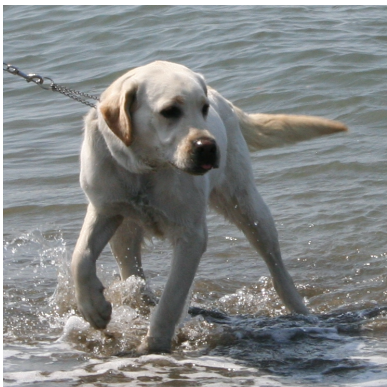


有効場の理論を用いた

T_{cc} の性質



Tomona Kinugawa



Tetsuo Hyodo

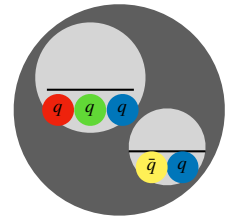
Department of Physics, Tokyo Metropolitan University
August 6th-9th YONUPA summer school 2022

背景

エキゾチックハドロン → ハドロン分子状態
= qqq or $q\bar{q}$ で到達できない量子数

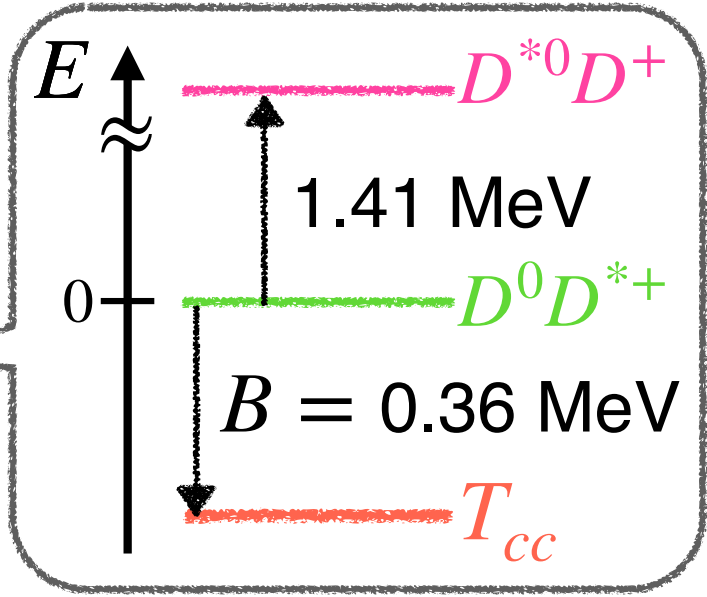
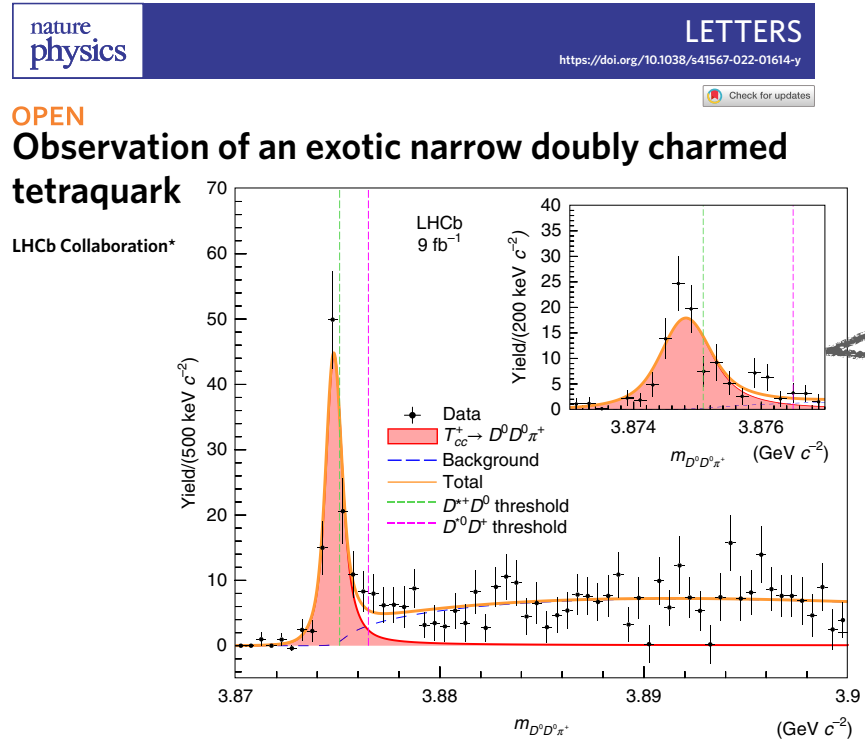


マルチクォーク



ハドロン分子

T_{cc} (2021年発見)



$T_{cc} \rightarrow D^0 D^0 \pi^+ (c\bar{u}c\bar{u}d\bar{d})$

→ 最低でも $cc\bar{u}\bar{d}$

LHCb Collaboration, Nat. Phys. (2022).

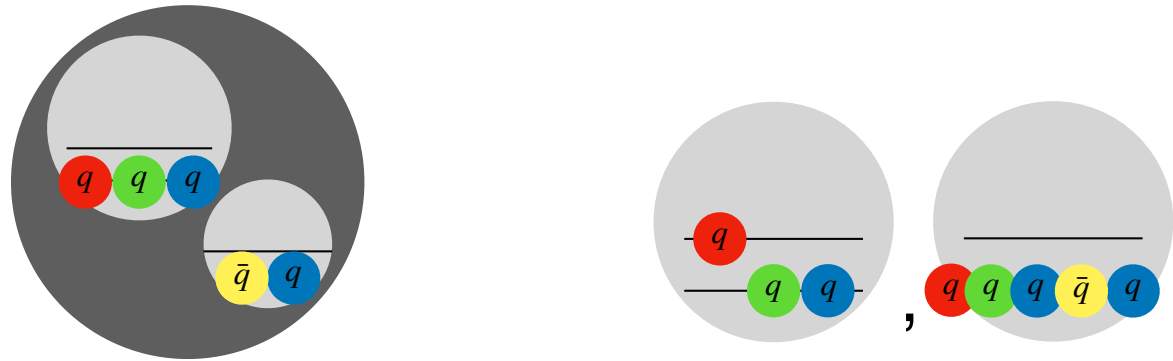
T_{cc} の内部構造 ←

有効場の理論 & 複合性

複合性

● 簡易的な定義

ハドロンの波動関数



$$|\Psi\rangle = \sqrt{X} |\text{hadronic molecule}\rangle + \sqrt{1-X} |\text{others}\rangle$$

