

新学術領域キックオフ研究会
"多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的研究"

2009年11月27-28日
名古屋大学 野依記念学術交流館

ハドロン分子共鳴としての 軸性ベクトル中間子の光崩壊幅の研究



永廣 秀子,¹⁾ Luis Roca,²⁾ 保坂 淳,³⁾ Eulogio Oset⁴⁾

¹⁾ 奈良女子大学 理学部, ³⁾ 大阪大学 核物理研究センター,
²⁾ Murcia University, Spain, ⁴⁾ Valencia University, Spain.

A1, B1 RADIATIVE DECAYS WITH HIDDEN GAUGE FORMALISM

• H. Nagahiro, L. Roca, A. Hosaka and E. Oset, Phys. Rev. **D79**, 014015, (2009).

RADIATIVE DECAYS OF MESONS etc.

• H. Nagahiro, L. Roca, E. Oset and B.S. Zou, Phys. Rev. **D78**, 014012 (2008).

• H. Nagahiro, L. Roca and E. Oset, Eur. Phys. J. **A 36**, 73-84 (2008).

• H. Nagahiro, L. Roca, E. Oset, Phys. Rev. **D77**, 034017 (2008).

• H. Nagahiro, J. Yamagata-Sekihara, E. Oset and S. Hirenzaki, Phys.Rev.**D79**, 114023, (2009).

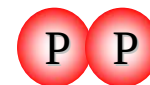
R. Molina, A. Hosaka, H. Nagahiro, E. Oset, Phys.Rev.**D80**, 014025, (2009).

background

■ ハドロン-ハドロン系で記述される共鳴状態：exotics

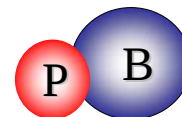
» pseudo-scalar – pseudo-scalar 系 ($\pi\pi$, KK^{bar} , etc.)

› σ , $f_0(980)$, $a_0(980)$ scalar mesons



» pseudo-scalar – baryon (πN , ηN , $K\Sigma$, ... / $\pi\Sigma$, $K^{\text{bar}}N$, ...)

› $N^*(1535)$, $\Lambda(1405)$ baryon resonances



» pseudo-scalar – vector $\rightarrow$ axial vector meson

› $a_1(1260)$, $b_1(1235)$, $K_1(1270)$ two pole, ($\sim 1\text{GeV}$) etc...

$\rightarrow$ ベクトル中間子を含むハドロン共鳴



» vector(ρ) – vector(ρ/D^*) [ベクトル-ベクトル相互作用]

› $f_0(1370)$, $f_2(1270)$ / $D^*_2(2460)$, $D^*_1(2640)$, $D^*_0(2600)?$,



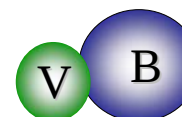
» vector – baryon $\rightarrow N^*$, Δ^* , ...

– Kaneko, Nagahiro, Hosaka; (ρ -N with hidden)

– M. Lutz etc., VN coupled channel

– team E. Oset

etc etc...



motivation

■ 構造を知る ~ ハドロン分子 or qq^{bar}/qqq 状態 or ...

» 生成反応をみる

- › $K_1(1270)$ two poles evidence in $K^-p \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ p$

L.S.Geng, E.Oset, L.Roca, J.A.Oller, PRD75(07)014017.



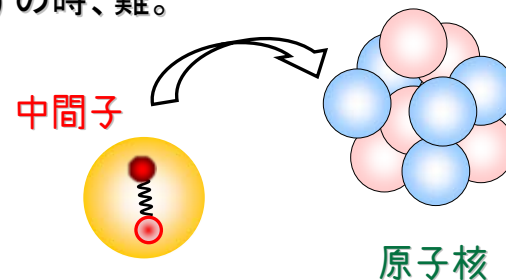
» 環境を変えて応答をみる

- › mesic nuclei ... hadrons in matter

- eta mesic nuclei $\langle N^*(1535) \text{ in medium} \rangle$, Kaonic nuclei $\langle \Lambda(1405) \text{ in medium} \rangle$... etc.
- large width ($\Gamma \sim 100 \text{ MeV}$) や heavy meson ($> 1 \text{ GeV}$) の時、難。

» 崩壊幅をみる

- › strong decay width
- › **radiative decay width**



■ vector meson と photon が絡む崩壊

» vector 粒子の導入の仕方

- › Tensor formalism, vector formalism, **hidden gauge formalism**, ...

