

PRECISION MEASUREMENTS OF PURE LEPTONIC DECAY OF CHARM MESON AT THE BESIII EXPERIMENT

BESIII实验粲介子纯轻衰变的精确测量

赵明刚·南开大学

味物理讲座·第110期
2026-05-21

OUTLINE

1. CKM矩阵
2. BESIII的纯轻测量
3. 纯轻研究展望

PART ONE

CKM矩阵

世界由什么组成？

人们发现：可以根据不同特性，把“物质”分类

最简单图像

物质内部是有结构的：世界上的物质都是由简单的、没有内部结构的砖块组成！

古希腊·德谟克利特 (~460—370 BC)

- 提出 atomos（不可切割）概念，万物由微小粒子组成

约翰·道尔顿 (John Dalton, 1803)

- 通过质量守恒和定比定律，确立近代科学原子论

门捷列夫 (D.I. Mendeleev, 1869)

- 发布元素周期表，揭示元素性质周期性规律

门捷列夫的第一张元素周期表（1869年）

			Ti=50	Zr=90	?=180
			V=51	Nb=94	Ta=182
			Cr=52	Mo=96	W=186
			Mn=55	Rh=104.4	Pt=197
			Fe=56	Ra=104.4	Ir=198
		Ni=Co=59	Pt=106.6	Os=199	
H=1		Cu=63.4	Ag=108	Hg=200	
Be=9.4	Mg=24	Zn=65.2	Cd=112	Au=197?	
B=11	Al=27.4	?=68	Cr=116		
C=12	Si=28	?=70	Sr=118		
N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?	
O=16	S=32	Se=79.4	Te=128?		
F=19	Cl=35.5	Br=80	I=127		
Li=7 Na=23	K=39	Rb=85.4	Cs=133	Tl=204	
	Ca=40	Sr=87.6	Ba=137	Pb=207	
	?=45	Rb=85.4			
	?Er=56	Sr=87.6			
	?Yt=60	Ce=92			
	?In=75.6	La=94			
		Di=95			
		Th=118?			

电子的发现 (1897)

J.J. 汤姆逊 (J.J. Thomson)

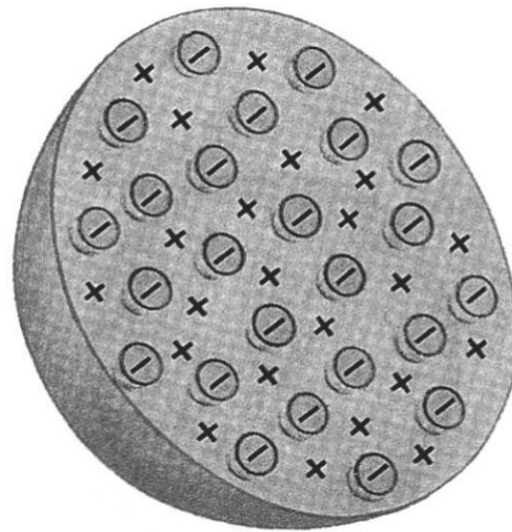
- 阴极射线实验，测量荷质比
- 发现阴极射线由带负电的微小粒子组成



1906年诺贝尔物理学奖

葡萄干布丁模型

原子 = 正电荷均匀球体 + 镶嵌其中的电子



卢瑟福散射 (1909—1911)

Thomson原子模型能够解释原子发光现象，所以被大家广泛接受。

问题：然而，**确实如此**吗？

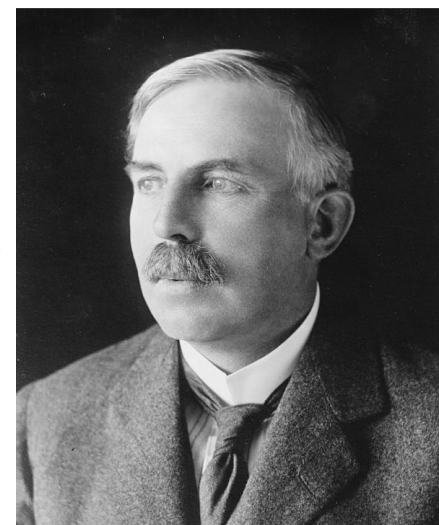
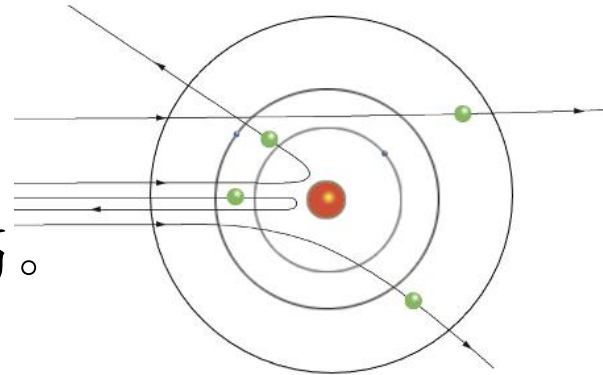
实验：1903年勒纳德实验，电子束轰击金属膜。

结果：较高速度的电子很容易穿透原子。

解释：原子不是一个实心球体。

问题：原子到底是什么结构？

实验：1909~1911年卢瑟福实验， α 粒子轰击金箔。



"这就好像你向一张纸发射15英寸的炮弹，炮弹竟然反弹回来打到你自己。"

— Ernest Rutherford

质子与中子

质子 (Proton) — 1919

- 卢瑟福用 α 粒子轰击氮原子核，发现产物中有氢核。
- 卢瑟福认为这些氢核唯一可能的来源是氮原子，因此氮原子必须含有氢核。
- 因此他建议原子序数为1的氢原子核是一个基本粒子，就是质子。



- 1、电磁斥力问题
- 2、同位素问题

中子 (Neutron) — 1932

- 1920年，卢瑟福提出中子猜想
- 1928年，玻特和贝克用 α 粒子轰击铍时，发现穿透力极强的中性射线
- 1931年，小居里夫妇排除电磁波
- 1932年，查德威克确认其质量与质子相近，且中性不带电，称为中子。



1935年诺贝尔物理学奖

原子核 = 质子 + 中子，统称为“核子”

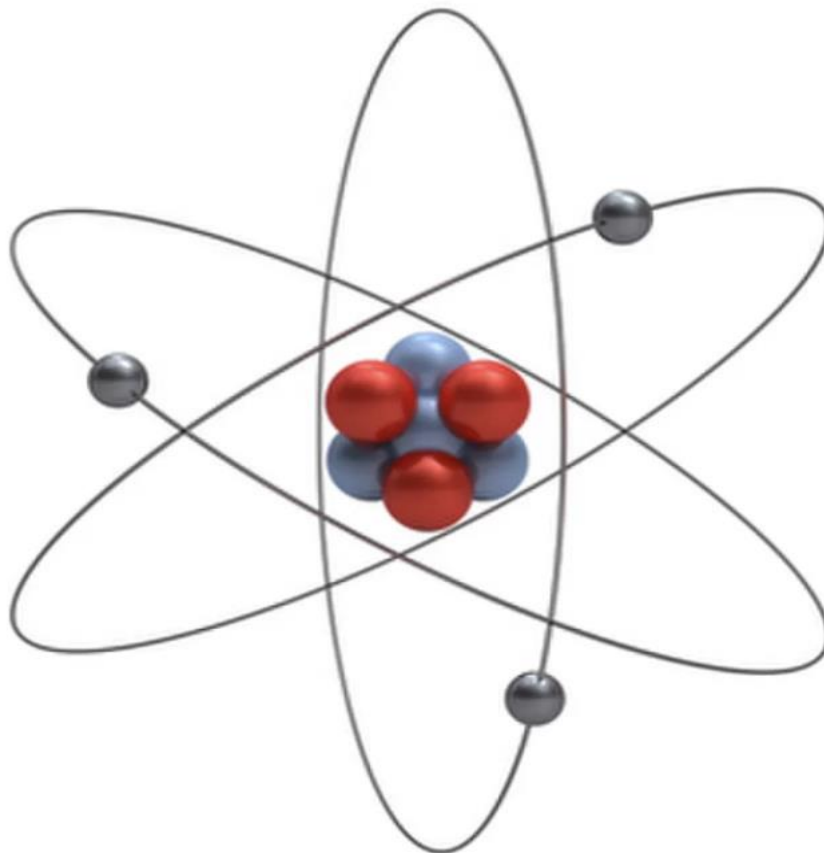
质子与中子

质子 (Proton) — 1919

- 卢瑟福用 α 粒子轰击发现产物中有氢核。
- 卢瑟福认为这些氢核来源是氮原子，因此含有氢核。
- 因此他建议原子序数核是一个基本粒子，



- 1、电磁斥力问
- 2、同位素问题



中子 — 1932

瑟福提出中子猜想
特和贝克用 α 粒子轰击发现穿透力极强的中性

居里夫妇排除电磁波
德威克确认其质量与
且中性不带电，称为

诺贝尔物理学奖

原子核 = 质子 + 中子，统称为“核子”

粒子动物园：20世纪50—60年代的混乱

人们很快发现了几百个“基本”粒子，例如：

- 1947年鲍威尔在宇宙射线中发现 π 介子
- 1947年Rochester & Butler: 发现 K介子
- 此后陆续发现： Λ 、 Σ 、 Ξ 、 Ω^- 、 η 、.....

这些粒子的名称“五花八门”，特性各异，有的较为稳定，但大多都极不稳定。人们对这些粒子进行了分类，有轻子、介子、重子、奇异介子、奇异重子等。



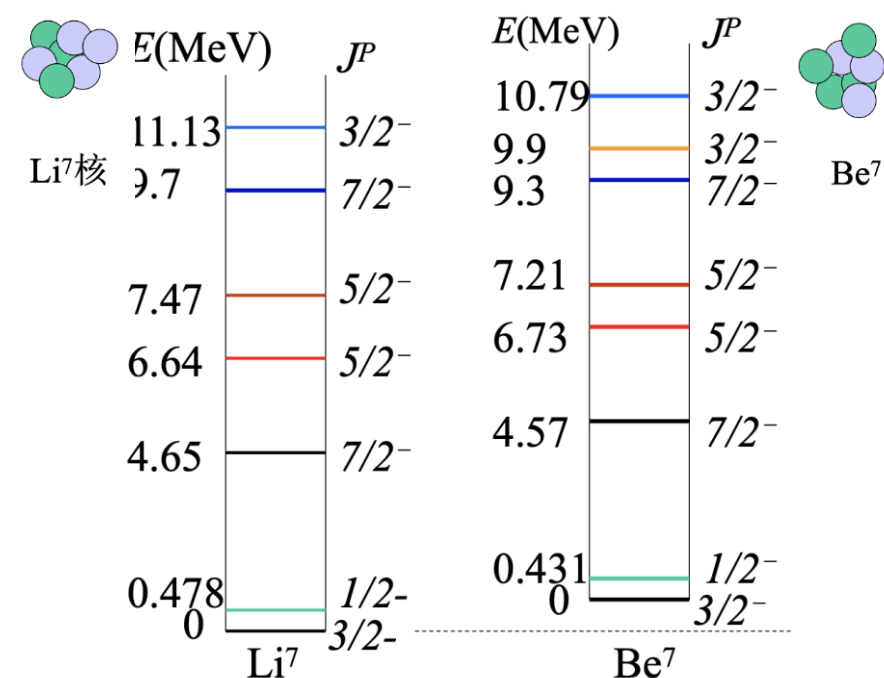
“Young man, if I could remember the names of these particles, I would have been a botanist!”

—— Enrico Fermi

这么多粒子不可能都是“基本”的

强子的同位旋对称性

- 人们发现：镜像核有相似的能级结构，表明强作用具有电荷无关性。
- 存在新的对称性，类比自旋引入“同位旋”，运算规则与自旋类似。
- 强作用下，总同位旋和第三分量“都”守恒。
- 电磁作用下，总同位旋“不”守恒，但第三分量守恒。
- 弱作用下，总同位旋和第三分量“都不”守恒。



$pp : \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle = |1, 1\rangle$

$pn : \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |1, 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |0, 0\rangle$

$np : \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |1, 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |0, 0\rangle$

$nn : \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle = |1, -1\rangle$

Clebsch- Gordan
系数

强	$\psi'' \rightarrow$	D^+	D^-
I	0	1/2	1/2
I_3	0	1/2	-1/2

电磁	$\pi^0 \rightarrow$	γ	γ
I	1	0	0
I_3	0	0	0

弱	$D^+ \rightarrow$	μ^+	ν_μ
I	1/2	0	0
I_3	1/2	0	0

同位旋对称性下的强子分类

- 确定粒子同位旋的原则：看粒子在强相互作用下的行为。
 - 首先：“质量相近”的粒子“有可能”组成一个同位旋多重态，粒子数为 $(2I + 1)$ 。
 - 其次：看这样确定下来的同位旋量子数在强作用下是否守恒。
- 质子和中子为同位旋二重态。
 - $\pi^{\pm/0}$ 质量接近，假设为同位旋三重态 ($I = 1; I_3 = +1, 0, -1$)；核子散射验证。
 - $K^{\pm}$ 和 $K^0/\bar{K}^0$ 质量相近，然而 K^0 和 $\bar{K}^0$ 奇异数相反，不是同种粒子，不可能处于同位旋多重态，故 $I \neq 3/2$ 。
 - 四个 K 介子不得不分成两个同位旋二重态。

$$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda + K^+ \Rightarrow K^+: \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle$$

$$K^- + p \rightarrow \Lambda + \pi^0 \Rightarrow K^-: \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle$$

$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0 \Rightarrow K^0: \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle$$

	K⁺	K⁰	$\bar{K}^0$	K⁻
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I₃	1/2	-1/2	1/2	-1/2
S	1	1	-1	-1

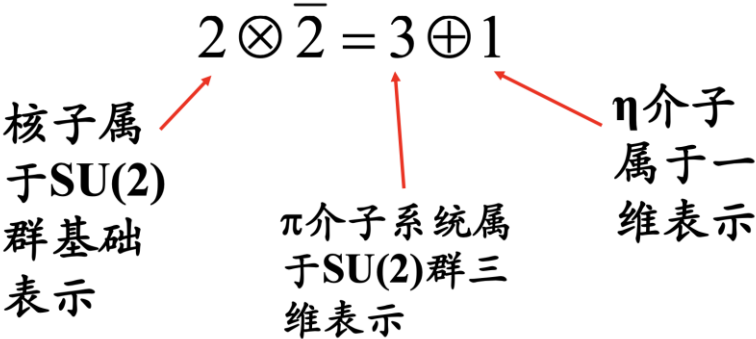
费米-杨模型

- 1949年，Yang与Fermi撰文“介子是基本粒子吗”，提出基本粒子的第一个复合模型。
- π 介子是由正反核子构成的，由正反核子构造出 π 介子的全部量子数：同位旋、自旋、电荷、质量。
- 基于SU(2)对称性的模型， p 和 n 构成SU(2)群基础表示2， $\bar{p}$ 和 $\bar{n}$ 构成其复共轭表示 $\bar{2}$ 。

$N\bar{N}$ 系统的量子数与介子的对应

同位旋 I	I_3	$N\bar{N}$	电荷 Q	对应介子
$I=1$	1	$p\bar{n}$	1	π^+
	0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(n\bar{n} - p\bar{p})$	0	π^0
	-1	$-n\bar{p}$	-1	π^-
$I=0$	0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(n\bar{n} + p\bar{p})$	0	η

$N\bar{N}$ 直乘 可以分解成一个3维表示和一个1维表示

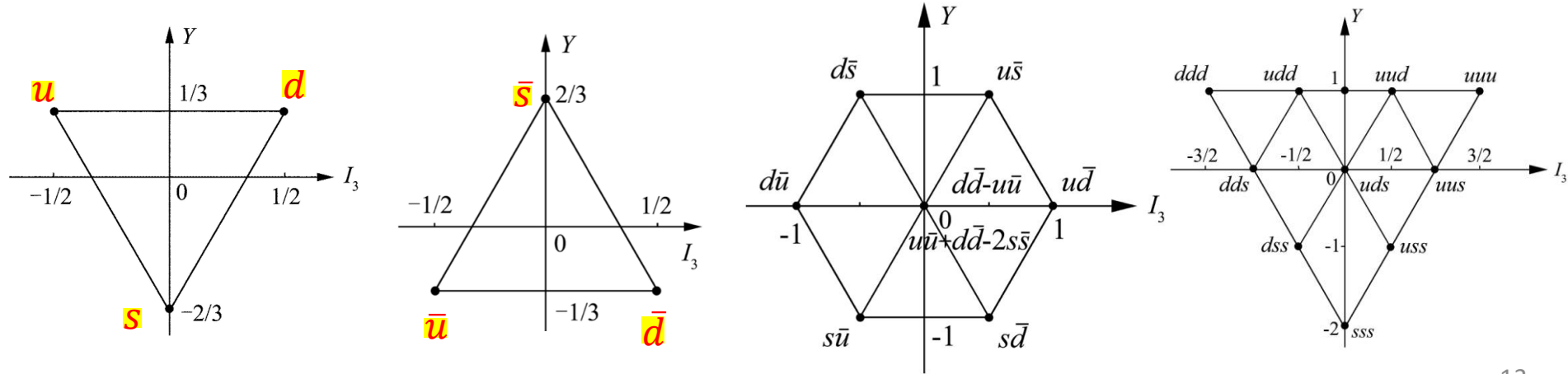


1961年，美国LBNL的Bevatron实验，通过 π 介子与核子碰撞发现

强子的SU(3)对称性

- 1956年，为了解释奇异粒子(50年代才系统研究)，S. Sakata把费米-杨模型的p和n推广为p、n、 Λ (坂田模型)。
 - 1960-62年，M. Gell-man与Y. Ne'eman索性放弃由重子构成其他粒子的想法，直接考虑强子之间的SU(3)对称性。
- 引入抽象的数学符号 u 、 d 、 s ，并“赋予”其量子数用于构造各种强子。
 - 类比坂田模型，赋予 u, d 与 p, n 相同的同位旋和奇异数，赋予 s 奇异数为“-1”，同位旋为“0”。
 - 将重子数平均分配到 u 、 d 、 s 三个基矢量，每个的“ $B = 1/3$ ”。

