

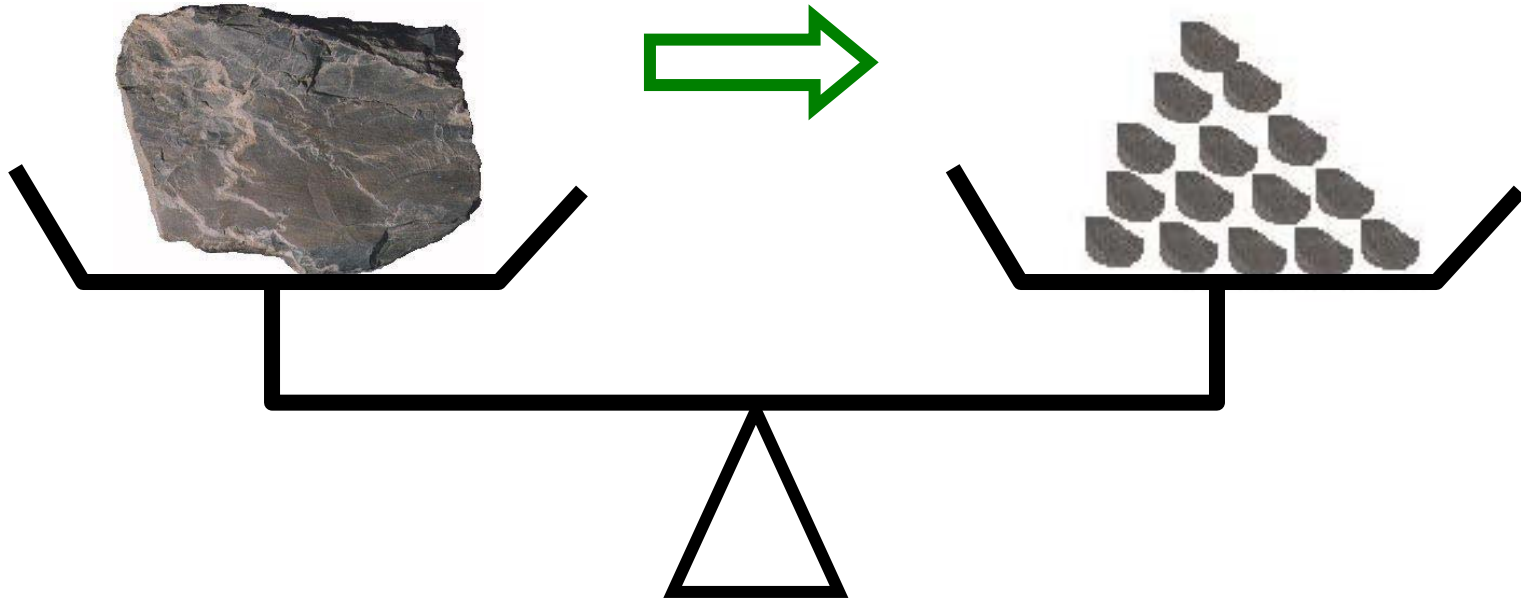
カイラル対称性回復のシグナル？

原田正康（名古屋大）

（2008年3月28日 @HIP 広島）

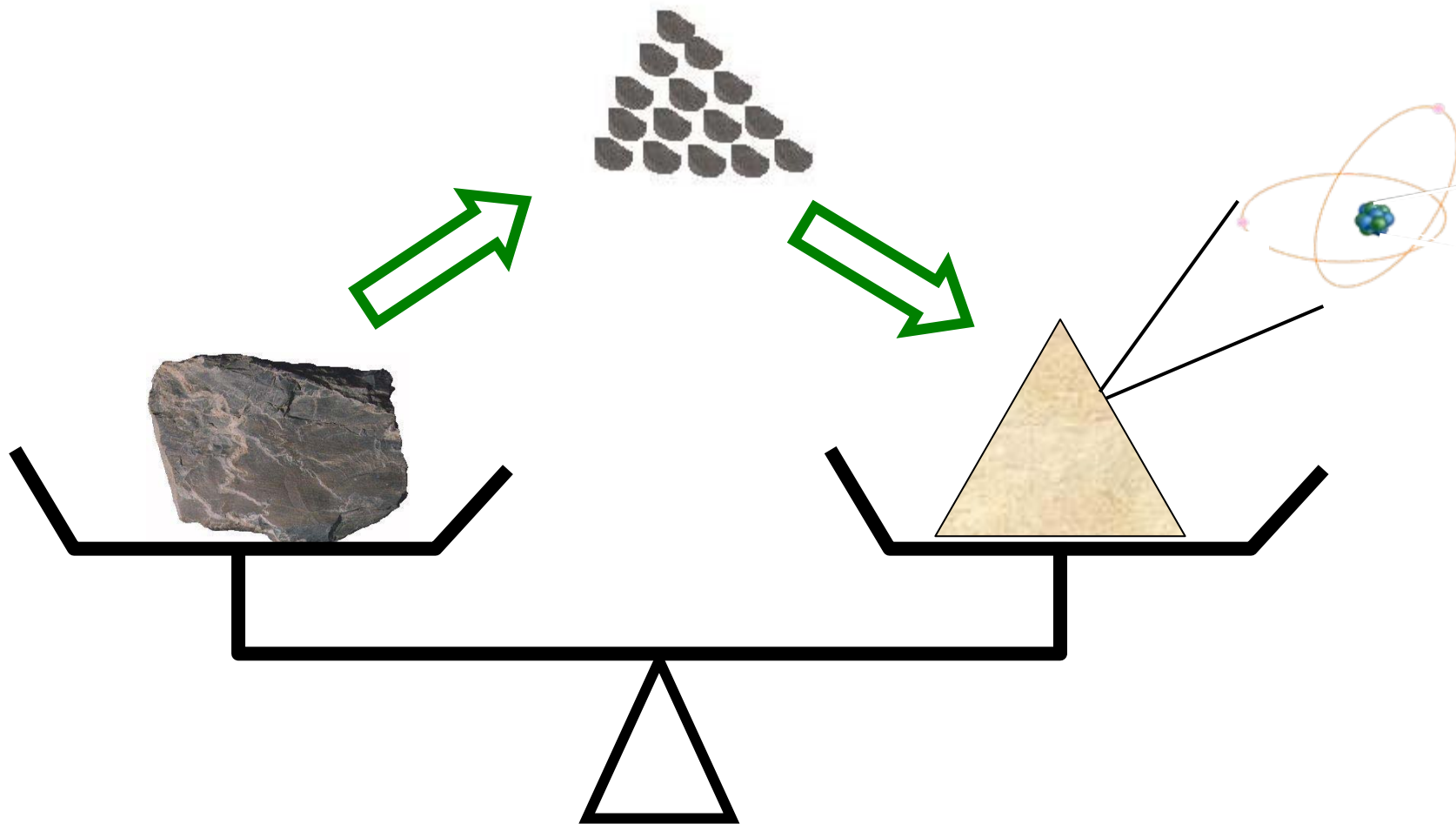
質量の起源？

物をバラバラにしてから、重さを比べてみよう



バラバラにする前と後で、重さは同じ

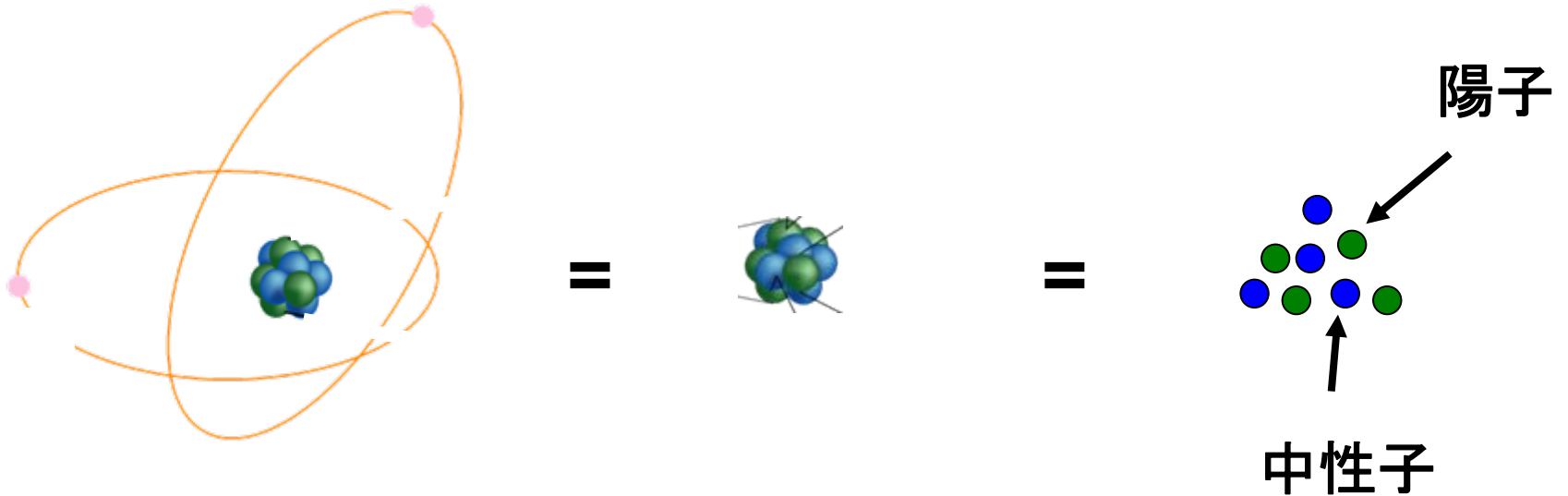
もっと細かくする … 原子に分解



やっぱり、前とほとんど同じ重さ

もっと、もっと細かく

原子 → 原子核 + 電子 → 陽子・中性子 + 電子

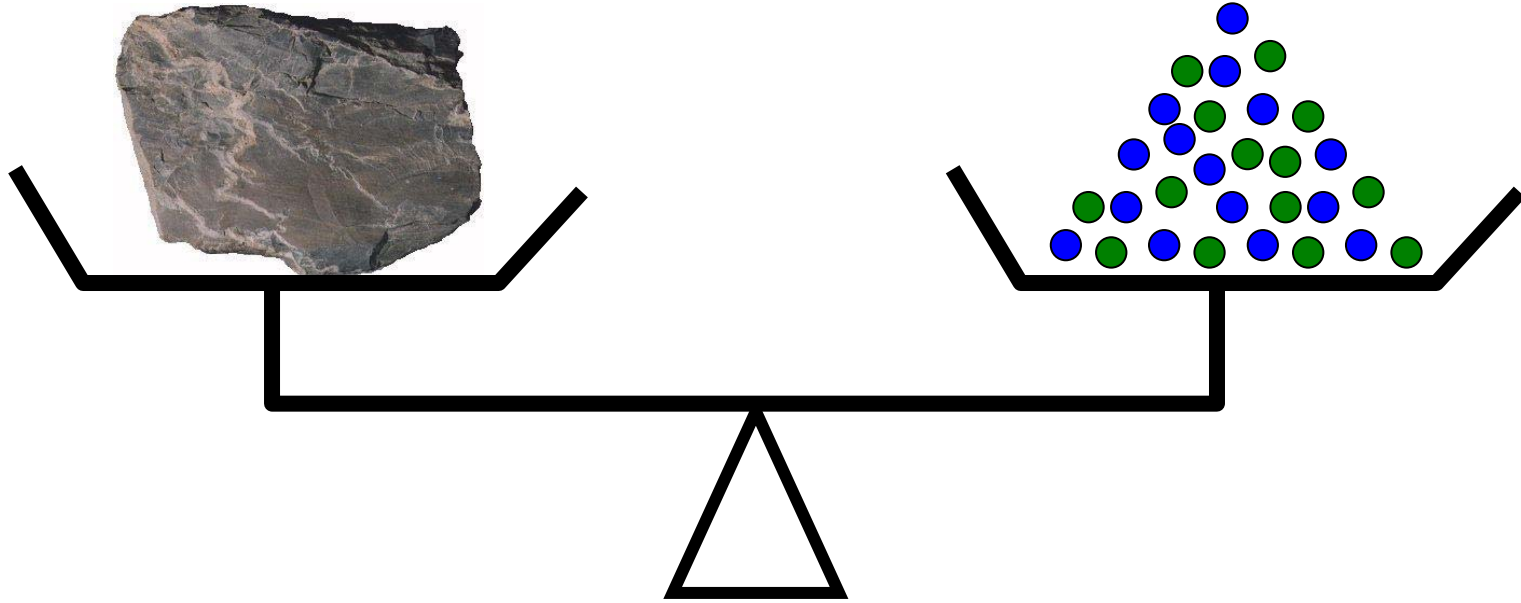


ここまで細かくしても、大体元と同じ重さ

物



陽子、中性子



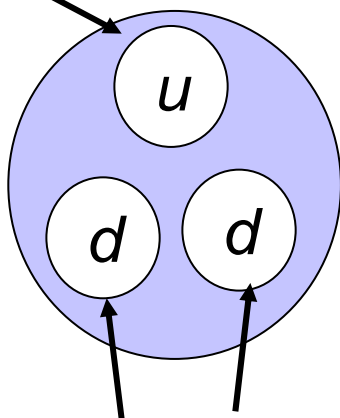
バラバラにする前と後で、重さはほぼ同じ

さらに細かくしてみよう

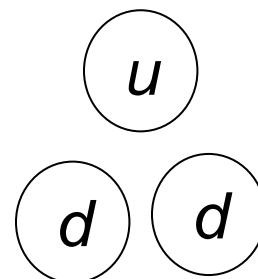
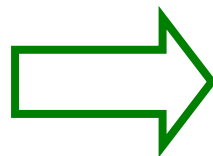
中性子

