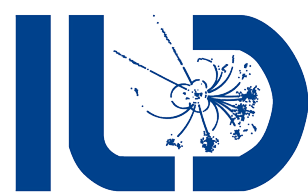


Study of running bottom quark mass at 250GeV ILC

250GeV ILCにおけるボトムクォーク質量の研究

平船 精大

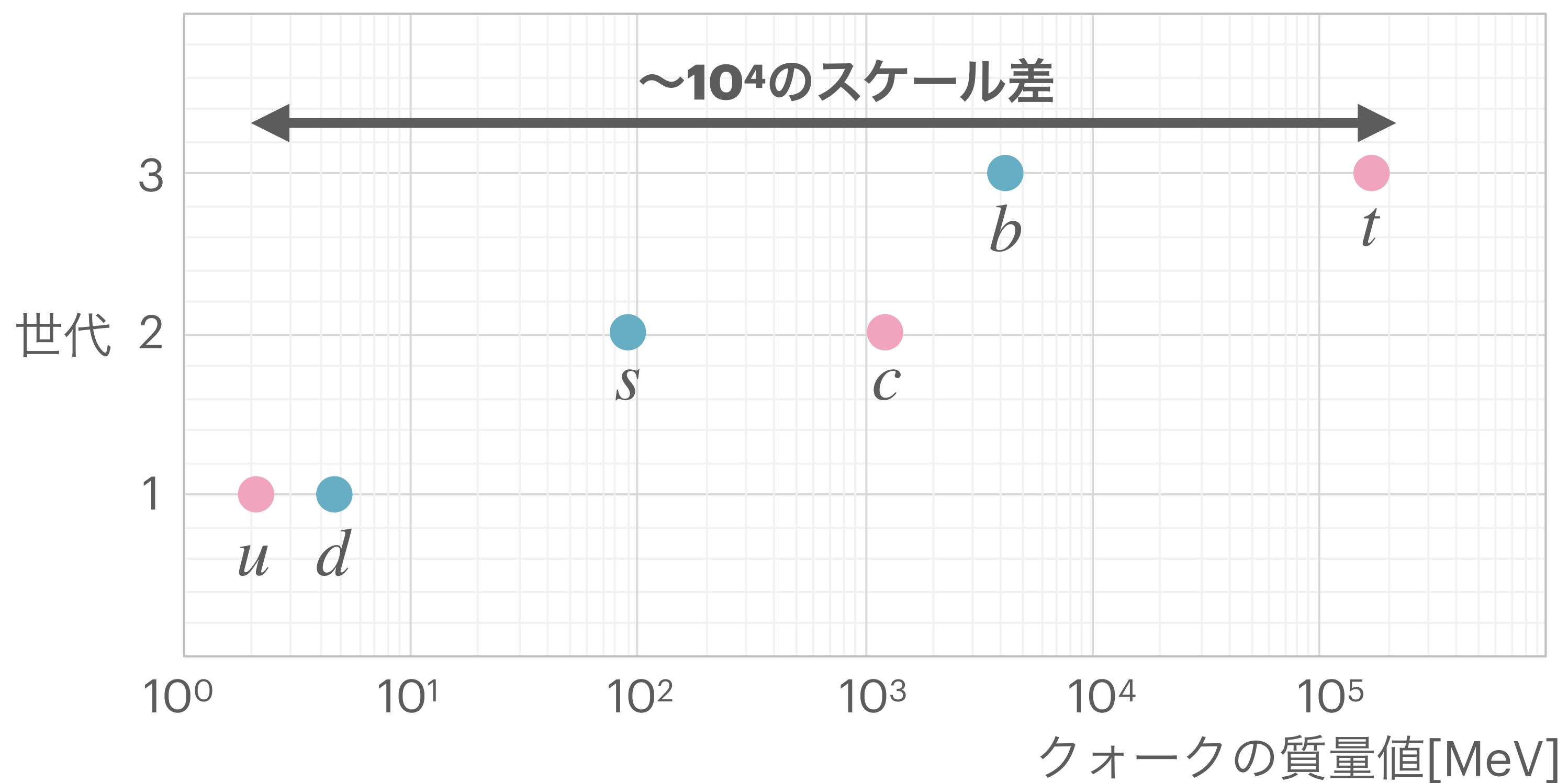
2021/2/1



背景

クォークの質量格差

- 標準模型は各質量値の間にある格差を説明できていない



クォーク質量のエネルギー依存性

- クォーク質量：
 - Pole mass
 - Running mass ...

- Running mass

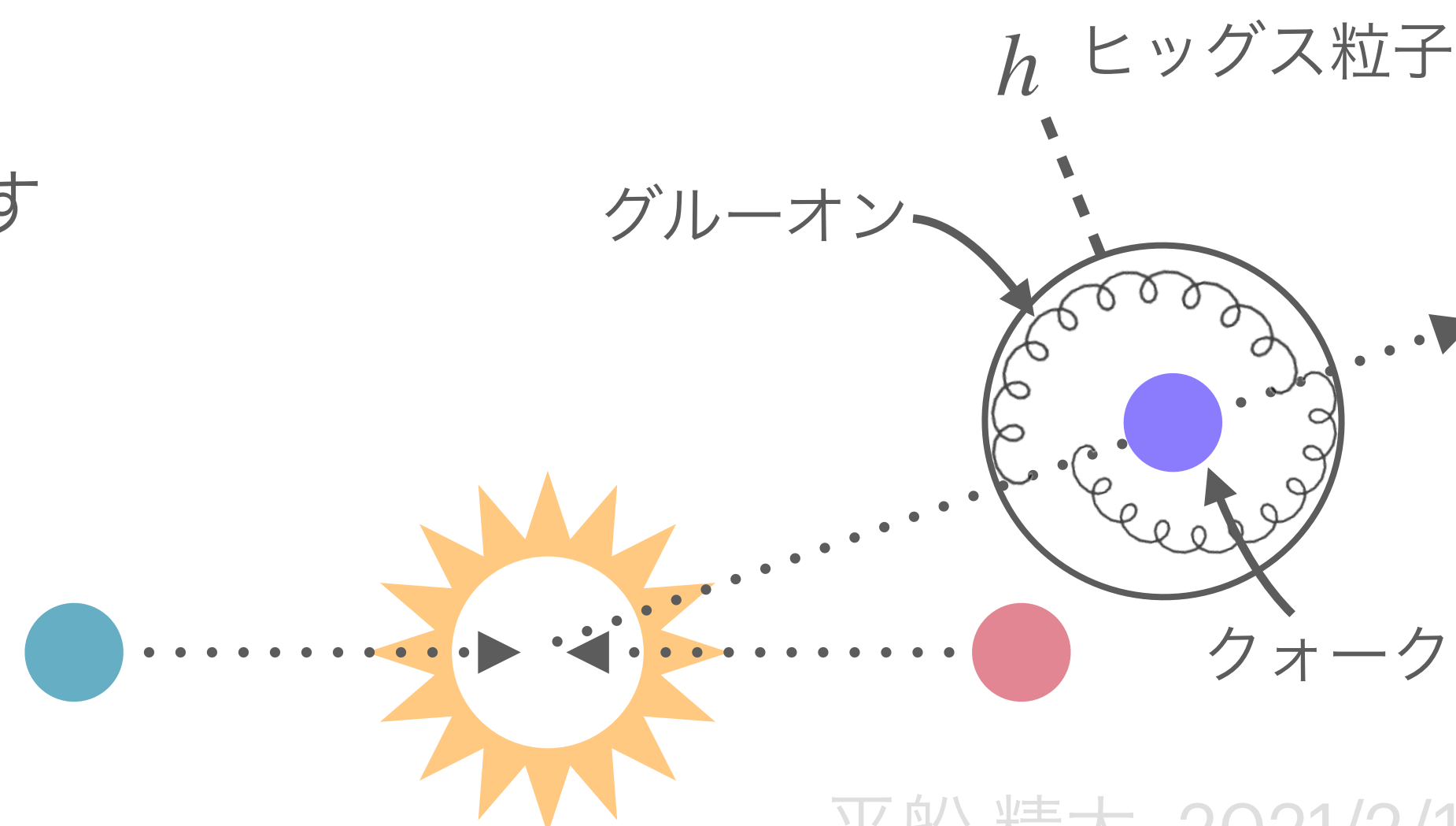
実験のエネルギースケール依存性を持つ質量でQCDの繰り込み群方程式に従う

$$\mu^2 \frac{\partial m_q(\mu)}{\partial \mu^2} = -\gamma(\alpha_s(\mu)) m_q(\mu)$$

$\gamma(\alpha_s(\mu))$: 摂動計算される関数
 μ : 実験のエネルギースケール

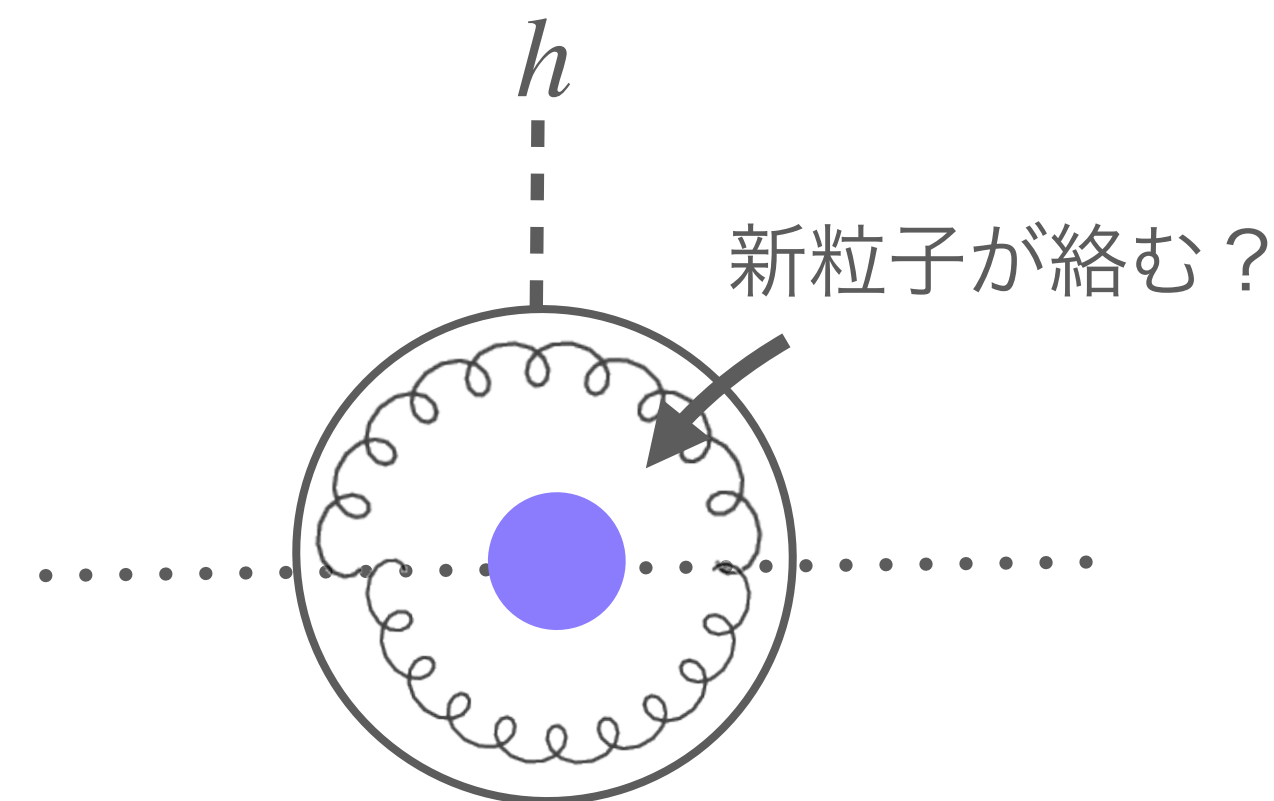
- Running massのイメージ

グルーオンのエネルギーも含めてクォーク質量とみなす
 エネルギー領域によって相互作用の強さは変化し、
 クォーク質量も変化する



b クォーク質量と新物理

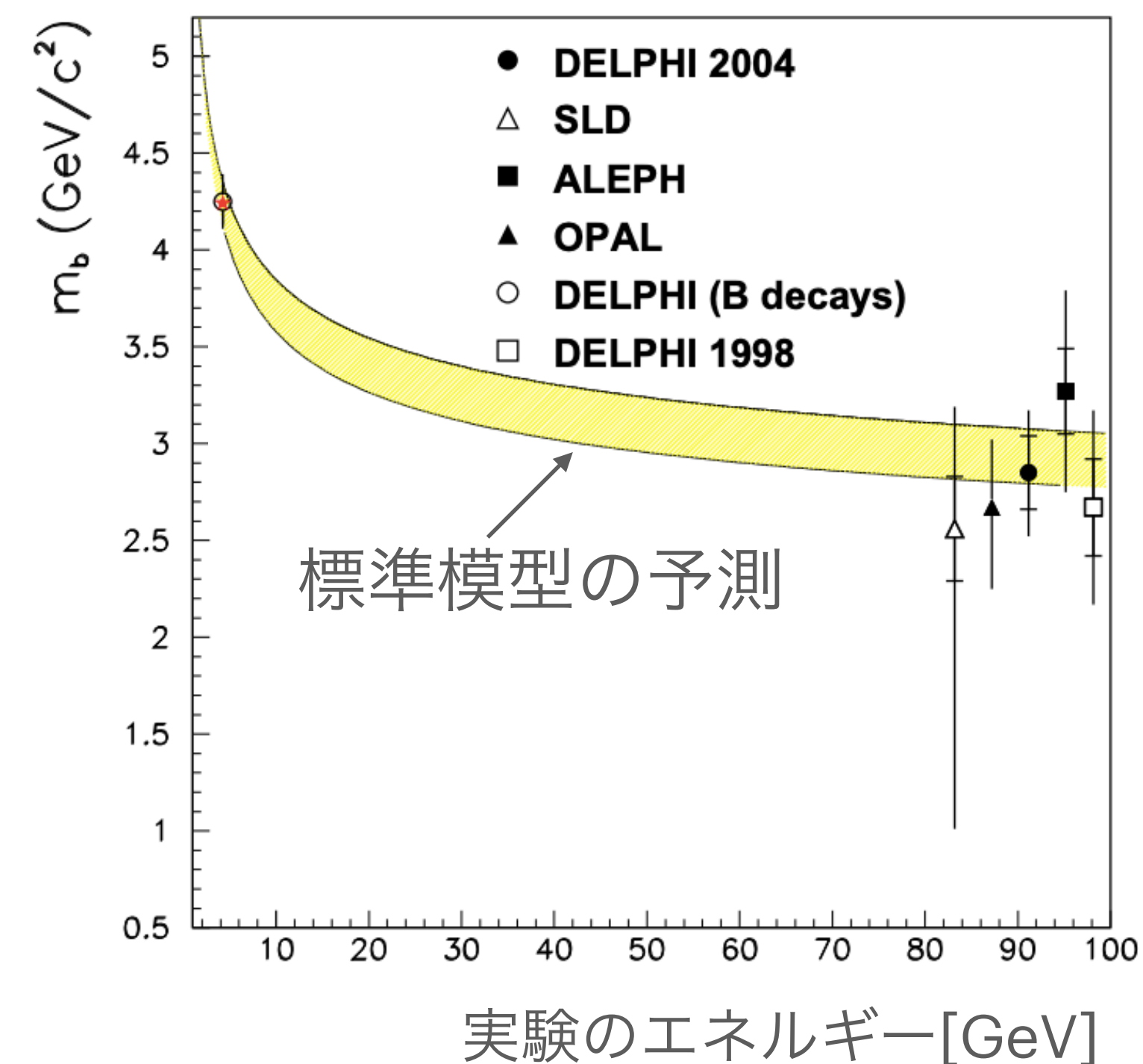
- 新粒子の寄与により b クォーク質量のエネルギー依存性は標準模型からずれ、GUTスケールで τ レプトンの質量と統一されるモデルがある