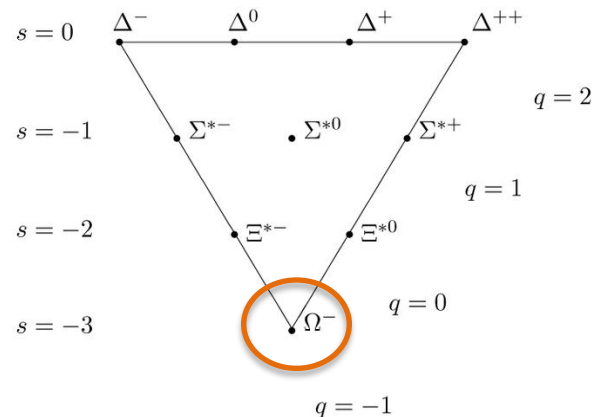
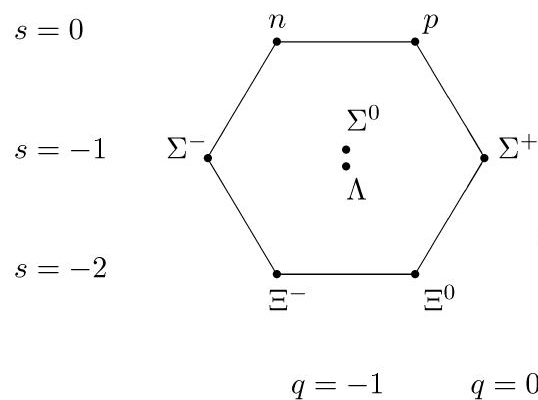
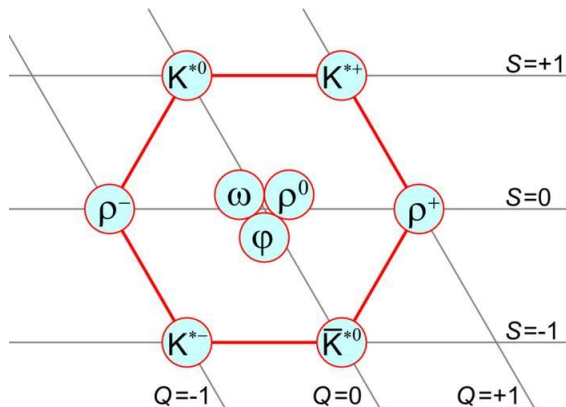
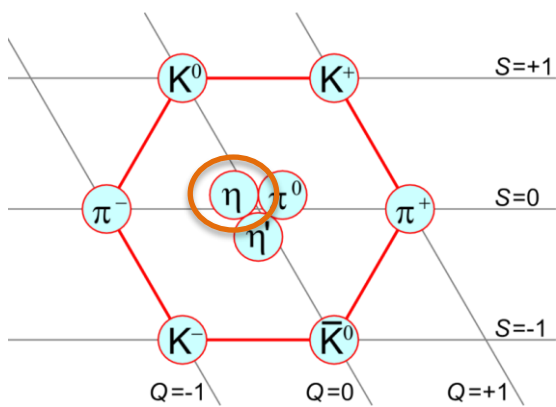
	u	d	s
I_3	1/2	-1/2	0
S	0	0	-1
B	1/3	1/3	1/3
Y	1/3	1/3	-2/3



强子的SU(3)对称性

- 同位旋对称性的对称群是SU(2)群，一个SU(3)群可以有多个不同的SU(2)子群。若强子有SU(3)对称性，则由此扩大的“超多重态”内可以包含多个同位旋多重态。
- 同一个超多重态具有相同的自旋宇称，相近的质量以及强作用下近似的行为，可被看成“同一个粒子”的不同表现形式。

- 当时，已知的八个 $J^{PC} = \frac{1}{2}^+$ 的重子首先被当做SU(3)八重态成员。
- 然后，已知的七个 $J^{PC} = 0^-$ 的介子被当做另一个SU(3)八重态的其中七个成员。若赝标介子真的按照SU(3)对称性存在，则第八个成员一定也是赝标介子，且同位旋为0，超荷也为0。1961年，LBNL实验发现 η 粒子，填补了最后一个空位。
- G和N把当时发现的9个 $J^{PC} = \frac{3}{2}^+$ 的重子填入SU(3)群的十重态，也留下一个空位，这个空位对应电荷为“-1”，超荷为“-2”的重子。1964年，LBNL发现 Ω^- 重子。



强子的SU(3)对称性

0⁻赝标介子的质量和量子数一览

同位旋	二重态 $I=1/2$		三重态 $I=1$			二重态 $I=1/2$		单态 $I=0$
	K^+	K^0	π^+	π^0	π^-	$\bar{K}^0$	K^-	
I_3	1/2	-1/2	1	0	-1	1/2	-1/2	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0
S	1	1	0	0	0	-1	-1	0
Y	1	1	0	0	0	-1	-1	0
质量 (MeV)	493.7	497.7	139.6	135.0	139.6	497.7	493.7	547.3

1⁻矢量介子的质量和量子数一览

同位旋	二重态 $I=1/2$		三重态 $I=1$			二重态 $I=1/2$		单态 $I=0$
	K^{*+}	K^{*0}	ρ^+	ρ^0	ρ^-	$\bar{K}^{*0}$	K^{*-}	
I_3	1/2	-1/2	1	0	-1	1/2	-1/2	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0
S	1	1	0	0	0	-1	-1	0
Y	1	1	0	0	0	-1	-1	0
质量 (MeV)	891.7	896.1	769.3			896.1	891.7	782.6

(1/2)⁺重子基态量子数及质量一览

同位旋	二重态 $I=1/2$		三重态 $I=1$			二重态 $I=1/2$		单态 $I=0$
	p	n	Σ^+	Σ^0	Σ^-	Ξ^0	Ξ^-	
I_3	1/2	-1/2	1	0	-1	1/2	-1/2	0
B	1	1	1	1	1	1	1	1
S	0	0	-1	-1	-1	-2	-2	-1
Y	1	1	0	0	0	-1	-1	0
质量 (MeV)	938.3	939.6	1189.4	1192.6	1197.4	1314.8	1321.3	1115.7

(3/2)⁺重子量子数和质量一览表（表中未列 Ω^- ）

同位旋多重态	$I=3/2$				$I=1$			$I=1/2$	
	Δ^{++}	Δ^+	Δ^0	Δ^-	Σ^{*+}	Σ^{*0}	Σ^{*-}	Ξ^{*0}	Ξ^{*-}
I_3	3/2	1/2	-1/2	3/2	1	0	-1	1/2	-1/2
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S	0	0	0	0	-1	-1	-1	-2	-2
Y	1	1	1	1	0	0	0	-1	-1
质量 (MeV)	1230~1234				1382.8	1383.7	1387.2	1531.8	1535.0

夸克模型

- 成就：SU(3)分类法获得了巨大成功！强子均为SU(3)群基础表示经混合直乘约化而来。
- 问题：那么，基础表示（ u 、 d 、 s ）有真实对应物吗？
- 猜想：1964年，盖尔曼和兹维格分别独立指出， u 、 d 、 s 应代表“更深层次”的粒子。
- 实验：1969年，深度非弹性散射实验，质子内部存在“带电的点状结构”。
- 假设盖尔曼-西岛关系（ $Q = I_3 + (B + S)/2$ ）对夸克也成立，则夸克具有分数电荷。
- 冷知识：有个日本人提出了整数电荷的夸克模型，也能与实验相符，但理论更复杂。



盖尔曼：1969年
诺贝尔物理学奖

u 、 d 、 s 夸克的量子数

	I	I_3	B	S	Y	Q
u	1/2	1/2	1/3	0	1/3	2/3
d	1/2	-1/2	1/3	0	1/3	-1/3
s	0	0	1/3	-1	-2/3	-1/3



Friedman, Kendall & Taylor: 1990年诺贝尔物理学奖

夸克模型

$$M_j^i = \begin{pmatrix} \frac{2u\bar{u} - d\bar{d} - s\bar{s}}{3} & u\bar{d} & u\bar{s} \\ d\bar{u} & \frac{2d\bar{d} - u\bar{u} - s\bar{s}}{3} & d\bar{s} \\ s\bar{u} & s\bar{d} & \frac{2s\bar{s} - u\bar{u} - d\bar{d}}{3} \end{pmatrix}$$

无迹 $\Rightarrow$

对角元: $M_1^1 + M_2^2 + M_3^3 = 0$
 取两个: M_1^1, M_2^2
 正交的线性组合: $M_2^2 - M_1^1 = d\bar{d} - u\bar{u}$
 $M_2^2 + M_1^1 = \frac{u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}}{3}$
 归一化: $\frac{d\bar{d} - u\bar{u}}{\sqrt{2}} \rightarrow \pi^0, \frac{u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}}{\sqrt{6}} \rightarrow \eta$

$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$$

$SU(3)$ 单态 $\Rightarrow \frac{u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}}{\sqrt{3}}$

$I=0, Y=0 \Rightarrow \eta'$

态 $\frac{u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}}{\sqrt{6}}$ 和 $\frac{u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}}{\sqrt{3}}$

具有相同的 I 和 Y 量子数

可以发生混合

η 和 η' 是混合后的态, 混合前的态定义为

$$\begin{cases} \eta_8 = \frac{u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}}{\sqrt{6}} \\ \eta_1 = \frac{u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}}{\sqrt{3}} \end{cases}$$

混合角为 θ

$$\begin{pmatrix} \eta \\ \eta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_8 \\ \eta_1 \end{pmatrix}$$

$$\eta = \eta_8 \cos\theta - \eta_1 \sin\theta$$

$$\eta' = \eta_8 \sin\theta + \eta_1 \cos\theta$$

$\pi \rightarrow \rho, K \rightarrow K^*, \eta_8 \rightarrow \omega_8, \eta_1 \rightarrow \omega_1$

$$\begin{cases} \varphi = \omega_8 \cos\theta - \omega_1 \sin\theta \\ \omega = \omega_8 \sin\theta + \omega_1 \cos\theta \end{cases}$$

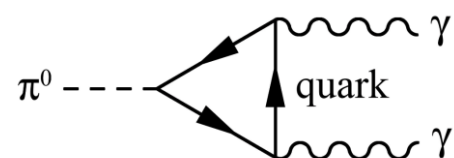
理想混合

$\cos\theta = \sqrt{\frac{2}{3}}, \sin\theta = \sqrt{\frac{1}{3}}$ 即 $\theta \approx 35^\circ$

$$\begin{cases} \phi = s\bar{s} \\ \omega = \frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

颜色自由度的实验证据

① $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 的衰变宽度



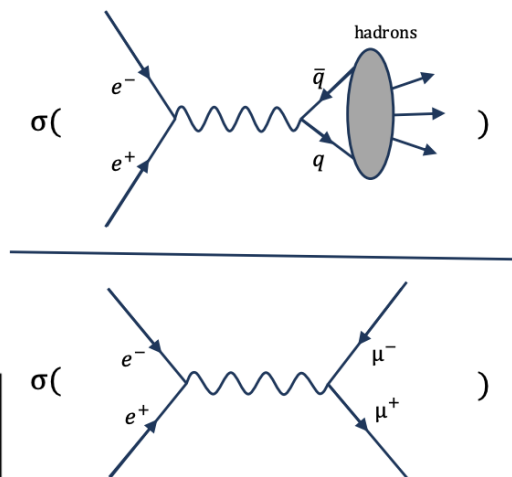
$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = N_c^2 (Q_u^2 - Q_d^2)^2 \frac{\alpha^2 m_{\pi^0}^3}{64\pi^3 f_\pi^2}$$

$$\Gamma^{the} = 7.6 \text{ eV}$$

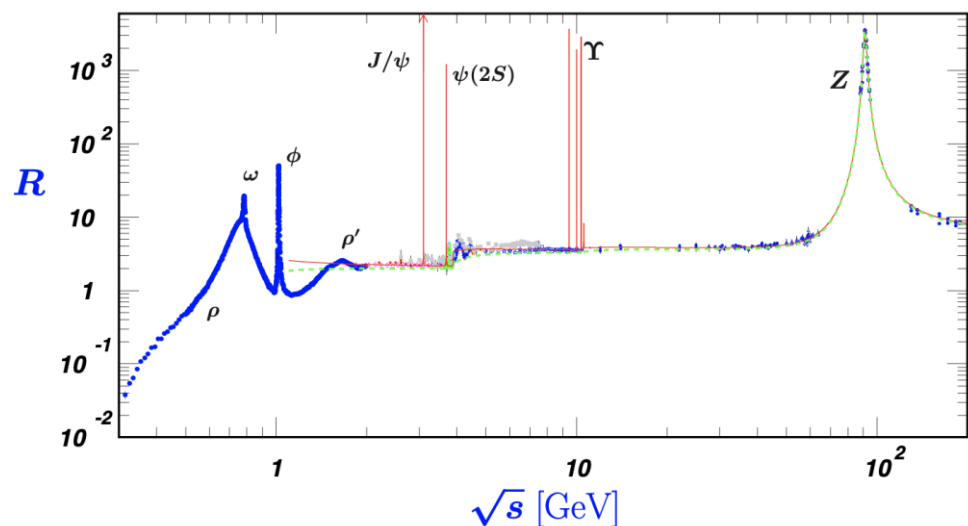
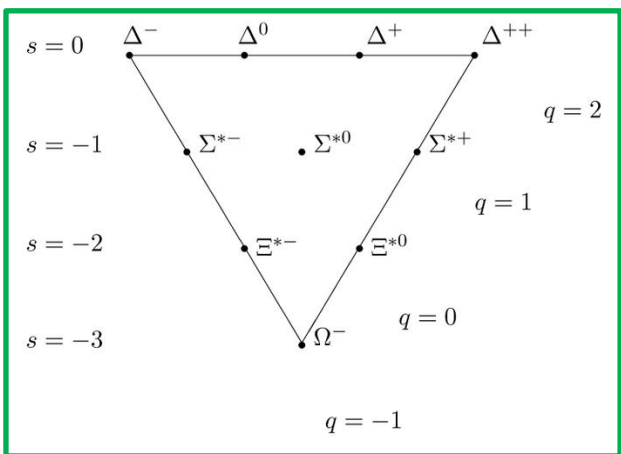
$$\Gamma^{obs} = 7.48 \pm 0.33 \text{ eV}$$

② 正负电子湮灭的R值

$$R \equiv \frac{\sigma^0(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma^0(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \equiv$$



$$= N_c \sum_{i=1}^{n_f} Q_i^2$$



$$= \begin{cases} 3 \times \left(\frac{1}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9} \right) = 2 & (uds) \\ 3 \times \left(\frac{1}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9} + \frac{4}{9} \right) = \frac{10}{3} & (udsc) \\ 3 \times \left(\frac{1}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9} + \frac{4}{9} + \frac{1}{9} \right) = \frac{11}{3} & (udscb) \end{cases}$$

Cabibbo混合 (Cabibbo, 1963)

- 上世纪六十年代，人们研究了大量弱作用过程，发现：
 - ✓ 纯轻过程具有一致的弱作用耦合常数 $G_\mu = G_\tau$;
 - ✓ “奇异数改变”的半轻过程具有一致的弱耦合常数 G ;
 - ✓ “奇异数不变”的半轻过程具有一致的弱耦合常数 G' ;
 - ✓ $G' \neq G$, $G \neq G_\mu$, $G = 98\%G_\mu$ 。
- 1963年，N. Cabibbo 假设强子弱流(J_μ)应同时有奇异数改变部分和奇异数不变部分。

$$J = \cos \theta_C J^{\Delta S=0} + \sin \theta_C J^{\Delta S=1}$$

- 各类弱耦合常数应与纯轻的一致， $G = G_\mu \cdot \cos \theta_C$, $G' = G_\mu \cdot \sin \theta_C$ ，统一记为 G_F 。

$$H_{SL} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} (\cos \theta_C J_\mu^{\Delta S=0} + \sin \theta_C J_\mu^{\Delta S=1}) \bar{l}_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \nu_e + h.c.$$

- Cabibbo理论首次系统引入“混合”概念，清空了全部混乱，且影响深远。

味道改变中性流问题

- 夸克图像：参与弱作用的是“味本征态”而不是“质量本征态”，前者是后者的线性混合，记作

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_C & \sin \theta_C \\ -\sin \theta_C & \cos \theta_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

- 关键：只有 d 和 s 发生了混合。只要假设 d' 和 u 构成的强子弱流满足普适的弱作用，且不存在 s' 和 u 之间的弱流，即可得到Cabibbo理论。

- 问题：若 s' 被排除在强子弱流之外，则理论上应存在“两种”弱中性流过程

$$\bar{u}u + \bar{d}'d' = \bar{u}u + (\cos^2 \theta_C \bar{d}d + \sin^2 \theta_C \bar{s}s) + \sin \theta_C \cos \theta_C (\bar{d}s + \bar{s}d)$$

- 然而，实验发现“味道改变中性流”远远低于理论预期。

GIM机制 (Glashow-Iliopoulos-Maiani, 1970)

- 自然界中存在四种轻子，于是有两种轻子带电流

$$J^e = \bar{\nu}_e(1 - \gamma_5)e$$

$$J^\mu = \bar{\nu}_\mu(1 - \gamma_5)\mu$$

- 但夸克只有三种，只能构成一种强子带电流

$$J_\mu^{ud'} = \bar{u}\gamma_\mu(1 - \gamma_5)d' = \bar{u}\gamma_\mu(1 - \gamma_5)(\cos\theta_C d + \sin\theta_C s)$$

- 引入一个与 u 夸克类似的新夸克： c 夸克，由此出现一个新的强子带电流

$$J_\mu^{cs'} = \bar{c}\gamma_\mu(1 - \gamma_5)s' = \bar{c}\gamma_\mu(1 - \gamma_5)(-\sin\theta_C d + \cos\theta_C s)$$

- 然后，弱中性流从“两种”变成“四种”，新增

$$\bar{c}c + \bar{s}'s' = \bar{c}c + (\sin^2\theta_C \bar{d}d + \cos^2\theta_C \bar{s}s) - \sin\theta_C \cos\theta_C (\bar{d}s + \bar{s}d)$$

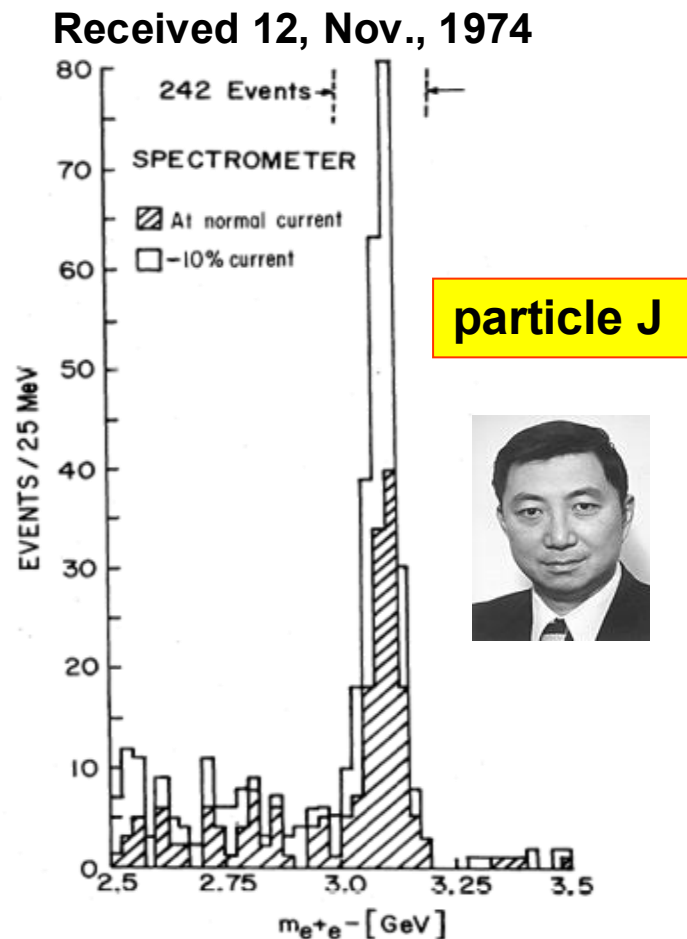
- 于是，“味道改变中性流”部分刚好被抵消。

$$\bar{u}u + \bar{c}c + \bar{d}'d' + \bar{s}'s' = \bar{u}u + \bar{c}c + \bar{d}d + \bar{s}s$$

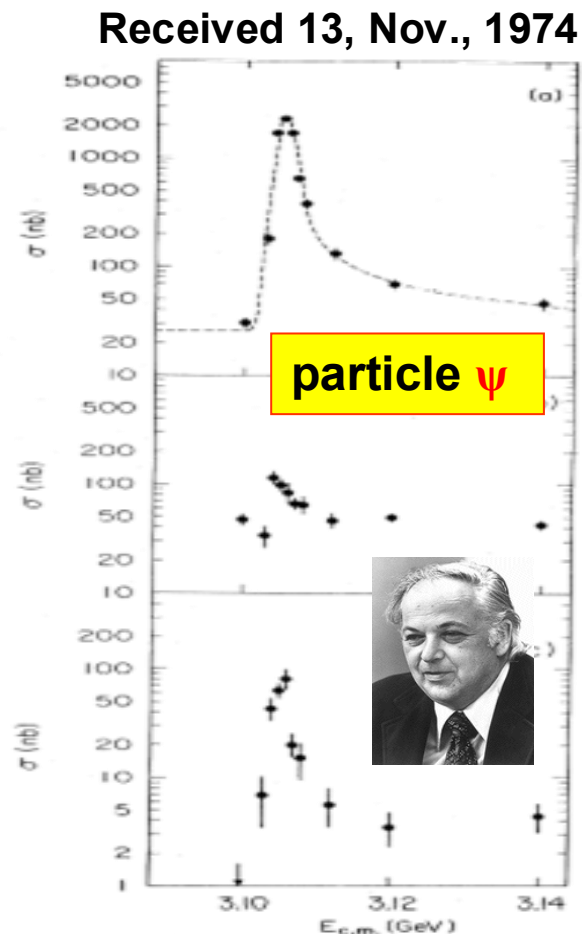
粲夸克的发现 (Ting-Richter, 1974)

“November Revolution of Particle Physics!”

