Measurement of EPR type flavor entanglement in $\Upsilon(4S) \rightarrow B^0 \overline{B^0}$ decays

PRL 99,131802 (2007)

2013.4.17

Eriko Kato

目次

- イントロ(物理の話、歴史的実験) 大部分
- 素粒子実験の場合
- 検出器
- 解析＆結果
- 解釈

目次

“Measurement of <u>EPR</u>? type flavor <u>entanglement</u>? in $\Upsilon(4S) \to B^0\overline{B^0}$ decays”

<イントロ>

- 物理の話
  - 量子もつれ(entanglement)とは
  - EPR 相関
  - ベルの不等式(CHSH)
  - 実在、局所性、決定論
- 代表的実験、歴史(アスペの実験)
  - そこから言えること、言えないこと。

<流れ>

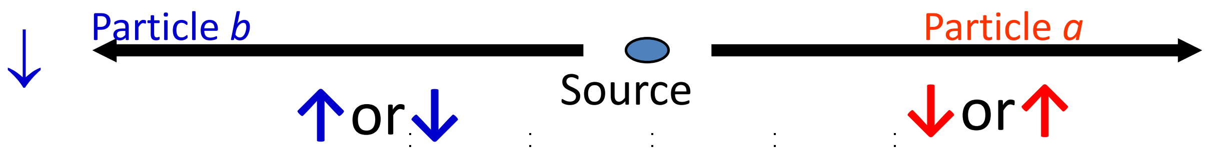
- 古典論VS量子論

➢ もっかい古典論を振り返ってみよう！
➢ 量子論の理解を深めよう！

Entanglement 量子もつれ

■量子力学では

- E.g. 一重項の状態から生じた2粒子は空間的には離れているが、同じ共通の波動関数に属している。: $\Psi_{a,b}$ は a と b を両方の状態を書き出し、全ての可能性の重ね合わせで表される。

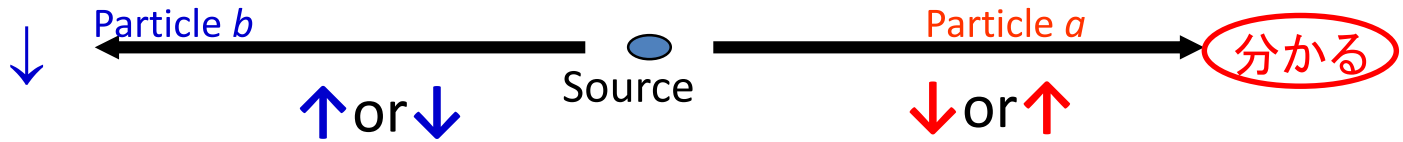


$$|\Psi_{a,b}\rangle = (1/\sqrt{2})\,(\,|\rangle_a\ |\downarrow\rangle_b + |\downarrow\rangle_a\ |\rangle_b\,)$$

量子力学: 測定しない限り、
結果は一意に決まらない。(波動関数の収縮)

➢ a の測定をすることで、b の状態が測定せずに**瞬時に**決まる。=非局所性
(entangle/もつれていた状態の重ね合わせが解かれる。)

EPR相関とは、まとめ



＜スピンの例に戻ってみよう！＞

- $\Psi=|\uparrow\downarrow>_x + |\downarrow\uparrow>_x$ で片方のスピンを測ることで、もう片方のスピンが分かるので実在を確かめられる！(物理量と値決まる)
- 同じように　$\Psi=|\uparrow\downarrow>_y + |\downarrow\uparrow>_y$ でも成立する。

※しかし、[Sx,Sy]=iSz　交換しないオブザーバブルは不確定性原理に従う。(e.g. [x,p]=ih)

- 粒子aをSxを測定。aのSxの実在決まる。→粒子bのSxが実在が決まる。
- 測定することで、もう片方の粒子の方向の実在が決定される＋その情報が瞬時に伝わる。

➢ 量子力学を仮定すると変な遠隔作用がなければならない。因果関係おかしくならない？何よりも気持ち悪い。(EPR)

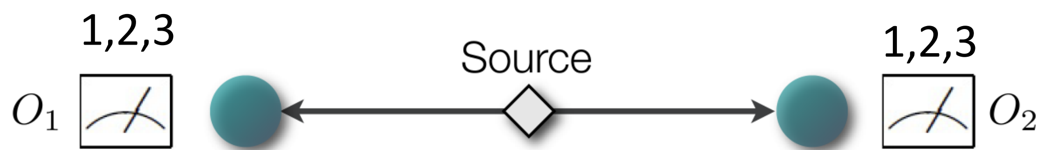
➢ 実は、量子力学が不完全で、変な遠隔作用はなく、隠れた変数で実在(物理量とその値)が決まっているのでは？

➢ ベルの不等式の出現により、初めて検証できるようになった。

Bellの不等式image

- EPR検証
  - 隠れた変数(2粒子に共通の指令書を持参)
  - 量子力学(変な遠隔作用で2粒子連絡とる)
- ２つの理論の違いを見たい
  - I)　完全相関(e.g. O_1: →O_2:)
  - II)　ランダム性(の確率、 の確率)

  に注目！
- 思考実験(dial一致でlamp完全相関)
  - Observer(O_1,O_2)のdial(1~3)は測定器(機械がランダムに選択)
  - O_1O_2でobserveされるlampはdial一致してれば完全相関(O_1dial3 →O_2dial3)
- 結果(量子力学の場合)
  - (dial番号によらず)全体におけるlampの色の一致する確率は50%。
  - 波動関数収縮前まで、 どっちかは等確率でdialもランダムなんだから当然
  - ➢ 完全相関、完全ランダム性両方満たす。



量子力学の場合

Ψ_1 =| > + | >
Ψ_2 =| > + | >
Ψ_3 =| > + | >

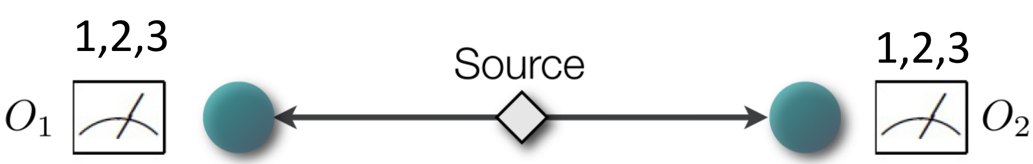
測定回数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
O_1	Dial	1	2	1	3	2	1	2	1	1	3	2	3	2
	Lamp	青	赤	青	赤	赤	青	青	赤	青	赤	青	青	赤
O_2	Dial	2	3	1	1	3	2	2	2	3	1	2	1	3
	lamp	赤	青	青	赤	青	赤	青	赤	青	青	青	赤	青

Bellの不等式image

- EPR検証
  - 隠れた変数(2粒子に共通の指令書を持参)
  - 量子力学(変な遠隔作用で2粒子連絡とる)
- 2つの理論の違いを見たい
  - I) 完全相関(e.g. O_1: →O_2:)
  - II) ランダム性(の確率、 の確率)

に注目！

- 思考実験(dial一致でlamp完全相関)
  - Observer(O_1,O_2)のdial(1~3)は測定器(機械がランダムに選択)
  - O_1O_2でobserveされるlampはdial一致してれば完全相関(O_1dial3 →O_2dial3)
- 結果(隠れた変数理論の場合)
  - Lampが一致する確率異なる。(それぞれで5/9を下らない)
- ➢ 完全相関は満たすが、完全にランダムにはならない。



1	2	3
青	赤	青

共通指令書
(2^3=8通り)

Lampが一致する組み合わせ

dial	1	2	3
1	✓		✓
2		✓	
3	✓		✓

✓ Lamp色一致

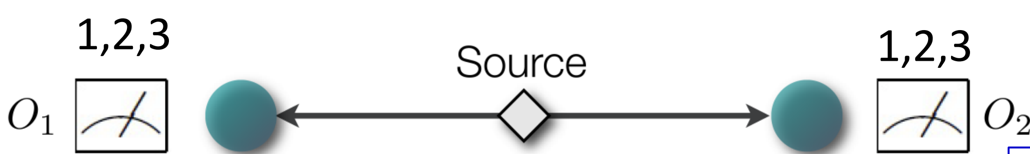
Bellの不等式image

- EPR検証
  - 隠れた変数(2粒子に共通の指令書を持参)
  - 量子力学(変な遠隔作用で2粒子連絡とる)
- 2つの理論の違いを見たい
  - I) 完全相関(e.g. O_1: →O_2:)
  - II) ランダム性(の確率、 の確率)

に注目！

- 思考実験(dial一致でlamp完全相関)
  - Observer(O_1,O_2)のdial(1~3)は測定器(機械がランダムに選択)
  - O_1O_2でobserveされるlampはdial一致してれば完全相関(O_1dial3 →O_2dial3)
- 結果(隠れた変数理論の場合)
  - Lampが一致する確率異なる。(それぞれで5/9を下らない)

➢ 完全相関は満たすが、完全にランダムにはならない。



1	2	3
青	青	青

共通指令書
(2^3=8通り)