- LEP・SLDでZ-pole領域($\sim 90\text{GeV}$)での b クォーク質量が測られたが新物理の兆候は見られなかった

→ **Z-poleより高いエネルギースケールでの b クォーク質量測定は標準模型の検証・新物理への手がかりになる**

LEP・SLDでの測定結果



観測量の定義

- $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ ($q = uds \text{ or } b$)について

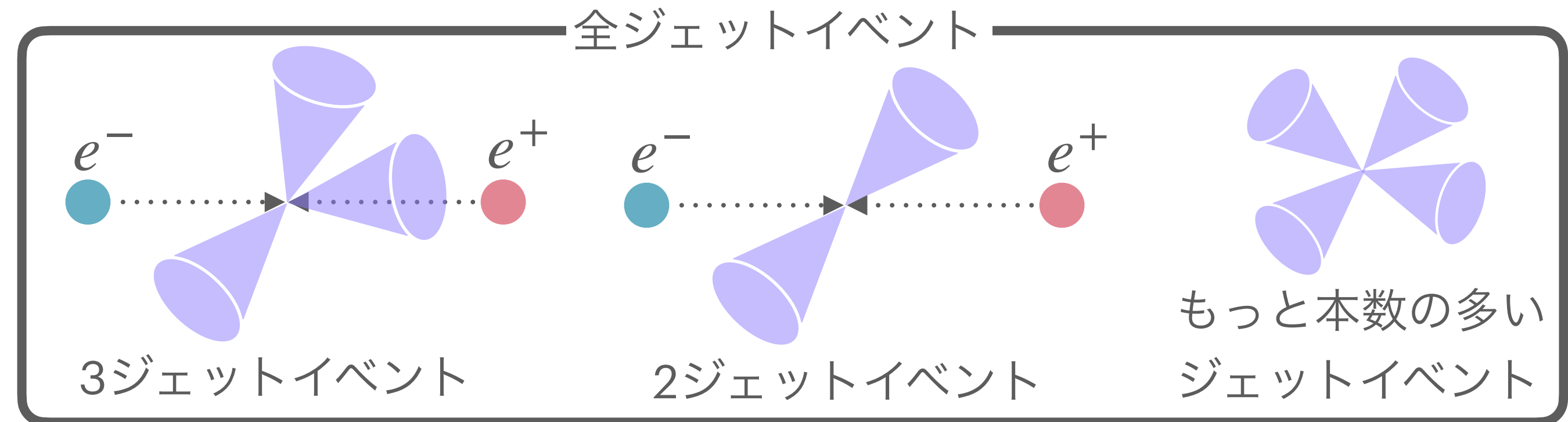
3ジェットイベント率の比 R_3^{bl} を定義

$$R_3^{bl} = \frac{N_{3b}/N_b}{N_{3l}/N_l}$$

$$= 1 + \frac{\alpha_s}{\pi} a_{LO} + \frac{m_b^2}{s} \left(b_{LO}(m_b) + \frac{\alpha_s}{\pi} b_{NLO}(m_b) \right)$$

a_{LO}, b_{LO} : LOの補正項 b_{NLO} : NLOの補正項

\sqrt{s} : 重心系エネルギー



N_b : $e^+e^- \rightarrow b\bar{b} \rightarrow$ 全ジェット イベント数

N_{3b} : $e^+e^- \rightarrow b\bar{b} \rightarrow$ 3ジェット イベント数

N_l : $e^+e^- \rightarrow l\bar{l} \rightarrow$ 全ジェット ($l = u \text{ or } d \text{ or } s$)

N_{3l} : $e^+e^- \rightarrow l\bar{l} \rightarrow$ 3ジェット イベント数 ($l = u \text{ or } d \text{ or } s$)

- 実験で得られた量にハドロン化・検出器の補正をしたパートンレベルの R_3^{bl} が理論予測と比較可能

本研究の目的

本研究の目的

250GeV ILCにおける **b** クォーク質量の測定精度をシミュレーションで見積もる

- 250GeV b クォーク質量の研究の意義
 1. 250GeVエネルギースケールまでのQCD(標準模型)の検証
 2. Z-poleより高いエネルギースケールでの b クォーク質量測定が新物理の手がかりになる

- 重心系エネルギーが大きくなると b クォーク質量は相対的に小さくなる

→ 高エネルギーでの b クォーク質量感度は低くなる

$$R_3^{bl} = \frac{N_{3b}/N_b}{N_{3l}/N_l} = 1 + \frac{\alpha_s}{\pi} a_{LO} + \frac{m_b^2}{s} \left(b_{LO}(m_b) + \frac{\alpha_s}{\pi} b_{NLO}(m_b) \right)$$

$$R_3^{bl} \text{ の } b \text{ クォーク質量感度 : } \Delta R_3^{bl} = 2 (1 - R_3^{bl}) \frac{\Delta m_b}{m_b}$$

$\Delta m_b = 0.4 \text{ GeV}$ での測定に必要な R_3^{bl} の精度

(R_3^{bl} と b クォーク質量は標準模型のものを使用)

重心系エネルギー	Z-pole ($\sim 90 \text{ GeV}$)	250 GeV
必要な R_3^{bl} の測定精度	$\sim 1\%$	$\sim 0.1\%$

解析の流れ

シミュレーションと解析の流れ

1. 信号/背景事象を生成 ◀.....
 - 信号事象： $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow Jets$, 背景事象：後で説明
 - パートンまでの R_3^{bl} を測定
 - ハドロン化後の R_3^{bl}
2. 検出器シミュレーション・イベント再構成
3. 背景事象のカット ◀.....
 - 検出後の R_3^{bl} を測定
4. ハドロン化・検出器の補正因子を見積もる
5. b クォーク質量の測定精度を見積もる

シミュレーションと解析の流れ

1. 信号/背景事象を生成

信号事象： $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow Jets$, 背景事象：後で説明

既に用意されているものを使用

2. 検出器シミュレーション・イベント再構成

3. 背景事象のカット

4. ハドロン化・検出器の補正因子を見積もる

5. b クォーク質量の測定精度を見積もる

今回自分がやった部分

解析の条件

■ プロセス： $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ ($q = u d s c b$)

■ 重心系エネルギー：250GeV

■ ルミノシティ：250fb⁻¹

■ 偏極率は2パターン

100% 左偏向：左巻き電子＋右巻き陽電子

100% 右偏向：右巻き電子＋左巻き陽電子

(-80%,+30%)

	電子	陽電子
左巻き成分	90%	35%
右巻き成分	10%	65%

$\mathcal{L} = 900\text{fb}^{-1}$

(+80%,-30%)

	電子	陽電子
左巻き成分	10%	65%
右巻き成分	90%	35%

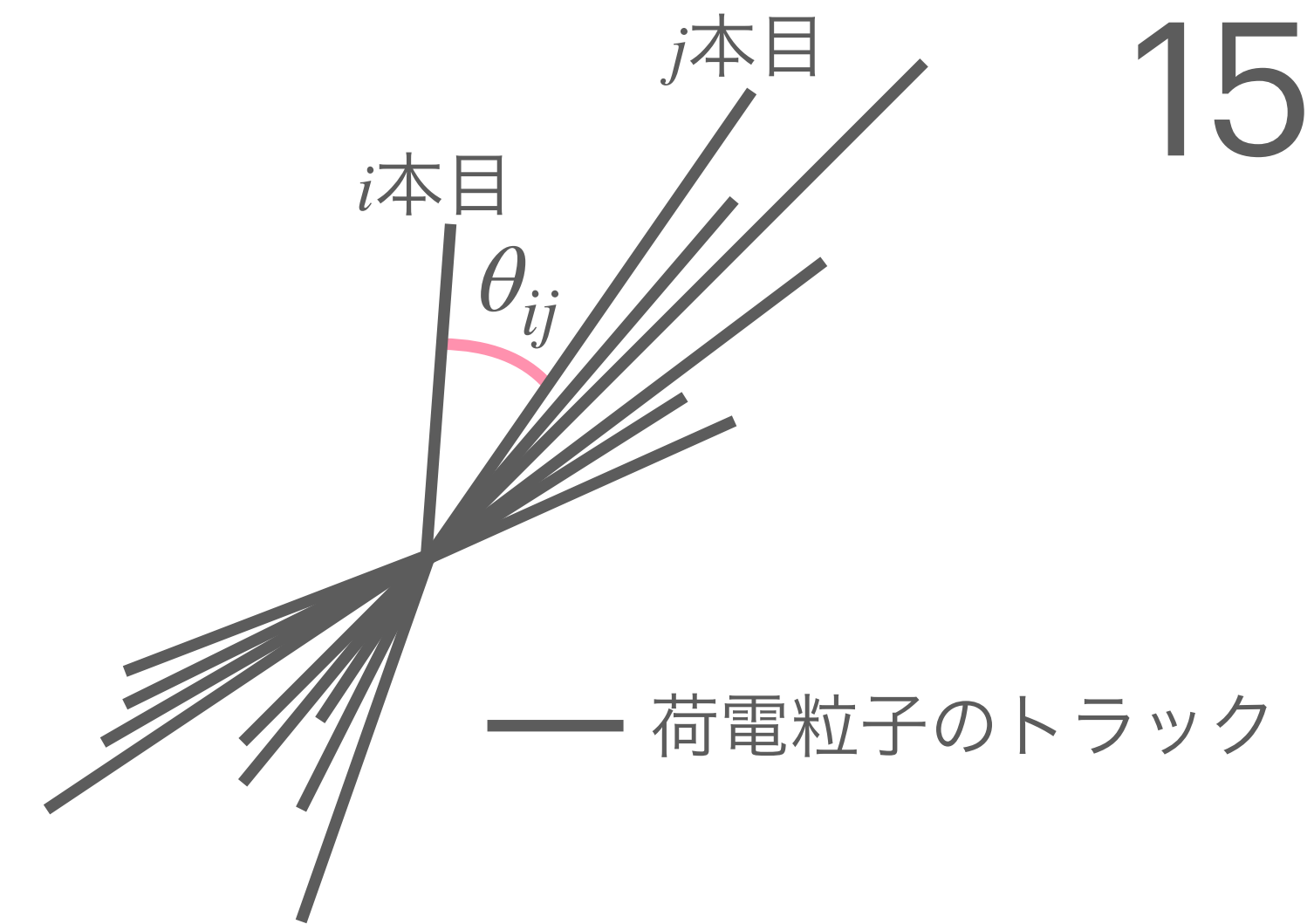
$\mathcal{L} = 900\text{fb}^{-1}$

ジェットの再構成

- トラックの*i*本目と*j*本目の間に d_{ij} を定義

$$d_{ij} = \min(E_i^2, E_j^2) \frac{1 - \cos \theta_{ij}}{1 - \cos R} \quad (R = 1.25) \quad E_i: \text{トラックのエネルギー}$$