Charmonium: bound states of $c\bar{c}$

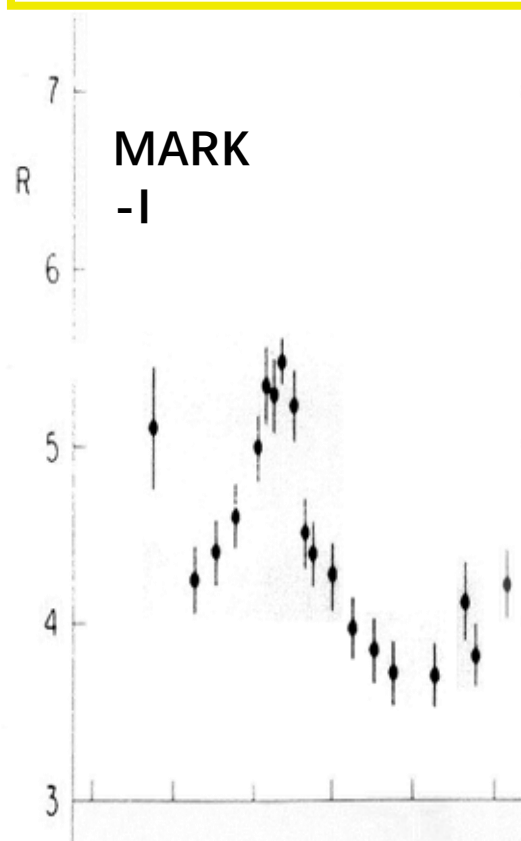


PRL33, 1404 (1974)



PRL33, 1406 (1974)

Discovery of $\psi(3770)$



PRL39, 526 (1977)

CP破坏 (Cronin & Fitch, 1964)

- 实验发现 K^0 介子含有两种中性成分，其中 K_1 衰变到 2π ， K_2 衰变到 3π ，故他们的CP宇称分别被确定为“正”和“负”。
- 由于 2π 衰变的相空间比 3π 的大，故 K_1 衰变快，其寿命比 K_2 短很多，两者差约580倍。
- 有趣的可能： K^0 产生后，因 K_1 成分的平均寿命更短，一段时间后， K_1 基本消失，剩下的都是 K_2 ，于是就可以研究 K_2 能否衰变到 2π 。

VOLUME 13, NUMBER 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

27 JULY 1964

EVIDENCE FOR THE 2π DECAY OF THE K_2^0 MESON*†

J. H. Christenson, J. W. Cronin,‡ V. L. Fitch,‡ and R. Turlay§

Princeton University, Princeton, New Jersey

(Received 10 July 1964)

0.2%

This Letter reports the results of experimental studies designed to search for the 2π decay of the K_2^0 meson. Several previous experiments have served^{1,2} to set an upper limit of 1/300 for the fraction of K_2^0 's which decay into two charged pions. The present experiment, using spark chamber techniques, proposed to extend this limit.

In this measurement, K_2^0 mesons were produced at the Brookhaven AGS in an internal Be target bombarded by 30-Bev protons. A neutral beam was defined at 30 degrees relative to the circulating protons by a $1\frac{1}{2}$ -in. $\times$ $1\frac{1}{2}$ -in. $\times$ 48-in. collimator at an average distance of 14.5 ft. from

The analysis program computed the vector momentum of each charged particle observed in the decay and the invariant mass, m^* , assuming each charged particle had the mass of the charged pion. In this detector the K_{e3} decay leads to a distribution in m^* ranging from 280 MeV to ~536 MeV; the $K_{\mu 3}$, from 280 to ~516; and the $K_{\pi 3}$, from 280 to 363 MeV. We emphasize that m^* equal to the K^0 mass is not a preferred result when the three-body decays are analyzed in this way. In addition, the vector sum of the two momenta and the angle, θ , between it and the direction of the K^0 beam were determined. This

🏆 C&F: 1980年诺贝尔物理学奖



Fitch

Turlay

Cronin

Christenson

CKM机制 (Kobayashi & Maskawa, 1973)

- K和M把GIM机制的两代夸克混合推广到三代

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

- 于是，强子带电流变成

$$J_{\mu}^{+} = (\bar{u} \quad \bar{c} \quad \bar{t}) \gamma_{\mu} (1 - \gamma_5) \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = (\bar{u} \quad \bar{c} \quad \bar{t}) \gamma_{\mu} (1 - \gamma_5) \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

- 数学上， 3×3 复么正矩阵有9个独立实参数。
- 6个夸克场共有6个任意相位，选择1个作为基准后，其余5个可消除。
- 剩余的4个独立实参数：无数种参数化方式。如，四个角度、三个角度和一个相位、两个模长和一个相位等等。“三个欧拉角和一个**CP破坏相位**”的参数化方式，是最符合物理直觉的一种选择。
- 冷知识：CKM矩阵大获成功后，有人拓展了四代夸克的矩阵，独立实参数有 $16-7=9$ 个，除4个混合角外，还有5个CP相角，只是导致CP破坏变复杂，没有带来新东西。

CKM参数化

- 标准参数化

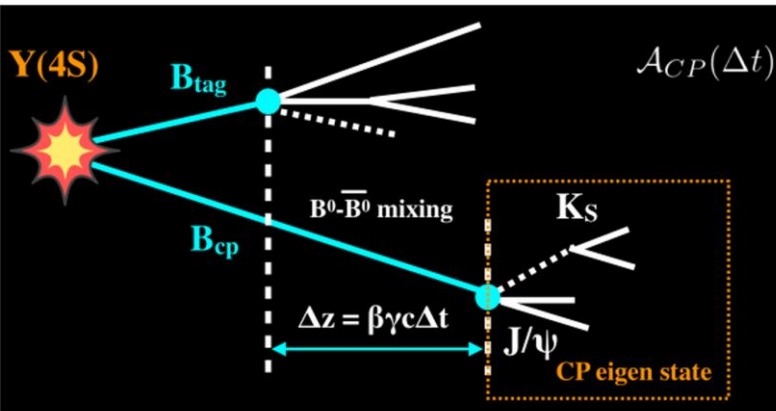
$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\delta_{13}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\delta_{13}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{-i\delta_{13}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{-i\delta_{13}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

- 当 $\theta_{13} = 0$ 且 $\theta_{23} = 0$ 时，回归Cabibbo矩阵； δ_{13} 可产生CP破坏。

- 考虑量级关系，取 $V_{us} = 0.22 = \lambda$ ， $V_{cb} = A\lambda^2$ ， $V_{ub} = A\lambda^3(\rho - i\eta)$ ，可得Wolfenstein参数化

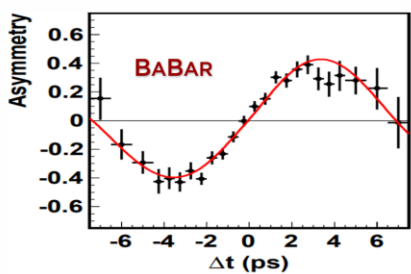
$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

层级结构清晰
 λ 、 λ^2 、 λ^3

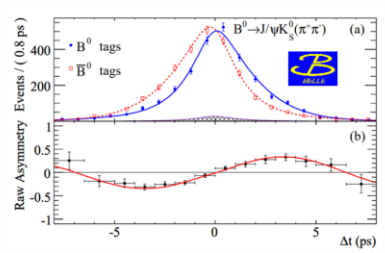


味道标记

信号重建



$\sin 2\beta = 0.59 \pm 0.14 \pm 0.05$
Babar, PRL 87 (2001) 091801



$\sin 2\beta = 0.99 \pm 0.14 \pm 0.06$
Belle, PRL 87 (2001) 091802

K&M : 2008年诺贝尔奖



为什么精确测量CKM矩阵元：幺正性检验

① 检验CKM矩阵的幺正性

CKM矩阵描述夸克如何改变“味道”。若矩阵元的测量值与幺正性的预言出现无法调和的偏差，就意味着标准模型对味物理的描述是不完整的，可能暗示存在第四代夸克或其他新物理。

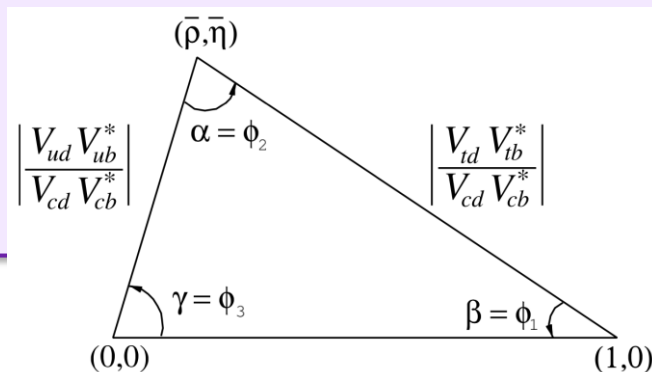
✓ 归一化条件(6个)：每一行或每一列的矩阵元模的平方和等于1。对应弱相互作用的普适性，即某类夸克与所有可能耦合的夸克耦合强度的总和是1。

卡比玻角异常 (CAA)：前两个的平方和小于1（约2-3 σ 偏差）

$$\begin{aligned} |V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 &= 1 & |V_{ud}|^2 + |V_{cd}|^2 + |V_{td}|^2 &= 1 \\ |V_{cd}|^2 + |V_{cs}|^2 + |V_{cb}|^2 &= 1 & |V_{us}|^2 + |V_{cs}|^2 + |V_{ts}|^2 &= 1 \\ |V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{tb}|^2 &= 1 & |V_{ub}|^2 + |V_{cb}|^2 + |V_{tb}|^2 &= 1 \end{aligned}$$

✓ 正交条件(6个)：任意两行或任意两列之间必须是正交的。对应6个复平面的三角形。

$$\begin{aligned} V_{ud}V_{cd}^* + V_{us}V_{cs}^* + V_{ub}V_{cb}^* &= 0 & V_{ud}V_{us}^* + V_{cd}V_{cs}^* + V_{td}V_{ts}^* &= 0 \\ V_{ud}V_{td}^* + V_{us}V_{ts}^* + V_{ub}V_{tb}^* &= 0 & V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* &= 0 \\ V_{cd}V_{td}^* + V_{cs}V_{ts}^* + V_{cb}V_{tb}^* &= 0 & V_{us}V_{ub}^* + V_{cs}V_{cb}^* + V_{ts}V_{tb}^* &= 0 \end{aligned}$$



为什么精确测量CKM矩阵元

② CP破坏

精确测量CKM矩阵元，可以得到标准模型所能提供的CP破坏程度。目前的结论是，标准模型里的CP破坏量级远远不够解释观测到的宇宙物质-反物质不对称。精确测量CKM参数，能帮助物理学家量化“缺口”到底有多大。

③ LQCD

- ✓ 实验测得的衰变率是“CKM矩阵元”与“衰变常数”的乘积。
- ✓ 输入CKM矩阵元的数值以得到衰变常数，由此检验与刻度LQCD，以提高LQCD的计算精度。
- ✓ LQCD的理论输入，是获取高精度CKM矩阵元的关键。

④ 约束新物理模型

对BSM模型（带电Higgs、轻子夸克、额外维度等）给出灵敏约束

V_{cd} 和 V_{cs} 的实验测量方法

V_{cd} 测量

- ① D介子纯轻衰变：统计误差大，系统误差小 [陶粲工厂]
- ② D介子半轻衰变：统计误差小，系统误差大(来自输入FF) [陶粲工厂、B工厂、固定靶]
- ③ 中微子散射实验：依赖中微子束流特征、QCD修正等
 - ✓ CDHS [Z. Phys. C15, 19 (1982)]: $|V_{cd}| = 0.24 \pm 0.03$
 - ✓ CCFR [PRL 70, 134 (1993)]: $|V_{cd}| = 0.209 \pm 0.012$
 - ✓ CCFR [Z. Phys. C65, 189 (1995)]: $|V_{cd}| = 0.232^{+0.018}_{-0.020}$
 - ✓ CHARM II [EPJC 11, 19 (1999)]: $|V_{cd}| = 0.219 \pm 0.016$

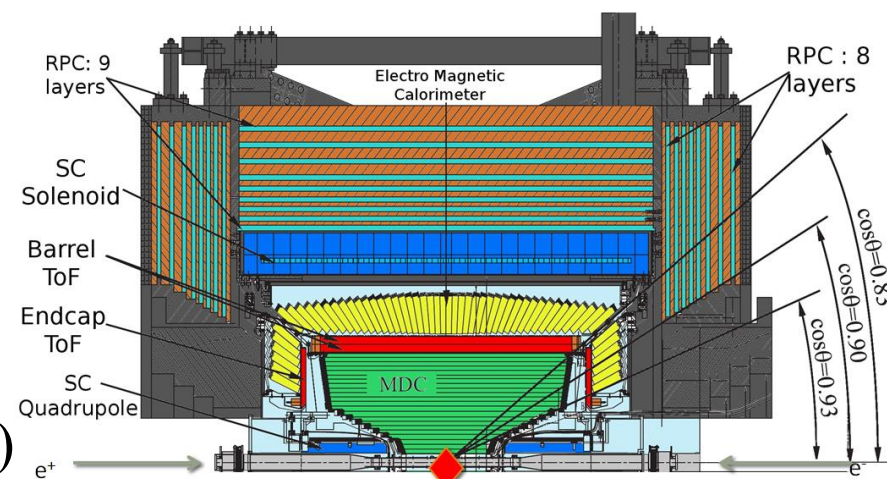
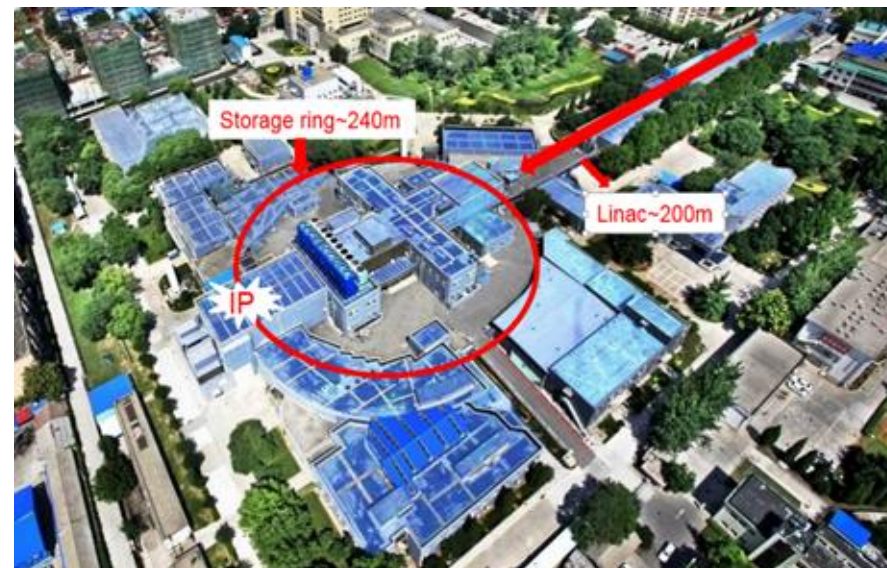
V_{cs} 测量

- ① D介子半轻衰变：统计误差小，系统误差大(来自输入FF) [陶粲工厂、B工厂、固定靶]
- ② D_s 介子纯轻衰变：统计误差大，系统误差小 [陶粲工厂、B工厂、固定靶、Z工厂]。
- ③ W衰变：DELPHI [PLB439, 209 (1998)] $|V_{cs}| = 0.91^{+0.15}_{-0.14} \pm 0.05$
- ④ 中微子散射实验：CDHS [Z. Phys. C15, 19 (1982)] $|V_{cs}| > 0.59$

PART TWO

BESIII的纯轻测量

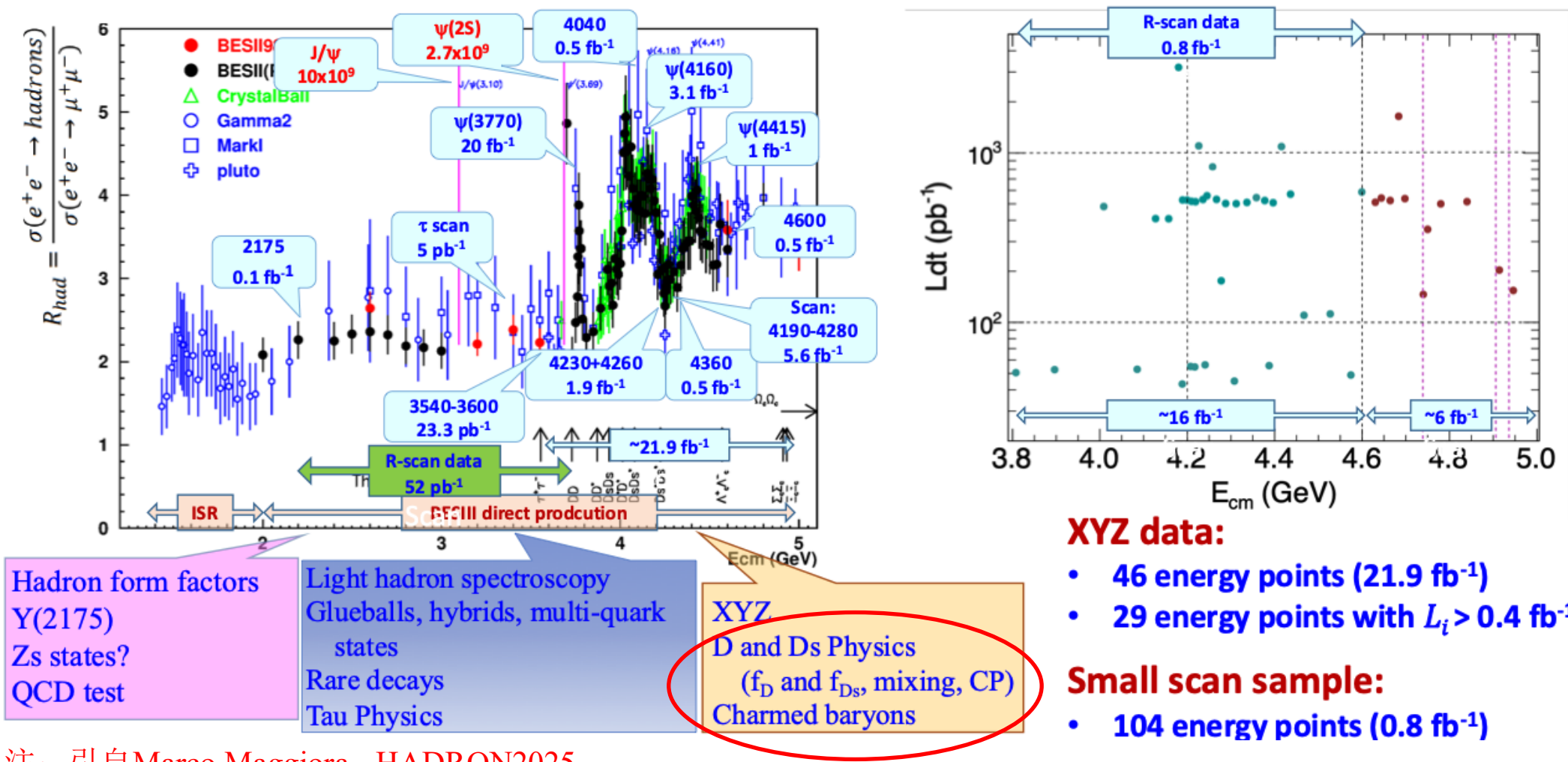
BESIII实验



- $\sqrt{s} = (2.0 - 4.95) \text{ GeV}$
- MDC: $\sigma_p/p = 0.5\% @ 1 \text{ GeV}$, $\sigma_{dE/dx} = 6\%$
- TOF: $\sigma_T = 68(60) \text{ ps}$ for barrel (endcap)
- EMC: $\sigma_E/E = 2.5\%(5\%) \text{ ps}$ for barrel (edncap)