複合性 (ハドロン分子状態の重み)

● 計算方法 (弱束縛関係式)

S. Weinberg, Phys. Rev. 137, B672 (1965);
Y. Kamiya and T. Hyodo, PTEP 2017, 023D02 (2017);
T. Kinugawa and T. Hyodo, Phys. Rev. C 106, 015205 (2022)

$$a_0 = R \left\{ \frac{2X}{1+X} + \mathcal{O}\left(\frac{R_{\text{typ}}}{R}\right) \right\}$$

a_0 : 散乱長

$R \equiv (2\mu B)^{-1/2}$, B : 束縛エネルギー

$R_{\text{typ}} = \max\{R_{\text{int}}, r_e, \dots\}$ (R_{int} : 相互作用長さ, r_e : 有効レンジ)

$R \gg R_{\text{typ}}$ のとき : 観測量 (a_0, B) \longrightarrow 複合性 (X)

※ 定義より $0 \leq X \leq 1$ \longrightarrow $X \geq 0.5$ なら複合的

● エキゾチックハドロン候補の複合性

弱束縛関係式による複合性 X の見積もり

bound state	compositeness X
d	$0.74 \leq X \leq 1$
$X(3872)$	$0.53 \leq X \leq 1$
$D_{s0}^*(2317)$	$0.81 \leq X \leq 1$
$D_{s1}(2460)$	$0.55 \leq X \leq 1$
$N\Omega$ dibaryon	$0.80 \leq X \leq 1$
$\Omega\Omega$ dibaryon	$0.79 \leq X \leq 1$
${}^3_{\Lambda}H$	$0.74 \leq X \leq 1$
${}^4\text{He}$ dimer	$0.93 \leq X \leq 1$

浅い束縛状態は模型非依存に
複合性を見積もれる

→ 調べた状態全てにおいて
複合的 ($X \geq 0.5$)

T_{cc} は観測量 (有効レンジ) の不定性が大きすぎて

弱束縛関係式から複合性を見積もれない...

→ 束縛エネルギーを再現する模型を用いて X を計算

有効場の理論 (EFT)

ある微視的な理論の低エネルギー極限を記述

e.g. Euler-Heisenberg理論 (QED)

カイラル摂動論 (QCD)

イメージ

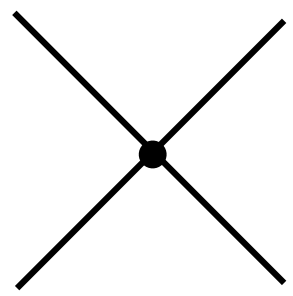
$\mathcal{H}_{\text{micro}}$



$\mathcal{H}_{\text{EFT}} : k \ll \Lambda$ の現象を記述



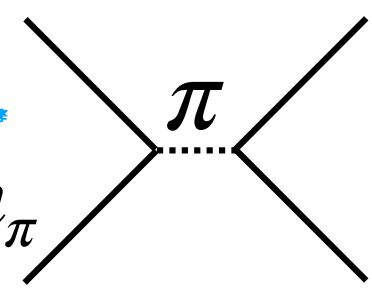
Λ (カットオフ)



点状相互作用 (EFT)



$k \ll \Lambda \sim m_\pi$



微視的構造が見える

E. Braaten, M. Kusunoki, and D. Zhang, Annals Phys. 323, 1770 (2008).

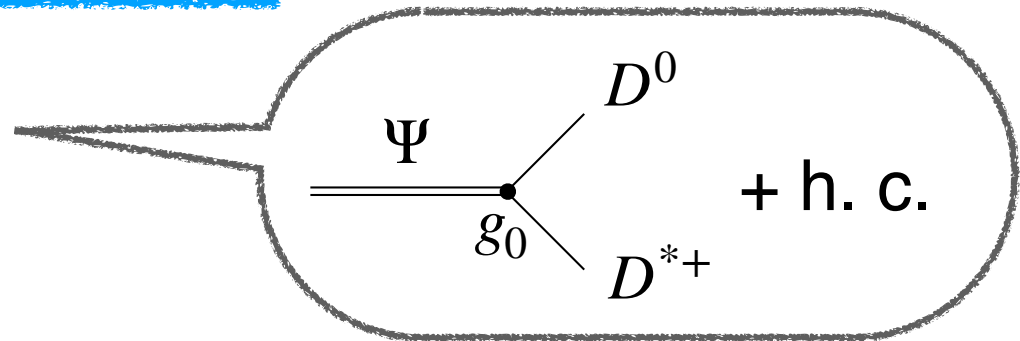
● 1チャンネル共鳴模型

$$\mathcal{H}_{\text{free}} = \frac{1}{2m_{D^0}} \nabla D^{0\dagger} \cdot \nabla D^0 + \frac{1}{2m_{D^{*+}}} \nabla D^{*+\dagger} \cdot \nabla D^{*+} + \frac{1}{2m_{\Psi}} \nabla \psi^\dagger \cdot \nabla \psi + \nu_0 \psi^\dagger \cdot \psi,$$

