

Search for new physics
by a time-dependent CP violation analysis of
the decay $B \rightarrow K_s \eta \gamma$ using the Belle detector

(Belle実験における $B \rightarrow K_s \eta \gamma$ 崩壊の
時間に依存した CP の破れの解析による
新物理の探索)

素粒子実験研究室

中野浩至

2014年1月30日

目次

$B^0 \rightarrow K_s \eta \gamma$ 解析

1

動機や実験装置の紹介
(D論 1-3章)

2

モンテカルロシミュレーションを用いた、
再構成とBG除去方法の決定。
(D論 4-5章)

3

CP非対称性のパラメーターをフィットする、
 Δt 分布の解析
(D論 6-7章)

4

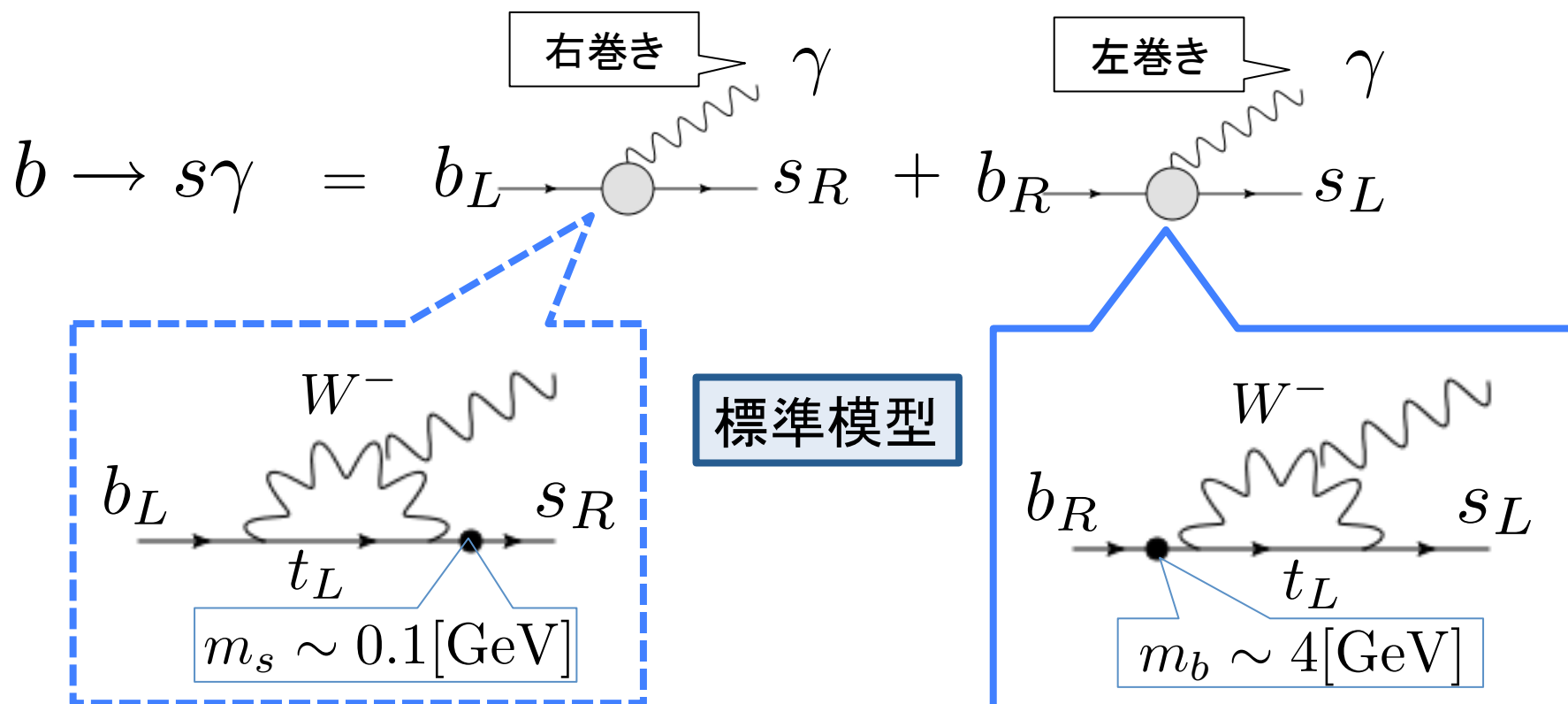
時間依存CP非対称性の測定結果。
系統誤差の評価および、考察。
(D論 7-10章 + α)

動機・実験装置

$b \rightarrow s \gamma$ 崩壊の光子の偏極

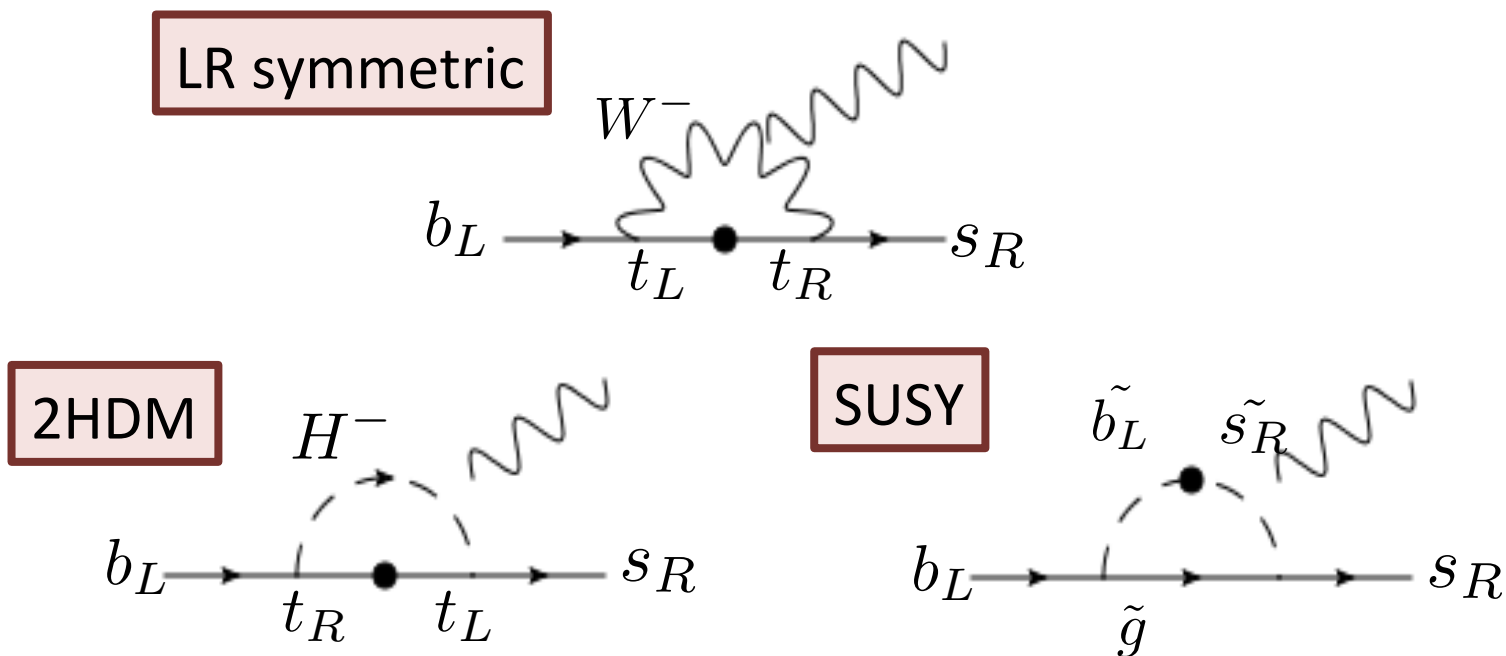
$b \rightarrow s \gamma$ 崩壊の有効ハミルトニアンは以下の様に表され、
標準模型では左巻きの光子の放出が支配的である。

$$H_{\text{eff}} = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} C_{7\gamma} V_{tb} V_{ts}^* \frac{e}{4\pi^2} (m_s \bar{s}_R \sigma_{\mu\nu} P_L b_L + m_b \bar{s}_L \sigma_{\mu\nu} P_R b_R) F^{\mu\nu}$$



$b \rightarrow s \gamma$ 崩壊の光子の偏極

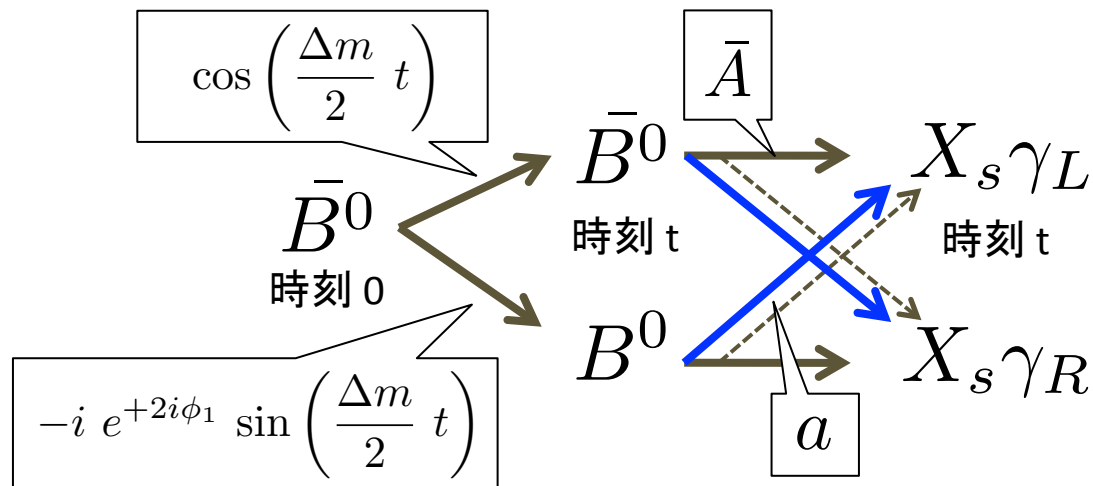
一方で、一部の**新物理は右巻きの光子の放出を許している。**



標準模型では左巻き光子の放出が支配的であるが、
 新物理によって右巻き光子の割合が増えるかもしれない。
 → 光子の偏極を調べれば新物理の探索ができる。

光子の偏極の測定方法

偏極の測定には、**時間依存の CP 破れの測定**を用いる。



- : 標準模型
- - - - -> : 標準模型(抑制)
- (blue) : 新物理の寄与
- : 確率振幅

崩壊幅

$$\Gamma(t) \propto e^{-t/\tau_B} [1 + q \{ \mathcal{A} \cos(\Delta m t) + \mathcal{S} \sin(\Delta m t) \}]$$

↑
反 B^0 は $q = +1$, B^0 は $q = -1$ 。これが CP 破れ。

$$\mathcal{S} = \frac{2|a/\bar{A}|}{1 + |a/\bar{A}|^2} \sin \left(2\phi_1 + \arg \left[\frac{a}{\bar{A}} \right] \right)$$

$\tau_B = 1.519 \pm 0.007$ [ps]
B の寿命。
 t: 始状態から終状態までに要した時間。
 $\Delta m = 0.507 \pm 0.004$ [ps⁻¹]
 質量固有状態 B_a, B_b の質量差。
 $\phi_1 = (21.5_{-0.7}^{+0.8})^\circ$
 CKM 三角形の角。
 V_{td}^* の複素位相。

$b \rightarrow s \gamma_R$ (=a) が抑制されている標準模型では $\mathcal{S} = 0$ であるが、 $b \rightarrow s \gamma_R$ を許す新物理があれば、 \mathcal{S} は大きくなる可能性がある。つまり、 \mathcal{S} の測定によって $b \rightarrow s \gamma_R$ 過程の有無を調べる事が可能。

時間依存 CP 破れの測定方法

どうやって t を測る? $\rightarrow \Gamma(t) \propto e^{-t/\tau_B} [1 + q\{\mathcal{A} \cos(\Delta mt) + \mathcal{S} \sin(\Delta mt)\}]$

B の寿命は 1.5 [ps] \rightarrow 時間測定は困難。

$b\bar{b}$ の共鳴状態である $\Upsilon(4S)$ からの崩壊では $\beta\gamma = 0.06 \rightarrow 27[\mu\text{m}]$ しか飛ばない。

$Ee^- = 8 \text{ GeV}, Ee^+ = 3.5 \text{ GeV}$ の非対称エネルギーで衝突させることで $\beta\gamma = 0.425$ を実現。

