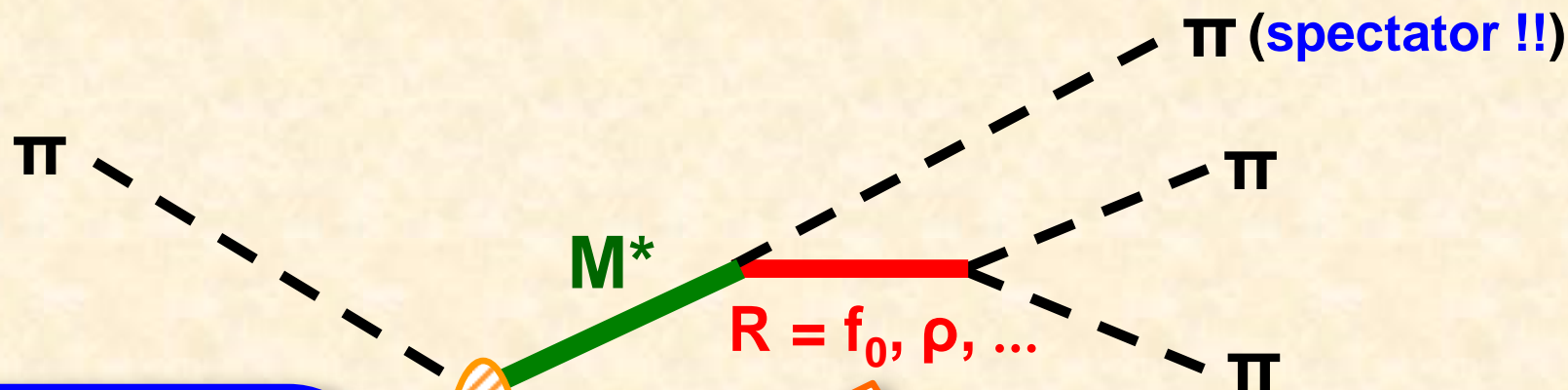
アイソバー模型を使った解析:

- 2体共鳴Rは単純な現象論的Breit-Wigner型でパラメトライズされる。
- 3つ目の π 中間子は自由な spectator として取り扱われる。

軽クォークメソン分光研究における問題点

Example:

COMPASS $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- p$ (e.g., B. Ketzer's talk at Hadron2013)



三体ユニタリー性
に起因する3 π 終状態
相互相互作用が完全に
無視されている！！

アイソバー模型を使った解析:

- 2体共鳴Rは単純な現象論的Breit-Wigner型でパラメトライズされる。
- 3つ目の π 中間子は自由な spectator として取り扱われる。

我々の取り組み

- ✓ 今後10年以内に期待される軽クォークメソン(M^*)分光実験 (GlueX 等) の著しい進展を見据え、従来のアイソバー模型に代わる (三体終状態相互作用を適切に取り扱う) 新しい理論解析手法を開発する。

現状

- 3体ユニタリー性に起因する3体終状態相互作用を取り入れた $M^* \rightarrow 3\pi$ 崩壊模型を開発した。
- アイソバー模型に基づく解析手法の妥当性を検証した。