①

$$\mathcal{H}_{\text{int}} = g_0 (\psi^\dagger D^0 D^{*+} + D^{0\dagger} D^{*+\dagger} \psi).$$

②



① 1チャンネル散乱

② コンパクトな4クォーク状態 $\Psi (cc\bar{u}\bar{d})$ との結合

● 散乱振幅

$$V = \frac{g_0^2}{E - \nu_0}, \quad G = -\frac{\mu}{\pi^2} \left(\Lambda + \frac{\pi}{2} ik \right). \quad \Lambda : \text{カットオフ}$$

* $\Lambda \rightarrow \infty$ で消える項は無視

$$T = \frac{1}{V^{-1} - G} \rightarrow f(k) = \left[-\frac{2\pi}{\mu} \left(\frac{\frac{k^2}{2\mu} - \nu_0}{g_0^2} \right) - \frac{2\Lambda}{\pi} - ik \right]^{-1}.$$

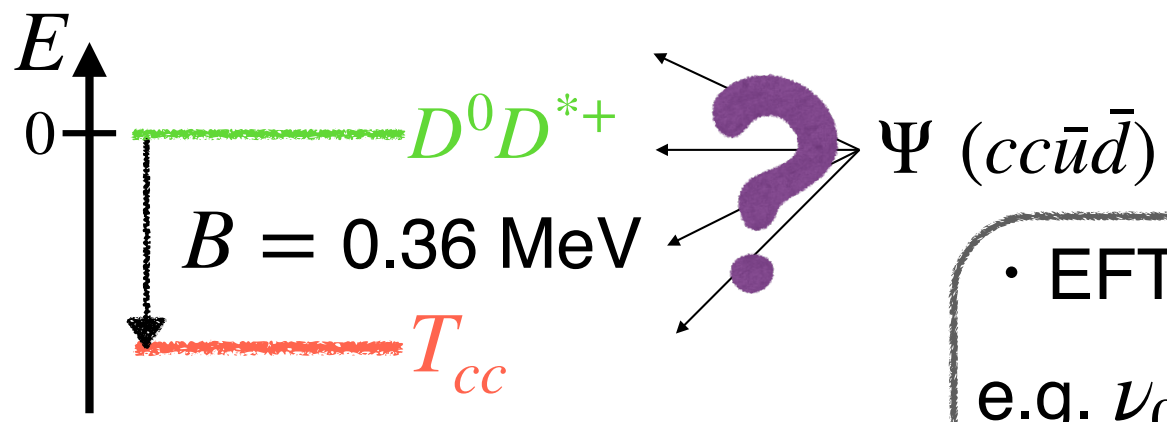
模型のパラメタ

- ・ カットオフ $\Lambda : 0.14 \text{ GeV} = m_\pi$ (π 交換)

- ・ 結合定数 $g_0 : g_0^2(\Lambda, \nu_0, B) = \left(\frac{\kappa^2}{2\mu} + \nu_0 \right) \frac{2\pi}{\mu(2\Lambda/\pi - \kappa)}, \kappa = \sqrt{2\mu B}.$

∴ 束縛状態の条件式 $f^{-1} = 0$

- ・ 散乱の閾値から測った4クォーク状態のエネルギー ν_0



LHCb Collaboration, Nat. Phys. (2022).

- ・ EFT以外の模型で決める
e.g. $\nu_0 = 7 \text{ MeV}$ (クォーク模型)
M. Karliner and J. L. Rosner, PRL 119, 202001 (2017)
- ・ 可能な範囲で変化させる
 $-B \leq \nu_0 \leq \Lambda^2/(2\mu_0)$

模型計算

• ν_0 の範囲: $-B \leq \nu_0 \leq \Lambda^2/(2\mu_0)$

$g_0^2 \geq 0$ を与える ν_0 : $-B \leq \nu_0$

有効場の理論における上限: $\nu_0 \leq \Lambda^2/(2\mu)$

• 複合性 X

$$X = \frac{G'(-B)}{G'(-B) - [V^{-1}(-B)]'}$$

$$T = V + VGT$$

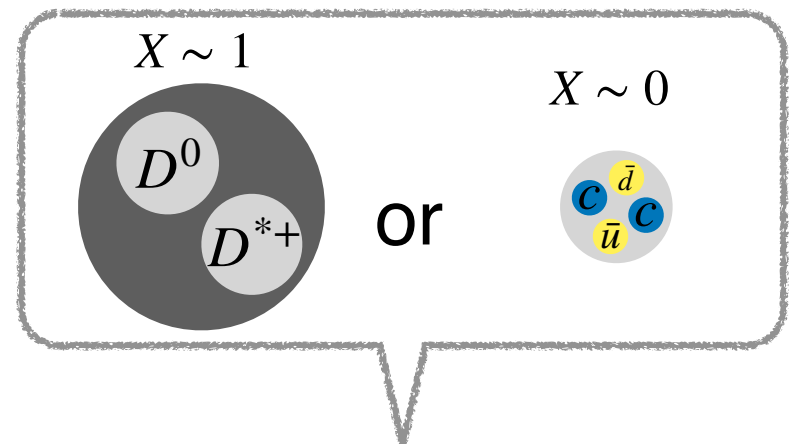
$$\alpha'(E) = d\alpha/dE$$

$$X = \left[1 + \frac{2\pi}{R\mu^2 g_0^2} \right]^{-1}, \quad R = 1/\sqrt{2\mu B}.$$