Lampが一致する組み合わせ

dial	1	2	3
1	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓

Bellの不等式数学的証明

■ S

Bellの不等式

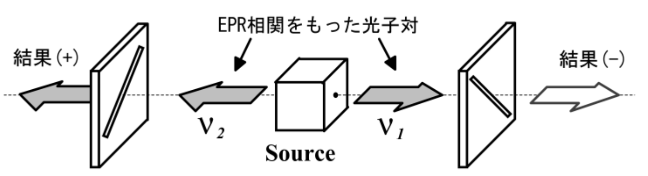
$$-2 \le E(\hat{\boldsymbol a},\hat{\boldsymbol b})+E(\hat{\boldsymbol a}',\hat{\boldsymbol b})-E(\hat{\boldsymbol a},\hat{\boldsymbol b}')+E(\hat{\boldsymbol a}',\hat{\boldsymbol b}')\le 2$$

遠隔作用のないどんな理論も不等式をみたす

$$E(\hat{\boldsymbol a},\hat{\boldsymbol b}) = \int \rho(\lambda)A(\lambda,\hat{\boldsymbol a})B(\lambda,\hat{\boldsymbol b})d\lambda \qquad \int \rho(\lambda)d\lambda = 1.$$

λ: 隠れた変数
ρ: 隠れた変数の分布関数
$\hat{a},\hat{b}$: 偏光フィルタの向き, dial etc
A(B):$\hat{a}$, ($\hat{b}$)の偏光測定の結果を出す関数
E($\hat{a},\hat{b}$):積A(λ, $\hat{a}$) B(λ, $\hat{b}$)の隠れた変数の分布ρ(λ)での平均。期待値

e.g.アスペの実験



証明

$$S = E(\hat{\boldsymbol a},\hat{\boldsymbol b})+E(\hat{\boldsymbol a}',\hat{\boldsymbol b})-E(\hat{\boldsymbol a},\hat{\boldsymbol b}')+E(\hat{\boldsymbol a}',\hat{\boldsymbol b}')$$

$$A(\hat{\boldsymbol a})B(\hat{\boldsymbol b})+A(\hat{\boldsymbol a}')B(\hat{\boldsymbol b})-A(\hat{\boldsymbol a})B(\hat{\boldsymbol b}')+A(\hat{\boldsymbol a}')B(\hat{\boldsymbol b}')$$
$$=\left(A(\hat{\boldsymbol a})+A(\hat{\boldsymbol a}')\right)B(\hat{\boldsymbol b})-\left(A(\hat{\boldsymbol a})-A(\hat{\boldsymbol a}')\right)B(\hat{\boldsymbol b}')$$

$$\left|\left(A(\hat{\boldsymbol a})+A(\hat{\boldsymbol a}')\right)B(\hat{\boldsymbol b})-\left(A(\hat{\boldsymbol a})-A(\hat{\boldsymbol a}')\right)B(\hat{\boldsymbol b}')\right|$$
$$\le \left|\left(A(\hat{\boldsymbol a})+A(\hat{\boldsymbol a}')\right)B(\hat{\boldsymbol b})\right|+\left|\left(A(\hat{\boldsymbol a})-A(\hat{\boldsymbol a}')\right)B(\hat{\boldsymbol b}')\right| \qquad |B|\le 1$$
$$\le \underbrace{\left|A(\hat{\boldsymbol a})+A(\hat{\boldsymbol a}')\right|}_{\pm\left(A(\hat{\boldsymbol a})+A(\hat{\boldsymbol a}')\right)}+\underbrace{\left|A(\hat{\boldsymbol a})-A(\hat{\boldsymbol a}')\right|}_{\pm\left(A(\hat{\boldsymbol a})-A(\hat{\boldsymbol a}')\right)}$$

$=\pm 2A(\hat{\boldsymbol a}')$, $\pm 2A(\hat{\boldsymbol a})$ と2以下

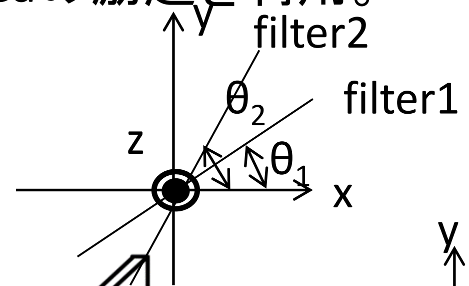
$$\left|\left(A(\hat{\boldsymbol a})+A(\hat{\boldsymbol a}')\right)B(\hat{\boldsymbol b})-\left(A(\hat{\boldsymbol a})-A(\hat{\boldsymbol a}')\right)B(\hat{\boldsymbol b}')\right|$$
$$=A(\hat{\boldsymbol a})B(\hat{\boldsymbol b})+A(\hat{\boldsymbol a}')B(\hat{\boldsymbol b})-A(\hat{\boldsymbol a})B(\hat{\boldsymbol b}')+A(\hat{\boldsymbol a}')B(\hat{\boldsymbol b}')\le 2$$

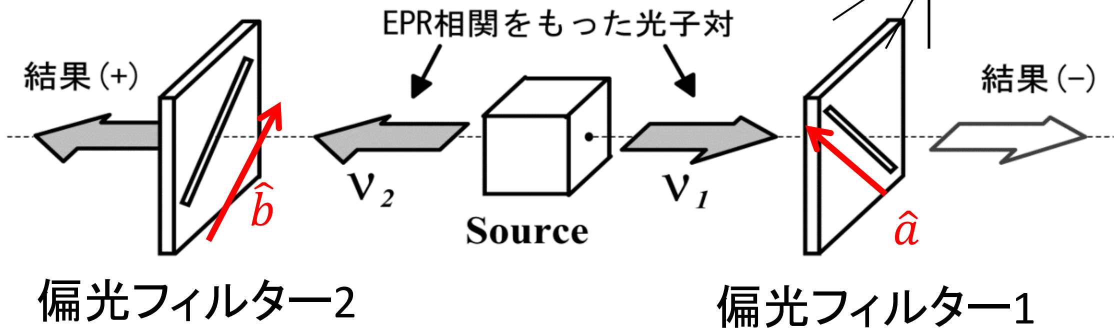
最後にρ(λ)について平均とれば終了

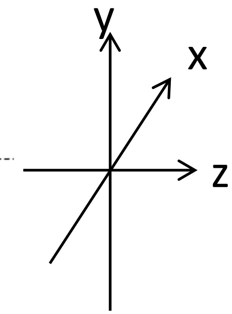
アスペの実験

- ベルの不等式の検証
  - スピン0(一重項)の粒子→γγ (2粒子偏光逆)
  - Sourceは(なんでもいいけどアスペは)Caの励起を利用。

初めの光の強度$\cos\theta_{12}$倍
エネルギーは、$|\cos\theta_{12}|^2$倍
$\Theta_{12}=\theta_1-\theta_2$







入射光の偏光が$\hat{a}, \hat{b}$と平行だと結果(+1)。垂直だと結果(−1)
＋、ーをとる確率は $P_+(\hat{a})=P_-(\hat{a})=1/2$、$P_+(\hat{b})=P_-(\hat{b})=1/2$

光子対の偏光の測定結果:(+,+),(+,-),(-,+),(-,-)を取る確率

透過確率 $P_{++}(\hat{\boldsymbol{a}},\hat{\boldsymbol{b}}) = P_{--}(\hat{\boldsymbol{a}},\hat{\boldsymbol{b}}) = \frac{1}{2}\cos^2\theta_{ab}$ $\quad P_{+-}(\hat{\boldsymbol{a}},\hat{\boldsymbol{b}}) = P_{-+}(\hat{\boldsymbol{a}},\hat{\boldsymbol{b}}) = \frac{1}{2}\sin^2\theta_{ab}$

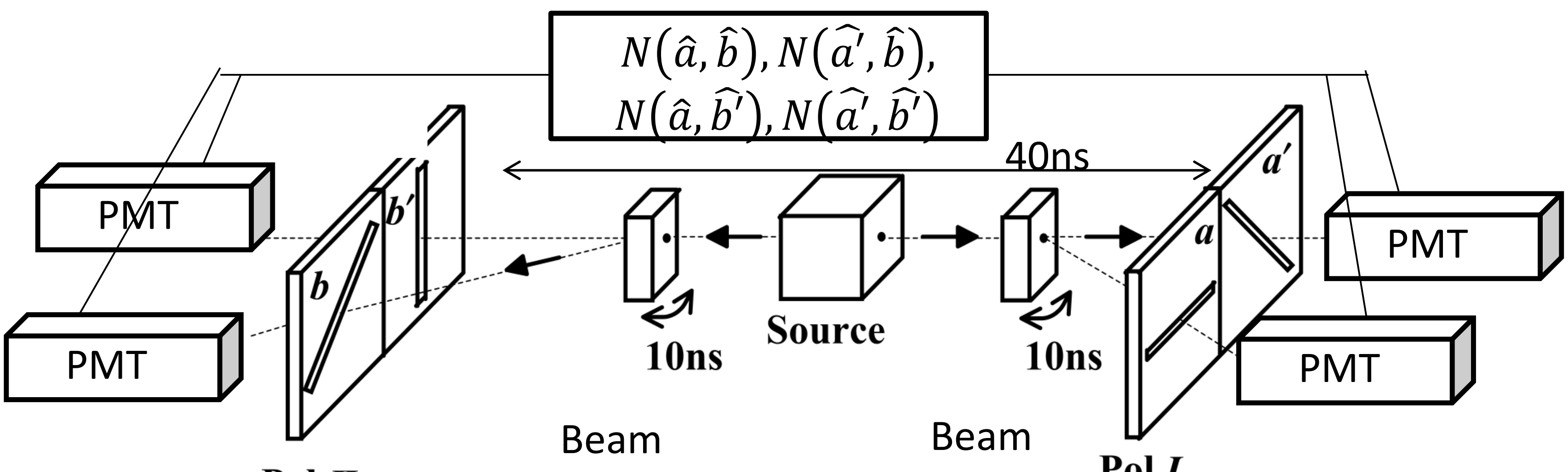
期待値:
$$\begin{aligned} E(\hat{\boldsymbol{a}},\hat{\boldsymbol{b}}) &= (P_{++}+P_{--})-(P_{+-}+P_{-+}) \\ &= \left(\frac{1}{2}\cos^2\theta_{ab}+\frac{1}{2}\cos^2\theta_{ab}\right)-\left(\frac{1}{2}\sin^2\theta_{ab}+\frac{1}{2}\sin^2\theta_{ab}\right) \\ &= \cos 2\theta_{ab} \end{aligned}$$