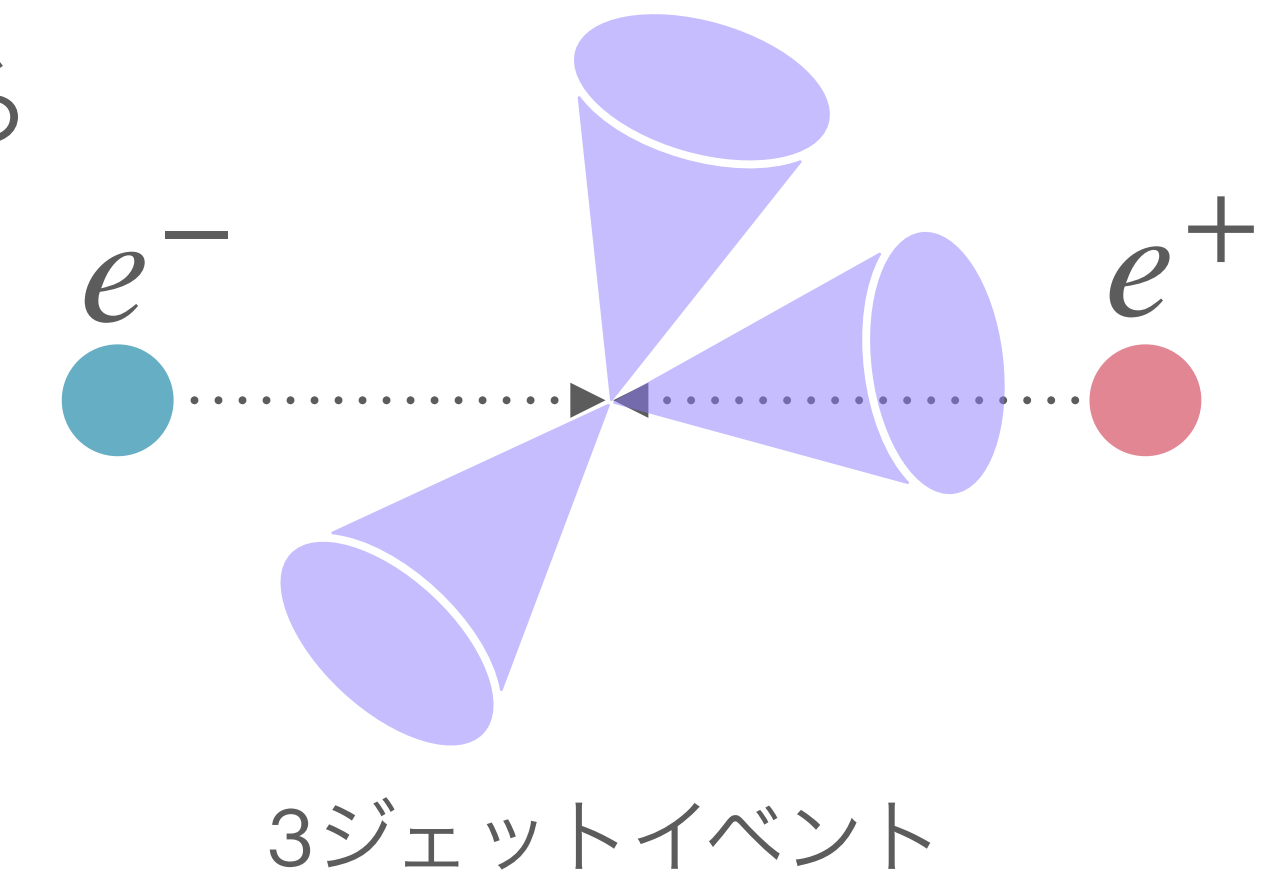
$d_{ij} < y_c$ ならばトラックは同じジェットに属すとする



- $y_c = 0.01$ で束ねた結果3本まで残ったものを3ジェットイベントとする

- y_c はジェットを定義するため R_3^{bl} は y_c 依存性をもつ

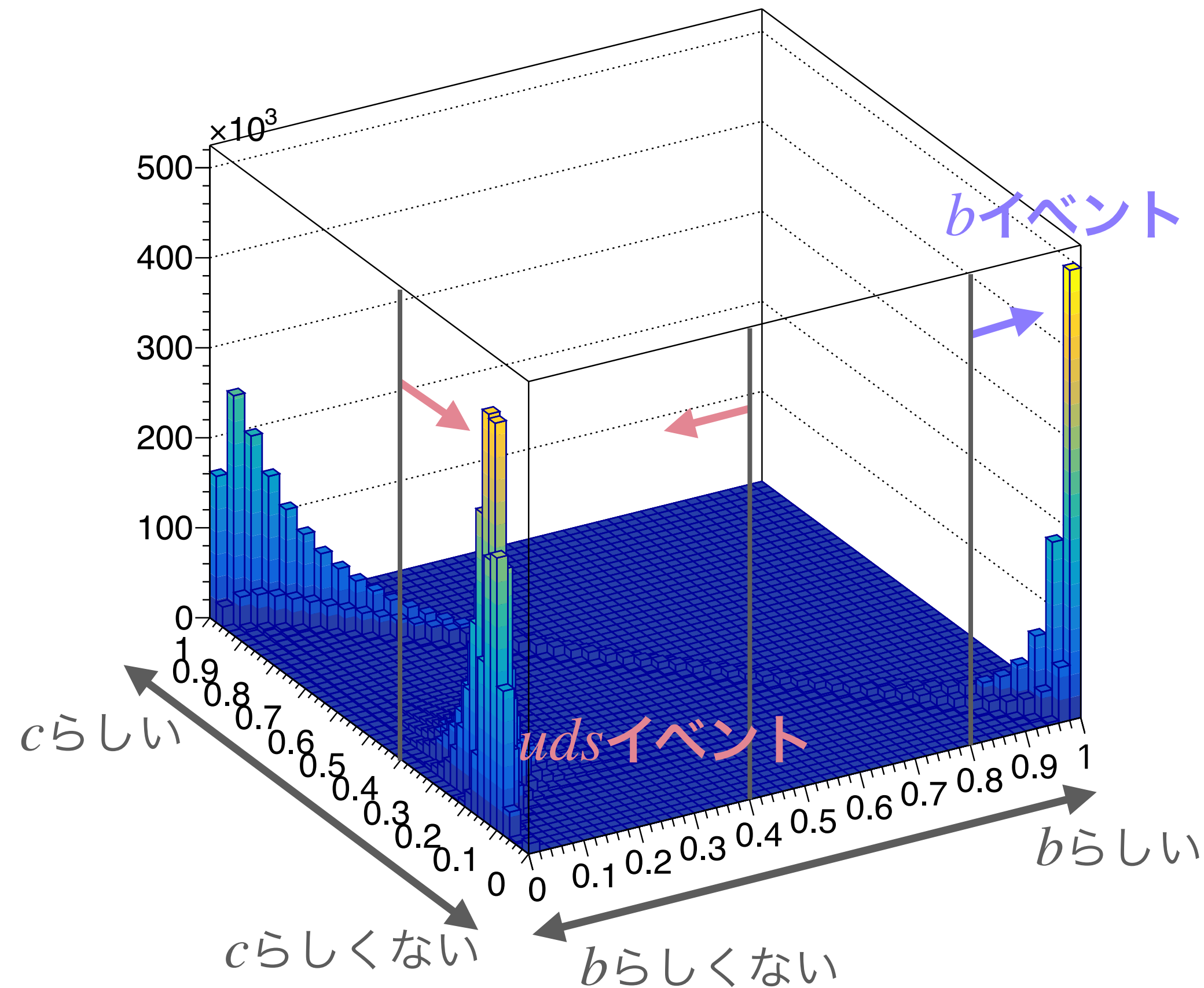
$$R_3^{bl} = \frac{N_{3b}/N_b}{N_{3l}/N_l} = 1 + \frac{\alpha_s}{\pi} a_{LO}(y_c) + \frac{m_q^2}{s} \left(b_{LO}(m_q, y_c) + \frac{\alpha_s}{\pi} b_{NLO}(m_q, y_c) \right)$$



- 背景事象の見積もりのために、 y_c を緩めながら2ジェットまで束ねる

フレーバー識別

- R_3^{bl} は b と uds を区別しているなのでフレーバーを同定する必要がある
- b, c クォークを含むイベントは衝突点から数100 μm 離れたところに崩壊点をもつ
→ 検出器で崩壊点等を検出、 b らしさ・ c らしさが出力される



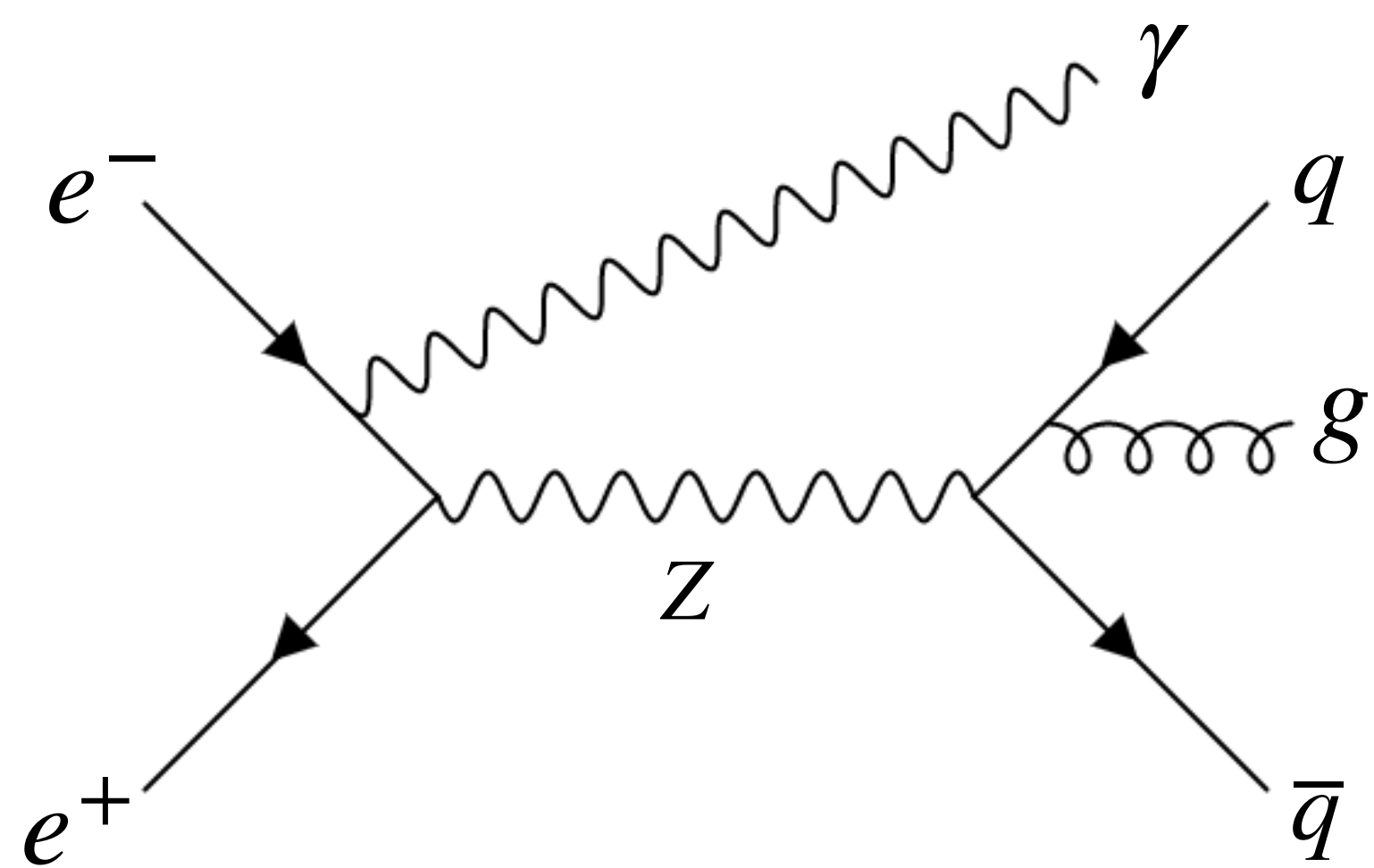
- 以下の条件を各ジェットに課す：
 b らしさ $> 0.8 \rightarrow b$ イベント
 b らしさ < 0.4 & c らしさ $< 0.25 \rightarrow uds$ イベント

b識別の効率	b識別の純度	uds識別の効率	uds識別の純度
80%	98.7%	58%	96.1%

b 識別の効率：MCの b をどれだけ識別できたか

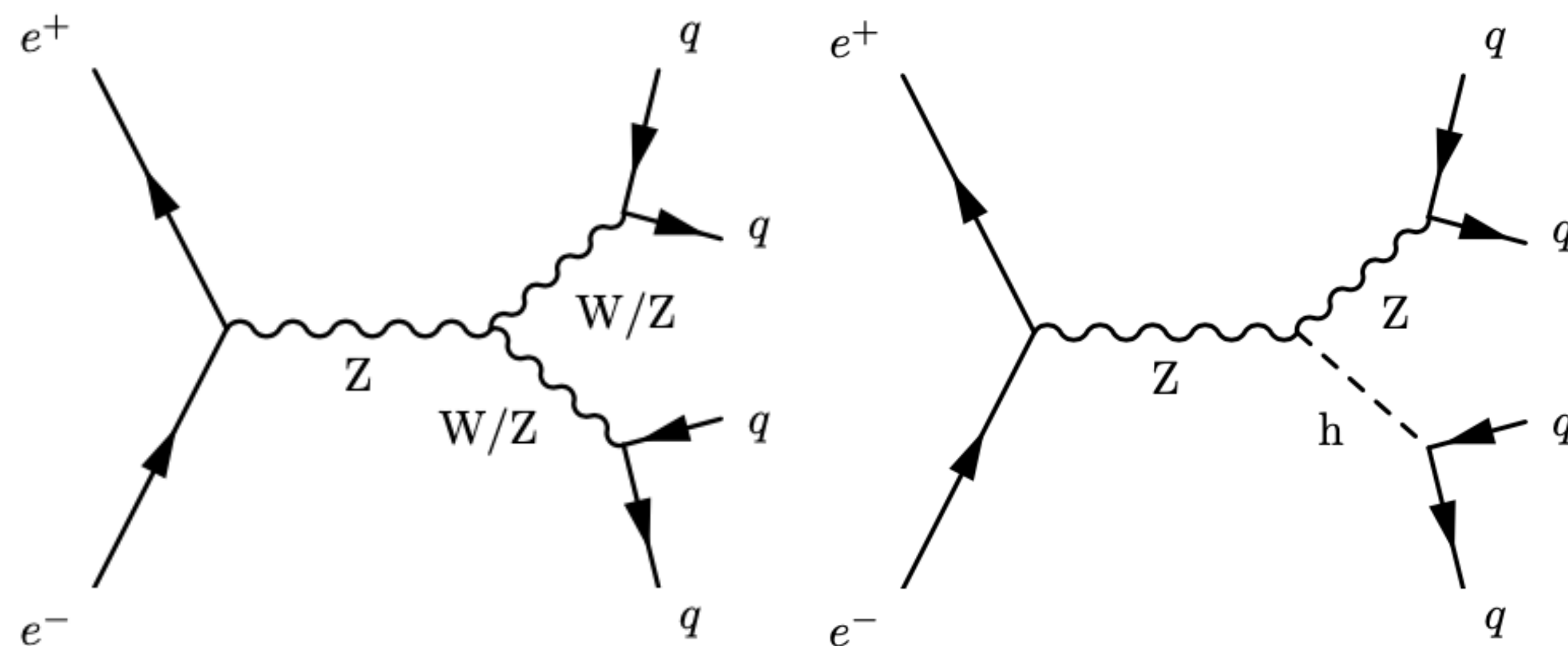
b 識別の純度： b と識別したものがどれくらいMCの b か

背景事象のカット



背景事象①：Radiative return

(輻射によって衝突のエネルギーが下がる)



背景事象②：ボゾン対生成イベント

(ジェットの再構成で誤認する可能性あり)

Radiative returnのカット

- 輻射がビームパイプ方向に出て検出できない場合

→ ジェットの角度で輻射のエネルギー K_γ を構成し、

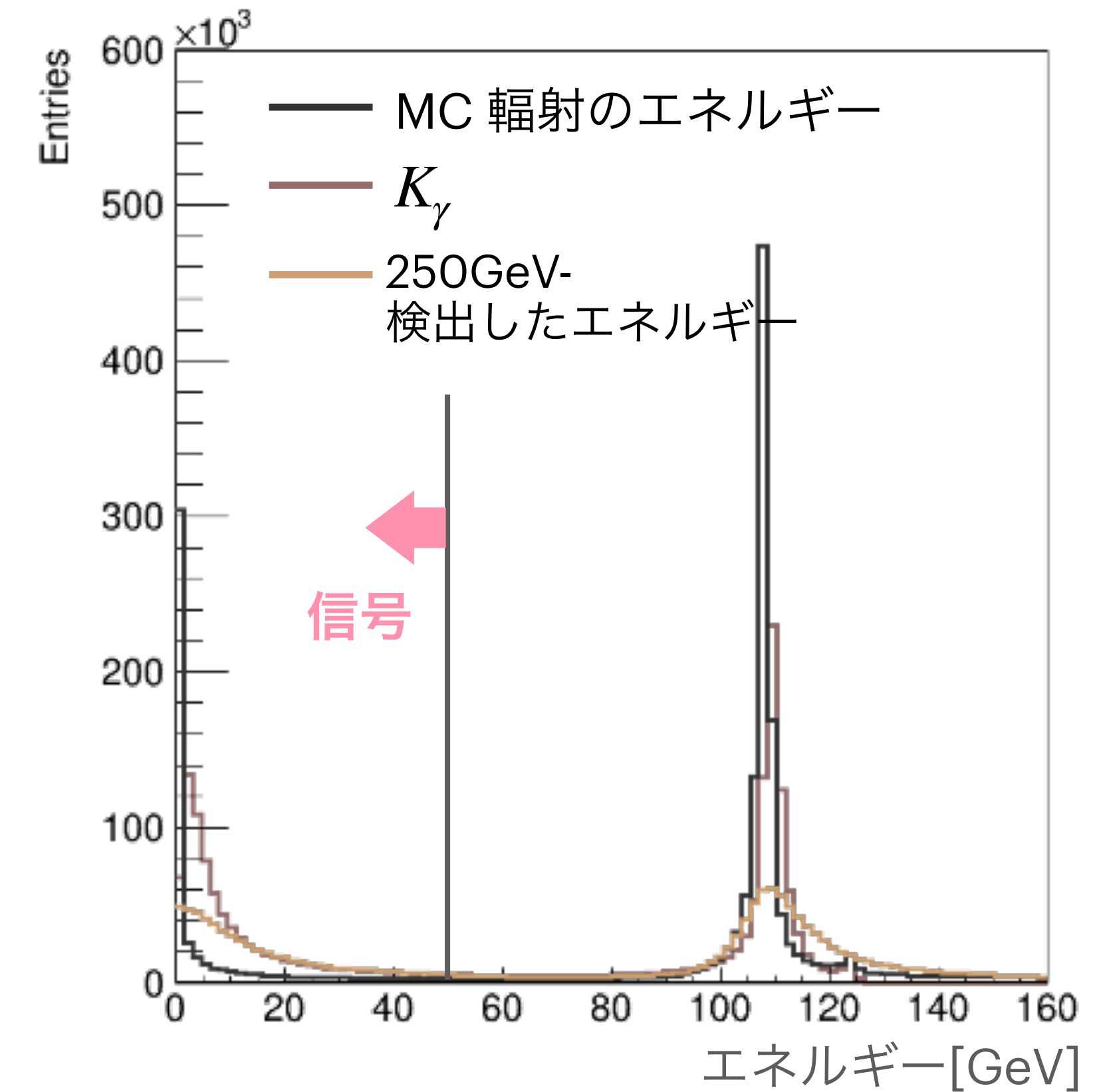
$K_\gamma > 50\text{GeV}$ をカットする

$$K_\gamma \equiv \frac{250\text{GeV} \cdot \sin \psi_{acol}}{\sin \psi_{acol} + \sin \theta_1 + \sin \theta_2}$$