● 計算するもの

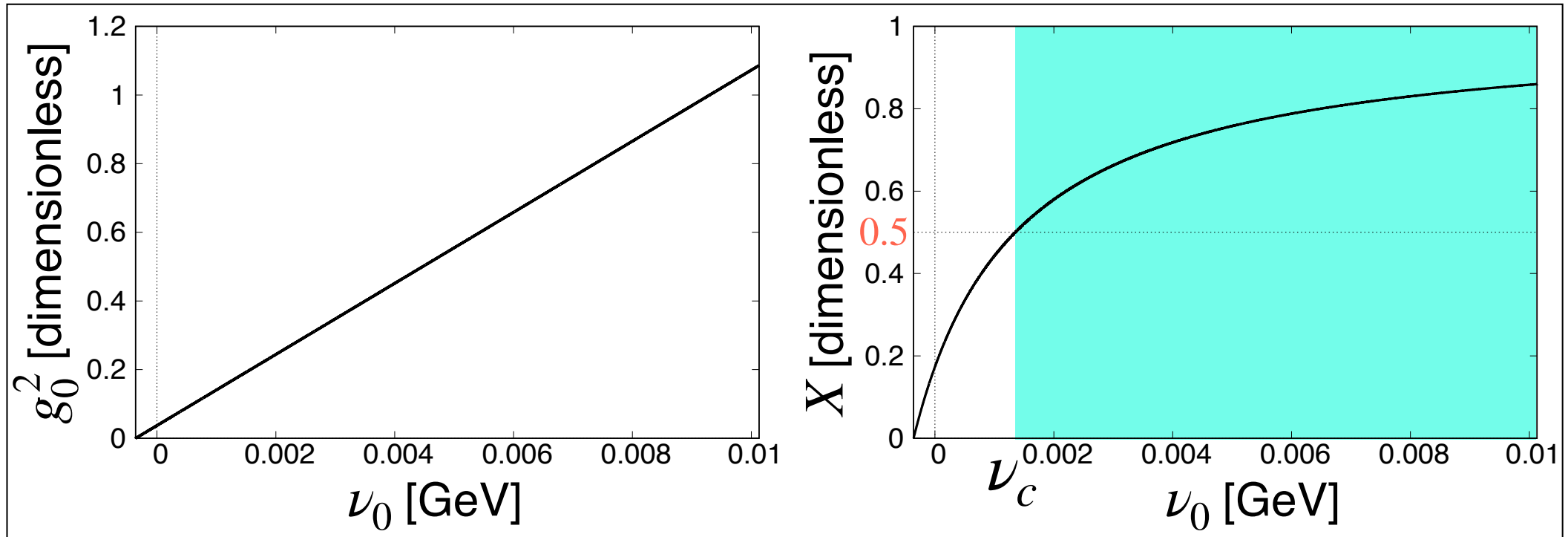
① ν_0 の関数としての g_0^2

② ν_0 の関数としての X \longrightarrow T_{cc} の内部構造?



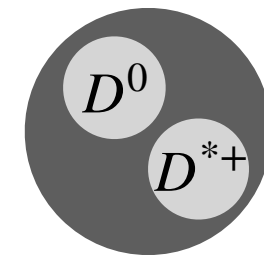
計算結果

$$-B \leq \nu_0 \leq \Lambda^2/(2\mu_0), \quad B = 360 \text{ keV}$$



ν_0 の関数としての g_0^2 (左) と X (右)

- ほとんどの ν_0 の範囲で複合的 ($X \geq 0.5$)



定量的に...

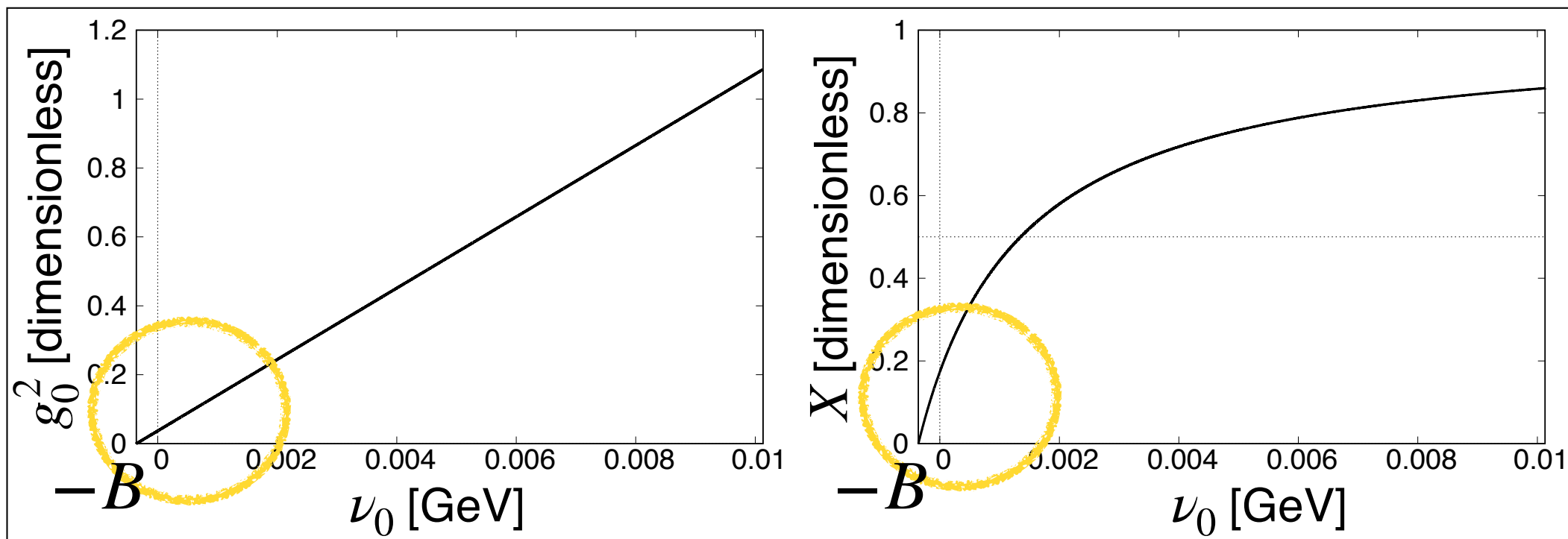
$$P_{\text{comp}} = \frac{\Lambda^2/(2\mu) - \nu_c}{\Lambda^2/(2\mu) + B} = 0.836$$