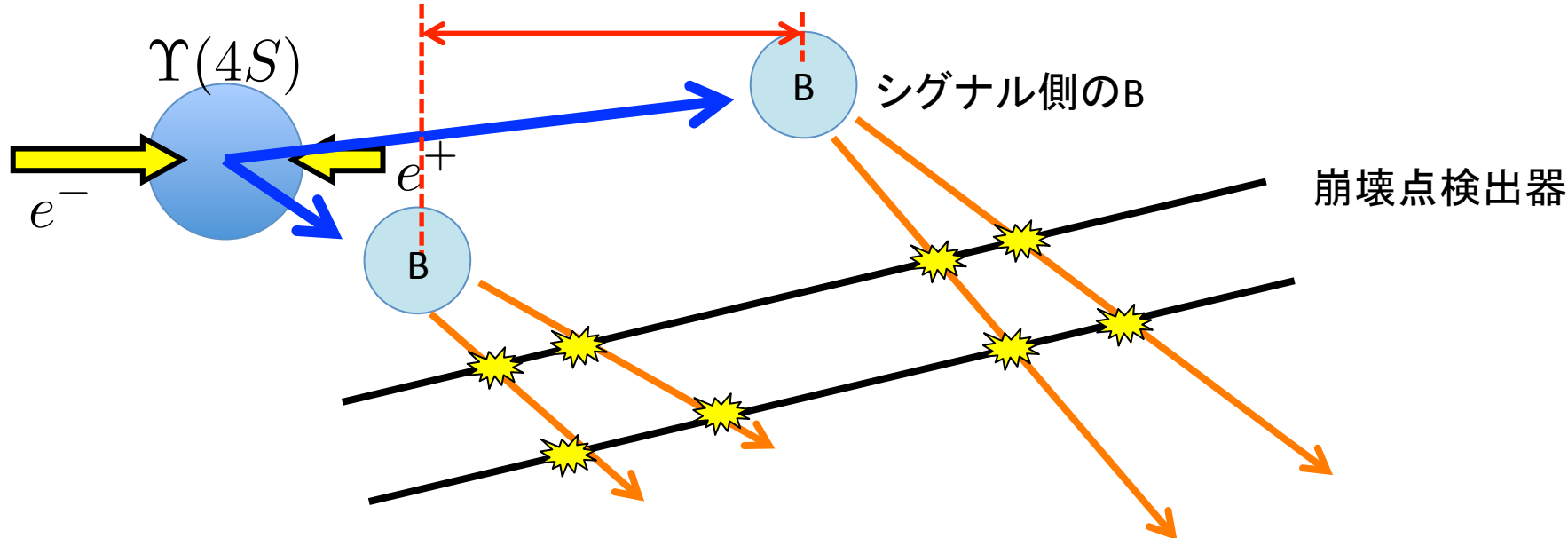
$$c\tau\beta\gamma \sim 200[\mu\text{m}]$$

典型的な飛行距離

100 [μm] 以下で崩壊点を測定する検出器を用意。

$$\sigma_{\text{vertex}} \sim 75[\mu\text{m}]$$

崩壊位置の差 Δz から Δt を得る。

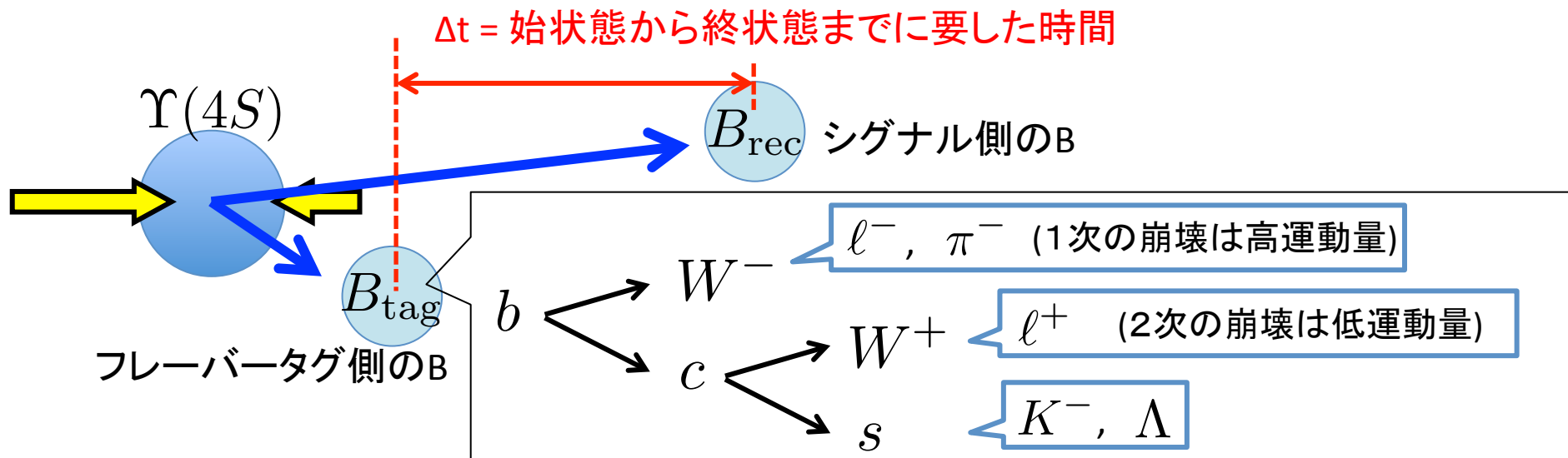


フレーバータグ

どうやって q を測る? $\rightarrow \Gamma(t) \propto e^{-t/\tau_B} [1 + q \{ \mathcal{A} \cos(\Delta mt) + \mathcal{S} \sin(\Delta mt) \}]$

シグナル側の $B (= B_{rec})$ の始状態が反 B であるか B であるか (フレーバー) を知る為に、シグナル側でない方の $B (= B_{tag})$ を用いる。

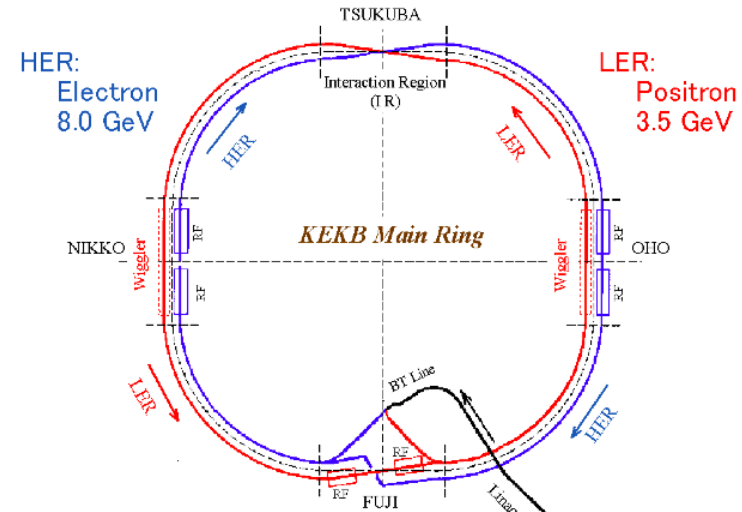
- $\Upsilon(4S)$ の崩壊から生成される B 中間子ペアは B_{tag} が B か反 B 、どちらで崩壊したかがわかれば、同時刻の B_{rec} のフレーバーが確定。
- B_{tag} のフレーバーは、 b の典型的な崩壊、 $b \rightarrow c W^- \rightarrow s W^+$ によって生じる荷電粒子の運動量などを用いた、多次元 likelihood から求める。



KEKB 加速器

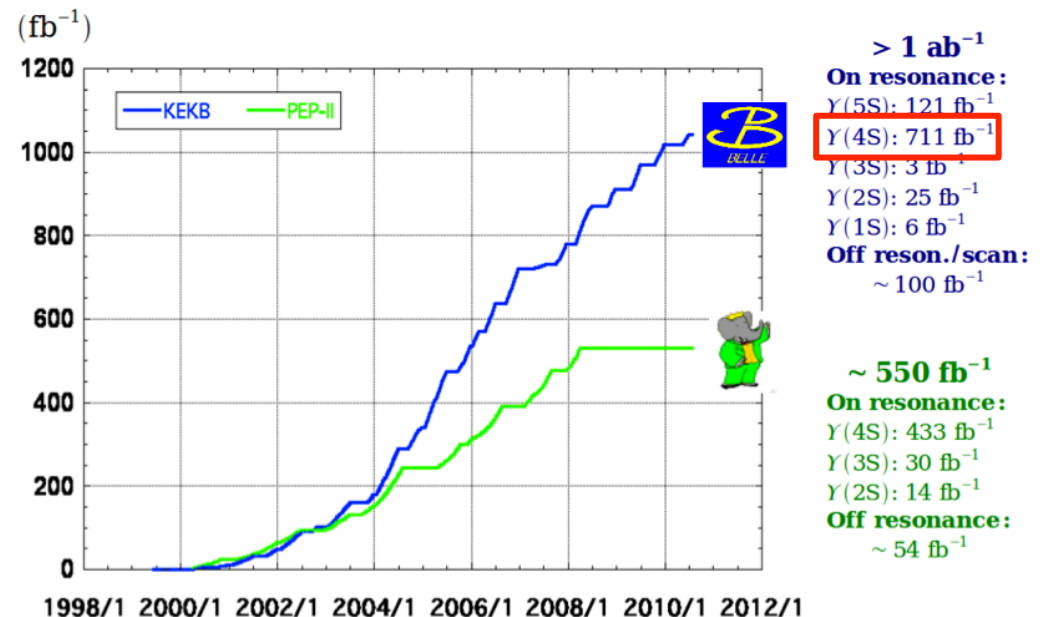
KEKB 加速器

- Δt を測定する為に、
 e^- を 8 GeV、 e^+ を 3.5 GeV で衝突。(右)
- 重心エネルギー 10.58 GeV は
 $Y(4S)$ の resonance であり、
効率よく B 中間子対を生成できる。(下)
- 約10年間で 772 M の B 中間子対を生成。
 e^-e^+ 加速器で世界一の統計(右下)。



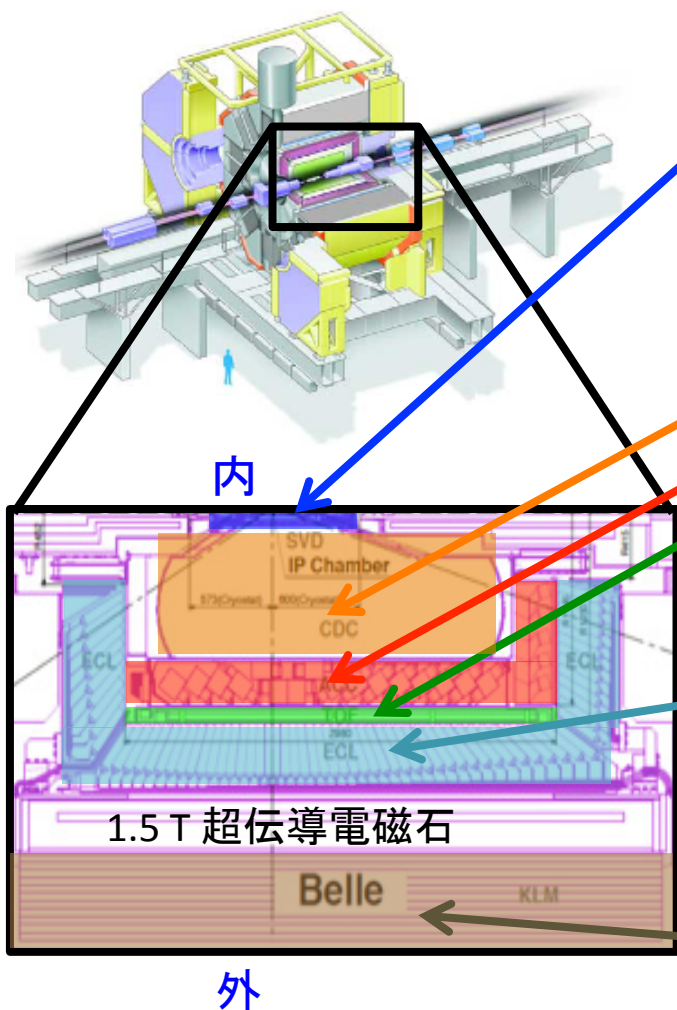
Integrated luminosity of B factories

反応断面積 (10.58GeV)	σ [nb]
bb	1.1
dd, ss	各 0.33
uu, cc	各 1.32
$\tau^+ \tau^-$	0.93
QED ($25.6 < \theta < 159.9$)	37.8
$\gamma \gamma \rightarrow qq$	11.1



Belle 検出器

Belle 検出器



崩壊点と飛跡の検出

B の崩壊時間、荷電粒子の運動量の測定

- シリコン検出器
- ドリフトチェンバー

粒子識別

K/ π 識別や、フレーバータグに重要。

- ドリフトチェンバー (dE/dx)
- エアロジェルを用いたチェレンコフ光検出器
- Time of flight カウンター (バレル部のみ)

光子、 $e^{+/-}$ の検出

光子のエネルギーおよび、電磁シャワーの形状を測定

- CsI(Tl) 電磁カロリメーター

カロリメーターを通過する粒子の検出

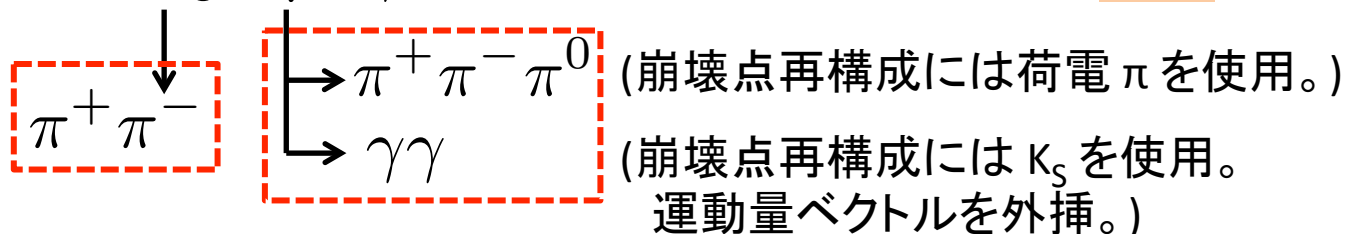
μ はフレーバータグに使われる。

- K_L, μ 検出器

崩壊に使用するモード

再構成に使う崩壊

$$B^0 \rightarrow K_s \eta \gamma \quad \text{BR} = (7.6 \pm 1.8) \times 10^{-6} \quad \text{PDG}$$