※a||bなら
$P_{+-}=0, P_{++}=1/2$
E=1

アスペの実験

- さらに光速以上やり取りの有無を検証
  - Sourceで光子が出た”後”にbeam splitterで方向をランダムに切換。
  - PMTが鳴った数をそれぞれ数えて、E,Sを計算。

$$E(\hat{\boldsymbol{a}},\hat{\boldsymbol{b}}) = (P_{++}+P_{--})-(P_{+-}+P_{-+})$$
$$S = E(\hat{\boldsymbol{a}},\hat{\boldsymbol{b}}) + E(\hat{\boldsymbol{a}}',\hat{\boldsymbol{b}}) - E(\hat{\boldsymbol{a}},\hat{\boldsymbol{b}}') + E(\hat{\boldsymbol{a}}',\hat{\boldsymbol{b}}')$$



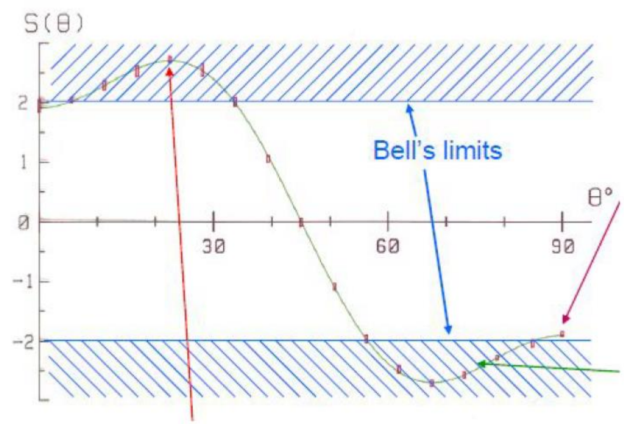
アスペの実験loophole

- 計算　$S=E(\hat{\boldsymbol{a}},\hat{\boldsymbol{b}})+E(\hat{\boldsymbol{a}}',\hat{\boldsymbol{b}})-E(\hat{\boldsymbol{a}},\hat{\boldsymbol{b}}')+E(\hat{\boldsymbol{a}}',\hat{\boldsymbol{b}}')$
  - $\hat{a}$, $\hat{b}$, $\hat{a}'$, $\hat{b}'$のx 軸となす角度をθ_1 ,θ_2 ,θ_3 ,θ_4
  - $\theta_2 = \theta_1 + \pi/8$, $\theta_3 = \theta_2 + \pi/8$, $\theta_4 = \theta_3 + \pi/8$, とすると
  - $\theta_4 = \theta_1 + \pi 5/4$　で

$$S=\cos(\pi/4)-\cos(3\pi/4)+\cos(\pi/4)+\cos(\pi/4)=2\sqrt{2}$$

量子力学ベルの不等式破れる
＞2

- 結果
  - いろんな角度のSを測定
  - 測定値がBell ineq.限界2を超えた



- Loophole
  - PMTの検出効率が低い。
  - 光の強度∝光子の数∝検出効率
  - 違うバリエーションのbelle ineq.試すと破れたり、破れなかったり、検出効率低い分、隠れた変数理論入る余地あるらしい。
  - 検出効率が低いと2か所の相関が十分取れない。

素粒子との関連

- 素粒子検出器
  - 検出効率がいい。とくにCharge trackなど。

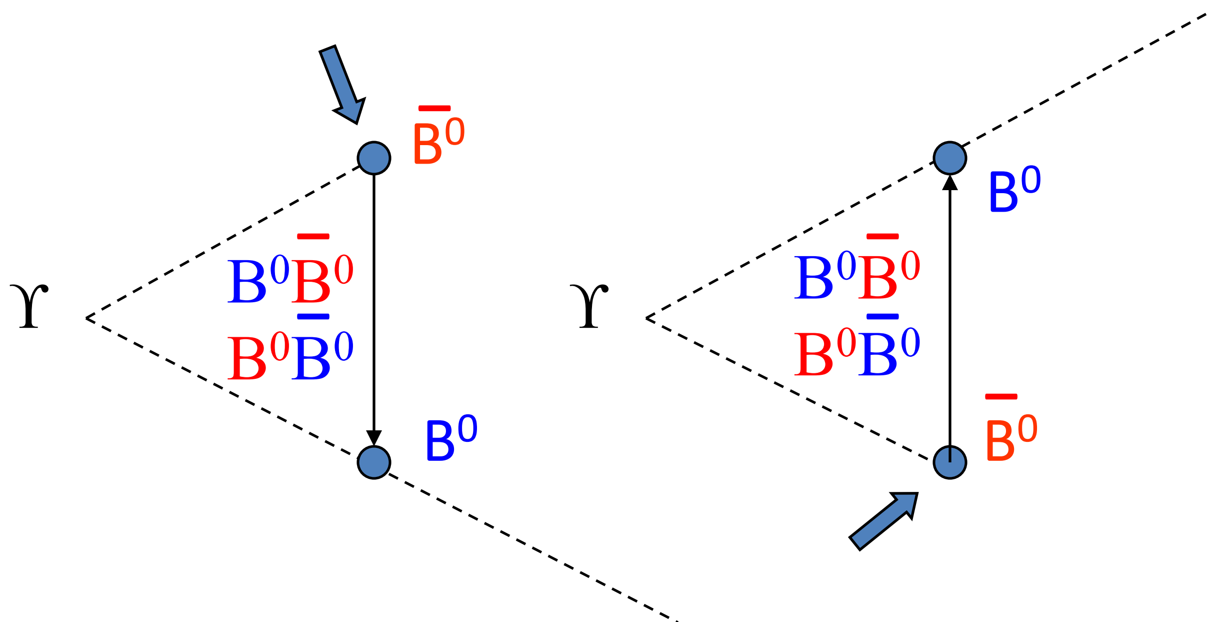
  →bell ineq.のバリエーションの制約にあまり依存しない。
- $K^0\overline{K^0}$ や$B^0\overline{B^0}$のflavor Asymmetryを見よう
  - Time dependent flavor asymmetryが、量子力学と隠れた変数理論で異なる振舞い。
  - アスペの実験でloopholeとなる隠れた変数理論を検証できるらしい。

➢ asymmetric colliderなら崩壊時間測定可能（PMTと比べて精度はあまりないが一応可能）

素粒子物理での量子もつれ

- スピンだけでなく、$\Upsilon(4S)\rightarrow B^0\overline{B^0}$ のような大きな粒子系のflavorにも量子もつれの現象は見れる。
- 片方がB^0ならもう片方は$\overline{B^0}$。しかし、観測されるまで、flavorは決まっていない。

$$|\Psi\rangle = (1/\sqrt{2})\,(\,|B^0\rangle_a\,|\overline{B^0}\rangle_b - |\overline{B^0}\rangle_a\,|B^0\rangle_b\,)$$



フレーバー状態と混合

$$|\Psi\rangle = (1/\sqrt{2})\,(\,|B^0\rangle_a\,|\overline{B}^0\rangle_b - |\overline{B}^0\rangle_a\,|B^0\rangle_b\,)$$

- $B^0, \overline{B^0}$: フレーバー固有状態
- B_H, B_L:質量固有状態(Δm_d=3.3*10^{-10}MeV, 0.5*10^{12} hs^{-1})
- 時間発展 : $\Psi(t)=\Psi_0 e^{-i\lambda t}$, $\lambda = m - i\gamma/2$
  - 不安定粒子 : $1/\gamma$=1.542ps ($\gamma_H \sim \gamma_L$)

$H\Psi_0=\lambda\Psi_0$ Ψ_0:$|B_H>=\binom{p}{q}$, $|B_L>=\binom{p}{-q}$

$|B_H>=p|\,B^0\,>+q|\overline{B^0}>$)

$|B_L>=p|\,B^0\,>-q|\overline{B^0}>$)