世界最大 τ -粲能区数据

拥有世界上最大的tau-粲能区数据样本



注：引自Marco Maggiora - HADRON2025

BESIII粲物理的四大优势

优势一：粲强子工厂

大样本 | 高数据质量 | ISR精确可控

优势二：近阈数据

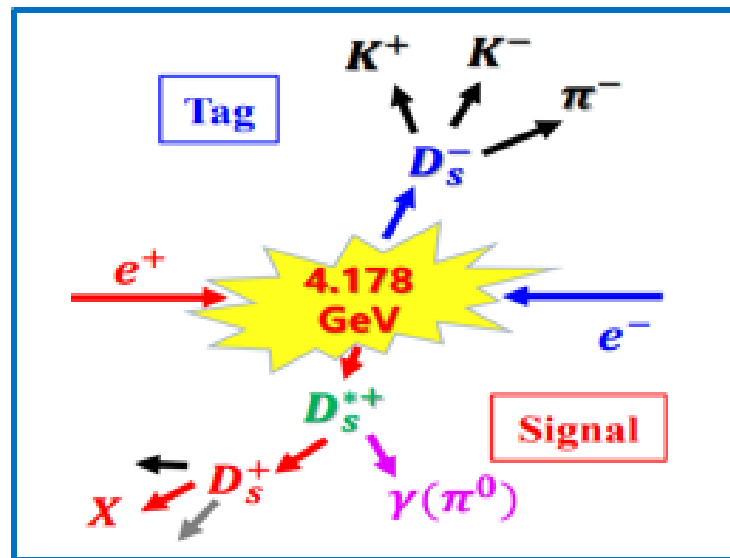
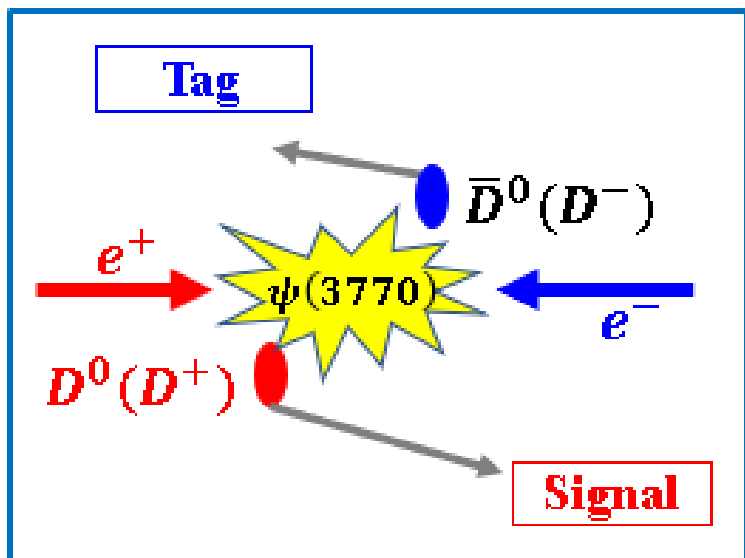
近阈产生 | 运动学约束紧 | 成对 $D\bar{D}$

优势三：双标记方法

低本底 | 低统计误差 | 丢失质量约束

优势四：量子关联

关联产生 | 强相差 | CP破坏 | 关联测量



$$\mathcal{B} = \frac{N_{\text{sig}}}{N_{\text{tag}} \epsilon_{\text{sig}}}$$
$$\epsilon_{\text{sig}} = \frac{\epsilon_{\text{tag, sig}}}{\epsilon_{\text{tag}}}$$
$$\epsilon_{\text{tag}} = \frac{N_{\text{tag}}^{\text{inmc}}}{N_{\text{tot}}^{\text{inmc}}}$$

$D_{(s)}^+$ 介子纯轻衰变

衰变宽度

$$\Gamma(D_{(s)}^+ \rightarrow l^+ \nu_l) = \frac{G_F^2 m_l^2 m_{D_{(s)}^+}}{8\pi} f_{D_{(s)}^+}^2 |V_{cd(s)}|^2 \left(1 - \frac{m_l^2}{m_{D_{(s)}^+}^2}\right)^2 \left(1 + \frac{\alpha}{\pi} C_p\right)$$

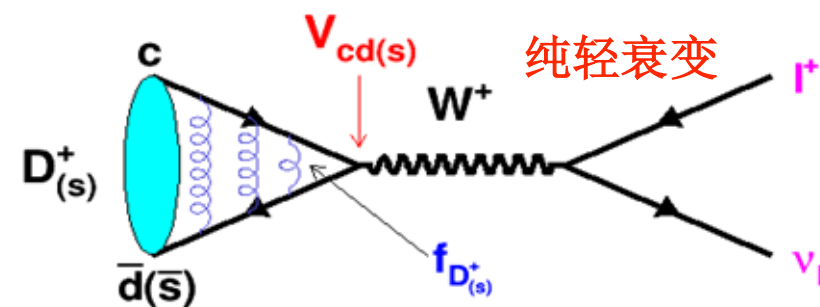
螺旋度压低 (振幅 $\propto m_l \rightarrow$ 宽度 $\propto m_l^2$)

$$B^{e\nu} : B^{\mu\nu} : B^{\tau\nu} \approx m_e^2 : m_\mu^2 : m_\tau^2 \approx 2.6 \times 10^{-7} : 1 : 283$$

$$|V_{\text{CKM}}| = \begin{pmatrix} 0.97435 \pm 0.00016 & 0.22501 \pm 0.00068 & 0.003732^{+0.000090}_{-0.000085} \\ \textcolor{red}{0.22487 \pm 0.00068} & \textcolor{red}{0.97349 \pm 0.00016} & 0.04183^{+0.00079}_{-0.00069} \\ 0.00858^{+0.00019}_{-0.00017} & 0.04111^{+0.00077}_{-0.00068} & 0.999118^{+0.000029}_{-0.000034} \end{pmatrix}$$

➤ $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}| \rightarrow$ 检验CKM幺正性

➤ 衰变常数 $f_{D_{(s)}^+} \rightarrow$ 检验LQCD计算

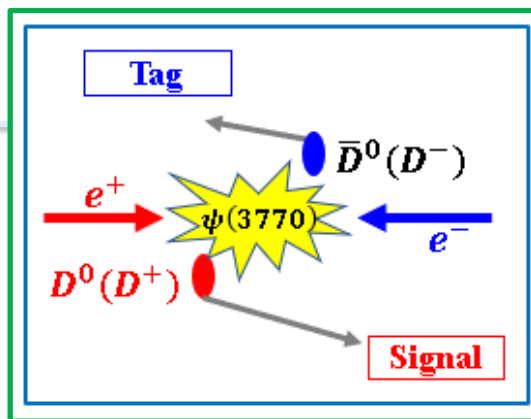


➤ 分支比的比值 $\rightarrow$ 检验轻子普适性

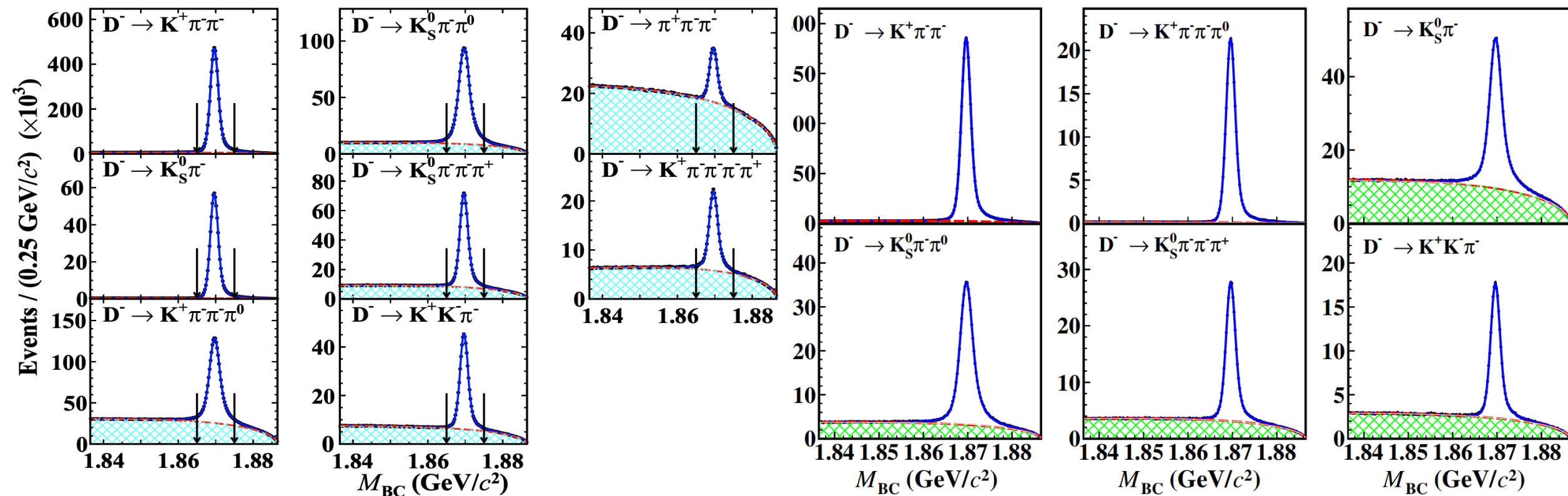
➤ 寻找超出标准模型之外的新物理

D^+ 的单标记

8个标记道



6个标记道



$D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ (2014)

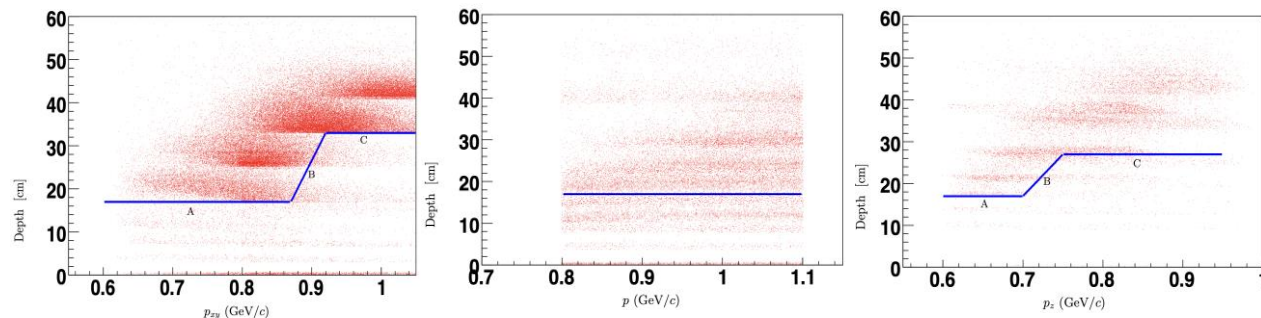
数据样本: 2.93 fb^{-1} @ 3.773 GeV ($3.5\times$ of CLEO-c); 双标记方法; $N_{\text{ST}} \sim 1.7 \text{ M}$

PRD89(2014)051104RC

信号侧分析

μ^+ is identified by its transit distance in the MUC

Charged pions/kaons undergo strong interactions and stop before MUC

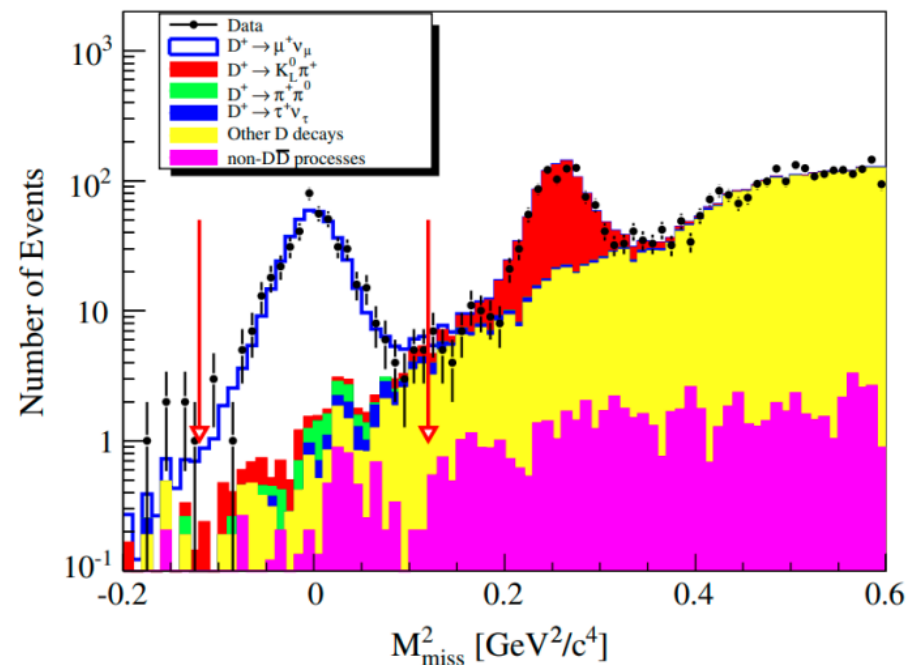


$E_{\gamma \text{ max}}$ of any extra good photon in the EMC: $< 300 \text{ MeV}$

M_{miss}^2 window: $(-0.12, 0.12) \text{ GeV}^4/c^2$

$$\text{➤ } N_{\text{sig}} = 409 \pm 21 \pm 2$$

$$\begin{aligned} \text{➤ } B(D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) &= \frac{N_{\text{sig}}^{\text{net}}}{N_{D^+ \text{ tag}} \times \epsilon} \\ &= (3.71 \pm 0.10 \pm 0.06) \times 10^{-4} \end{aligned}$$



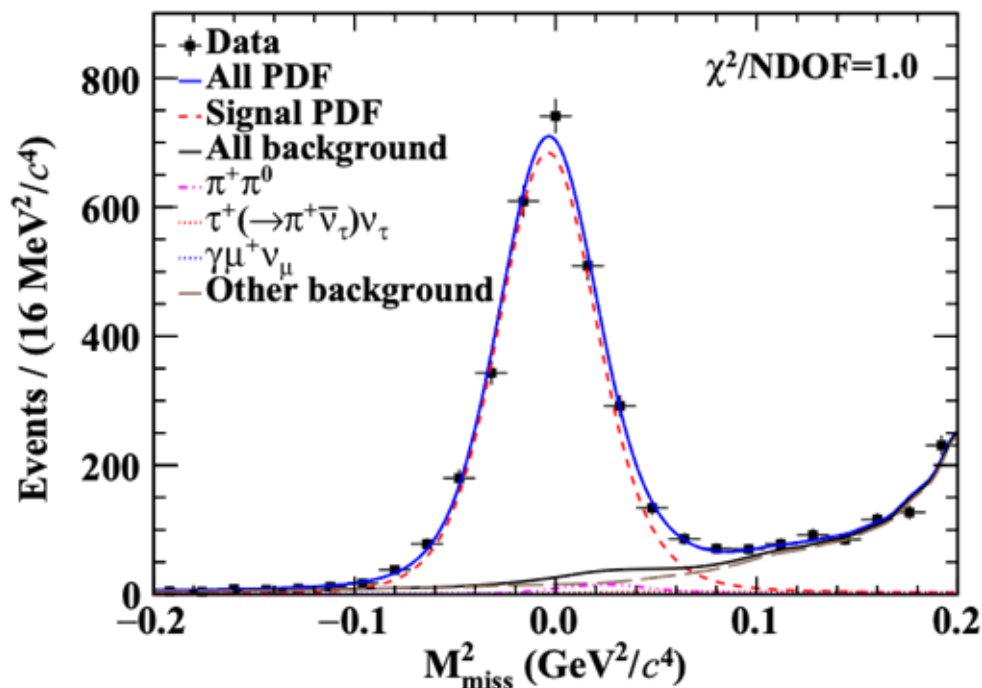
$$M_{\text{miss}}^2 = (E_{\text{cm}} - E_{\text{tag}} - E_{\mu^+})^2 - |\vec{p}_{\text{tag}} - \vec{p}_{\mu^+}|^2$$

$$\text{➤ } |V_{cd}| = 0.2210(0.0058_{\text{stat}})(0.0047_{\text{syst}})$$

$$\text{➤ } |V_{cd}| \text{ 精度: } 2.8\%$$

$D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ (2025)

数据样本: 20.3 fb⁻¹ @3.773 GeV
双标记方法: $N_{ST} \sim 10.8$ M (8个标记道)



PRL135(2025)061801

$f_{D^+}|V_{cd}|$ 可从 $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 衰变宽度的首阶项(Γ^0)提取

$$\Gamma_{D^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell} = \Gamma_{D^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell}^{(0)} \left[1 + \frac{\alpha}{\pi} C_p \right] \quad \text{辐射修正因子}$$

$$= \frac{G_F^2 f_{D^+}^2 m_{D^+}^3 |V_{cd}|^2 \mu_\ell^2 (1 - \mu_\ell^2)^2}{8\pi} \left[1 + \frac{\alpha}{\pi} C_p \right]$$

必要的辐射修正[PRD98(2018)074512]

1. Structure-dependent bremsstrahlung → 从拟合中扣除

$$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = 4.034 \pm 0.080 \pm 0.040$$

2. Short-distance electroweak correction
3. Long-distance electroweak correction

$$|V_{cd}| = 0.2265(0.0023_{\text{stat}})(0.0011_{\text{syst}})(0.0009_{\text{input}})(0.0007_{\text{EM}})$$

$$f_{D^+} = (213.5 \pm 2.1_{\text{stat}} \pm 1.1_{\text{syst}} \pm 0.8_{\text{input}} \pm 0.7_{\text{EM}}) \text{ MeV}$$