ψ_{acol} : 2つのジェット間の角度
 θ_1, θ_2 : 各ジェットの極角

- 輻射が検出された場合は中性の再構成粒子を用いてカットする

1. ジェットの全体の不変質量が 130GeV 以下
2. 各ジェットに含まれる粒子は5個以下
3. $|\cos \theta| > 0.98$ でジェットに 50GeV 以上の中性粒子を含む



100% 左偏向	(残った背景事象数)/(選別された信号事象数)
bクォーク	1.0%
udsクォーク	1.1%

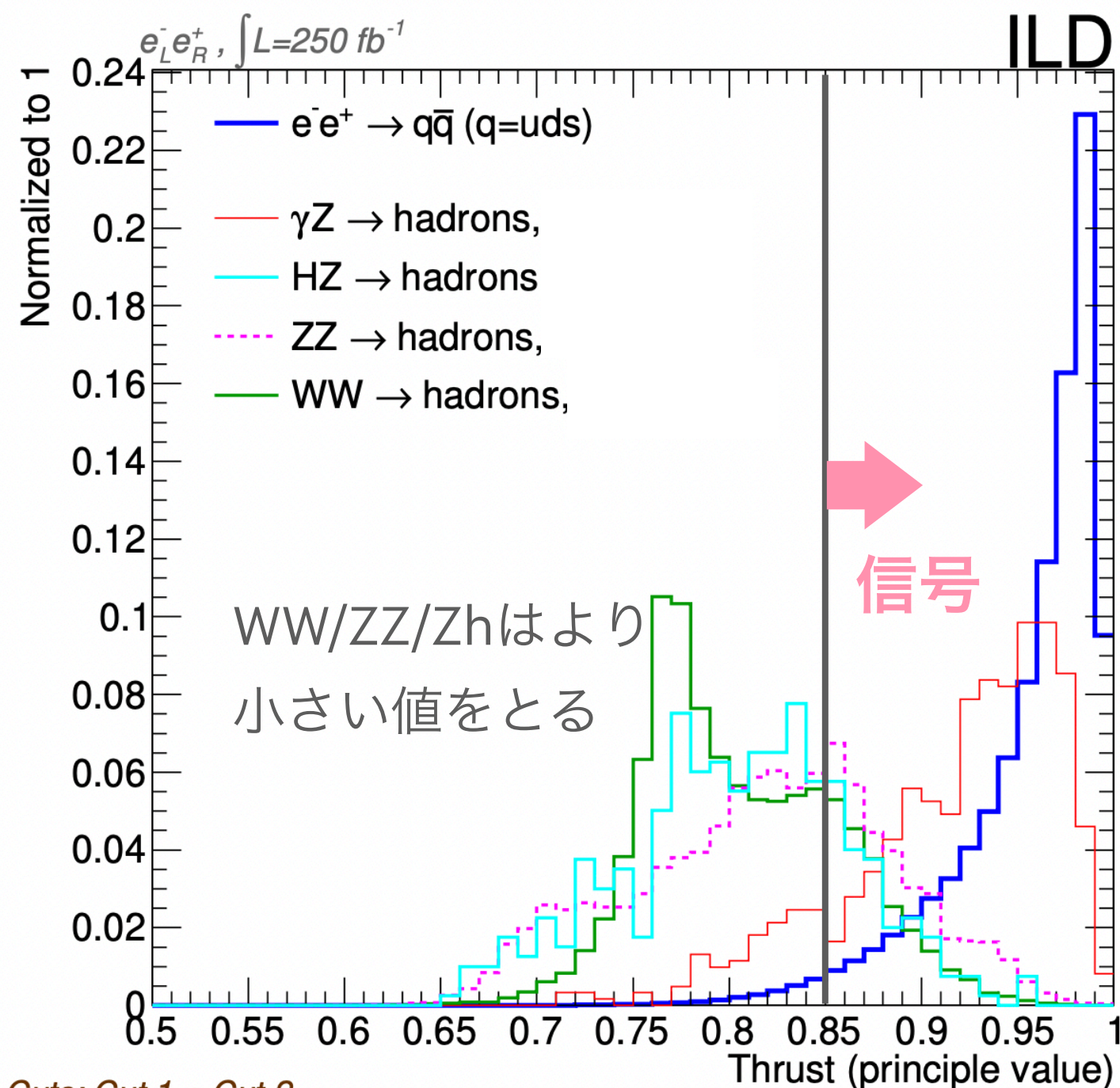
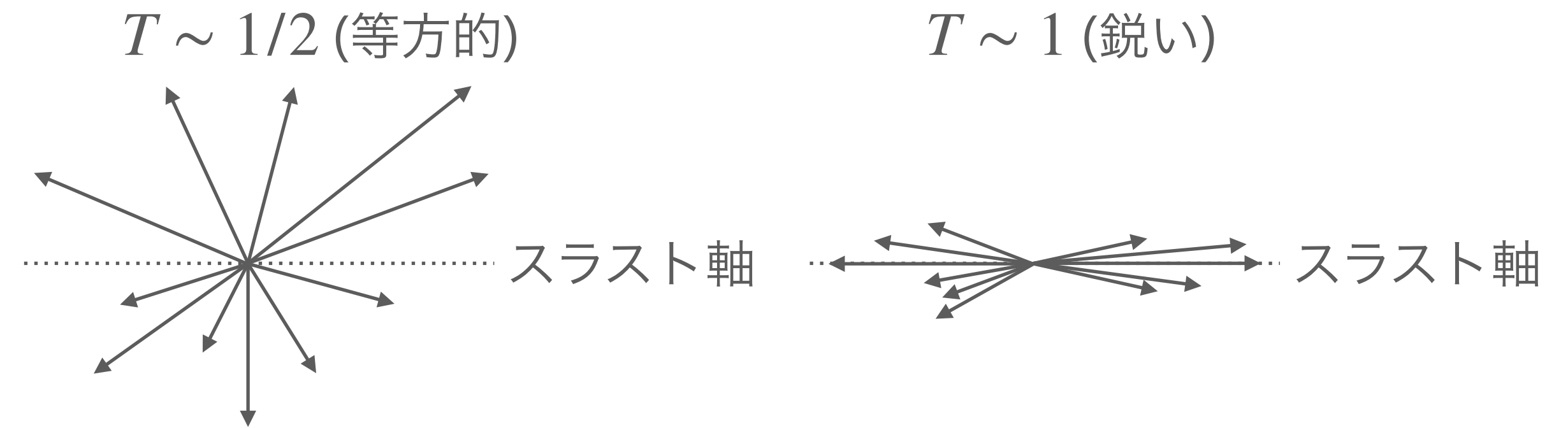
ボゾン対生成イベントのカット

- 本来4ジェットイベントのものが2ジェットイベントに再構成されるとジェットの形状は膨らむ

→スラスト T を使ってカットする (今回は $T > 0.85$ とした)

$$T \equiv \max_n \frac{\sum_i^N |\mathbf{p}_i \cdot \mathbf{n}|}{\sum_i^N p_i}$$

N : ジェット内の粒子の総数
 \mathbf{p}_i : 各粒子の運動量
 \mathbf{n} : スラスト軸方向の単位ベクトル



Cuts: Cut 1 + Cut 2
+ double light-quark tag

	(残った背景事象数)/(選別された信号事象数)		
	WW	ZZ	Zh
100% 左偏向			
bクォーク	0.0%	0.5%	1.4%
udsクォーク	2.1%	0.2%	0.0%
100% 右偏向			
bクォーク	0.0%	0.9%	1.0%
udsクォーク	0.0%	0.3%	0.1%

観測量の測定と考察

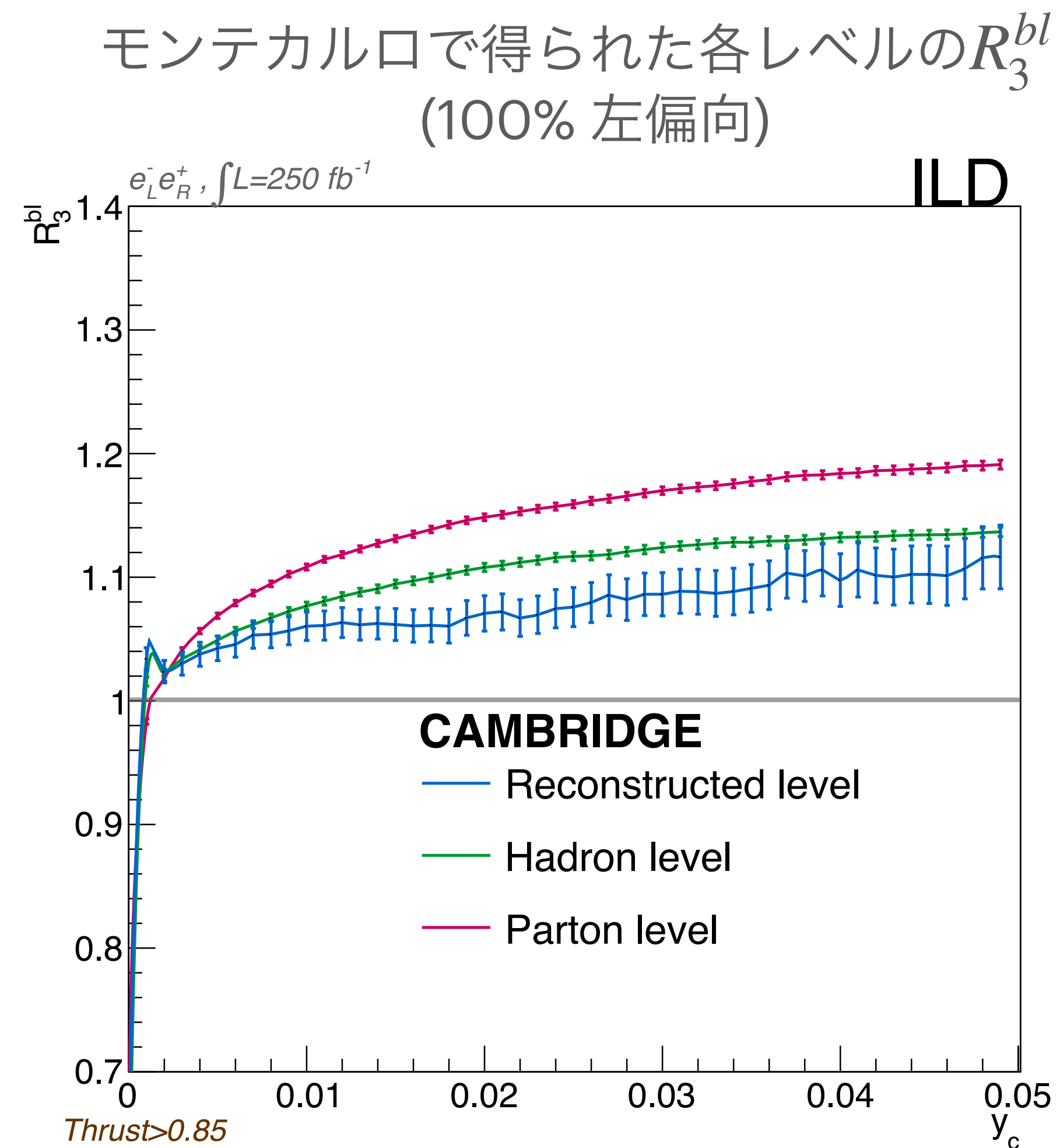
R_3^{bl} の測定結果

- 3つのレベルで信号事象数を数えて R_3^{bl} を測定する：

パートンレベル $R_3^{bl Par}$: パートンまで

ハドロンレベル $R_3^{bl Had}$: ハドロン化後

再構成レベル $R_3^{bl Rec}$: 検出後



- b は uds よりも重い $\rightarrow R_3^{bl} < 1$ になるはず $R_3^{bl} = \frac{N_{3b}/N_b}{N_{3l}/N_l}$