$|\,B^0\,> = 1/p(|B_H> + |B_L>)$

時間発展 → $e^{-i\lambda_L t}|B_L>$ = $p|\,B^0\,> - q|\overline{B^0}>$

時間発展 → $e^{-i\lambda_H t}|B_H>$ = $p|\,B^0\,> + q|\overline{B^0}>$

$|\,B^0\,> \rightarrow f(t)\,|\,B^0\,> + \bar{g}(t)|\overline{B^0}>$

$|\overline{B^0}> \rightarrow \bar{f}(t)\,|\,B^0\,> + g(t)|\overline{B^0}>$

$f(t) = \bar{f}(t) = \frac{e^{-i\lambda_L t}+e^{-i\lambda_H t}}{2}$

$g(t) = \frac{p}{q}\frac{e^{-i\lambda_L t}-e^{-i\lambda_H t}}{2}$, $g(t) = \frac{p}{q}\frac{e^{-i\lambda_L t}+e^{-i\lambda_H t}}{2}$

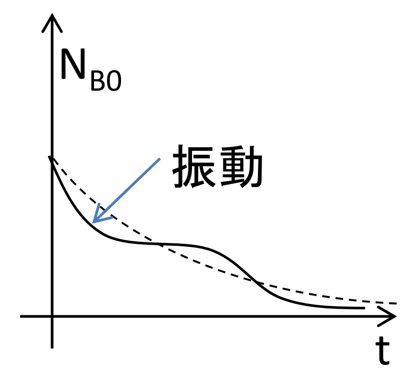
$\gamma_{\pm} = \frac{\gamma_H \pm \gamma_L}{2}$

Decay rate

$$\Gamma_{B^0\rightarrow B^0}(t) = \Gamma_{\overline{B^0}\rightarrow\overline{B^0}}(t) = 1/4(e^{-\gamma_H t} + e^{-\gamma_L t} + 2e^{-\gamma_+ t}\,\underline{\cos\Delta mt})$$

$$\Gamma_{B^0\rightarrow\overline{B^0}}(t) = 1/4|\frac{p}{q}|^2(e^{-\gamma_H t} + e^{-\gamma_L t} - 2e^{-\gamma_+ t}\,\underline{\cos\Delta mt})$$

$$\Gamma_{B^0\rightarrow\overline{B^0}}(t) == 1/4|\frac{q}{p}|^2(e^{-\gamma_H t} + e^{-\gamma_L t} - 2e^{-\gamma_+ t}\,\underline{\cos\Delta mt})$$



Time dependent flavor asymmetry

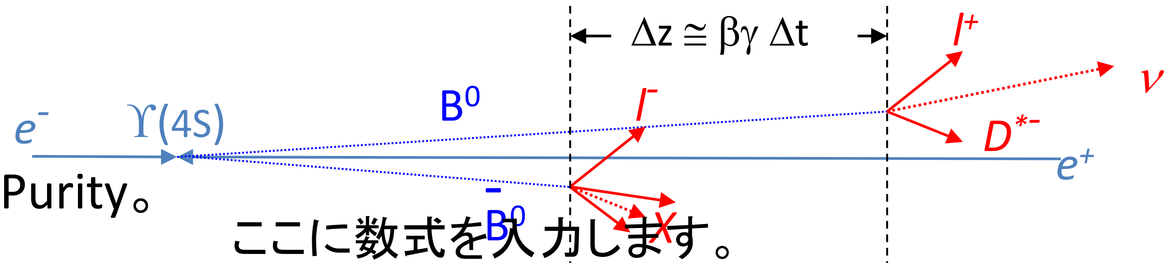
- Time dependent flavor asymmetry

e.g. $N_{++}(\Delta t) = N_{B^0 \to B^0}(\Delta t) = \int_0^{\Delta t} \Gamma_{B^0 \to B^0}(T)\,dT$

片方のBが崩壊することでもう片方のBのフレーバ決定時間発展リセット。

$$A(\Delta t) = \frac{N_{+-}(\Delta t)+N_{-+}(\Delta t)-N_{++}(\Delta t)-N_{--}(\Delta t)}{N_{++}(\Delta t)+N_{--}(\Delta t)+N_{+-}(\Delta t)+N_{-+}(\Delta t)} = \cos\Delta m\Delta t$$

- 欲しい情報
  - 時間差、flavor
  - 高Vertex精度。高Purity。



ここに数式を入力します。

- 方針
  - 候補1:semi-leptonic decayのleptonでflavor tag.Dは両サイドともcharged hadronに崩壊するもの。
  - 候補2:semi-leptonic decayのleptonでflavor tag.片方は、Dがcharged hadronに崩壊。もう片方はD→anything
  - ➢ まだ統計が足りないので候補2採用。

First B^0: Fully reconstructed semileptonic decay

$B^0 \to D^{*-} l^+ \nu$, ($l^+ = e^+, \mu^+$)
$\quad \to D^0 \pi^-$
$\quad\quad \to K^+\pi^-, K^+\pi^-\pi^0, K^+\pi^-\pi^+\pi^-$

Branching Ratio=4.6%

Second B^0: only ID lepton to tag flavor

$B^0 \to l^- X$

Branching ratio=10.5%

BELLE experiment

KEKB:

CMS energy @ $\Upsilon(4S)$

$\beta\gamma = 0.425$

SVD:

$\sigma_z \approx 55\mu m$

for 1 GeV/c at 90°

CDC:

$\sigma_p/p \approx 0.35\%$

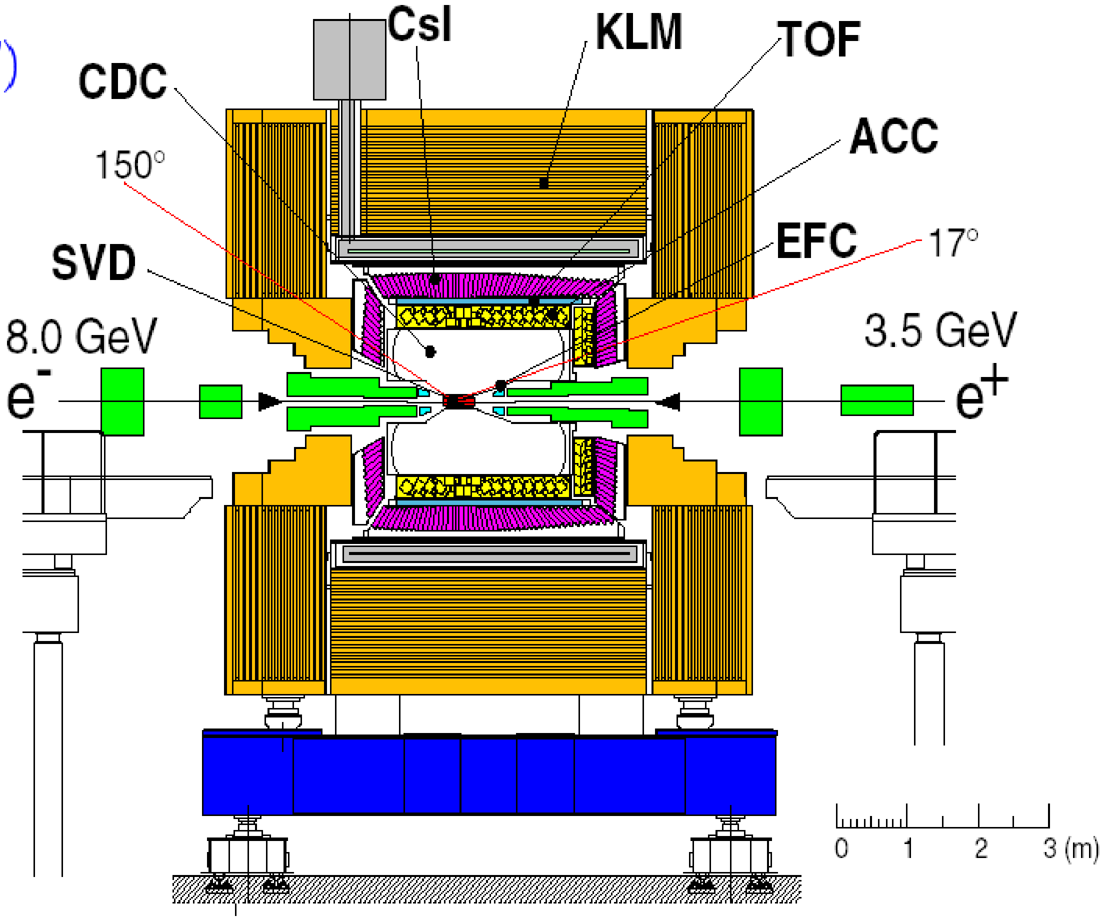
at 1 GeV/c

KLM:

$\epsilon_\mu > 90\%, \sim 2\%$ fakes

Magnet: 1.5 T

Superconducting solenoid



積分ルミノシティー 140 fb^{-1} (B 152*10^{6}個相当)

