

レプトン対生成量 (理論)

北沢正清

目次

- ▶ インTRODクシヨN
 - ▶ レプトン対・仮想光子・光子／カクテル／エネルギー領域の分類
- ▶ 媒質効果
 - ▶ 仮想光子の計算式／ハドロンの媒質効果／カイラル対称性との関係／QCD和則／格子QCD

質問群から

- ▶ 18. レプトン対の不変質量測定による**核内ベクトル中間子の質量変化**観測について勉強しています。重イオン衝突の実験から強い相互作用の対称性についてどのような事がわかるか勉強したいです
- ▶ 24. low mass di-lepton の測定で、カクテルを差し引いた残りの **moment 付き積分値**について知りたい (1997, Hatsuda et al.?)
- ▶ 25. 高統計の di-lepton 測定で、高精度に測定できるとして、**カイラル対称性の回復現象**に迫れるのか？
- ▶ 48. 光子 (理論)、dilepton (理論) 媒質部分の取り扱いの弱結合と強結合の違い (生成率) **格子 QCD**による生成率はどこまで得られているか？**運動量依存性は？** 弱結合 (摂動的) の場合、ハドロン共鳴ガスの寄与はどこまで取り入れられるか？ (またはその寄与は評価できるか？)

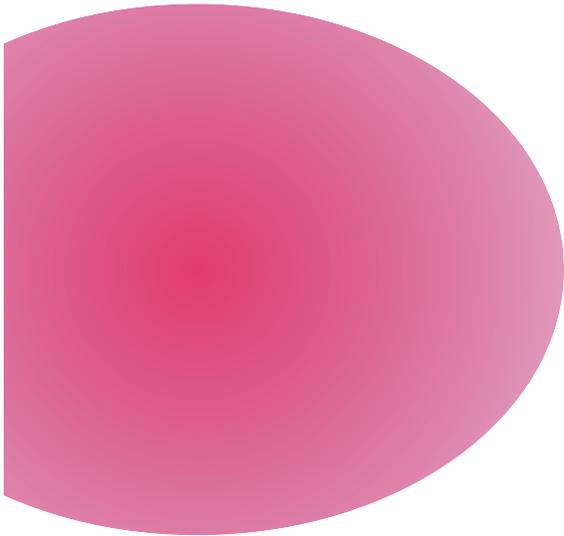
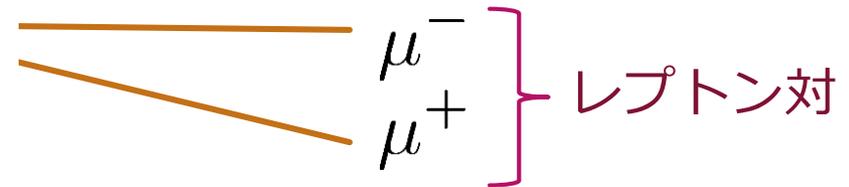
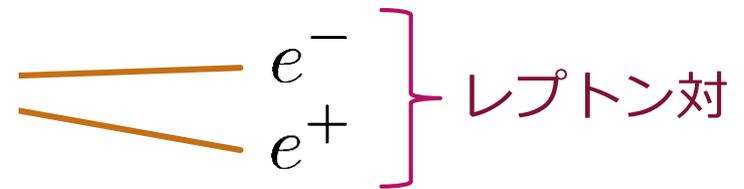
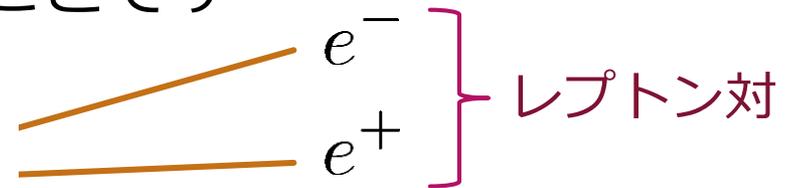
質問群から

- ▶ 82. **Rapp-Wambach**のレプトン対の生成の計算はどれだけ信用できているのか？
- ▶ 94. **カイラル対称性の回復現象**は現状、見えているのか(rho mesonの質量など)。
- ▶ 95. low mass di-lepton enhancementはどう理解されているのか。
- ▶ 128. 光子・レプトン対はQGPの直接的信号になるとよく言われますが、実験室での観測から**QGPの「どのような性質」を明らかにすることができるのか**を知りたいです

レプトン対生成量とは？

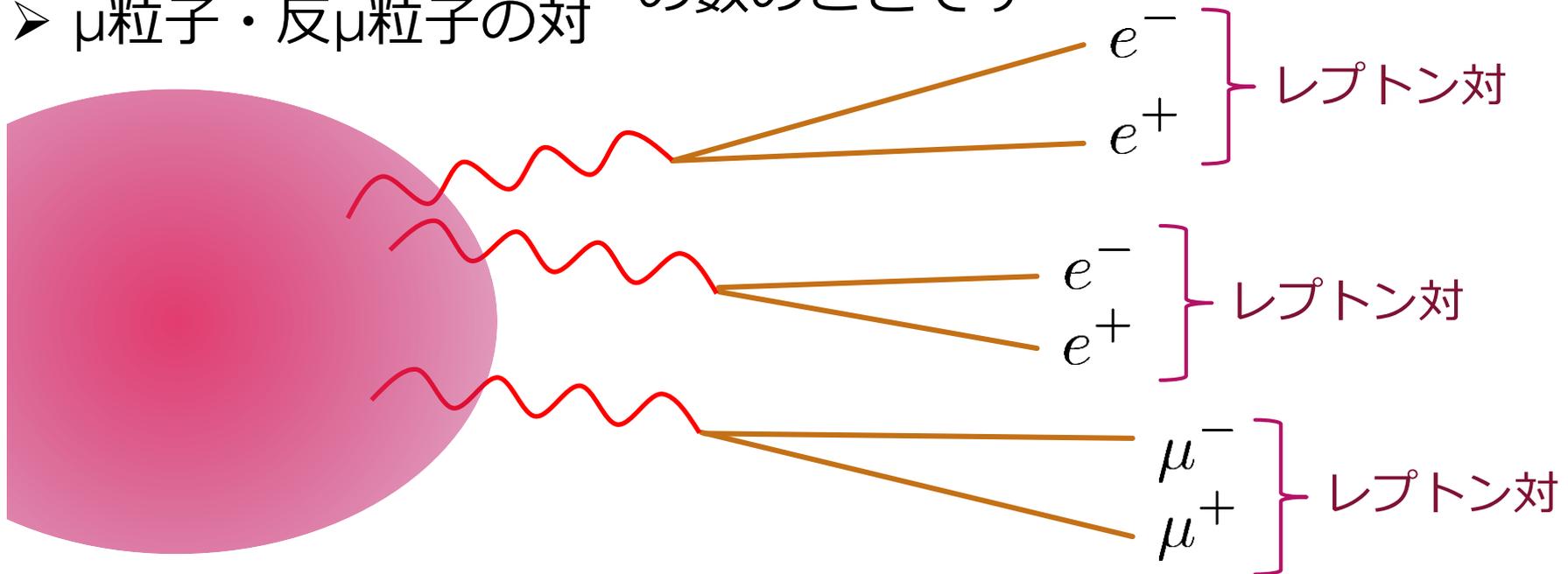
- 電子・陽電子の対
- μ 粒子・反 μ 粒子の対

の数のことです



レプトン対生成量とは？

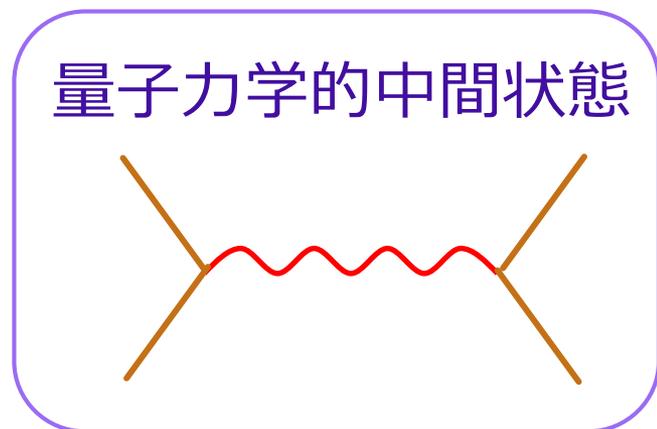
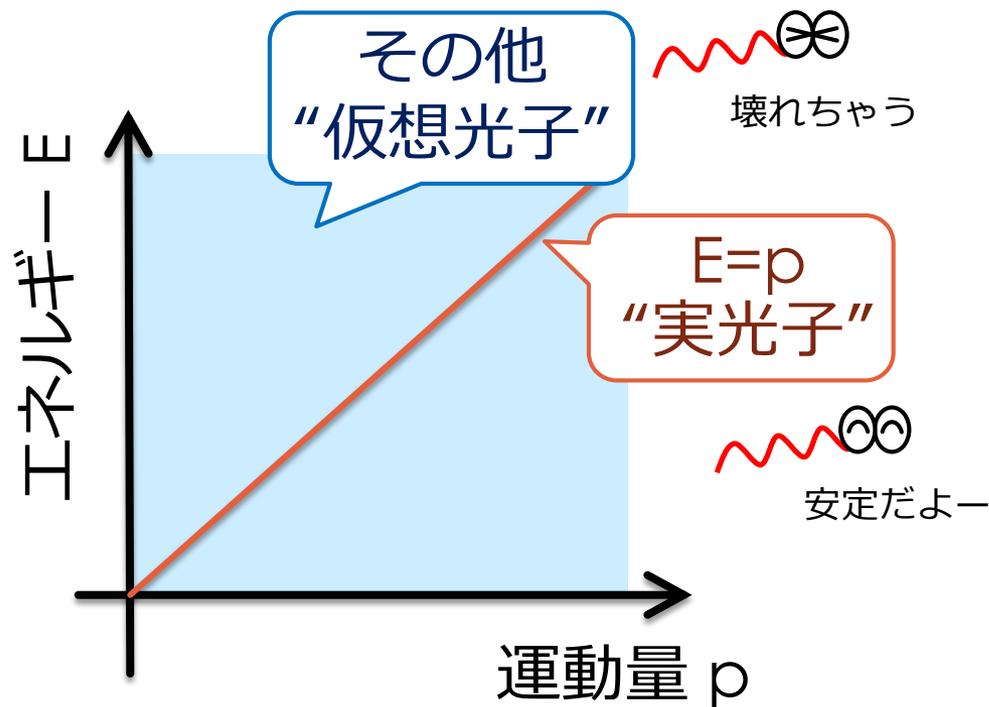
- 電子・陽電子の対
 - μ 粒子・反 μ 粒子の対
- の数のことです