しかし実際は $R_3^{bl} > 1$ だった

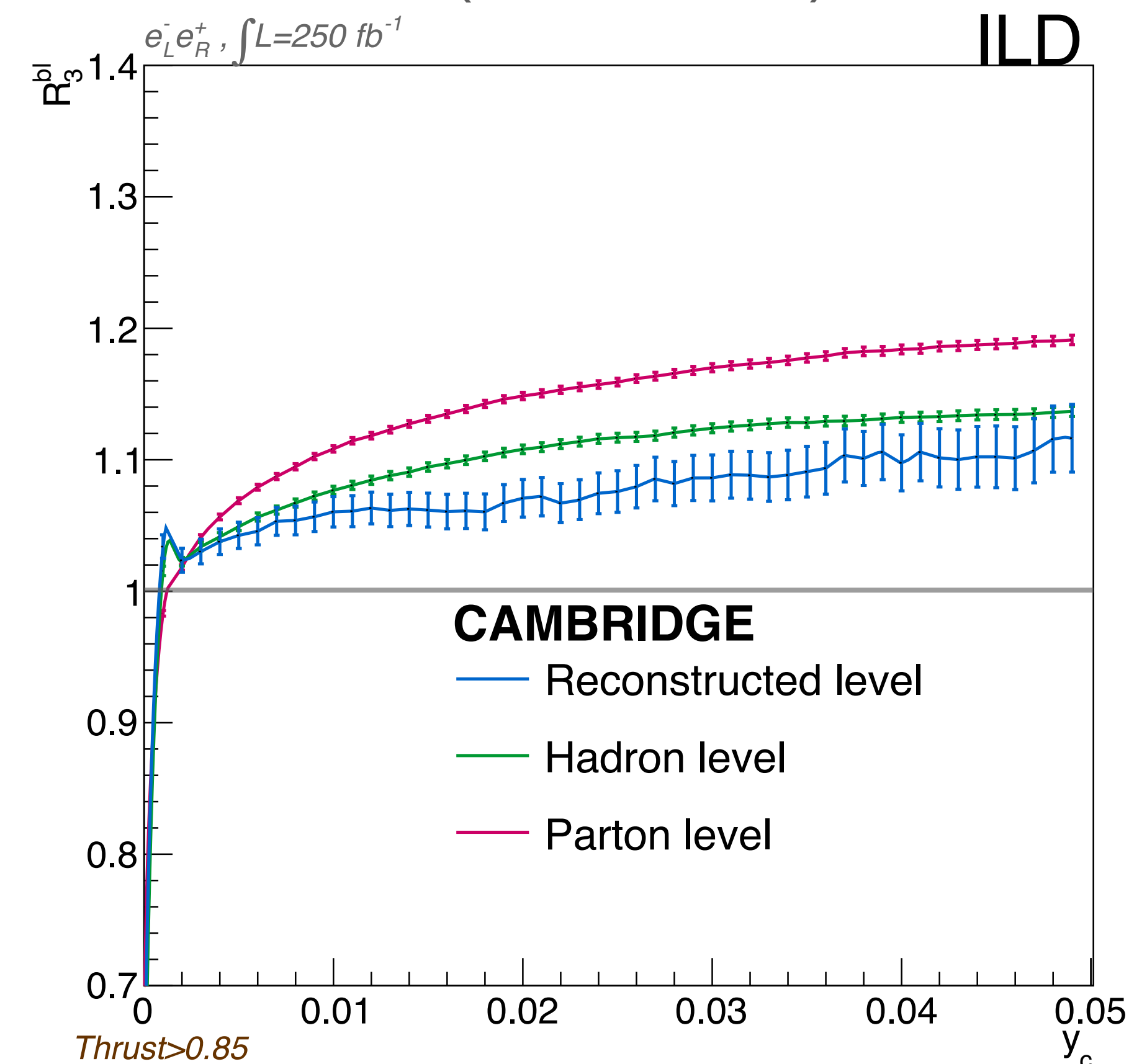
- さらに3ジェットイベント数が標準模型の計算よりも10倍ほど少ない
 \rightarrow モンテカルロに問題あり？

- モンテカルロを調べると...

b クォークがmassless、グルーオン放射はLOで計算されていた

\rightarrow 現在モンテカルロをNLO+massiveクォークへと改良中

モンテカルロで得られた各レベルの R_3^{bl}
(100% 左偏向)



誤差の見積もり

統計誤差の見積もり

- R_3^{bl} の統計誤差 :

$$R_3^{bl} = \frac{N_{3b}/N_b}{N_{3l}/N_l} \rightarrow \frac{\Delta R_3^{bl}}{R_3^{bl}}(stat.) = \frac{1}{\sqrt{N_{3b}}} + \frac{1}{\sqrt{N_{3l}}} + \frac{1}{\sqrt{N_b}} + \frac{1}{\sqrt{N_l}} \quad \begin{array}{l} N_{3q} : 3\text{ジェットイベント数} \\ N_q : \text{全ジェットイベント数} \end{array}$$

- 250GeV ILCの2ab⁻¹

偏極率(P_{e^-}, P_{e^+})	(-80%,+30%)	(+80%,-30%)	(-80%,-30%)	(+80%,+30%)
積分ルミノシティ	900fb ⁻¹	900fb ⁻¹	100fb ⁻¹	100fb ⁻¹

- 3ジェットイベントの比率は全体の30%を仮定

	全ジェットイベント数(MC)		3ジェットイベント数(仮定)	
	N_b	N_l	$N_{3b} = 0.3N_b$	$N_{3l} = 0.3N_l$
(-80%,+30%)	1,200,393	339,644	360,118	101,893
(+80%,-30%)	1,645,698	591,947	495,692	178,297

$$\frac{\Delta R_3^{bl}}{R_3^{bl}}(stat.) = 0.25 \% \text{ for } (-80\%, +30\%)$$

$$0.45 \% \text{ for } (+80\%, -30\%)$$

- ハドロン化モデルと検出器の効率に由来する系統誤差を考える

1. ハドロン化モデル由来： $C^{had} \equiv \frac{R_3^{bl\ Par}}{R_3^{bl\ Had}}$ の不定性を見積もる

2. 検出器の効率由来： $C^{det} \equiv \frac{R_3^{bl\ Had}}{R_3^{bl\ Rec}}$ の不定性を見積もる

パートンレベル

再構成レベル

$$R_3^{bl\ Par} = C^{had} C^{det} R_3^{bl\ Rec}$$

ハドロン化と検出器の
補正因子

系統誤差の見積もり結果

■ ハドロン化由来の誤差

ジェットが細くなることで誤認が減り、一方でハドロン化への理解も深まると考えて

LEPの結果の半分 $\Delta C^{had} / C^{had} = 0.1\%$ とした

■ 検出器由来の誤差

ジェットイベント数に寄与する下の3つの要素に不定性を与えて C^{det} へ伝播した不定性を見積もる

	各要素の不定性	C^{det} に伝播した不定性	
		100% 左偏向	100% 右偏向
フレーバー識別	0.5%	0.07%	0.06%
信号事象の選択	1%	0.06%	0.06%
背景事象の混入	1%	0.20%	0.10%
Total	—	0.22%	0.13%

ジェットの本数やフレーバーに共通した不定性はキャンセルし、 C^{det} には小さい不定性が現れる

結果とまとめ

本研究の結果

- R_3^{bl} の誤差見積もり :

$$\frac{\Delta R_3^{bl}}{R_3^{bl}} = 0.25(stat.) \pm 0.22(exp.) \pm 0.1(had.) [\%] \text{ for } (-80 \% , +30 \%)$$

$$\frac{\Delta R_3^{bl}}{R_3^{bl}} = 0.45(stat.) \pm 0.13(exp.) \pm 0.1(had.) [\%] \text{ for } (+80 \% , -30 \%)$$

- b クォーク質量の誤差見積もり :

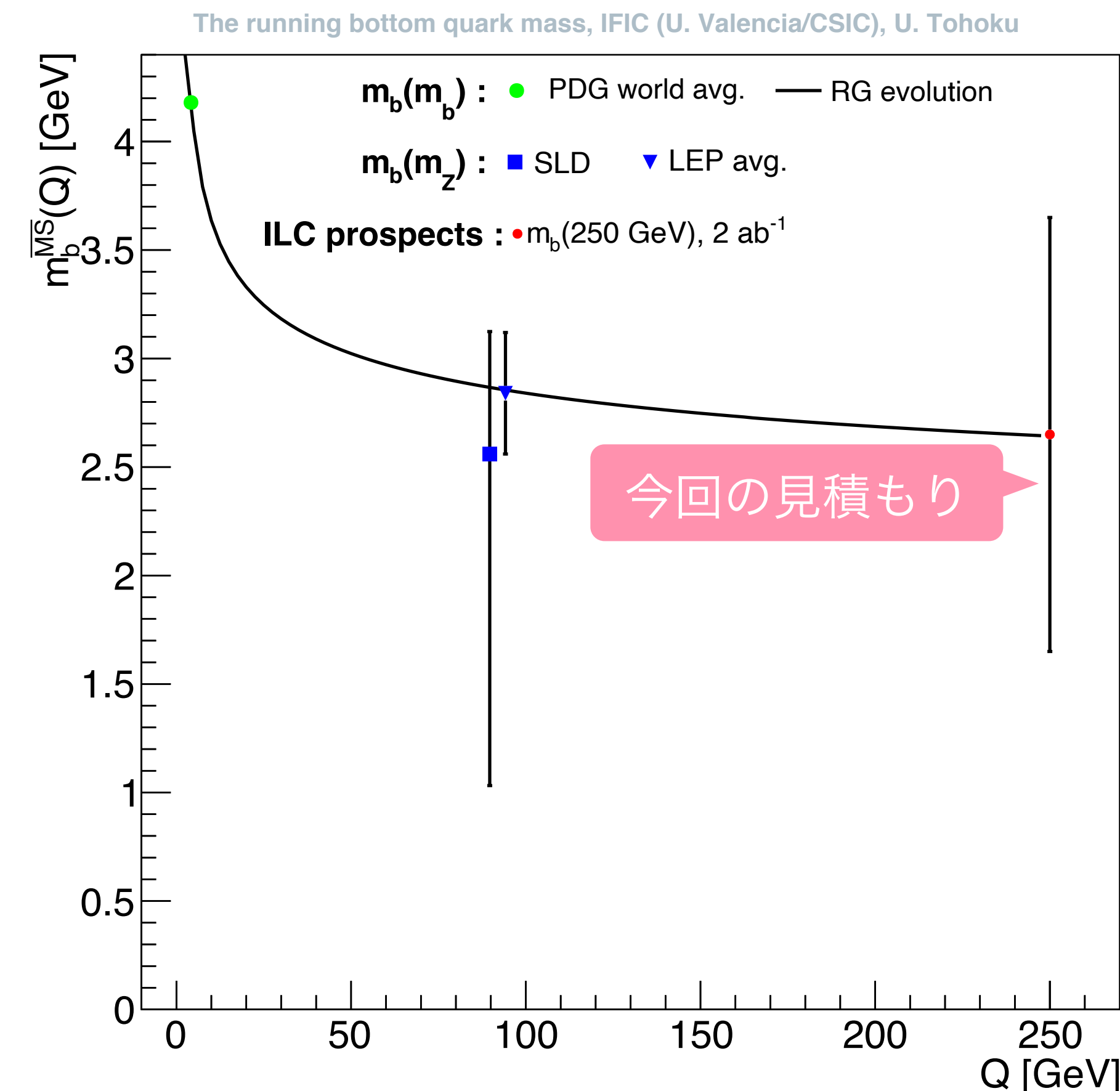
$$R_3^{bl} \text{ の } b \text{ クォーク質量感度 } \Delta R_3^{bl} = 2 (1 - R_3^{bl}) \frac{\Delta m_b}{m_b} \text{ で伝播させる}$$

$R_3^{bl} = 0.996$ 、 $m_b = 2.75\text{GeV}$ での測定誤差 :

$$\Delta m_b (250) = 0.85(stat.) \pm 0.75(exp.) \pm 0.34(had.) \pm 0.07(theo.)\text{GeV for } (-80 \% , +30 \%)$$

$$\Delta m_b (250) = 1.53(stat.) \pm 0.44(exp.) \pm 0.34(had.) \pm 0.07(theo.)\text{GeV for } (+80 \% , -30 \%)$$

理論的不定性 : 繰り込みスケールやクォーク質量の定義、strong couplingに由来



精度向上へのシナリオ

■ 250GeV ILCでのルミノシティアップグレード

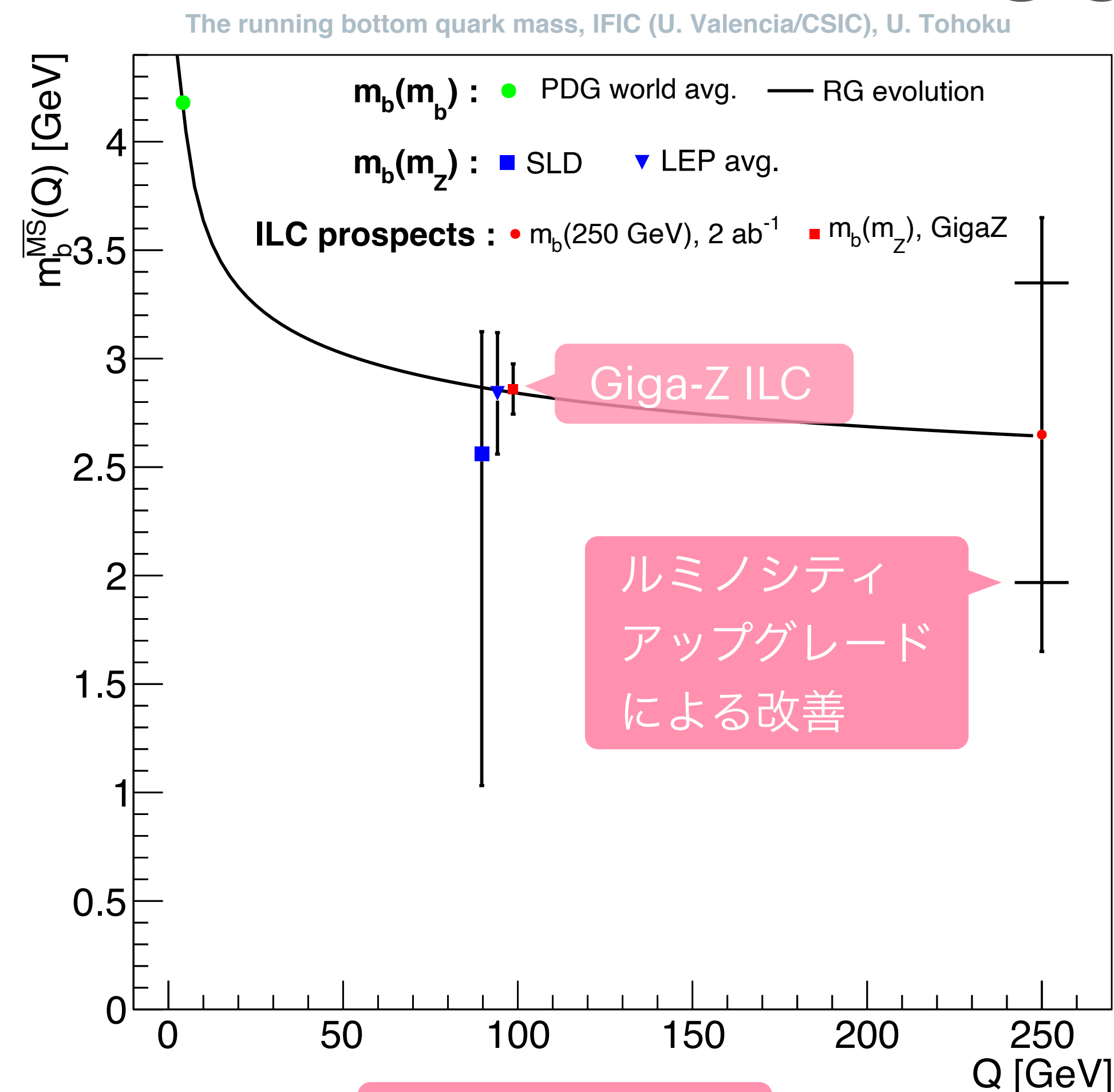
衝突頻度を2倍にすると積分ルミノシティも2倍になる
→統計誤差は $1/\sqrt{2}$ 倍の改善が期待される

