Measurement of the anomalous like-sign dimuon charge asymmetry with 9 fb^{-1} of $p\bar{p}$ collisions

2011年9月05日

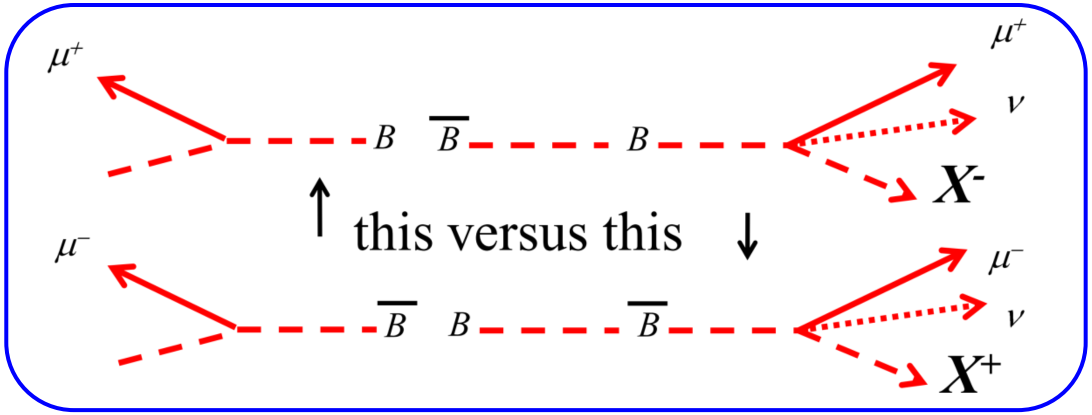
論文セミナー

イントロダクション

モチベーション

$B^0 - B^0$ ($B_s^0 - B_s^0$) 振動を用いてCPVを測定することが目的。

$B^0 \rightarrow X^- \mu^+ \nu$ 崩壊を利用する。



測定すべき非対称度は以下のように定義される。

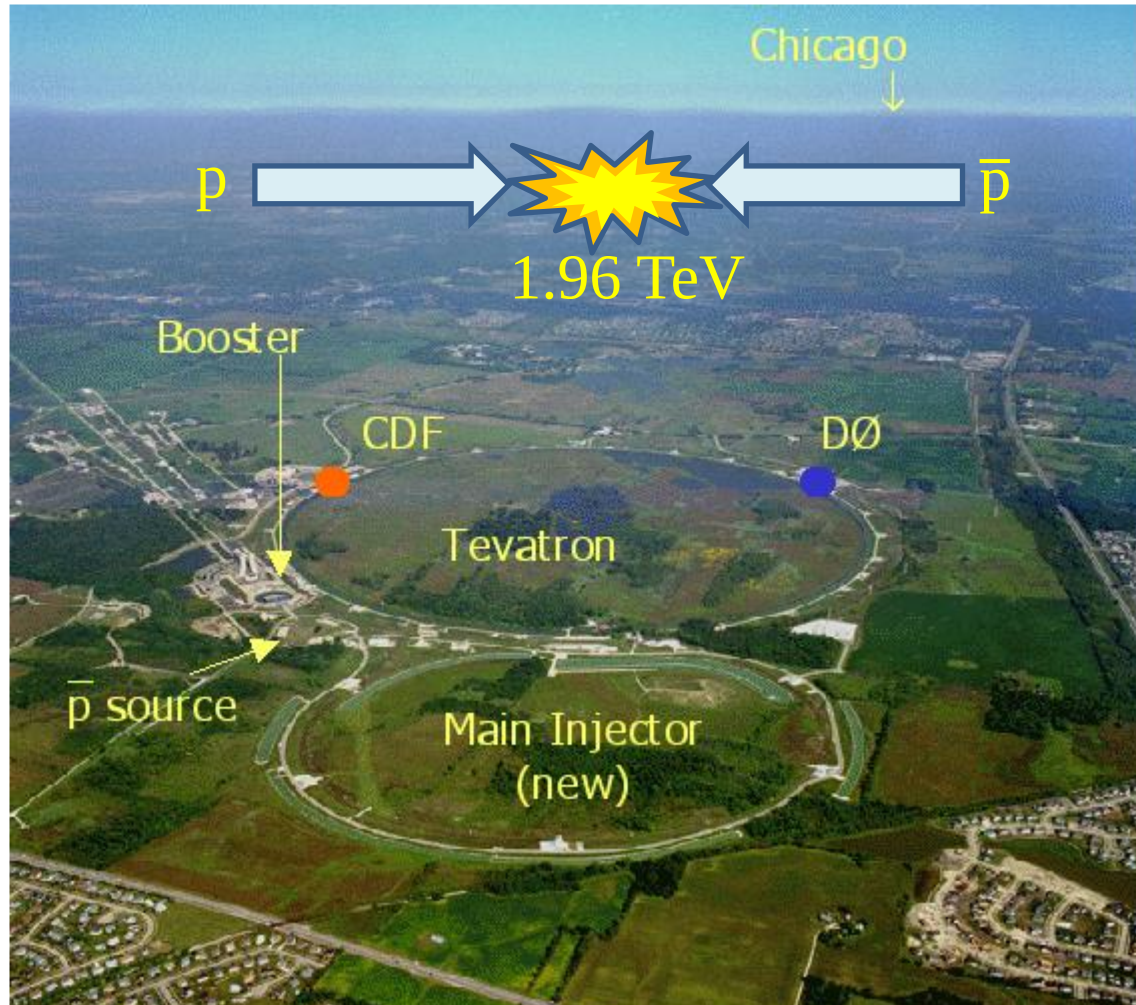
$$A_{\rm sl}^b \equiv \frac{N_b^{++} - N_b^{--}}{N_b^{++} + N_b^{--}} = C_d a_{\rm sl}^d + C_s a_{\rm sl}^s \ , \quad a_{\rm sl}^q = \frac{\Delta\Gamma_q}{\Delta M_q} \tan\phi_q$$

C_d , C_s は LEP で測定された値を使う。

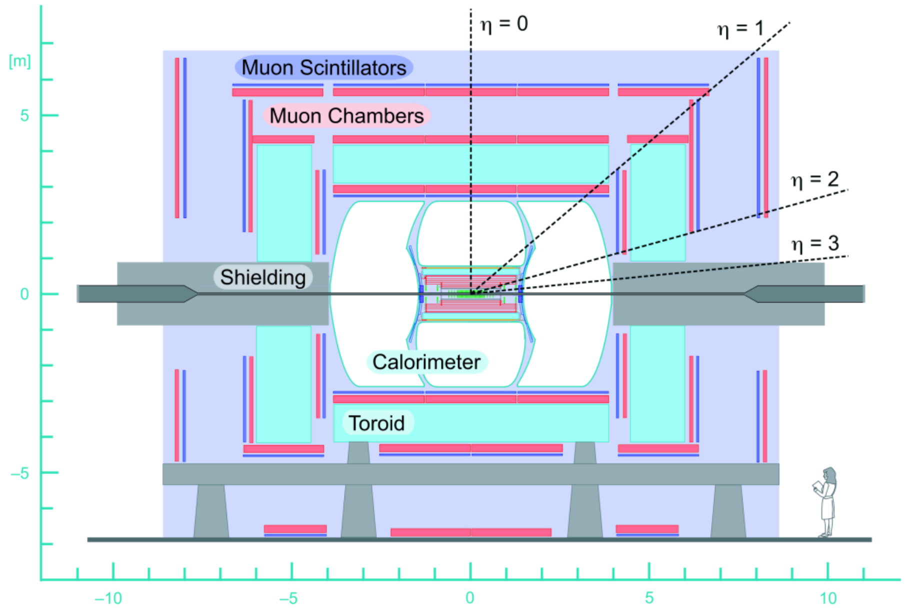
$C_d = 0.594 \pm 0.022$, $C_s = 0.406 \pm 0.022$