- レプトン対は、**仮想光子の崩壊**により生成します
- レプトン対を数えると、**仮想光子の生成量**が分かります

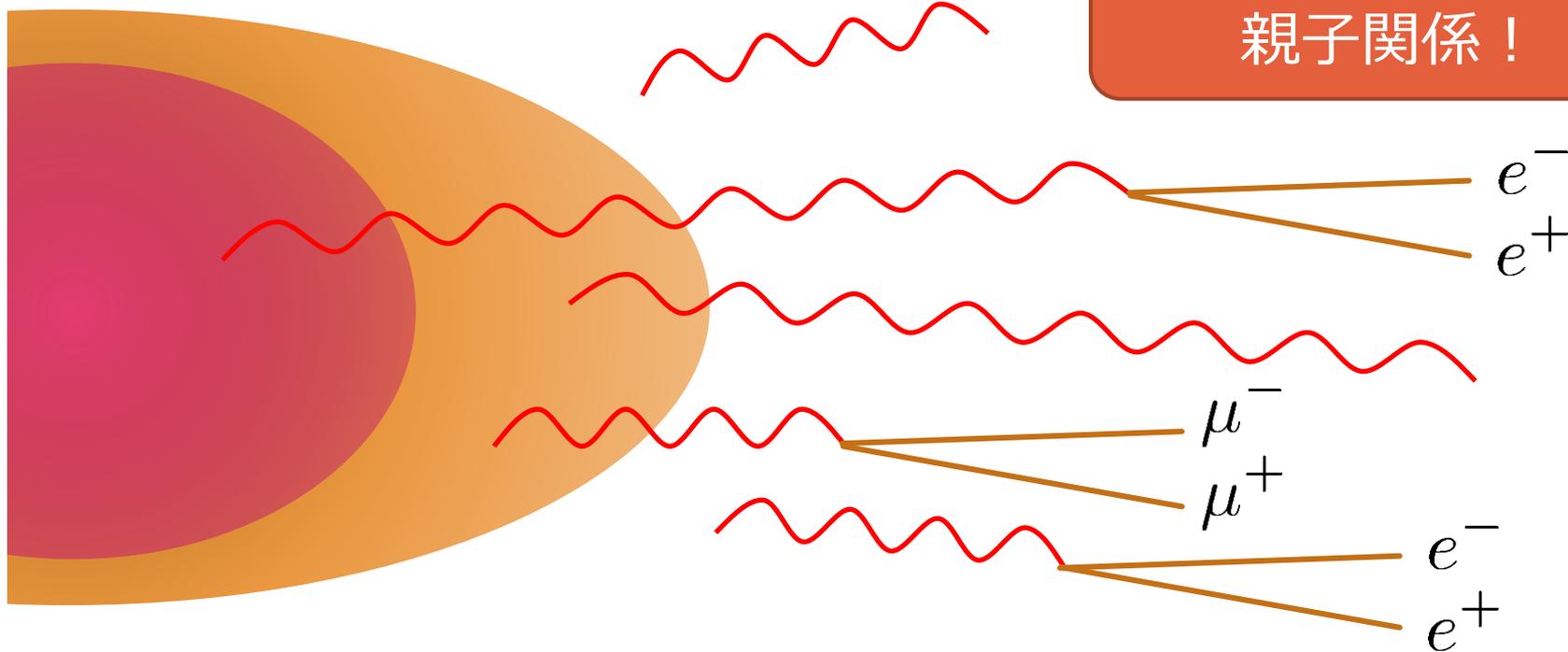
仮想光子(virtual photon)とは？

- 実光子： $E=pc$ の関係を満たした光子
- 仮想光子： $E=pc$ を満たさない光子



高温物質は、光子をたくさん作る

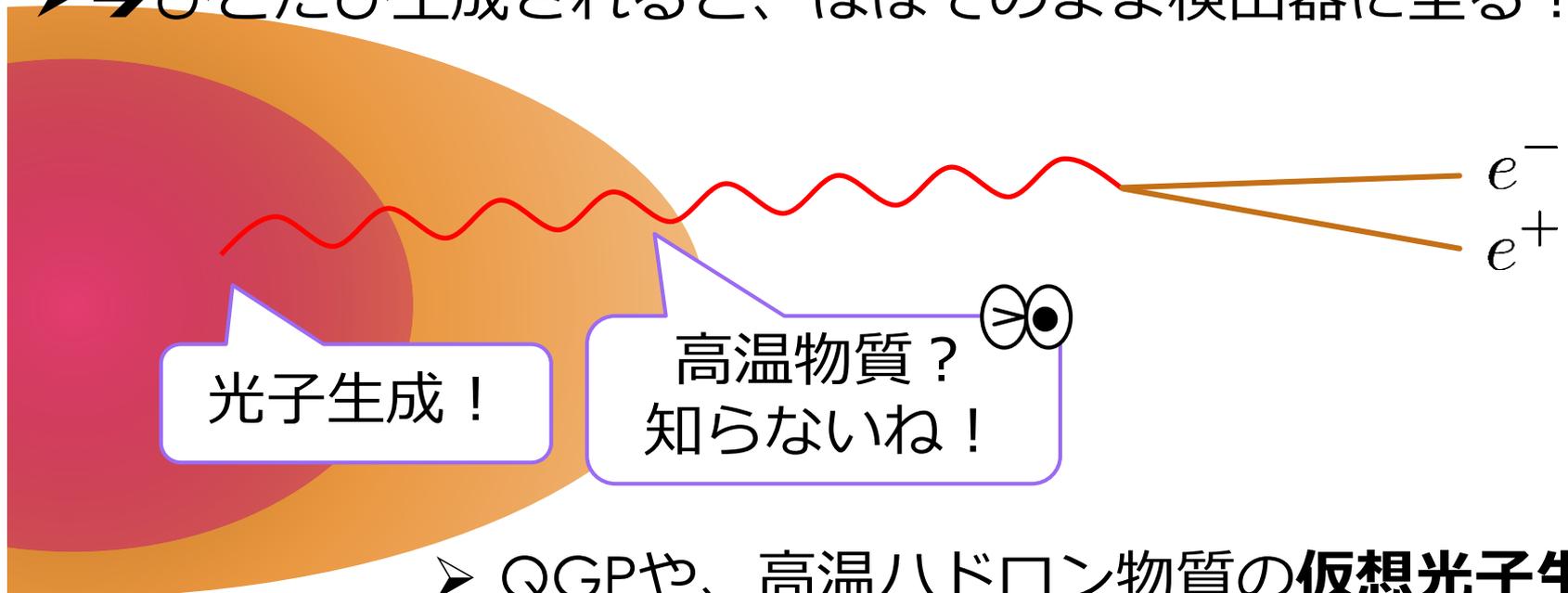
光子とレプトン対は
親子関係！



- 実光子は、そのまま検出器に至る
- 仮想光子は、レプトン対に崩壊する

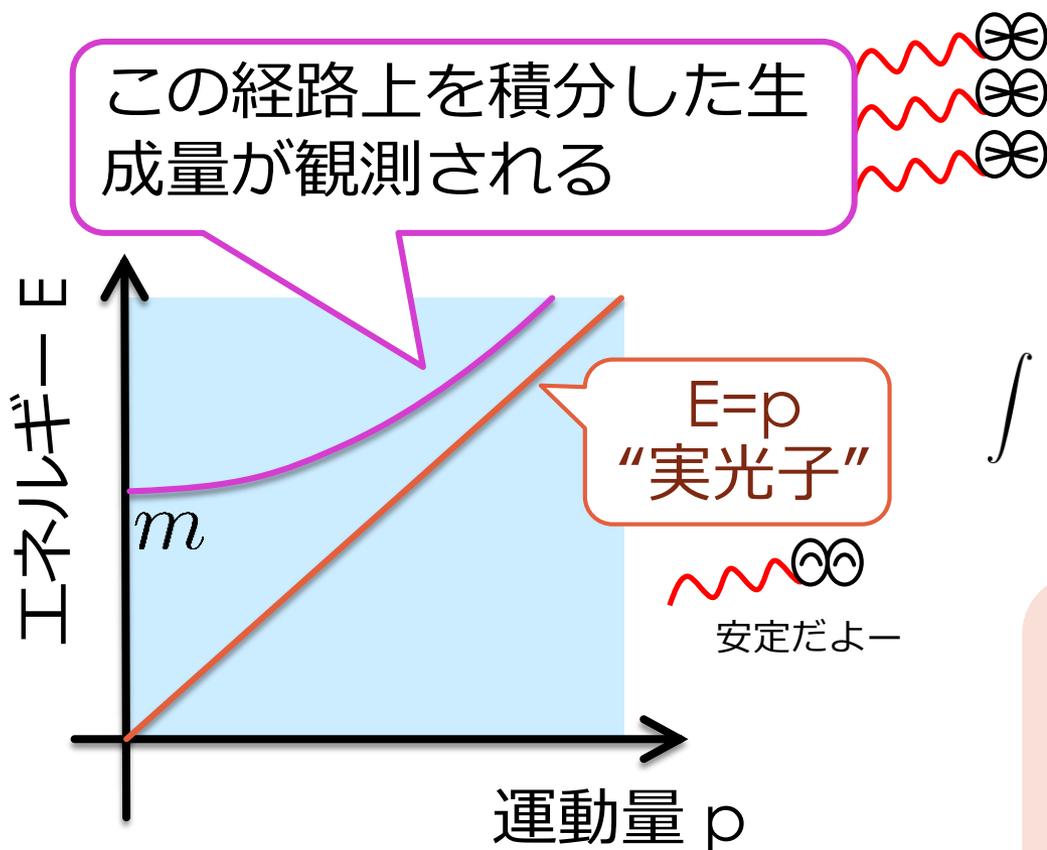
光子・レプトン対の最大の特徴： 高温物質と相互作用しない！

- 光子・レプトン対はカラー荷を持たない
- ➔ 強い相互作用をしない
- ➔ ひとたび生成されると、ほぼそのまま検出器に至る！



- QGPや、高温ハドロン物質の**仮想光子生成量の情報**が直接的に検出器に到達

測定できるのは、不変質量分布



$$\frac{d^4 R_{ee}}{dE d^3 \vec{p}}(E, \vec{p})$$

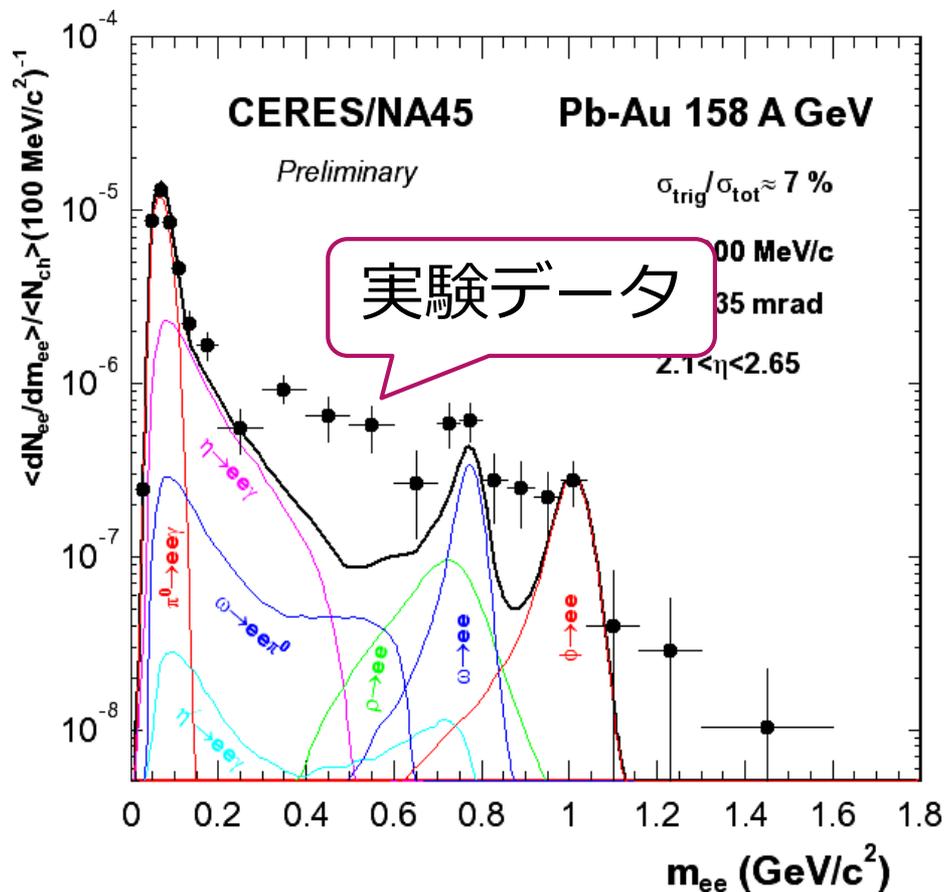


$$\int \frac{d^4 p}{(2\pi)^4} \frac{d^4 R_{ee}}{dE d^3 \vec{p}}(\omega, \vec{p}) \delta(\omega^2 - p^2 - m^2)$$