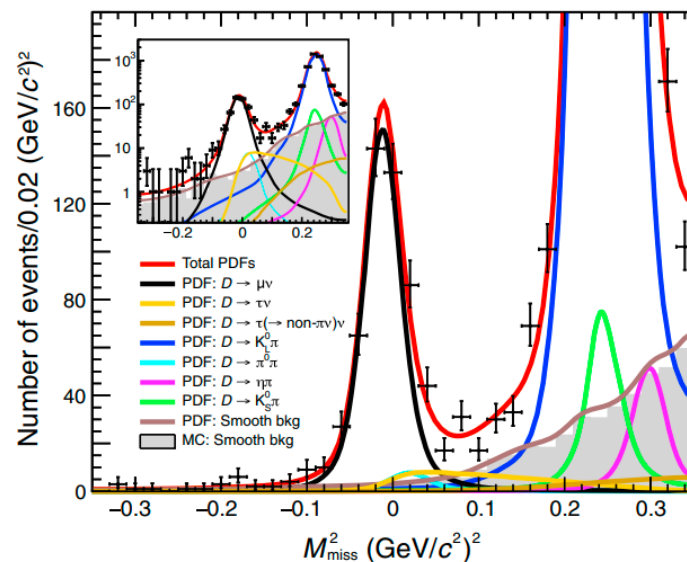
f_{D^+} 和 $|V_{cd}|$ 精度: 1.2%
和此前结果相比, 精度改善了 2.3 倍

$D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau, \tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau$ (2019)

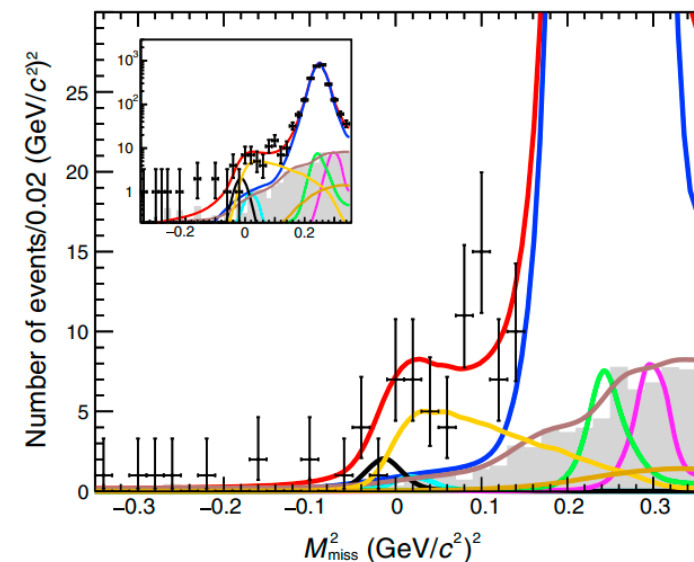
数据样本: 2.93 fb^{-1} @ 3.773 GeV ($3.5\times$ of CLEO-c); 双标记方法; $N_{\text{ST}} \sim 1.5 \text{ M}$

PRL123(2019)211802

- 末态带电径迹为 π^+ ，在探测器中的行为与 μ^+ 相似
- 为免效率损失，没有使用MUC信息
- 对 $\mu^+ \text{--like}$ 道和 $\pi^+ \text{--like}$ 道，进行联合拟合



$\mu^+ \text{--like}$ ($E_{\text{EMC}} < 300$)



$\pi^+ \text{--like}$ ($E_{\text{EMC}} > 300$)

- $\mathcal{B}_{\tau\nu} = (1.20 \pm 0.24 \pm 0.12) \times 10^{-3}$
- $f_{D^+} = (224.5 \pm 22.8_{\text{stat}} \pm 11.3_{\text{syst}} \pm 0.9_{\text{ext-syst}}) \text{ MeV}$
- $|V_{cd}| = 0.237 \pm 0.024_{\text{stat}} \pm 0.012_{\text{syst}} \pm 0.001_{\text{ext-syst}}$
- $R_{\tau/\mu} = (3.21 \pm 0.64 \pm 0.43)$

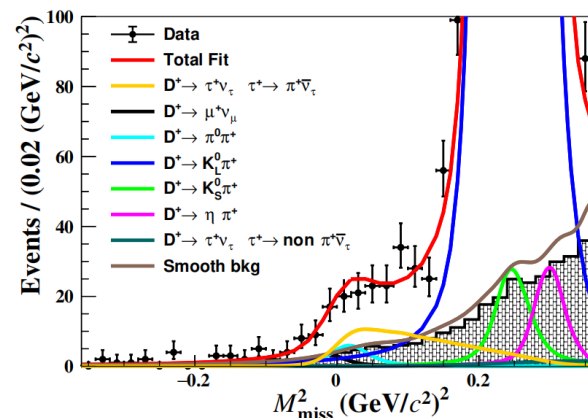
首次观测: 5.1σ
 $|V_{cd}|$ 精度: 11.3%

$$D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau, \tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau \text{ (2025)}$$

数据样本: 7.9 fb^{-1} @3.773 GeV; 双标记方法; $N_{\text{ST}} \sim 4.1 \text{ M}$ (6单标记道)

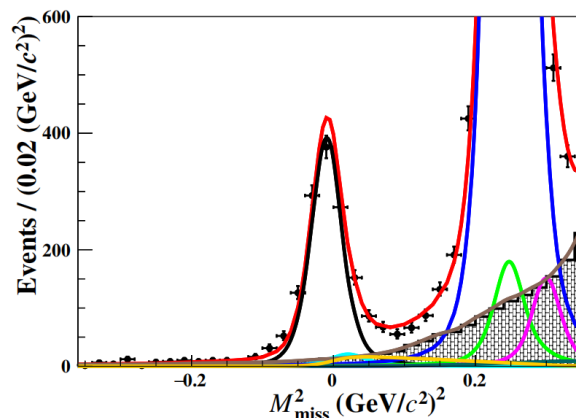
JHEP01(2025)089

信号侧分析



(a)

联合拟合: π^+ -like



(b)

μ^+ -like

- $\mathcal{B}_{\tau\nu} = (9.9 \pm 1.1 \pm 0.5) \times 10^{-4}$
- $f_{D^+} = (204 \pm 11 \pm 5 \pm 1) \text{ MeV}$
- $|V_{cd}| = 0.216 \pm 0.012 \pm 0.006 \pm 0.001$
- $R_{\tau/\mu} = 2.49 \pm 0.31$

分支比改进:

45.4%

$|V_{cd}|$ 精度:

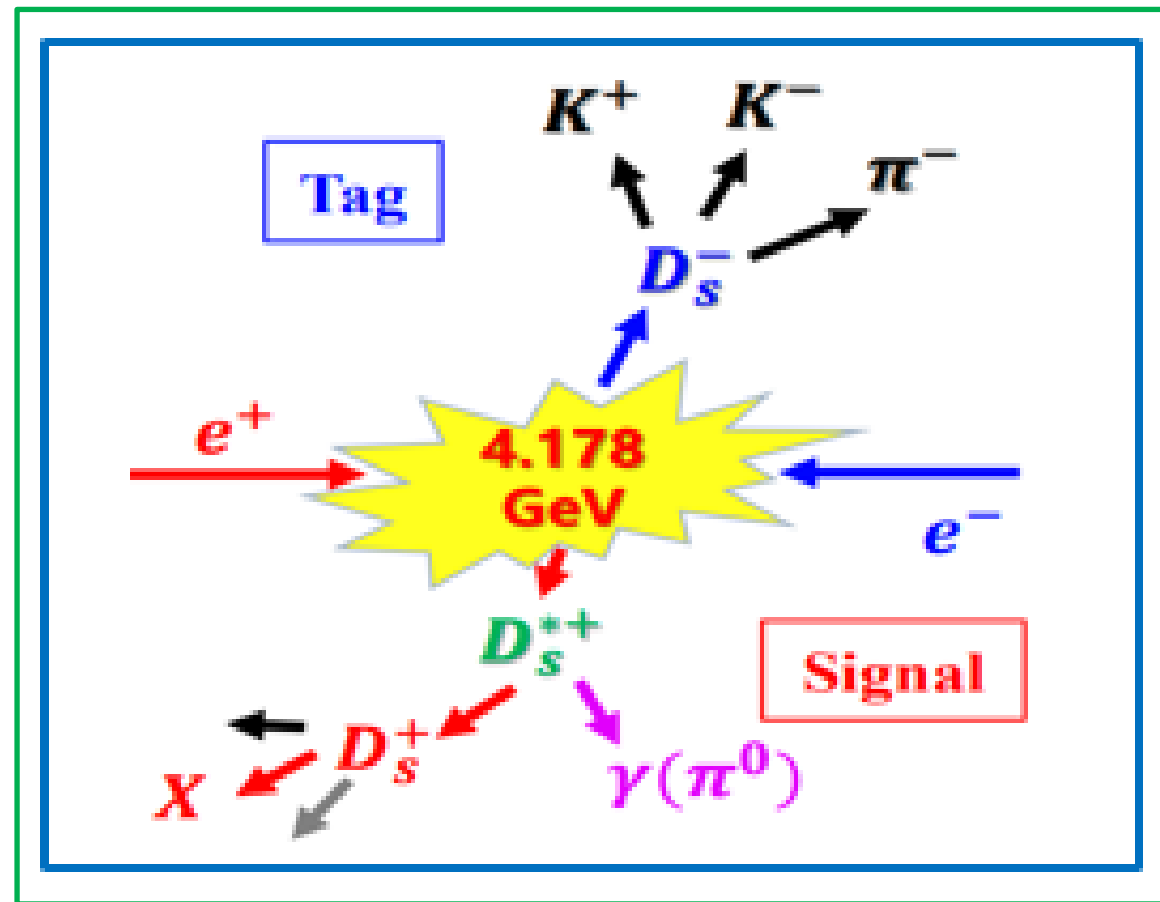
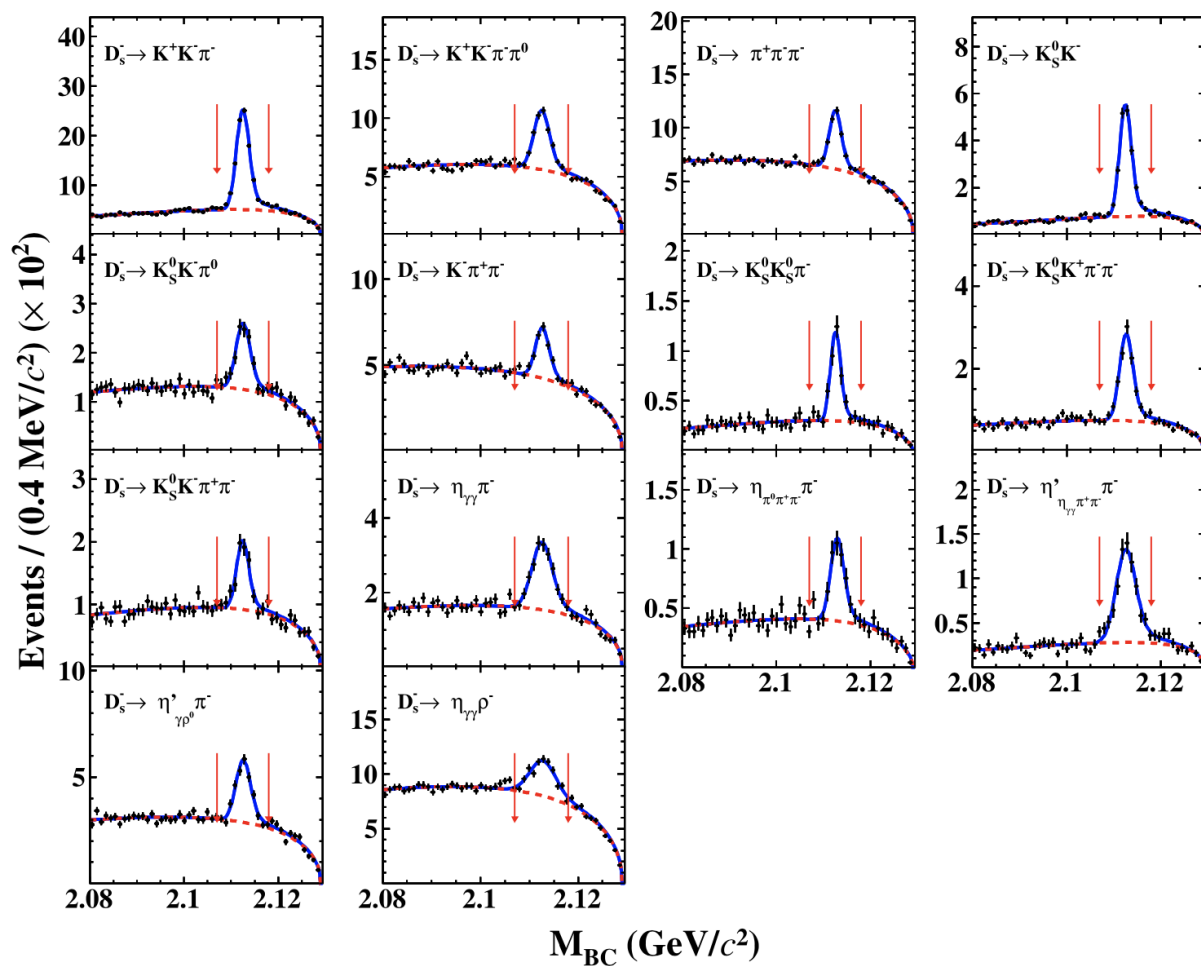
6.2%

BESIII D^+ 纯轻测量总结

Reference	Decay mode	$\mathcal{L}$	$ V_{cd} f_D$ (MeV)	$ V_{cd} $	f_D (MeV)	$\mathcal{B}$ (10^{-4})	$R^{\{\tau/\mu\}}$
$D^+ \rightarrow \mu \nu_\mu$							
PRD89(2014)051104RC	$\mu^+ \nu_\mu$	2.93 fb $^{-1}$	$45.75 \pm 1.20 \pm 0.39$	$0.2165 \pm 0.0055 \pm 0.0020$	$204.2 \pm 5.3 \pm 1.7$	$3.71 \pm 0.10 \pm 0.06$	—
PRL135(2025)061801		20.3 fb $^{-1}$	$48.02 \pm 0.48 \pm 0.24 \pm 0.12 \pm 0.15$	$0.2265 \pm 0.0023 \pm 0.0011 \pm 0.0009 \pm 0.0007$	$213.5 \pm 2.1 \pm 1.1 \pm 0.8 \pm 0.7$	$4.034 \pm 0.080 \pm 0.040$	2.97 ± 0.67
$D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$							
PRL123(2019)211802	$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau$	2.93 fb $^{-1}$	—	$0.237 \pm 0.024 \pm 0.012 \pm 0.001$	$224.5 \pm 22.8 \pm 11.3 \pm 0.9$	$12.0 \pm 2.4 \pm 0.12$	$3.21 \pm 0.64 \pm 0.43$
JHEP01(2025)089		7.9 fb $^{-1}$	$45.9 \pm 2.5 \pm 1.2 \pm 0.1$	$0.216 \pm 0.012 \pm 0.006 \pm 0.001$	$204 \pm 11 \pm 15 \pm 1$	$9.9 \pm 1.1 \pm 0.5$	2.49 ± 0.31

D_s^+ 的单标记

14个单标记道 (from 4.128 to 4.699 GeV)

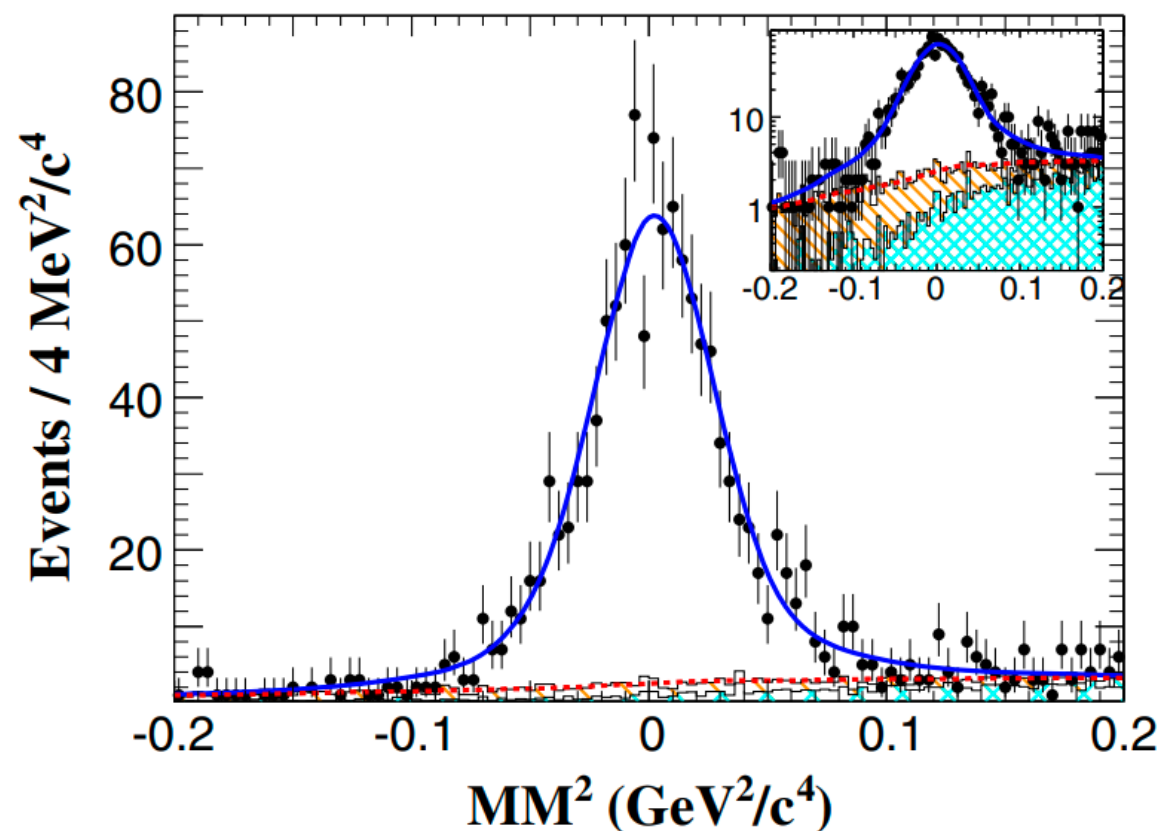


$D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ (2019)

数据: 3.19 fb⁻¹ @ 4.178 GeV

PRL 122, 071802 (2019)