QM vs. Spontaneous Disentanglement

量子力学と対抗して２つのモデルを見ていく

1. Spontaneous disentanglement (SD) into $B^0\bar{B}^0$ at t~0.

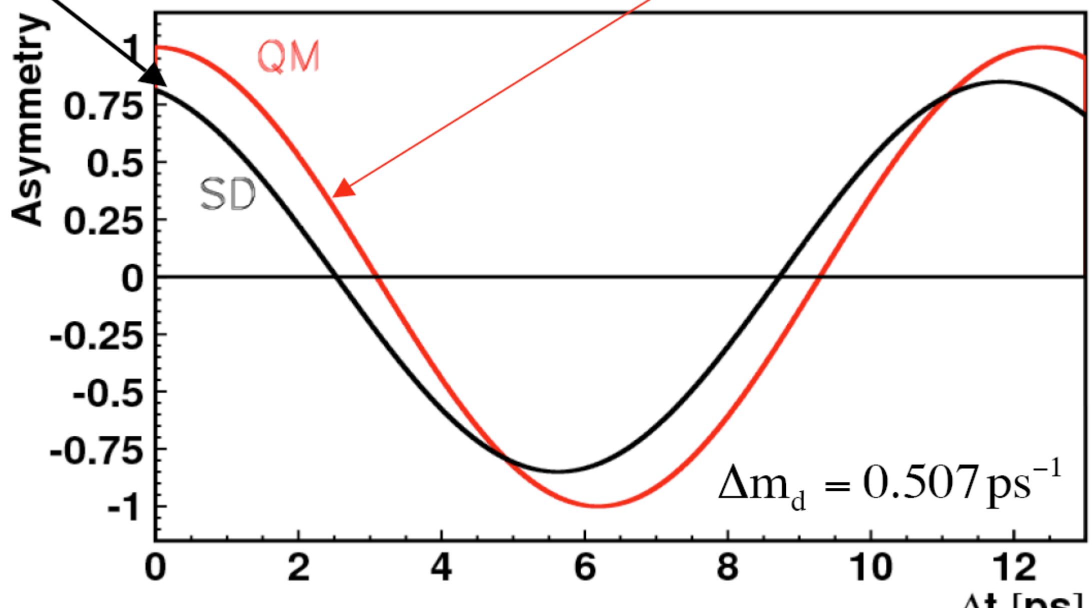
それぞれのＢが独立に時間発展。

片方のBが決定してもう片方のBのフレーバが決定されないので、
時間発展リセットなし。普通にt1+t2 , t1-t2 成分に分けられるだけ。

$$A_{SD}(t_1,t_2) = \cos(\Delta m_d t_1)\cos(\Delta m_d t_2) = \frac{1}{2}[\cos(\Delta m_d(t_1+t_2)) + \cos(\Delta m_d \Delta t)]$$

A_{SD} (average out t_1+t_2)

$A_{QM}(\Delta t)=\cos(\Delta m_d\,\Delta t)$



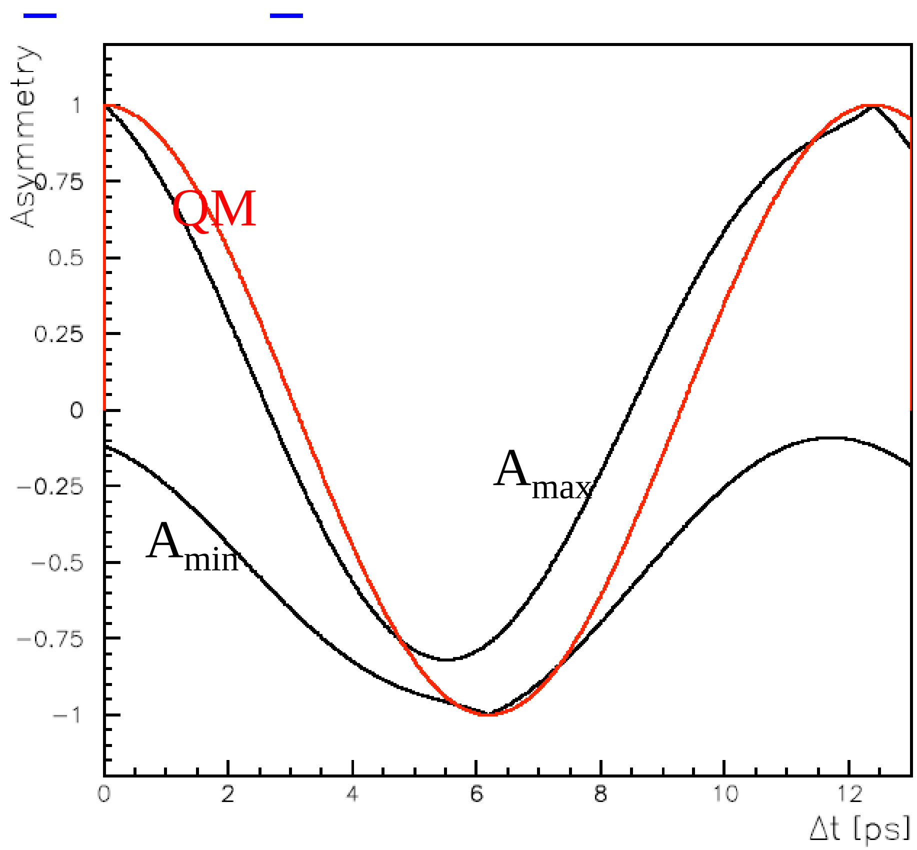
QM vs. Local Realism by PS

2. Local Realism model by Pompili & Selleri (PS): 常に4つの状態が存在している

: B^0_H, B^0_L, $\overline{B_H{}^0}$, $\overline{B_L{}^0}$

- ■ 隠れた変数:
  - λ_1: CP=+1 or -1
  - λ_2:Flavour=+1 or -1
- それぞれの B^0 は QM 時間発展

- A_{max} and A_{min} の間をとる



F. Selleri, Phys. Rev. A 56 (1997) 3493

A. Pompili and F. Selleri, Eur. Phys. J. C14 (2000) 469

Analysis Steps

- $140fb^{-1}$ (152MのＢ)のデータ使用。
- Event selection
- Background subtraction
  - Fake D*
  - Uncorrelated D*l
  - B^{+-}→$D^{**}l\nu$
- Wrong flavor tag correction
- Data deconvolution
- result

Event selection

- Semileptonic B side:

Variable	Cuts
P^{CMS}_{lepton}	$1.4GeV/c < P^{CMS}_{lepton} < 2.4GeV/c$
Slow π vertex constr. to B	$\chi^2/dof < 100$
K/π likelihood for π	$K3\pi$ mode: $Prob_{K/\pi} < 0.5$ $K\pi, K\pi\pi^0$ mode: $Prob_{K/\pi} < 0.3$
P_{π^0}	$P_{\pi^0} > 0.2GeV/c$
P_γ	$P_\gamma > 0.08\ GeV/c$
$P_{K,\pi}$ ($K3\pi$ mode)	$P_{K,\pi} > 0.2GeV/c$
Impact parameters	$\lvert dr_{IP}\rvert < 0.2$cm
$\cos(\theta_{B,D^*l})$	$\lvert\cos(\theta_{B,D^*l})\rvert < 1.1$
D^0 mass	$-37MeV/c^2 < M_{K\pi\pi^0} - M_{D^0} < 23MeV/c^2$ $-13MeV/c^2 < M_{K\pi,K3\pi} - M_{D^0} < 13MeV/c^2$
$M_{D^*} - M_{D^0}$	$144.4MeV/c^2 < M_{D^*} - M_{D^0} < 146.4MeV/c^2$
$P^{CMS}_{D^*}$	$P^{CMS}_{D^*} < 2.6GeV/c$
B^0 vertex	$\chi^2/dof < 75$
B_{tag} vertex	$\chi^2/dof < 75$

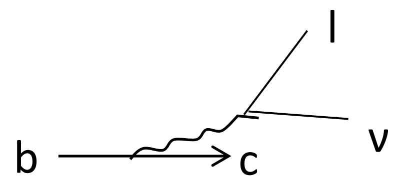
$B^0 \to D^{*-} l^+ \nu$, $(l^+ = e^+, \mu^+)$

$\quad \vert\!\to D^0\pi^-$

$\quad\quad \vert\!\to K^+\pi^-, K^+\pi^-\pi^0, K^+\pi^-\pi^+\pi^-$

Branching Ratio=4.6%

Hadonic→vertexの位置



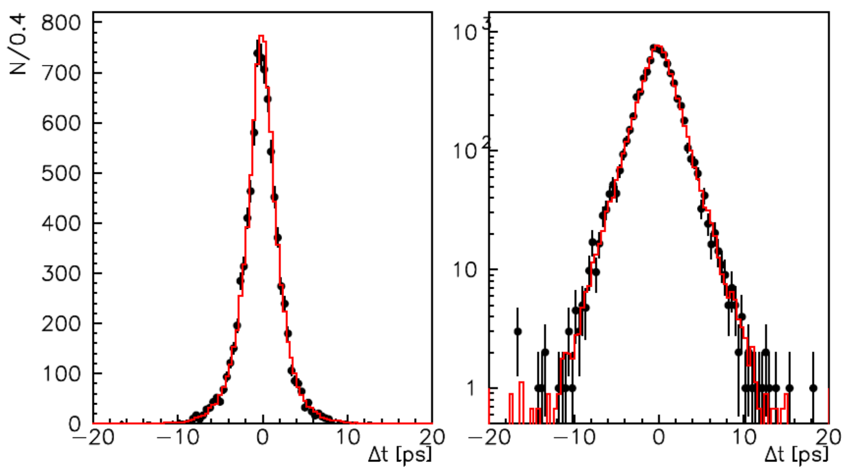
$$M_\nu^2 = (E_B^* - E_{D^*\ell}^*)^2 - |\vec{p}_B^{\,*}|^2 - |\vec{p}_{D^*\ell}^{\,*}|^2 + 2|\vec{p}_B^{\,*}||\vec{p}_{D^*\ell}^{\,*}|\cos(\theta_{B,D^*\ell}),$$