コメント：

- 積分計算面倒
- 格子上でも困難
- PHENIXで、 p_T ビン解析

光子生成量@CERES@SPS



QuarkMatter2005
CERES

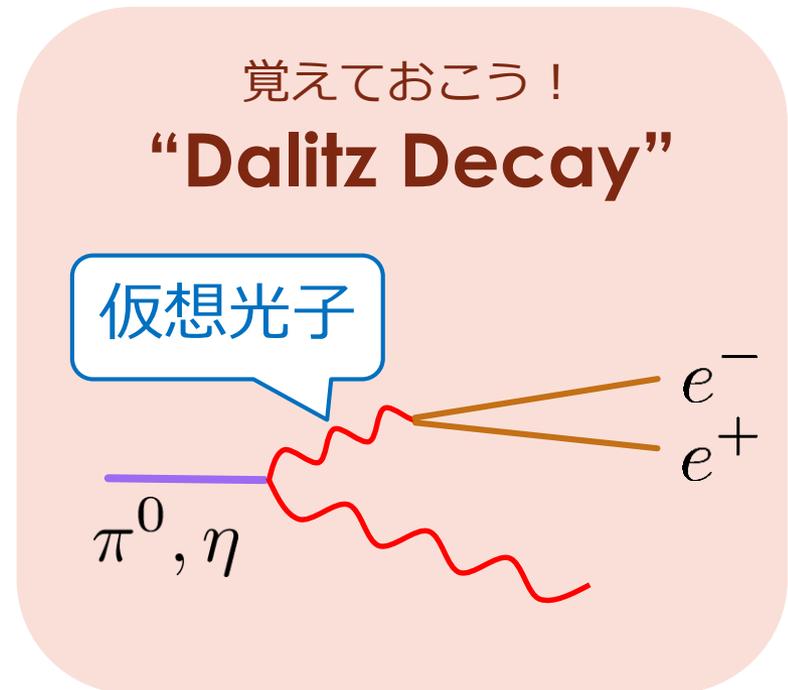
博士課程の北沢の感想：
絶望的だわ...

と、初見で思った。

メソン崩壊によるレプトン対生成

メソン崩壊によるレプトン対生成

崩壊	分岐比
$\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$	1.2%
$\omega \rightarrow e^+ e^- \pi^0$	0.07%
$\omega \rightarrow e^+ e^-$	0.07%
$\rho \rightarrow e^+ e^-$	0.005%
$\eta \rightarrow e^+ e^- \gamma$	0.72%
$\phi \rightarrow e^+ e^-$	0.03%

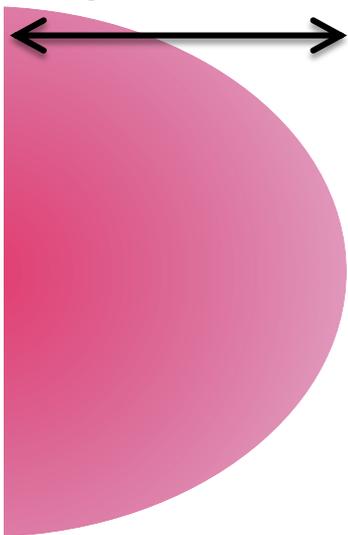


※レプトン対生成は稀現象

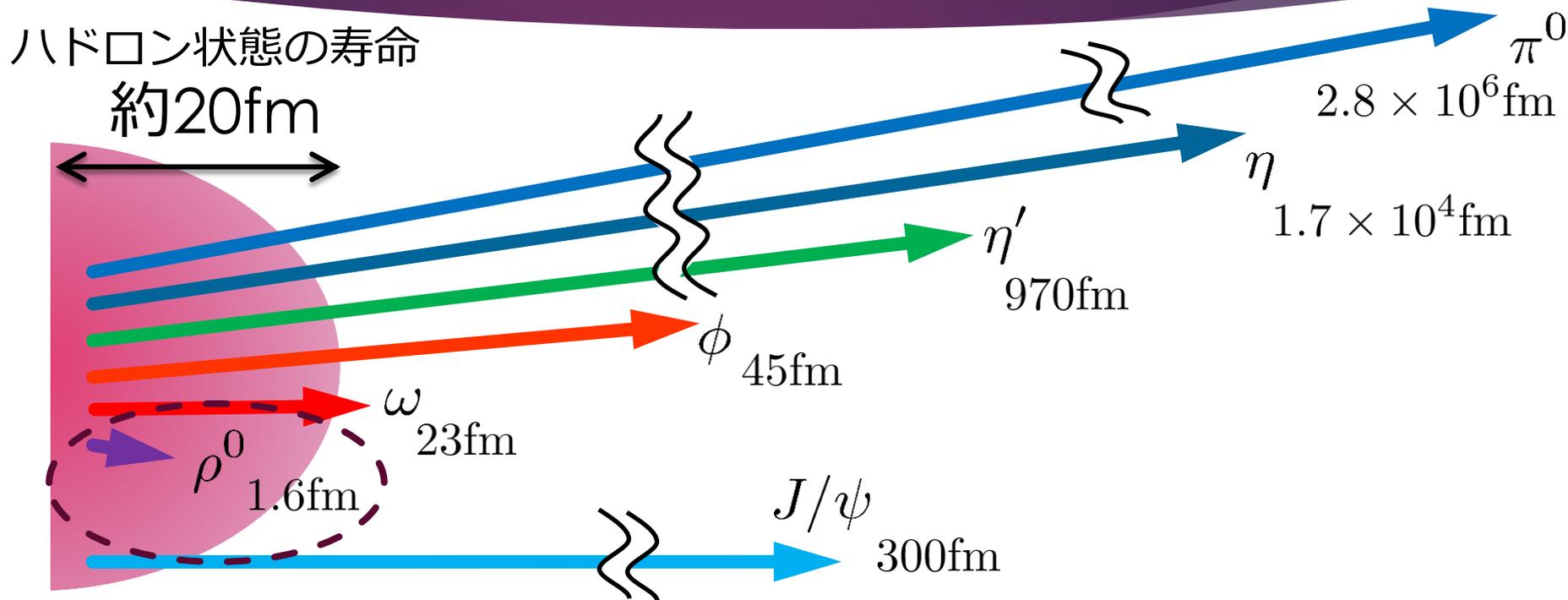
仮想光子の半分くらいは、
真空中のメソン崩壊で生成する

ハドロン状態の寿命

約20fm



仮想光子の半分くらいは、 真空中のメソン崩壊で生成する



- π , η , ϕ の寿命はハドロン状態の寿命と比べはるかに長い。
- これらの粒子崩壊への媒質効果は、基本的に無視できる。
- **ρ メソンのみが、例外！**

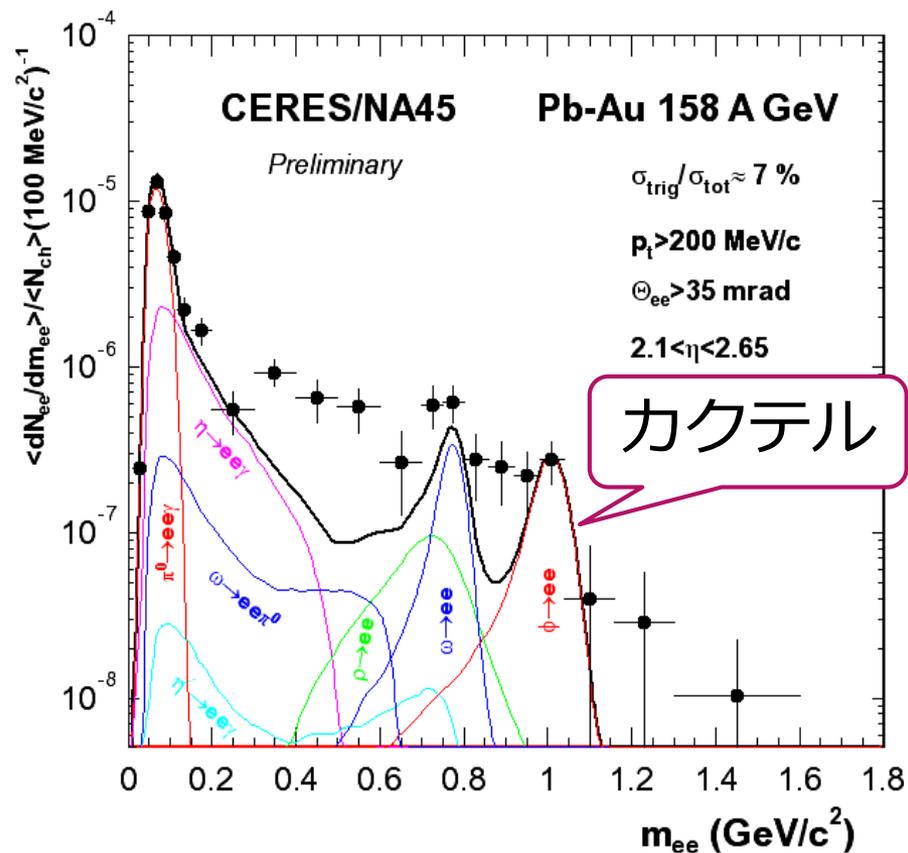
カクテル

カクテル

- 終状態の粒子収量
- 真空の崩壊比

から見積もられた、メソン崩壊由来のレプトン対の数

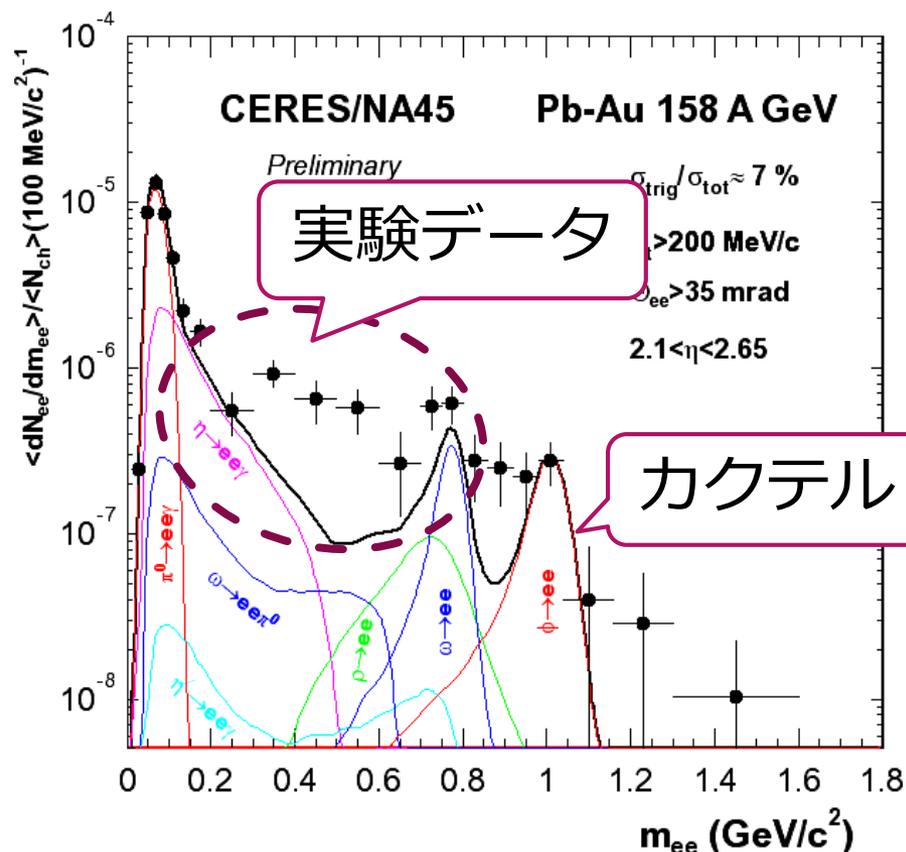
- ※ ρ メソンは、含む場合と含まない場合がある
- ※昔は、 pp の収量を定数倍