→ アップクォーク + ダウクォーク2個

アップ・クォーク

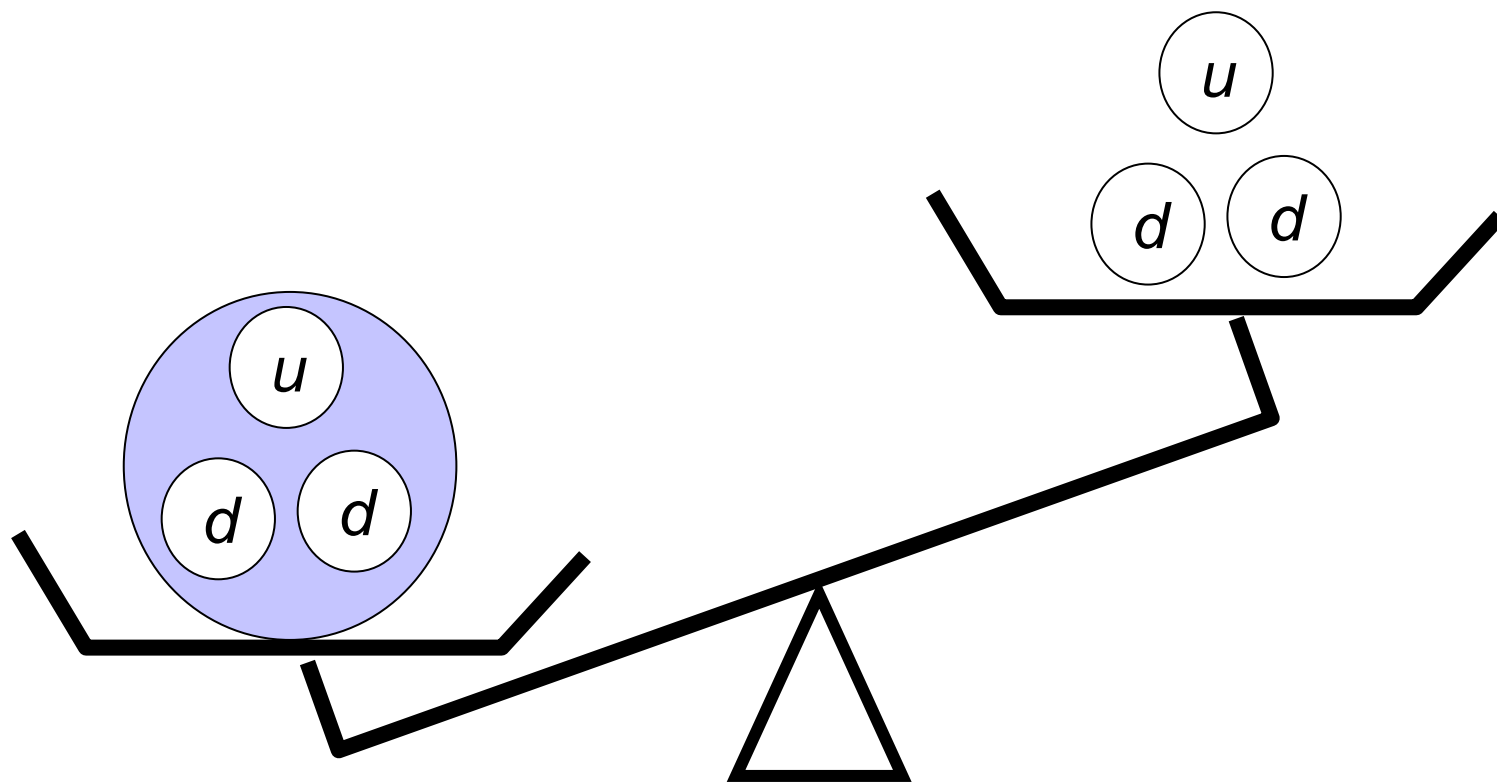


ダウン・クォーク



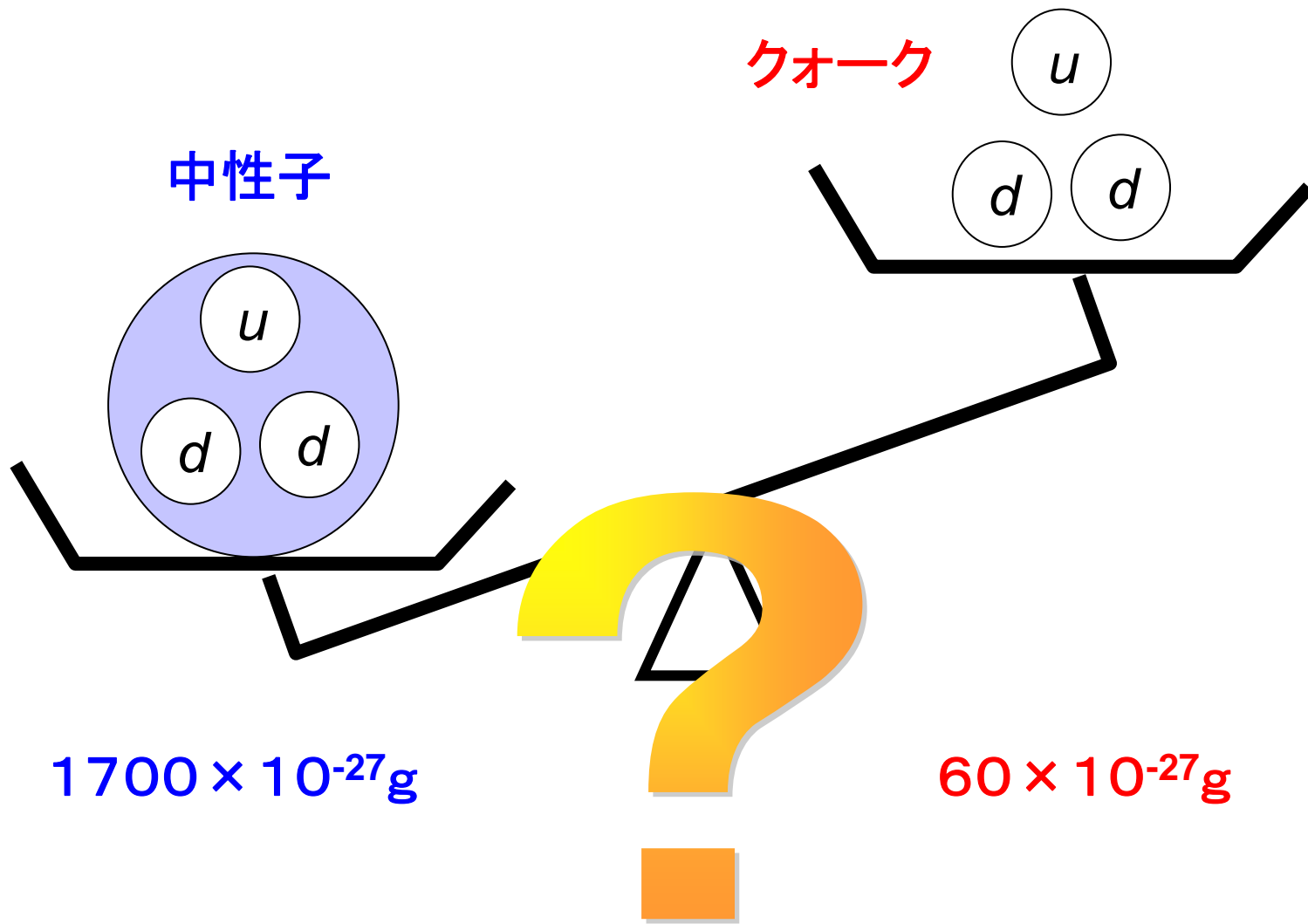
さらに細かくしてみよう

中性子 → アップクォーク + ダウンクォーク2個



$1700 \times 10^{-27} \text{g}$

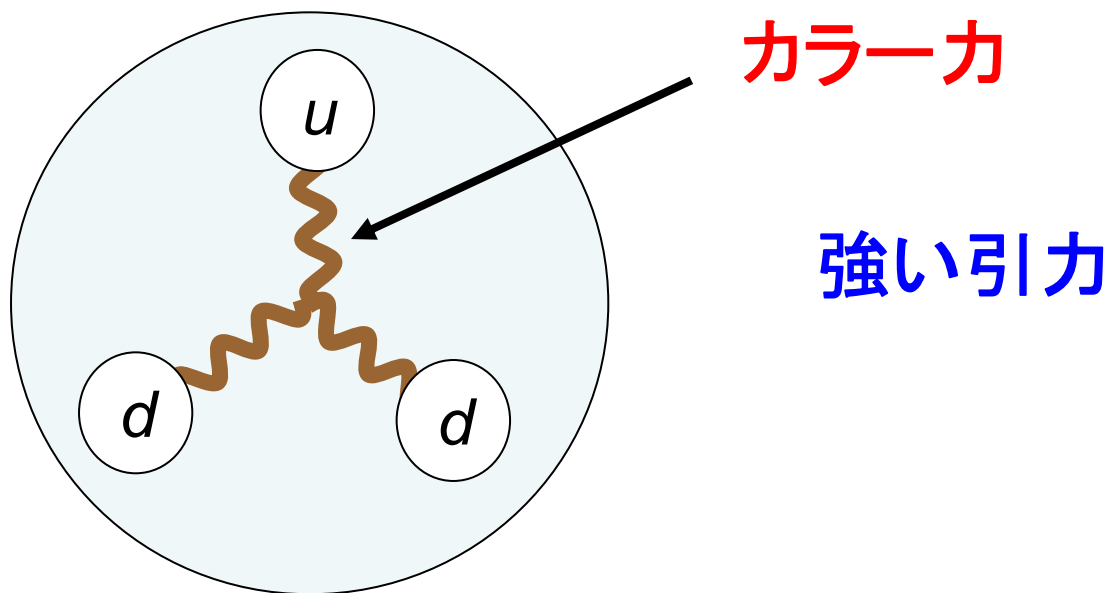
$60 \times 10^{-27} \text{g}$



物の質量(のほとんど)はどこから来たのか

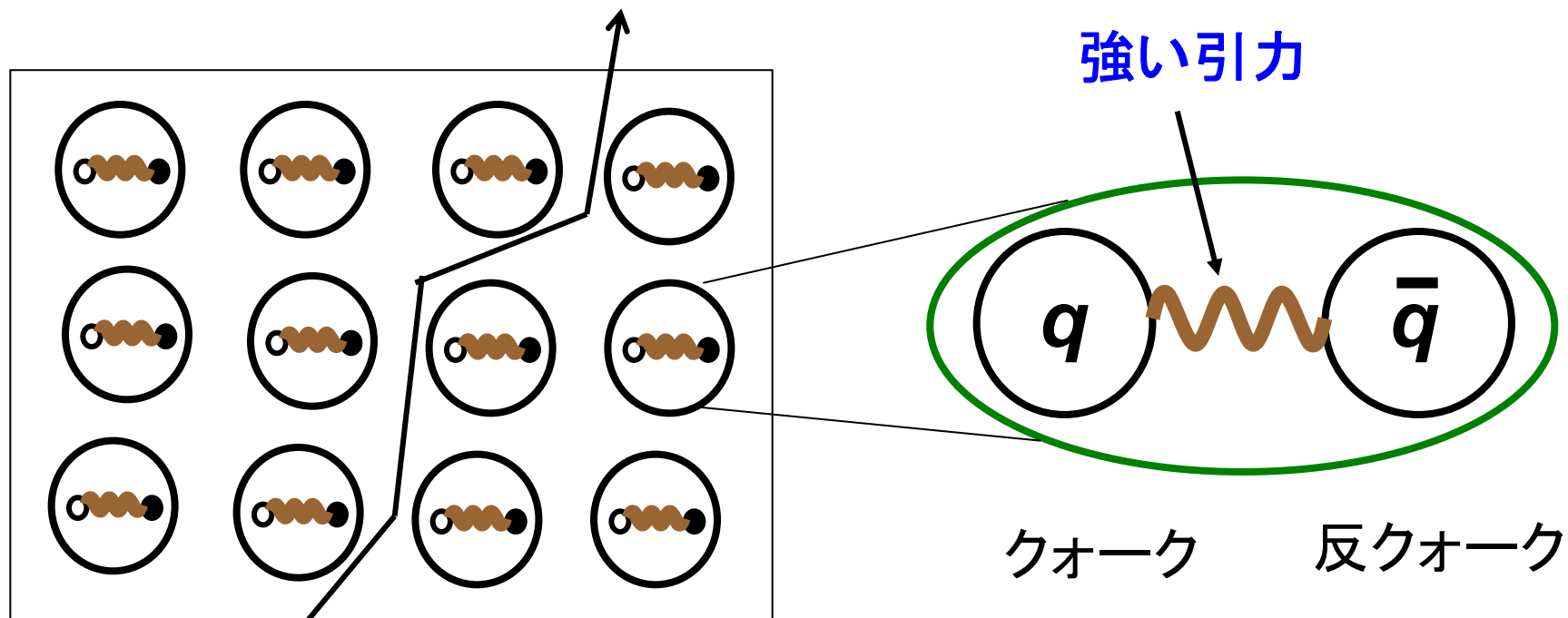
◎ 質量を生むメカニズムの候補

☆ 中性子の構造



☆ 真空の構造

クォーク-反クォークペアが真空を埋め尽くしている



q

クォークの運動が妨害される

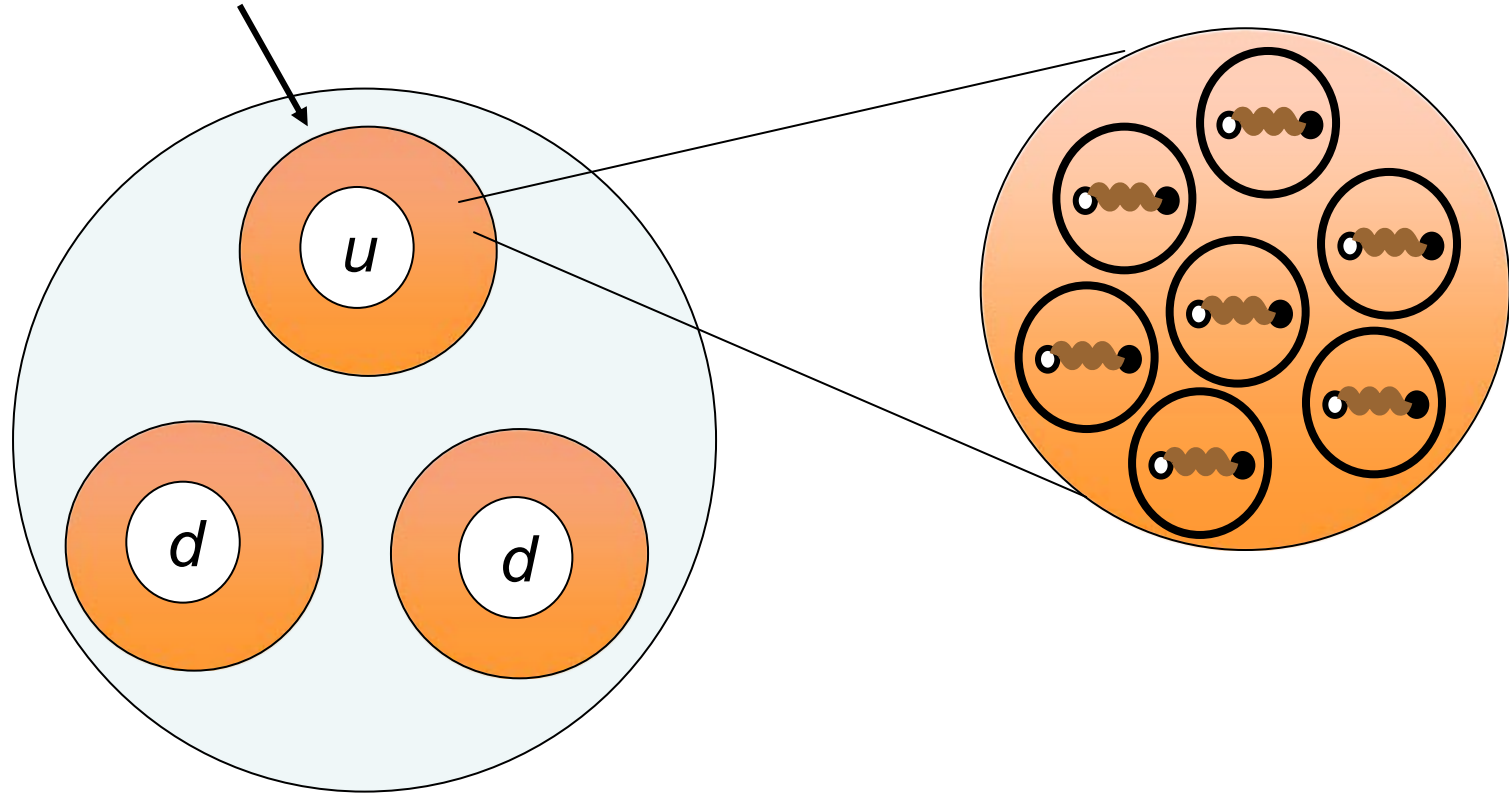
⇒ クォークが動きにくくなる

⇒ クォークが重くなった

☆ 中性子の構造

構成子クォーク
「衣」を着たクォーク

クォーク-反クォークペアの「衣」

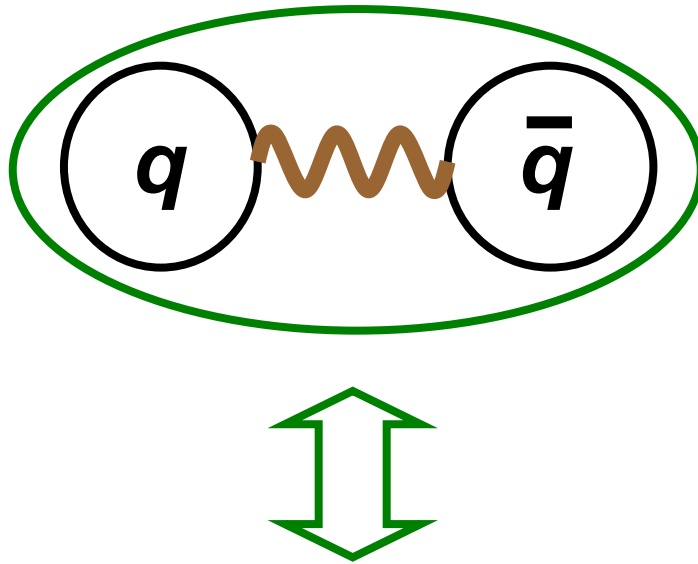


「衣」を着たクォークの質量

~ 500 × 10⁻²⁷ g ~ 中性子の重さの大体3分の1

質量の起源

= 真空を埋め尽くすクォーク・反クォークペア ?