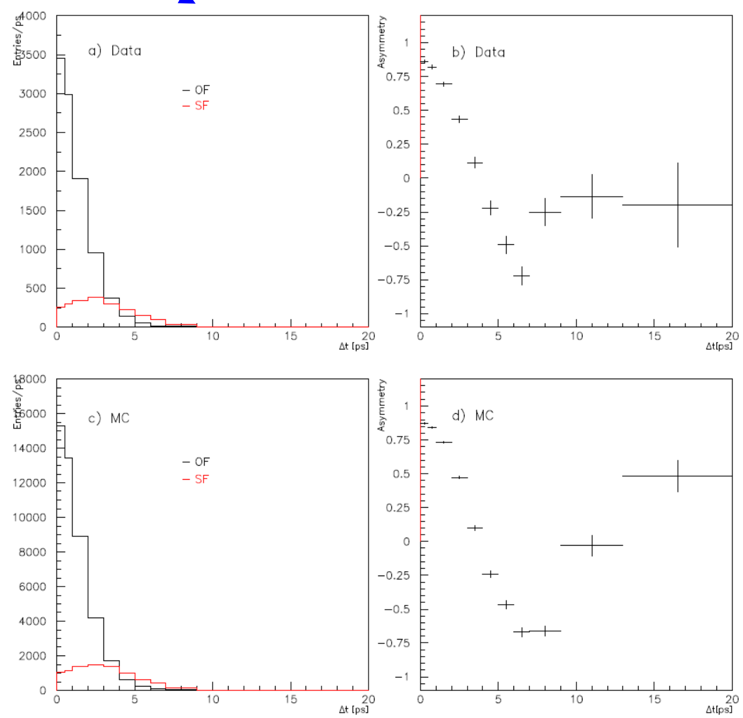
Once the B^0 is selected, all other tracks are used to identify the flavor of the accompanying B. Lepton tag only and r>0.875 to obtain highest purity.

After event selection: MC vs Data

Total of 6718 (OF) and 1847 (SF) events selected

Consistence check: MC vs. data in Δt distribution for OF+SF (independent of QM entanglement assumption in MC)





Systematics

We estimate the systematics after subtracting backgrounds (Fake D*, Uncorrelated D*l, charged B) and wrong flavor tag:

Δt bin	Evt sel.	Fake D^*	Uncor. D^*l	Wrg Flv	$B^\pm$	Tot analysis
1	0.0054	0.0020	0.0058	0.0100	0.0134	0.0186
2	0.0055	0.0032	0.0060	0.0098	0.0130	0.0185
3	0.0130	0.0025	0.0042	0.0087	0.0132	0.0211
4	0.0082	0.0019	0.0023	0.0065	0.0120	0.0162
5	0.0092	0.0008	0.0072	0.0066	0.0126	0.0184
6	0.0211	0.0081	0.0068	0.0130	0.0134	0.0301
7	0.0195	0.0051	0.0123	0.0124	0.0144	0.0303
8	0.0339	0.0061	0.0174	0.0195	0.0187	0.0471
9	0.0410	0.0079	0.0211	0.0222	0.0213	0.0559
10	0.0669	0.0214	0.0571	0.0380	0.0233	0.1009
11	0.1449	0.0226	0.2222	0.0803	0.0416	0.2812

cuts (appendix B)
$\oplus$ M(D*)–M(D^0)
$\oplus$ cos(θ_{B,D^*l})