カクテル

実験結果とカクテルの間には、明瞭なずれがある
なんでだろう？

※pp衝突の結果は、カクテルとよく一致する。



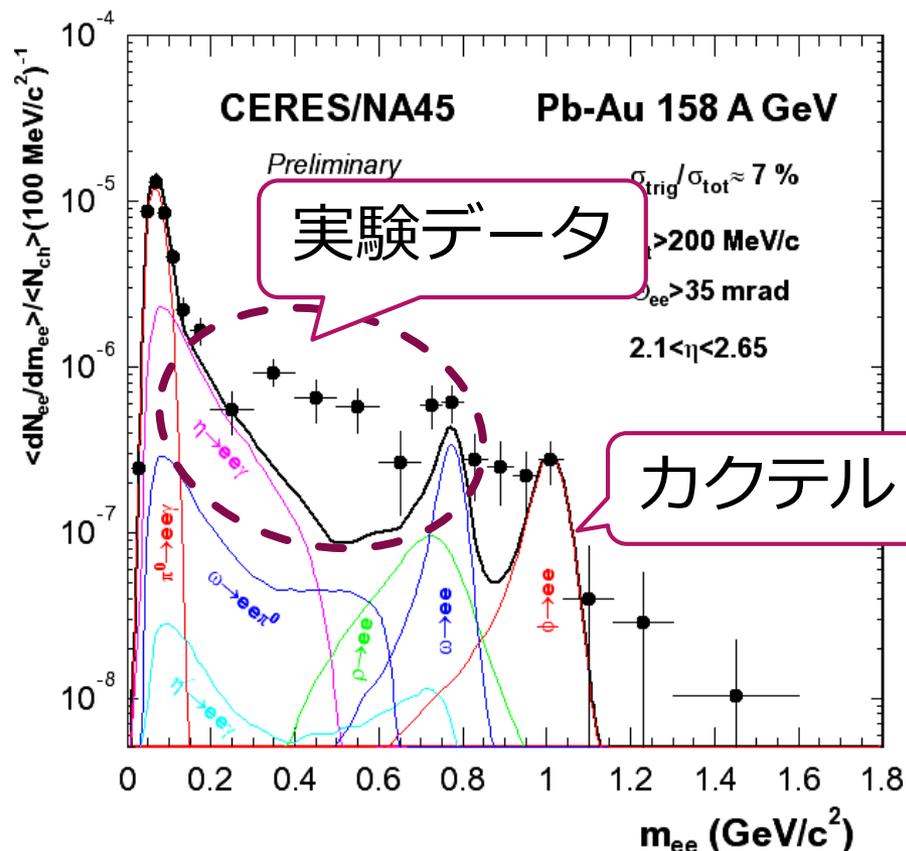
カクテル

実験結果とカクテルの間には、明瞭なずれがある
なんでだろう？

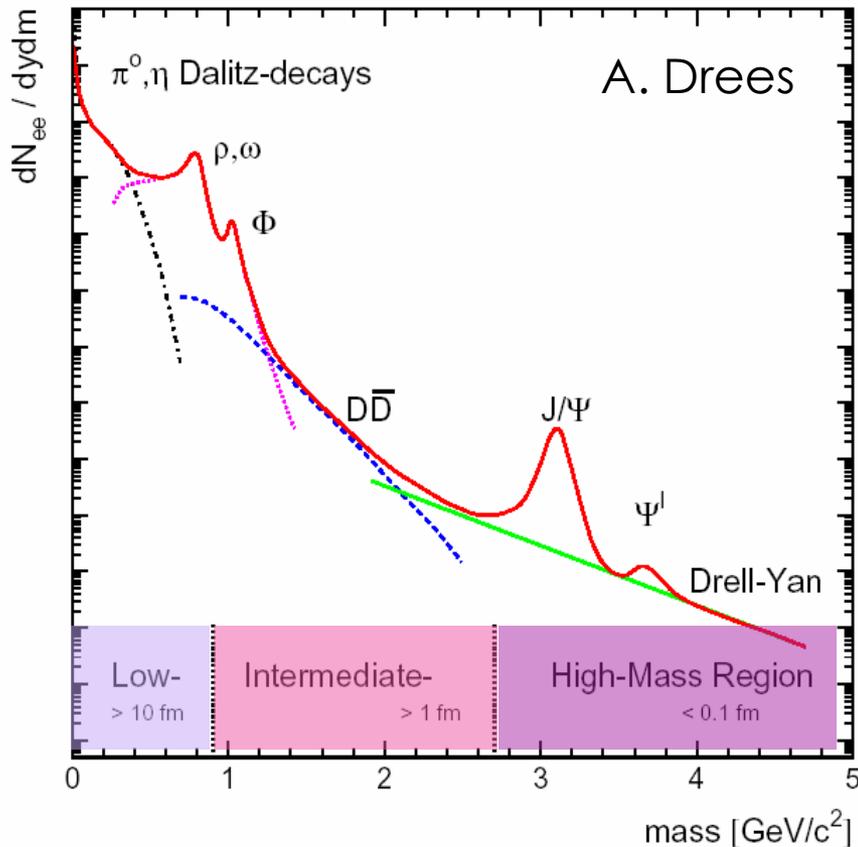


高温物質の媒質効果の研究へ

- ρ の性質の変化？
- $\pi^+\pi^-$ 対消滅？
- QGPの熱放射？



3 種類のエネルギー領域



LMR: low mass region
($m < 1 \text{ GeV}$)

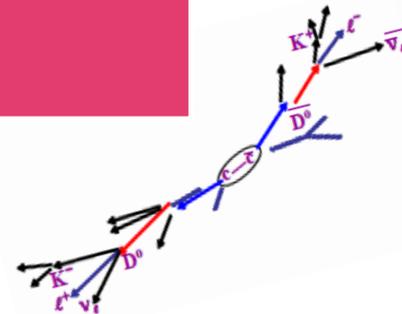
- 媒質効果の物理

IMR: intermediate //
($1 < m < 3 \text{ GeV}$)

- DD相関崩壊
- 熱的放射

HMR: high //
($m > 3 \text{ GeV}$)

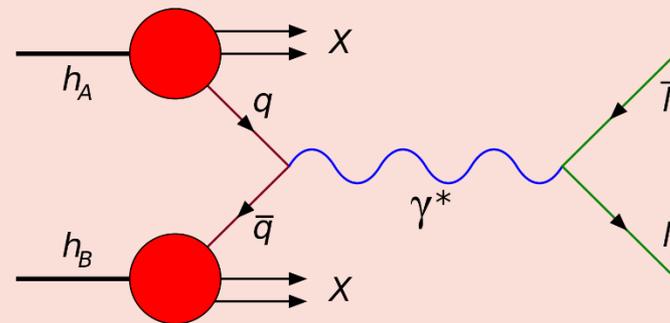
- Drell-Yan過程



衝突初期のレプトン対生成

- クォーク対消滅のみから発生（グルオンは電荷中性）
- 衝突核内のクォークが関与する

Drell-Yan
process:



高不変質量で支配的

ここまでのまとめ

- ▶ レプトン対生成量を用いると、HICで生成された仮想光子の不変質量分布を調べることができる
- ▶ 電磁プローブは、HICの全てのステージの情報が直接検出器に到達する。これはメリットでありデメリット。
- ▶ AA衝突では、カクテルからのずれ = 「媒質効果」が観測されている。



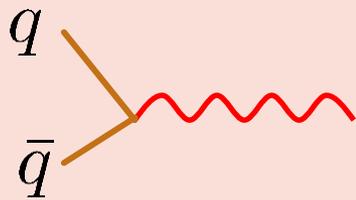
2. 媒質効果



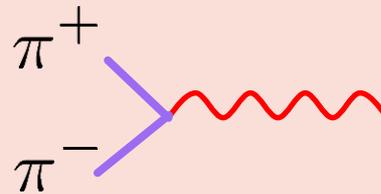
レプトン対生成量の計算法

高温物質からの仮想光子生成

クォーク対消滅



π 対消滅

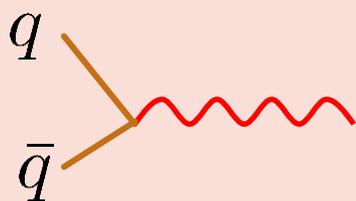


ρ 消滅

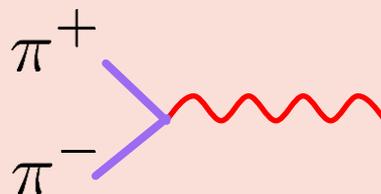


高温物質からの仮想光子生成

クォーク対消滅



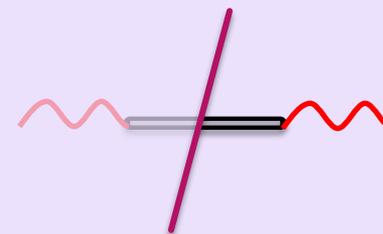
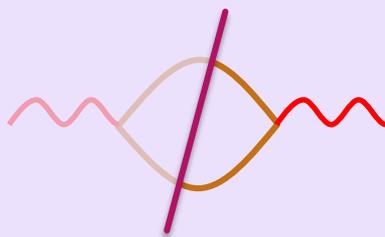
π 対消滅



ρ 消滅



計算方法



左右対称を重ねたダイアグラムの虚部を取る

高温物質からの仮想光子生成

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = J_{\mu} A_{\mu}$$

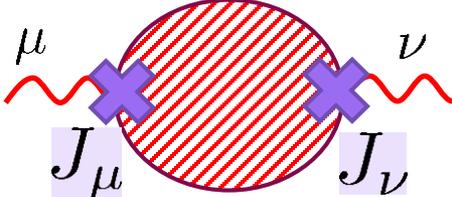
$$\Pi_{\mu\nu}^R(\omega, k) = \text{[Diagram]} \quad \begin{array}{l} \text{光子} \\ \text{自己エネルギー} \end{array}$$

The diagram shows a central red hatched circle representing a medium. Two wavy red lines representing photons enter and exit the circle. Each photon line is connected to the circle by a purple cross labeled J_{μ} and J_{ν} respectively.