Introduction : radiative decays of axial vector mesons

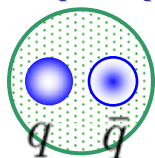
- radiative decays of axial vectors $A \rightarrow P\gamma$

» give information on nature of the axial-vectors

$$a_1^+(1260) \rightarrow \pi^+\gamma, \quad b_1^+(1235) \rightarrow \pi^+\gamma$$

- some works for radiative decays of axial vectors

quark model + vector meson dominance (VMD)
J.L.Rosner, PRD23 (1981) 1127.



$$\Gamma_{a^+ \rightarrow \pi^+\gamma} = 1.0 \sim 1.6 \text{ MeV}; \quad \Gamma_{b^+ \rightarrow \pi^+\gamma} = 184 \pm 30 \text{ keV}$$

effective Lagrangian + VMD

L.Roca, J.E.Palomar, E.Oset, PRD70 (2004) 094006.

$$\Gamma_{a^+ \rightarrow \pi^+\gamma} = 320 \sim 470 \text{ keV}; \quad \Gamma_{b^+ \rightarrow \pi^+\gamma} = 19 \sim 36 \text{ keV}$$

an elementary particle
in a Lagrangian



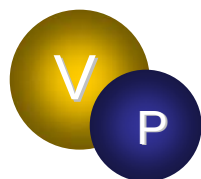
based on the chiral unitary approach (as a quasi-bound state of VP)

L.Roca, A. Hosaka, E. Oset, PLB658 (2007) 17; H.Nagahiro, L.Roca, E. Oset, PRD77(08)034017.

$$\Gamma_{a^+ \rightarrow \pi^+\gamma} = 460 \pm 100 \text{ keV}; \quad \Gamma_{b^+ \rightarrow \pi^+\gamma} = 210 \pm 40 \text{ keV}$$

H.Nagahiro, L.Roca, A. Hosaka, E. Oset, PRD79 (2009) 014015.

$$\Gamma_{a^+ \rightarrow \pi^+\gamma} = 133 \pm 70 \text{ keV}; \quad \Gamma_{b^+ \rightarrow \pi^+\gamma} = 209 \pm 90 \text{ keV}$$



a quasi-bound state

++ 実験値 ++

$$\Gamma_{a^+ \rightarrow \pi^+\gamma} = 640 \pm 246 \text{ keV} [1]; \quad \Gamma_{b^+ \rightarrow \pi^+\gamma} = 230 \pm 60 \text{ keV} [2]$$

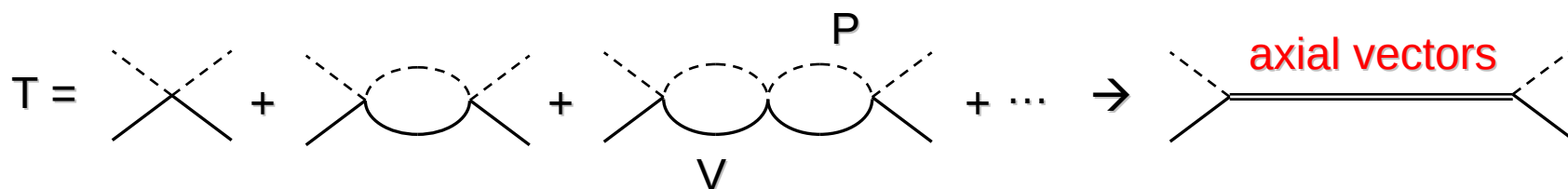
[1] M.Zielinski et al., PRL52 (1984) 1195. [2] B.Collick et al., PRL53 (1984) 2734.

ダイナミカルに生成される共鳴としての軸性ベクトル中間子

L.Roca, E.Oset and J.Singh, PRD72(05)014002

Chiral Unitary approach for low lying axial vectors

scattering of the nonet of vector mesons (V)
and the octet of pseudoscalar mesons (P)



search poles in 2nd Riemann sheet

1⁺ meson ~ 1GeV from PDG

$J^{PC}=1^{+-}$... $b_1(1235)$, $h_1(1170)$, $h_1(1380)$

$J^{PC}=1^{++}$... $a_1(1260)$, $f_1(1285)$, $f_1(1420)$

$K_1(1270)$, $K_1(1400)$

building blocks

pseudoscalar octet

$$\begin{pmatrix} \frac{\pi^0}{\sqrt{2}} + \frac{\eta_8}{\sqrt{6}} & \pi^+ & K^+ \\ \pi^- & -\frac{\pi^0}{\sqrt{2}} + \frac{\eta_8}{\sqrt{6}} & K^0 \\ K^- & \bar{K}^0 & -\frac{2\eta_8}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}$$

vector nonet

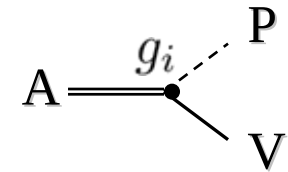
$$\begin{pmatrix} \frac{\rho^0}{\sqrt{2}} + \frac{\omega}{\sqrt{2}} & \rho^+ & K^{*+} \\ \rho^- & -\frac{\rho^0}{\sqrt{2}} + \frac{\omega}{\sqrt{2}} & K^{*0} \\ K^{*-} & \bar{K}^{*0} & \phi \end{pmatrix}_\mu$$