M(D*)–M(D^0)
different sidebands

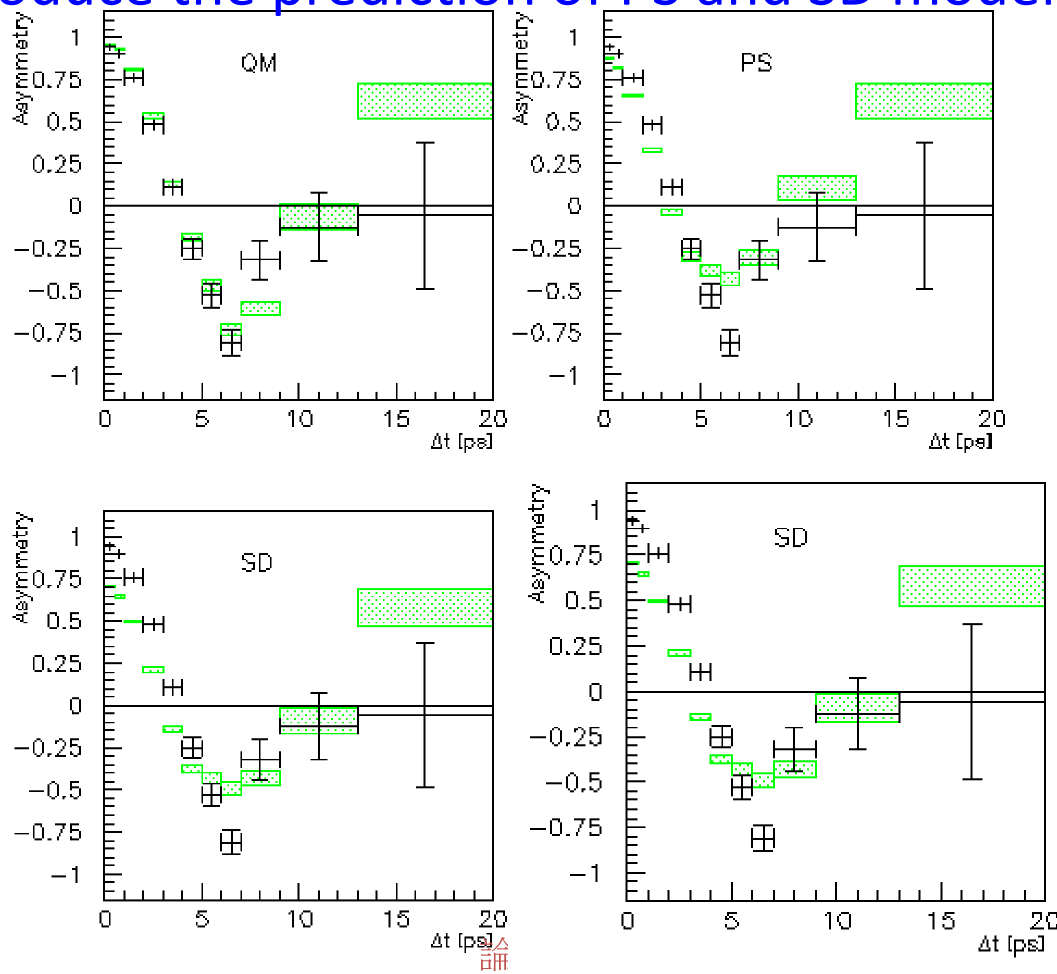
±1σ variation
in SF/OF distrib

ω = 1.5±0.5%
$\Rightarrow$ ±1 %
$\oplus$ ±1σ variation
in SF/OF distrib

fit errors in
B$^\pm$ fraction
and BRs ratio

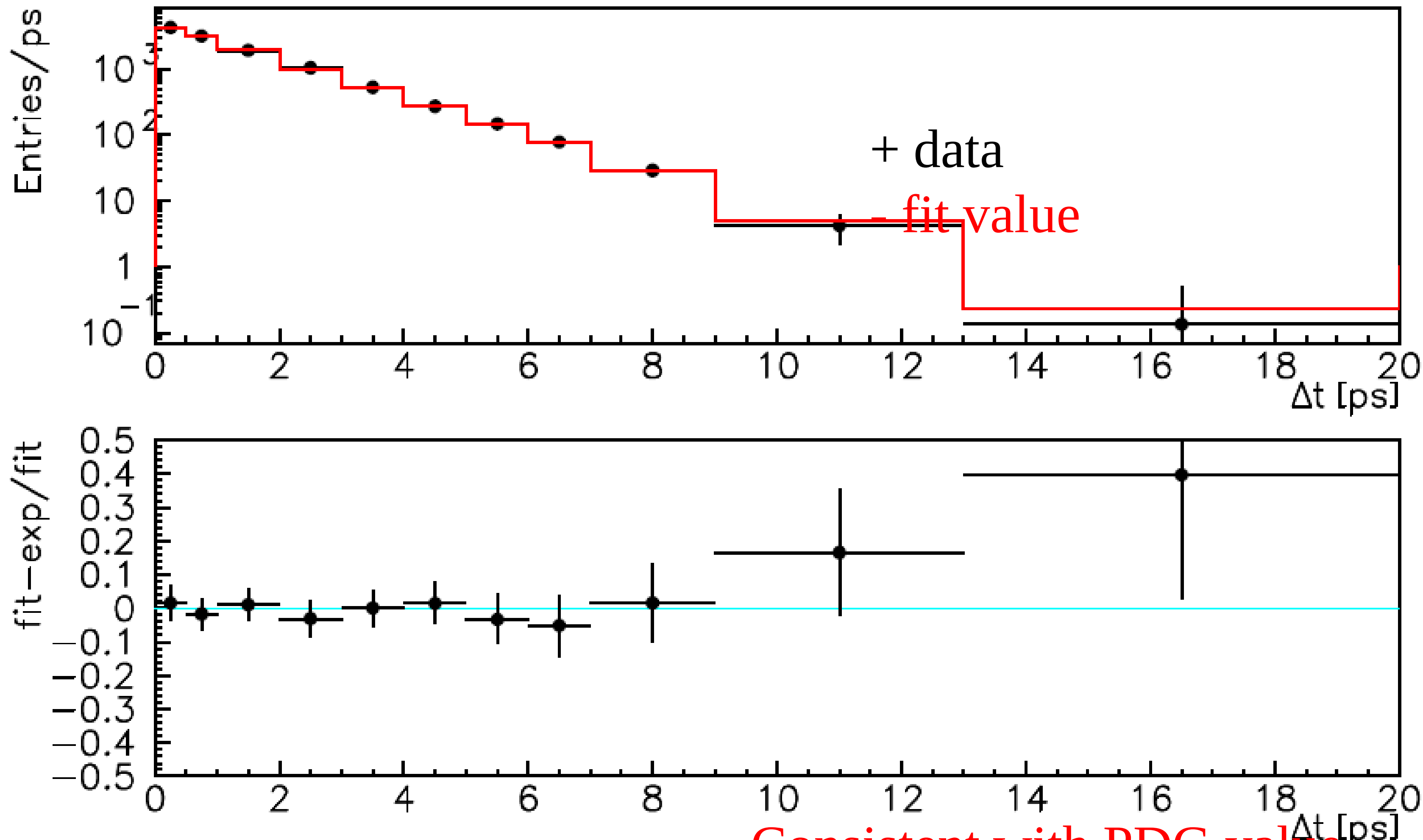
Cross Check: Forward Test

- At this stage, we compare data with MC prediction for QM, LR and SD results
- Since our MC is generated with QM correlation, we re-weight each event to produce the prediction of PS and SD models.



Cross Check: B^0 lifetime

Add OF+SF and fit the lifetime of B^0:



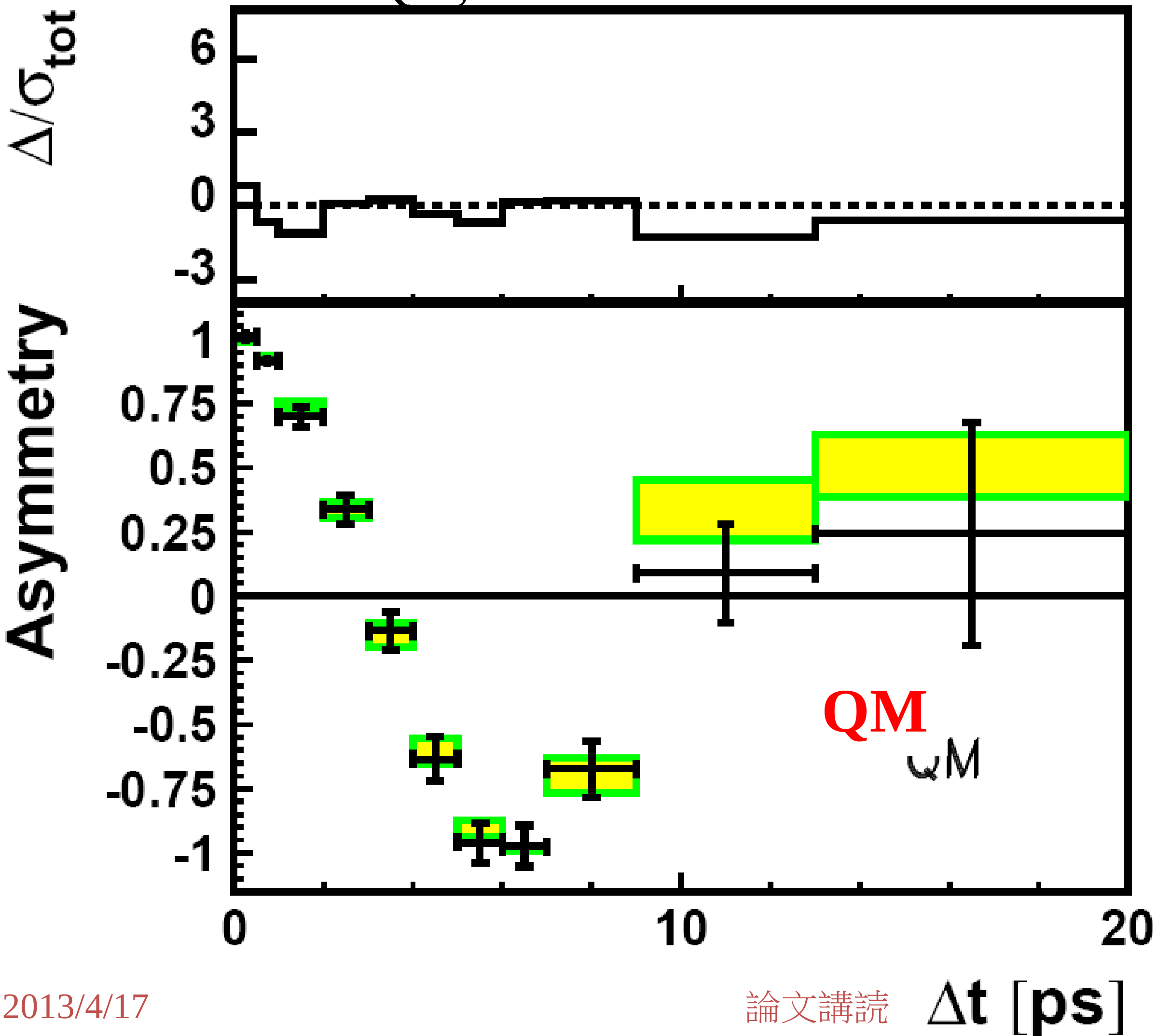
τ=1.532±0.017 ps

χ^2=3/11 bins

Consistent with PDG value

Result: Comparison with QM

We let Δm_d float (but with the constraint Δm_d=(0.496±0.013)ps^{-1}, from the best experimental value excluding entangled B pair measurements) and fit data to QM, we obtain:

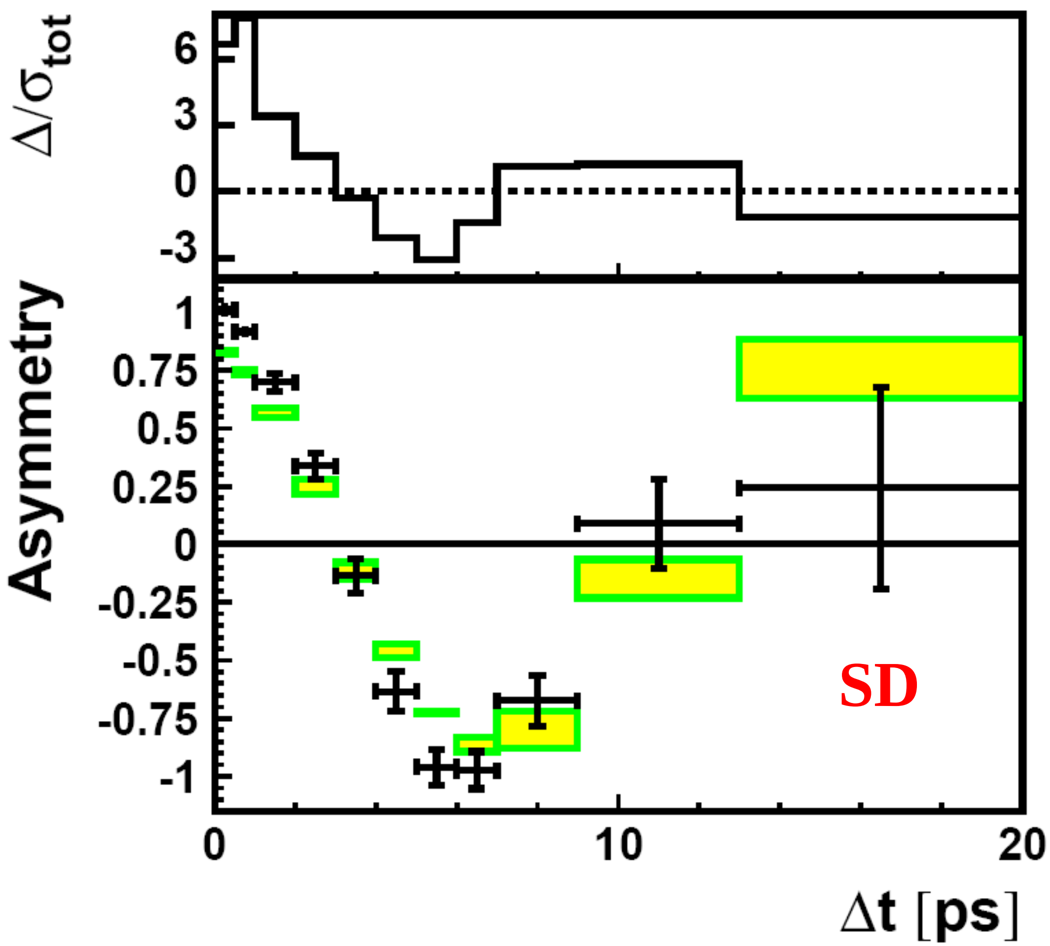


Δm_d=(0.501±0.009)ps^{-1}
χ^2=5 (for 11 bins)

Data fits QM quite Well!!