実験施設

実験はアメリカ、フェルミラボの Tevatron で行われた。



D0 検出器



- 最内層には荷電粒子のバーテックスと運動量を測定するためのトラッキングシステムを配置。
- トラッキングシステムの外側には e, γ, jet のエネルギーと方向を測定するためのカロリーメータ。
- 外側の3層はミューオンのIDや運動量の測定のためのトロイダルマグネット、チェンバー、シンチレーター。

解析手法

解析手法

この解析では、直接検出している粒子はミューオンのみで、
２種類のミューオンのデータセットを使う。

① Inclusive muon : とにかく μ を含むイベント。

② Like-sign dimuon : μ を2つ以上含み、そのうちの2つが同符号であるイベント。3つ以上の同符号の μ を含む場合、垂直方向の運動量(p_T)が大きいものを選択。

また、これらの μ は以下のように分類される。

- L (long) muon :
  K , π , p 由来の μ 。interaction point から少し飛んだところで生成される。CPVとは関係がなく、バックグラウンドになる。
- S (short) muon :
  b, c や τ 、短寿命のメソン(ϕ , ω , η , ρ^0)由来の μ 。
  interaction point の近傍で生成される。CPVの効果を含む。

解析手法

この2つのデータセットに対してそれぞれ非対称度を定義する。

$$a = \frac{n^+ - n^-}{n^+ + n^-} = \sum_{i=1}^{6} f^i_\mu \{ f^i_S (a_S + \delta_i) + f^i_K a^i_K + f^i_\pi a^i_\pi + f^i_p a^i_p \}$$

$$A = \frac{N^{++} - N^{--}}{N^{++} + N^{--}} = F_{SS} A_S + F_{SL} a_S + \sum_{i=1}^{6} F^i_\mu \{ (2 - F^i_{\mathrm{bkg}}) \delta_i + F^i_K a^i_K + F^i_\pi a^i_\pi + F^i_p a^i_p \}$$

$$F^i_{\mathrm{bkg}} \equiv F^i_K + F^i_\pi + F^i_p$$

$$F_{\mathrm{bkg}} \equiv \sum_{i=1}^{6} (F^i_\mu F^i_{\mathrm{bkg}}) = F_{SL} + 2F_{LL} = 1 + F_{LL} - F_{SS}$$

f, F はそれぞれのフラクション、a, A は非対称度、δ は μ の検出、同定の際の荷電非対称度である。また、上付きの i は μ の p_T による分類である(下図)。

Bin	Muon p_T range (GeV)	f^i_μ	F^i_μ
1	1.5 – 2.5	0.0077	0.0774
2	2.5 – 4.2	0.2300	0.3227
3	4.2 – 5.6	0.4390	0.3074
4	5.6 – 7.0	0.1702	0.1419
5	7.0 – 10.0	0.1047	0.1057
6	10.0 – 25.0	0.0484	0.0449

解析手法

この2つのデータセットに対してそれぞれ非対称度を定義する。

$$a = \frac{n^+ - n^-}{n^+ + n^-} = \sum_{i=1}^{6} f_\mu^i \{ f_S^i (a_S + \delta_i) + f_K^i a_K^i + f_\pi^i a_\pi^i + f_p^i a_p^i \}$$

$$A = \frac{N^{++} - N^{--}}{N^{++} + N^{--}} = F_{SS} A_S + F_{SL} a_S + \sum_{i=1}^{6} F_\mu^i \{ (2 - F_{\mathrm{bkg}}^i) \delta_i + F_K^i a_K^i + F_\pi^i a_\pi^i + F_p^i a_p^i \}$$

$$F_{\mathrm{bkg}}^i \equiv F_K^i + F_\pi^i + F_p^i$$

$$F_{\mathrm{bkg}} \equiv \sum_{i=1}^{6} (F_\mu^i F_{\mathrm{bkg}}^i) = F_{SL} + 2F_{LL} = 1 + F_{LL} - F_{SS}$$

特に、a_S, A_S は S muon の非対称度であり、

$$a_S = c_b A_{\mathrm{sl}}^b \;, \;\; A_S = C_b A_{\mathrm{sl}}^b$$

と表される。よって、この a, A を使って A_{sl}^bを求めることが出来る。

解析手法

この2つのデータセットに対してそれぞれ非対称度を定義する。

$$a = \frac{n^+ - n^-}{n^+ + n^-} = \sum_{i=1}^{6} f_\mu^i \{ f_S^i (a_S + \delta_i) + \underline{f_K^i a_K^i} + f_\pi^i a_\pi^i + f_p^i a_p^i \}$$

$$A = \frac{N^{++} - N^{--}}{N^{++} + N^{--}} = F_{SS} A_S + F_{SL} a_S + \sum_{i=1}^{6} F_\mu^i \{ (2 - F_{\mathrm{bkg}}^i) \delta_i + \underline{F_K^i a_K^i} + F_\pi^i a_\pi^i + F_p^i a_p^i \}$$

$$F_{\mathrm{bkg}}^i \equiv F_K^i + F_\pi^i + F_p^i$$

$$F_{\mathrm{bkg}} \equiv \sum_{i=1}^{6} (F_\mu^i F_{\mathrm{bkg}}^i) = F_{SL} + 2F_{LL} = 1 + F_{LL} - F_{SS}$$

この解析における最大のバックグラウンドは、K によるものであるので、

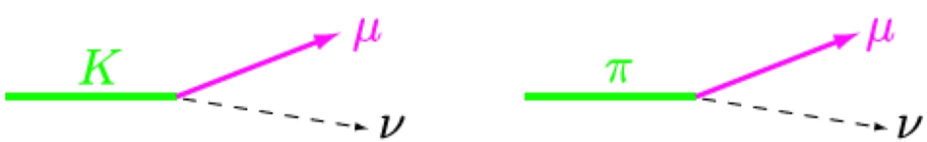
$$A' \equiv A - \alpha a$$

を使うことで、その寄与を抑えることが出来る。
f_K^iとF_K^iは同じ物理過程が寄与しており、強い相関があるため、適切に α を選べば、その一部を相殺することが出来る。

バックグラウンド

この解析で見ているものは μ のみなので、他の粒子を μ とIDしてしまうものがバックグラウンドになる。

また、シグナルの μ は B^0 由来のものなので、本物の μ でも K や π 由来の μ はバックグラウンドとなる。この解析における主なバックグラウンドは



である。特に、K , π は負電荷の粒子に含まれる $\bar{u}$ が物質中の p, n に含まれる u と反応するため、正電荷のものより反応断面積が大きく、非対称度に大きな影響を与える。