ダイナミカルに生成される共鳴としての軸性ベクトル中間子

S=0, I=1 channel

in unit of MeV [] ... main decay channel (PDG)

		$a_1(1260) [\rho\pi]$	$b_1(1235) [\omega\pi]$		
$\sqrt{s_p}$	pole position	$1011 - i84$	$1247 - i28$		
		g_i	$ g_i $	g_i	$ g_i $
$\frac{1}{\sqrt{2}}(\bar{K}^*K + K^*\bar{K})$		$\dots$	$\dots$	$6172 - i75$	6172
$\phi\pi$		$\dots$	$\dots$	$2087 - i385$	2122
$\omega\pi$		$\dots$	$\dots$	$-1869 + i300$	1893
$\rho\eta$		$\dots$	$\dots$	$-3041 + i498$	3082
$\rho\pi$	$-3795 + i2330$	4453		$\dots$	$\dots$
$\frac{1}{\sqrt{2}}(\bar{K}^*K - K^*\bar{K})$	$1872 - i1486$	2390		$\dots$	$\dots$



coupling constants
→ Input of my calc.

$a_1(1260)$

Mass $m = 1230 \pm 40$ MeV

Full width $\Gamma = 250$ to 600 MeV

$b_1(1235)$

Mass $m = 1229.5 \pm 3.2$ MeV

Full width $\Gamma = 142 \pm 9$ MeV

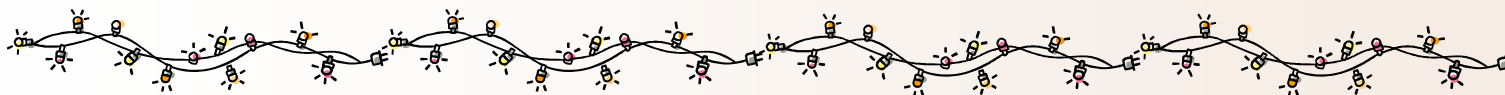
[other poles]

in unit of MeV

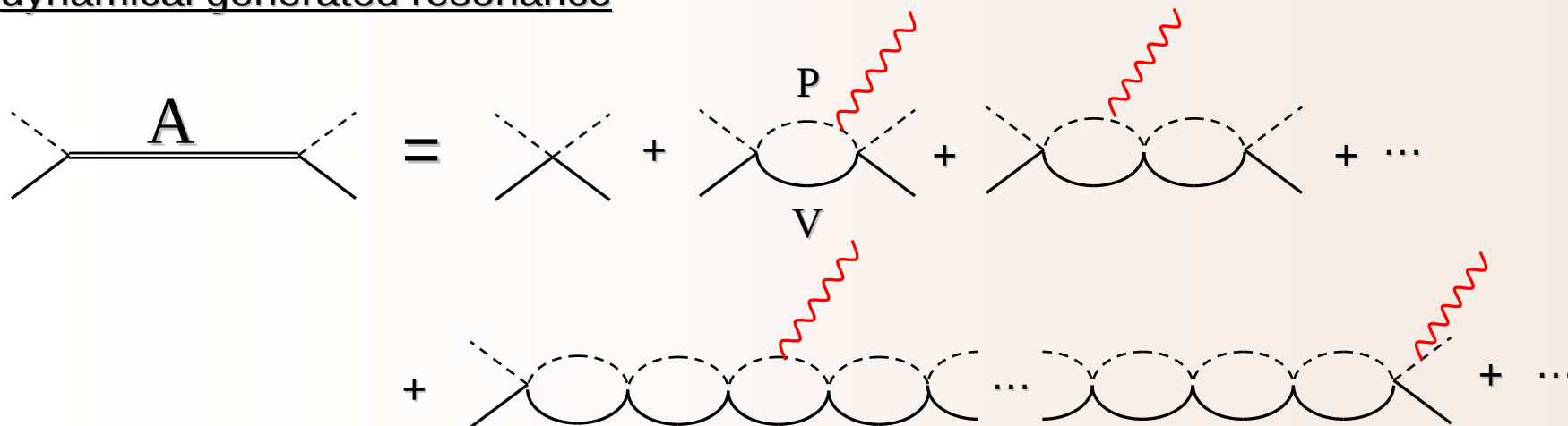
assigned axial vectors	pole $\sqrt{s_p}$	main decay channel	
		CUM	PDG
$h_1(1170)$	919 - 17 i	$\rho\pi$	$\rho\pi$
$h_1(1380)$	1245 - 7 i	KK^*	KK^*
$f_1(1285)$	1288 - 0 i	...	4π
$K_1(1270)$ [double pole]	1112 - 64 i	$K^*\pi$	ρK
	1216 - 4 i	ρK	

Formalism of the radiative decay of the axial vectors as dynamically generated resonances

$$a_1^+(1260) \rightarrow \pi^+ \gamma, \quad b_1^+(1235) \rightarrow \pi^+ \gamma$$



dynamical generated resonance



===== A ... axial vectors (dynamically generated resonance)