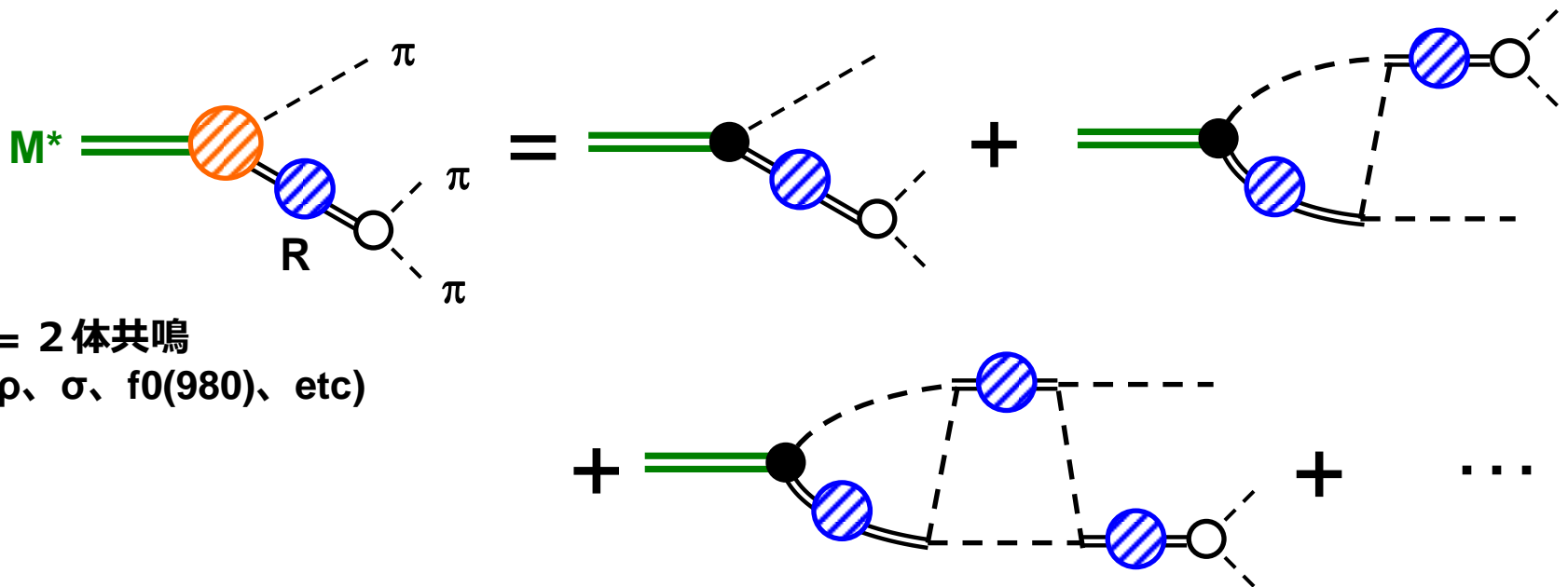
動的チャンネル結合アプローチ

- ✓ 3体ユニタリー性に起因する三体終状態相互作用を取り扱える。
- ✓ 軽クォークバリオン分光研究に実績がある。[HK et al., PRC88(2013)035209]

See, Matsuyama, Sato, Lee, Phys. Rep. 439 (2007) 193
鎌野、中村、松山、佐藤、日本物理学会誌69巻2号, 74

動的チャンネル結合アプローチに基づく $M^* \rightarrow 3\pi$ 崩壊過程 :

HK, Nakamura, Lee, Sato, PRD84(2011)114019



R = 2体共鳴
(ρ 、 σ 、 $f_0(980)$ 、etc)