測定

ミューオンの選定

- 垂直方向運動量(p_T): $1.5 < p_T < 25$ GeV　*W*, *Z* からの μ を抑制

更に p_T を6つの領域に分類

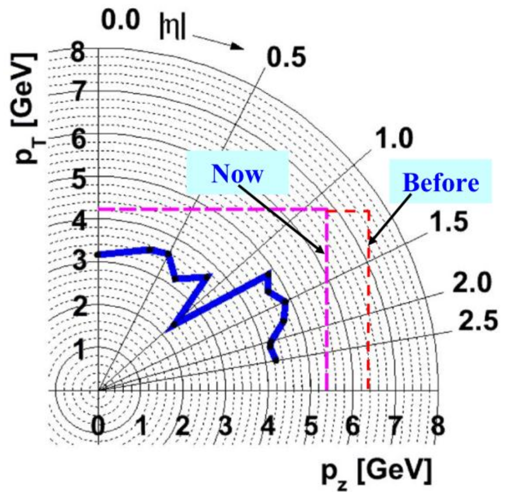
Bin	Muon p_T range (GeV)	f_μ^i	F_μ^i
1	1.5 – 2.5	0.0077	0.0774
2	2.5 – 4.2	0.2300	0.3227
3	4.2 – 5.6	0.4390	0.3074
4	5.6 – 7.0	0.1702	0.1419
5	7.0 – 10.0	0.1047	0.1057
6	10.0 – 25.0	0.0484	0.0449

- Pseudorapidity (η) : $|\eta| < 2.2$

$$\eta \equiv -\ln\left[\tan\left(\theta/2\right)\right]$$

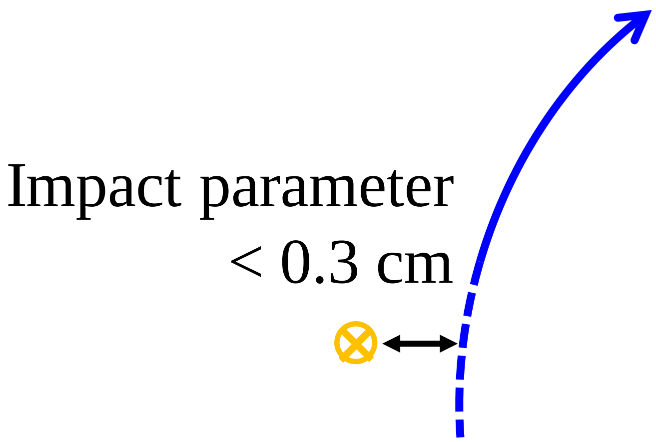
- μ 用の検出器3層を通り抜けることを要求。

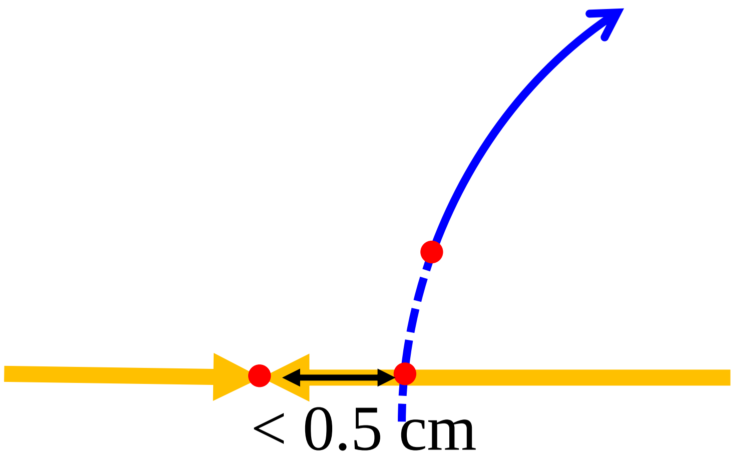
$$p_T > 4.2 \text{ GeV or } |p_Z| > 5.4 \text{ GeV}$$



ミューオンの選定

- *b* からは *S* muon が出るので interaction point からの距離に制限。





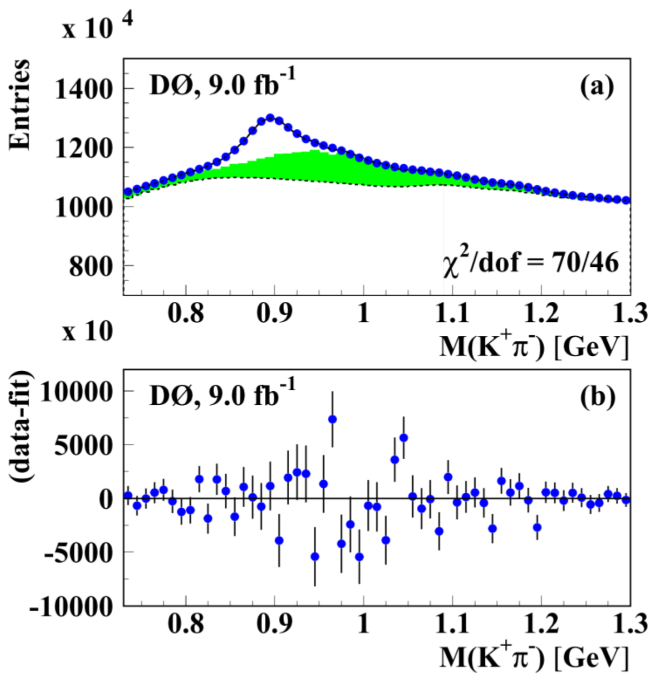
- dimuon に関しては、同じ *b* からの μ を除外。

$$M_{\mu\mu} > 2.8\ \mathrm{GeV}$$

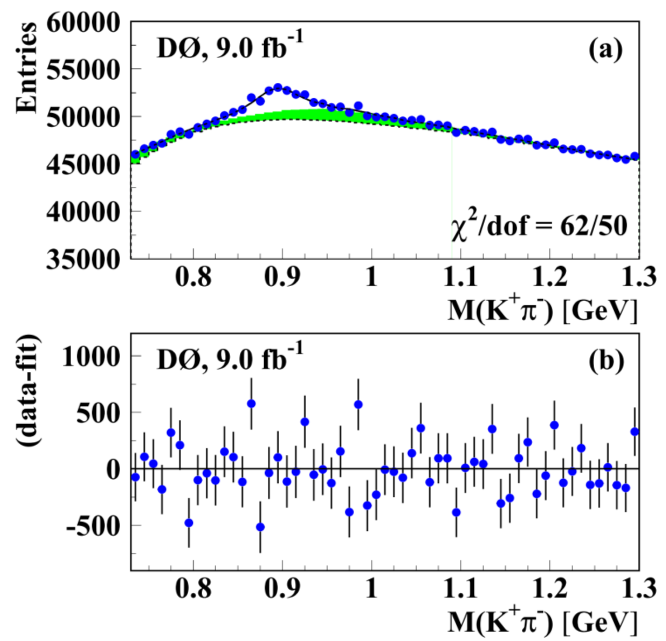
f_K, f_π, f_p の測定

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ は再構成できないので、f_K は $K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$ で K を μ と誤って同定した場合を用いて測定する。