ν_0 の範囲の 84 % で
複合的

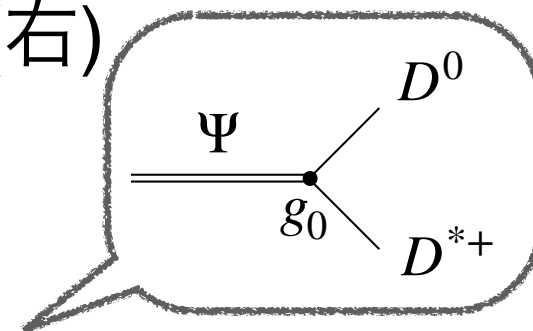
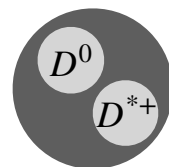
計算結果

$$-B \leq \nu_0 \leq \Lambda^2/(2\mu_0), \quad B = 360 \text{ keV}$$



ν_0 の関数としての g_0^2 (左) と X (右)

$\nu_0 \sim -B$ のとき

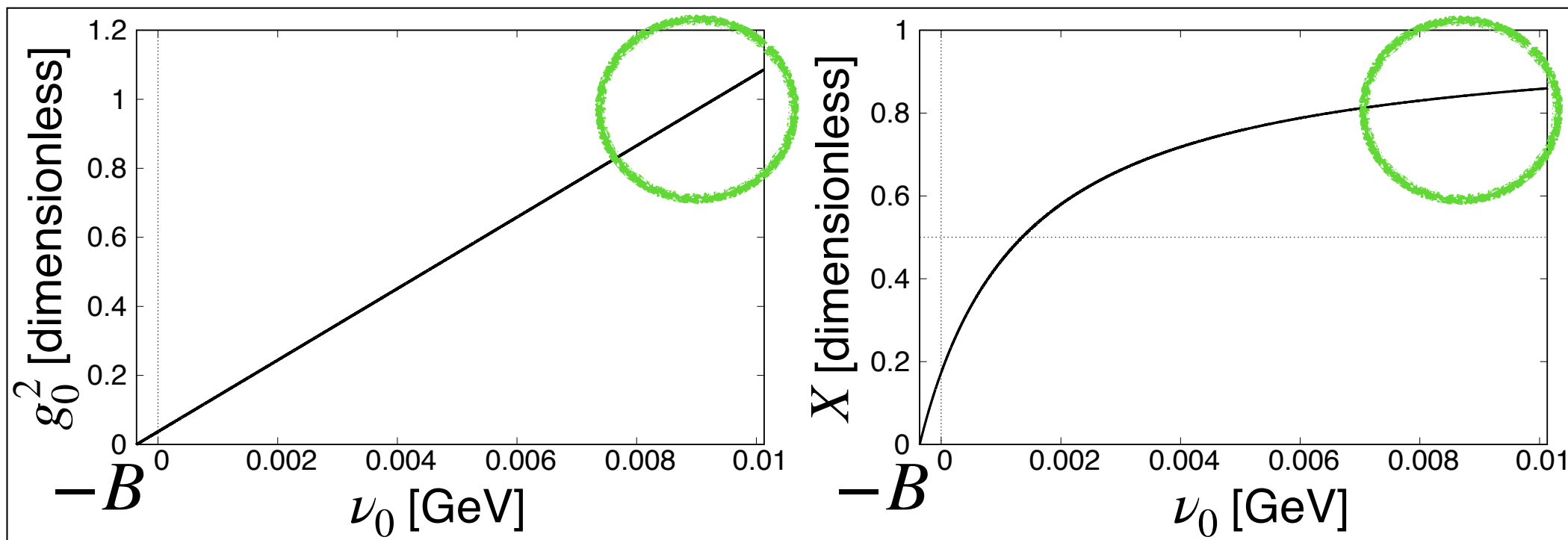


g_0^2 が小さい \longleftrightarrow $cc\bar{u}d$ と散乱状態との結合が小さい

\longleftrightarrow X が小さい

計算結果

$$-B \leq \nu_0 \leq \Lambda^2/(2\mu_0), \quad B = 360 \text{ keV}$$



ν_0 の関数としての g_0^2 (左) と X (右)

$\nu_0 \gg -B$ のとき

g_0^2 が大きい \longleftrightarrow X も大きい ($\nu_0 \sim B$ と逆)

! $cc\bar{u}\bar{d}$ との結合のみで作られた束縛状態なのに $X > 0.5$

\longleftarrow 低エネルギー—普遍性 (B が小)