Result: Comparison with SD model

We let Δm_d float (but with the constraint $\Delta m_d=(0.496\pm0.013)ps^{-1}$) and fit data to SD model, we obtain:

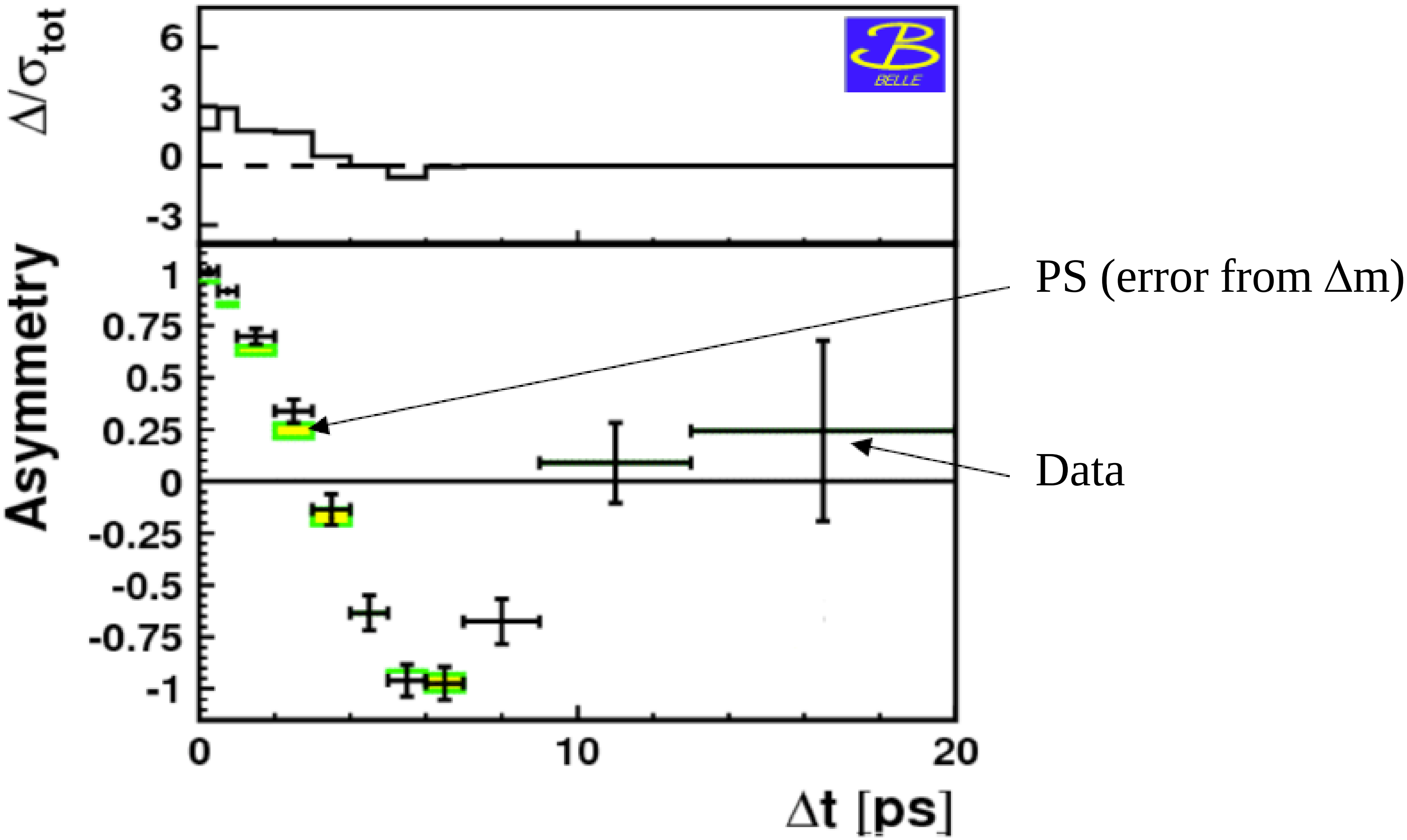


$\Delta m_d=(0.419\pm0.008)ps^{-1}$
$\chi^2=174$ (for 11 bins)

Hypothesis Test:
Data favors QM over SD model by 13σ.
Completely ruled out!

PS model vs. QM

Fit data to PS model, using the closest boundary. We conservatively assign a null deviation when data falls between A_{max} and A_{min}



Data favors QM over PS model by 5.1σ. Strongly ruled out!

Decoherence Check

- One can construct a model where only a fraction (λ) of the B^0 pair disentangle into $B^0\,\overline{B^0}$, the asymmetry becomes:

  $$A=(1-\zeta)A_{QM}+\zeta A_{SD}$$

- Single parameter λ fit gives:
  - $\zeta=0.029\pm0.057$
- Consistent with 0 (=> no decoherence)

Previous estimate from CLEO and Argus data: $\zeta=-0.06\pm0.10$ (Bertlmann and Grimus: PRD64 (2001) 056004)

Similarly, one can fit decoherence in $B_H B_L$ basis:

$A=(1-\zeta)A_{QM}$ $\rightarrow$ $\zeta=0.004\pm0.017$

Conclusion

- EPR-type quantum entanglement has been observed both in K^0 and B^0_d mesons
  1. K meson: PLB 422 (1998) 339
  2. B meson: quant-ph/0702267 (submitted to PRL)
- B^0 system: Local Realism models can be tested: two specific models has been ruled out.
- Decoherence are measured in both systems, consistent with zero.

Bell inequlality

- Photonのとき同様、cosで書かれている。

$$A(\Delta t) = \frac{N_{+-}(\Delta t)+N_{-+}(\Delta t)-N_{++}(\Delta t)-N_{--}(\Delta t)}{N_{++}(\Delta t)+N_{--}(\Delta t)+N_{+-}(\Delta t)+N_{-+}(\Delta t)} = \cos\Delta m\Delta t$$

- ベルの不等式計算できる。

$$S(\Delta t) = 3E_R(\Delta t) - E_R(3\Delta t) \leq 2$$

$$S = 2.725 \pm 0.167_{\mathrm{stat}} \pm 0.092_{\mathrm{syst}}$$

- 3シグマ以上で破っている。

BACKUP

参考文献

■「量子力学の反常識と素粒子の自由意思」筒井泉

量子力学のエッセンス

- 量子力学のエッセンス
  - 物理量の量子化(プランク光の量子性)
  - 測定結果の確率性
  - 不確定性原理
  - 重ね合わせの原理(スリットの実験)
  - 測定後の状態収縮(測定後の状態から測定量に関する不確定性は消えて測定に関する限り確定的状態になる)

  ※コペンハーゲン解釈

原理と測定がうまく一致。
場の理論には、不確定性入っていない

量子力学vs古典力学(1粒子記述の場合)

	物理量	測定結果	測定後の状態	不確定性	重ね合わせ	時間発展
古典力学	連続量	確率的	変化しない	なし	なし	Newton eq.
量子力学	非連続量	統計的	確率的状態に変化(状態の収縮)	あり	あり	Schrodinger eq.

量子論の他の解釈

- コペンハーゲン解釈(一番一般的？教科書に出てくる解釈)
  - 不確定性原理(交換しないオペレータは不確定)、ボルンの統計解釈：波動関数をP=ΨΨ*で確率を与えてくれるものと解釈。量子は系の平均を予言できる。
  - 観測によって波動関数が収縮。(これが意味することはあまり深く考えていない。測定を予言できればよい。)->因果律？
- 多世界解釈
  - 波動関数は収縮しない。全ての可能な世界に分岐する。
  - 観測者なし。波動関数が収縮して見えるのは、観測者の意識が特定の波動関数の分岐パターンに沿っているから。
  - 量子論の特徴である干渉効果は、複数の世界が合流することで生じる。
- Transactional解釈
  - 不確定性原理、ボルンの統計解釈は原理、仮定ではない。導出可
  - 遅延波(入射波)Ψ、先進波(反射波)Ψ* , ΨΨ*は定常波で、E,P, etcの保存量を運び、realになる。
  - 特殊な観測者いらない。非局所的。

➢ あくまで量子論の枠組みの形式の解釈なので、異なる解釈によって形式に差が出てこない限り、解釈の差を実験で検証するのは、難しい。