要するに、集めた μ のデータサンプルを K だと思ってこのモードを再構成すると、本当に K だったものは K^{*0} のところにピークが立つ。



inclusive muon



like-sign dimuon

f_K, f_π, f_p の測定

$K^{*0} \to K^+\pi^-$ で K を μ と誤って同定したもののフラクションを $f_{K^{*0}}$ とすると、

$$\boxed{f_{K^{*0}} = \varepsilon_0 f_K R(K^{*0})}$$

と表される。$R(K^{*0})$ はこの過程における K のフラクション、ε_0 は π の検出効率である。

　ここで、$K^{*+} \to K_S\pi^+$ について考える。

$$\boxed{N(K^{*+} \to K_S\pi^+) = \varepsilon_c N(K_S)R(K^{*+})}$$

$K^{*0} \to K^+\pi^-$ とのアイソスピンの不定性や π の検出効率が等しいことから、

$$\boxed{R(K^{*0}) = R(K^{*+})\ ,\ \varepsilon_0 = \varepsilon_c}$$

$$\Rightarrow \boxed{f_K = \frac{N(K_S)}{N(K^{*+} \to K_S\pi^+)} f_{K^{*0}}}$$

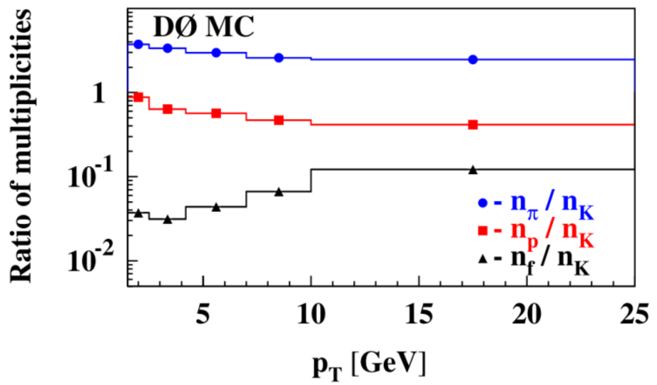
f_K, f_π, f_p の測定

f_π, f_p は以下の式を用いて決定される。

$$f_\pi = f_K \frac{P(\pi \to \mu)}{P(K \to \mu)} \frac{n_\pi}{n_K} \quad , \quad f_p = f_K \frac{P(p \to \mu)}{P(K \to \mu)} \frac{n_p + n_f}{n_K}$$

$$\frac{P(\pi \to \mu)}{P(K \to \mu)} = 0.540 \pm 0.029$$

$$\frac{P(p \to \mu)}{P(K \to \mu)} = 0.076 \pm 0.021$$



これらを用いて測定された値は以下の通りである。

Bin	$f_K \times 10^2$	$f_\pi \times 10^2$	$f_p \times 10^2$
1	9.35 ± 4.77	36.20 ± 4.12	0.55 ± 0.24
2	14.91 ± 1.00		
3	16.65 ± 0.41	31.42 ± 2.57	0.11 ± 0.29
4	17.60 ± 0.49	27.41 ± 3.46	0.63 ± 0.58
5	14.43 ± 0.45	19.25 ± 3.19	0.64 ± 0.71
6	12.75 ± 0.97		
All	15.96 ± 0.24	30.01 ± 1.60	0.38 ± 0.17

F_K, F_π, F_p の測定

Inclusive muon と like-sign dimuon における物理過程は同じなので、

$$F_K = R_K f_K \ , \quad R_K = 2\frac{N(K\to\mu)}{n(K\to\mu)}\frac{n(\mu)}{N(\mu)}$$

として F_K を求めることが出来るが、$K^+ \to \mu^+ \nu$ は再構成できないので、ここでも $K^{*0} \to K^+ \pi^-$ を使う。

$$R_K(K^{*0}) = 2\frac{N(K^{*0}\to\mu)}{n(K^{*0}\to\mu)}\frac{n(\mu)}{N(\mu)} \ , \quad \frac{N(K^{*0}\to\mu)}{n(K^{*0}\to\mu)} = \frac{N(K\to\mu)}{n(K\to\mu)}$$

また、$K_S \to \pi^+ \pi^-$ からも R_K を求めることが出来る。

R_K

bin	R_K from K^{*0}	R_K from K_S^0	average R_K
1	0.983 ± 0.154		0.983 ± 0.154
2	0.931 ± 0.058		0.931 ± 0.058
3	0.880 ± 0.052	0.844 ± 0.059	0.864 ± 0.039
4	0.856 ± 0.082	0.800 ± 0.040	0.811 ± 0.036
5	0.702 ± 0.112	0.828 ± 0.042	0.813 ± 0.039
6	1.160 ± 0.165	1.138 ± 0.117	1.146 ± 0.095
Mean	0.892 ± 0.032	0.834 ± 0.025	0.856 ± 0.020

F_K, F_π, F_p

Bin	$F_K \times 10^2$	$F_\pi \times 10^2$	$F_p \times 10^2$
1	9.19 ± 4.90	30.54 ± 3.89	0.47 ± 0.21
2	13.88 ± 1.26		
3	14.38 ± 0.74	24.43 ± 2.28	0.09 ± 0.22
4	14.26 ± 0.74	19.99 ± 2.67	0.46 ± 0.42
5	11.73 ± 0.67	14.90 ± 2.55	0.49 ± 0.55
6	14.48 ± 1.64		
All	13.78 ± 0.38	24.81 ± 1.34	0.35 ± 0.14

f_S , F_{SS} の測定

f_S は以下のように表すことが出来るから、これまでの測定から求めることが出来る。

$$f_S = 1 - f_K - f_\pi - f_p$$

また、$F_{\rm bkg}$ もこれまでの測定から求められる。

$$F^i_{\rm bkg} \equiv F^i_K + F^i_\pi + F^i_p$$

$$F_{\rm bkg} \equiv \sum_{i=1}^{6} (F^i_\mu F^i_{\rm bkg}) = F_{SL} + 2F_{LL} = 1 + F_{LL} - F_{SS}$$

しかし、これだけでは F_{SS} は求められないので、シミュレーションから

$$\frac{F_{LL}}{F_{SL} + F_{LL}} = 0.264 \pm 0.024$$

を得る。これと $F_{\rm bkg}$ から F_{LL} , F_{SL} , F_{SS} を得ることが出来る。

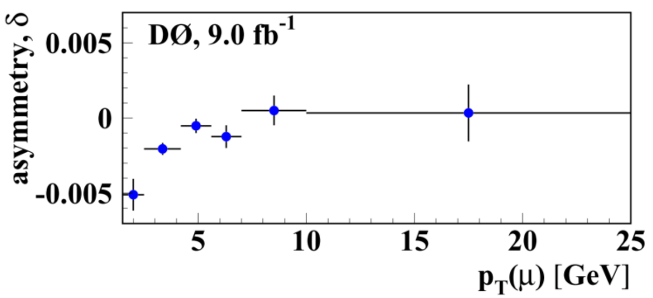
$$\begin{aligned}
f_S &= 0.536 \pm 0.017\ ({\rm stat}) \pm 0.043\ ({\rm syst}), \\
F_{\rm bkg} &= 0.389 \pm 0.019\ ({\rm stat}) \pm 0.038\ ({\rm syst}), \\
F_{LL} &= 0.082 \pm 0.005\ ({\rm stat}) \pm 0.010\ ({\rm syst}), \\
F_{SL} &= F_{\rm bkg} - 2F_{LL}, \\
F_{SS} &= 0.692 \pm 0.015\ ({\rm stat}) \pm 0.030\ ({\rm syst}).
\end{aligned}$$

a_K , a_π , a_p , δ の測定

δ は検出器の性能（μ の検出、同定）に由来する非対称度であるが、ソレノイドとトロイドの地場の向き、またその組み合わせをおよそ2週間おきに入れ替えることで、その大部分はキャンセルされている。