まとめ

- 有効場の理論 → 複合性 X の計算 → T_{cc} の内部構造？

- コンパクトな4クォーク状態 ($cc\bar{u}\bar{d}$) との結合を持つ模型

- $cc\bar{u}\bar{d}$ のエネルギーを変えながら複合性 X の計算

→ ほとんど (84 %) の ν_0 の範囲で複合的

$cc\bar{u}\bar{d}$ との結合のみで作られた束縛状態なのに複合的

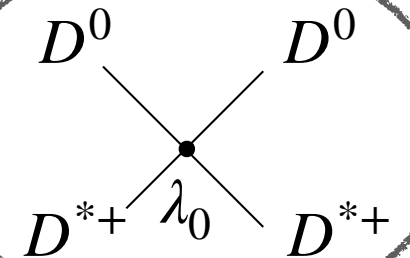
∴ 低エネルギー普遍性

● 今後の見通し

- 2チャンネルへの拡張： $D^{*0}D^+$ チャンネルの追加

- さらなる相互作用：4点相互作用の追加

- p 波の場合に低エネルギー普遍性が現れないことの確認



有効場の理論を用いた

T_{cc} の性質



Tomona Kinugawa

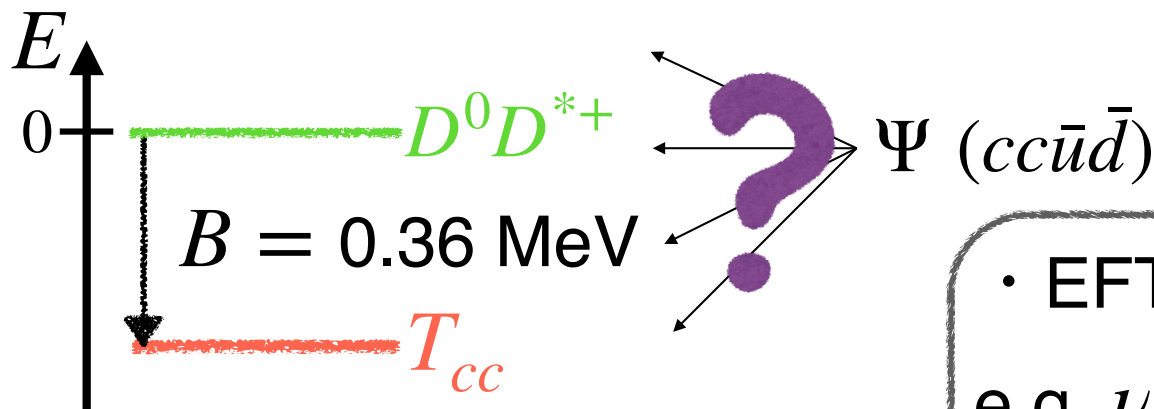


Tetsuo Hyodo

Department of Physics, Tokyo Metropolitan University
August 6th-9th YONUPA summer school 2022

クォークモデルでの ν_0

- 散乱の閾値から測った離散固有状態のエネルギー ν_0



- EFT以外の模型で決める

e.g. $\nu_0 = 7 \text{ MeV}$ (クォーク模型)

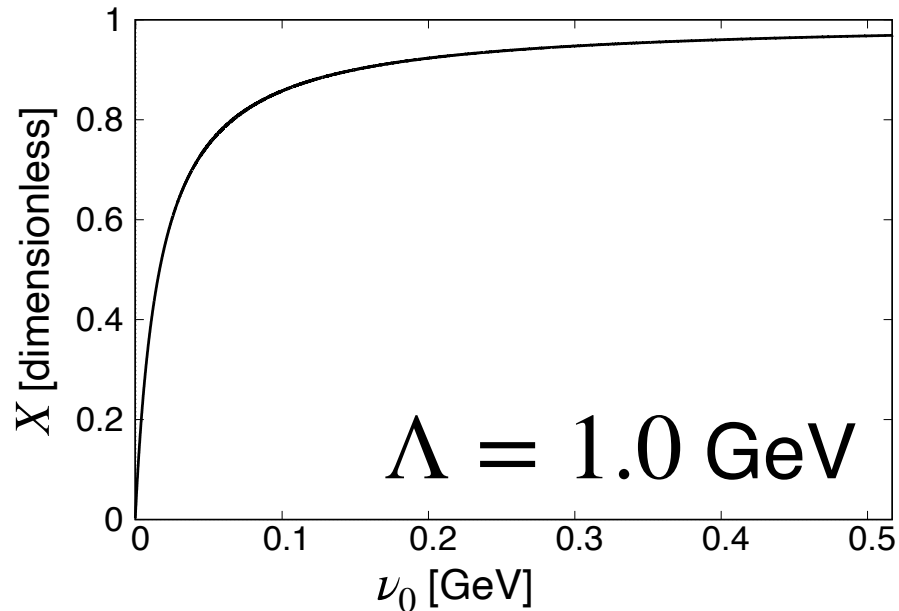
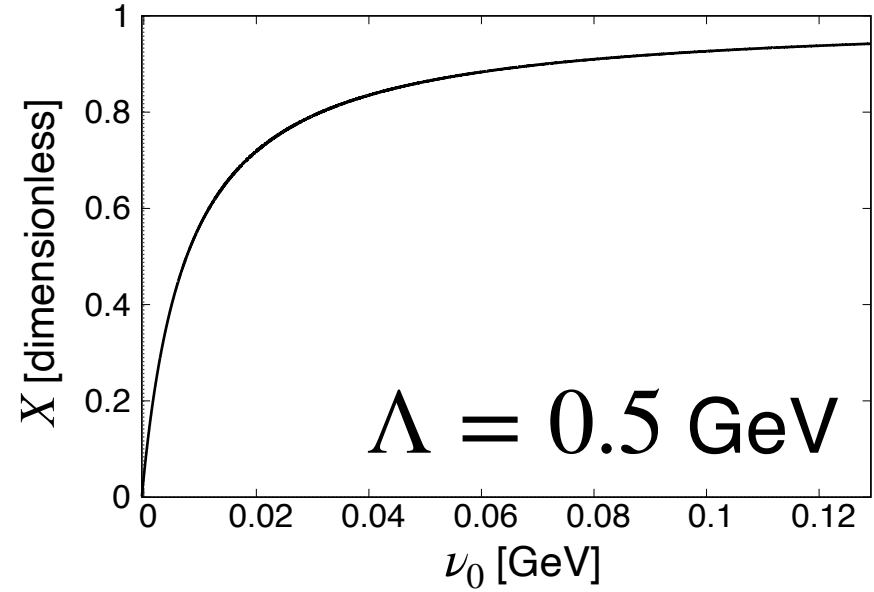
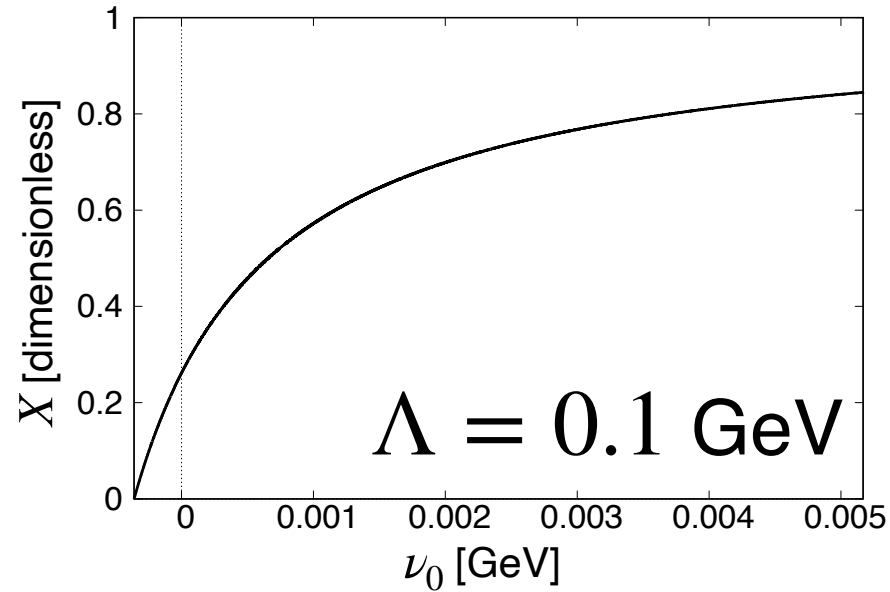
M. Karliner and J. L. Rosner, PRL 119, 202001 (2017)