「カイラル対称性の自発的破れ」

☆ QCDラグランジアン

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}\text{tr}[G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}] + \bar{q}i\gamma^\mu D_\mu q - \bar{q}\mathcal{M}q$$

$$q = \begin{pmatrix} u \\ d \\ \vdots \end{pmatrix}; \quad D^\mu q \equiv (\partial_\mu - ig_s G_\mu) q \quad \mathcal{M} = \begin{pmatrix} m_u & & \\ & m_d & \\ & & \dots \end{pmatrix}$$

カレント・
クォーク質量

⊙ $\mathcal{M} = 0$ の極限

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}\text{tr}[G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}] + \bar{q}_R i\gamma^\mu D_\mu q_R + \bar{q}_L i\gamma^\mu D_\mu q_L$$

$$q_R = \frac{1+\gamma_5}{2}q; \quad q_L = \frac{1-\gamma_5}{2}q; \quad q = q_R + q_L$$

● 大局的 $SU(N_f)_R \times SU(N_f)_L$ 対称性

$$q_R \rightarrow g_R q_R, \quad g_R = \exp[i\theta_R^a T_a] \in SU(N_f)_R$$

$$q_L \rightarrow g_L q_L, \quad g_L = \exp[i\theta_L^a T_a] \in SU(N_f)_L$$

☆ QCDにおけるカイラル対称性

◎ QCDラグランジアン

$$\mathcal{L} = \bar{q} i \gamma^\mu D_\mu q - \bar{q} \mathcal{M} q - \frac{1}{2} \text{tr} [G_{\mu\nu} G^{\mu\nu}]$$

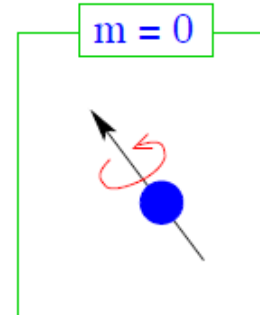
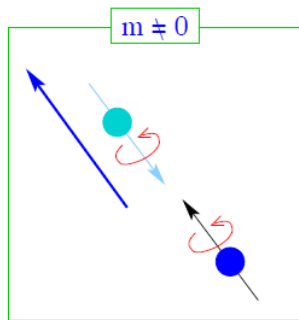
$$q = \begin{pmatrix} u \\ d \\ \vdots \end{pmatrix}; \quad D^\mu q \equiv (\partial_\mu - ig_s G_\mu) q \quad \mathcal{M} = \begin{pmatrix} m_u & & \\ & m_d & \\ & & \dots \end{pmatrix}$$

カレント・
クォーク質量

・右手・左手成分に分解

$$q_R = \frac{1+\gamma_5}{2} q; \quad q_L = \frac{1-\gamma_5}{2} q; \quad q = q_R + q_L$$

$$\mathcal{L} = \bar{q}_R i \gamma^\mu D_\mu q_R + \bar{q}_L i \gamma^\mu D_\mu q_L - \bar{q}_L \mathcal{M} q_R - \bar{q}_R \mathcal{M} q_L + \dots$$



◎ QCDラグランジアン

$$\mathcal{L} = \bar{q}_R i \gamma^\mu D_\mu q_R + \bar{q}_L i \gamma^\mu D_\mu q_L - \bar{q}_L \mathcal{M} q_R - \bar{q}_R \mathcal{M} q_L + \dots$$

◎ $\mathcal{M} = 0$ の極限

$$\mathcal{L} = \bar{q}_R i \gamma^\mu D_\mu q_R + \bar{q}_L i \gamma^\mu D_\mu q_L + \dots$$

q_R と q_L を独立に回転する変換のもとで \mathcal{L} は不変

● カイラル対称性： $SU(N_f)_R \times SU(N_f)_L$

$$q_R \rightarrow g_R q_R, \quad g_R = \exp[i\theta_R^a T_a] \in SU(N_f)_R$$

$$q_L \rightarrow g_L q_L, \quad g_L = \exp[i\theta_L^a T_a] \in SU(N_f)_L$$

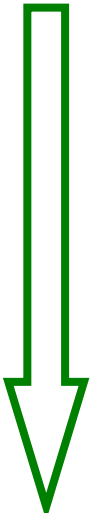
☆ カレントと保存電荷

$$J_{R,\mu}^a = \bar{q}_R \gamma_\mu T^a q_R ; \quad J_{L,\mu}^a = \bar{q}_L \gamma_\mu T^a q_L$$

$$Q_R^a = \int d^3x J_{R,0}^a ; \quad Q_L^a = \int d^3x J_{L,0}^a$$

$$[Q_R^a, q_R] = T^a q_R ; \quad [Q_R^a, q_L] = 0$$

$$[Q_L^a, q_L] = T^a q_L ; \quad [Q_L^a, q_R] = 0$$



$$J_{V,\mu}^a = J_{R,\mu}^a + J_{L,\mu}^a = \bar{q} \gamma_\mu T^a q \quad ; \quad \text{ベクトル・カレント}$$

$$J_{A,\mu}^a = J_{R,\mu}^a - J_{L,\mu}^a = \bar{q} \gamma_5 \gamma_\mu T^a q \quad ; \quad \text{軸性ベクトル・カレント}$$

$$Q_V^a = Q_R^a + Q_L^a ; \quad Q_A^a = Q_R^a - Q_L^a$$

(vector charge)
(axial-vector charge)

$$[Q_V^a, q] = T^a q ; \quad [Q_A^a, q] = \gamma_5 T^a q$$

☆ カイラル対称性の自発的破れ

QCDの強い相互作用により、 q_R と q_L が真空中で凝縮

・オーダー・パラメータ

$$\langle 0 | \bar{q}q | 0 \rangle = \langle 0 | \bar{q}_R q_L + \bar{q}_L q_R | 0 \rangle \neq 0$$

QCD真空は q_R と q_L を同時に回転させる対称性のみ持つ

$$\begin{aligned} q_R &\rightarrow g_V q_R \\ q_L &\rightarrow g_V q_L \end{aligned} \quad g_V = \exp [i\theta_V^a T_a] \in \text{SU}(N_f)_V$$

$$\text{SU}(N_f)_R \times \text{SU}(N_f)_L \rightarrow \text{SU}(N_f)_V$$

◎ 南部-ゴールドストーンの定理

$N_f^2 - 1$ 個の南部-ゴールドストーン粒子 (質量ゼロ)

☆ 現実世界

- ・カレント・クォーク質量 ; $m_u, m_d \cdots 5 - 10 \text{ MeV}$
⇒ カイラル対称性は explicit に破れている
- ・構成子(constituent)クォーク質量
陽子(uud), 中性子(udd)の質量 $\cdots 1 \text{ GeV}$
→ ハドロンの中では、 $M_u, M_d \cdots 300 \text{ MeV}$
 M_u, M_d ; QCDの強い相互作用により生成された有効質量

◎ QCDラグランジアンでの近似的カイラル対称性

$$\frac{m_u}{M_u}, \frac{m_d}{M_d} \ll 1 \cdots \text{近似的 } \text{SU}(2)_R \times \text{SU}(2)_L \text{ 対称性}$$

$$\Downarrow \text{QCD の強い相互作用} \rightarrow \langle 0 | \bar{q}q | 0 \rangle \neq 0$$

◎ 自発的破れ : $\text{SU}(2)_R \times \text{SU}(2)_L \rightarrow \text{SU}(2)_V$

- ・ π 中間子 \cdots 近似的南部-ゴールドストーン粒子

☆ カイラル対称性の自発的破れの証拠 ?

◎ π 中間子の低エネルギー相互作用が対称性で決まっている

南部-ゴールドストーン定理の低エネルギー定理

NG boson の低エネルギー極限における散乱振幅は対称性の要求から、力学系の詳細によらずに決定される。

・ ハドロンのパートナー間に質量差がある ?

[例: $\rho(770)$ と $A_1(1260)$]

注1) 「自発的破れ」か「はじめからない」の区別 ?

注2) ρ と A_1 がカイラルパートナー ?

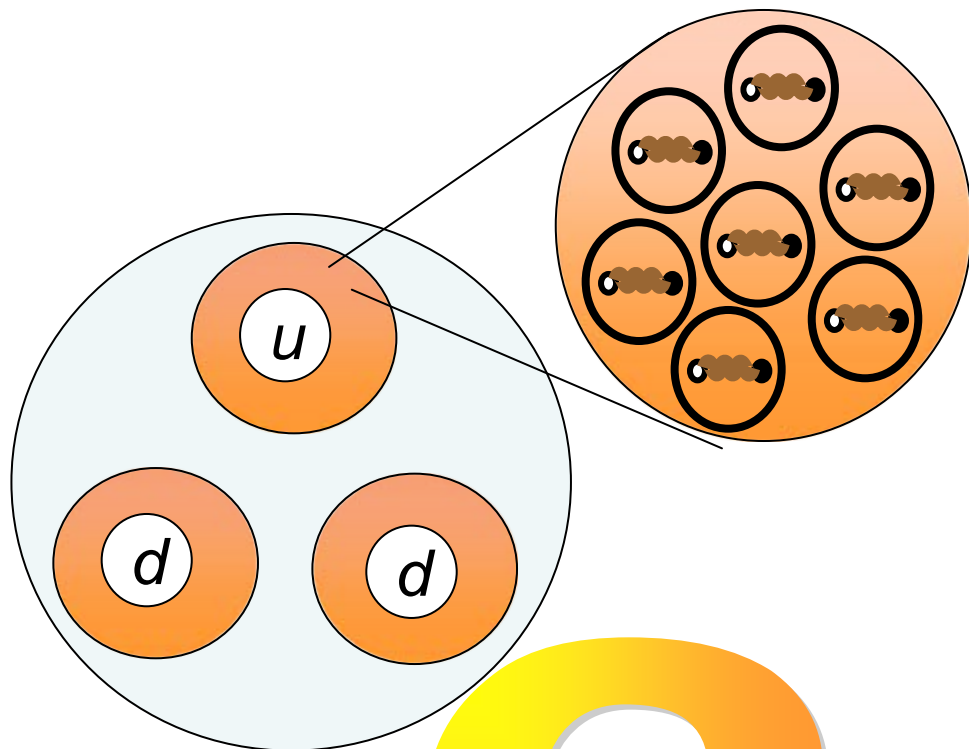
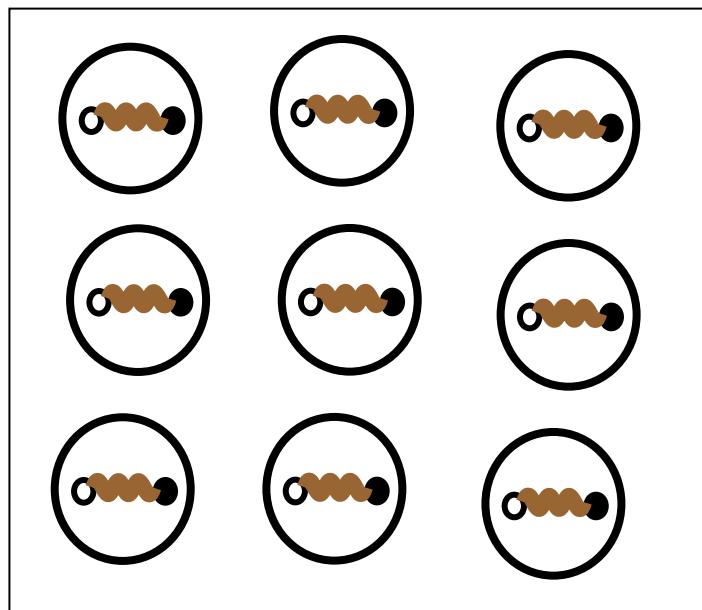
$$J_{V,\mu}^a = \bar{q}\gamma_\mu T^a q$$