- 虚部を取れば、厳密な仮想光子生成量
- 虚部 = スペクトル関数

高温物質からの仮想光子生成

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = J_{\mu} A_{\mu}$$

$$\Pi_{\mu\nu}^R(\omega, k) = \text{光子自己エネルギー}$$


- 虚部を取れば、厳密な仮想光子生成量
- 虚部 = スペクトル関数

$$\Pi_{\mu\nu}^R(\omega, k) = \text{F.T.} \langle [J_{\mu}, J_{\nu}] \rangle \theta(t)$$

- 光子自己エネ = カレント・カレント相関関数
- aのleadingでは、**強い相互作用のJJ相関関数**

レプトン対生成"率"・生成"量"

レプトン対生成「率」

$$\frac{d^4\Gamma}{d\omega d^3q} = \frac{\alpha}{12\pi^4} \frac{1}{e^{\beta\omega} - 1} \frac{1}{q^2} \text{Im}\Pi_{\mu}^{\mu}(\omega, q)$$

熱平衡 / 単位体積・単位時間当たり

McLerran, Toimela (1985); Weldon(1990); Gale, Kapusta (1991)

レプトン対生成"率"・生成"量"

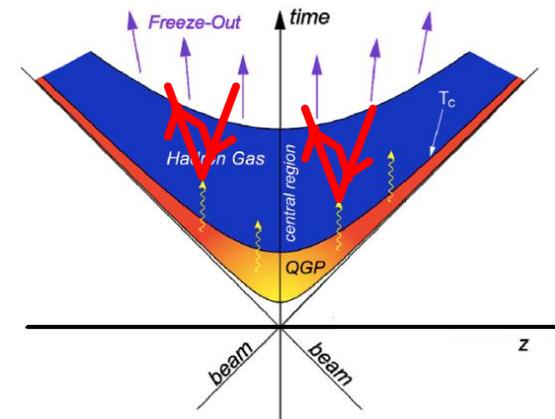
レプトン対生成「率」

$$\frac{d^4\Gamma}{d\omega d^3q} = \frac{\alpha}{12\pi^4} \frac{1}{e^{\beta\omega} - 1} \frac{1}{q^2} \text{Im}\Pi_{\mu}^{\mu}(\omega, q)$$

熱平衡／単位体積・単位時間当たり

McLerran, Toimela (1985); Weldon(1990); Gale, Kapusta (1991)

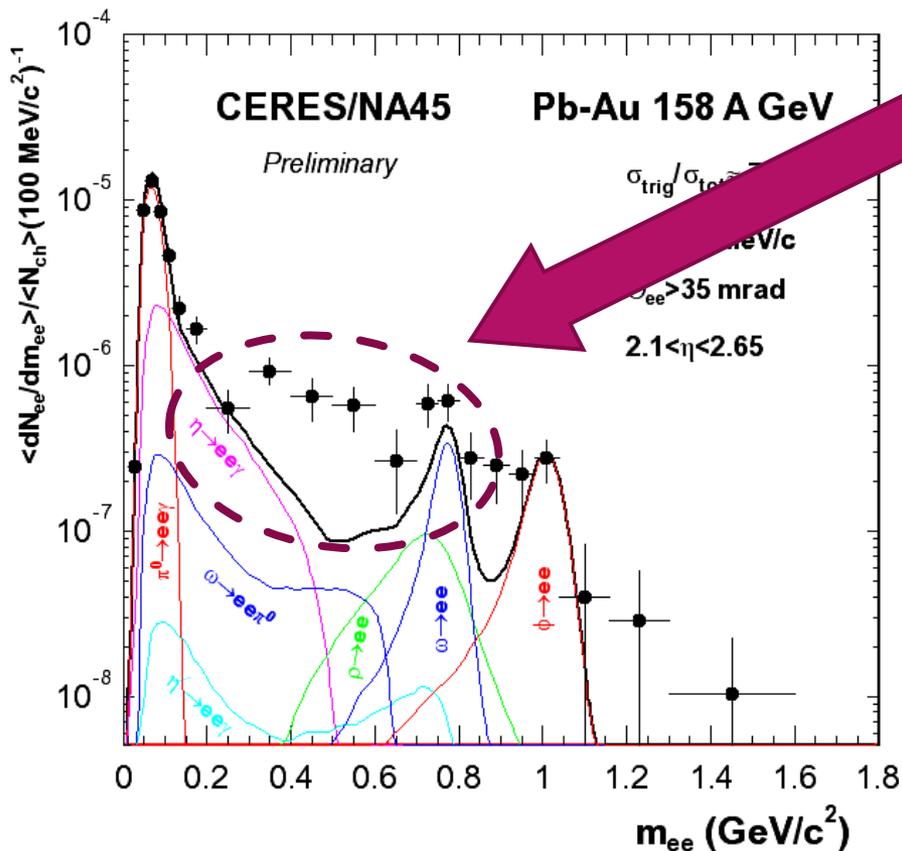
実験で得られる**生成「量」**は、膨張の各時空素片からのレートを重ね合わせたもの





核物質中のレプトン対生成
レプトン対とベクトルボソン

レプトン対とベクトルボソン



LMR領域の収量増大は、
ベクトルボソン（特に ρ メ
ソン）の媒質効果由来であ
る可能性が高い

レプトン対は、**カイラル対
称性の回復**のプローブ？

ρ メソンとカイラル相転移

□ Brown-Rho Scaling

$$\frac{m_\rho}{m_\rho^{\text{vac}}} \sim \left(\frac{\langle \bar{\psi}\psi \rangle}{\langle \bar{\psi}\psi \rangle_{\text{vac}}} \right)^{1/3}$$

Brown and Rho, 1991

カイラル模型と
直観的洞察

□ Hatsuda-Lee

$$\frac{m_\rho}{m_\rho^{\text{vac}}} = 1 - c \frac{\rho}{\rho_{\text{vac}}}$$

Hatsuda and Lee, 1992

QCD和則

□ In-medium Modification

ρ メソンは、溶ける

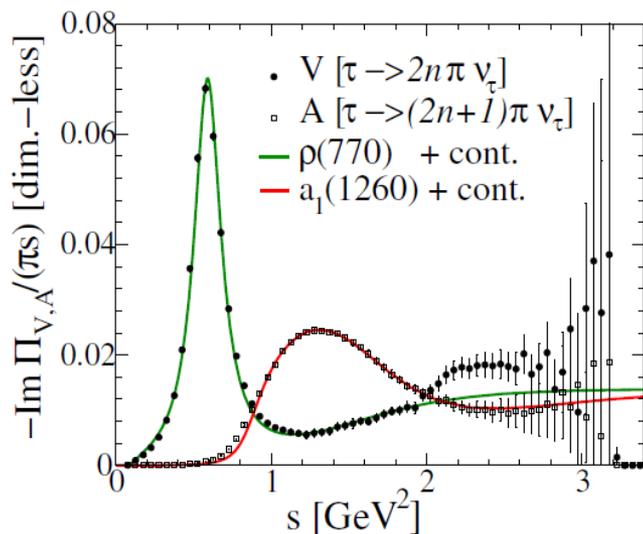
Rapp, Wambach, van Hees, ...

カイラル模型と
有限温度計算

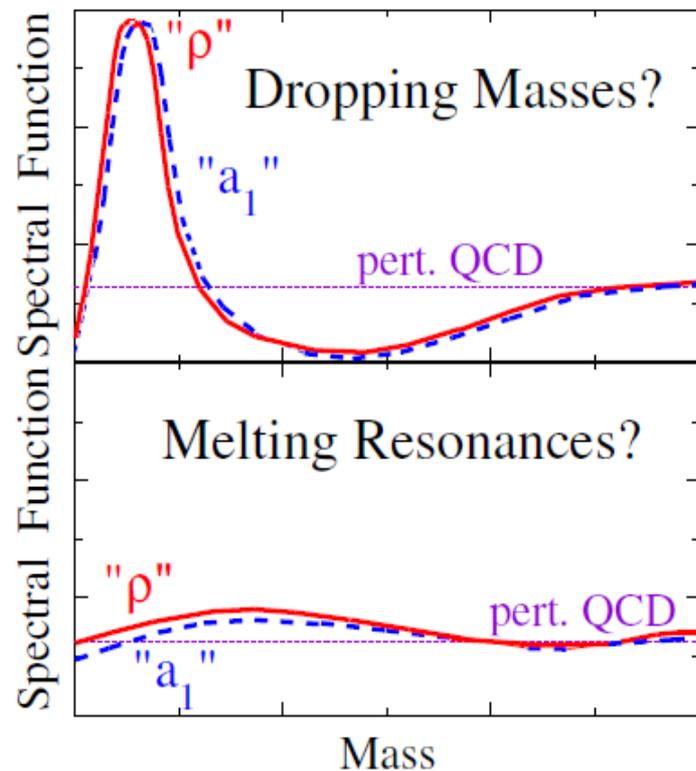
“Mass shift” vs “Broadening”

Quark Matter 2005 @Budapest

V,AVチャンネルの
真空スペクトル



媒質
効果

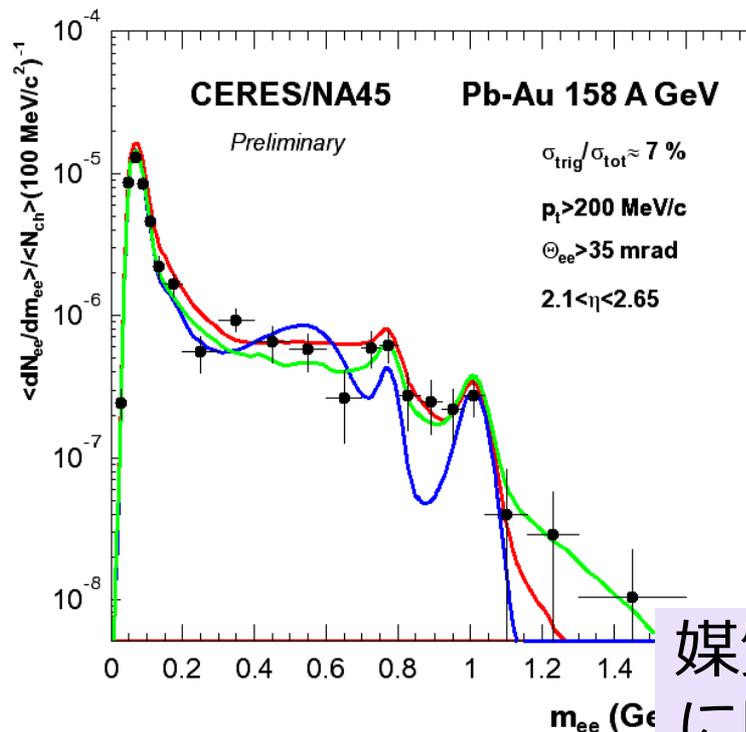


QM2005 CERES summary talk

e+e- mass spectrum: comparison to the models

Pb+Au at 158 GeV per nucleon

Sergey Yurevich



calculation by R.Rapp using
Rapp/Wambach medium
modification of rho spectral
function

calculation by R.Rapp using
Brown-Rho scaling

B. Kämpfer, thermal emission

...added to the cocktail.

in the $0.8 < m < 0.98$ GeV region:
Brown-Rho curve: $\chi^2/n = 2.4$

媒質効果は、このように明快に区別できるものではない。

QCD和則

QCD和則とは

スペクトル関数の
積分値

$$\int_0^\infty d\omega \omega^n \rho(\omega), \dots$$

関連付け

真空凝縮

$$\langle \bar{\psi}\psi \rangle, \langle G^2 \rangle, \\ \langle (\bar{\psi}\psi)^2 \rangle, \dots$$

QCD和則

QCD和則とは

スペクトル関数の
積分値

$$\int_0^\infty d\omega \omega^n \rho(\omega), \dots$$

関連付け

真空凝縮

$$\langle \bar{\psi}\psi \rangle, \langle G^2 \rangle, \\ \langle (\bar{\psi}\psi)^2 \rangle, \dots$$

例 1 : Borel和則 $\frac{1}{\pi M^2} \int_0^\infty d\omega \text{Im}\Pi(\omega) e^{-\omega/M^2} = C_1 + C_2 \frac{m_q \langle \bar{q}q \rangle}{M^4} + C_3 \frac{\langle G^2 \rangle}{M^4} + \dots$

※Mが十分大きいときOK

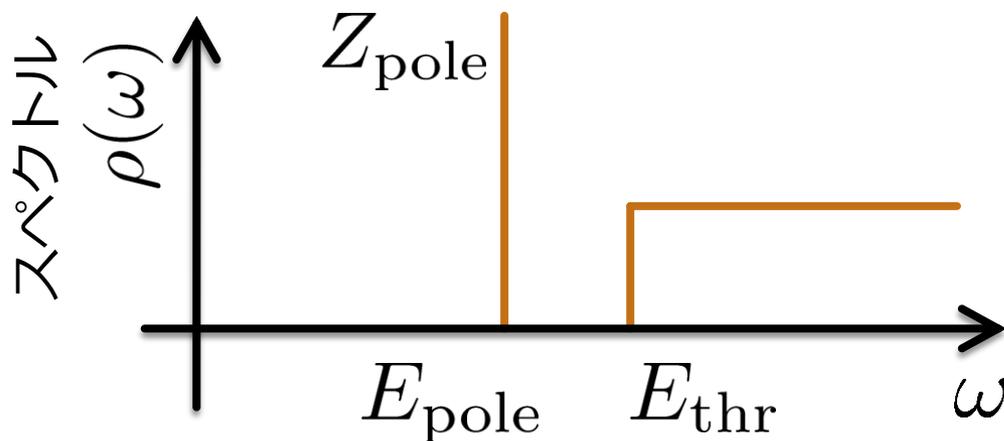
例 2 : Weinberg型和則 $\int_0^\infty d\omega^2 (\rho(\omega) - \rho_{\text{pert.}}(\omega)) = \sum_i C_i \langle O_i \rangle$