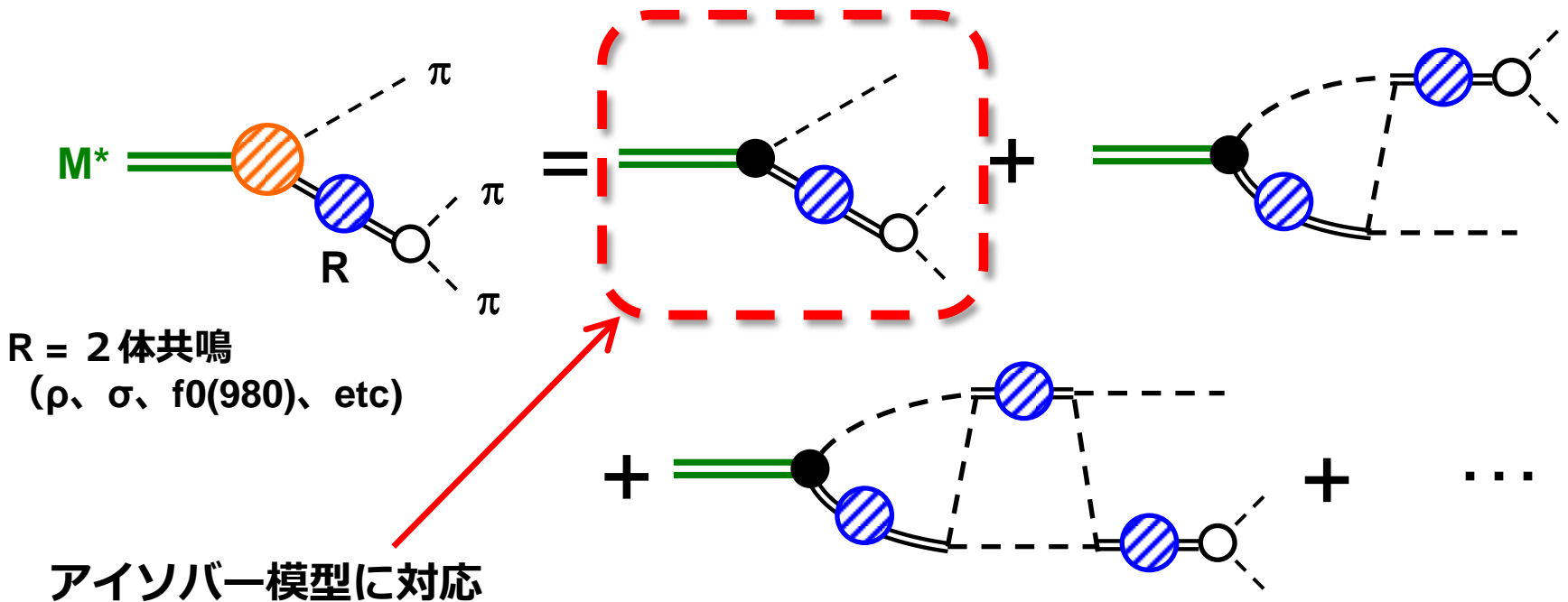
動的チャンネル結合アプローチ

- ✓ 3体ユニタリー性に起因する三体終状態相互作用を取り扱える。
- ✓ 軽クォークバリオン分光研究に実績がある。[HK et al., PRC88(2013)035209]

See, Matsuyama, Sato, Lee, Phys. Rep. 439 (2007) 193
鎌野、中村、松山、佐藤、日本物理学会誌69巻2号, 74

動的チャンネル結合アプローチに基づく $M^* \rightarrow 3\pi$ 崩壊過程 :

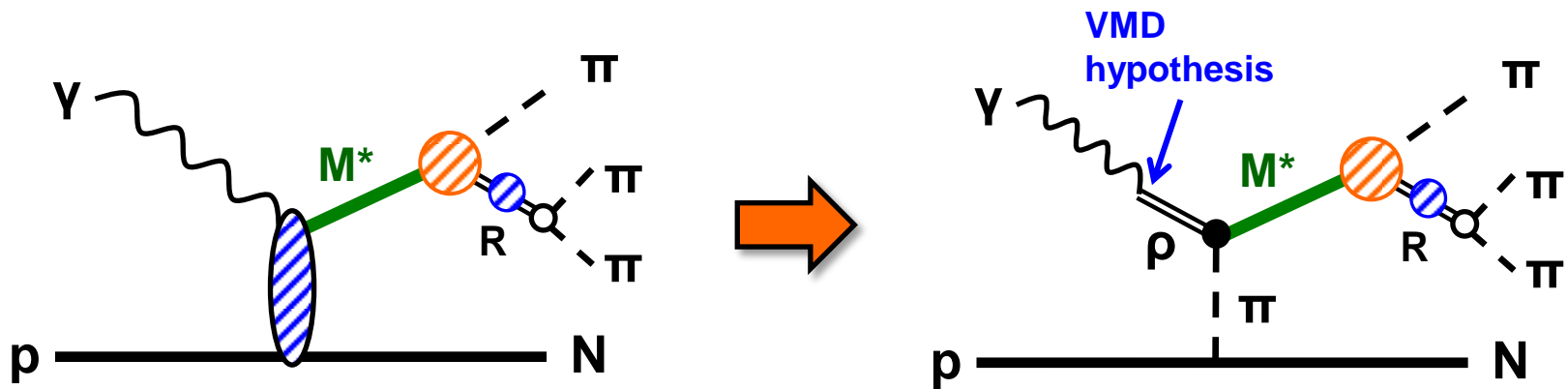
HK, Nakamura, Lee, Sato, PRD84(2011)114019