----- P ... pseudoscalar mesons [π , K, η]

———— V ... vector mesons [ρ , ω , K^* , ϕ]

Lagrangians obtained from the hidden gauge formalism

hidden gauge formalism

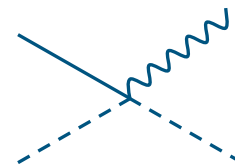
- ρ meson is a gauge boson of a hidden local symmetry transformation
- ρ meson can be naturally introduced
 - universality, KSFR relation, vector-meson dominance, WT theorem for $\rho\pi$

We can treat pseudo-scalar meson, vector meson, and photon in a unified way

$$\mathcal{L}_{V\gamma} = -M_V^2 \frac{e}{g} A_\mu \langle V^\mu Q \rangle$$



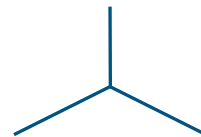
$$\mathcal{L}_{V\gamma PP} = e \frac{M_V^2}{4gf^2} A_\mu \langle V^\mu (Q\phi^2 + \phi^2 Q - 2\phi Q\phi) \rangle$$



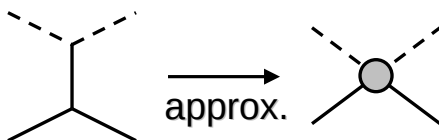
$$\mathcal{L}_{VPP} = -i \frac{M_V^2}{4gf^2} \langle V^\mu [\phi, \partial_\mu \phi] \rangle$$



$$\mathcal{L}_{VVV} = ig \langle (\partial_\mu V_\nu - \partial_\nu V_\mu) V^\mu V^\nu \rangle$$



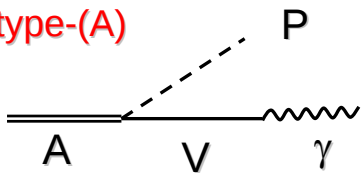
kernel VP $\rightarrow$ VP to be used in the BS eq.



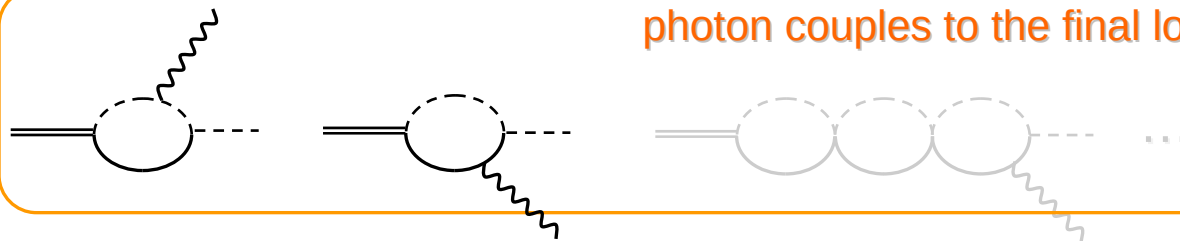
光崩壊計算の定式化 $A \rightarrow P\gamma$

contributing diagrams (taken into account in this work)

type-(A)



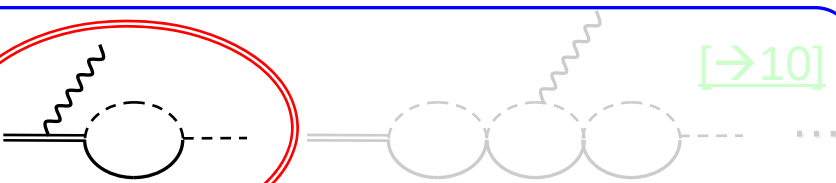
photon couples to the final loop



photon couples to the final vertex



photon couples A or an intermediate loop



[→10]

a_1 - π mixing

to the final P

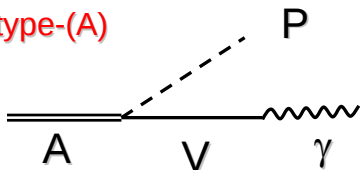
[→11]



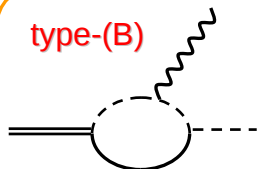
光崩壊計算の定式化

contributing diagrams (taken into account in this work)

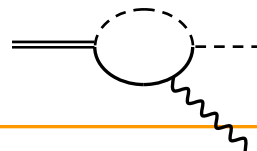
type-(A)