信号侧拟合: 误差棒为数据, 直方图为蒙卡模拟的背景



$$N_{ST} = 388660 \pm 2592$$

$$N_{D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu} = 1135.9 \pm 33.1$$

$$\mathcal{B}_{D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu} = (5.49 \pm 0.16_{\text{stat}} \pm 0.15_{\text{syst}}) \times 10^{-3}$$

$$f_{D_s^+} |V_{cs}| = 246.2 \pm 3.6_{\text{stat}} \pm 3.5_{\text{syst}} \text{ MeV}$$

$$f_{D_s^+} = 252.9 \pm 3.7_{\text{stat}} \pm 3.6_{\text{syst}} \text{ MeV}$$

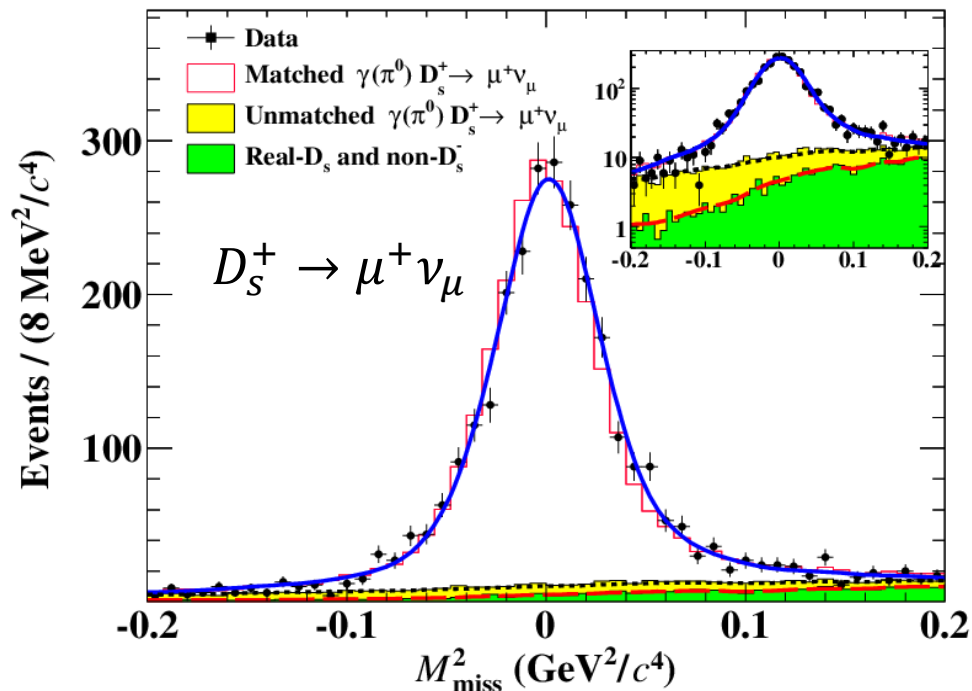
$$|V_{cs}| = 0.985 \pm 0.014_{\text{stat}} \pm 0.014_{\text{syst}}$$

- 实验上极大改善了BF的精度: 3.99 %
- $|V_{cs}|$ 精度: 2%

$D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ (2023)

数据: 7.33 fb⁻¹ @ 4.128 – 4.226 GeV;

PRD 108, 112001(2023)



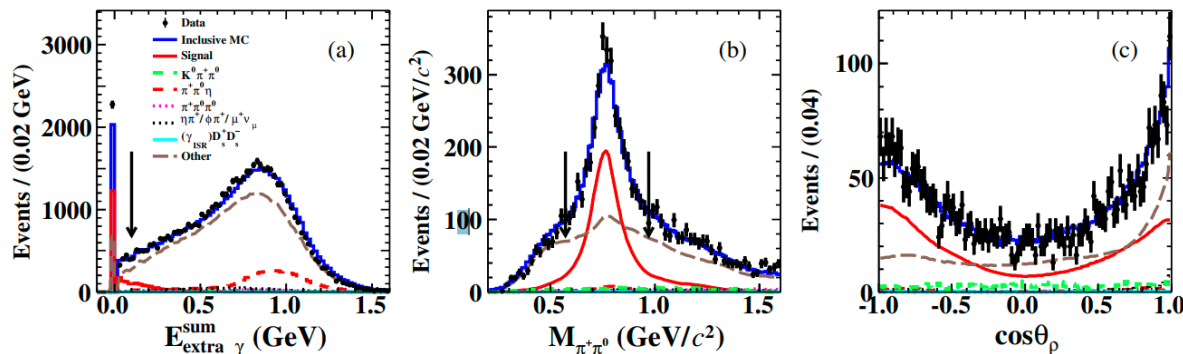
- $N_{ST}: \sim 0.88 \text{ M}$
- $N_{\text{sig}} = 2515 \pm 52$
- $f_{D_s^+} |V_{cs}| = (241.8 \pm 2.5_{\text{stat}} \pm 2.2_{\text{syst}}) \text{ MeV}$
- $f_{D_s^+} = (248.4 \pm 2.5_{\text{stat}} \pm 2.2_{\text{syst}}) \text{ MeV}$
- $|V_{cs}| = 0.968 \pm 0.010_{\text{stat}} \pm 0.009_{\text{syst}}$

- 得益于更大的数据样本，更多的单标记道以及MUC中的信息， $|V_{cs}|$ 的精度改善至: 1.4%!

$D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau, \tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\nu}_\tau$ (2021)

数据: 6.32 fb⁻¹ @ 4.178 – 4.226 GeV

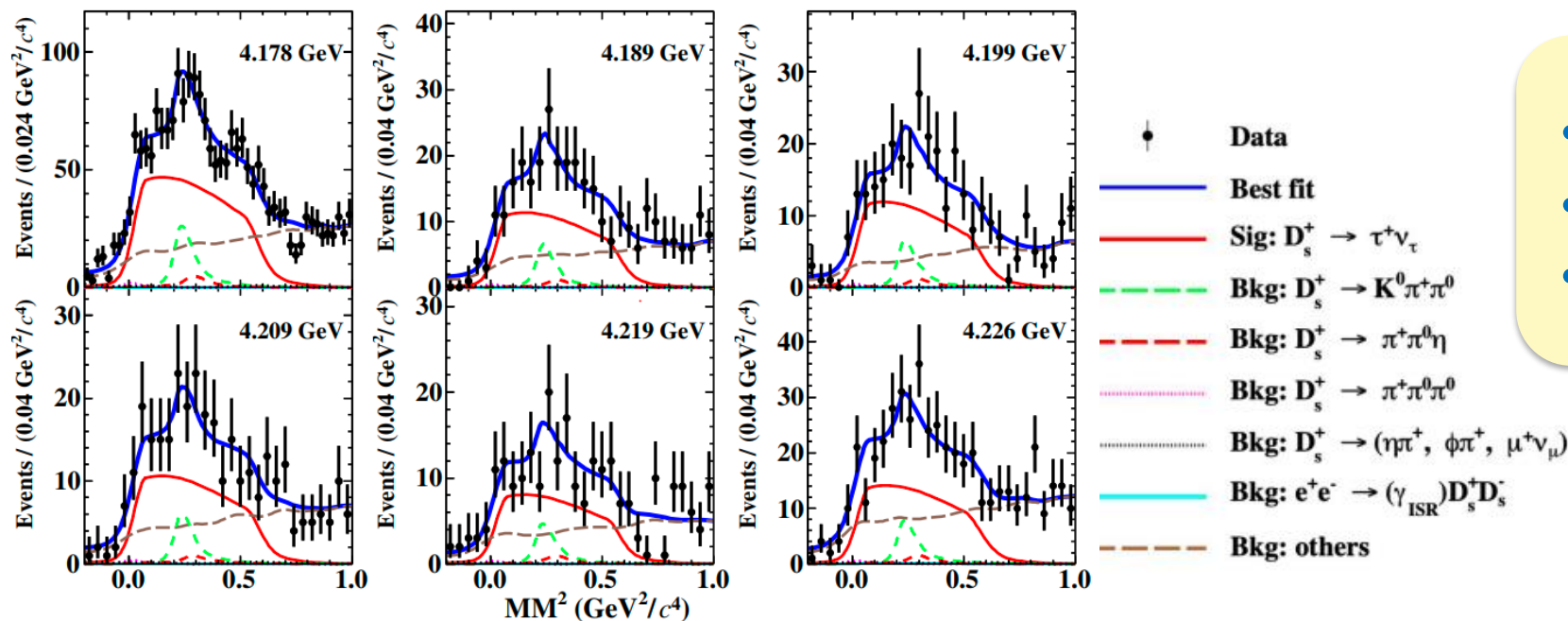
PRD 104, 032001(2021)



$N_{ST}: 0.71 M$

$$N_{D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu} = 1745 \pm 84$$

$$f_{D_s^+} |V_{cs}| = (244.8 \pm 5.8_{\text{stat}} \pm 4.8_{\text{syst}}) \text{ MeV}$$



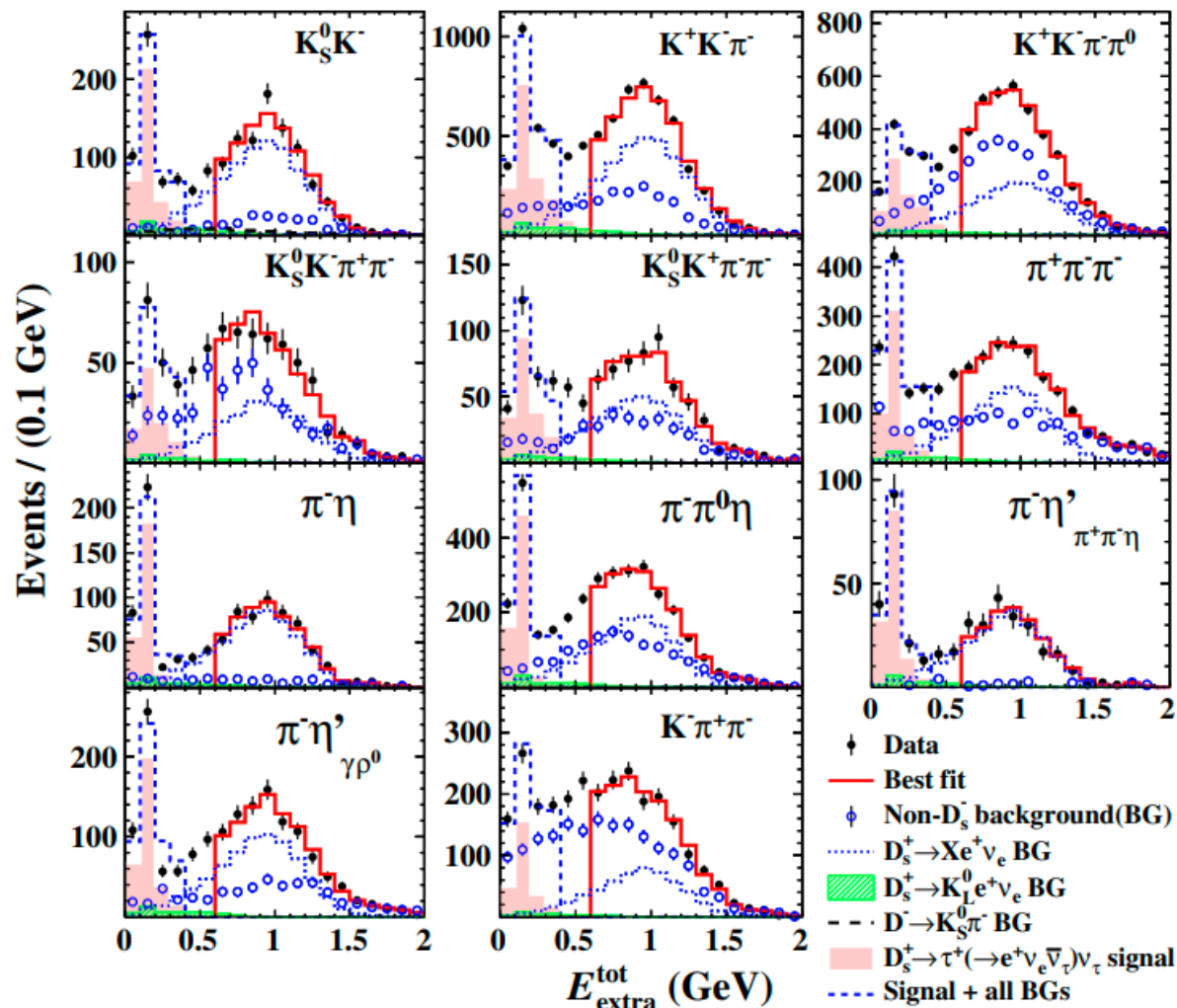
- 多能量点测量;
- 分支比和之前结果相符
- $|V_{cs}|$ 精度: 3.1 %

Simultaneous fit to M_{miss}^2 @ $\sqrt{s} = 4.178\text{--}4.226$ GeV

$$D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau, \tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau \text{ (2021)}$$

数据: 6.32 fb⁻¹ @ 4.178 – 4.226 GeV

PRL 127, 171801(2021)



信号: $E_{extra}^{tot} < 0.4$ GeV

背景: $E_{extra}^{tot} > 0.6$ GeV

$$N_{sig} = N_{data}^{SR} - N_{bkg}^{SR}$$

N_{data}^{SR} : 信号区数据事例数

N_{bkg}^{SR} : 信号区背景事例数,

拟合背景区, 利用MC BKG shape外推到信号区

$$\mathcal{B}_{D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau} = (5.27 \pm 0.10 \pm 0.12) \times 10^{-2}$$

$$f_{D_s^+} |V_{cs}| = (244.4 \pm 2.3 \pm 2.9) \text{ MeV.}$$

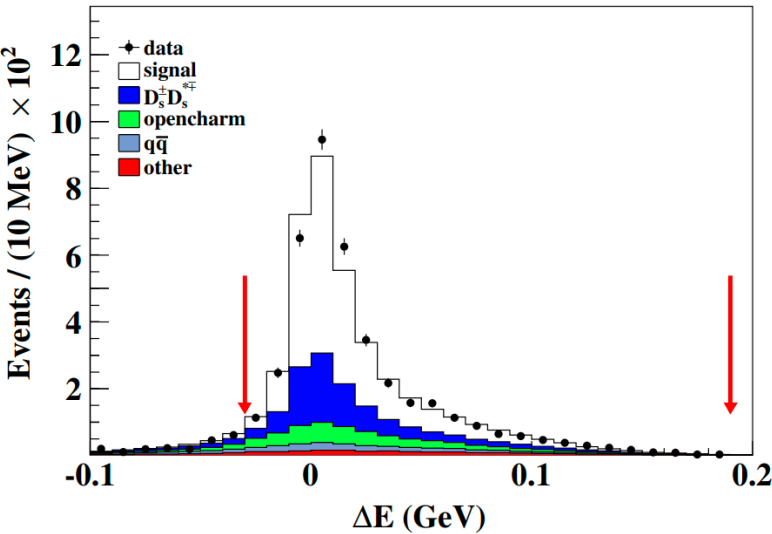
$$f_{D_s^+} = (251.1 \pm 2.4 \pm 3.0) \text{ MeV.}$$

$$|V_{cs}| = 0.978 \pm 0.009 \pm 0.012$$

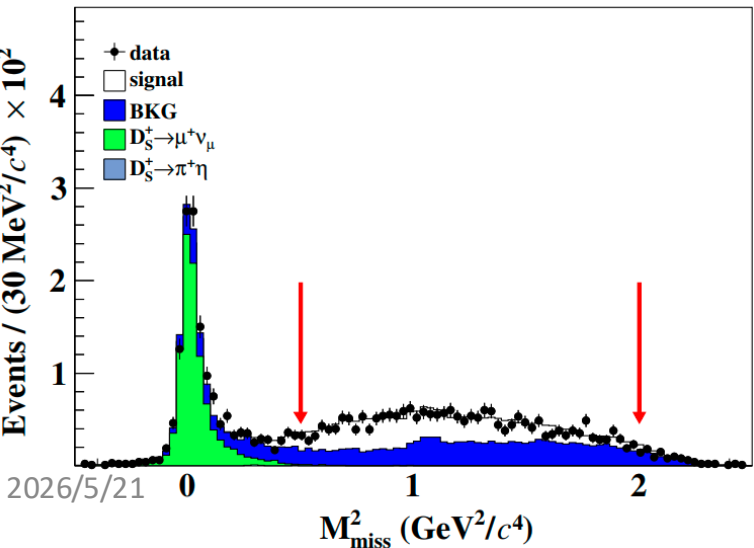
$|V_{cs}|$ 精度: ~1.5 %

$D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau, \tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau$ (2023)

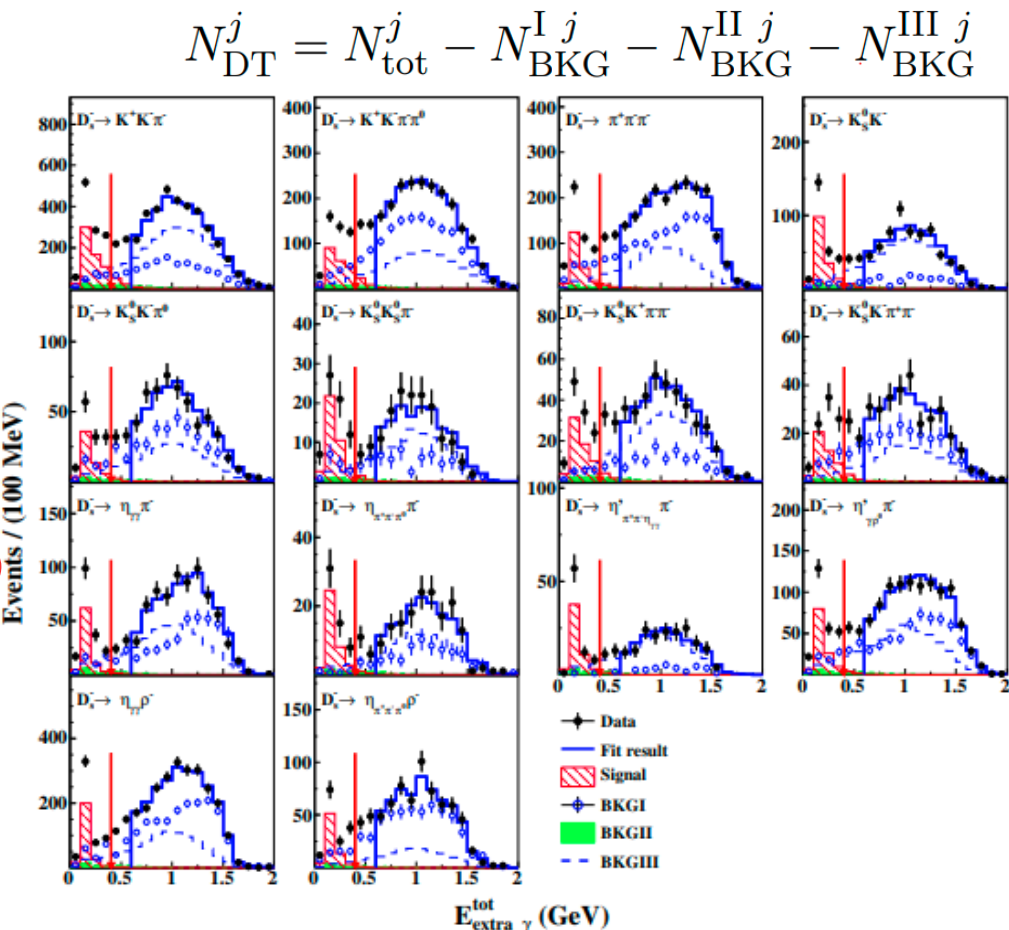
数据： 7.33 fb⁻¹ @ 4.128 – 4.226 GeV JHEP 09, 124(2023)



信号特征变量分布(箭头内为信号区)



2026/5/21



E_{extra}^{tot} : 未使用的好径迹在EMC中沉积的总能量

信号: $E_{extra}^{tot} < 0.4$ GeV

背景: $E_{extra}^{tot} > 0.6$ GeV

$$N_{sig} = N_{data}^{SR} - N_{bkg}^{SR}$$

N_{data}^{SR} : 信号区数据事例数

N_{bkg}^{SR} : 信号区背景事例数, 由背景区拟合外推到信号区

$$\mathcal{B}_{D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau} = (5.34 \pm 0.16_{\text{stat}} \pm 0.10_{\text{syst}})\%$$