$\gamma p \rightarrow 3\pi N$ 反応(GlueX実験)への応用

Nakamura, HK, Lee, Sato, PRD86(2012)114012

Our first attempt



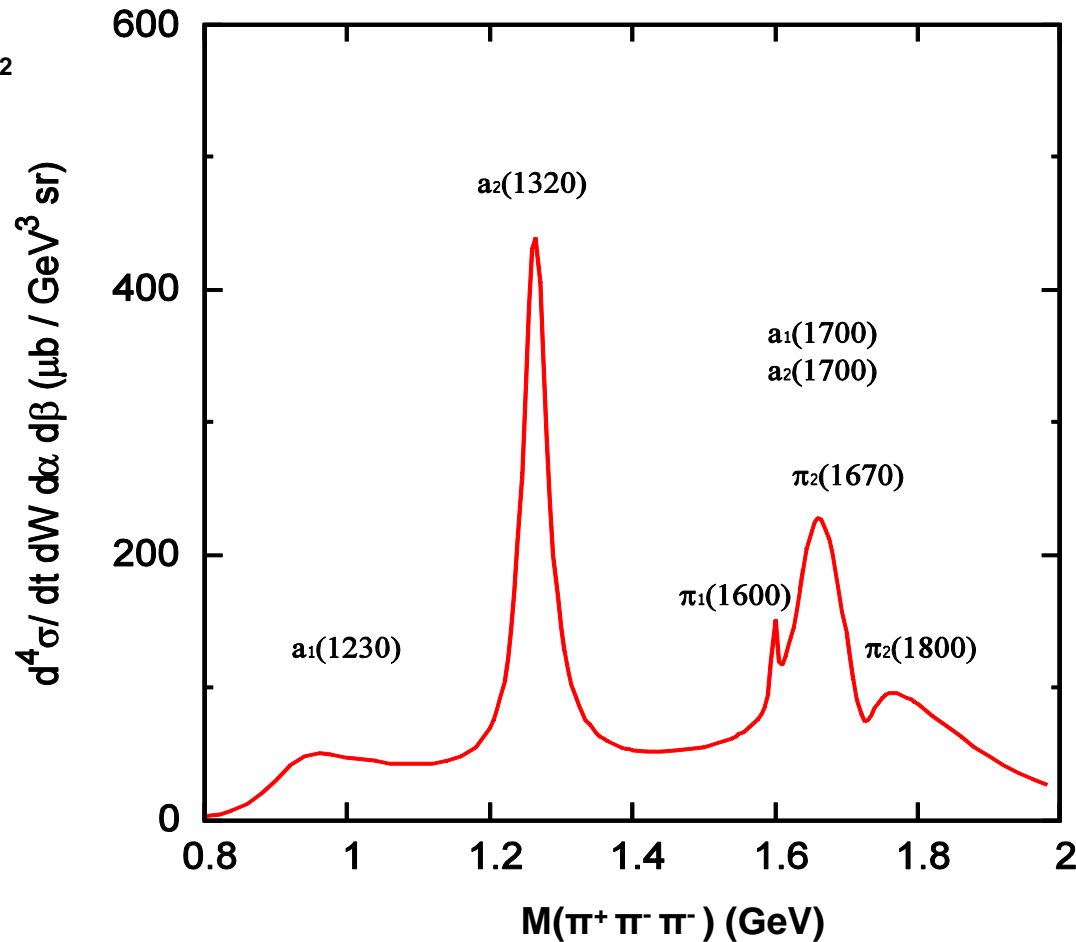
- R に関する模型パラメータは $\pi\pi$ 散乱の位相のずれから決定。
- M^* に関する模型パラメータは 3P_0 模型 [Barnes et al., PRD55(1997)4157] から決定。

$\gamma p \rightarrow 3\pi N$ 反応(GlueX実験)への応用

Nakamura, HK, Lee, Sato, PRD86(2012)114012

$\gamma p \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- p$ 反応の 3π 不変質量分布の予言