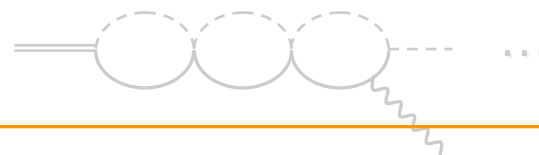
type-(B)



type-(C)



photon couples to the final loop



type-(D)



photon couples to the final vertex

寄与なし



photon couples A or an intermediate loop

loopを通した a_1 - π mixing

→終状態 on shell pion

a_1 - π mixing

$$t \propto \epsilon_A^\mu \times J(P^2) P_\mu = 0$$

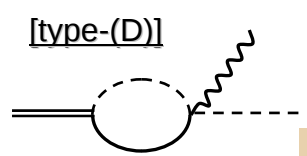
Lorentz condition for on-shell axial

寄与なし

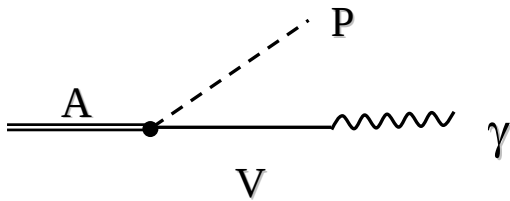


to the final P

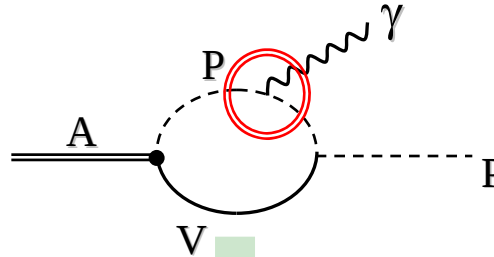
double counting ... ?



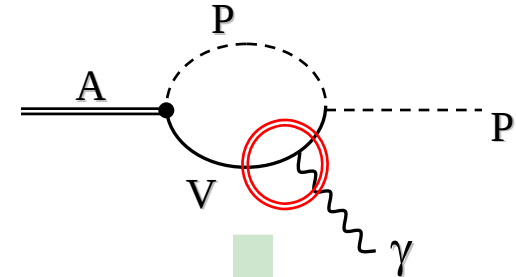
“tree” [type-(A)]



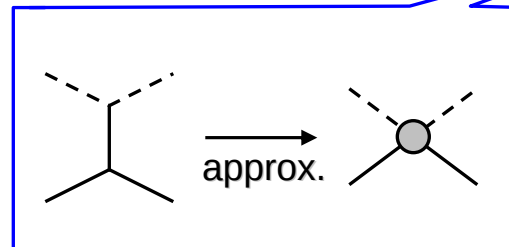
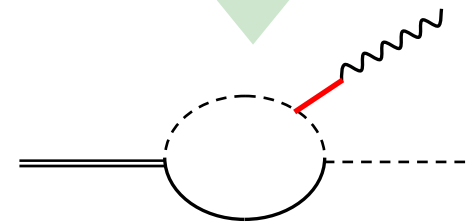
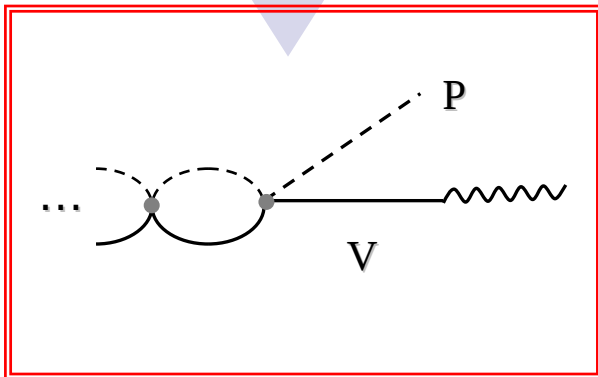
“loop” [type-(B)]



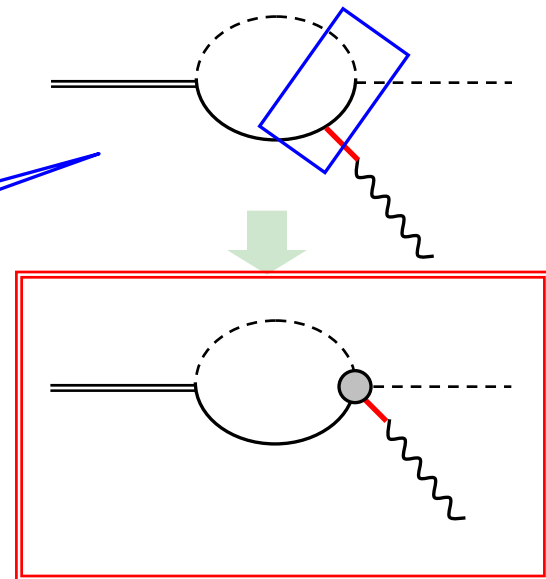
“loop” [type-(C)]



In the hidden formalism, photon never couples to a particle line directly. It always couple through a vector meson.



This approx. was already used in $VP \rightarrow VP$ scattering.