- カットオフ $\Lambda = 0.14 \text{ GeV}$
- 束縛エネルギー $B = 0.36 \text{ GeV}$

$cc\bar{u}\bar{d}$ のエネルギー $\nu_0 = 0.007 \text{ GeV}$

→ $X = 0.81$ (複合的)

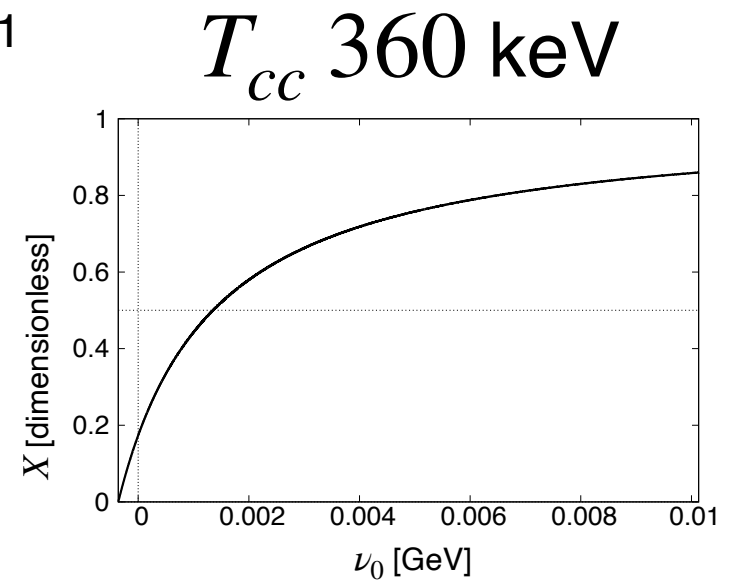
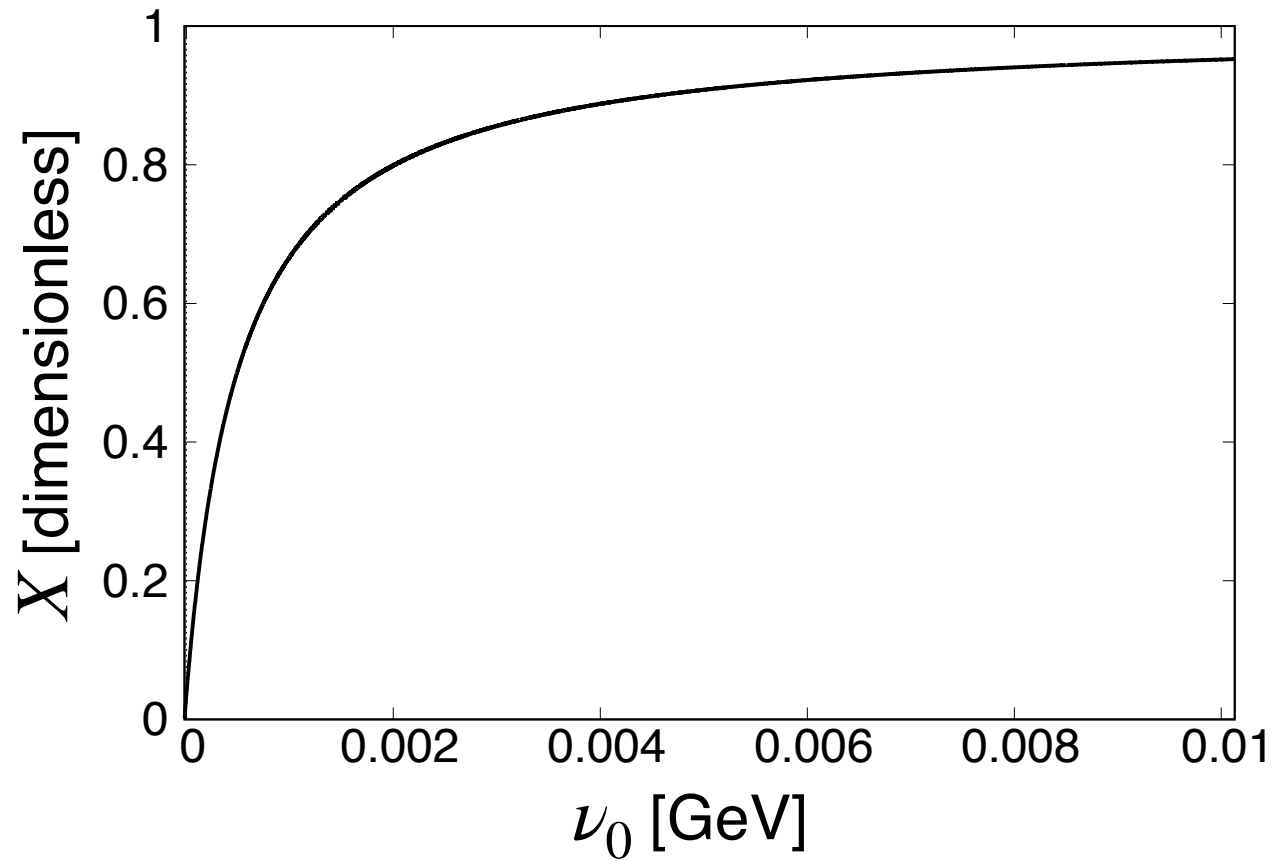
カットオフを変えた計算