$E_\gamma = 5\text{ GeV}$
 $t = -0.4\text{ GeV}^2$

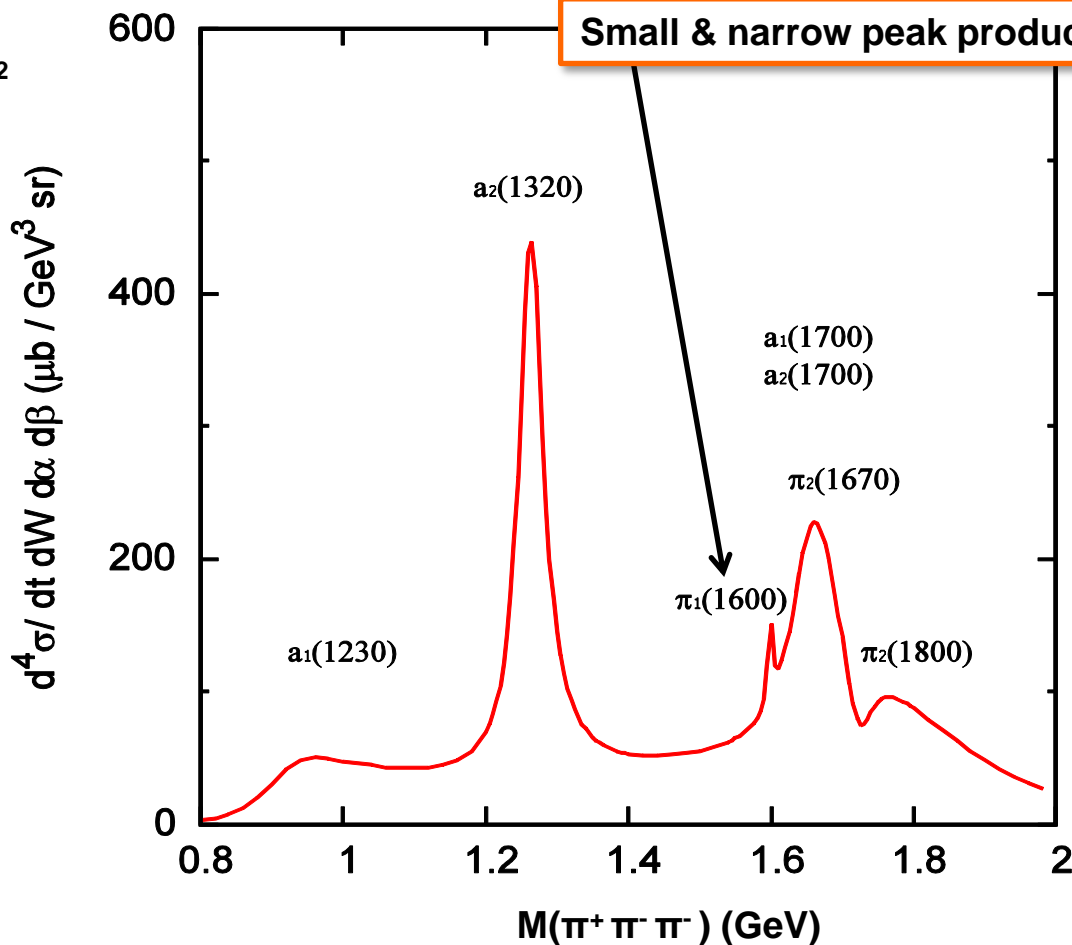


$\gamma p \rightarrow 3\pi N$ 反応(GlueX実験)への応用

Nakamura, HK, Lee, Sato, PRD86(2012)114012

$\gamma p \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- p$ 反応の 3π 不変質量分布の予言

$E_\gamma = 5\text{ GeV}$
 $t = -0.4\text{ GeV}^2$



$\gamma p \rightarrow 3\pi N$ 反応(GlueX実験)への応用

Nakamura, HK, Lee, Sato, PRD86(2012)114012

$\gamma p \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- p$ 反応の 3π 不変質量分布の予言