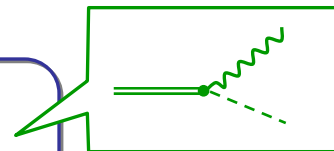
独立な diagram set

①

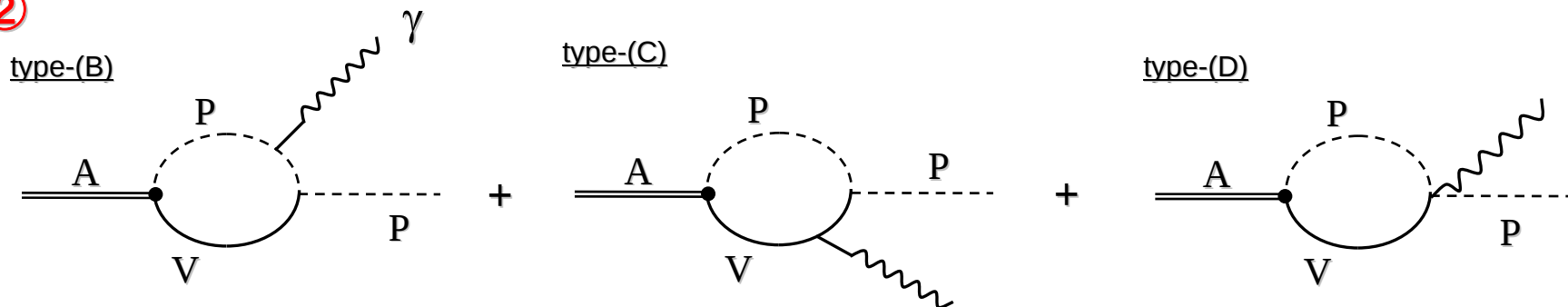


Vector を介して γ と結合するもの

Vを介さないもの



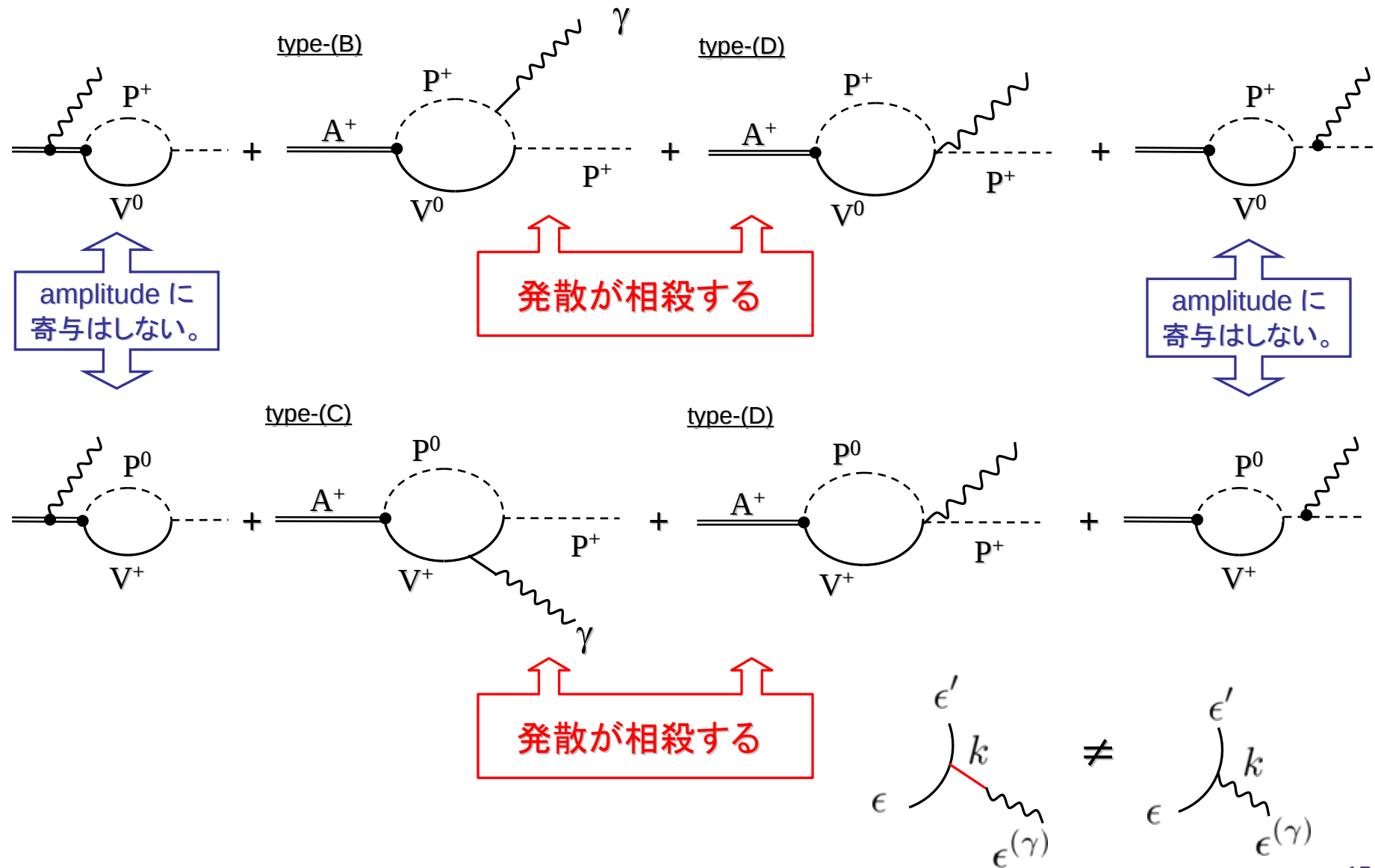
②



どちらを計算すべきか

1. dynamical に生成された共鳴状態という観点からすれば、両者は同一のもの(のはず)。
2. set ① は、explicitに、gauge invariance が見えない。
(このまま計算すると gauge invariant ではない。(AVP vertex の近似に由来))
3. type-(D) は発散する。

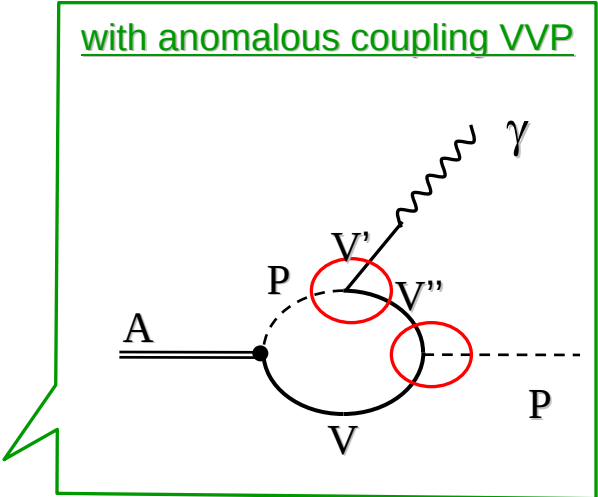
gauge invariant set ② $A^+ \rightarrow \gamma P^+$



数値計算結果

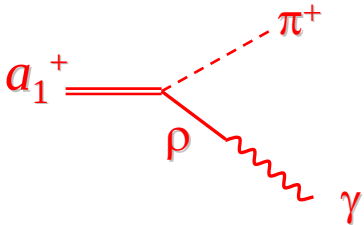
in unit of keV

VP in loop		$a_1^+(1260) \rightarrow \pi^+ \gamma$	$b_1^+(1235) \rightarrow \pi^+ \gamma$
type-(B)	$K^* K$	14	26
	$\rho \pi$	119	...
	total	171	26
type-(C)	$K^* K$	30	57
	$\rho \pi$	213	...
	total	373	57
TOTAL		103	159
anomalous		217	4
TOTAL + anomalous		133 ± 70	209 ± 90
experimental value		640 ± 246 [1]	230 ± 60 [2]



[2] B.Collick et al., PRL53 (1984) 2374.
 [1] M.Zielinski et al., PRL52 (1984) 1195.

quark model Rosner, PLD23(1981)1127	1.0 ~ 1.6 MeV	184 ± 30 keV