信号に似た
コントロールサンプル

$$B^\pm \rightarrow K^\pm \eta \gamma \quad (\text{アイソスピン対称。セレクションの最適化に利用。})$$

各Bファクトリーでの状況



• **BaBar 実験**

- S の測定値は 465×10^6 の BB ペアを用いて $-0.18^{+0.49}_{-0.46} \pm 0.12$
- **統計誤差** が支配的。 統計誤差 系統誤差

arXiv:0805.1317v1



• **LHCb 実験**

- pp 衝突のため、 π^0, η 由来の γ 測定が困難。



• **Belle 実験**

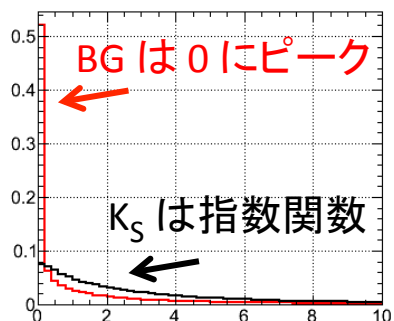
- BB ペアのデータは 772×10^6 と BaBar の **1.6 倍** の統計。
- まだ1度も S の測定は行われていない。**今回が初。**

再構成・BG の除去

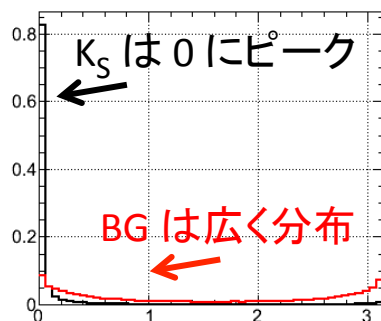
新しい K_S finder の開発

K_S を含むモードの再構成に際して、Belle 実験の物理解析に用いられる新しい K_S finder を開発した(共同研究 東北大:石川、KEK:住澤)。

V粒子の特徴を持つものを、ニューラルネットによる多変数解析で選別。



衝突点からの飛距離 [cm]



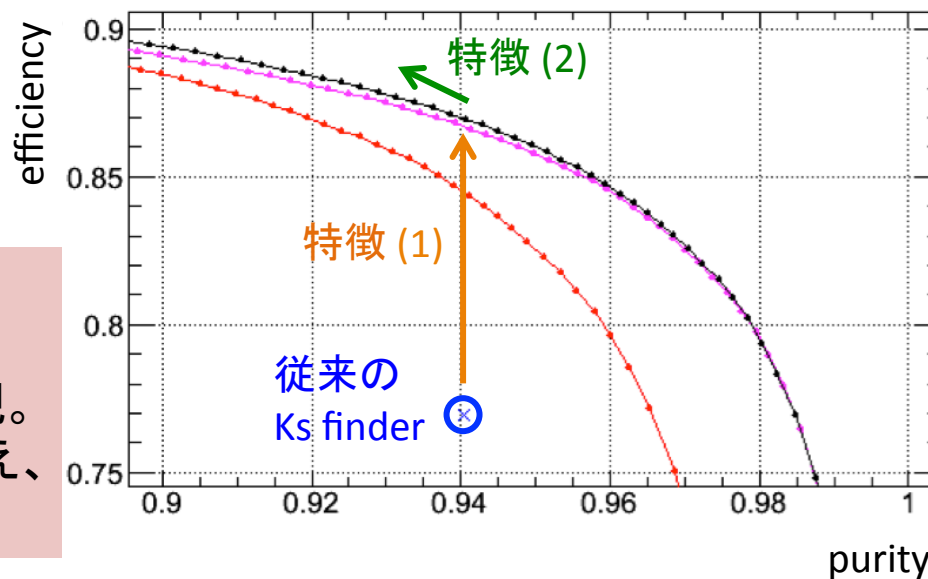
崩壊位置と運動量の角

- 衝突点と崩壊点が離れているか
- 崩壊点と運動方向の一致
- 2つの π が1点から来ている事
...など、計13パラメータ。

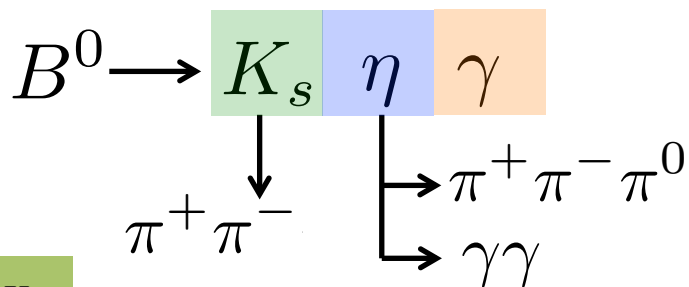
また、BGとなる $\Lambda(\rightarrow p \pi^-)$ をニューラルネットを用いて除去し、purity を向上させた。
(右図: 赤=除去前、黒・マゼンタ=除去後)

[特徴]

- (1) 従来の再構成よりも多くの変数を使用し、同じ purity において高い efficiency を実現。
- (2) ニューラルネットの出力のカット位置を変え、さらに efficiency を上げる事が可能。



シグナルの再構成(1/2)



K_s

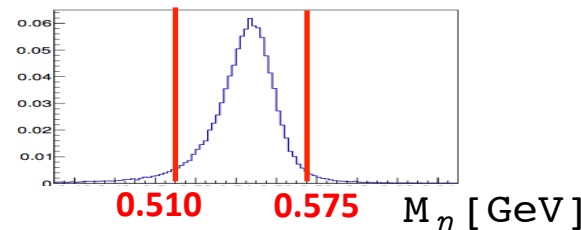
V粒子の特徴を持つものを、ニューラルネットによる多変数解析で選別。本解析のために用意した。従来のセレクションよりも効率が10%増加。

η

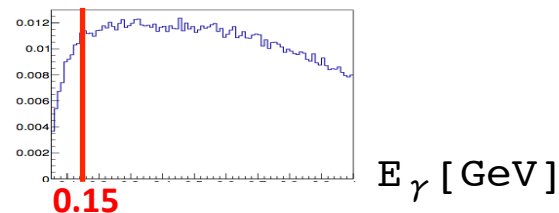
[3 π mode]
 $0.537 < M_\eta < 0.556$ [GeV]
 $0.114 < M_{\pi^0} < 0.147$ [GeV]
 $P_{\pi^0} > 0.1$ [GeV]
 E_γ (lab系) > 0.05 [GeV]

[2 γ mode]
 $0.510 < M_\eta < 0.575$ [GeV]
 E_γ (lab系) > 0.15 [GeV]

不変質量によるカット(例: $\eta \rightarrow 2\gamma$)



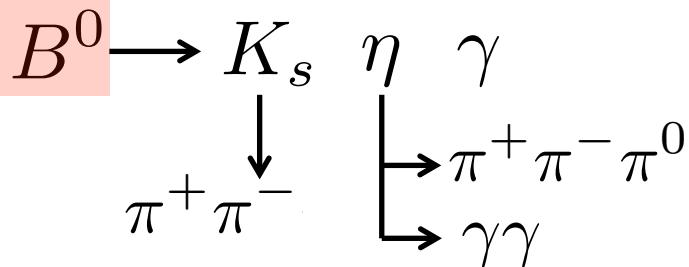
σ_E が大きい低エネルギー γ の除去(例: $\eta \rightarrow 2\gamma$)



γ

$1.8 < E_\gamma$ (c.m.) < 3.4 [GeV] (γ は b からの2体崩壊で生じるため。)
 カロリメーターでのシャワー形状が鋭い。(ハドロンシャワーは広い。)

シグナルの再構成(2/2)



B

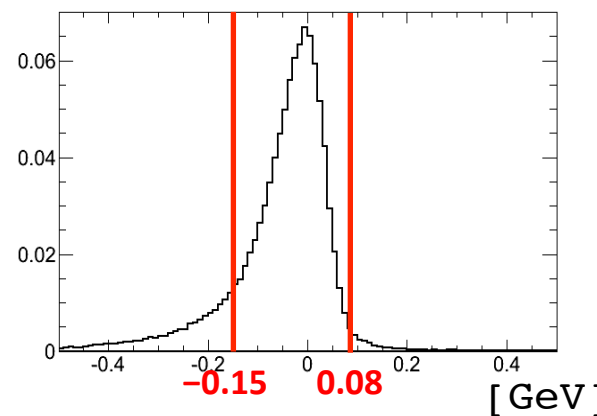
$$-0.15 < \Delta E < 0.08 \text{ [GeV]}$$

$$5.27 < M_{bc} < 5.29 \text{ [GeV]}$$

1イベント中に
複数の候補があった場合は、
1. η の質量が PDG の値に近い
2. K_s の質量が PDG の値に近い
ものを選択し、1つに絞る。

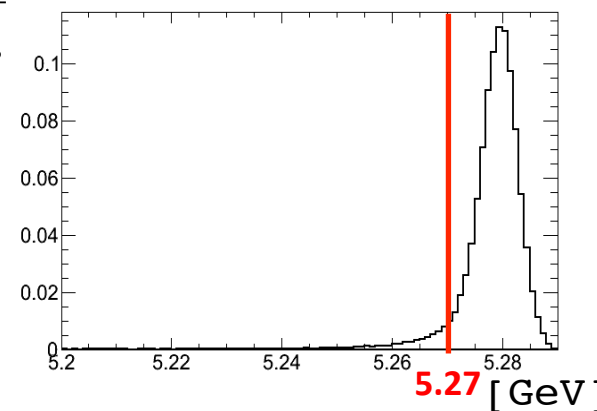
$$\Delta E \equiv E_B - E_{\text{beam}}$$

ビームエネルギーと
再構成された B の
エネルギーの差



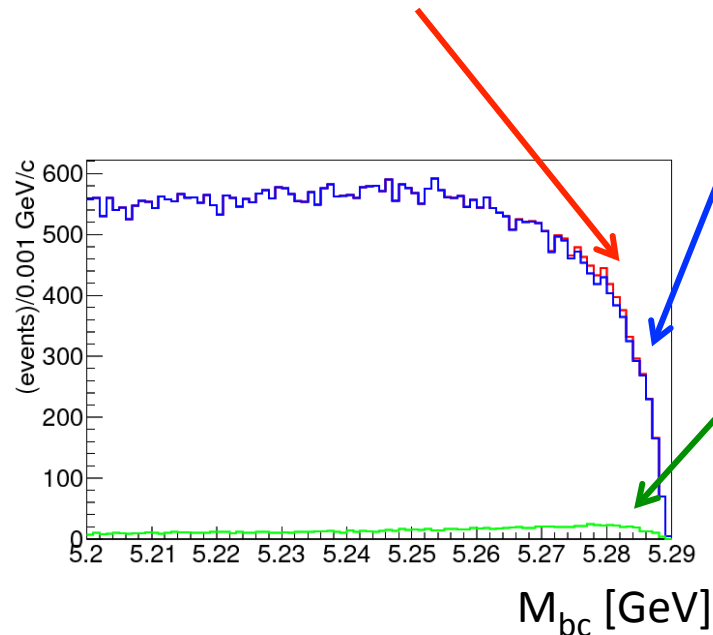
$$M_{bc} \equiv \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - p_B^2}$$

ビームエネルギーと
B の運動量
から求めた B の質量



バックグラウンドの除去

再構成直後の**シグナル**は大量のバックグラウンドに埋もれている。



軽いクォーク対によるバックグラウンド (qq BG)

断面積は $\Upsilon(4S)$ 生成の3倍。
間違った再構成によって大量に紛れてくることで、
シグナルを埋もれさせてしまう。

B 由来のバックグラウンド

- $b \rightarrow c$ の崩壊 (BB BG)
- $b \rightarrow u, b \rightarrow d, b \rightarrow s$ のような稀崩壊 (rare B BG)
- シグナル以外の $b \rightarrow s \gamma$ の崩壊 (rad B BG)

量は多くないが、

- $\Delta E, M_{bc}$ にシグナルのようにピークをもつ。
 - CP 破れを持つものもある。
- など、シグナルから分離しなければいけない。

これらのバックグラウンドを取り除く為、様々な変数にセレクションを加える。
セレクションの値は $\text{significance} (= N_{\text{sig}} / \sqrt{N_{\text{sig}} + N_{\text{BG}}})$ を最大化するように最適化を行った。