$$J_{A,\mu}^a = \bar{q}\gamma_5\gamma_\mu T^a q$$

} }

これらは「パートナー」と言ってもいいだろうが。。。

このメカニズムは正しいのか？

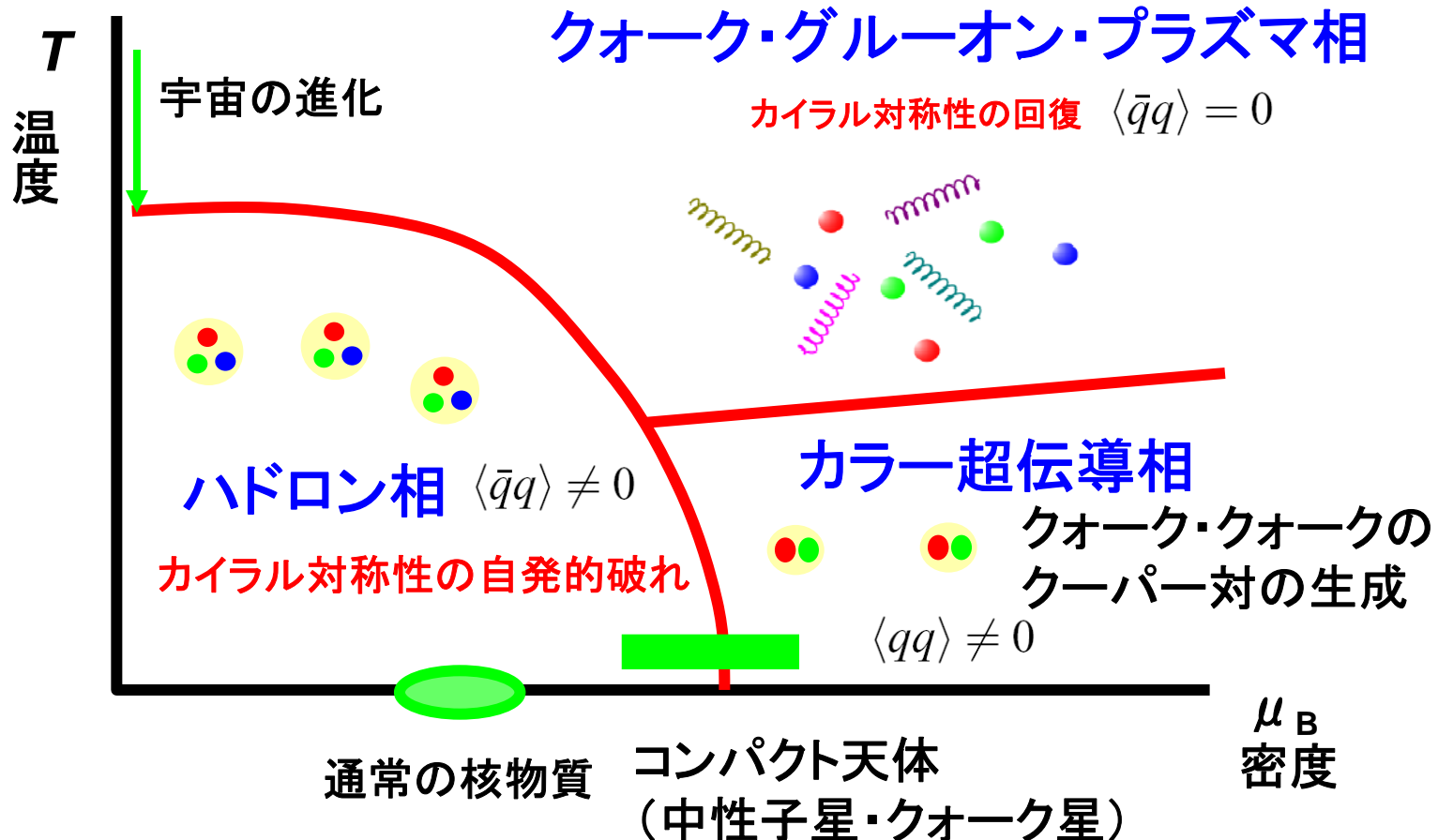


「クォーク-反クォークペア」、
または、「衣」を確認できないか？

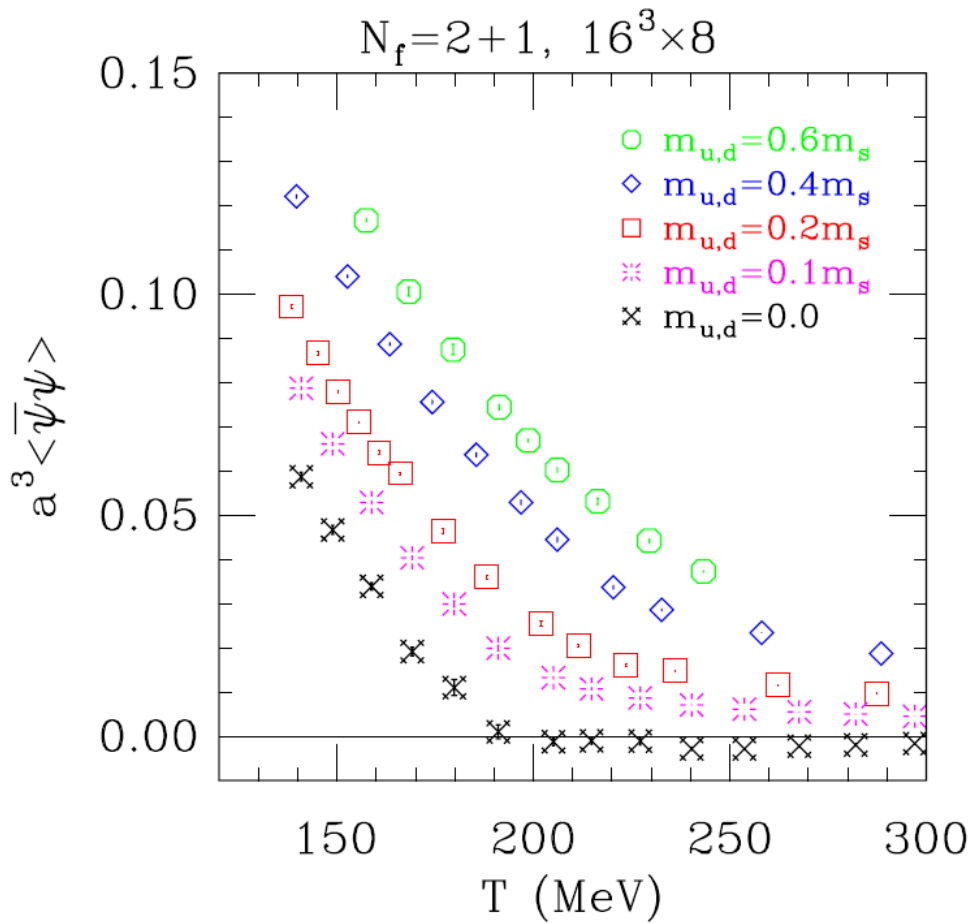
☆ 有限温度・有限密度QCD

- 相構造の変化
- 高温・高密度でのハドロンの性質の変化

QCDの相図（理論的予想）



☆ 高温でのクォーク-反クォーク凝縮の溶解



C. Bernard et al.
PRD71, 034504 (2005)

ハドロンの性質は影響を受けるか？

☆ Brown-Rho scaling

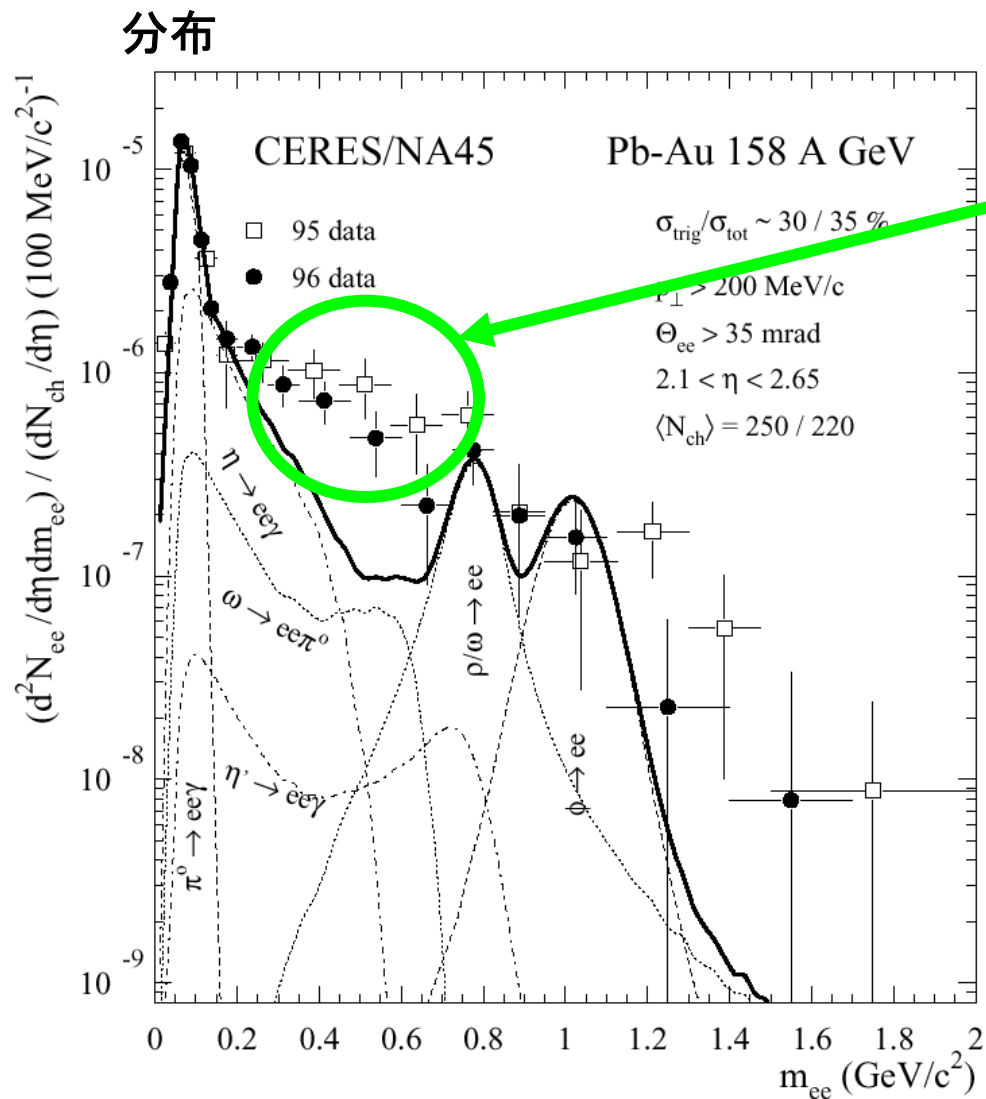
G.E.Brown and M.Rho, PRL 66, 2720 (1991)

$$\frac{m_{\sigma}^*}{m_{\sigma}} \sim \frac{m_N^*}{m_N} \sim \frac{m_{\rho}^*}{m_{\rho}} \sim \frac{m_{\omega}^*}{m_{\omega}} \sim \frac{\langle \bar{q}q \rangle^*}{\langle \bar{q}q \rangle} \xrightarrow{T \rightarrow T_c} 0$$

カイラル対称性の回復と共にハドロンの質量が軽くなる

☆ CERN/SPS 実験の結果 (1995, 1996)

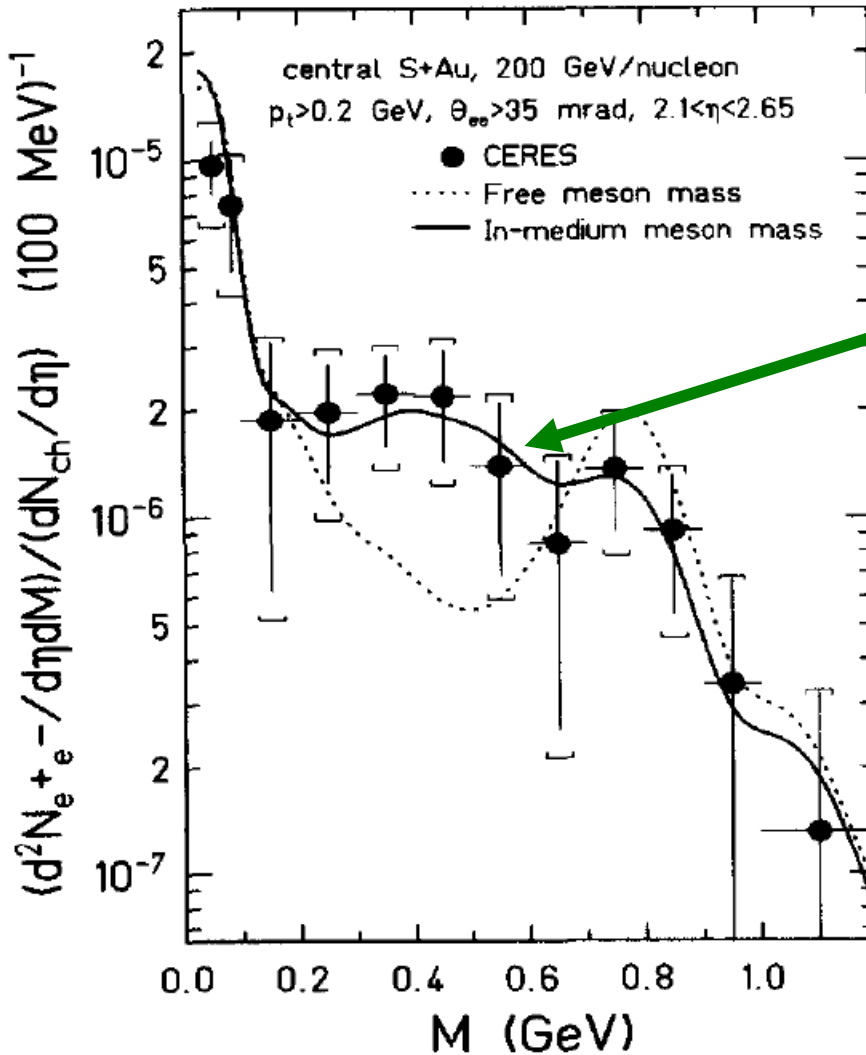
電子・陽電子対の数



真空中と同じ分布関数
では説明できない

電子・陽電子対のエネルギー

◎ ドロップリング ρ が実験データを説明できる



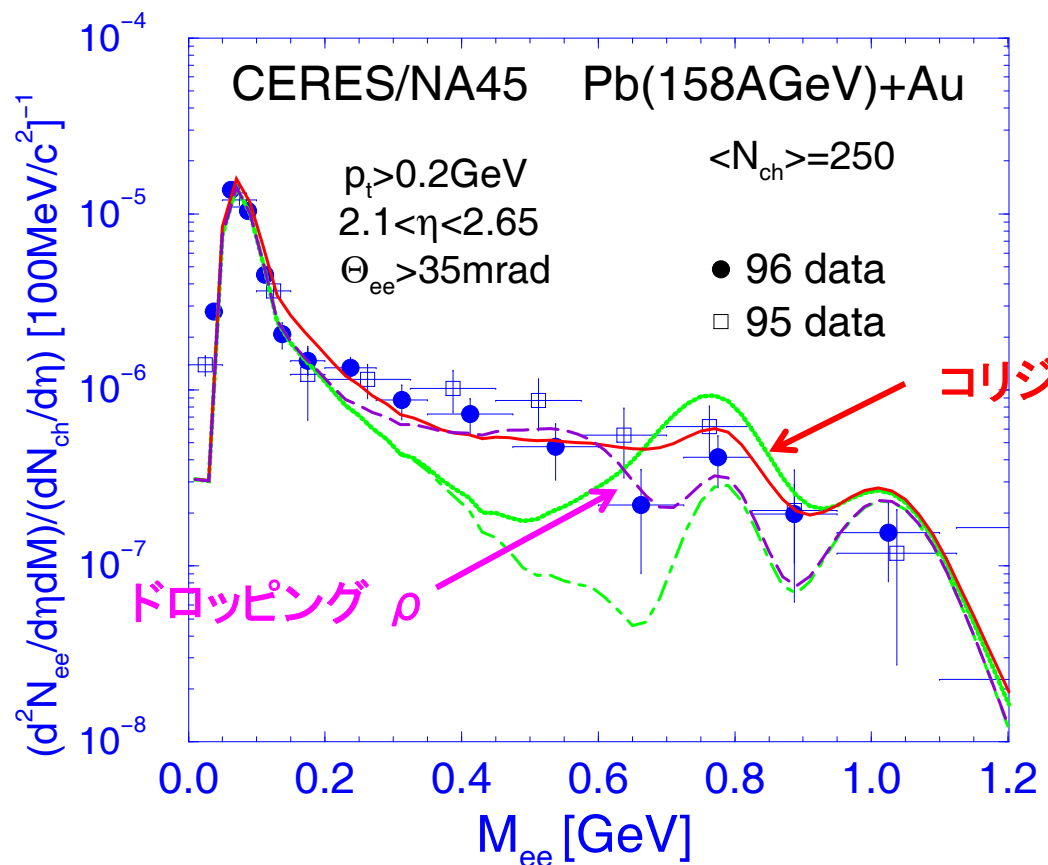
G.Q.Li, C.M.Ko and G.E.Brown
 NPA 606, 568 (1996)

$$\frac{m_\rho^*}{m_\rho} \sim \frac{\langle \bar{q}q \rangle^*}{\langle \bar{q}q \rangle} \xrightarrow{T \rightarrow T_c} 0$$

☆ 理論的説明

- ・ **コリジョン・ブロードニング** ... ハドロンの多体効果で ρ がブロードに
- ・ (シンプル)ドロップング ρ ... BR scaling $m_\rho \rightarrow 0$

ハドロンの多体効果なし？



Rapp-Wambach, 2000

☆ Dilepton production rate

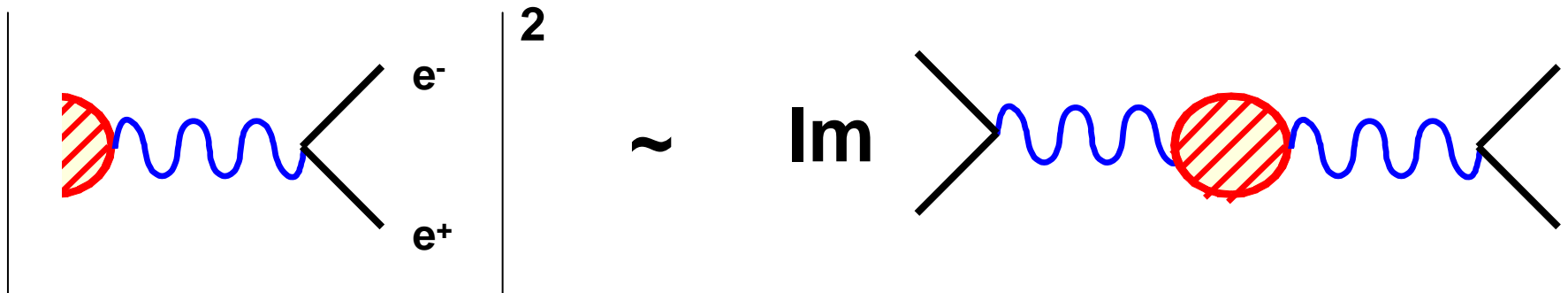
$$\frac{dN}{ds}(s; T) = \int \frac{d^3\vec{q}}{2q_0} \frac{dN}{d^4q}(q_0, \vec{q}; T) \quad s = M^2 \quad ; \quad \text{dilepton invariant mass}$$

$$q_0 = \sqrt{\vec{q}^2 + M^2}$$

$$\frac{dN}{d^4q}(q_0, \vec{q}; T) = \frac{\alpha^2}{\pi^3 M^2} \frac{1}{e^{q_0/T} - 1} \text{Im}\Pi(q_0, \vec{q}; T)$$

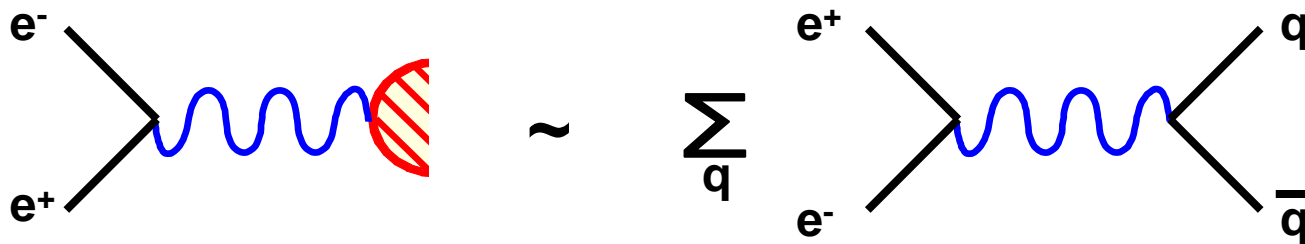


photon self-energy の虚部



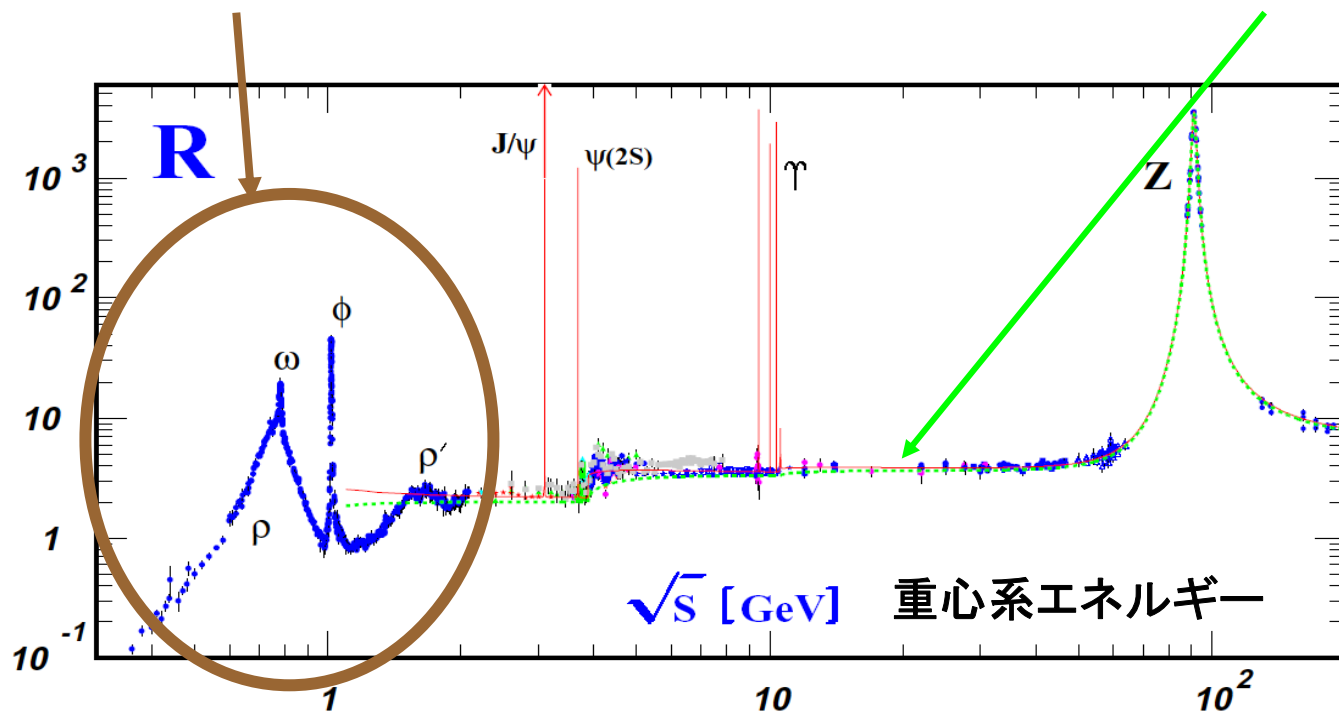
◎ 真空中での $\text{Im } \Pi \cdots R$ 値

$$R = \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \text{ハドロン})}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)}$$