effective Lagrangian Roca et al., PRD70(04)094006	320 ~ 470 keV	19 ~ 36 keV
tree + VMD	647 keV	67 keV



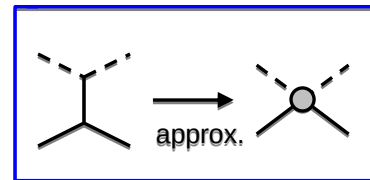
discussions : $a_1(1260)$ meson について

- 今の formalism では実験値の $1/3 \sim 1/4$ しか再現できない。

» anomalous contribution を入れなければ $1/5$ 程度。

- 原因は？

(1) もっと高次(?) が必要? $\mathcal{L} = g A_\mu V^\mu P$



(2) Chiral Unitary approach での記述がよろしくない？

→ 導出されるシリーズの一員である $K_1(1270)$ の two pole picture によって、
 $K^-p \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ p$ 実験data (ACCMOR Collaboration) は非常によく再現されている。

[PDG, L.S.Geng, E.Oset, L.Roca, J.A.Oller, PRD75(07)014017.]

(3) a_1 に関しては **quark component(?) からの寄与が大きい?**

- » ハドロン分子の要素が少ない or core (?) からの光崩壊への寄与が大きい。
- » pole analysis[1] の観点からすると、 a_1 には分子構造以外からの寄与が必要そうである。

[1] T. Hyodo, D. Jido, A. Hosaka, PRC78(08)025203.

(4) a_1 meson は、extended hidden gauge symmetry Lagrangian に explicit field として導入される。[M.Bando, T.Kugo, K. Yamawaki, PR164(88)217 他] (そこでは、lowest で $\Gamma_{\pi\gamma} = 0 \dots$ 何か関係が?)