π^0, η 由来の γ を含む BG の除去

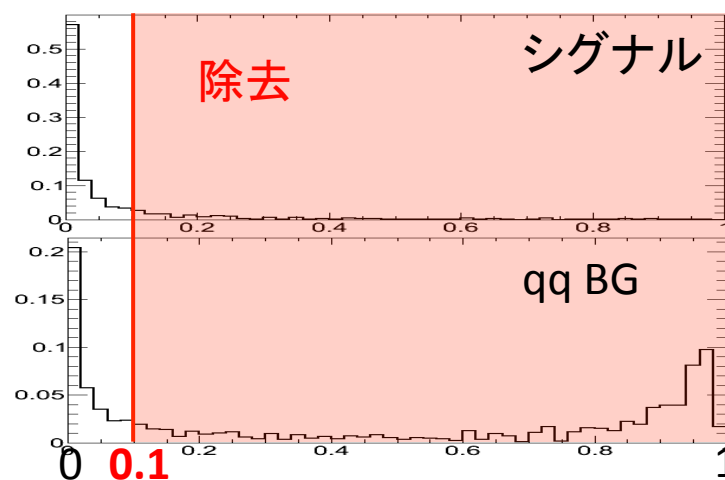
$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad \eta \rightarrow \gamma\gamma$$

エネルギーの高い光子があると、 $b \rightarrow s\gamma$ の BG になりやすい。

除去の方法

1. γ 候補を他の全ての γ と組み、
各不変質量と低エネルギー側の γ の E_γ から π^0, η 由来である確率(最大値)を計算。
2. 確率の計算には MC シミュレーションの分布を使用。
3. π^0 由来の確率、 η 由来の確率がそれぞれ 0.1, 0.2 より高いイベントを除去。

efficiency	$\eta \rightarrow 2\gamma$ mode	$\eta \rightarrow 3\pi$ mode
Signal	81.3 %	79.6 %
qq BG	25.3 %	28.1 %
B 由来 BG	57.7 %	48.7 %



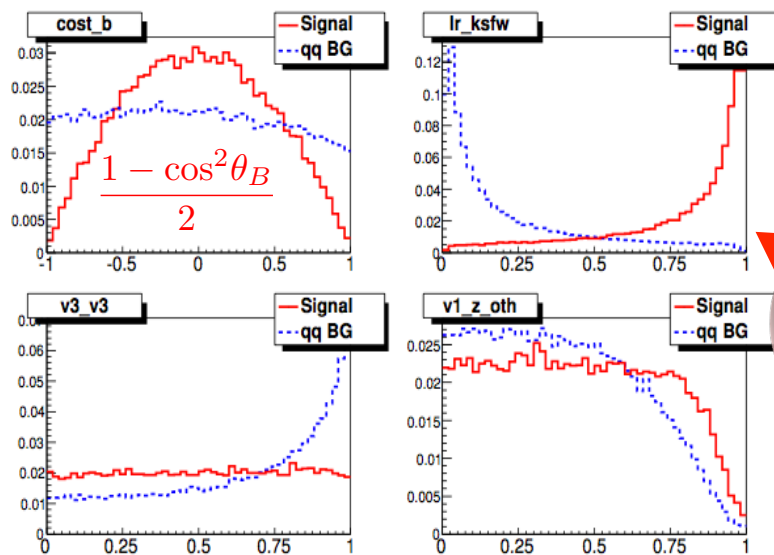
シグナルを残しながら、バックグラウンドを落とせている。

π^0 由来である確率

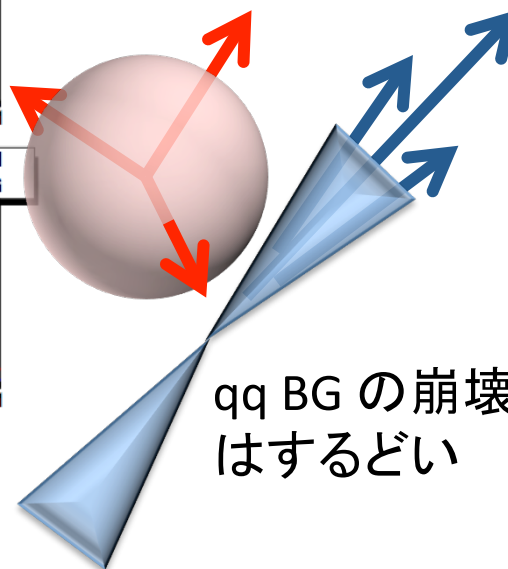
qq BG の除去

軽いクォーク対($q = u, d, s, c$) 由来の「qq BG」を、崩壊の方向や形状を表す4つの変数をニューラルネットに入力し分離した。

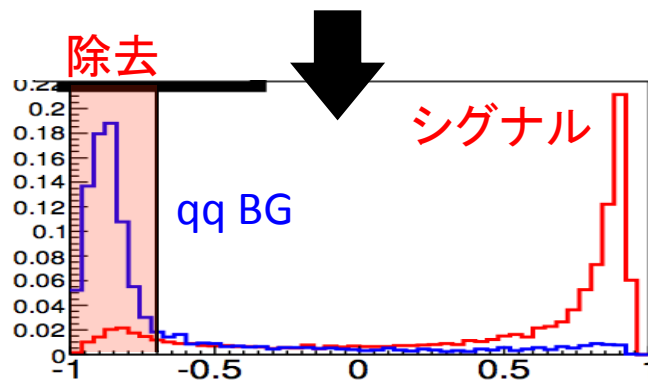
- B中間子の運動量方向の \cos (左上)
- ルジャンドル関数を用いた分布の likelihood ratio (右上)
- シグナル側の B_{rec} とフレーバータグ側の B_{tag} の 3rd sphericity axis のなす角の \cos (左下)
- フレーバータグ側の B_{tag} の 1st sphericity axis と z 軸のなす角の \cos (右下)



B中間子の崩壊は等方的



qq BG の崩壊はするどい



ニューラルネットの出力

シグナルと qq BG が良く分離できている。

コントロールサンプルの分布を利用したカット

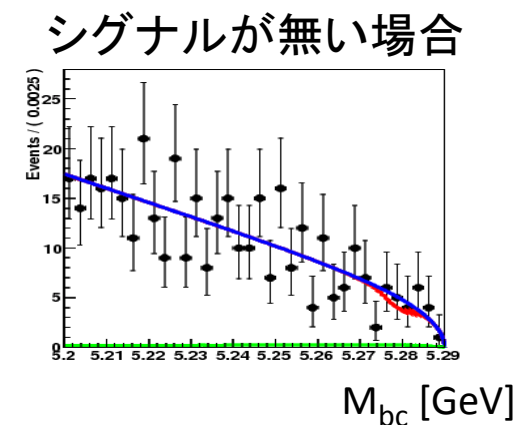
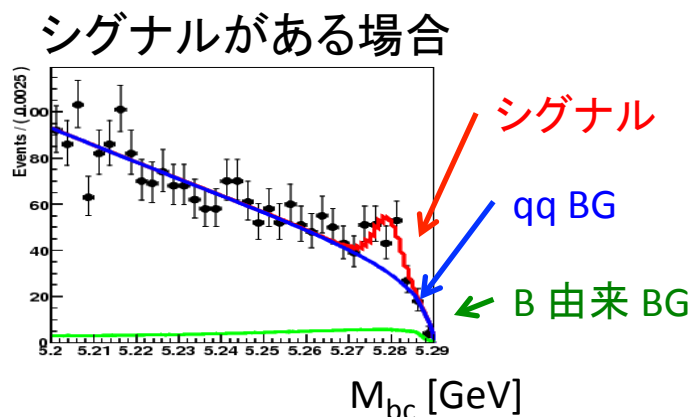
コントロールサンプル $B^+ \rightarrow K^+ \eta \gamma$ から得られる情報をもとに、さらにカットを加える。
 $K^0 \rightarrow K_S(50\%) \rightarrow \pi^+ \pi^- (69\%)$ という過程が無い分、中性モードの3倍の統計量。

本解析では、コントロールサンプル $B^+ \rightarrow K^+ \eta \gamma$ に対して以下の量を測定。

- $K \eta$ 系のスピンの依存する、崩壊角度の分布。
- $K \eta$ 系の不変質量。

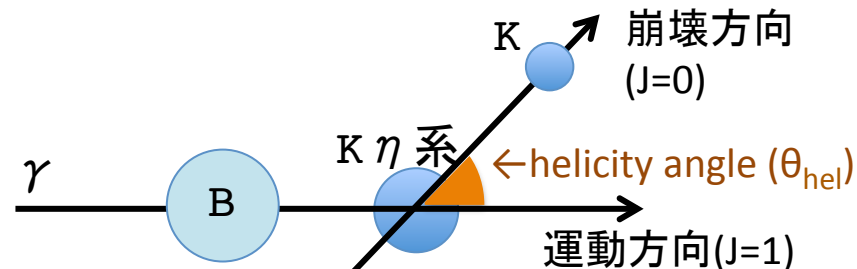
測定する量を bin 分けし、 ΔE , M_{bc} を用いた2次元フィットによって、シグナルの分布を得た。

	ΔE	M_{bc}
シグナル	ヒストグラム PDF	
qq BG	2次関数	Argus
B 由来の BG (固定)	指数関数	Argus + Bifur. Gauss



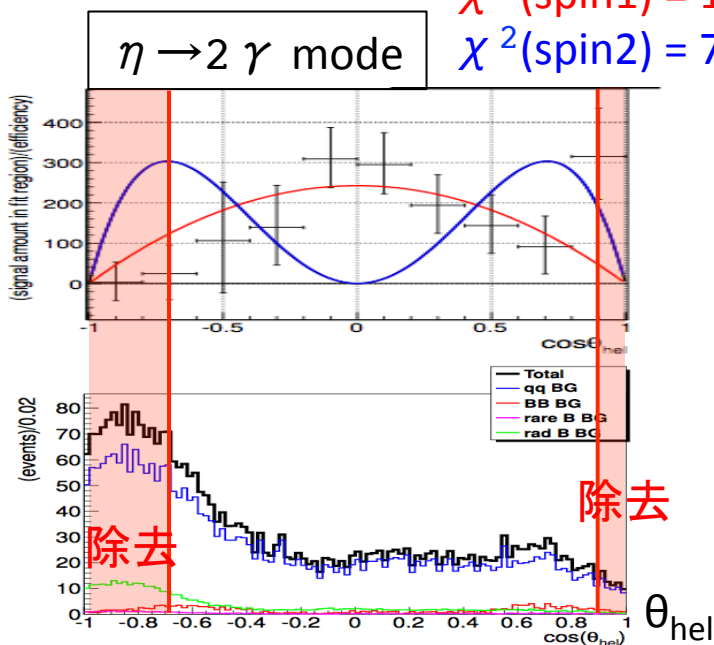
K η 系の崩壊角度の分布へのカット

K η 系の運動方向 (角運動量 = 1) と、
 K η 系の崩壊方向 (角運動量 = 0) のなす角 θ_{hel} は、
 d 関数から、確率分布を計算できる。

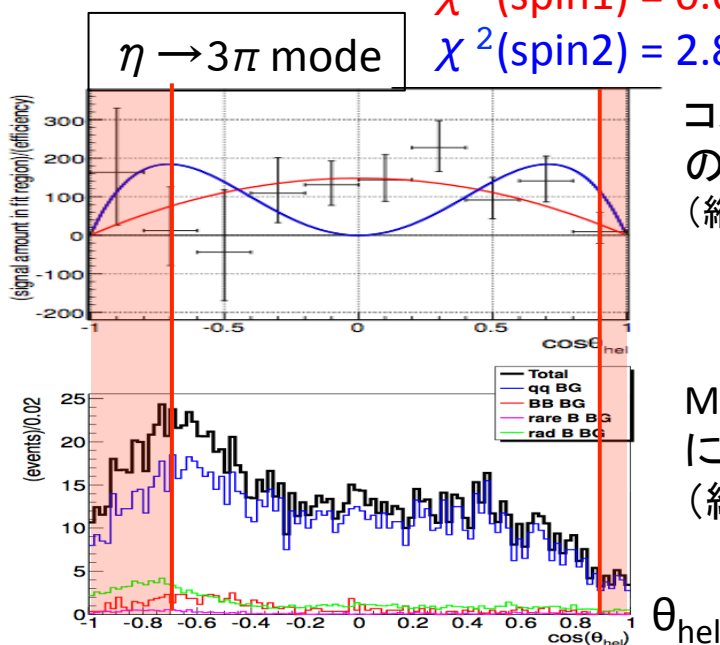


$$|d_{1,0}^1(\theta_{hel})|^2 = \frac{1 - \cos^2\theta_{hel}}{2}, \quad |d_{1,0}^2(\theta_{hel})|^2 = \frac{3}{2}(1 - \cos^2\theta_{hel}) \cos^2\theta_{hel}$$

$\chi^2(\text{spin1}) = 1.2$
 $\chi^2(\text{spin2}) = 7.5$



$\chi^2(\text{spin1}) = 0.6$
 $\chi^2(\text{spin2}) = 2.8$



コントロールサンプル
 のフィット結果
 (縦軸: シグナル数/効率)