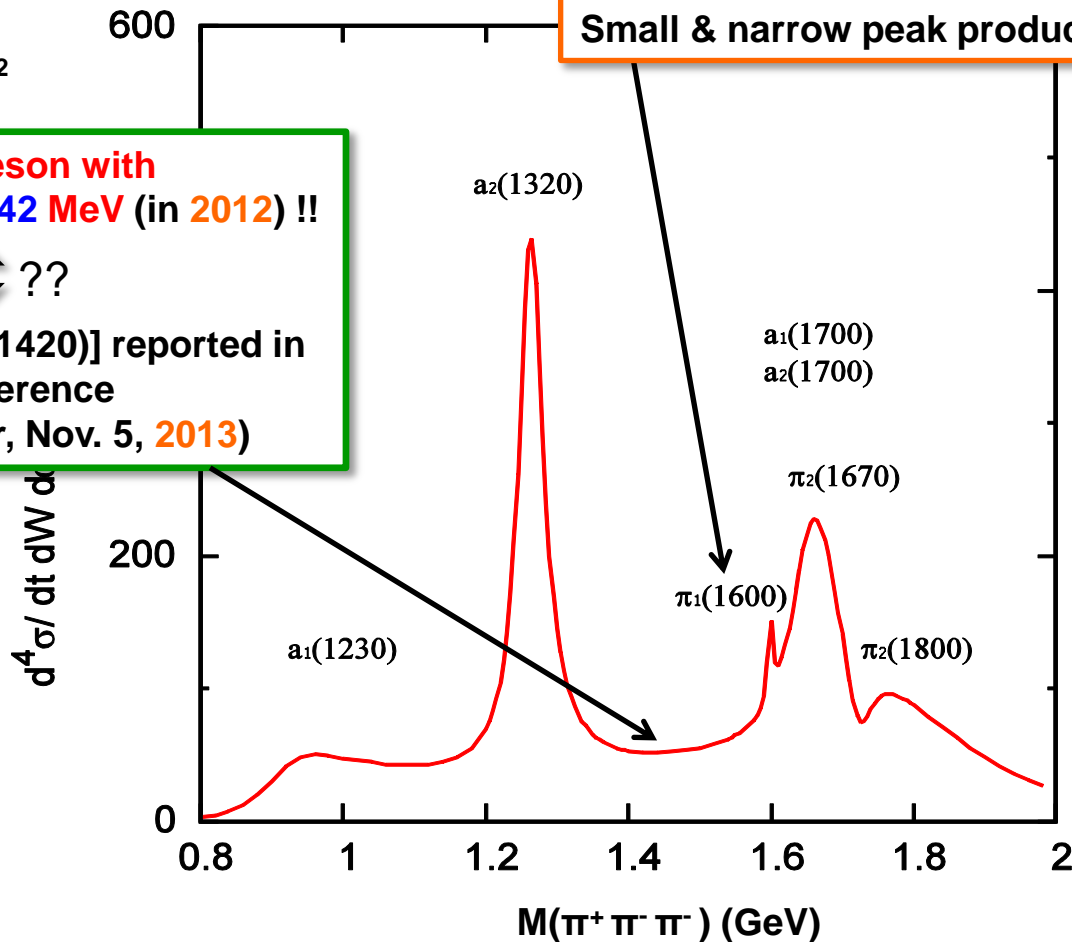
$E_\gamma = 5\text{ GeV}$
 $t = -0.4\text{ GeV}^2$

Small & narrow peak produced by $\pi_1(1600)$

We found 2nd a_1 meson with
pole mass $1443 - i342\text{ MeV}$ (in 2012) !!



New a_1 meson [$a_1(1420)$] reported in
HADRON2013 conference
(PI talk by B. Ketzner, Nov. 5, 2013)

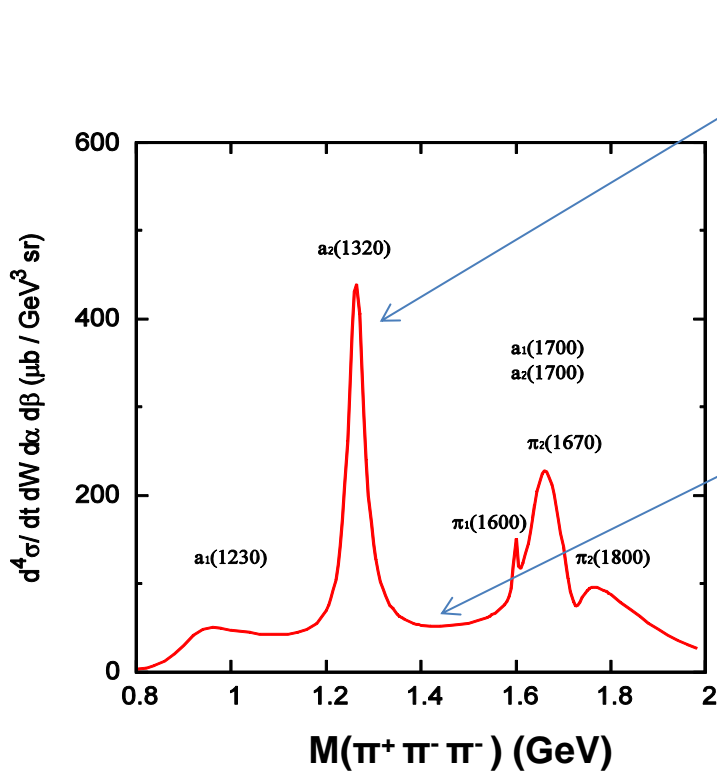


$\gamma p \rightarrow 3\pi N$ 反応(GlueX実験)への応用

Nakamura, HK, Lee, Sato, PRD86(2012)114012

アイソバー模型の妥当性の検証:

1. ユニタリー模型から予言された 3π 不変質量分布を“実験データ”と見なす。
2. アイソバー模型を使って“実験データ”を解析し、得られたメソンの情報をユニタリー模型の結果と比較する。



1st a2 meson: clear & isolated resonance

	ユニタリー 模型	アイソバー 模型
pole mass (MeV)	1263-i21	1262-i22
$g[\gamma\pi]_{L=2}M^* \times g[\pi\rho]_{L=2}M^*$	-6.1+i1.0	-6.1+i1.0

2nd a1 meson: no clear peak in 3π dist.