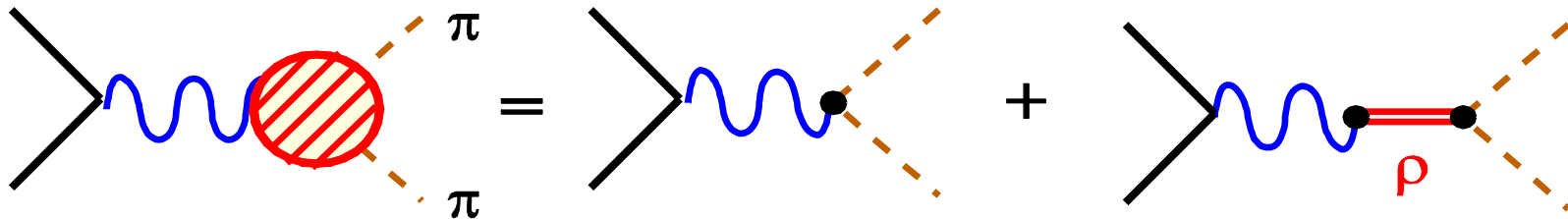


強結合領域 \cdots カイラル対称性の情報

摂動的QCD : $N_c = 3$

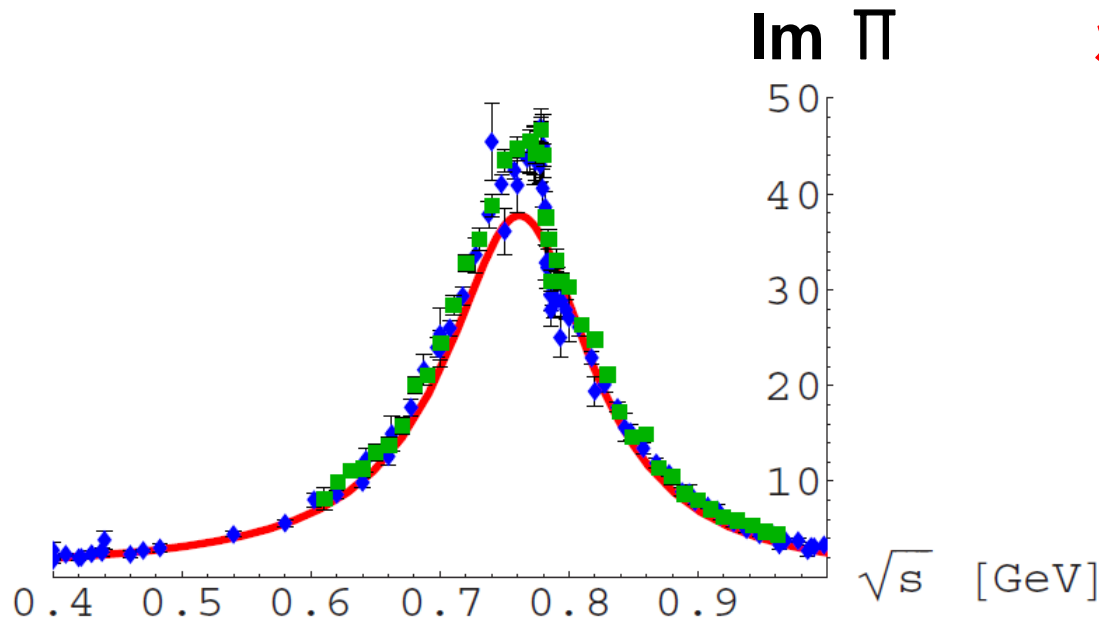


© $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$ ($\sqrt{s} < 1 \text{ GeV}$ ρ dominant)

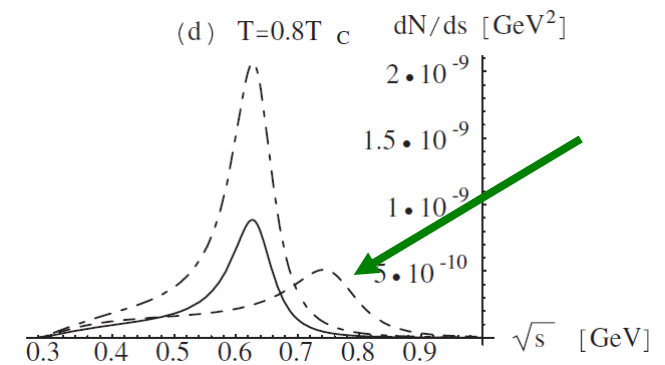
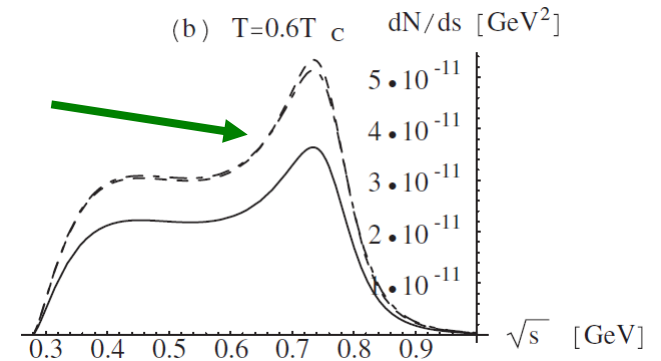
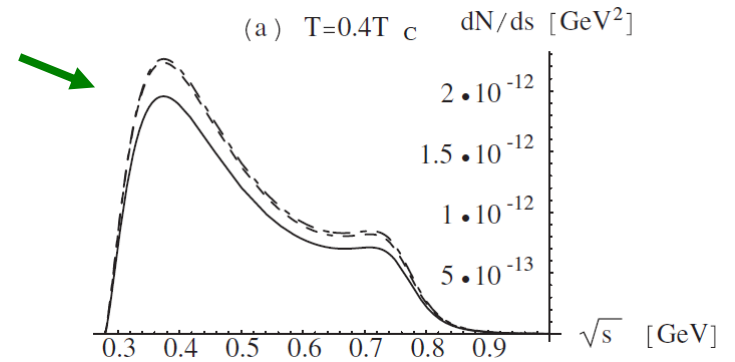
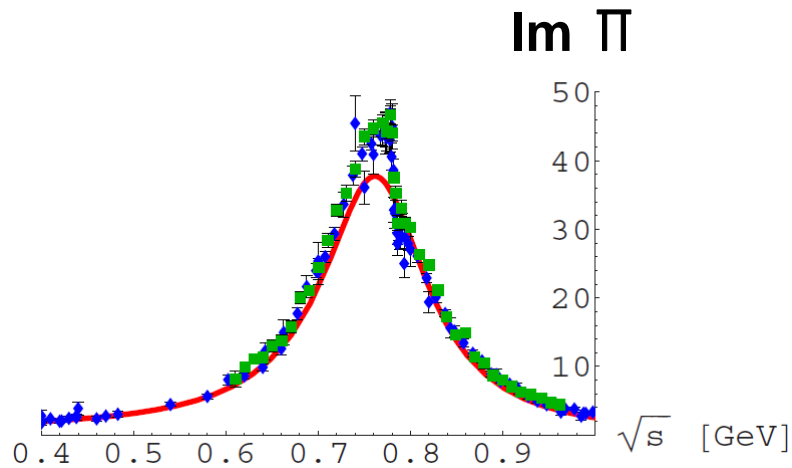
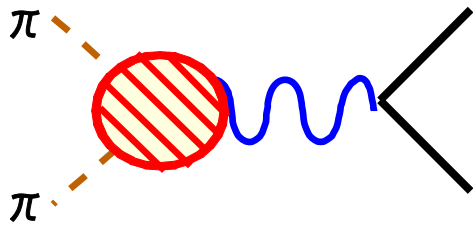


$$\text{Im}\Pi(s; T) = \frac{1}{6\pi\sqrt{s}} \left(\frac{s - 4m_\pi^2}{4} \right)^{3/2} |\mathcal{F}(s; T)|^2$$

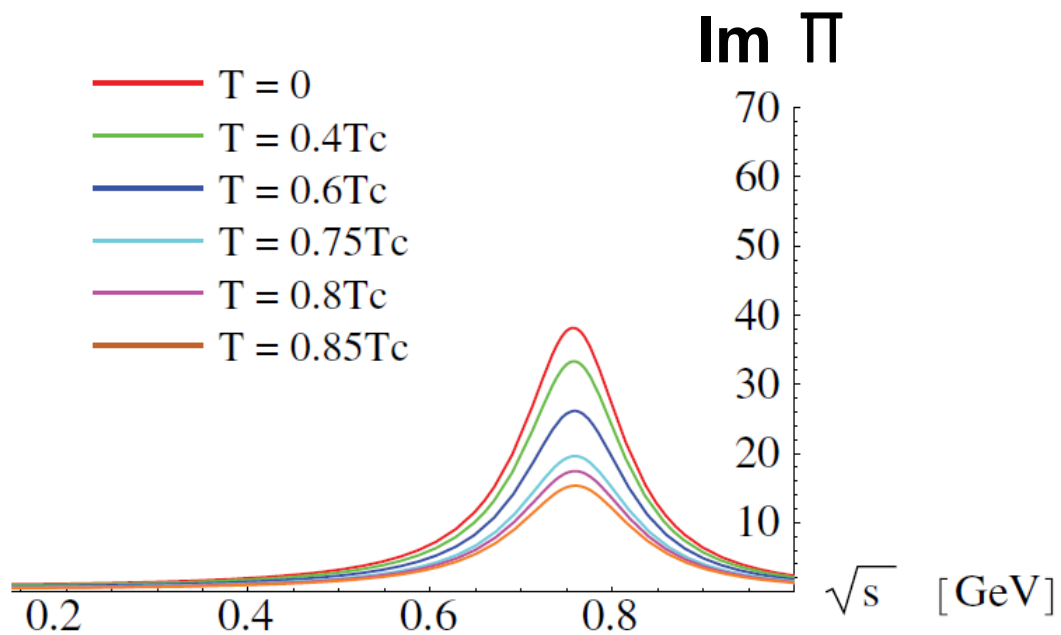
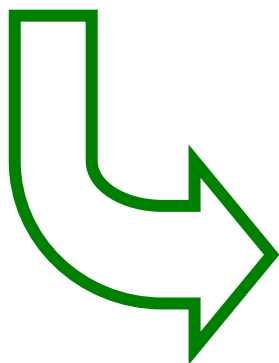
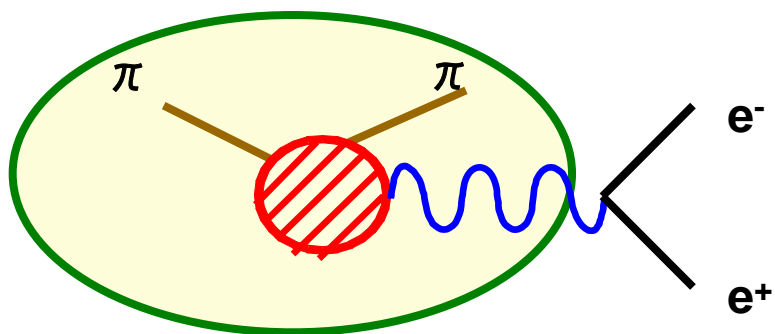
π EM form factor



☆ Dilepton Production from $\pi^+ \pi^- \rightarrow e^+ e^-$

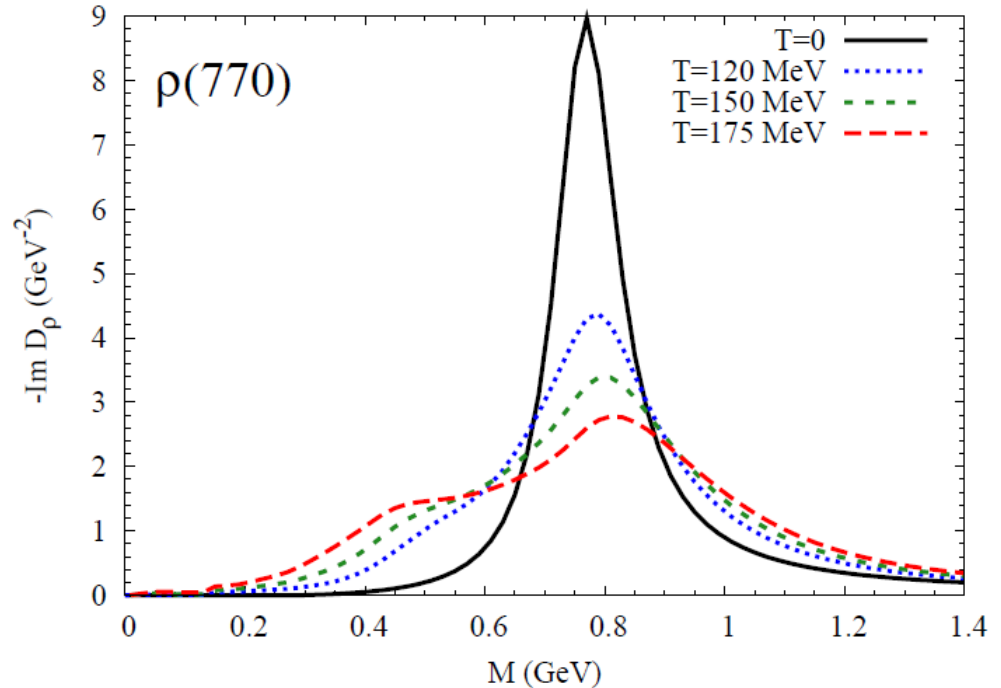
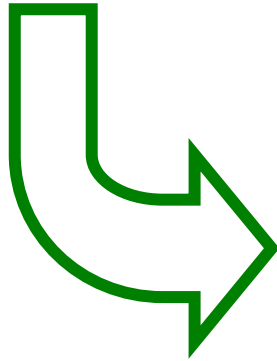
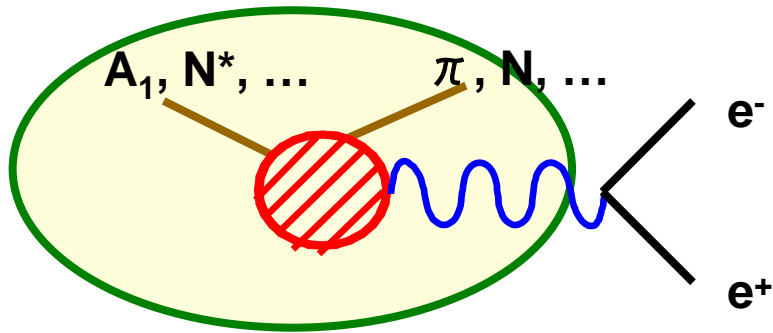


◎ コリジョン・ブロードニング 1



◎ コリジョン・ブロードニング 2

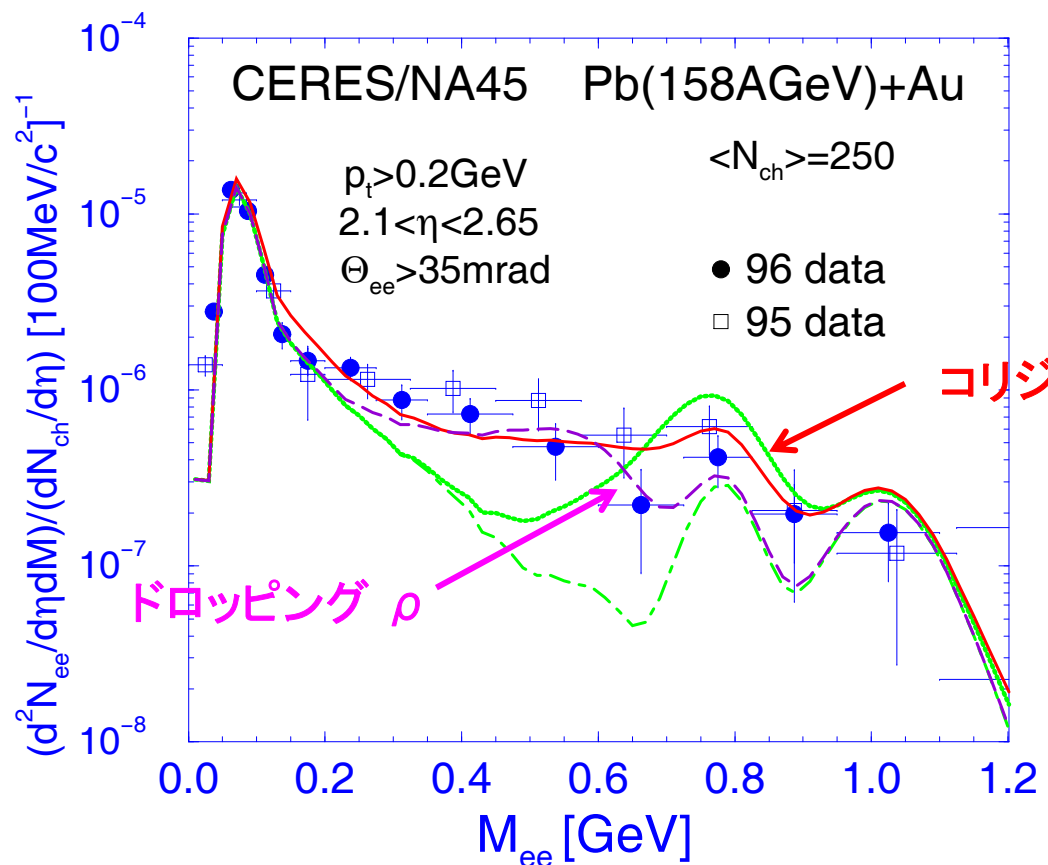
$$A_1 \rightarrow \pi e^+ e^- ; N^* \rightarrow N e^+ e^- ; \dots$$



☆ 理論的説明

- ・ **コリジョン・ブロードニング** ... ハドロンの多体効果で ρ がブロードに
- ・ **(シンプル)ドロップング ρ** ... **BR scaling $m_\rho \rightarrow 0$**