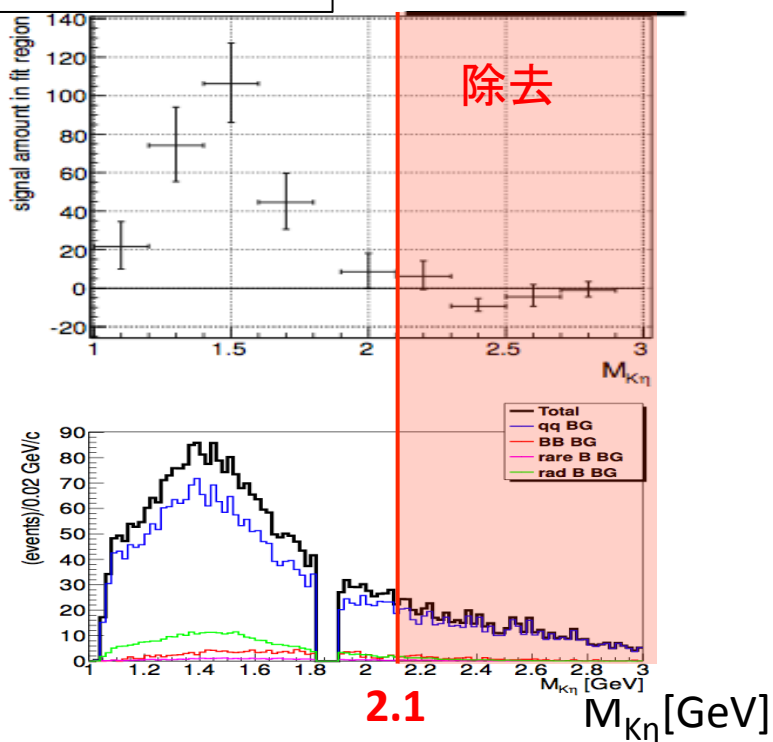
MCシミュレーション
 によるBG分布
 (縦軸: イベント数)

フィット結果は $K^+\eta$ 系のスピンの1であることを示している。
 アイソスピン対称性から、 $K_S\eta$ 系のスピンも1と考え、 $-0.7 < \cos\theta_{hel} < 0.9$ を要求。

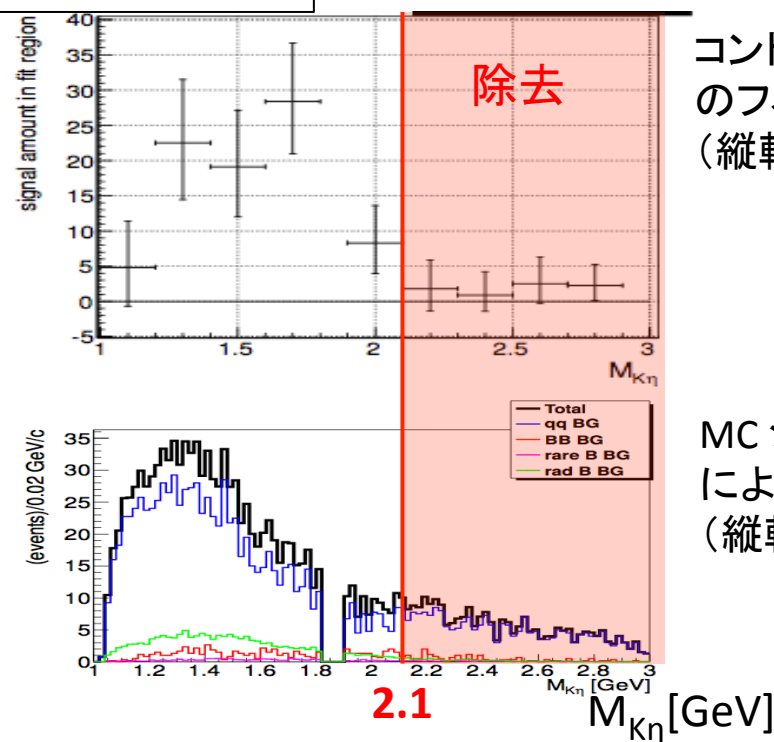
K η 系の不変質量へのカット

K $^+$ η 系の不変質量 $M_{K\eta}$ の分布を測定した。
1~2 GeV あたりに分布している事がわかる。

$\eta \rightarrow 2\gamma$ mode



$\eta \rightarrow 3\pi$ mode



コントロールサンプル
のフィット結果
(縦軸: シグナル数)

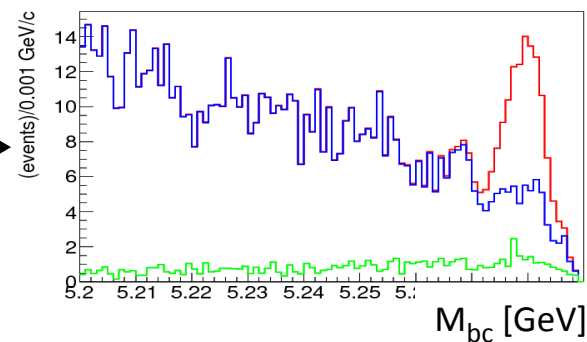
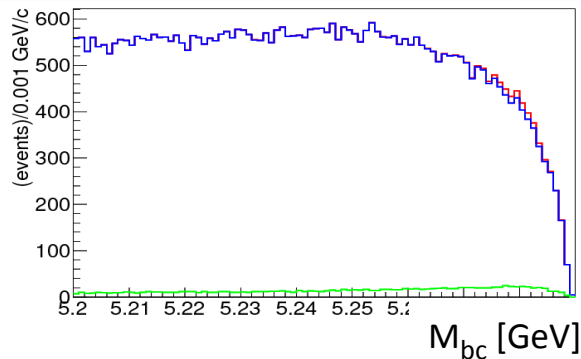
MCシミュレーション
によるBG分布
(縦軸: イベント数)

アイソスピン対称性から、K $_S$ η 系の不変質量も同様と考え、2.1 GeV 以上をカット。

セレクションまとめ

MC シミュレーションから予想されるイベント数

($\eta \rightarrow 2\gamma / \eta \rightarrow 3\pi$)	シグナル	BG合計	qq BG	B 由来 BG	Signi.
再構成	123.2 / 45.7	7144.2 / 1900.3	6787.3 / 1483.5	356.9 / 97.1	1.9 / 1.5
$\pi^0 \eta$ 由来 γ 除去	100.2 / 36.4	1923.7 / 465.2	1717.3 / 416.8	206.4 / 48.4	2.7 / 2.0
qq BG 除去	80.3 / 26.7	264.1 / 43.6	144.0 / 21.0	120.1 / 22.6	4.5 / 3.3
B BG 除去	66.7 / 23.2	93.4 / 26.2	55.8 / 14.8	37.6 / 11.4	5.4 / 3.4
$\cos \theta_{hel}$	62.5 / 22.5	54.3 / 19.0	32.5 / 11.0	21.8 / 8.0	5.9 / 3.6
$M_{K\eta}$	61.1 / 22.0	42.5 / 15.8	24.8 / 9.0	17.7 / 6.8	6.1 / 3.6



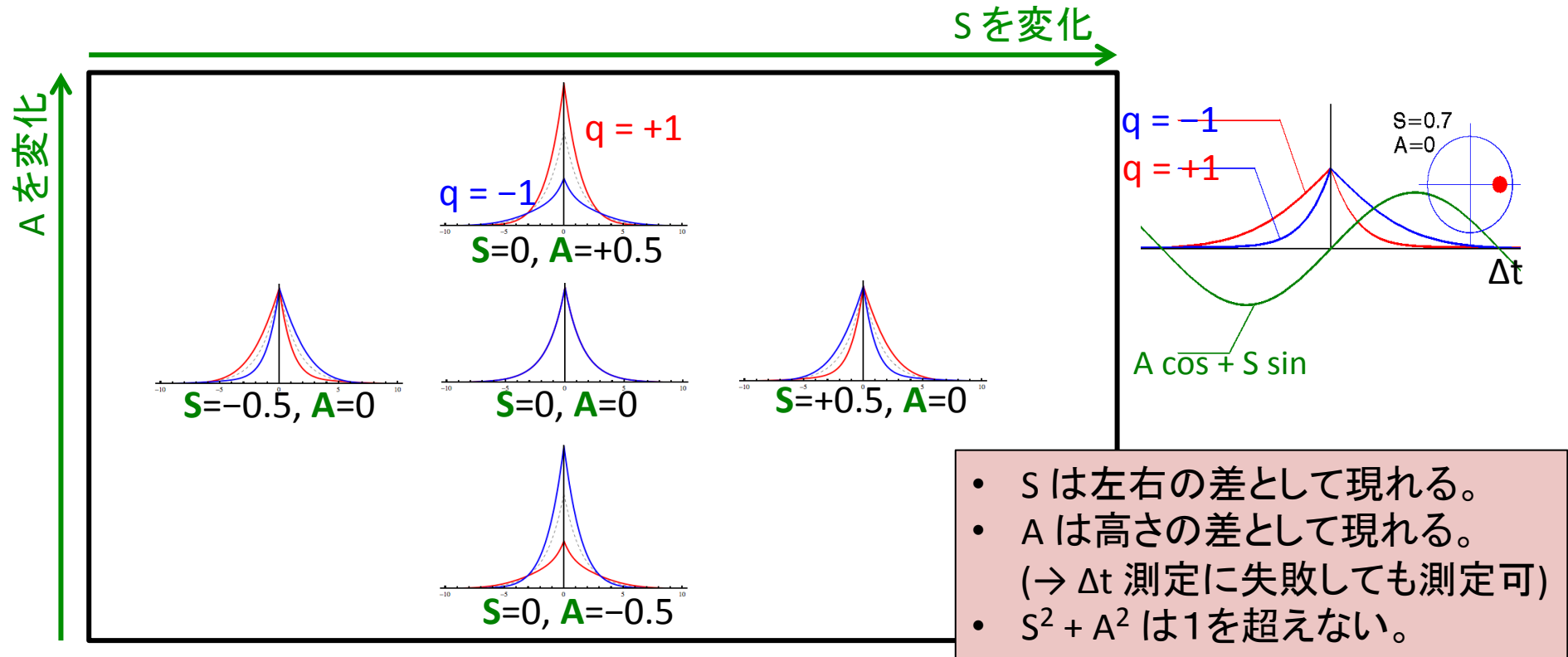
以上のカットから Significance がそれぞれ 6.1 / 3.6 と期待できる。
 (qq BG 除去のためのニューラルネットの出力はカットではなくフィットに用いる)

Δt 分布の解析

Δt 分布の解析の概要

$$e^{-|\Delta t|/\tau_B} [1 + q\{A \cos(\Delta m \Delta t) + S \sin(\Delta m \Delta t)\}] \quad (\text{再記 6 ページ})$$

CP 破れのパラメータ S, A によって、 Δt 分布は以下の様に変化する。



実際に測定するのは上記の理想的な分布に、以下の要素を加えた物となる。

- フレーバータグの誤識別率。
- 検出器などによる分解能。
- バックグラウンド。

次ページ以降 \rightarrow

フレーバータグの誤識別率

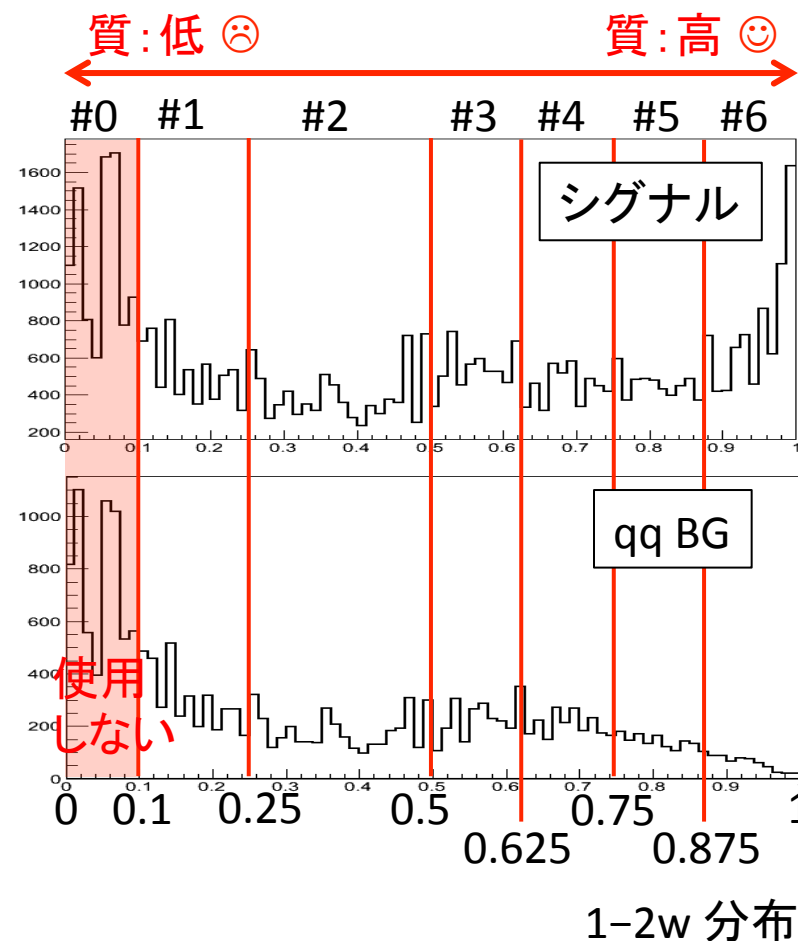
フレーバータグは Likelihood なので、 $e^{-|\Delta t|/\tau_B} [1 + q\{\mathcal{A} \cos(\Delta m \Delta t) + \mathcal{S} \sin(\Delta m \Delta t)\}]$
 誤識別率を考慮する必要がある。



$$e^{-|\Delta t|/\tau_B} [(1 - q\Delta w) + q(1 - 2w)\{\mathcal{A} \cos(\Delta m \Delta t) + \mathcal{S} \sin(\Delta m \Delta t)\}]$$

w : フレーバーの誤識別率。
 MC 由来のバイアスを避ける為に、
 右図のように7つに分割。
 Δw : B と反B の w の差。
 \wedge 、反 \wedge の効率の差などを考慮。
 大きくても高々数%のオーダー。