QCD和則とスペクトル関数

① スペクトルに構造を仮定



② パラメータを、
QCD和則から推定



媒質中のQCD和則

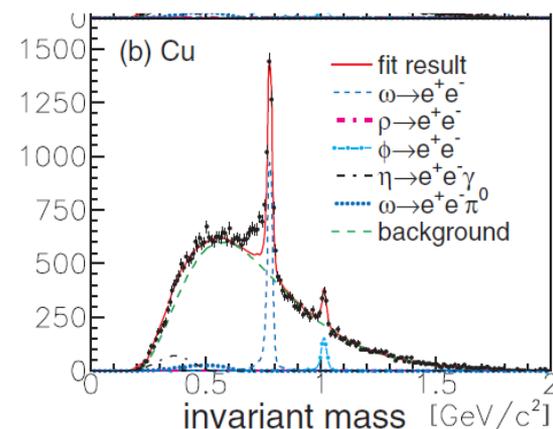
Hatsuda-Lee, 1992

$$\frac{m_\rho}{m_\rho^{\text{vac}}} = 1 - c \frac{\rho}{\rho_{\text{vac}}}$$



核物質中の
媒質変化？

E325@KEK



QCD和則とスペクトル関数

comment by 初田さん

International Conference on Soft Dilepton Production
LBL, 1997

http://macdls.lbl.gov/DLS_WWW_Files/DLSWorkshop/proceedings.html



スペクトル自身よりも、積分値の方がより直接的に実験とQCD凝縮を比較できる

- *spectral sum (moments)* vs. *spectral shape*

$$\int ds N_{e^+e^-}(s) s^n, \quad N_{e^+e^-}(s)$$

Constrained by QCD condensates sensitive to dynamics

↓

moment analyses must be done
(like the parton distribution $q(x)$, $G(x)$)

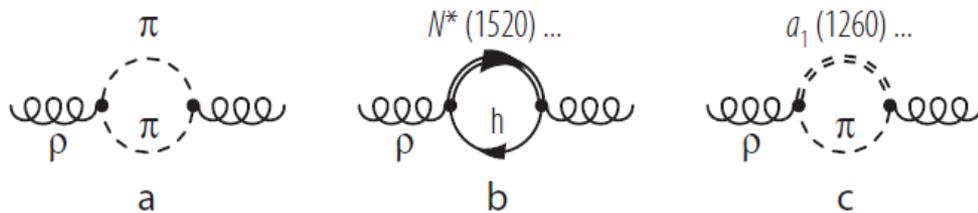
See also, Hatsuda, Hayano, RMP**82**, 2949

※実験的に積分値を出すのは誤差との戦いか？

Mass Broadening

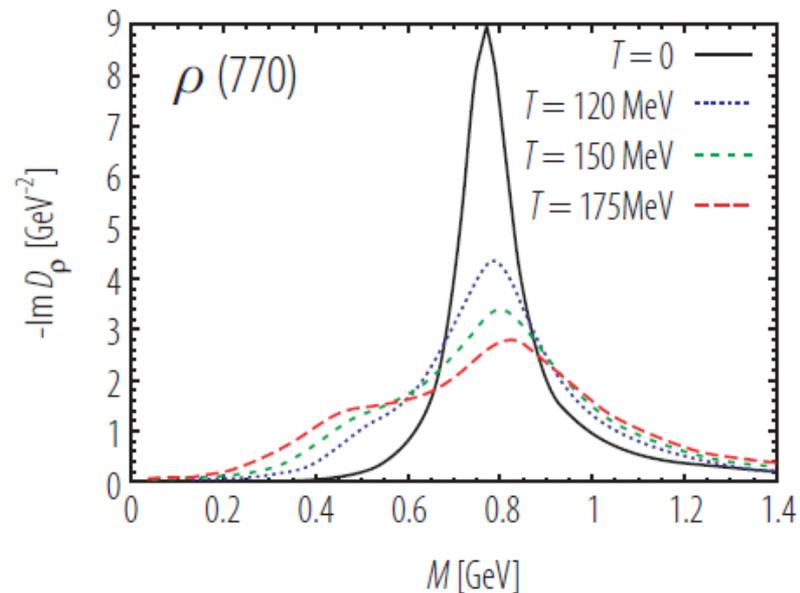
Rapp, Wambach+

- vector meson dominance J.J. Sakurai
- ハドロン有効模型



高温ハドロン物質中の
スペクトル関数は、溶ける

Rapp, Wambach, 1999

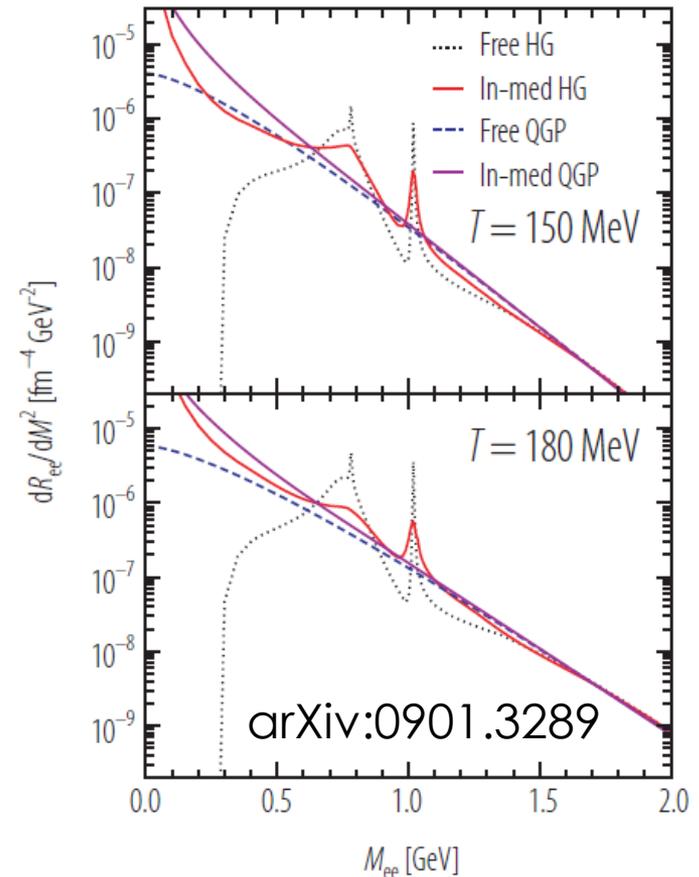


ρ の溶解は、カイラル対称性の回復と関係しているのか？

①VとAVのスペクトルが、高温で縮退する傾向を示す。

②Rapp, Wambachのモデルで得られたスペクトルは、摂動論のスペクトルに漸近する。

“quark-hadron duality”

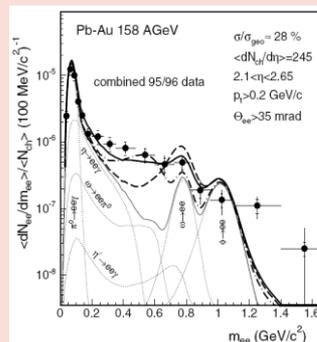


動的模型について

理論的に
計算された

$$\frac{d^4\Gamma}{d\omega d^3q}$$

時空発展の
動的モデル



- SPSエネルギー領域には、確立した動的描像が存在しない
- 実験との比較を行うためには、動的描像の確立が急務

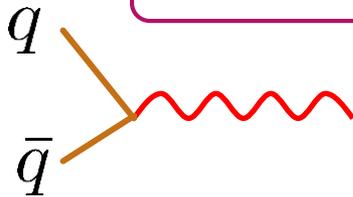
例：
Rapp, Wambach+

円筒形状の
温度一様物質

クォーク気体のレプトン対生成率

- レプトン対は自由クォーク気体からも発生する

強い相互作用について

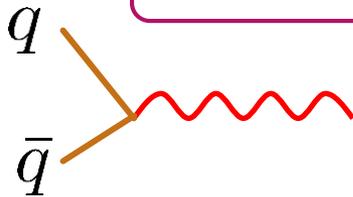


※実光子生成は、 $O(\alpha)$ では起こらない

クォーク気体のレプトン対生成率

- レプトン対は自由クォーク気体からも発生する

強い相互作用について



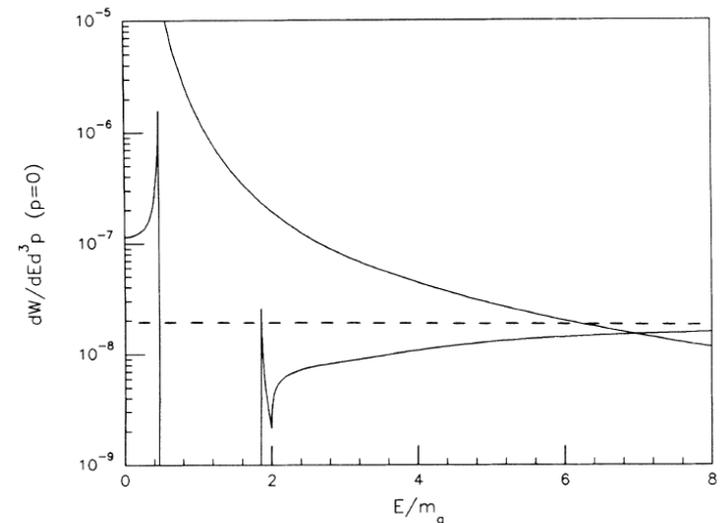
※実光子生成は、 $O(\alpha)$ では起こらない

- Hard Thermal Loop近似

Braaten, Pisarski, Yuan, 1990
Wong, 1992

ソフト領域でover estimate

Moore, Roberts, 2006





格子QCDでの仮想光子生成率計算について

格子QCDの何が難しいか？

実時間相関関数

$$C(t, \vec{x}) = \langle \hat{O}_1(t, \vec{x}) \hat{O}_2(0, \vec{0}) \rangle$$

我々の世界の情報

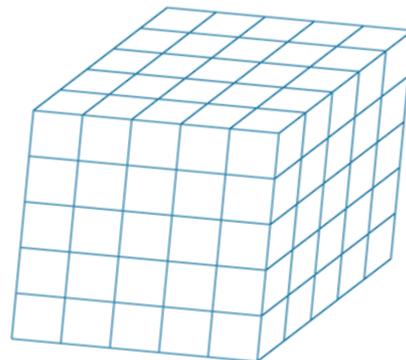
- レプトン対生成率
- 輸送係数



虚時間相関関数

$$\tilde{C}(\tau, \vec{x}) = \langle \hat{O}_1(\tau, \vec{x}) \hat{O}_2(0, \vec{0}) \rangle$$

格子上的の観測量



格子QCDの何が難しいか？

実時間相関関数

$$C(t, \vec{x}) = \langle \hat{O}_1(t, \vec{x}) \hat{O}_2(0, \vec{0}) \rangle$$

虚時間相関関数

$$\tilde{C}(\tau, \vec{x}) = \langle \hat{O}_1(\tau, \vec{x}) \hat{O}_2(0, \vec{0}) \rangle$$