残りの部分は、p_T の関数として評価することが出来る。

Bin	$\delta_i \times 10^2$
1	-0.509 ± 0.106
2	-0.205 ± 0.040
3	-0.053 ± 0.048
4	-0.124 ± 0.075
5	$+0.050 \pm 0.099$
6	$+0.034 \pm 0.189$

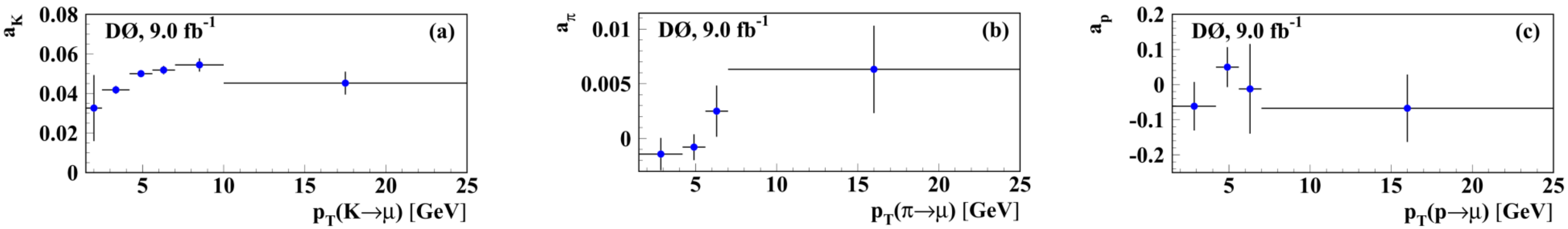


$$\delta \equiv \sum_{i=1}^{6} f_\mu^i \delta_i = (-0.088 \pm 0.023)\%$$

$$\Delta \equiv \sum_{i=1}^{6} F_\mu^i \delta_i = (-0.132 \pm 0.019)\%$$

a_K , a_π , a_p , δ の測定

a_K は $K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-$ や $\phi \rightarrow K^+K^-$ の K を μ と miss ID したイベントから、正電荷と負電荷のものを別々に測定することで得られる。
a_p , a_p も同様に $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$, $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ から得られる。



Bin	$a_K \times 10^2$	$a_\pi \times 10^2$	$a_p \times 10^2$
1	$+3.26 \pm 1.67$	-0.14 ± 0.15	-6.2 ± 6.9
2	$+4.18 \pm 0.20$		
3	$+5.00 \pm 0.13$	-0.08 ± 0.12	$+4.9 \pm 5.6$
4	$+5.18 \pm 0.22$	$+0.25 \pm 0.23$	-1.2 ± 12.8
5	$+5.44 \pm 0.34$	$+0.63 \pm 0.40$	-6.8 ± 9.6
6	$+4.52 \pm 0.57$		
All	$+4.88 \pm 0.09$	-0.03 ± 0.08	-0.8 ± 3.8

f, F の測定結果と合わせると、

Bin	$f_K a_K \times 10^2$	$f_\pi a_\pi \times 10^2$	$f_p a_p \times 10^2$
1	$+0.305 \pm 0.220$	-0.052 ± 0.054	-0.034 ± 0.041
2	$+0.624 \pm 0.052$		
3	$+0.832 \pm 0.030$	-0.025 ± 0.037	$+0.005 \pm 0.016$
4	$+0.912 \pm 0.046$	$+0.068 \pm 0.065$	-0.008 ± 0.081
5	$+0.785 \pm 0.054$	$+0.121 \pm 0.079$	-0.043 ± 0.077
6	$+0.577 \pm 0.086$		
All	$+0.776 \pm 0.021$	$+0.007 \pm 0.027$	-0.014 ± 0.022

Bin	$F_K a_K \times 10^2$	$F_\pi a_\pi \times 10^2$	$F_p a_p \times 10^2$
1	$+0.300 \pm 0.222$	-0.044 ± 0.046	-0.029 ± 0.035
2	$+0.581 \pm 0.060$		
3	$+0.719 \pm 0.042$	-0.020 ± 0.029	$+0.004 \pm 0.012$
4	$+0.739 \pm 0.050$	$+0.050 \pm 0.047$	-0.005 ± 0.059
5	$+0.638 \pm 0.054$	$+0.094 \pm 0.062$	-0.033 ± 0.060
6	$+0.655 \pm 0.112$		
All	$+0.633 \pm 0.031$	-0.002 ± 0.023	-0.016 ± 0.019

係数 c_b , C_b

$$a_S = \underline{c_b} A^b_{\rm sl} \ , \ \ A_S = \underline{C_b} A^b_{\rm sl}$$

Inclusive muom に含まれる崩壊は以下の通り。

	Process	Weight
T_1	$b \to \mu^- X$	$w_1 \equiv 1$
T_{1a}	$b \to \mu^- X$ (nos)	$w_{1a} = (1 - \chi_0) w_1$
T_{1b}	$\bar{b} \to b \to \mu^- X$ (osc)	$w_{1b} = \chi_0 w_1$
T_2	$b \to c \to \mu^+ X$	$w_2 = 0.113 \pm 0.010$
T_{2a}	$b \to c \to \mu^+ X$ (nos)	$w_{2a} = (1 - \chi_0) w_2$
T_{2b}	$\bar{b} \to b \to c \to \mu^+ X$ (osc)	$w_{2b} = \chi_0 w_2$
T_3	$b \to c\bar{c}q$ with $c \to \mu^+ X$ or $\bar{c} \to \mu^- X$	$w_3 = 0.062 \pm 0.006$
T_4	$\eta, \omega, \rho^0, \phi(1020), J/\psi, \psi' \to \mu^+\mu^-$	$w_4 = 0.021 \pm 0.001$
T_5	$b\bar{b}c\bar{c}$ with $c \to \mu^+ X$ or $\bar{c} \to \mu^- X$	$w_5 = 0.013 \pm 0.002$
T_6	$c\bar{c}$ with $c \to \mu^+ X$ or $\bar{c} \to \mu^- X$	$w_6 = 0.660 \pm 0.077$

Weight は MC で求められている。

$$\chi_0 = f'_d \chi_{d0} + f'_s \chi_{s0}$$

$$\chi_0(\text{HFAG}) = 0.1259 \pm 0.0042$$

この weight を使って、c_b は

$$c_b = \frac{w_{1b} - w_{2b}}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6}$$