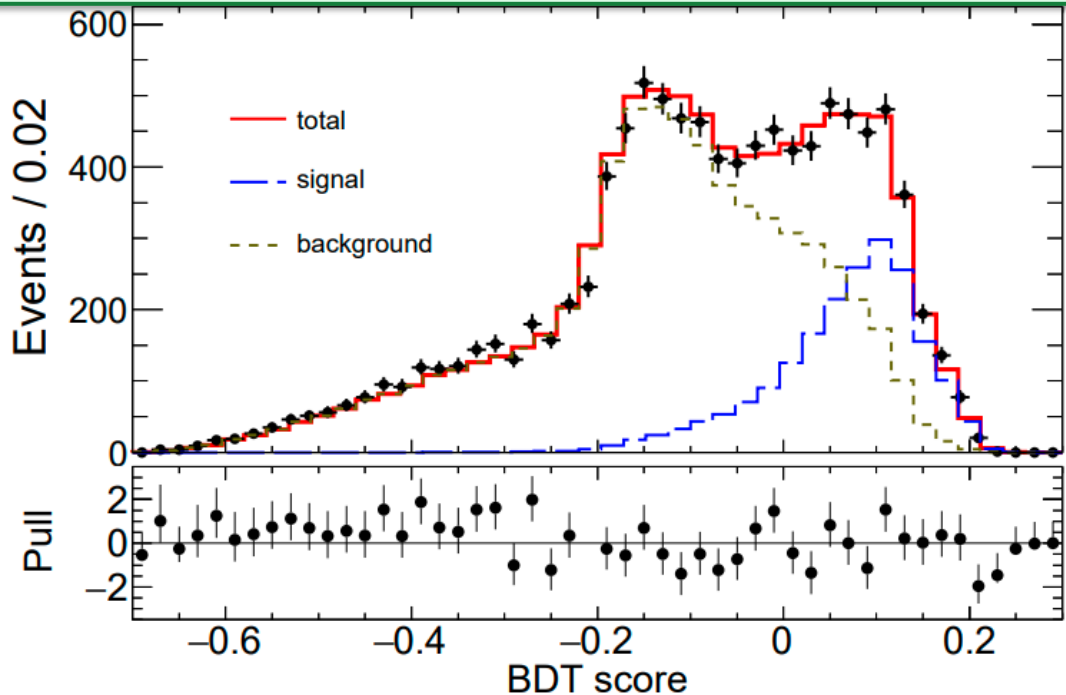
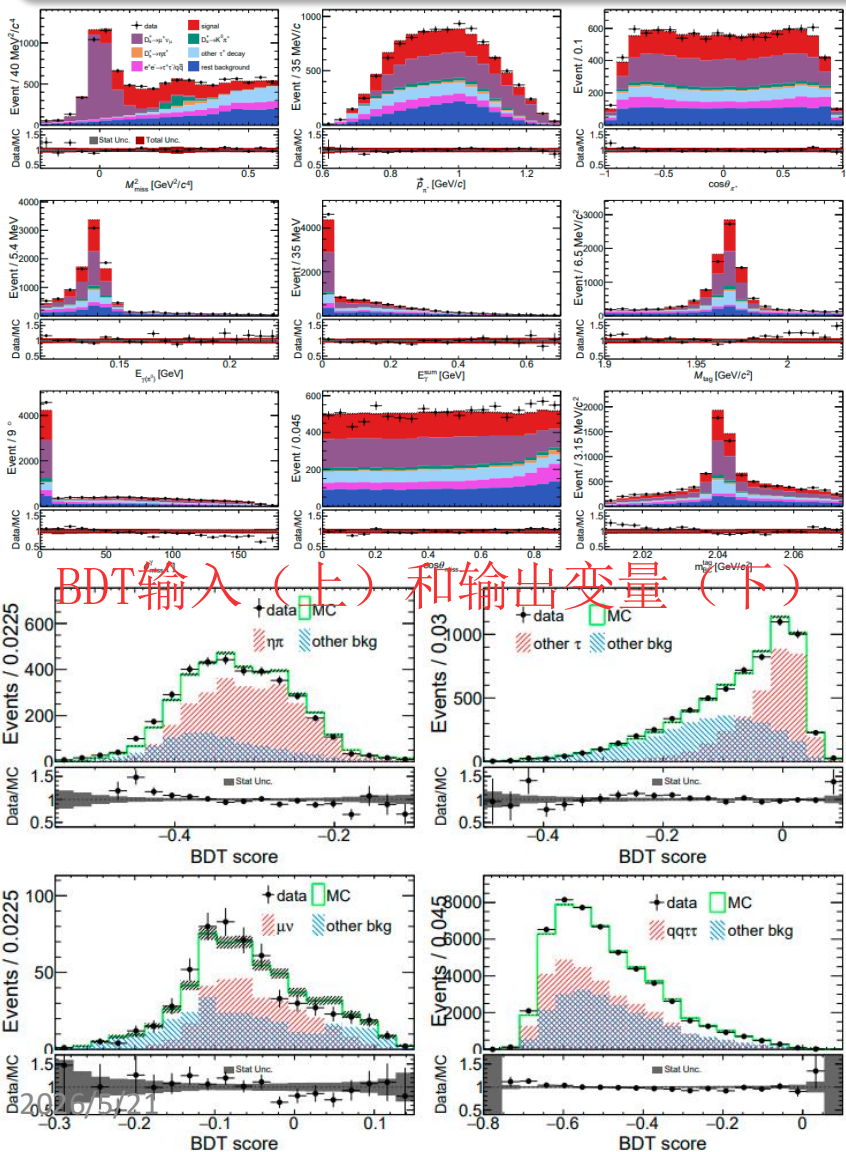
$$f_{D_s^+} |V_{cs}| = (246.2 \pm 3.7_{\text{stat}} \pm 2.5_{\text{syst}}) \text{ MeV}$$

$|V_{cs}|$ 精度: 1.9%

$$D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau, \quad \tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau \quad (2023)$$

数据: 7.33 fb⁻¹ @ 4.128 – 4.226 GeV

PRD 108, 092014(2023)



采用增强法分类的决策树集 (BDT) 更好区分信号和背景行为
拟合BDT分数得到信号产额: $N_{D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu} = 2371 \pm 74$

$$\mathcal{B} (\%)$$

$$5.41 \pm 0.17 \pm 0.13$$

$$f_{D_s^+} |V_{cs}| \text{ (MeV)}$$

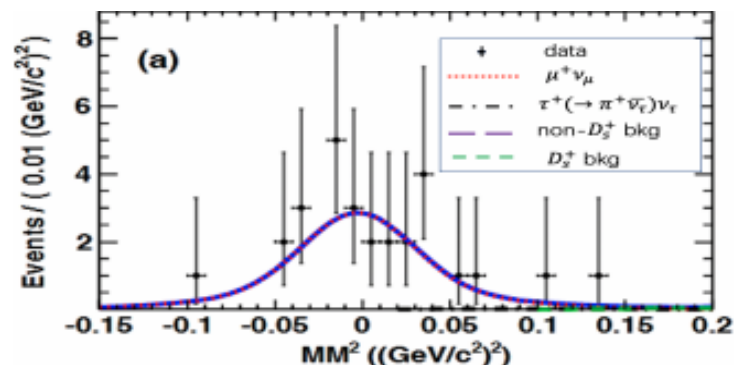
$$247.6 \pm 3.9 \pm 3.2 \pm 1.0$$

$|V_{cs}|$ 精度: $\sim 2.1\%$

$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$ (2016)

数据: 0.48 fb⁻¹ @ 4.009 GeV

PRD 94, 072004 (2016)

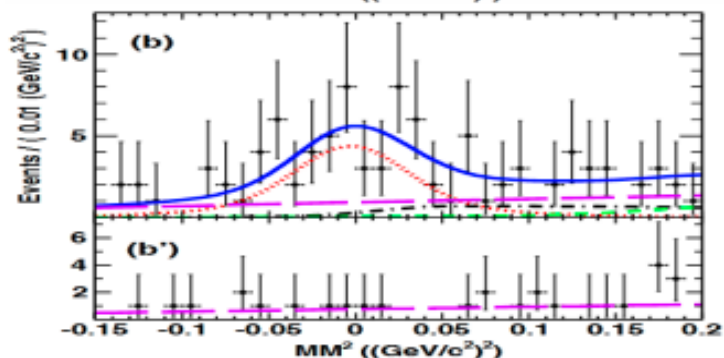


μ -like

衰变链: $e^+e^- \rightarrow D_s^+ D_s^- \rightarrow D_s^+ D_s^-$

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = (0.517 \pm 0.075 \pm 0.021)\%$$

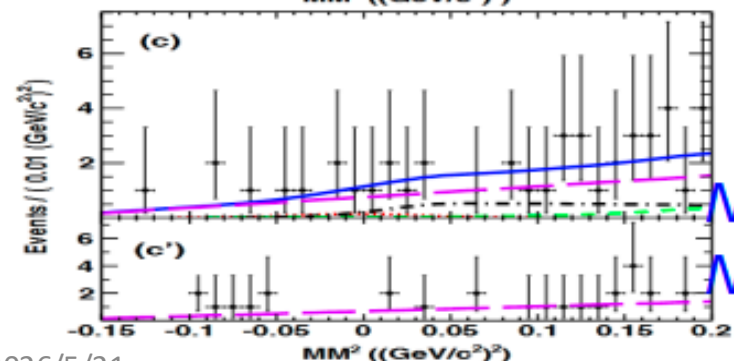
$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau) = (3.28 \pm 1.83 \pm 0.37)\%$$



non- μ , π -like

• BF ($\mu^+ \nu_\mu$) 精度: $\sim 15.1\%$

• BF ($\tau^+ \nu_\tau$) 精度: $\sim 56.9\%$



π -like

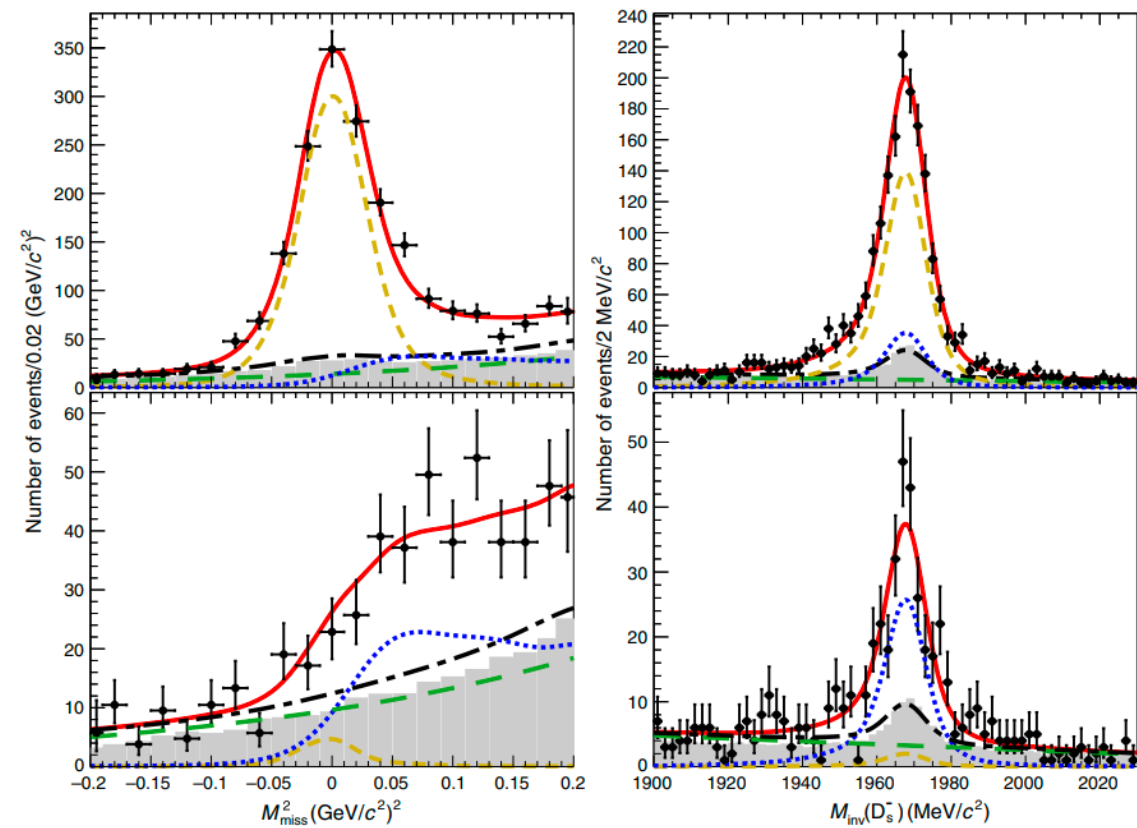
$$N(\mu^+ \nu_\mu) = 72.4 \pm 10.4$$

$$N(\tau^+ \nu_\tau) = 22.1 \pm 12.3$$

$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$ (2021)

数据: 6.32 fb⁻¹ @ 4.178 – 4.226 GeV PRD 104, 05209(2021)

信号侧拟合(@4.178 GeV):



$f_{D_s^+} = 249.8 \pm 3.0 \pm 3.7 \pm 1.0 \text{ MeV},$
 $249.7 \pm 6.0 \pm 4.1 \pm 1.0 \text{ MeV},$
 $249.9 \pm 2.4 \pm 3.4 \pm 1.0 \text{ MeV},$

$|V_{cs}| = 0.973 \pm 0.012 \pm 0.015 \pm 0.004,$
 $0.972 \pm 0.023 \pm 0.016 \pm 0.004,$
 $0.973 \pm 0.009 \pm 0.013 \pm 0.004,$

- μ -like (upper):
 $E_{\text{EMC}} \leq 300 \text{ MeV}$, mixture of $D_s^+ \rightarrow \tau^+(\rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau) \nu_\tau$ and $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
 - π -like (lower):
 $E_{\text{EMC}} > 300 \text{ MeV}$, dominated of $D_s^+ \rightarrow \tau^+(\rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau) \nu_\tau$
- 多能量点测量;
 - 改善 $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu$ 的 BF精度: $\sim 5.8\%$

$B(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = (0.535 \pm 0.013 \pm 0.016)\%$

$B(D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau) = (5.21 \pm 0.25 \pm 0.17)\%$

	$ V_{cs} $ 精度
$\mu^+ \nu_\mu$	$\sim 2.0 \%$
$\tau^+ \nu_\tau$	$\sim 2.9 \%$
SM约束	$\sim 1.7 \%$

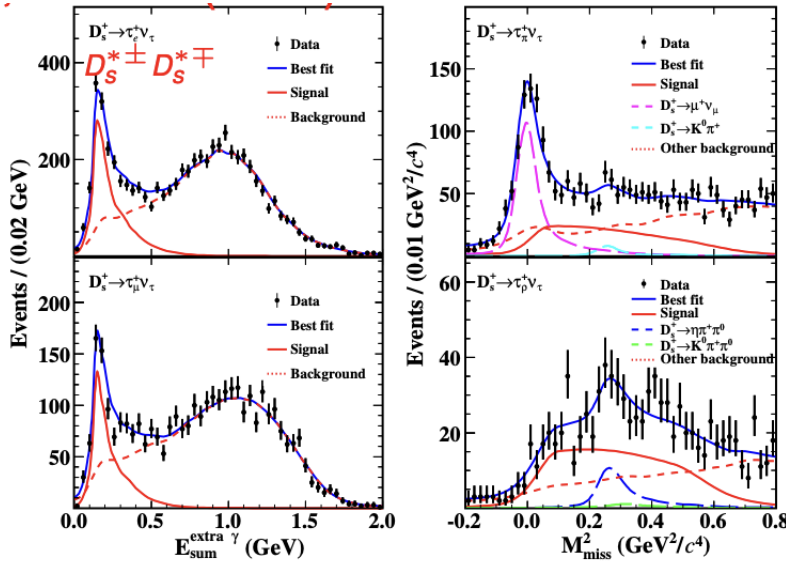
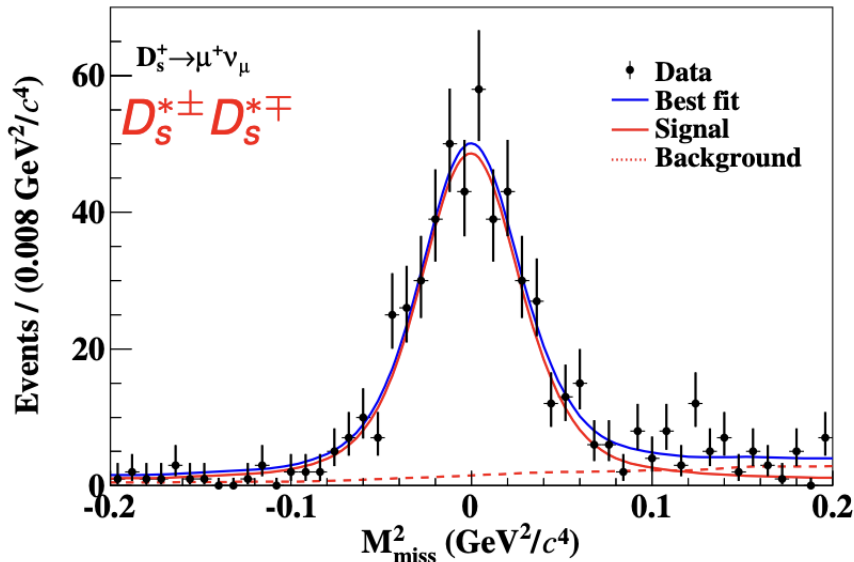
$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$ (2024)

数据: 10.64 fb⁻¹ @ 4.237 – 4.699 GeV

PRD 110, 052002 (2024)

新衰变链: $e^+e^- \rightarrow D_s^{*+}D_s^{*-}$, $D_s^* \rightarrow \gamma(\pi^0)D_s$