ハドロンの多体効果なし？

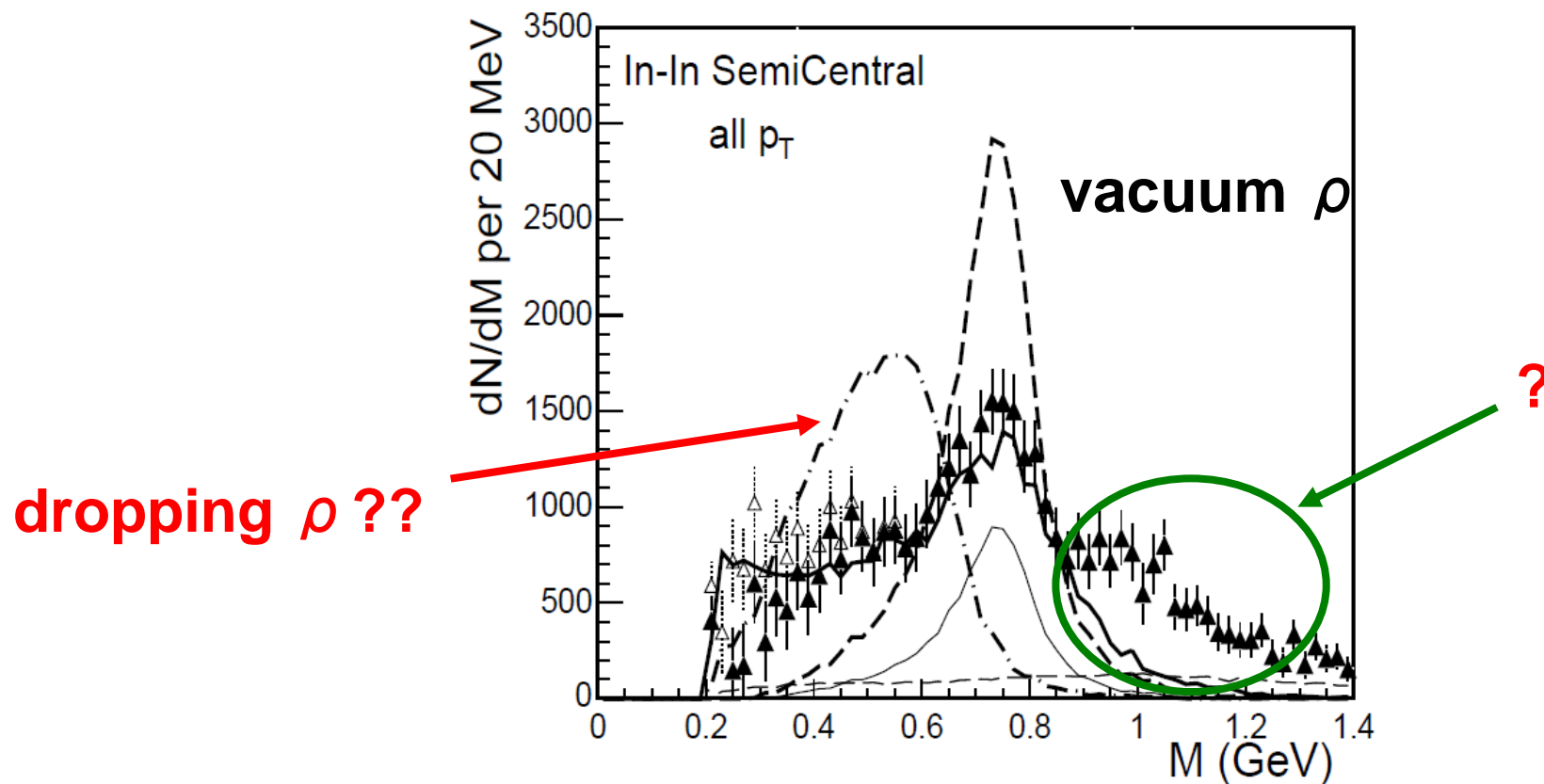


コリジョン・ブロードニング

ドロップング ρ

Rapp-Wambach, 2000

☆ New **Di-Muon** Data from **NA60** (PRL 96, 162302 (2006))



© New Di-Electron data from CERES

Talk given by P. Braun-Munzinger
at KIAS-APCTP Workshop
"Relativistic Heavy-Ion Collision : Present and Future"
2006-09 Heavy Ion Meeting (HIM 2006-09).

e^+e^- decays from CERES and ρ spectral function

• standard hadronic (cocktail) ρ meson very small compared to observations

spectral function strongly enhanced in hot medium

• Brown-Rho scenario
not including BR scaling in terms of the vector manifestation,
Brown and Rho, nucl-th/0509002

• Rapp-Wambach scenario

(a)

— cocktail ρ
- - - dropping ρ mass
- - - in-medium hadronic

$\langle dN_{e^+e^-}/dm_{e^+e^-} \rangle \times 10^{-6}$

$m_{e^+e^-} (\text{GeV}/c^2)$

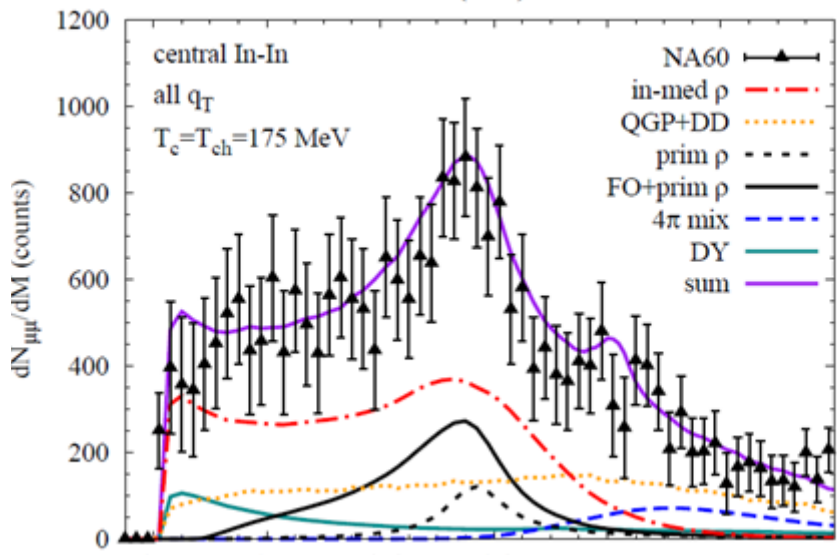
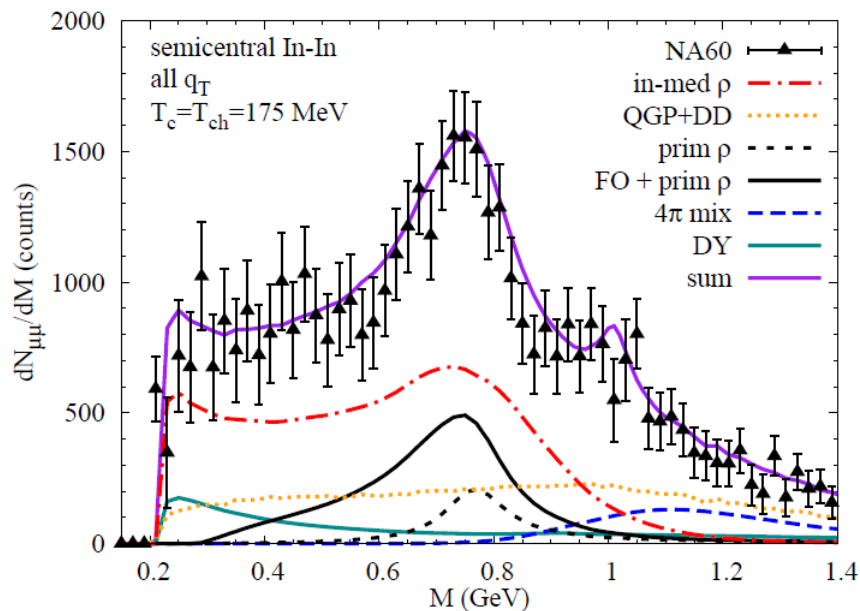
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

GSI

Peter Braun-Munzinger

◎ 理論的解析 (コリジョンブロードニング 1)

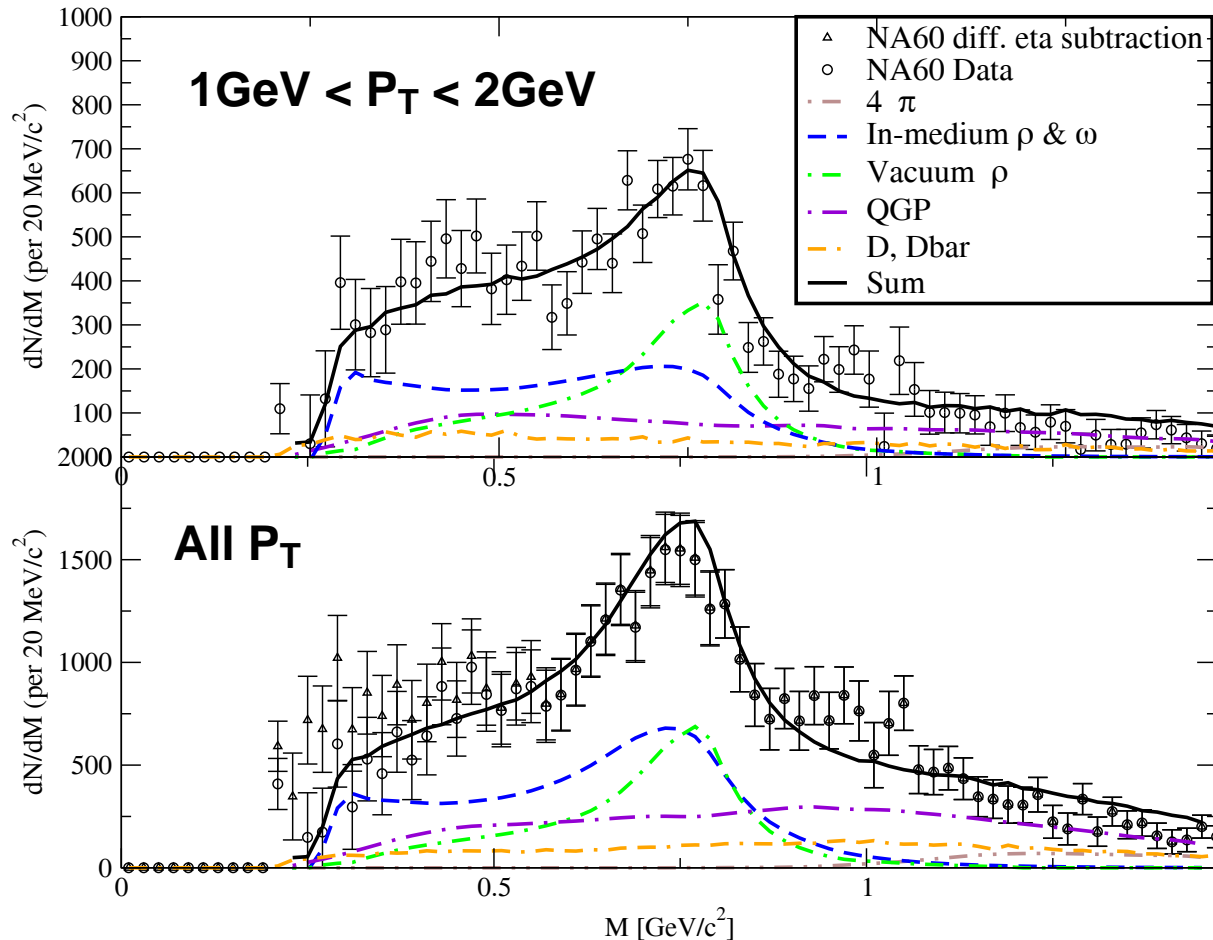
H.v.Hees and R.Rapp, hep-ph/0711.3444



1GeV より上では 4 π mode ($\pi\pi\pi\pi \rightarrow \mu\mu$ 等) が重要

◎ 理論的解析 (コリジョンブロードニング 2)

J.Ruppert, C.Gale, T.Renk, P.Lichard and J.I.Kapusta, arXiv:0706.1934 [hep-ph]

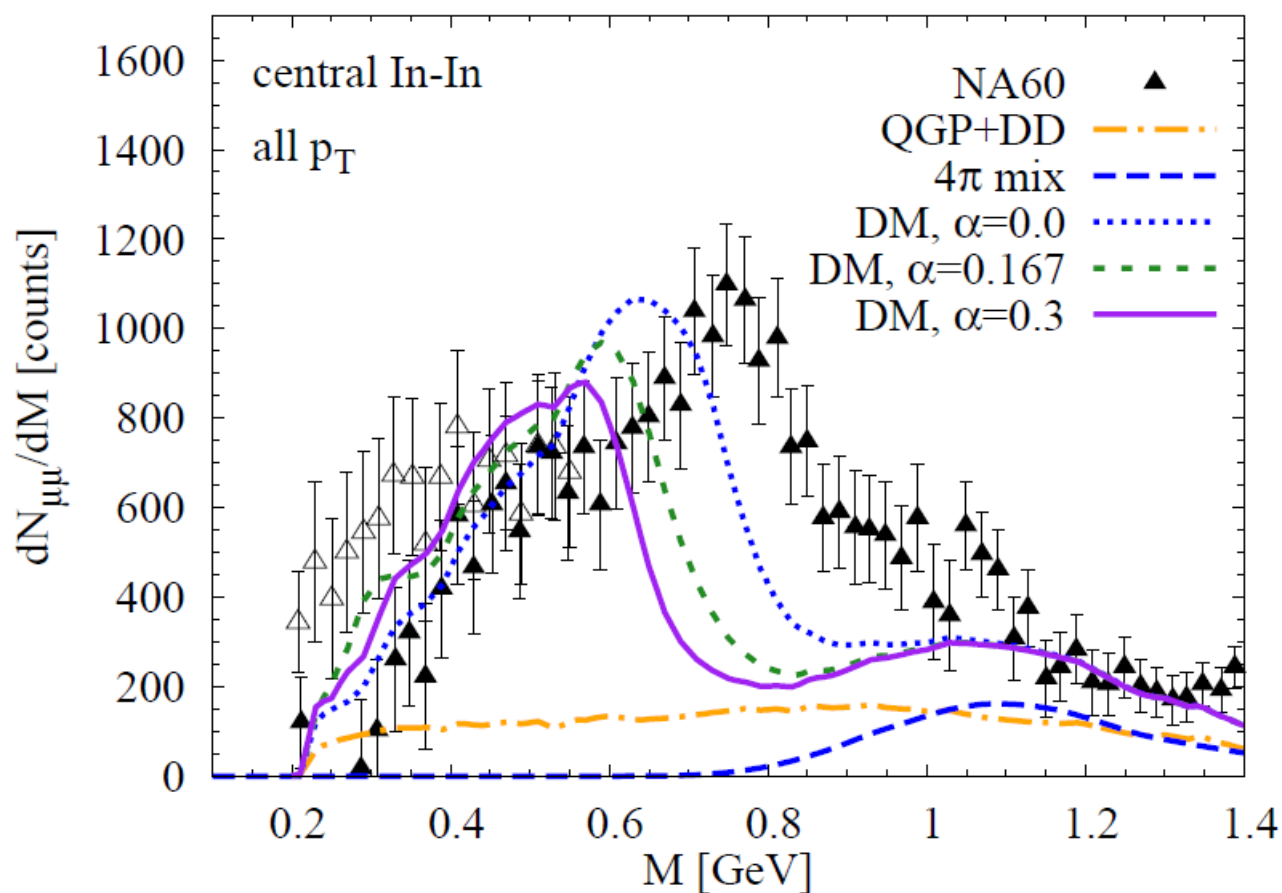


ハドロン多体効果で実験結果が説明できる
→ カイラル対称性の回復は見られなかった？

☆ ドロッピング ρ ?