フーリエ変換

$$t \rightarrow \omega$$



$$C(\omega, \vec{x})$$



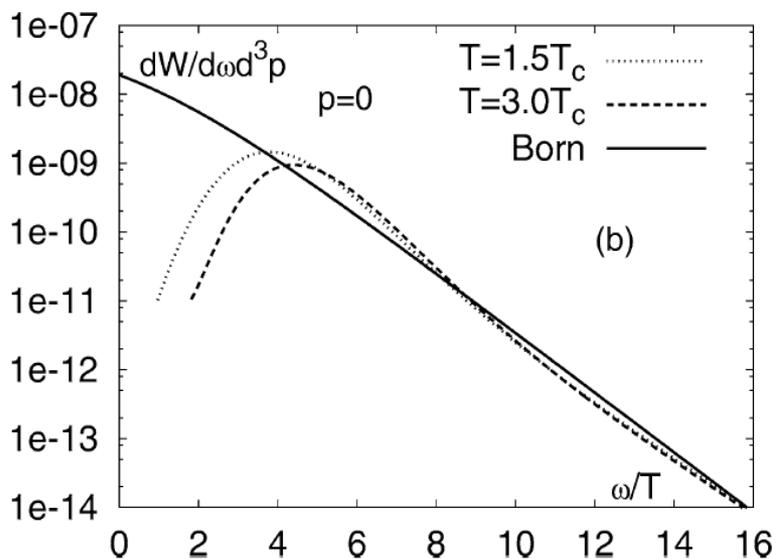
$$\tilde{C}(i\omega_n, \vec{x})$$

解析関係にある

$$\omega \leftrightarrow i\omega_n \text{ と置き換える}$$

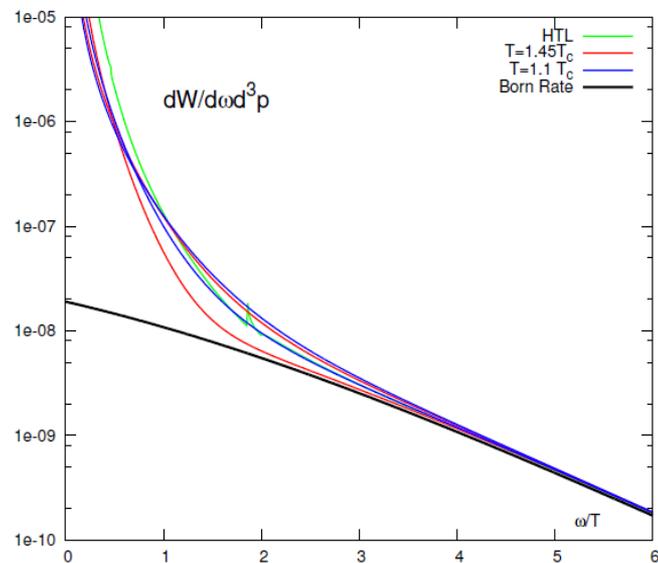
これまでの計算例(ゼロ運動量)

Karsch, et al. 2002



最大エントロピー法

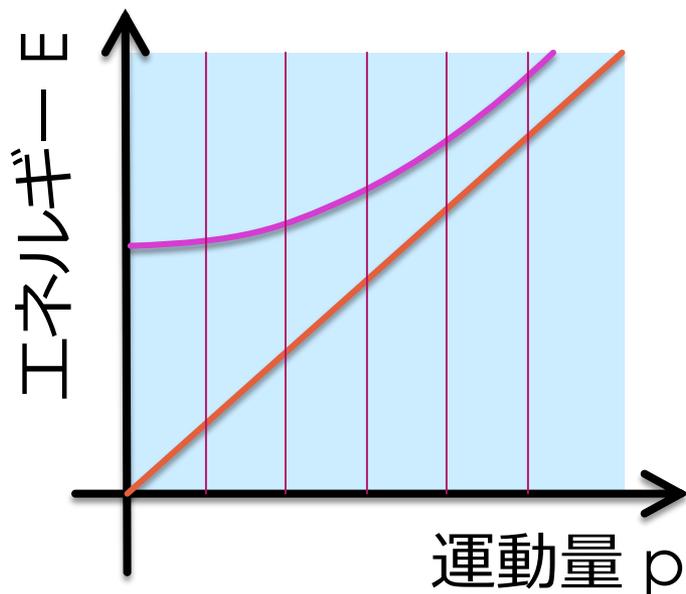
Ding, et al. 2011



Breit-Wigner + 摂動論
(4 parameter fit)