と求められる。

係数 c_b , C_b

一方、C_b は

$$P_b \propto w_{1a} + w_{2b} + 0.5(w_3 + w_4 + w_5)$$

$$P_{\bar{b}} \propto w_{1b} + w_{2a} + 0.5(w_3 + w_4 + w_5)$$

$$P_{\rm tot} \propto P_b P_{\bar{b}}$$

$$P_{\rm as} \propto w_{1b}[w_{1a} + 0.5(w_3 + w_4 + w_5)] - w_{2b}[w_{2a} + 0.5(w_3 + w_4 + w_5)]$$

$$C_b = P_{\rm as}/P_{\rm tot}$$

と求められる。また、

$$C_b = \frac{N_{\rm dd} - N_{\rm ss} + \chi_0(N_{\rm dr} - N_{\rm sr})}{N_{\rm ls}}$$

として求めることもでき、この結果は良く一致している。
これらを用いて求めた値は、

$$c_b = +0.061 \pm 0.007,$$
$$C_b = +0.474 \pm 0.032.$$

結果

ちょっとおさらい

$$a = \frac{n^+ - n^-}{n^+ + n^-} = \sum_{i=1}^{6} f_\mu^i \{ f_S^i (a_S + \delta_i) + f_K^i a_K^i + f_\pi^i a_\pi^i + f_p^i a_p^i \}$$

$$A = \frac{N^{++} - N^{--}}{N^{++} + N^{--}} = F_{SS} A_S + F_{SL} a_S + \sum_{i=1}^{6} F_\mu^i \{ (2 - F_{\mathrm{bkg}}^i) \delta_i + F_K^i a_K^i + F_\pi^i a_\pi^i + F_p^i a_p^i \}$$

$$F_{\mathrm{bkg}}^i \equiv F_K^i + F_\pi^i + F_p^i$$

$$F_{\mathrm{bkg}} \equiv \sum_{i=1}^{6} (F_\mu^i F_{\mathrm{bkg}}^i) = F_{SL} + 2F_{LL} = 1 + F_{LL} - F_{SS}$$

特に、a_S, A_S は S muon の非対称度であり、

$$a_S = c_b A_{\mathrm{sl}}^b \ , \ \ A_S = C_b A_{\mathrm{sl}}^b$$

と表される。よって、この a, A を使って A_{sl}^b を求めることが出来る。

$A_{\rm sl}^b$

a, A は単純に inclusive muon , like-sign dimuon のイベント数をカウントすれば求まる。

a = (+0.688 ± 0.002) %
A = (+0.126 ± 0.041) %

これまでに、

$$a = \frac{n^+ - n^-}{n^+ + n^-} = \sum_{i=1}^{6} f_\mu^i \{ f_S^i (a_S + \delta_i) + f_K^i a_K^i + f_\pi^i a_\pi^i + f_p^i a_p^i \}$$

$$A = \frac{N^{++} - N^{--}}{N^{++} + N^{--}} = F_{SS} A_S + F_{SL} a_S + \sum_{i=1}^{6} F_\mu^i \{ (2 - F_{\rm bkg}^i) \delta_i + F_K^i a_K^i + F_\pi^i a_\pi^i + F_p^i a_p^i \}$$

$$a_S = c_b A_{\rm sl}^b \ , \ A_S = C_b A_{\rm sl}^b$$

で現れるパラメータは全て決定したので、a, A のそれぞれから $A_{\rm sl}^b$ を求めることが出来る。

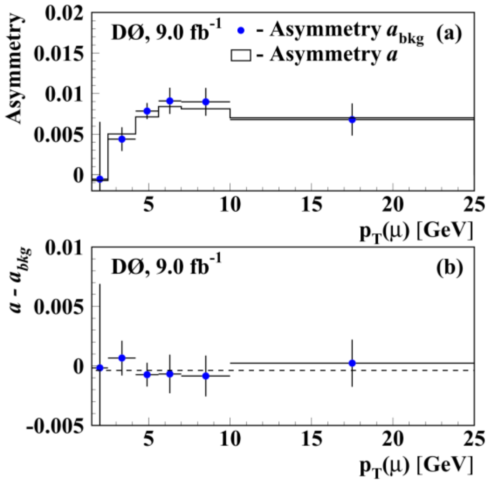
a → $A_{\rm sl}^b = (-1.04 \pm 1.30 \ ({\rm stat}) \pm 2.31 \ ({\rm syst}))\%$

A → $A_{\rm sl}^b = (-0.808 \pm 0.202 \ ({\rm stat}) \pm 0.222 \ ({\rm syst}))\%$

$A^b_{\rm sl}$

この結果ではあまり良い精度は得られていない。特に a から得た値は、ほとんどがバックグラウンドの寄与によるものである。

bin	$a \times 10^2$	$a_{\rm bkg} \times 10^2$
1	-0.071 ± 0.025	$-0.055 \pm 0.240 \pm 0.664$
2	$+0.503 \pm 0.005$	$+0.438 \pm 0.089 \pm 0.117$
3	$+0.712 \pm 0.003$	$+0.785 \pm 0.056 \pm 0.083$
4	$+0.841 \pm 0.005$	$+0.910 \pm 0.124 \pm 0.105$
5	$+0.812 \pm 0.007$	$+0.897 \pm 0.139 \pm 0.101$
6	$+0.702 \pm 0.010$	$+0.680 \pm 0.189 \pm 0.059$



この結果を改善するために

$$A' \equiv A - \alpha a$$

を用いる。最も $A^b_{\rm sl}$ の不定性が小さくなるように α を選ぶと、

$$\alpha = 0.89\ ,$$

$$A^b_{\rm sl} = (-0.787 \pm 0.172\ ({\rm stat}) \pm 0.093\ ({\rm syst}))\%.$$

$A_{\rm sl}^b$

この結果は SM の予測 $A_{\rm sl}^b({\rm SM}) = (-0.028^{+0.005}_{-0.006})\%$
から 3.9 σ のずれがある。