■ Giga-Z ILC (ILC@Z-pole)

Z-poleではLEPの時から統計やmachineの性能も向上するため
LEPを上回る精度で測定できる：

LEPの精度： $\Delta m_b(M_Z) = 0.18(stat.) \pm 0.13(exp.) \pm 0.19(had.) \pm 0.12(theo.) GeV$ **22%の測定精度**

ILCの精度： $\Delta m_b(M_Z) = 0.02(stat.) \pm 0.02(exp.) \pm 0.09(had.) \pm 0.06(theo.) GeV$ **3.8%の測定精度**



- 250GeV ILCでの測定精度：

$$\frac{\Delta R_3^{bl}}{R_3^{bl}} = 0.25(stat.) \pm 0.22(exp.) \pm 0.1(had.) \text{ for } (-80\%, +30\%)$$

$$\frac{\Delta R_3^{bl}}{R_3^{bl}} = 0.45(stat.) \pm 0.13(exp.) \pm 0.1(had.) \text{ for } (+80\%, -30\%)$$

$$\Delta m_b(250) = 0.85(stat.) \pm 0.75(exp.) \pm 0.34(had.) \pm 0.07(theo.) \text{ GeV} \\ \text{for } (-80\%, +30\%)$$

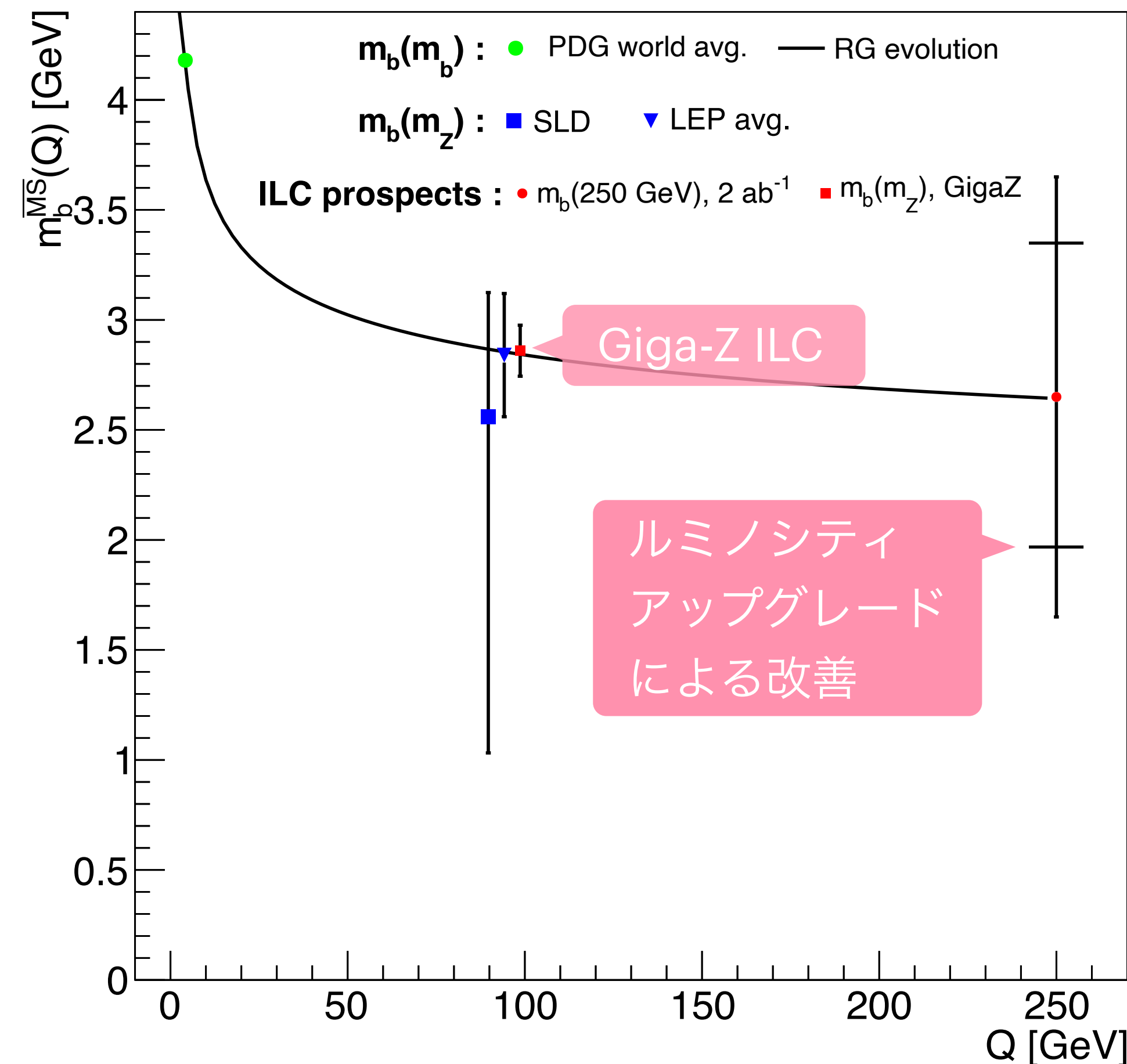
$$\Delta m_b(250) = 1.53(stat.) \pm 0.44(exp.) \pm 0.34(had.) \pm 0.07(theo.) \text{ GeV} \\ \text{for } (+80\%, -30\%)$$

- モンテカルロに改善すべき点があり、現在authorにより改良中

- Giga-Z ILCではLEPを上回る精度で測定が可能：

$$\Delta m_b(M_Z) = 0.02(stat.) \pm 0.02(exp.) \pm 0.09(had.) \pm 0.06(theo.) \text{ GeV}$$

The running bottom quark mass, IFIC (U. Valencia/CSIC), U. Tohoku



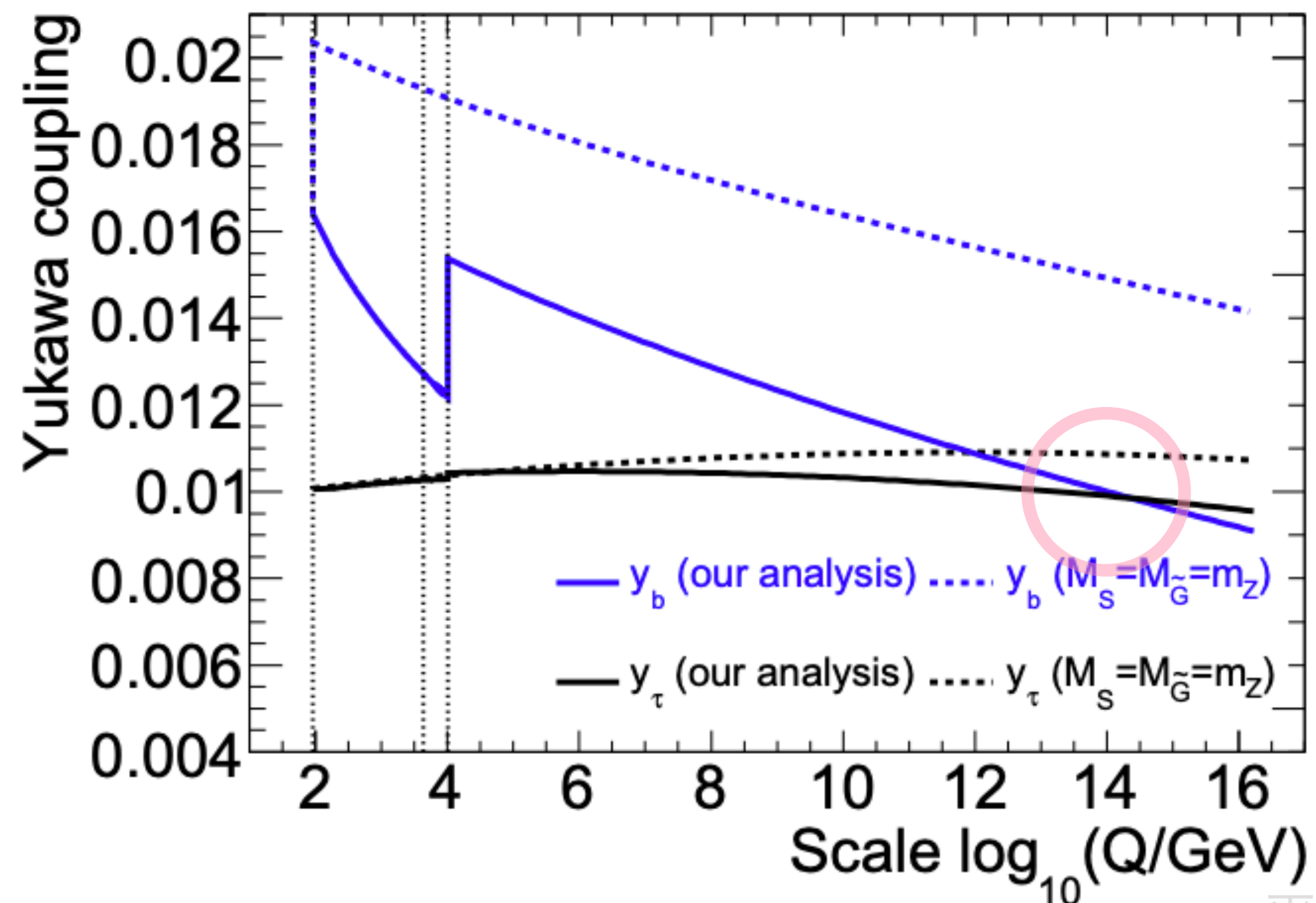
バックアップ

第3世代粒子の統一について

- SUSY Higgsの真空期待値の比 $\tan \beta$ によってシナリオが変わる [arXiv:1201.4412](https://arxiv.org/abs/1201.4412) [hep-ph]
[arXiv:1604.02156](https://arxiv.org/abs/1604.02156) [hep-ph]

$\tan \beta \sim 3 - 11$: b, τ Yukawa結合が統一される

$\tan \beta \sim 35 - 60$: t, b, τ Yukawa結合が統一される

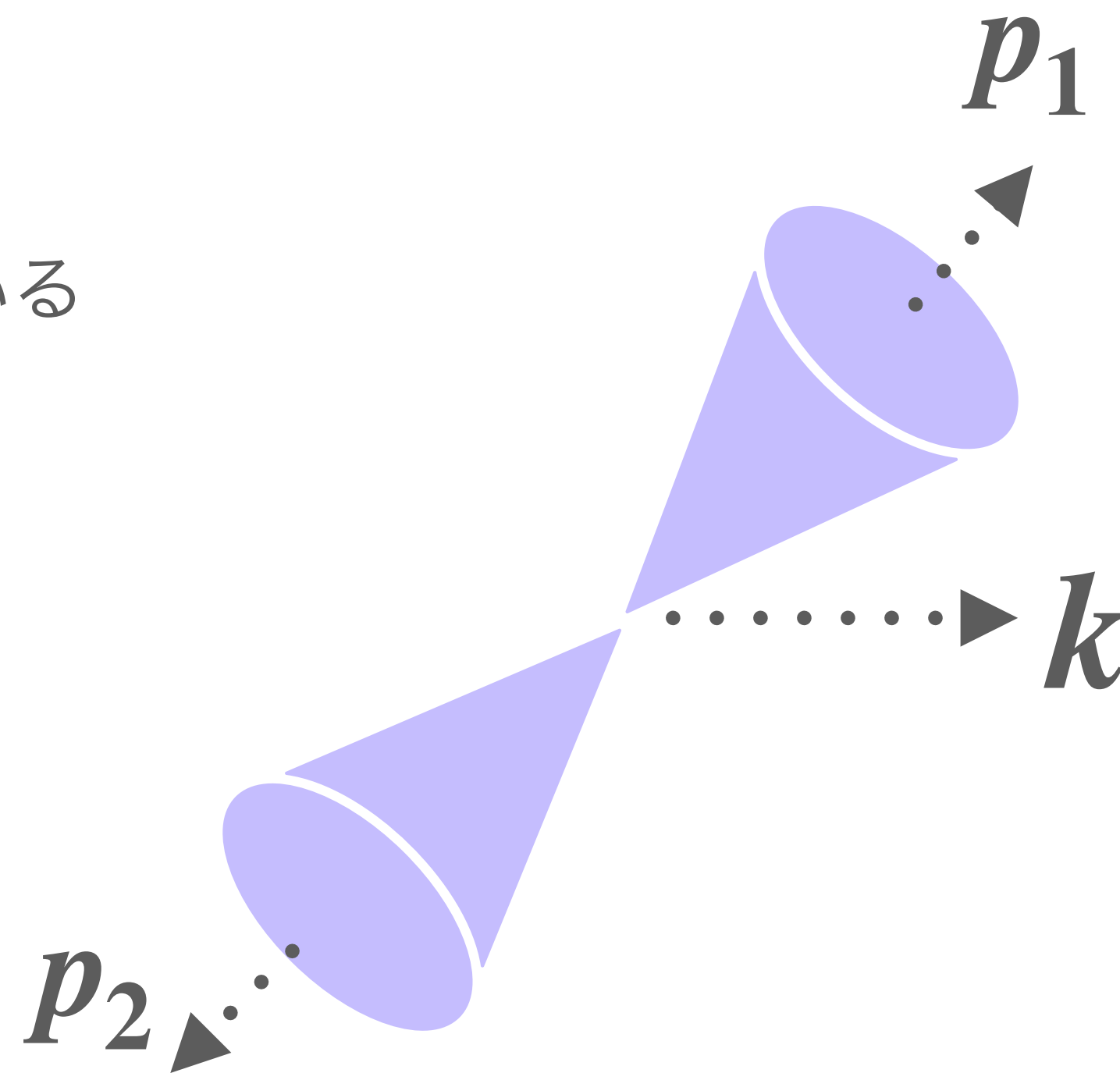


K_γ について

- エネルギーと運動量の保存則を用いる

$$\mathbf{k} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2, \quad k^0 = p_1^0 + p_2^0$$