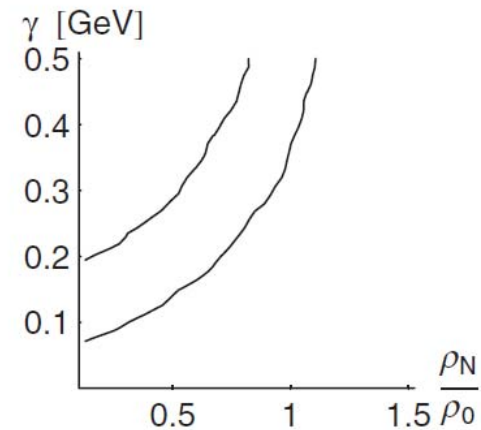
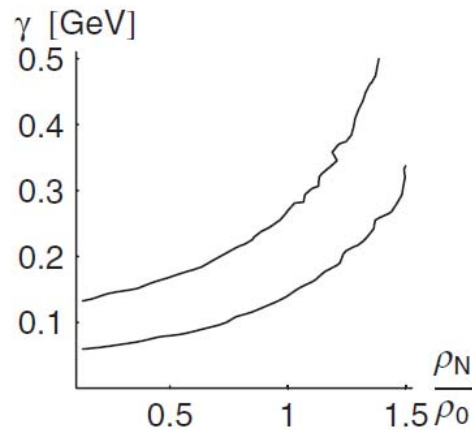
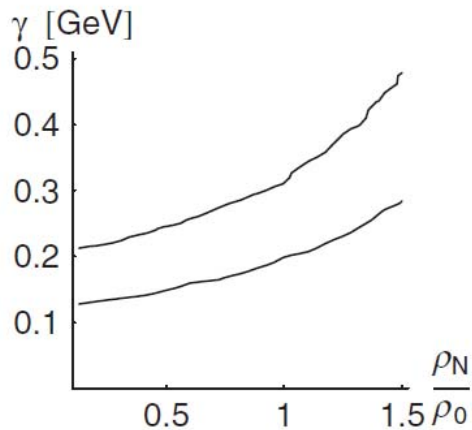
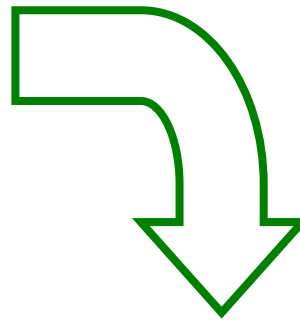
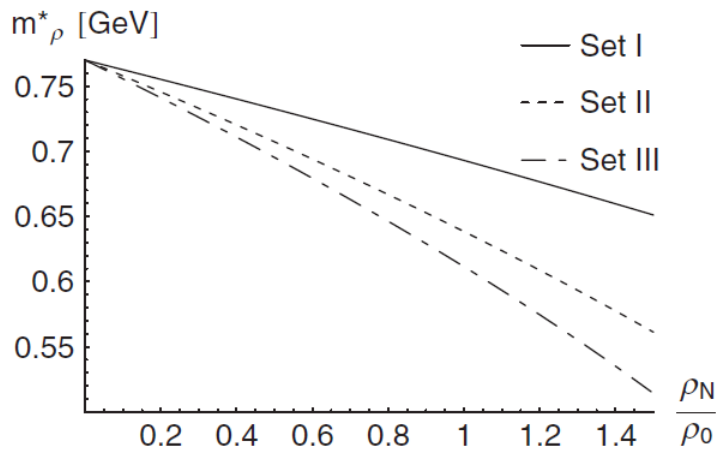
◎ (シンプル)ドロッピング ρ (H.v.Hees and R.Rapp, hep-ph/0604269)

$$m_{\rho}^* = m_{\rho}(1 - C\rho_B/\rho_0)[1 - (T/T_c)^2]^\alpha \quad C = 0.15$$



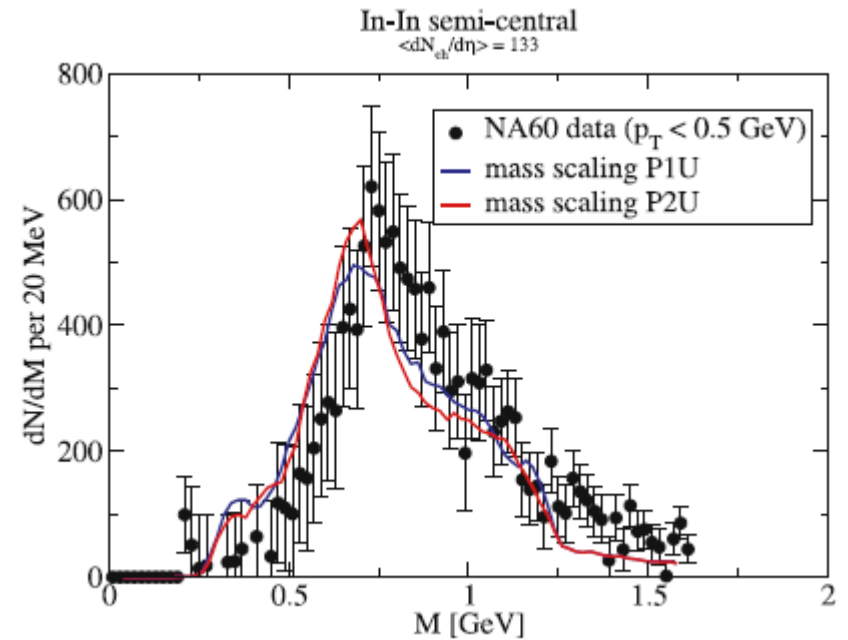
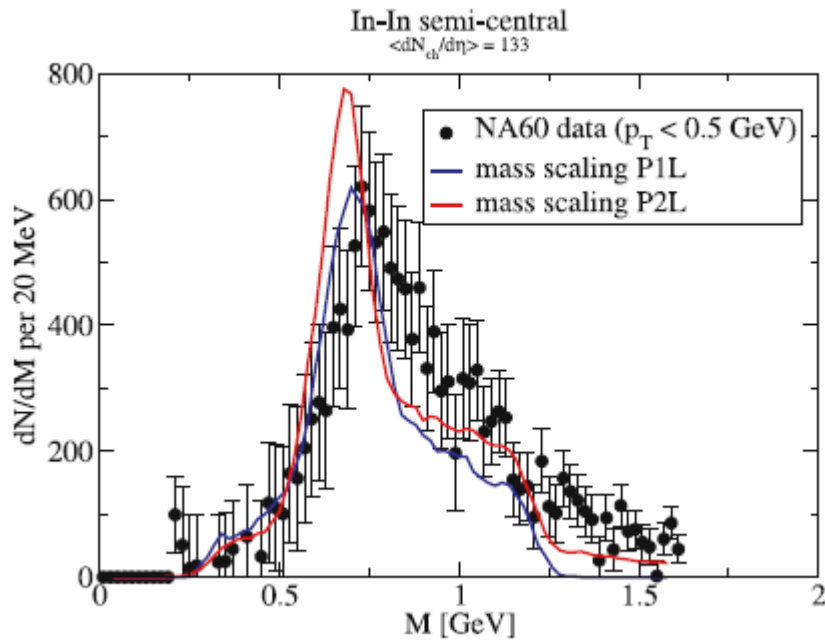
◎ ドロッピング ρ & “intrinsic” broadening (QCD sum rule)

J.Ruppert, T.Renk and B.Mueller, PRC 73, 034907 (2006)



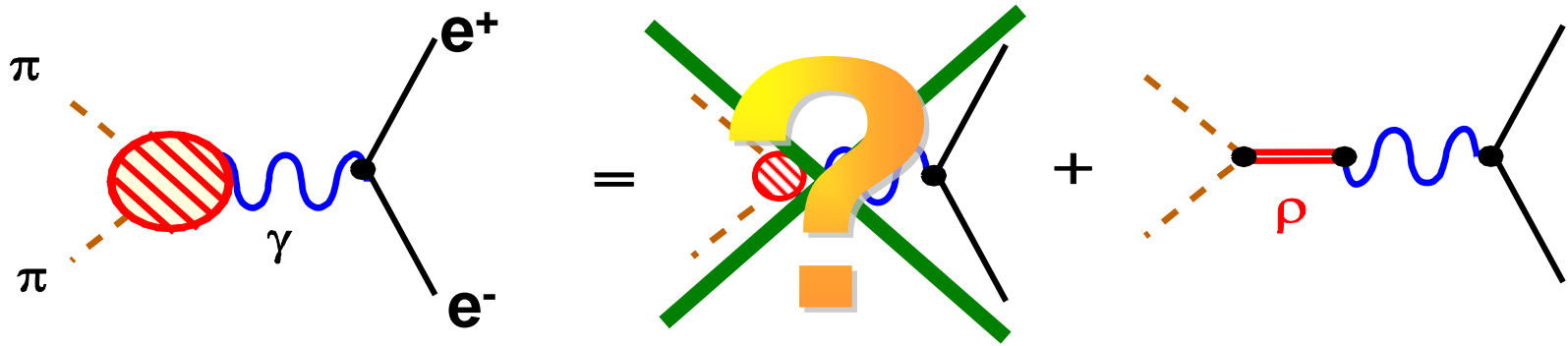
◎ ドロッピング ρ & “intrinsic” broadening (QCD sum rule)

J.Ruppert and T.Renk, EPJ C49, 219 (2007)

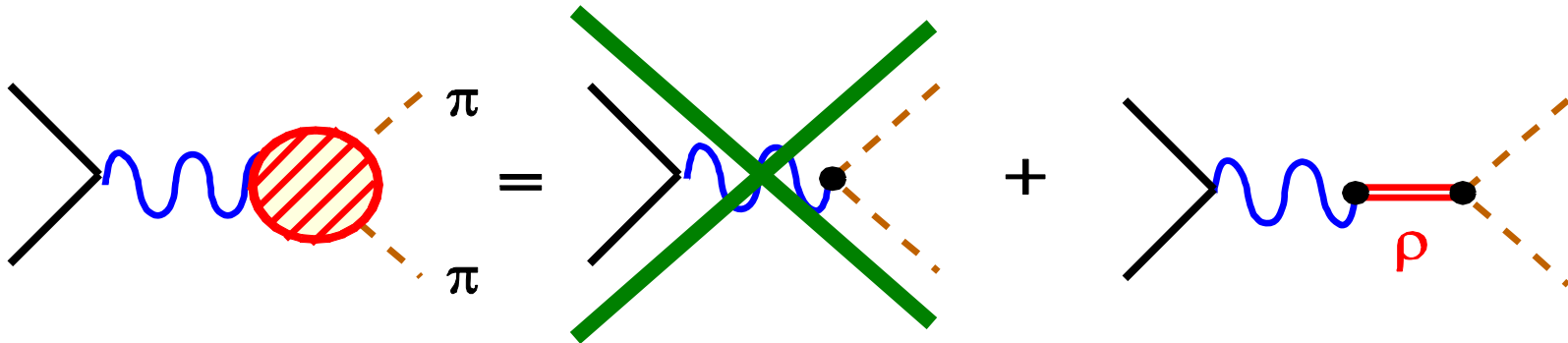


注: T 依存性は無視されている。バリオン数密度依存性のみ考慮

◎ これらの解析では「ベクターメソン・ドミナンス」(VD)が
仮定されている



注：真空中の ($e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$) ではVDはよく成り立っている

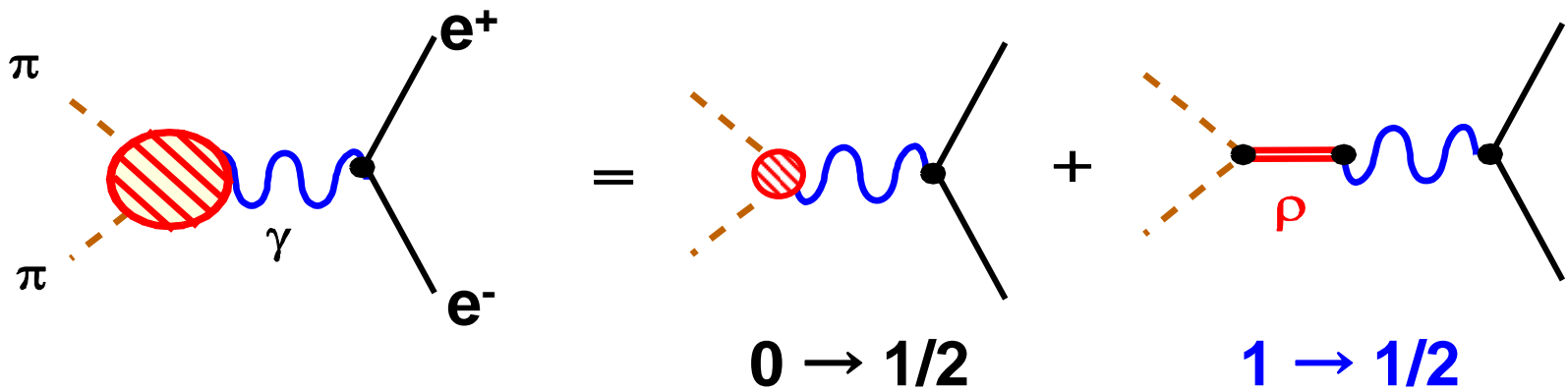


しかし、有限温度・有限密度でVDが正しい理由はない。
真空中でさえ、なぜVDがいいのかの理由はわかっていない。

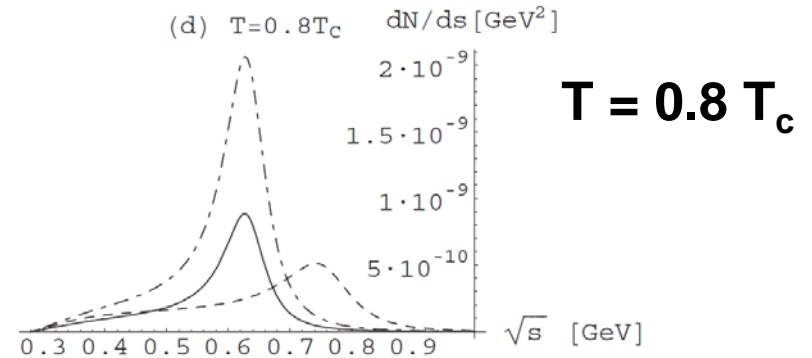
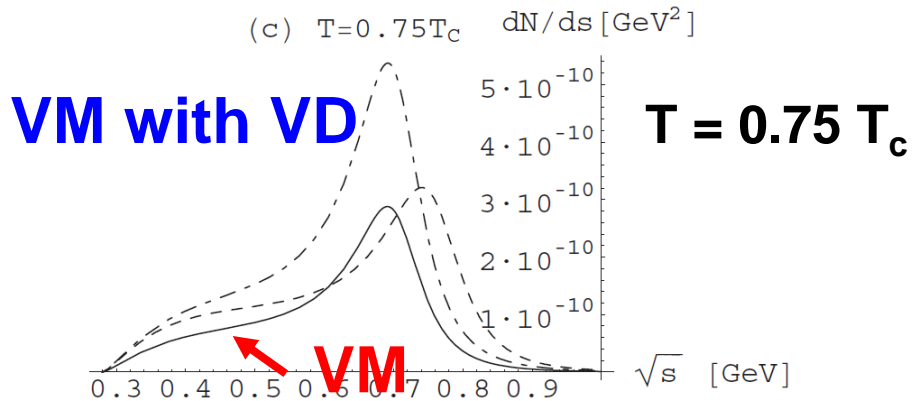
◎ ドロッピング ρ in the Vector Manifestation (VM)

MH and C.Sasaki, PLB537, 280 (2002); NPA736, 300 (2004); PRD74, 114006 (2006)

$$\frac{m_\rho^*}{m_\rho} \sim \frac{\Gamma_\rho^*}{\Gamma_\rho} \sim \frac{g_{\rho\pi\pi}^*}{g_{\rho\pi\pi}} \sim \frac{\langle \bar{q}q \rangle^*}{\langle \bar{q}q \rangle} \xrightarrow{T \rightarrow T_c} 0$$



◎「ベクターメソン・ドミナンス」の破れの効果



$$\mathbf{VM} \sim \mathbf{VM\ with\ VD} / 1.8$$

$$\mathbf{VM} \sim \mathbf{VM\ with\ VD} / 2$$

◎「ベクターメソン・ドミナンス」の破れの効果は
→ T_c 近傍で大きなサプレッション

◎ ドロッピング ρ は $T > T_f \sim 0.7 T_c$ でのみ起こる

G.E.Brown, C.H.Lee and M.Rho, PRC74, 024906 (2006); NPA747, 530 (2005)

$$\frac{m_\rho^*}{m_\rho} = \begin{cases} 1 & \text{for } T < T_f \\ \left[1 - \frac{T^2 - T_f^2}{T_c^2 - T_f^2} \right]^\alpha & \text{for } T > T_f \end{cases}$$



(H.v.Hees and R.Rapp, hep-ph/0604269)

$$m_\rho^* = m_\rho (1 - C \rho_B / \rho_0) \left[1 - (T/T_c)^2 \right]^\alpha \quad C = 0.15$$



+ ベクターメソン・ドミナンスの破れによるサプレッション

**$T < T_f$ からの ρ 中間子がドミナントになっていれば、
SPSデータからはドロッピング ρ が排除できない可能性がある？**

G.E.Brown, MH, J.W.Holts, M.Rho, C.Sasaki, in preparation

☆ ドロップング ρ 以外のカイラル対称性回復のシグナル？

◎ ドロップング A_1 with ドロップング ρ in the VM

MH and C.Sasaki, PRD 73, 036001 (2006)

$A_1(1260)$ が ρ と共に軽くなる可能性

◎ ドロップング A_1 without ドロップング ρ

$A_1(1260)$ は軽くなるが ρ はそのまま

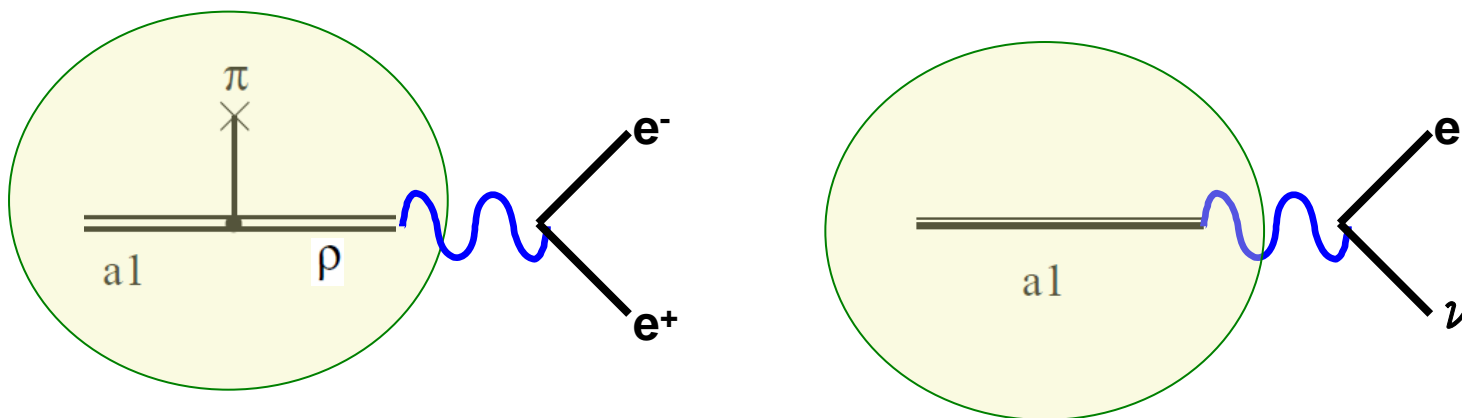
Dilepton の解析：

MH, C.Sasaki and W.Weise, in preparation

cf: M.Urban, M.Buballa and J.Wambach,

PRL88, 042002 (1002); NPA697, 38 (2002)