	ユニタリー 模型	アイソバー 模型
pole mass (MeV)	1443-i341	1201-i212
$g[\gamma\pi]_{L=0}M^* \times g[\pi\rho]_{L=0}M^*$	25.0-i59.0	-28.1-i4.4
$g[\gamma\pi]_{L=0}M^* \times g[\pi\rho]_{L=2}M^*$	6.7+i4.5	0.0+i0.0

#注意：共鳴状態の質量や結合定数は本質的に複素数になる。

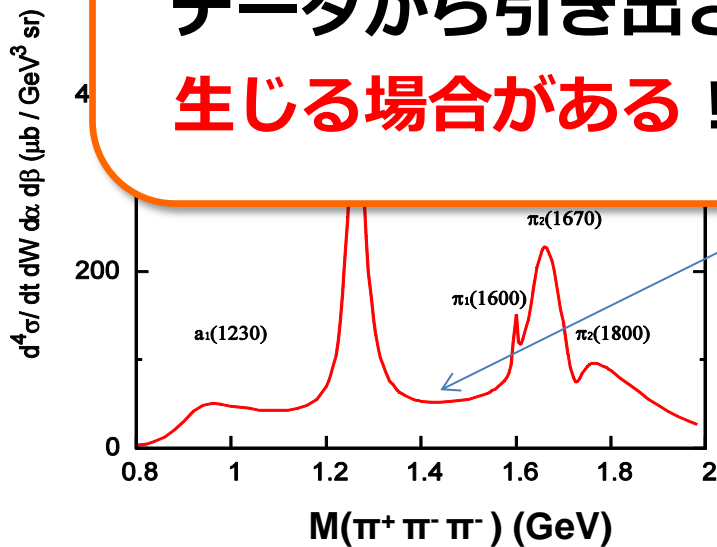
$\gamma p \rightarrow 3\pi N$ 反応(GlueX実験)への応用

Nakamura, HK, Lee, Sato, PRD86(2012)114012

アイソバー模型の妥当性の検証:

1. ユニタリー模型から予言された 3π 不変質量分布を“実験データ”と見なす。
2. アイソバー模型を使って“実験データ”を解析し、得られたメソンの情報を

同じデータを解析したとしても、**アイソバー模型**と**3体終状態相互作用を考慮するユニタリー模型**とでは、**データから引き出されるメソンの情報に大きな差異が生じる場合がある！！**



	ユニタリー 模型	アイソバー 模型
pole mass (MeV)	1443-i341	1201-i212
$g[\gamma\pi]_{L=0}M^* \times g[\pi\rho]_{L=0}M^*$	25.0-i59.0	-28.1-i4.4
$g[\gamma\pi]_{L=0}M^* \times g[\pi\rho]_{L=2}M^*$	6.7+i4.5	0.0+i0.0

#注意：共鳴状態の質量や結合定数は本質的に複素数になる。

まとめと今後の課題

まとめ

- ✓ 軽クォークメソン分光の実験研究の進展を見据え、3体ユニタリー性を満たす反応モデルに基づく**新しい理論解析手法の開発**を目指す。
- ✓ ユニタリーモデルに基づく $\gamma p \rightarrow 3\pi N$ 反応計算を初めて行った。
- ✓ 同じ実験データを解析しても、アイソバーモデルとユニタリーモデルでは、**得られるメソンの情報に大きな違いが現れる**場合があることがわかった。

今後の課題

- ✓ $\gamma p \rightarrow 3\pi N$ 反応実験(GlueX実験)の精密理論解析を介したエキゾチックメソン探索へ向けたモデルの改良。
- ✓ χ^2 -fit計算のための高速化。
- ✓ 多次元パラメータ空間上の極小値サーチの効率化。

Non- M^* process (e.g., Deck effect)