$\eta \rightarrow 2\gamma, \eta \rightarrow 3\pi$ mode それぞれ
 7 bin に分けて Δt 解析は行われる。



Resolution function

検出器の精度などを考慮し、

“Resolution function”, $R(\Delta t)$ を畳み込む。 $e^{-|\Delta t|/\tau_B} [(1 - q\Delta w) + q(1 - 2w)\{A \cos(\Delta m\Delta t) + S \sin(\Delta m\Delta t)\}]$



$$R(\Delta t) = R_{\text{det(rec)}}(\Delta t) \otimes R_{\text{det(tag)}}(\Delta t) \otimes R_{\text{np}}(\Delta t) \otimes R_{\text{k}}(\Delta t).$$

Resolution function はイベントごとに形状が異なり、以下の要素から成る。

検出器由来の崩壊点の分解能: R_{det}

- 崩壊点再構成の誤差をスケールしたガウシアン。
- 式に用いられるパラメータの多くは、実データをもとに決定されている。

Tag 側の B の崩壊点再構成に

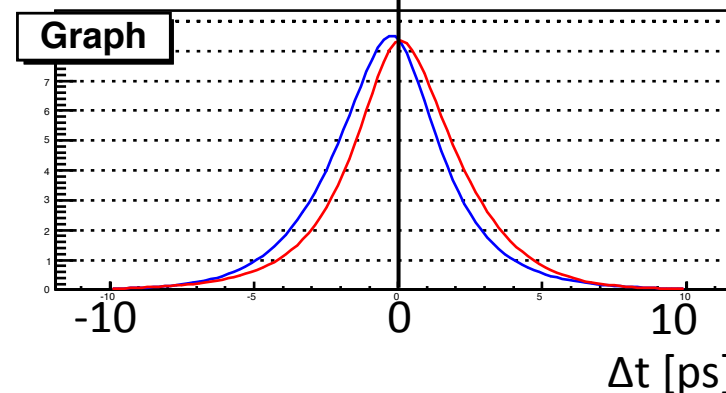
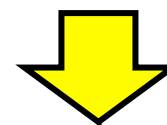
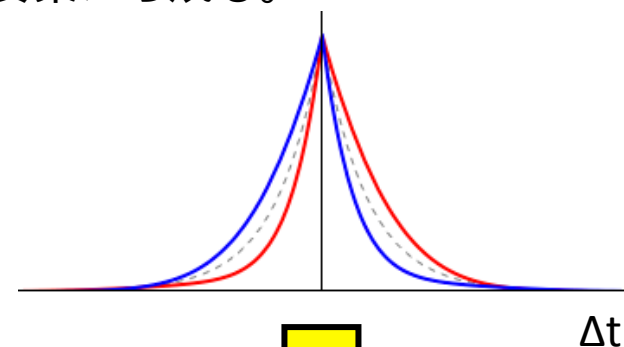
2次粒子を用いる事による位置のずれ: R_{np}

- D 中間子の寿命を考慮した指数関数。
- 式に用いられるパラメータの多くは、MC シミュレーションをもとに決定されている。

Y(4S)から B 中間子対に崩壊した際の

重心系に対する運動: R_{k}

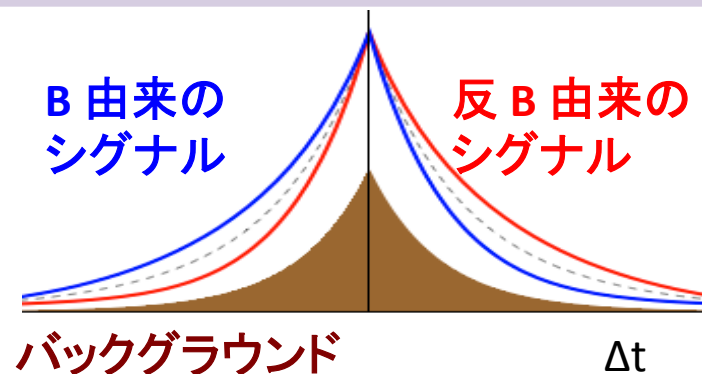
- 寄与は小さく、系統誤差も生じない。



バックグラウンドの Δt 分布

Δt の分布はシグナルだけでなく BG も含むため、

- BG の Δt 分布の形状
- {シグナル/BG}である確率を知る必要がある。



qq BG $P_{qq}(\Delta t)$

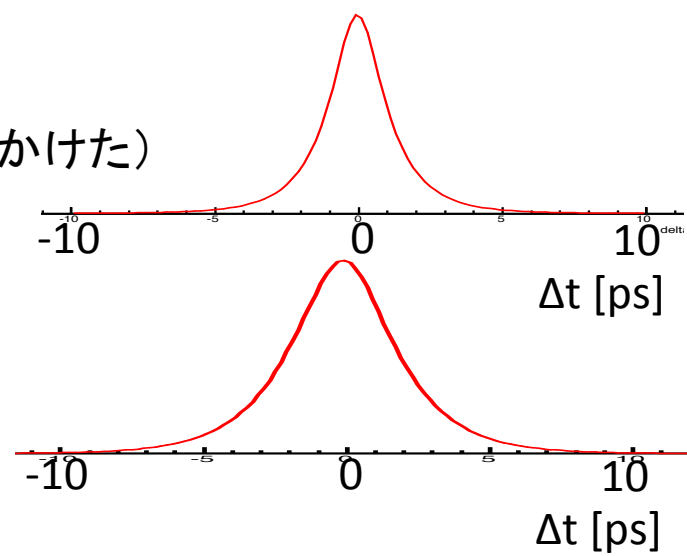
- δ 関数(衝突点由来)と指数関数(D中間子由来)を合わせたものにダブルガウシアンを畳み込んだものを使用。
- 形状は実データにフィットをして決定。
(qq BG が支配的(95% 以上)になるようなセレクションをかけた)

B 由来の BG $P_{BB}(\Delta t)$

- 指数関数に resolution function を畳み込んだ関数。
- MC シミュレーションの Δt 分布にフィットをして決定。

Outlier $P_{Ol}(\Delta t)$

- Resolution function を考慮しても残ってくる長い tail の分布を表す。
- 割合は $O(10^{-4})$ 程度、 $\sigma \sim 30-40$ [ps] のガウシアン。



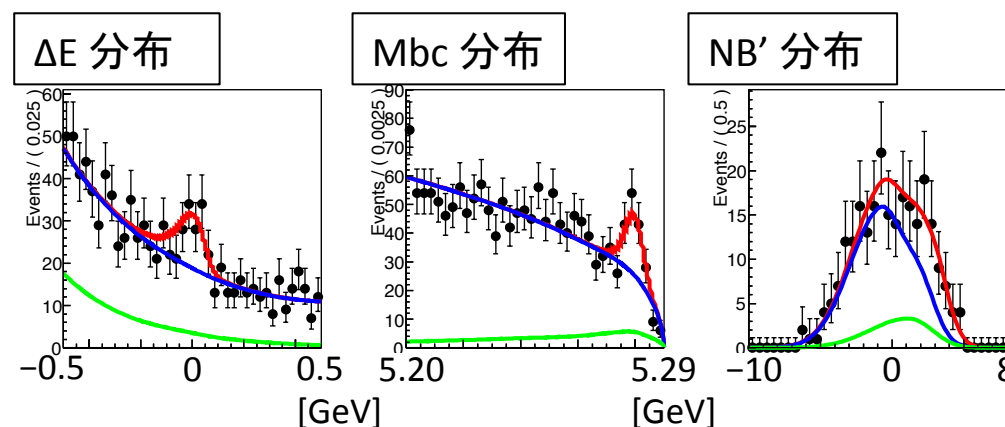
{シグナル/BG}である確率の決定方法

ΔE , Mbc, NB' の3次元分布から、{シグナル/BG}である確率を求める。

NB' は qq BG 除去の為にニューラルネット出力を変形した値。

フィットは 2 (η の崩壊モード) \times 7 (フレーバータグの質) の 14 bin に分けて行った。

	ΔE	Mbc	NB'
シグナル	補正した ヒストグラム PDF		Bifurcated Gaussian
qq BG	2次関数	Argus	Bifurcated Gaussian + Gauss
B 由来の BG (固定)	指数関数	Argus + Gauss	Bifurcated Gaussian



実データのフィット結果 (14 bin の合計)

PDF の形状と B BG の量は MC から固定。

イベントごとに{シグナル/BG}である確率 f_i を求め、各 Δt 分布 $P_i(\Delta t)$ にウェイトをかけ、PDF を用意。

以上の操作によって、 Δt 解析に用いる PDF が用意できる。

$$P(\Delta t) = (1 - f_{01}) \sum f_i \cdot P_i(\Delta t) + f_{01} \cdot P_{01}(\Delta t)$$

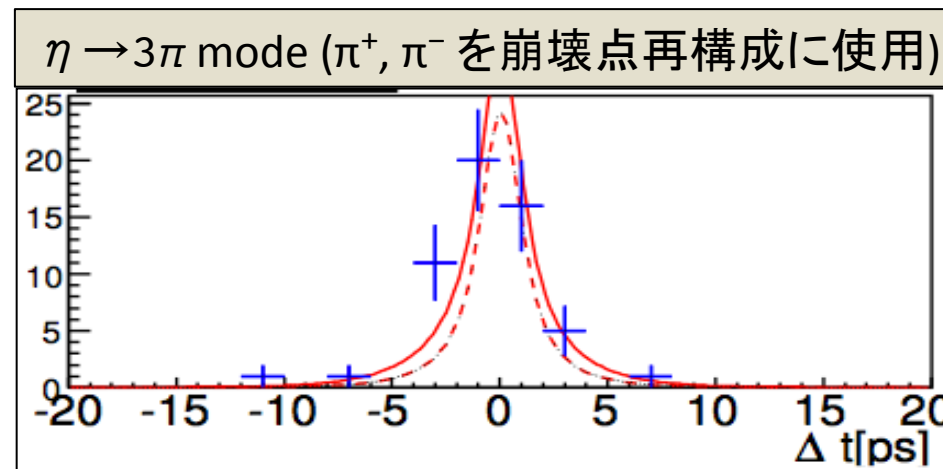
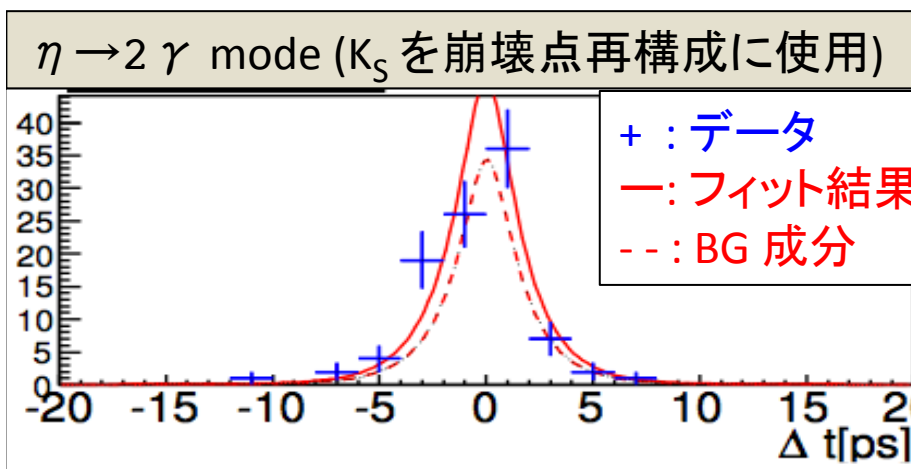
B の寿命測定によるフィットの動作確認

フレーバーを区別せずに Δt 解析を行うと、signal PDF のこの部分のみが残る。

$$e^{-t/\tau_B} \left[(1 - q\Delta w) + q(1 - 2w) \{ A\cos(\Delta mt) + S\sin(\Delta mt) \} \right]$$

既に良く知られている
B 中間子の寿命 (1.52 ps) を測定し、
フィット関数の動作確認を行った。
(同様に、コントロールサンプル
に対しても確認した。)

mode	フィット結果 [ps]	PDG 値とのずれ
$\eta \rightarrow 2\gamma$	0.87 (+0.50 / -0.45)	-1.3 σ
$\eta \rightarrow 3\pi$	1.81 (+0.71 / -0.50)	+0.6 σ
合計	1.37 (+0.38 / -0.33)	-0.4 σ



フィット結果は誤差の範囲内で世界平均に一致。
動作が確認された。(MC を用いた S, A のフィットも確認している。)