» Holographic QCD においても a_1 meson が自然に導出される。

[T. Sakai, S. Sugimoto, PTP113 (05) 843; PTP114(05)1083]

(core (qq^{bar} ...)) + (PV 分子) としての可能性?

K.Nawa, H. Nagahiro, S. Ozaki, D. Jido, A. Hosaka, *in progress*.

summary :

- カイラルユニタリモデルを基礎として、axial vector の光崩壊幅の計算を行った。
 - » axial vectors ... dynamical generated resonance
 $b_1(1235)$, $a_1(1260)$, $h_1(1170)$, $h_1(1380)$, $f_1(1285)$, two $K_1(1270)$ s
 - » $A \rightarrow VP$ coupling は、その相対符号も含めてUnitaryモデルから決まる。
- b_1 は良い一致。 a_1 は実験値の 1/3-1/4程度。
 - » 思案中・・・。
- 様々な channel の non-trivial な干渉の効果が重要。
- hidden formalism でベクトル粒子を記述。
 - » “photon が入っている”, 及び “dynamical generated object” の場合、注意。
 - » double counting の問題。独立な diagram の選定。
- a_1 に関しては、anomalous VVP coupling からの寄与がより大きい。
 - » 相殺してしまうけど。

Future work

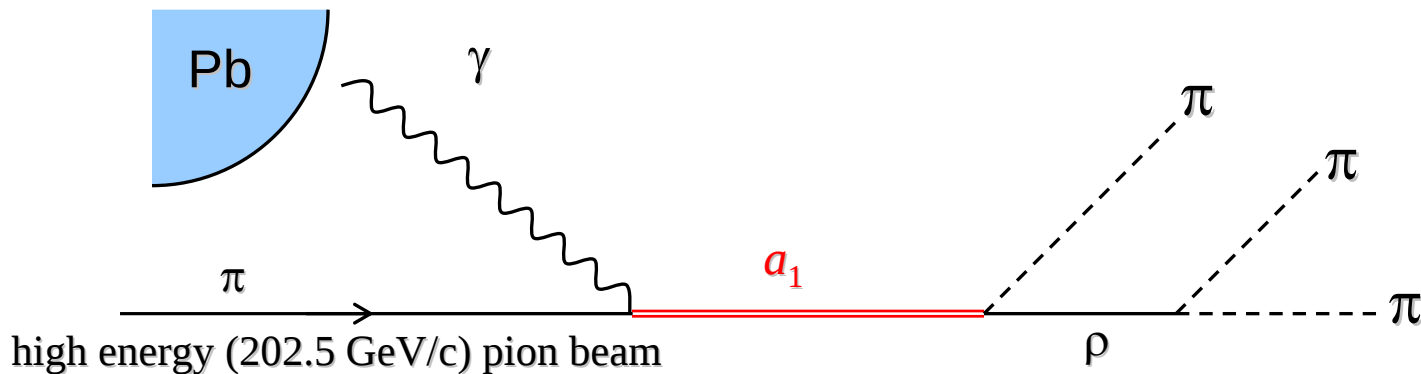
- 実験値に足りない計算結果
 - » extended hidden formalism (or Holographic QCD) により explicit に導入される a_1 中間子との関係。
 - » $(qq^{\text{bar}}) + (PV \text{ 分子})$ としての構造 ... *in progress*

実験データについて

M. Zielinski et al., Phys.Rev.Lett. **52**, 1195 (1984)

inverse reaction (Primakoff effect)

$$\pi^+ A \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- A$$



.... . We obtain $\Gamma_\gamma \sim 640 \pm 120 \text{ keV}$, if we use the A_1 parameters of Ref. 3. (実験: $M_{A_1} = 1.28 \text{ GeV}$, $\Gamma = 0.3 \text{ GeV}$).
 The result for the radiative width is clearly sensitive to the assumed resonance mass and total width. For $M_{A_1} = 1.2 \text{ GeV}$, $\Gamma = 0.3 \text{ GeV}$, for example, we obtain $\Gamma_\gamma = 510 \pm 100 \text{ keV}$.
 Consequently, for the standard A_1 parameters, we quote a radiative decay width of $640 \pm 246 \text{ keV}$,
 [M. Zielinski et al., Phys.Rev.Lett. 52, 1195 (1984)]

$a_1(1260)$

$I^G(J^{PC}) = 1^-(1^{++})$

Mass $m = 1230 \pm 40 \text{ MeV} \rightarrow$ ["OUR ESTIMATE" in PDG 2008]

Full width $\Gamma = 250 \text{ to } 600 \text{ MeV} \rightarrow$ ["OUR ESTIMATE" in PDG 2008]

DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)
$(\rho\pi)_{\text{S-wave}}$	seen
$(\rho\pi)_{\text{D-wave}}$	seen
$\vdots$	$\vdots$
$\pi\gamma$	seen