以下はこれらの結果の不定性のまとめ。

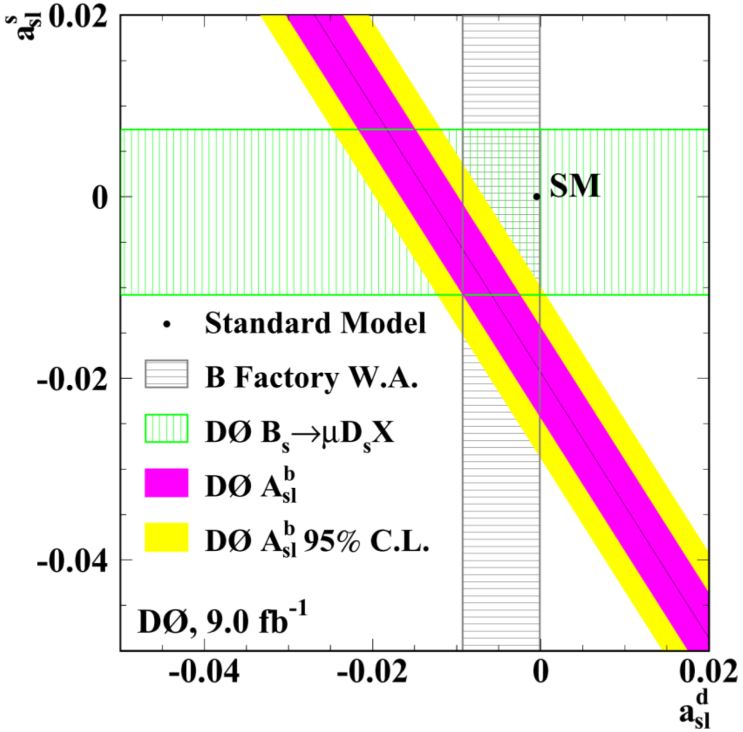
	a	A	$A-\alpha a$
Source	$\delta(A_{\rm sl}^b)\times 10^2$ Eq. (34)	$\delta(A_{\rm sl}^b)\times 10^2$ Eq. (35)	$\delta(A_{\rm sl}^b)\times 10^2$ Eq. (36)
A or a (stat)	0.068	0.121	0.132
f_K (stat)	0.472	0.064	0.028
R_K (stat)	N/A	0.059	0.065
$P(\pi\to\mu)/P(K\to\mu)$	0.181	0.023	0.008
$P(p\to\mu)/P(K\to\mu)$	0.323	0.026	0.002
A_K	0.458	0.052	0.037
A_π	0.802	0.067	0.030
A_p	0.584	0.050	0.020
δ or Δ	0.377	0.087	0.067
f_K (syst)	2.310	0.204	0.007
R_K (syst)	N/A	0.068	0.072
π, K, p multiplicity	0.067	0.019	0.017
c_b or C_b	0.121	0.052	0.056
Total statistical	1.304	0.202	0.172
Total systematic	2.313	0.222	0.093
Total	2.656	0.300	0.196

A^b_{sl}

$$A^b_{\mathrm{sl}} \equiv \frac{N_b^{++} - N_b^{--}}{N_b^{++} + N_b^{--}} = C_d a^d_{\mathrm{sl}} + C_s a^s_{\mathrm{sl}}$$

$C_d = 0.594 \pm 0.022$, $C_s = 0.406 \pm 0.022$

上式から、A^b_{sl}はa^d_{sl}とa^s_{sl}の平面に制限を与えることが出来る。



A_{sl}^b

また、$A' \equiv A - \alpha a$ からバックグラウンドの寄与を除いて評価すると、

$$A_{\mathrm{res}} \equiv (A - \alpha a) - (A_{\mathrm{bkg}} - \alpha a_{\mathrm{bkg}})$$

$$A_{\mathrm{res}} = (-0.246 \pm 0.052\ (\mathrm{stat}) \pm 0.021\ (\mathrm{syst}))\%$$

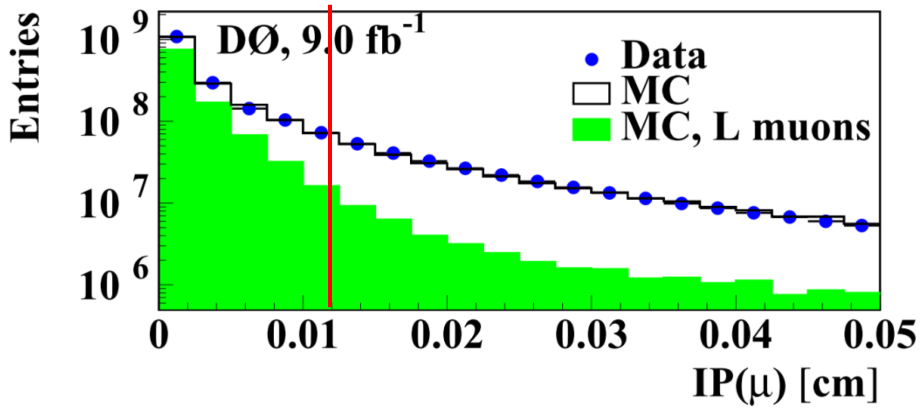
となる。SM の予測は

$$A_{\mathrm{res}}(\mathrm{SM}) = (-0.009 \pm 0.002)\%$$

であり、4.2 σ のずれが確認された。

$A^b_{\rm sl}$ の μ impact parameter 依存性

シミュレーションから、L muon は impact parameter が小さいことが分かった。

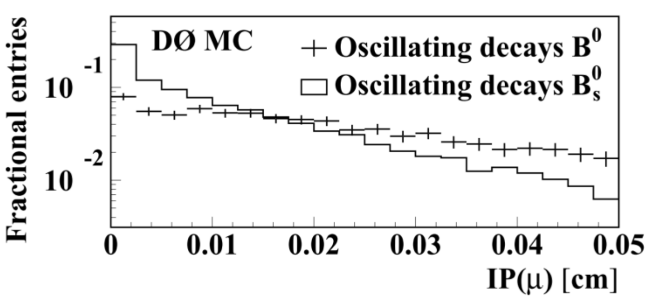


つまり、μ の impact parameter が大きいものを選べば、バックグラウンドを抑制することが出来る。
測定した非対称度が本当に目的の CPV から来ているものか検証するために、impact parameter が 120 μm より大きい領域と小さい領域で別々に $A^b_{\rm sl}$を測定した。

$A_{\rm sl}^{b}$ の μ impact parameter 依存性

	$A_{\rm sl}^{b}(IP_{>120})$ [%]	$A_{\rm sl}^{b}(IP_{<120})$ [%]
Use a	-0.422 ± 0.240 (stat) ± 0.121 (syst)	-1.65 ± 2.77 (stat) ± 4.96 (syst)
Use A	-0.818 ± 0.342 (stat) ± 0.067 (syst)	-1.17 ± 0.44 (stat) ± 0.59 (syst)
Use $A' = A - \alpha a$	-0.579 ± 0.210 (stat) ± 0.094 (syst)	-1.14 ± 0.37 (stat) ± 0.32 (syst)

ここで、$B^0_{(s)}$ の振動について考える。B^0 は寿命に対して振動の周期が十分に長いので、B^0 が飛べば飛ぶほどミキシングの影響は大きくなってくる。一方で、B^0_s は寿命までの間に何度も振動するので、長距離を飛んでもあまり影響は出ない。



for IP > 120 μm $A^b_{sl} = (0.728 \pm 0.018) a^d_{sl} + (0.272 \pm 0.018) a^s_{sl}$

for IP < 120 μm $A^b_{sl} = (0.397 \pm 0.022) a^d_{sl} + (0.603 \pm 0.022) a^s_{sl}$