☆ 媒質中での V-A mixing



◎ 低温領域

M.Dey, V.L.Eletsy and B.L.Ioffe, PLB252, 620 (1990)

$$G_V^{\mu\nu}(T) = (1 - \epsilon)G_V^{\mu\nu}(T=0) + \epsilon G_A^{\mu\nu}(T=0)$$

$$G_A^{\mu\nu}(T) = (1 - \epsilon)G_A^{\mu\nu}(T=0) + \epsilon G_V^{\mu\nu}(T=0)$$

$$\epsilon = \frac{T^2}{6F_\pi^2}$$

- current correlation functions : $G_A - G_V \rightarrow 0$ for $T \rightarrow T_c$

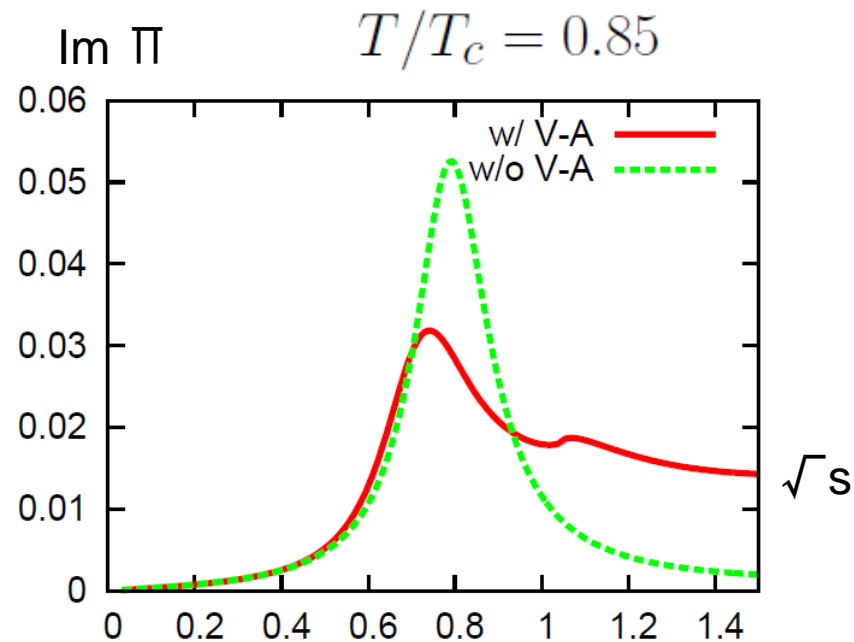
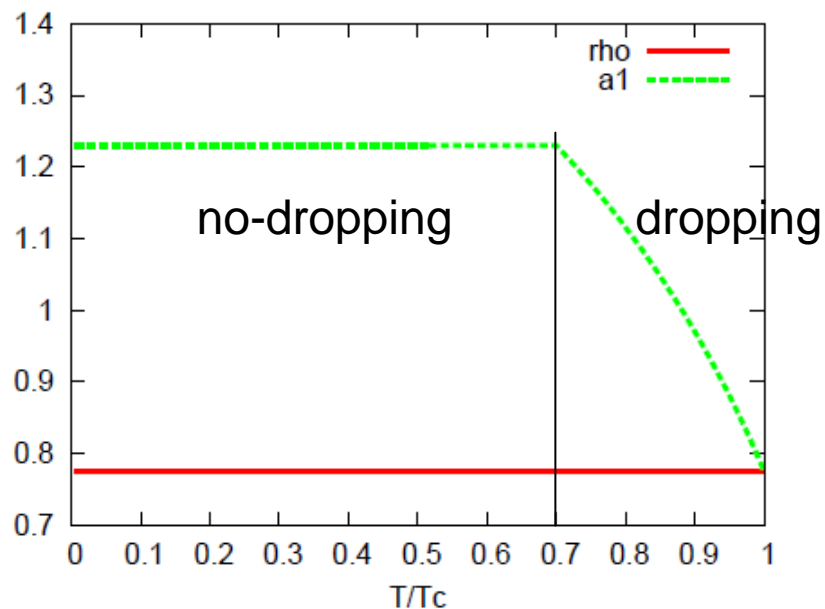
Q. maximal mixing $\epsilon = \frac{1}{2}$: $G_A = G_V = \frac{1}{2} \left(G_V^{(\text{vac})} + G_A^{(\text{vac})} \right)$???

cf: H.v.Hees and R.Rapp [hep-ph/0711.3444] の multi-pion の寄与の解析ではこれが使われている

☆ ハドロン模型を用いた解析

MH, C.Sasaki and W.Weise, in preparation

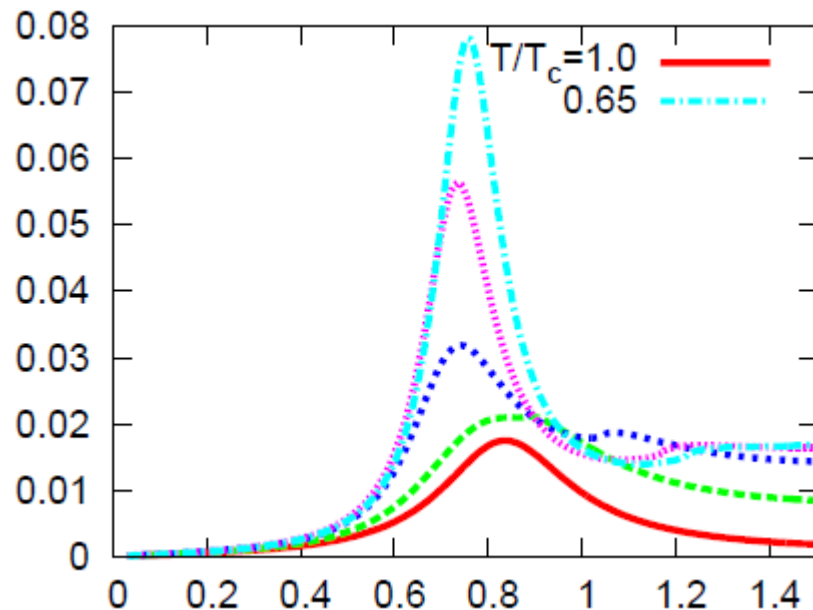
◎ ドロッピングA1 **without** ドロッピング ρ



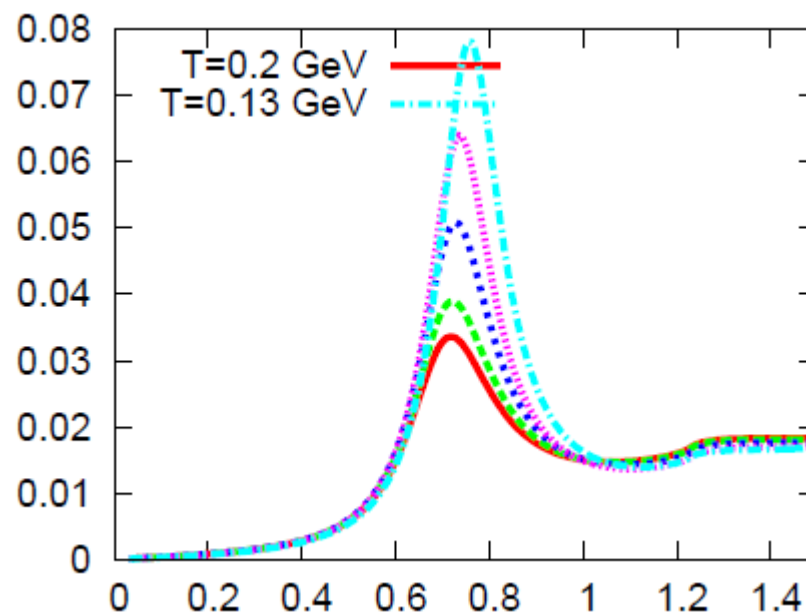
V-A mixing は、スペクトルをサプレスする

© Non-dropping A_1 との比較

dropping

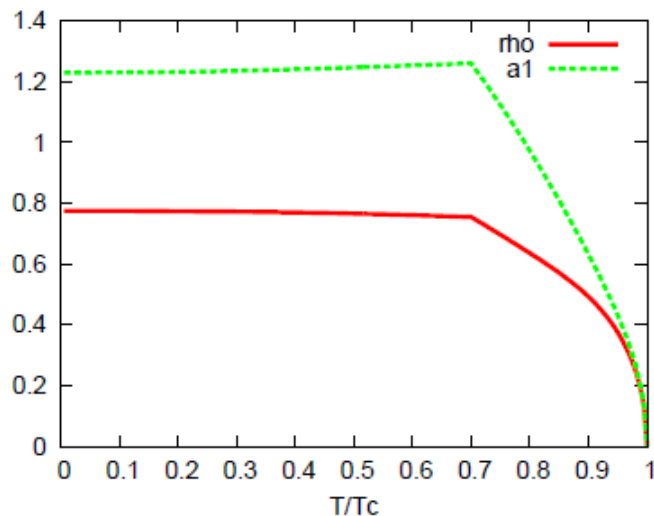


non-dropping

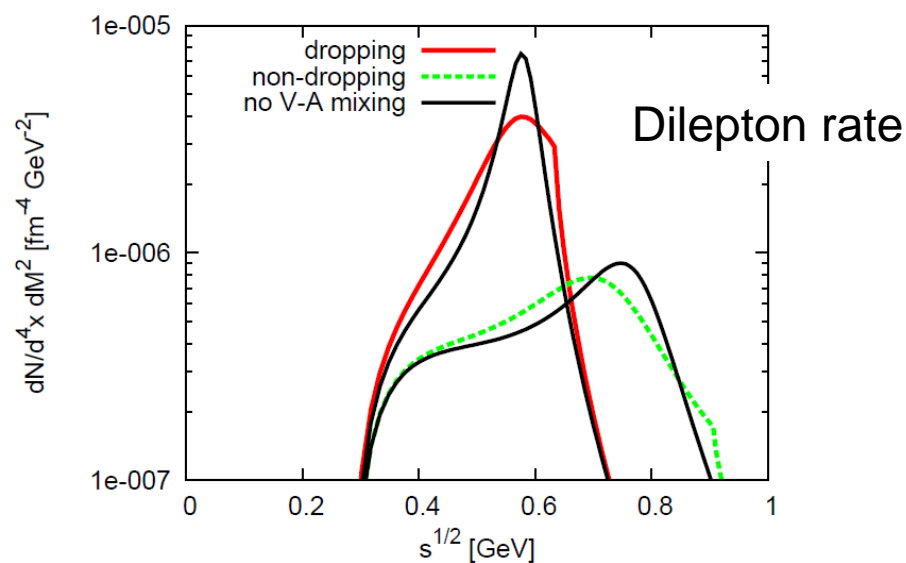
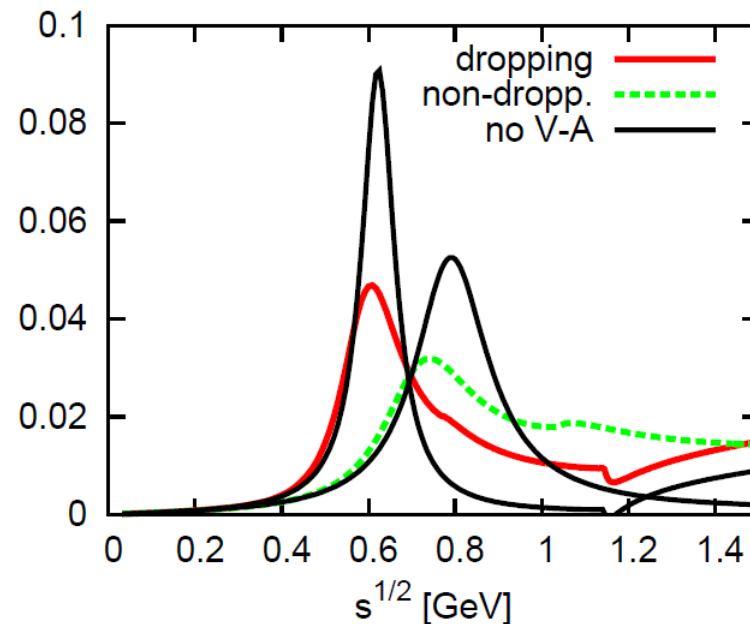


- spectral function broadened : a_1
- a_1 - ρ - π coupling strength changes with T since M_{a_1} decreases toward M_ρ
- V-A mixing totally vanishes at T_c

◎ ドロッピング A1 with ドロッピング ρ



$$T/T_c = 0.85$$

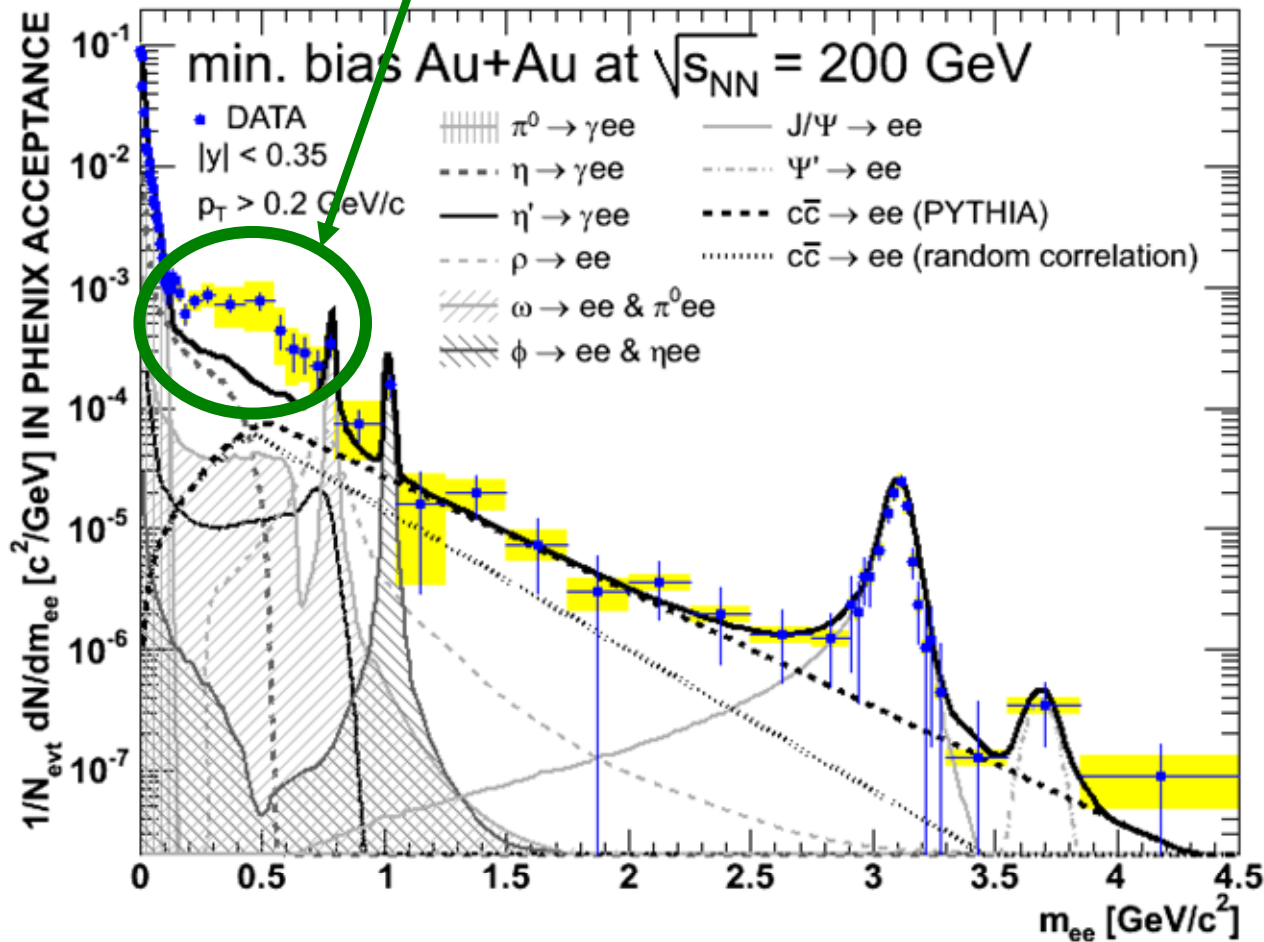


ドロッピング ρ の場合も
V-A mixing は、
スペクトルをサプレスする

◎ work in progress

☆ 最後に

これは???? ... **カイラル対称性回復のシグナル** ???
(e.g. ドロッピング ρ ???)



The End