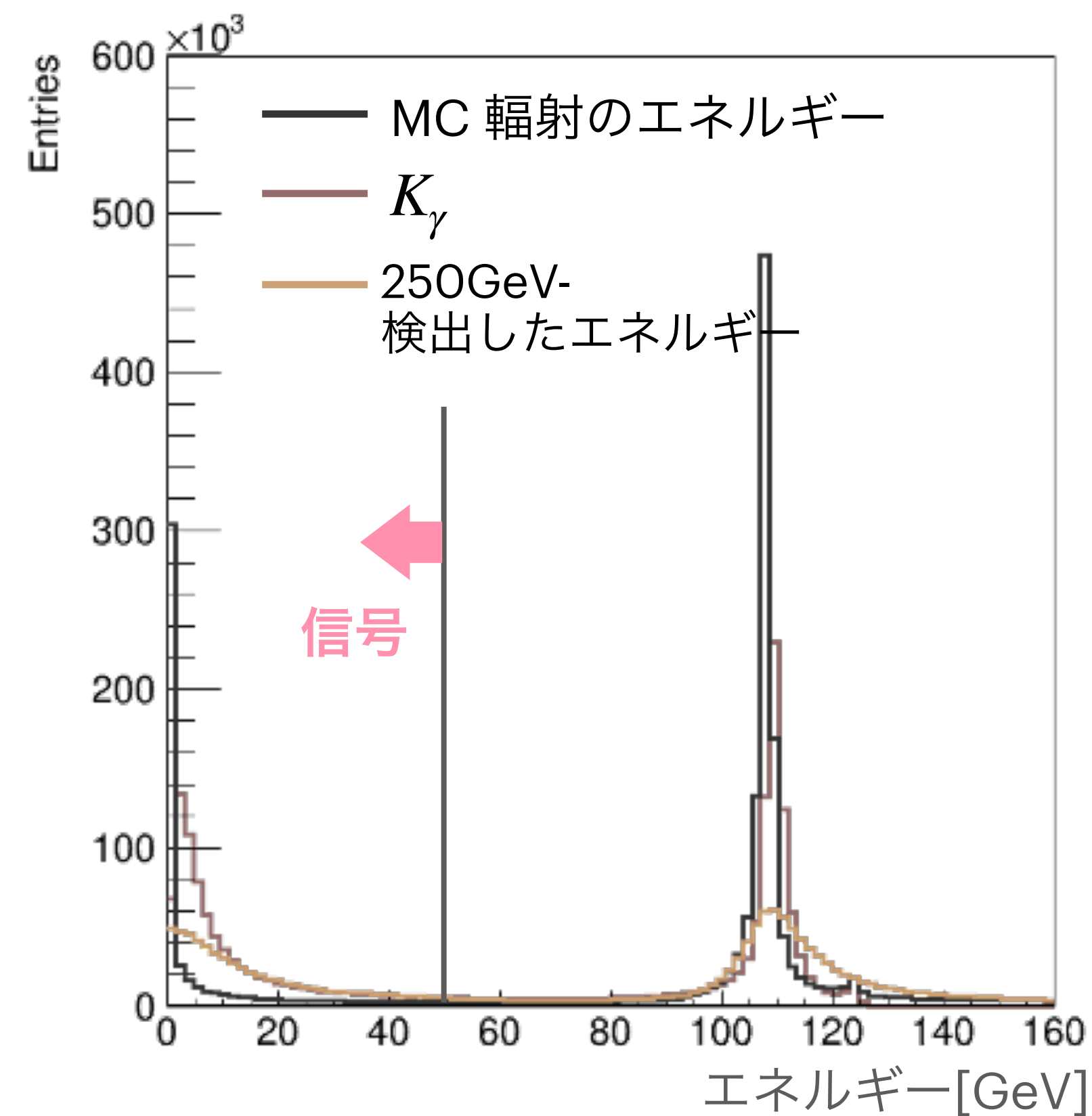
$$\sin \psi_{acol} = \frac{|\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2|}{|\mathbf{p}_1| \cdot |\mathbf{p}_2|}$$



- $\sim 110\text{GeV}$ のピークは重心系エネルギーがZ-poleに戻ることを意味する

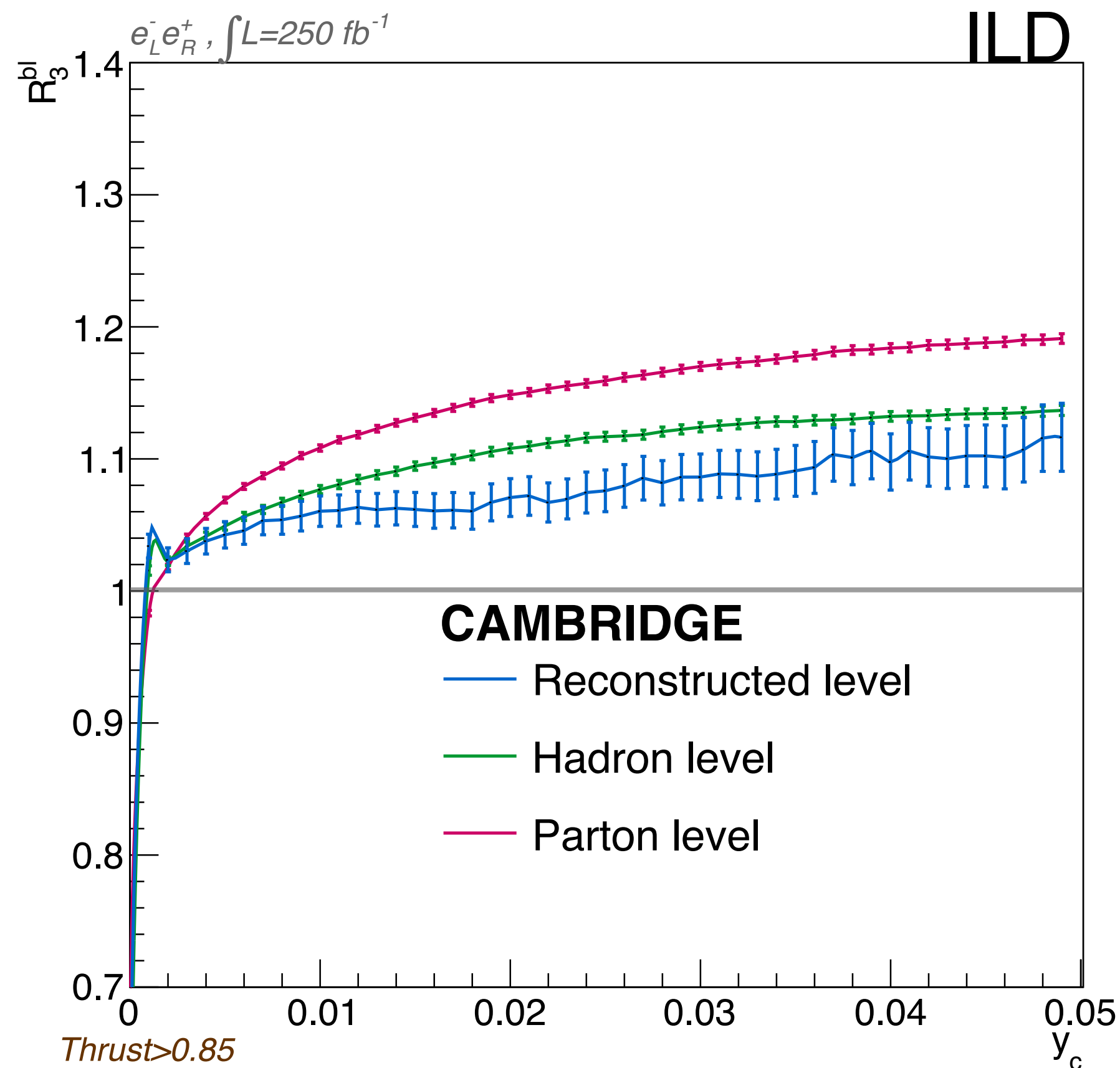
$$\sqrt{s} = 2\sqrt{E_1 E_2} \quad E_1: \text{電子のエネルギー}, \quad E_2: \text{陽電子のエネルギー}$$

$$E_2 = 125\text{GeV} - 110\text{GeV} \text{ とすると } \sqrt{s} \sim 90\text{GeV} \text{ となる}$$

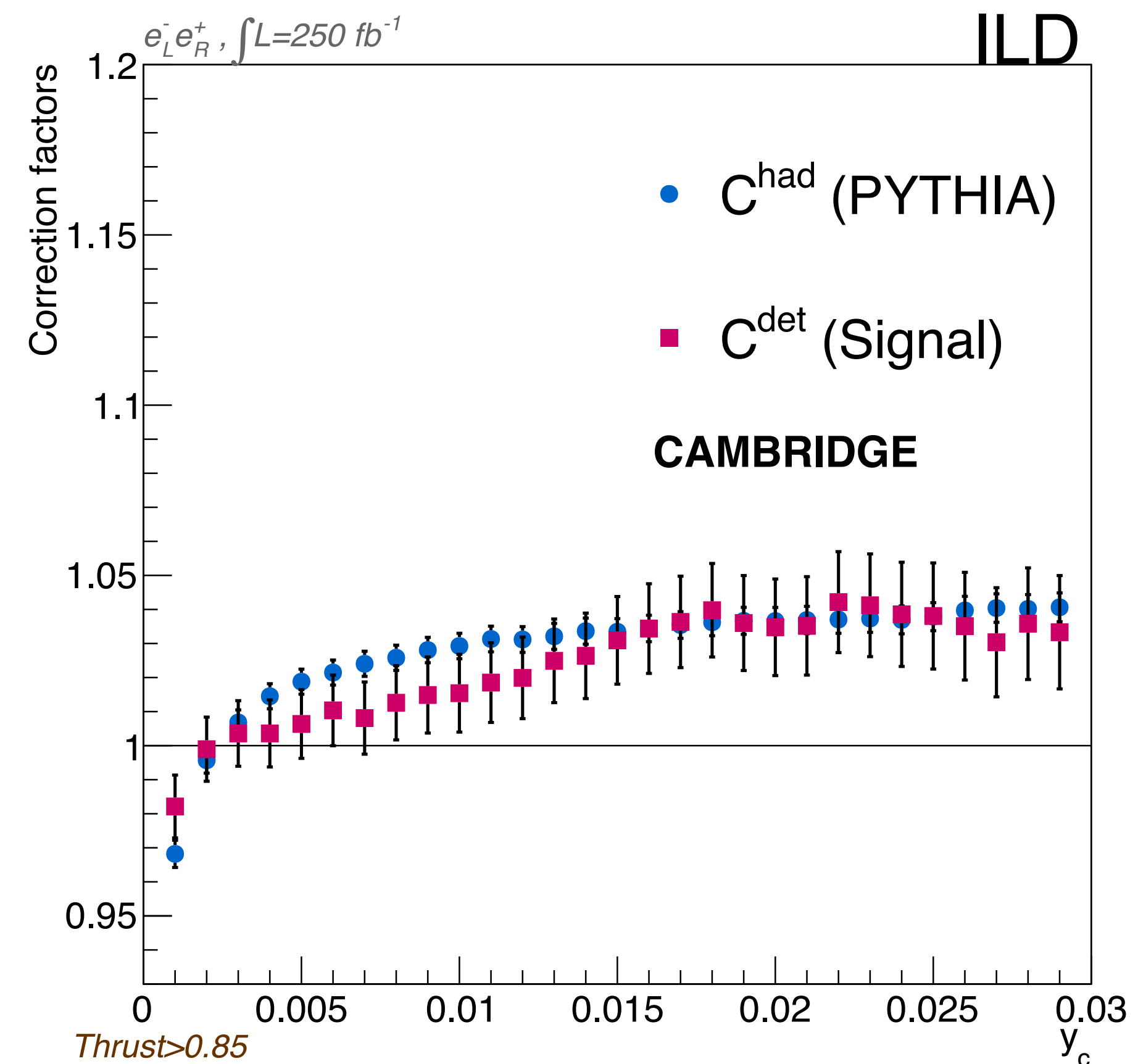


補正因子の大きさ

モンテカルロで得られた各レベルの R_3^{bl}
(100% 左偏向)



パートンレベルへの補正因子
(100% 左偏向)



$$C^{had} \equiv \frac{R_3^{bl \text{ Par}}}{R_3^{bl \text{ Had}}} \quad C^{det} \equiv \frac{R_3^{bl \text{ Had}}}{R_3^{bl \text{ Rec}}}$$

LEPでのハドロン化不定性の見積もり

ハドロン化をシミュレーションするモデルとしてHERWIGとPYTHIAを使用

異なるモデルやパラメータを使った時の C^{had} に現れる不定性を見積もる [arXiv:hep-ex/0603046](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0603046)

効いてくる要素

- ・ハドロン化のモデルの違い
- ・モデル内のチューニングパラメータの不定性
- ・モデル内の b クォーク質量の設定の仕方

H20シナリオの偏極

(+80%,+30%)

	電子	陽電子
左巻き成分	10%	35%
右巻き成分	90%	65%

$$\mathcal{L} = 100\text{fb}^{-1}$$

$$e_L^- e_R^+ : 17\text{fb}^{-1}$$

(-80%,-30%)

	電子	陽電子
左巻き成分	90%	65%
右巻き成分	10%	35%

$$\mathcal{L} = 100\text{fb}^{-1}$$

$$e_L^- e_R^+ : 83\text{fb}^{-1}$$

(-80%,+30%)

	電子	陽電子
左巻き成分	90%	35%
右巻き成分	10%	65%

$$\mathcal{L} = 900\text{fb}^{-1}$$

$$e_L^- e_R^+ : 846\text{fb}^{-1}$$

(+80%,-30%)

	電子	陽電子
左巻き成分	10%	65%
右巻き成分	90%	35%

$$\mathcal{L} = 900\text{fb}^{-1}$$

$$e_L^- e_R^+ : 50\text{fb}^{-1}$$

$$\sigma(P_{e^-}, P_{e^+}) = \frac{1}{4} \left((1 - P_{e^-}) (1 + P_{e^+}) \sigma_L + (1 + P_{e^-}) (1 - P_{e^+}) \sigma_R \right)$$

$$\text{偏極率} : P_{e^{-(+)}} \equiv \frac{f_R - f_L}{f_R + f_L}$$

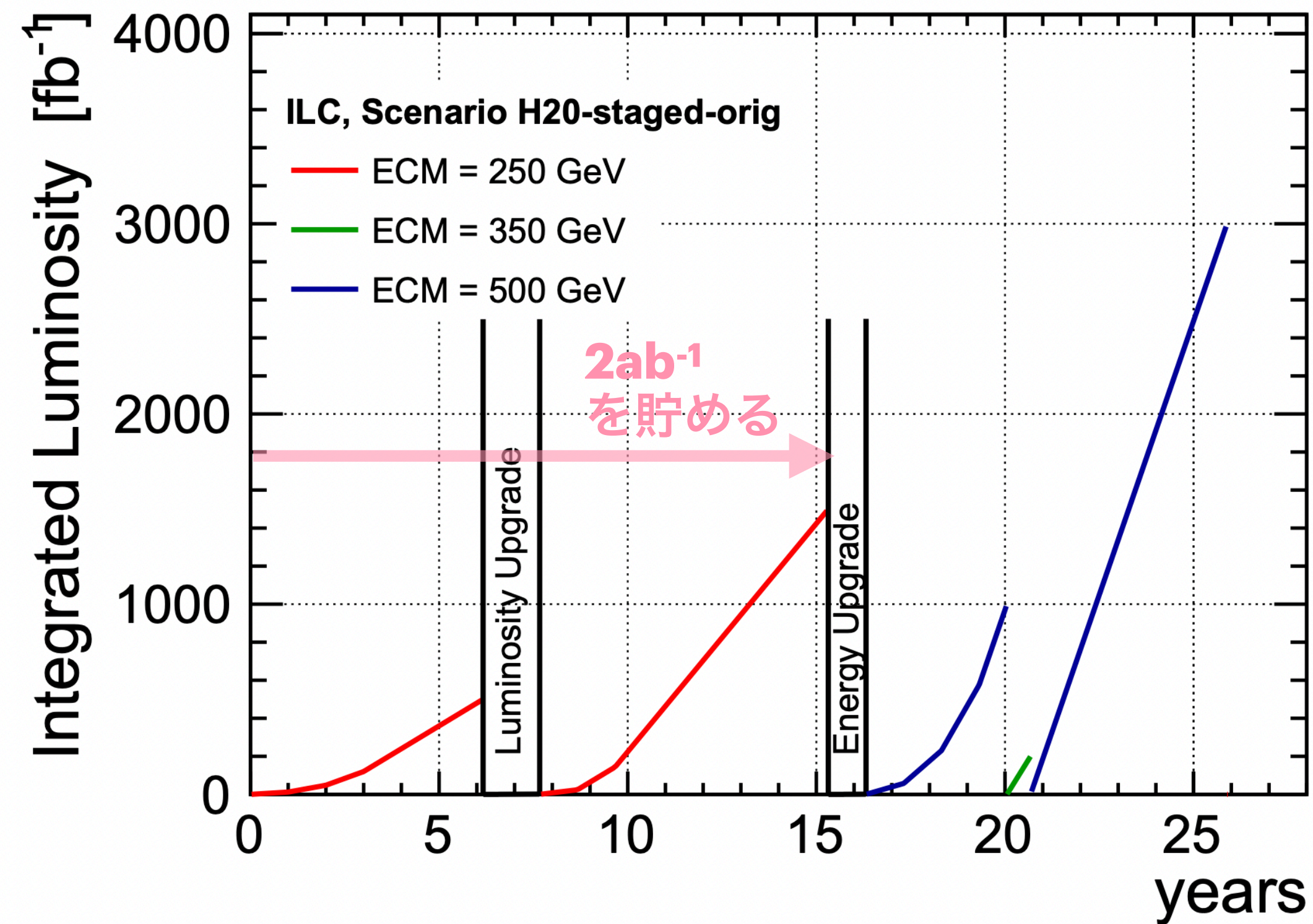
f_L : バンチ中の左巻き成分の割合
 f_R : バンチ中の右巻き成分の割合