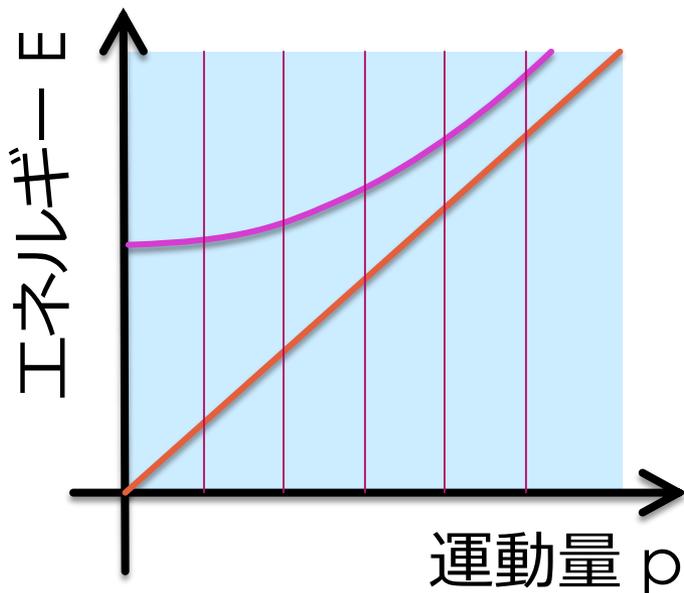
格子解析の今後の課題

- ① 解析接続技法の改善
- ② 有限 p 相関関数の測定
- ③ 縦波と横波の分離
- ④ フルQCD

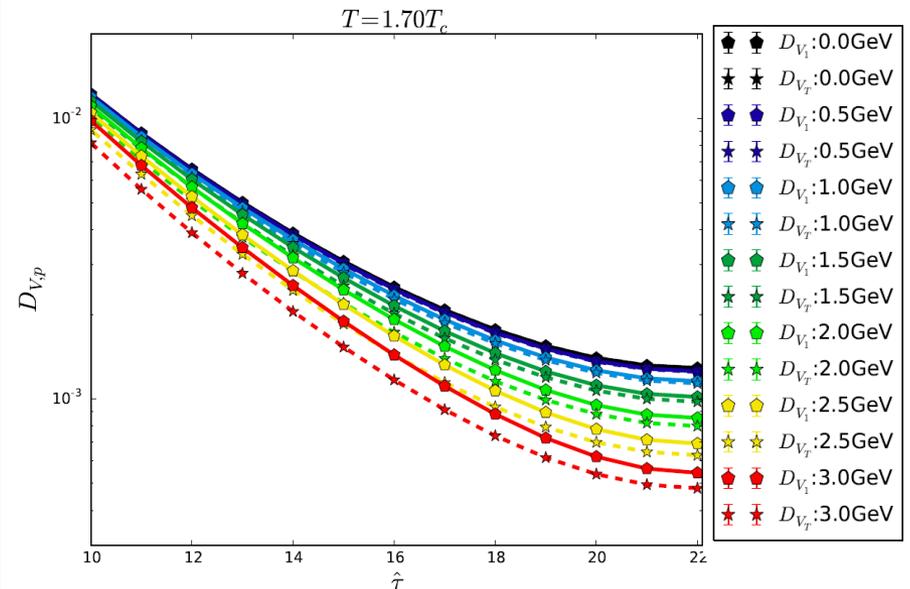


今後の課題：有限運動量への拡張

- ① 解析接続技法の改善
- ② 有限 p 相関関数の測定
- ③ 縦波と横波の分離
- ④ フルQCD



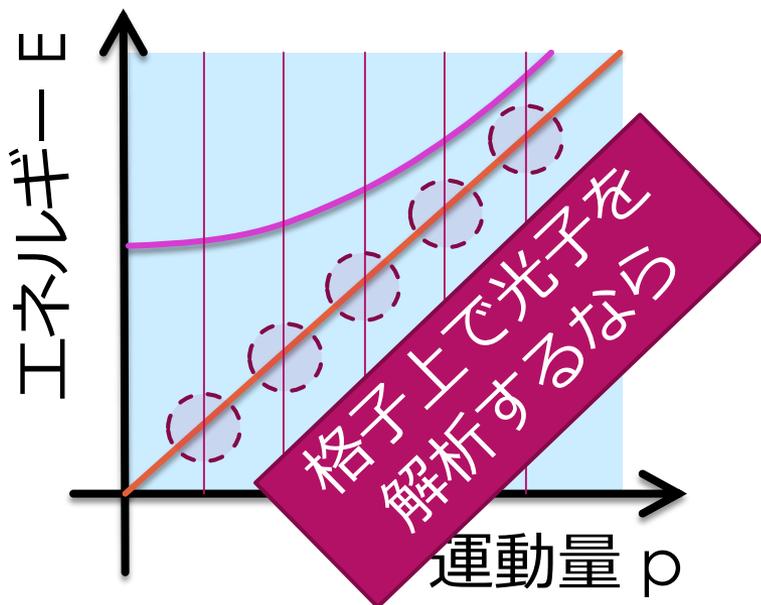
チャーム相関関数の計算例



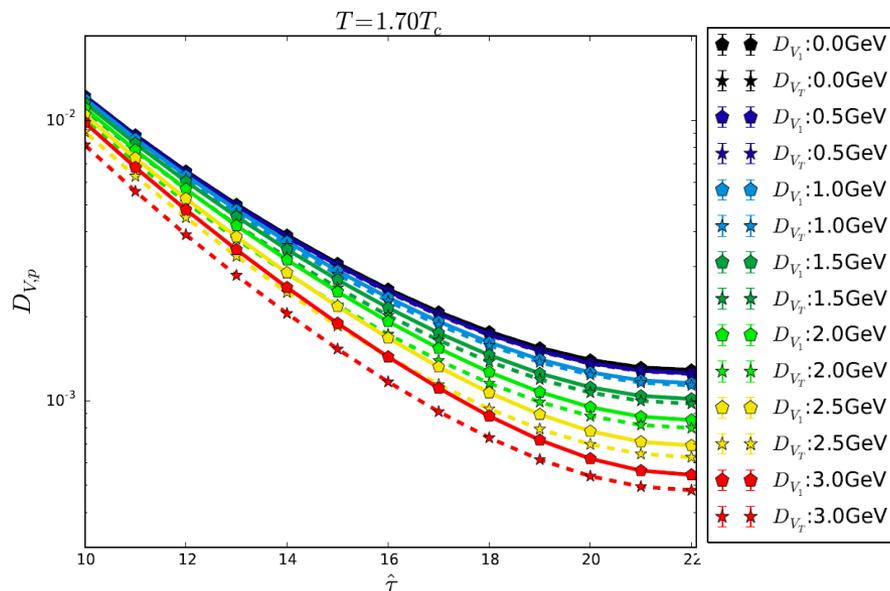
縦と横の明快な分離

今後の課題：有限運動量への拡張

- ① 解析接続技法の改善
- ② 有限 p 相関関数の測定
- ③ 縦波と横波の分離
- ④ フルQCD



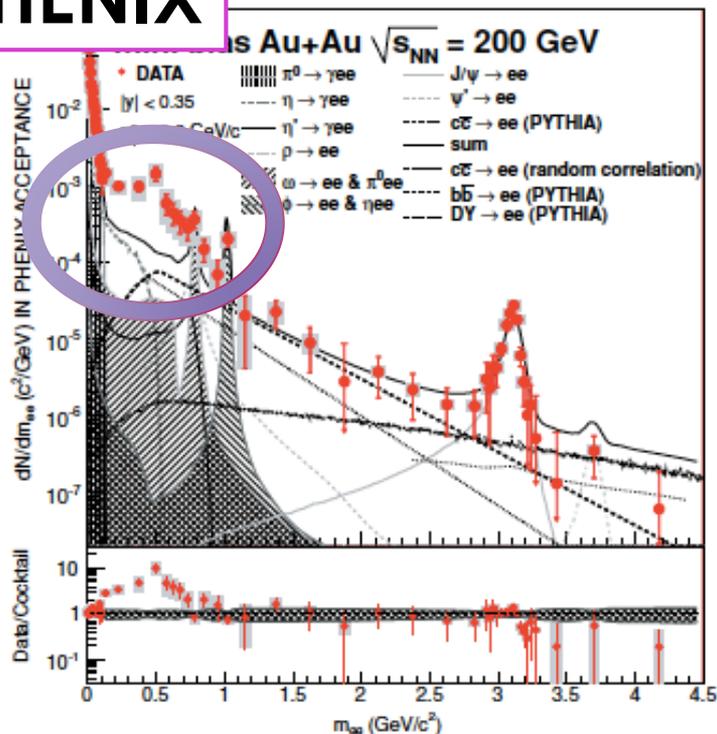
チャーム相関関数の計算例



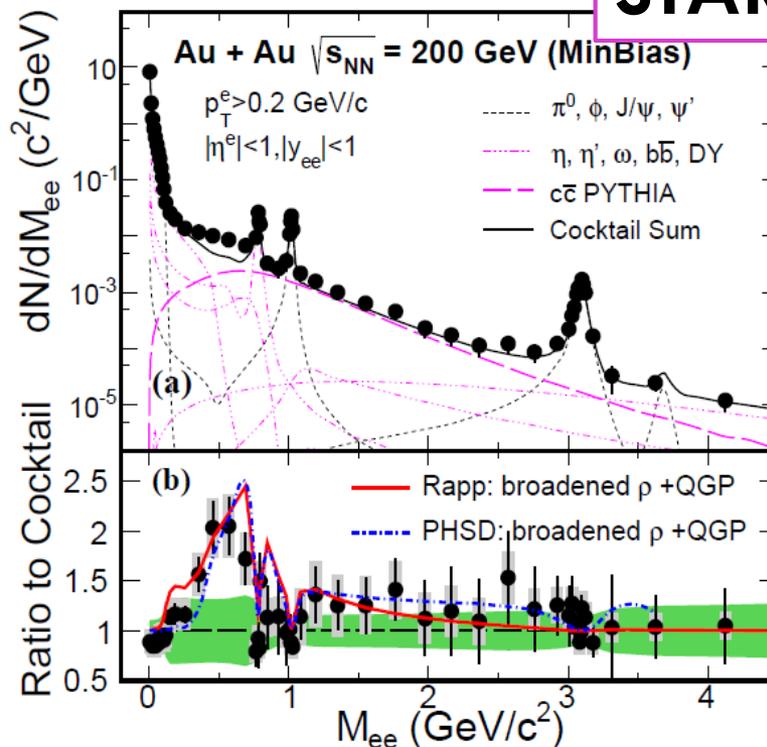
縦と横の明快な分離

最近の実験結果から 1 レプトン対@RHIC/200GeV

PHENIX



STAR

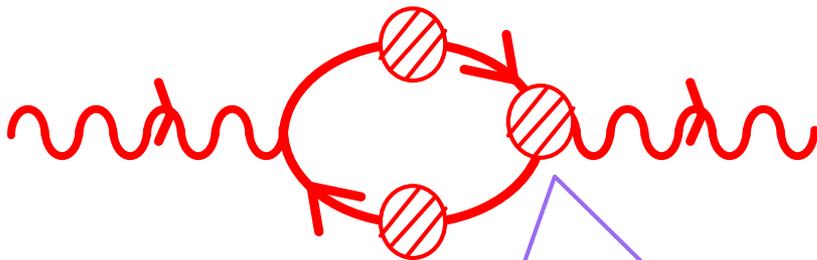


- PHENIXでは、LMRでかなりの増大
- PHENIXとSTARで、inconsistent

仮想光子生成 with 格子クォーク準粒子

Kim, Asakawa, MK
to appear soon

格子QCDで決めた
クォーク伝搬関数
(with クォーク準粒子)
MK+ 2007,9,12

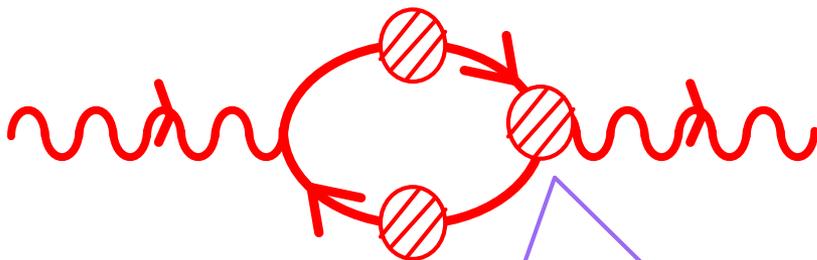


WT恒等式を満たす頂点関数

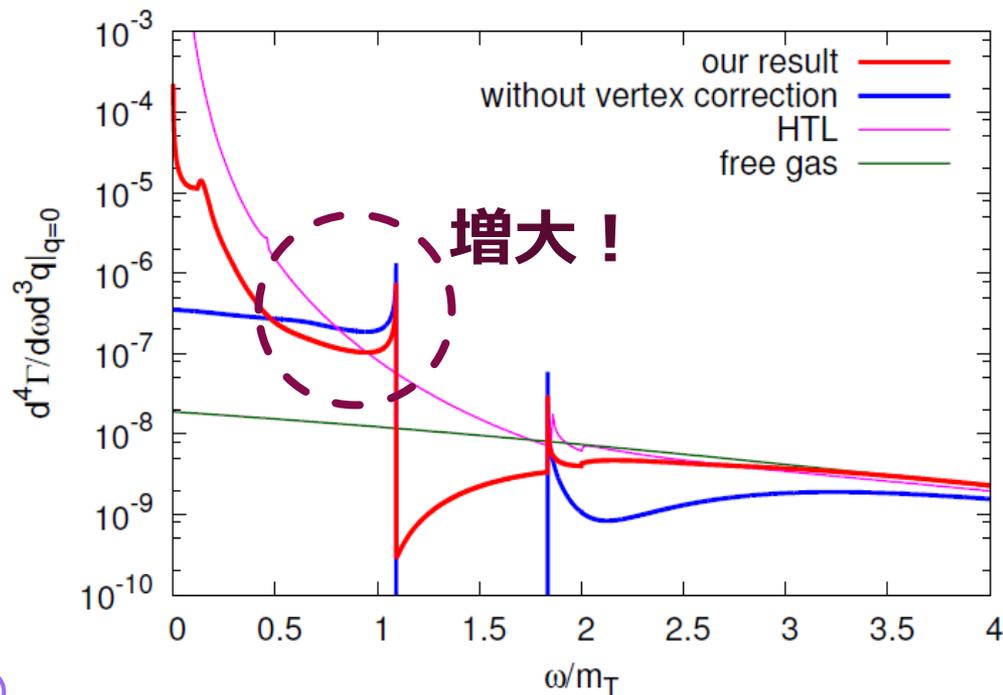
仮想光子生成 with 格子クォーク準粒子

Kim, Asakawa, MK
to appear soon

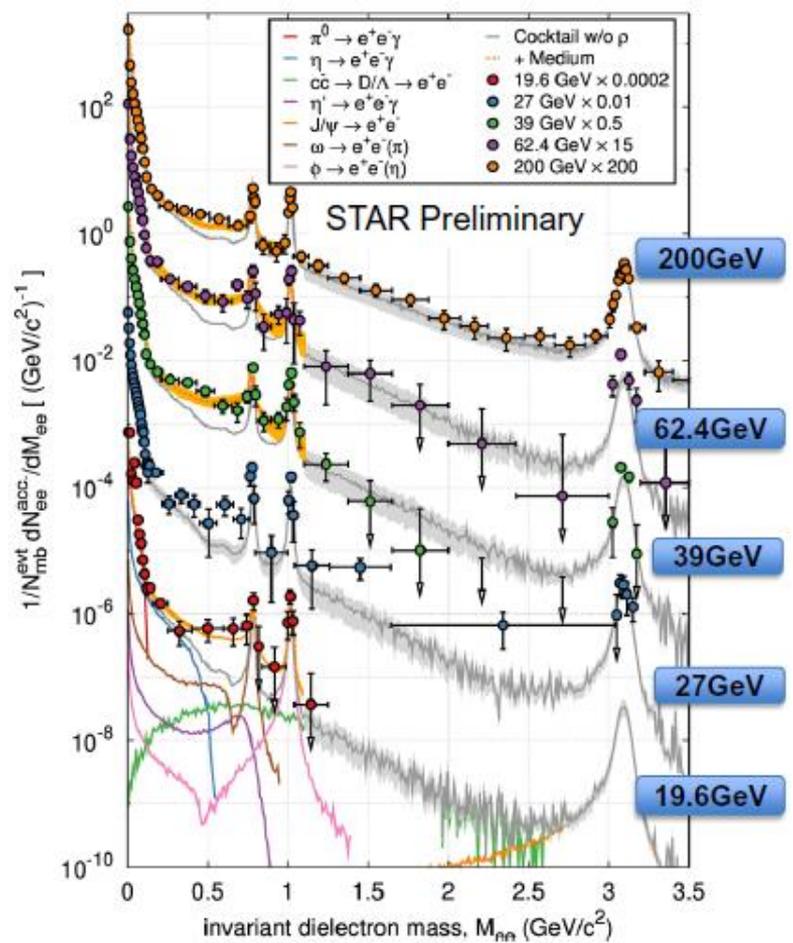
格子QCDで決めた
クォーク伝搬関数
(with クォーク準粒子)
MK+ 2007,9,12



WT恒等式を満たす頂点関数



最近の実験結果から 2 レプトン対@RHIC-BES



LMRとIMRの
衝突エネルギー依存性



BES-IIで統計が大幅に向上予定
J-PARCでも精密測定

その他最近の理論的進展

- ▶ 摂動論高次項の解析
- ▶ 散逸流体からの仮想光子生成レート
- ▶ ...

質問群から

- ▶ 18. レプトン対の不変質量測定による**核内ベクトル中間子の質量変化**観測について勉強しています。重イオン衝突の実験から強い相互作用の対称性についてどのような事がわかるか勉強したいです
- ▶ 24. low mass di-lepton の測定で、カクテルを差し引いた残りの **moment 付き積分値**について知りたい (1997, Hatsuda et al.?)
- ▶ 25. 高統計の di-lepton 測定で、高精度に測定できるとして、**カイラル対称性の回復現象**に迫れるのか？
- ▶ 48. 光子 (理論)、dilepton (理論) 媒質部分の取り扱いの弱結合と強結合の違い (生成率) **格子 QCD**による生成率はどこまで得られているか？**運動量依存性は？** 弱結合 (摂動的) の場合、ハドロン共鳴ガスの寄与はどこまで取り入れられるか？ (またはその寄与は評価できるか？)

質問群から

- ▶ 82. **Rapp-Wambach**のレプトン対の生成の計算はどれだけ信用できているのか？
- ▶ 94. **カイラル対称性の回復現象**は現状、見えているのか(rho mesonの質量など)。
- ▶ 95. low mass di-lepton enhancementはどう理解されているのか。
- ▶ 128. 光子・レプトン対はQGPの直接的信号になるとよく言われますが、実験室での観測から**QGPの「どのような性質」を明らかにすることができるのか**を知りたいです

まとめ

- ▶ レプトン対生成量は、高温物質の**媒質効果**を調べる有効な観測量。
- ▶ 実験データは、媒質効果の存在を示している。
- ▶ カイラル対称性の回復を含む媒質効果を調べるためには、更なる総合的な検討が必要である。