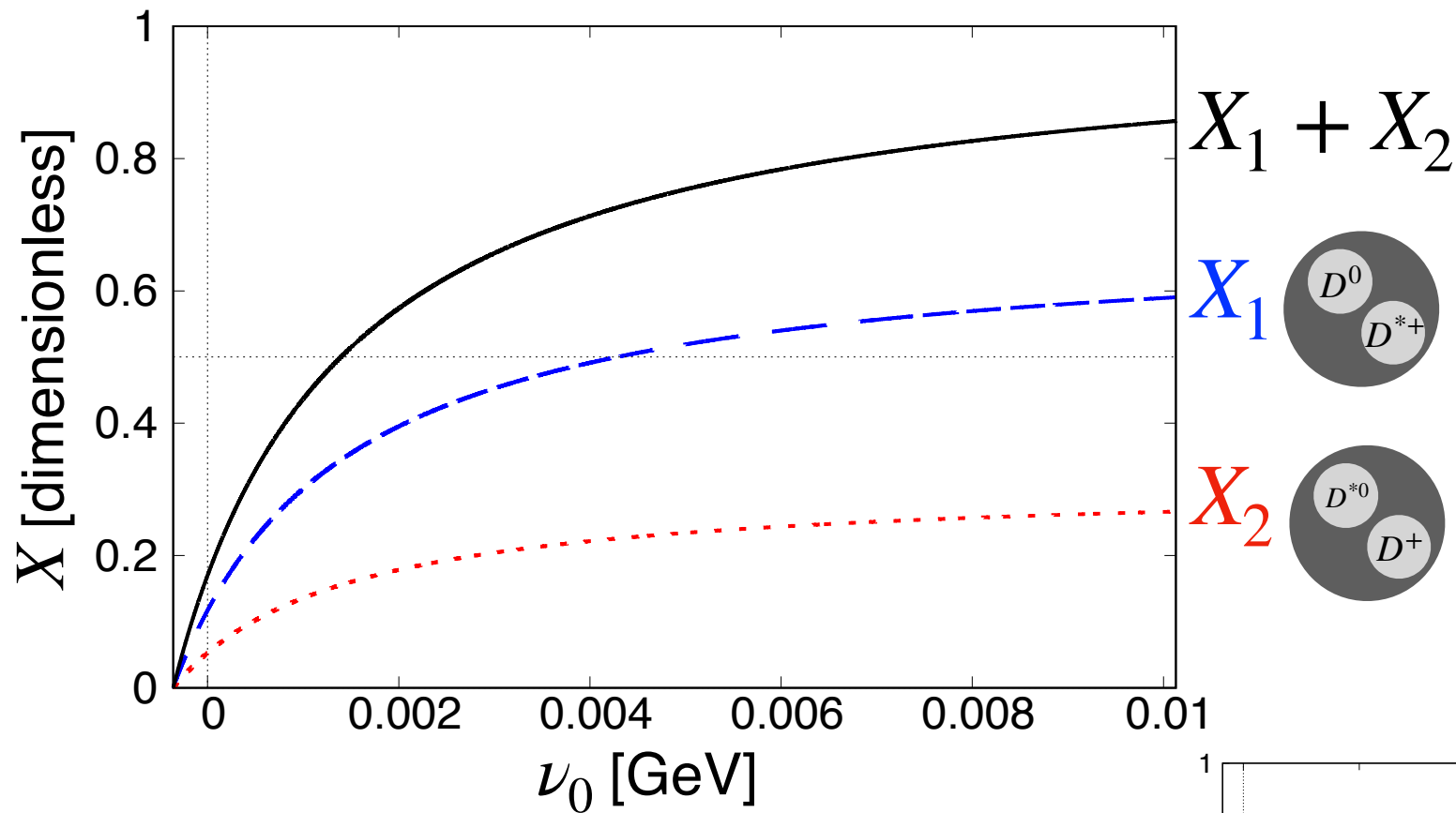
$$-B \leq \nu_0 \leq \Lambda^2 / (2\mu_0)$$

$$B = 360 \text{ keV}$$

$X(3872)$ $-B \leq \nu_0 \leq \Lambda^2/(2\mu_0)$, $B = 16 \text{ keV}$ 16



2チャンネル (やりかけ)



$$B = 360 \text{ keV}, \Lambda = 0.14 \text{ GeV}$$