H20シナリオとルミノシティアップグレード

H20シナリオでは $2ab^{-1}$ の積分ルミノシティを取得することが予定されているが、

衝突頻度を2倍にするオプションを使うとルミノシティは2倍になる

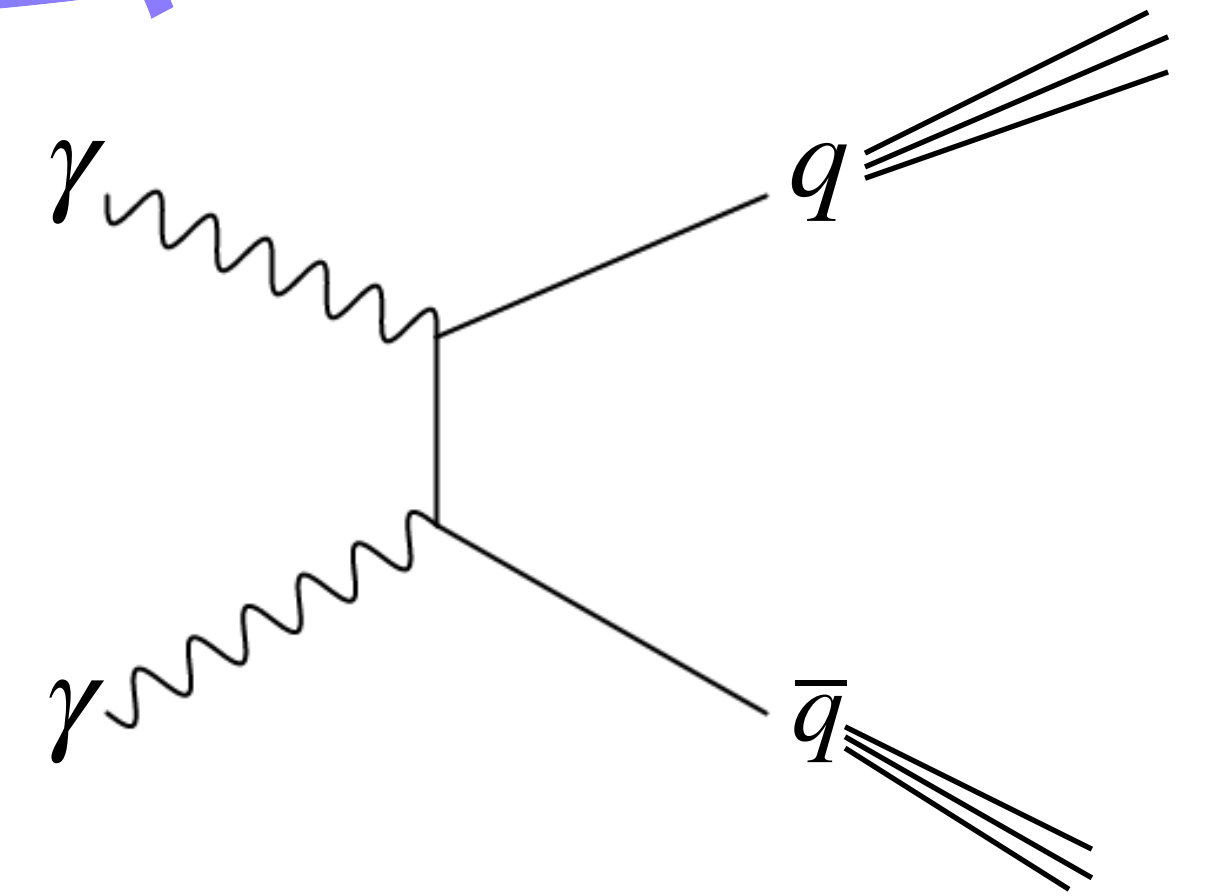
(ただしmachineに500GeV ILCと同程度の性能が要求される)



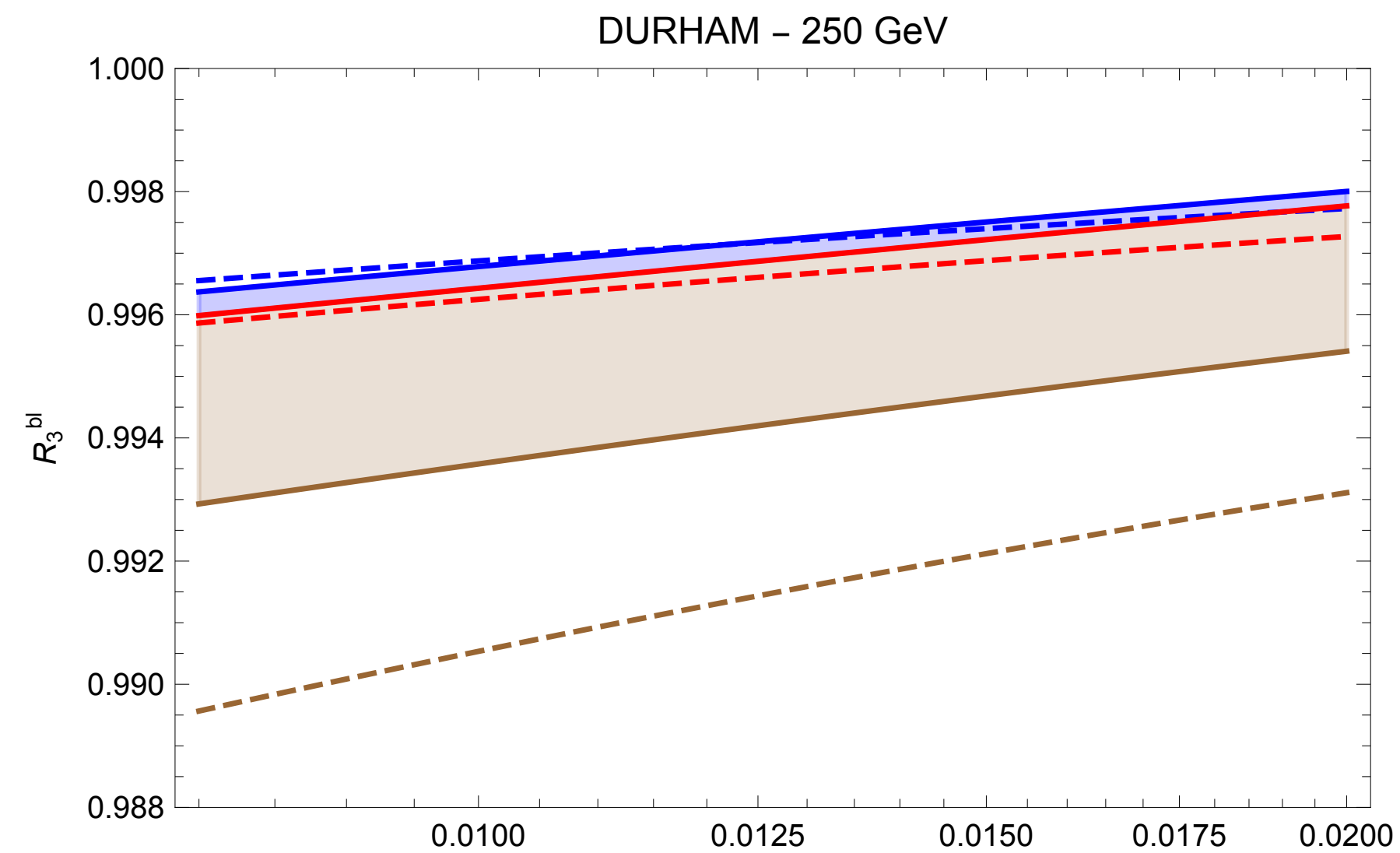
arXiv:1903.01629 [hep-ex]

ジェットクラスタリングアルゴリズム

$\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ は低横運動量を持つ傾向があり、
 ビーム軸に近い粒子を取り除くことでカットできる
 Cambridgeアルゴリズムはこの仕組みが備わっており、
 そうでないもの(DURHAMアルゴリズムetc)に比べて理論的不定性が小さい

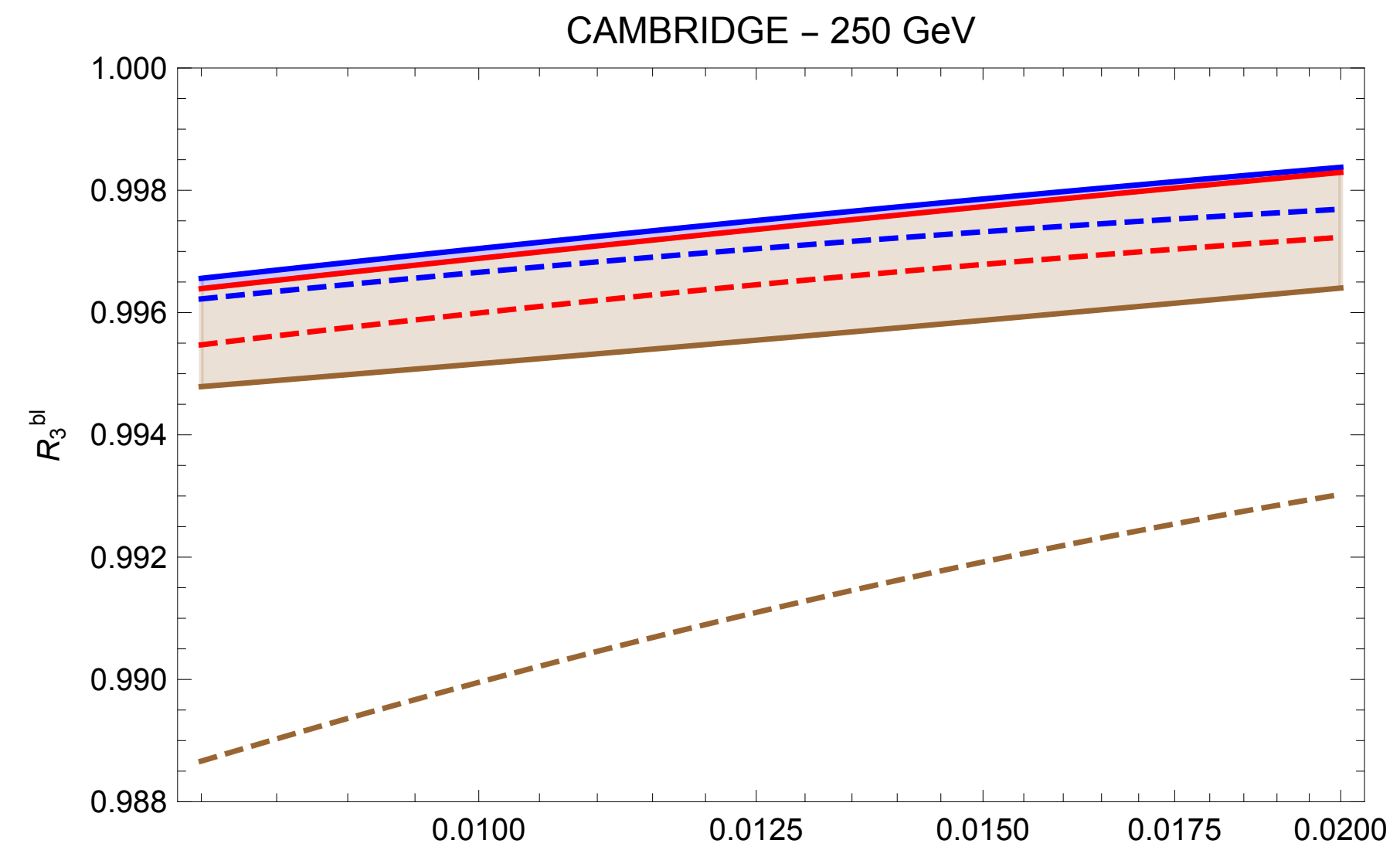


DURHAMアルゴリズムを用いた R_3^{bl} の理論計算



— NLO - - - - LO — $\mu = \sqrt{s}$ (Pole mass) — $\mu = \sqrt{s}/2$ — $\mu = 2\sqrt{s}$

CAMBRIDGEアルゴリズムを用いた R_3^{bl} の理論計算



$m_b(m_b)$ の値について

最左の結果はPDGのworld averageを使用

$$m_b(m_b) = 4.18^{+0.03}_{-0.02} \text{ GeV}$$

寄与する主な実験：

ZEUS実験 @ HERA (2018) [arXiv:1804.01019](https://arxiv.org/abs/1804.01019) [hep-ex]

電子-陽子深非弾性散乱がb massに依存することをを用いる

BABAR実験 @ PEP-II (2009) [arXiv:0908.0415](https://arxiv.org/abs/0908.0415) [hep-ex]

Belle実験 @ KEKB (2008) [arXiv:0803.2158](https://arxiv.org/abs/0803.2158) [hep-ex]

B中間子のsemi-leptonic崩壊(e.g. $B \rightarrow X_c l \nu_l$)がb massに依存することをを用いる