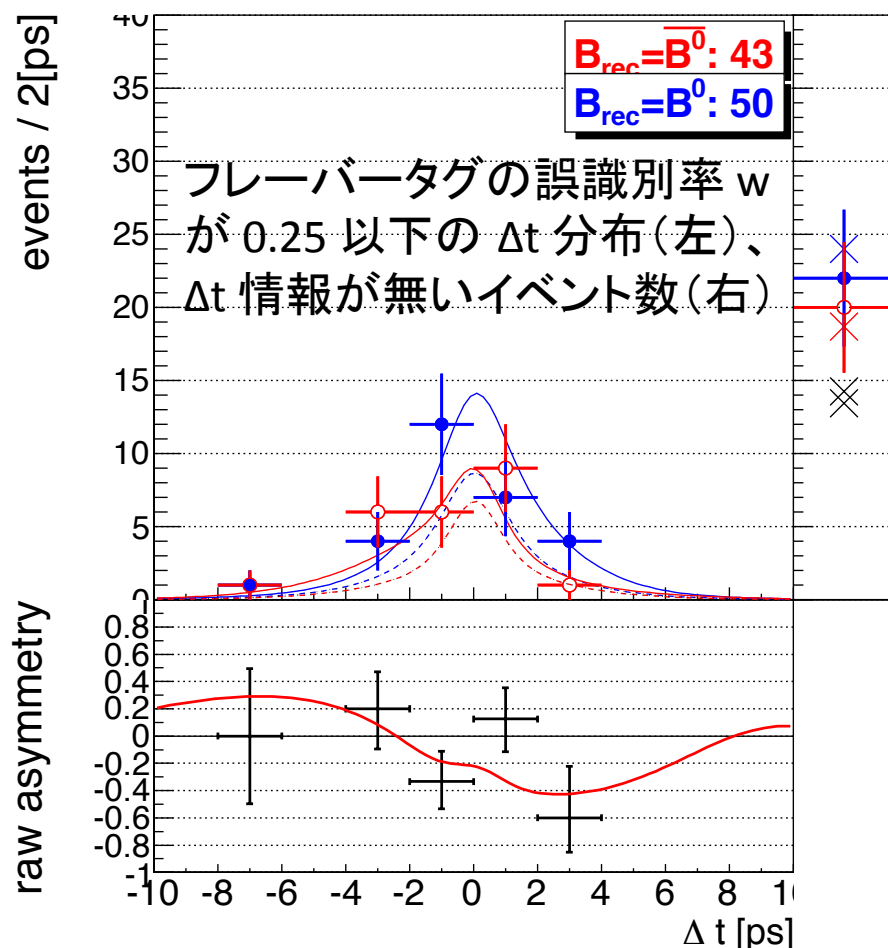
結果・考察

実データの測定結果

Δt 分布 $P(\Delta t) = (1 - f_{ol}) \sum f_i \cdot P_i(\Delta t) + f_{ol} \cdot P_{ol}(\Delta t)$

(和の i の要素) =
 { signal, qq, B BG }

において、 S, A をフィットパラメータとして実データのフィットを行った。



	S	A
$\eta \rightarrow 2\gamma$ mode	$-0.23^{+1.28}_{-1.20}$	$-0.31^{+0.46}_{-0.43}$
$\eta \rightarrow 3\pi$ mode	$-3.15^{+1.44}_{-1.15}$	$-1.10^{+0.79}_{-0.69}$
all	$-1.32^{+0.88}_{-0.81}$	$-0.48^{+0.36}_{-0.33}$

$S = -1.32 (+0.88 / -0.81)$
 $A = -0.48 (+0.36 / -0.33)$
 という結果が得られた。
 これは、物理的に許される範囲の外である。

Aの方が精度が良い理由

- Δt 情報が無いイベントも、Aのフィットには使う事ができる。
- $\Delta t = 0$ 付近のイベントは、Sには寄与しない。

系統誤差の見積もり

解析を行う際に固定しているパラメータを動かし、系統誤差を見積もった。

Source		S	A
Resolution function のパラメータ	(誤差の範囲で変化)	± 0.25695	± 0.04912
崩壊点再構成の際に使用した値	(Belle グループ共通の変化方法)	± 0.23152	± 0.02158
バックグラウンドの Δt PDF 形状	(誤差の範囲で変化させた)	± 0.05114	± 0.00627
フレーバータグの $w, \Delta w$	(誤差の範囲で変化させた)	± 0.01507	± 0.01915
B の寿命と Δm	(誤差の範囲で変化させた)	± 0.00360	± 0.00162
{シグナル/BG}確率を求める際の PDF	(誤差の範囲で変化させた)	± 0.09593	± 0.02276
CP の固有状態である BG の混入	(S, A = ± 1 として計算)	± 0.02369	± 0.02205
S, A のフィットバイアス	(MC シミュレーションから見積もり)	± 0.01550	± 0.01530
Tag 側 B の CP 破れ	(最大限の影響を仮定し計算)	± 0.00620	± 0.01010
Total (二乗和)		± 0.36404	± 0.06803

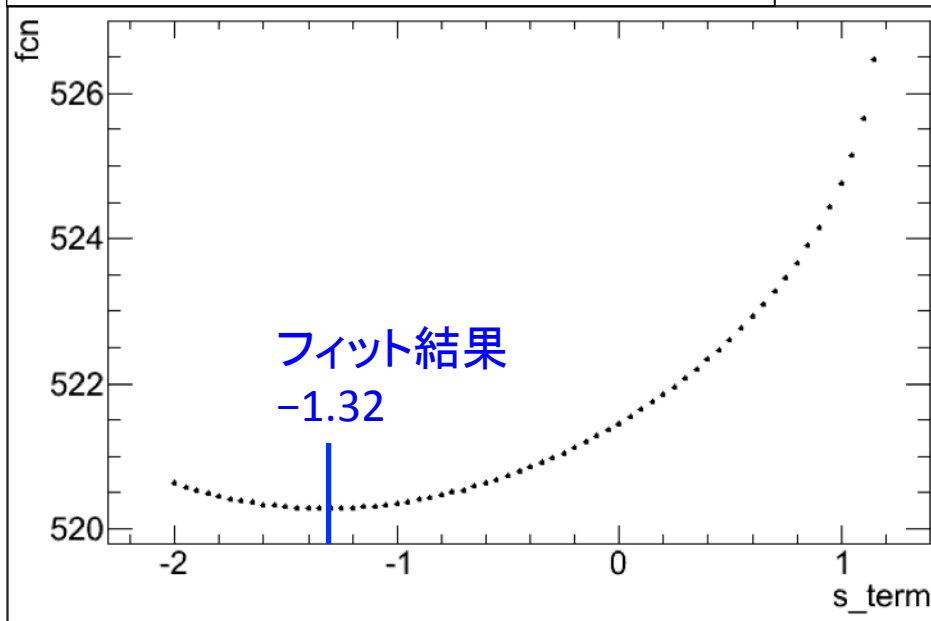
主な系統誤差は

- Resolution function のパラメータ
- 崩壊点再構成から来ている。

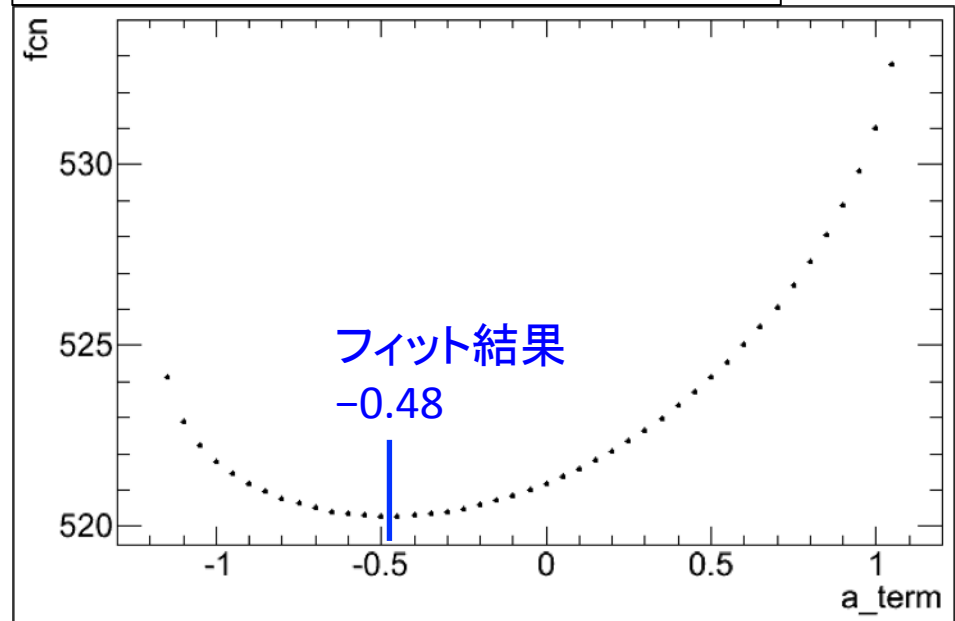
Likelihood fit における極小値の有無の確認

フィット結果は物理的に許される範囲の外側である。
フィット結果とは別に最小値がないかどうか確認した。

A をフィット結果に固定し、
S を走査したときの likelihood 分布。



S をフィット結果に固定し、
A を走査したときの likelihood 分布。



フィット結果とは別の最小値はないことを確認。

物理的に許される領域を超える確率の見積もり

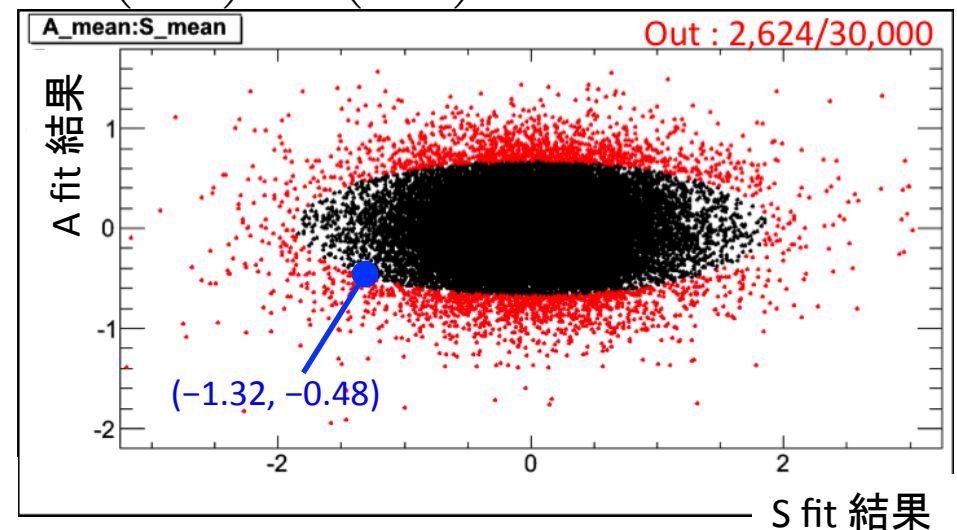
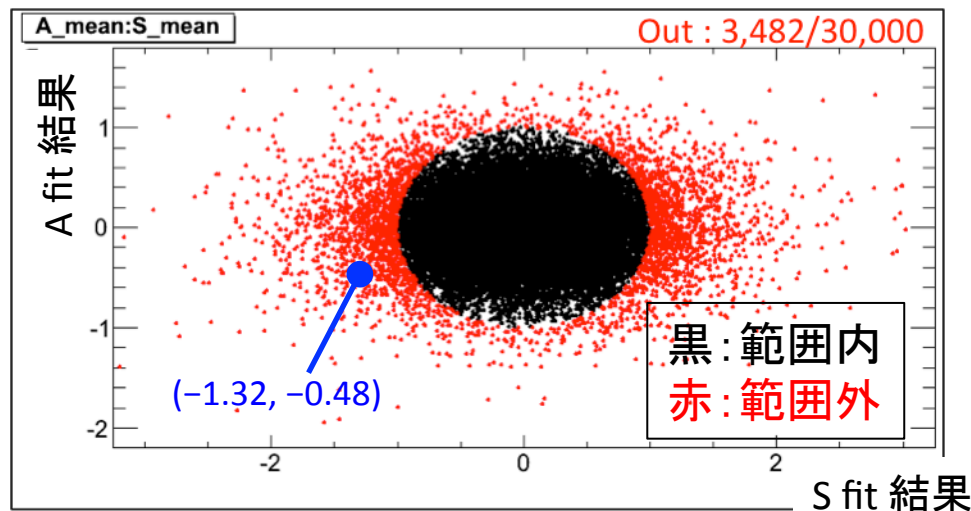
MC シミュレーションを 30,000 実験分行うことで、
 フィット結果が物理的に許される範囲外に出る確率を見積もった。
 $(S_{\text{true}}, A_{\text{true}}) = (0, 0)$ の際の結果を示す。