$A^b_{\rm sl}$ の μ impact parameter 依存性

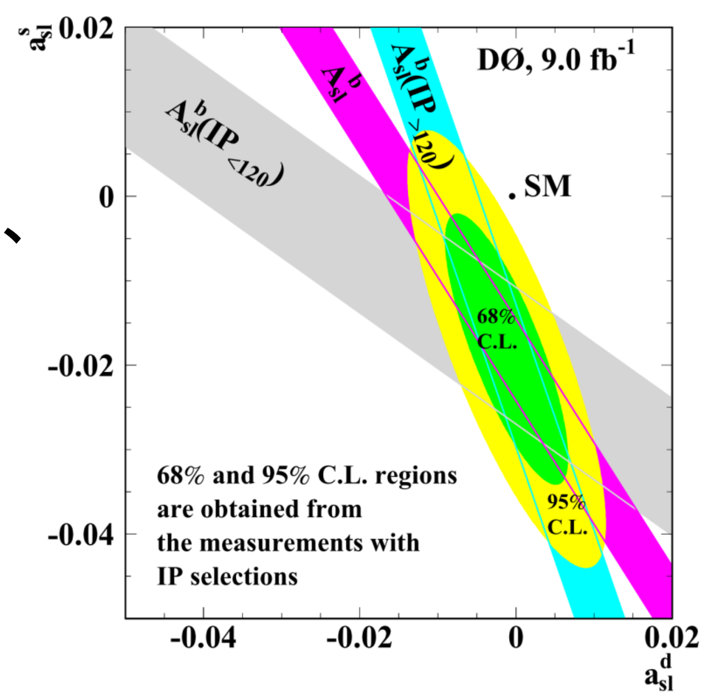
	$A^b_{\rm sl}(IP_{>120})$ [%]	$A^b_{\rm sl}(IP_{<120})$ [%]
Use a	-0.422 ± 0.240 (stat) ± 0.121 (syst)	-1.65 ± 2.77 (stat) ± 4.96 (syst)
Use A	-0.818 ± 0.342 (stat) ± 0.067 (syst)	-1.17 ± 0.44 (stat) ± 0.59 (syst)
Use $A' = A - \alpha a$	-0.579 ± 0.210 (stat) ± 0.094 (syst)	-1.14 ± 0.37 (stat) ± 0.32 (syst)

for IP > 120 μm $A^b_{sl} = (0.728 \pm 0.018) a^d_{sl} + (0.272 \pm 0.018) a^s_{sl}$

for IP < 120 μm $A^b_{sl} = (0.397 \pm 0.022) a^d_{sl} + (0.603 \pm 0.022) a^s_{sl}$

$A^b_{\rm sl}(IP_{>120})$ と $A^b_{\rm sl}(IP_{<120})$ は独立なデータなので、この2つの結果を連立して $a^d_{\rm sl}$ と $a^s_{\rm sl}$ を求めることが出来る。

$$\boxed{\begin{aligned} a^d_{\rm sl} &= (-0.12 \pm 0.52)\% \\ a^s_{\rm sl} &= (-1.81 \pm 1.06)\% \end{aligned}}$$



まとめ

- dimuon の荷電非対称度の新しい測定結果を得た。

$$A^b_{\rm sl} = (-0.787 \pm 0.172\ ({\rm stat}) \pm 0.093\ ({\rm syst}))\%.$$

- この結果は SM と 3.9 σ 異なる。
- この非対称度の μ の impact parameter への依存性を確認した。

$$A^b_{\rm sl}(IP_{>120}) = (-0.579 \pm 0.210\ ({\rm stat}) \pm 0.094\ ({\rm syst}))\%$$

$$A^b_{\rm sl}(IP_{<120}) = (-1.14 \pm 0.37\ ({\rm stat}) \pm 0.32\ ({\rm syst}))\%$$

- Impact parameter の研究から $a^d_{\rm sl}$ と $a^s_{\rm sl}$ を得た。

$$\begin{aligned} a^d_{\rm sl} &= (-0.12 \pm 0.52)\% \\ a^s_{\rm sl} &= (-1.81 \pm 1.06)\% \end{aligned}$$

$$f_S = 1 - f_K - f_\pi - f_p$$

Back up

$$A_{\rm sl}^b \equiv \frac{N_b^{++} - N_b^{--}}{N_b^{++} + N_b^{--}}$$

$$a_{\rm sl}^q = \frac{\Delta\Gamma_q}{\Delta M_q} \tan\phi_q$$

$$A_{\rm sl}^b \equiv \frac{N_b^{++} - N_b^{--}}{N_b^{++} + N_b^{--}} = C_d a_{\rm sl}^d + C_s a_{\rm sl}^s$$

$$A_{\rm sl}^b = C_d a_{\rm sl}^d + C_s a_{\rm sl}^s$$

$$a = \frac{n^+ - n^-}{n^+ + n^-} = \sum_{i=1}^{6} f_\mu^i \{ f_S^i (a_S + \delta_i) + f_K^i a_K^i + f_\pi^i a_\pi^i + f_p^i a_p^i \}$$

$$a = \frac{n^+ - n^-}{n^+ + n^-} = \sum_{i=1}^{6} f_\mu^i \{ f_S^i (a_S + \delta_i) + f_K^i a_K^i + f_\pi^i a_\pi^i + f_p^i a_p^i \}$$

$$A = \frac{N^{++} - N^{--}}{N^{++} + N^{--}} = F_{SS} A_S + F_{SL} a_S + \sum_{i=1}^{6} F_\mu^i \{ (2 - F_{\rm bkg}^i)\delta_i + F_K^i a_K^i + F_\pi^i a_\pi^i + F_p^i a_p^i \}$$

$$A = \frac{N^{++} - N^{--}}{N^{++} + N^{--}} = F_{SS} A_S + F_{SL} a_S + \sum_{i=1}^{6} F_\mu^i \{ (2 - F_{\rm bkg}^i)\delta_i + F_K^i a_K^i + F_\pi^i a_\pi^i + F_p^i a_p^i \}$$

$$a_S = c_b A_{\mathrm{sl}}^b$$
$$A_S = C_b A_{\mathrm{sl}}^b$$

$$a_S = c_b A_{\mathrm{sl}}^b \ , \ A_S = C_b A_{\mathrm{sl}}^b$$

$$A' \equiv A - \alpha a \qquad f_K^i \quad F_K^i \qquad \eta \equiv -\ln\left[\tan\left(\theta/2\right)\right]$$

$$f_{K^{*0}} = \varepsilon_0 f_K R(K^{*0})$$

$$R(K^{*0}) = R(K^{*+}) \ , \ \varepsilon_0 = \varepsilon_c$$

$$f_K = \frac{N(K_S)}{N(K^{*+} \to K_S \pi^+)} f_{K^{*0}}$$

$$F_K = \frac{N(K_S)}{N(K^{*+} \to K_S \pi^+)} F_{K^{*0}}$$

$$f_\pi = f_K \frac{P(\pi \to \mu)}{P(K \to \mu)} \frac{n_\pi}{n_K} \qquad f_p = f_K \frac{P(p \to \mu)}{P(K \to \mu)} \frac{n_p + n_f}{n_K}$$

$$F_K = R_K f_K$$

$$R_K = 2 \frac{N(K \to \mu)}{n(K \to \mu)} \frac{n(\mu)}{N(\mu)}$$

$$R_K(K^{*0}) = 2 \frac{N(K^{*0} \to \mu)}{n(K^{*0} \to \mu)} \frac{n(\mu)}{N(\mu)}$$

$$\frac{N(K^{*0} \to \mu)}{n(K^{*0} \to \mu)} = \frac{N(K \to \mu)}{n(K \to \mu)}$$