11.6% の結果が
 物理的に許される範囲の外であった。

$$S^2 + A^2 > 1$$

8.7% の結果が
 フィット結果に接する楕円の外であった。

$$\left(\frac{S}{1.32}\right)^2 + \left(\frac{A}{0.48}\right)^2 > 2$$



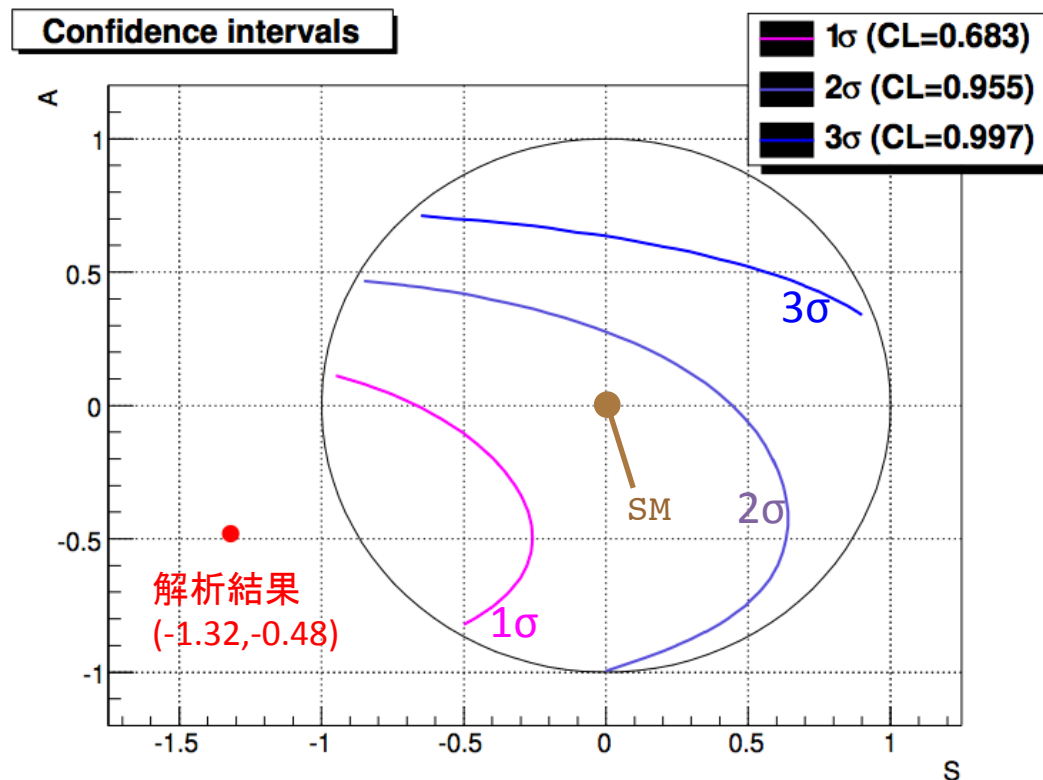
真の値が原点 (標準模型) の場合、
 フィット結果が物理的に許される範囲の外に出る確率は 11.6%、
 フィット結果に接する楕円を超える確率は 8.7% である。

S, A 平面における Confidence level contour

Feldman-Cousin 法を用いて、
confidence level の等高線を描いた。

Feldman-Cousin 法

1. 真の値が $(S_{\text{true}}, A_{\text{true}})$ の場合の $(S_{\text{out}}, A_{\text{out}})$ を得る PDF を用意。
2. $P > P(-1.32, -0.48)$ である領域の積分を Confidence level と定義。

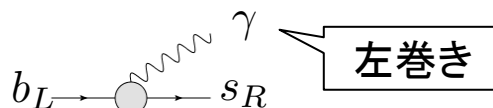


原点での confidence level は 0.886 。
2σ 以内で標準模型 ($S = 0, A = 0$) と無矛盾である。

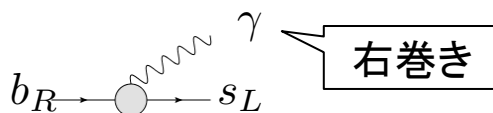
新物理に対して何が言えるか

$b \rightarrow s \gamma_L$ の振幅 A は標準模型の寄与のみ(議論を簡単にするため)、
 $b \rightarrow s \gamma_R$ の振幅 a は新物理の寄与のみ(a_{SM} は小さいので無視)
 とすると、

$$A = \bar{A}^* = A_{SM} + \cancel{A_{NP}}$$



$$a = \bar{a}^* = \cancel{a_{SM}} + a_{NP}$$



と書ける。

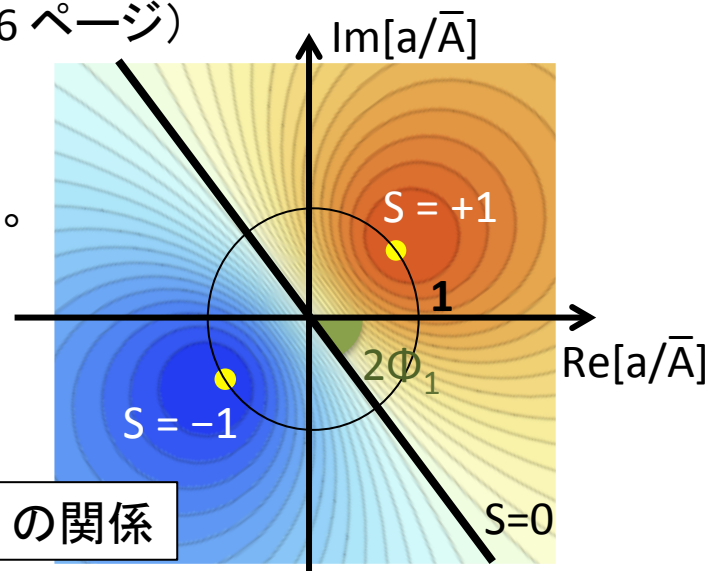
CP 破れのパラメータの S は、

$$S = \frac{2|a/\bar{A}|}{1 + |a/\bar{A}|^2} \sin \left(2\phi_1 + \arg \left[\frac{a}{\bar{A}} \right] \right)$$

と書けるので、
 (再記 6 ページ)

$\text{Re} \left[\frac{a_{NP}}{\bar{A}_{SM}} \right]$ 、 $\text{Im} \left[\frac{a_{NP}}{\bar{A}_{SM}} \right]$ 空間での S は右図のようになる。

本解析で得られた結果を用いて
 この2次元空間に制限を加えてみる。



S と a/A の関係

a_{NP}/A_{SM} への制限の contour

まず、 $BR(b \rightarrow s \gamma)$ から制限がかかっている。

$$BR(b \rightarrow s \gamma) \propto |A_{SM}|^2 + |a_{NP}|^2$$

理論 $BR_{SM} = (3.15 \pm 0.23) \times 10^{-4}$

実験 $BR_{HFAG} = (3.55 \pm 0.26) \times 10^{-4}$

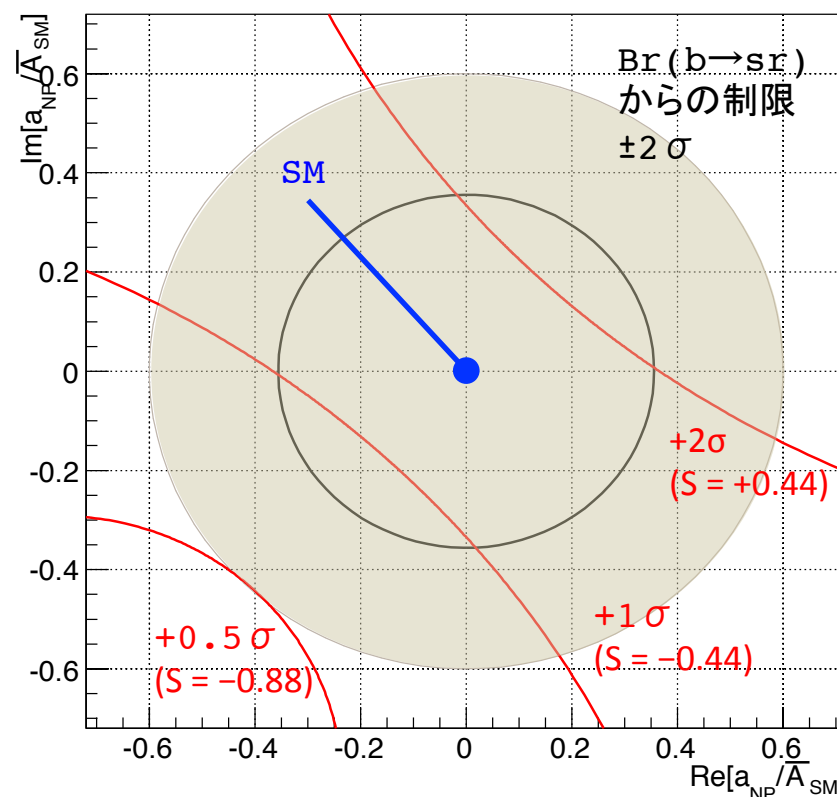
より、実験値が多い分は a_{NP} 由来と考え、
 図の半径方向に強く制限がかかっている。
 (茶色の円)

S の測定はさらにこれとは別の
 制限のかけ方をすることができる。
 (赤色の線)

2σ で許される領域の一部を
 排除する事ができた。
 標準模型に一致する部分は残っている。

注) 新物理の寄与の仮定
 $b \rightarrow s \gamma_R$: 有り
 $b \rightarrow s \gamma_L$, BB振動: 無し

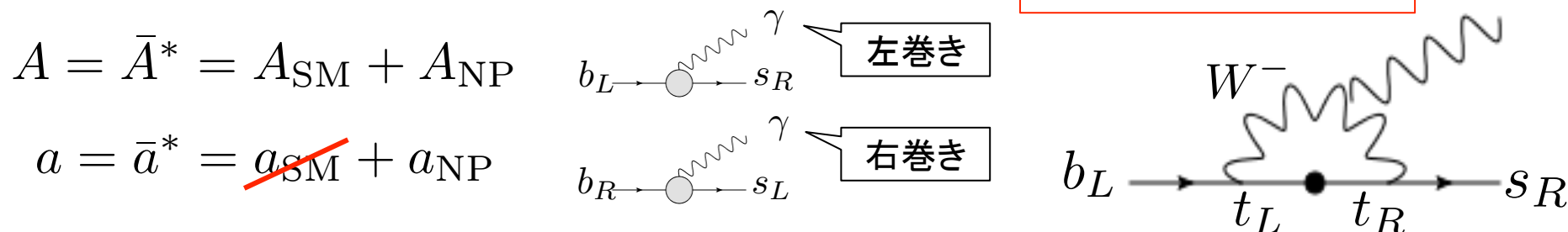
Limit contour



LR symmetric model ($A_{NP} \neq 0$)

次に、 A_{NP} が非ゼロの場合を、
LR symmetric model (W が q_L だけでなく q_R と結合) において考える。

LRSM のダイアグラム



このとき、 $|A_{SM} + A_{NP}|^2 + |a_{NP}|^2 = |A_{SM}|^2$ を満たす事ができ、

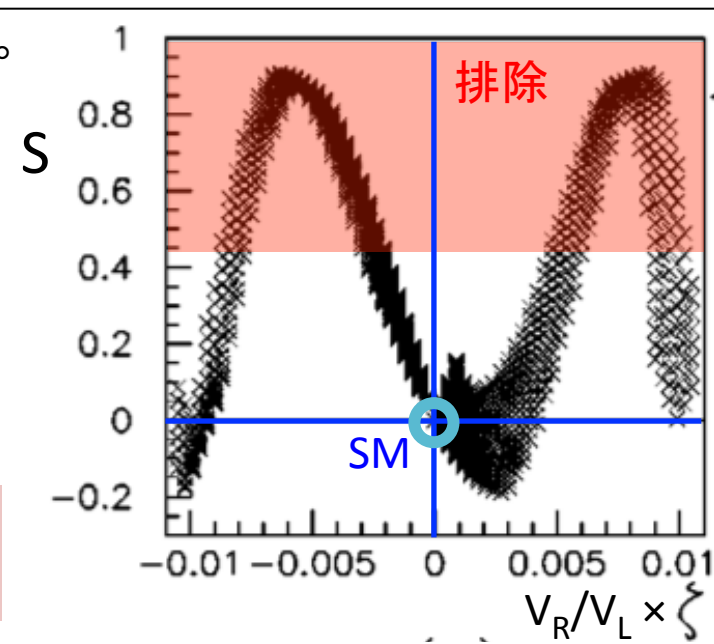
BR($b \rightarrow s\gamma$) 測定の制限を受けずに大きな A_{NP} , a_{NP} がとれる。

Phys. Rev. D 61, 054008 (2000年)

によると、 W_L と W_R の混合角 ζ と S の関係が右の様になる
パラメータの取り方がある。

(V_R が最大の値をとり、重い W_2 が 1.6 GeV,
荷電ヒッグス 14 GeV という仮定。)

本解析では、 2σ で $S=+0.44$ 以上を排除したので、
 ζ がとれる範囲をこのように制限できる。



まとめ

- Belle 実験で測定された 772 M の B 中間子対の崩壊データから、 $B^0 \rightarrow K_s \eta \gamma$ の時間依存の CP 非保存を測定。
- 標準模型では CP 非保存は強く抑制されている一方、一部の new physics では CP 非保存が大きくなる可能性がある。
- 本解析によって、CP 非保存のパラメータ S, A は、

$$S = -1.32_{-0.81}^{+0.88}(\text{stat.}) \pm 0.36(\text{syst.})$$

$$A = -0.48_{-0.33}^{+0.36}(\text{stat.}) \pm 0.07(\text{syst.})$$

と測定された。

- この結果は 2σ 以内で $(S,A)=(0,0)$ と無矛盾である。
- この結果は new physics の制限に用いられる。
- ニューラルネットを用いた新しい K_s finder を開発した。本解析では efficiency が 1.1 倍になった。これは、他の Belle の解析でも用いられる。