$N_{ST}: 124027 \pm 1121$

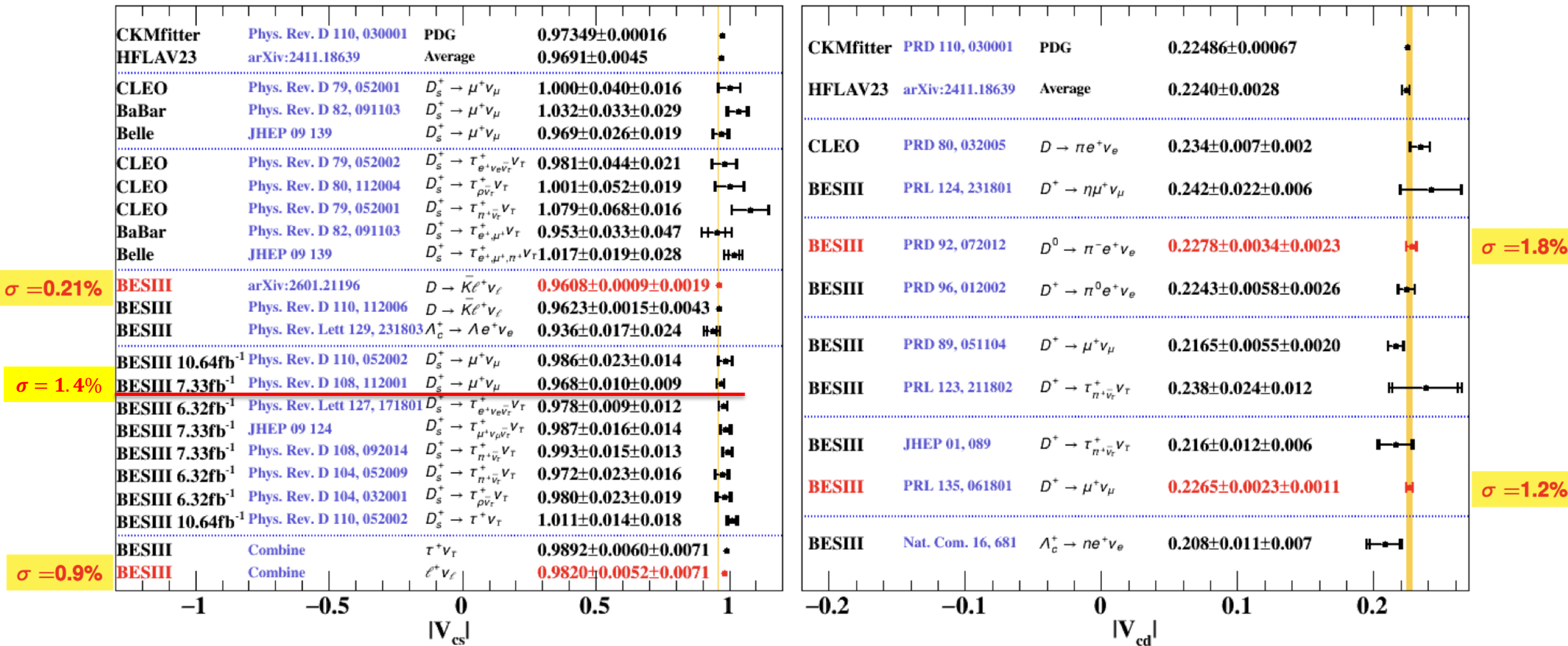


Reference	Data set fb ⁻¹	$\mathcal{B}(\%)$	$f_{D_s^+}$	$ V_{cs} $	Stat
			$D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$		
PRD 108, 112001(2023)	7.33 $D_s^\pm D_s^\mp$	$0.5294 \pm 0.0108 \pm 0.0085$	$248.4 \pm 2.5 \pm 2.2(\sigma = 1.4\%)$	$0.968 \pm 0.010 \pm 0.009(\sigma = 1.4\%)$	
PRD 110, 052002 (2024)	10.64 $D_s^{*\pm} D_s^\mp$	$0.547 \pm 0.026 \pm 0.016$	$246.5 \pm 5.9 \pm 3.6(\sigma = 2.8\%)$	$0.986 \pm 0.023 \pm 0.014(\sigma = 2.8\%)$	
			$D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$		
PRL 127, 171801 (2021)	6.32 $D_s^\pm D_s^\mp$	$5.27 \pm 0.10 \pm 0.12$	$251.1 \pm 2.4 \pm 3.0(\sigma = 1.5\%)$	$0.978 \pm 0.009 \pm 0.012(\sigma = 1.5\%)$	$\tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau$
PRD 104, 052009 (2021)	6.32 $D_s^\pm D_s^\mp$	$5.21 \pm 0.25 \pm 0.17$	$249.7 \pm 6.0 \pm 4.2(\sigma = 2.9\%)$	$0.972 \pm 0.023 \pm 0.016(\sigma = 2.9\%)$	$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau$
PRD 104, 032001 (2021)	6.32 $D_s^\pm D_s^\mp$	$5.29 \pm 0.25 \pm 0.20$	$251.6 \pm 5.9 \pm 4.9(\sigma = 3.0\%)$	$0.980 \pm 0.023 \pm 0.019(\sigma = 3.0\%)$	Simultaneous fit at various energy points
JHEP 09, 124 (2023)	7.33 $D_s^\pm D_s^\mp$	$5.37 \pm 0.17 \pm 0.15$	$253.4 \pm 4.0 \pm 3.7(\sigma = 2.2\%)$	$0.987 \pm 0.016 \pm 0.014(\sigma = 2.2\%)$	$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\nu}_\tau$
PRD 108, 092014 (2023)	7.33 $D_s^\pm D_s^\mp$	$5.44 \pm 0.17 \pm 0.13$	$255.0 \pm 4.0 \pm 3.4(\sigma = 2.1\%)$	$0.993 \pm 0.015 \pm 0.013(\sigma = 2.1\%)$	$\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau$
PRD 110, 052002 (2024)	10.64 $D_s^{*\pm} D_s^\mp$	$5.60 \pm 0.16 \pm 0.20$	$252.7 \pm 3.6 \pm 4.5(\sigma = 2.3\%)$	$1.011 \pm 0.014 \pm 0.018(\sigma = 2.3\%)$	$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau$ with BDT constrain the same BF $\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau, e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau, \pi^+ \bar{\nu}_\tau, \pi^+ \pi^0 \bar{\nu}_\tau$

BESIII D_S^+ 纯轻测量总结

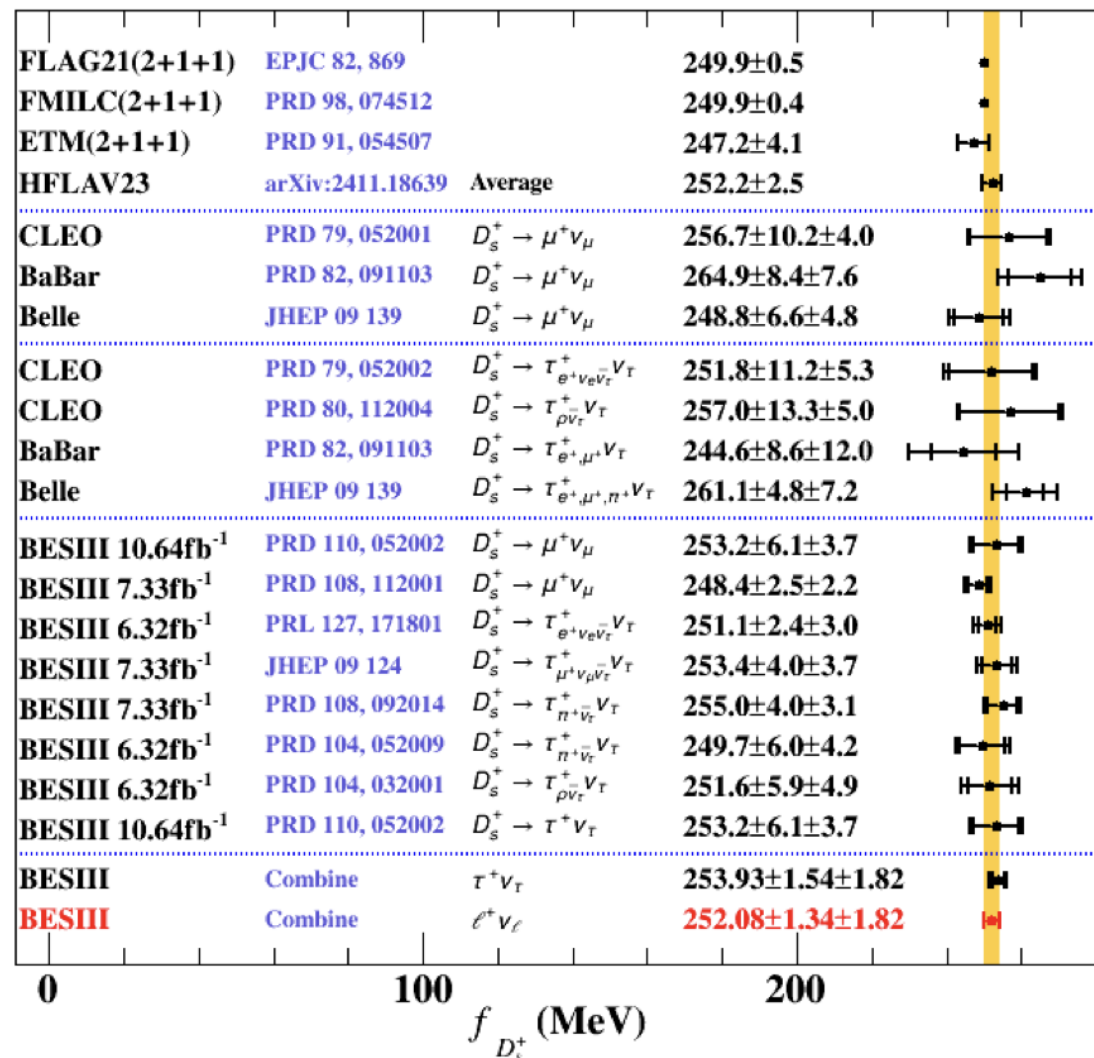
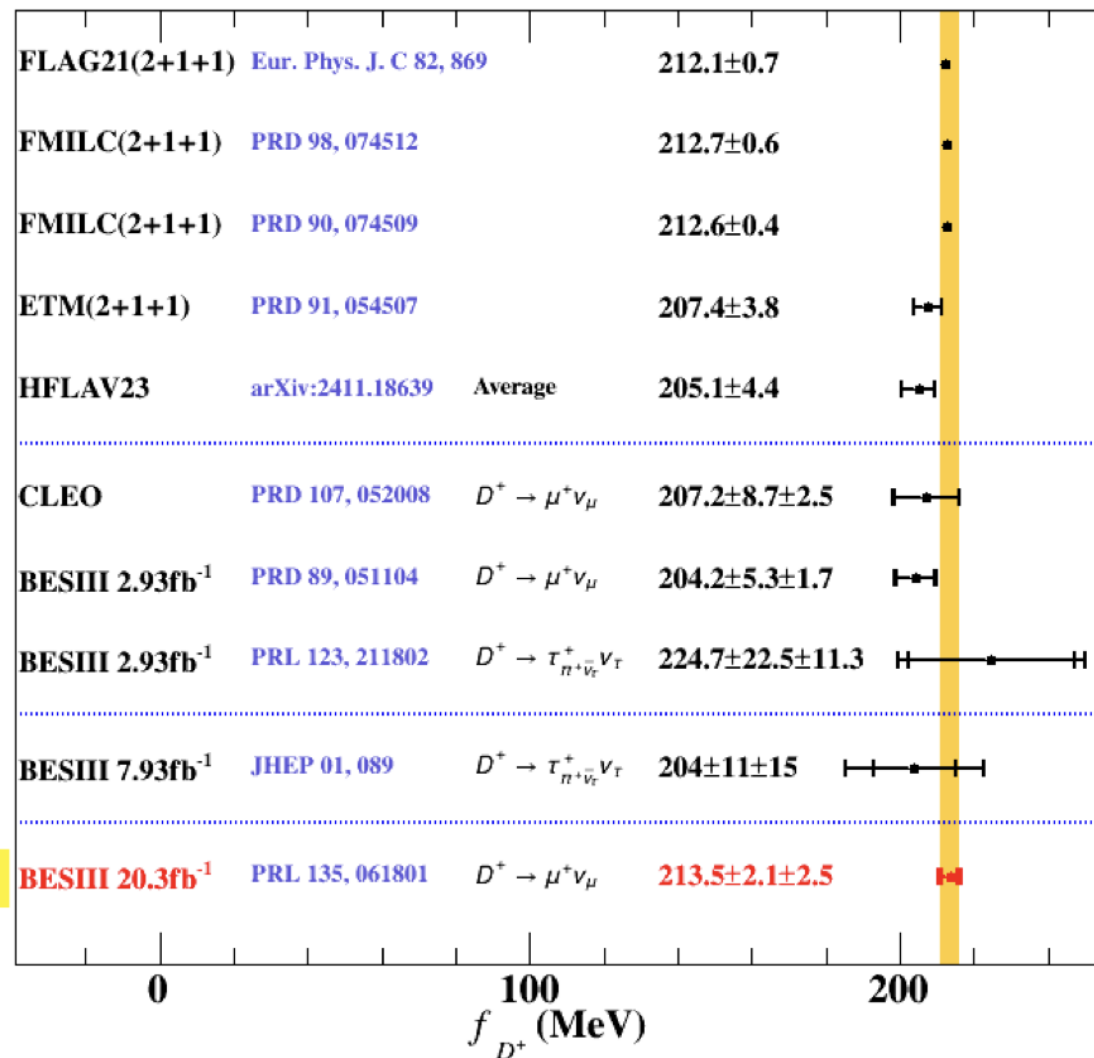
Reference	Process	Decay mode	$\mathcal{L}, \sqrt{s}$) GeV)	$ V_{cs} f_{D_S}$)MeV)	$ V_{cs} $	f_{D_S})MeV)	$\mathcal{B}$ (%)	$R^{\{\tau/\mu\}}$
$D_S^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$								
PRL122(2019)071802	$D_S^{*\pm} D_S^\mp$	$\mu^+ \nu_\mu$	3.19 fb ⁻¹ , 4.178	246.2±3.6±3.5	0.985 ±0.014±0.014	252.9±3.7±3.6	5.49±0.16±0.15	9.98 ±0.52
PRD104(2021)052009			6.32 fb ⁻¹ , 4.178–4.226	243.7±3.0±3.6±0.5	0.973±0.012±0.015±0.004	249.8±3.0±3.7±1.0	0.535±0.013±0.016	9.73±0.59±0.36
PRD108(2023)112001			7.33 fb ⁻¹ , 4.128–4.226	242.5±2.5±1.9±0.5	0.968 ±0.010±0.009	248.4±2.5±2.2	0.5294 ±0.0108 ±0.0085	10.05±0.35
PRD110(2024)052002	$D_S^{*+} D_S^{*-}$		10.64 fb ⁻¹ , 4.237–4.699	246.5±5.9 ±3.6 ±0.5	0.986 ±0.023 ±0.014	246.5±5.9±3.6	5.47 ±0.26±0.16	10.24±0.57
$D_S^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$								
PRD94(2016)072004	$D_S^+ D_S^-$	$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau$	0.482 fb ⁻¹ , 4.009	—	—	241.0±16.3±6.5	4.83±0.65±0.26	9.76
PRD104(2021)032001	$D_S^{*\pm} D_S^\mp$	$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\nu}_\tau$	6.32 fb ⁻¹ , 4.178–4.226	244.8 ± 5.8 ± 4.7	0.980±0.023±0.019	251.6±5.9±4.9	5.29±0.25±0.20	9.89±0.71
PRD104(2021)052009		$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau$	6.32 fb ⁻¹ , 4.178–4.226	243.0±5.8±4.0±1.0	0.972±0.023±0.016	249.7±6.0±4.2	5.21±0.25±0.17	9.73±0.59±0.36
PRL127(2021)171801		$\tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau$	6.32 fb ⁻¹ , 4.178–4.226	244.4±2.3±2.9	0.978±0.009±0.012	251.1±2.4±3.0	5.27±0.10±0.12	9.72±0.37
PRD108(2023)092014		$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau$	7.33 fb ⁻¹ , 4.128–4.226	248.3±3.9±1.0±1.0	0.993±0.015±0.012±0.004	255.0±4.0±3.2±1.0	5.44±0.17±0.13	—
JHEP09(2023)123		$\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau$	7.33 fb ⁻¹ , 4.128–4.226	246.7±3.9±3.6	0.987±0.016±0.014	253.4±4.0±3.7	5.37±0.17±0.15	9.89±0.50
PRD110(2024)052002	$D_S^{*+} D_S^{*-}$	All τ^+ modes	10.64 fb ⁻¹ , 4.237–4.699	252.7±3.6±4.5±0.6	1.011±0.014±0.018±0.003	259.6±3.7±4.6±0.6	5.60±0.16±0.20	10.24±0.57

$|V_{cd(s)}|$ 理论实验结果比较



■ Precisions of $|V_{cs}|$ and $|V_{cd}|$ from BESIII results: 0.21% and 1.2%

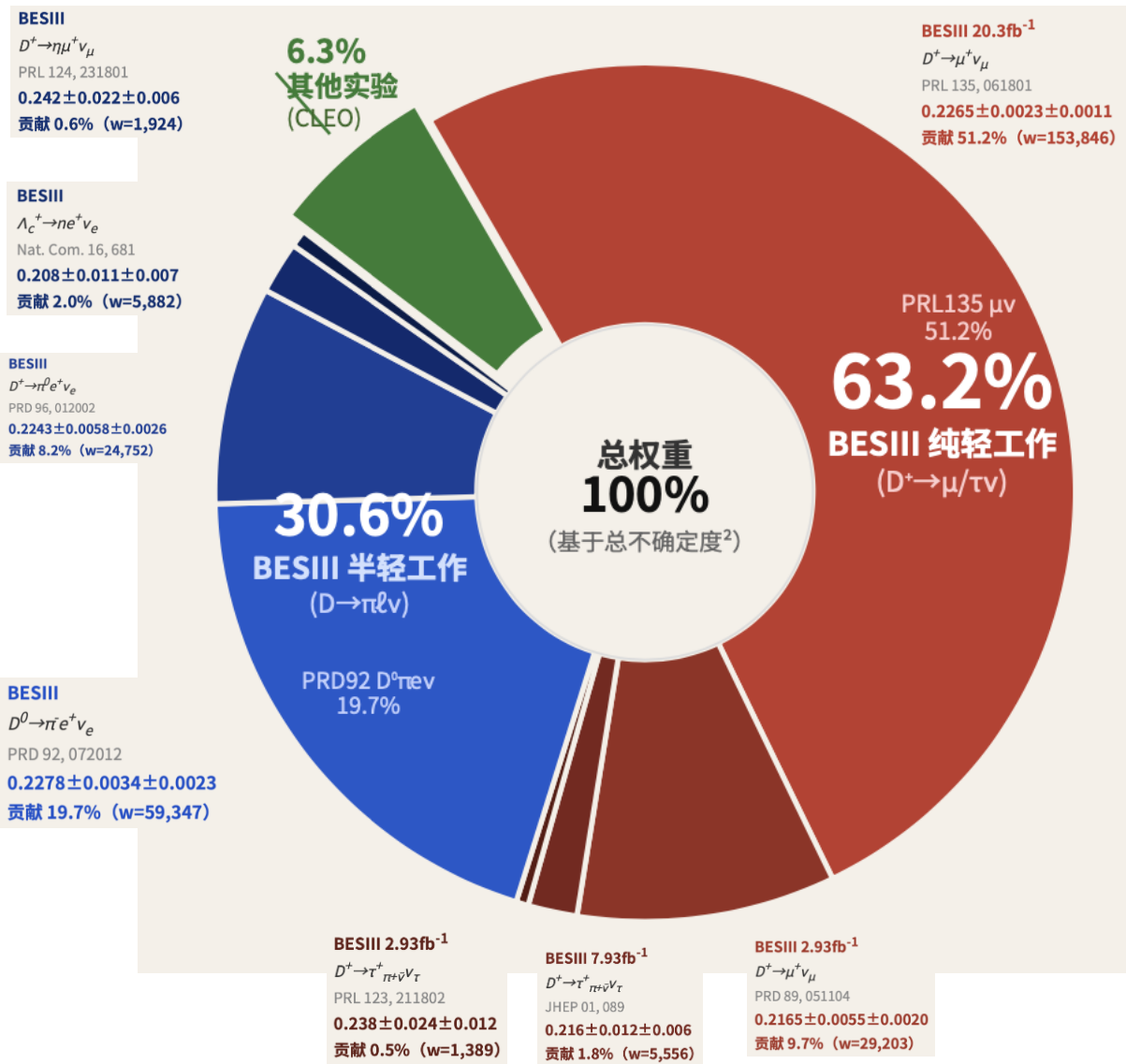
$f_{D(s)}^+$ 理论实验结果比较



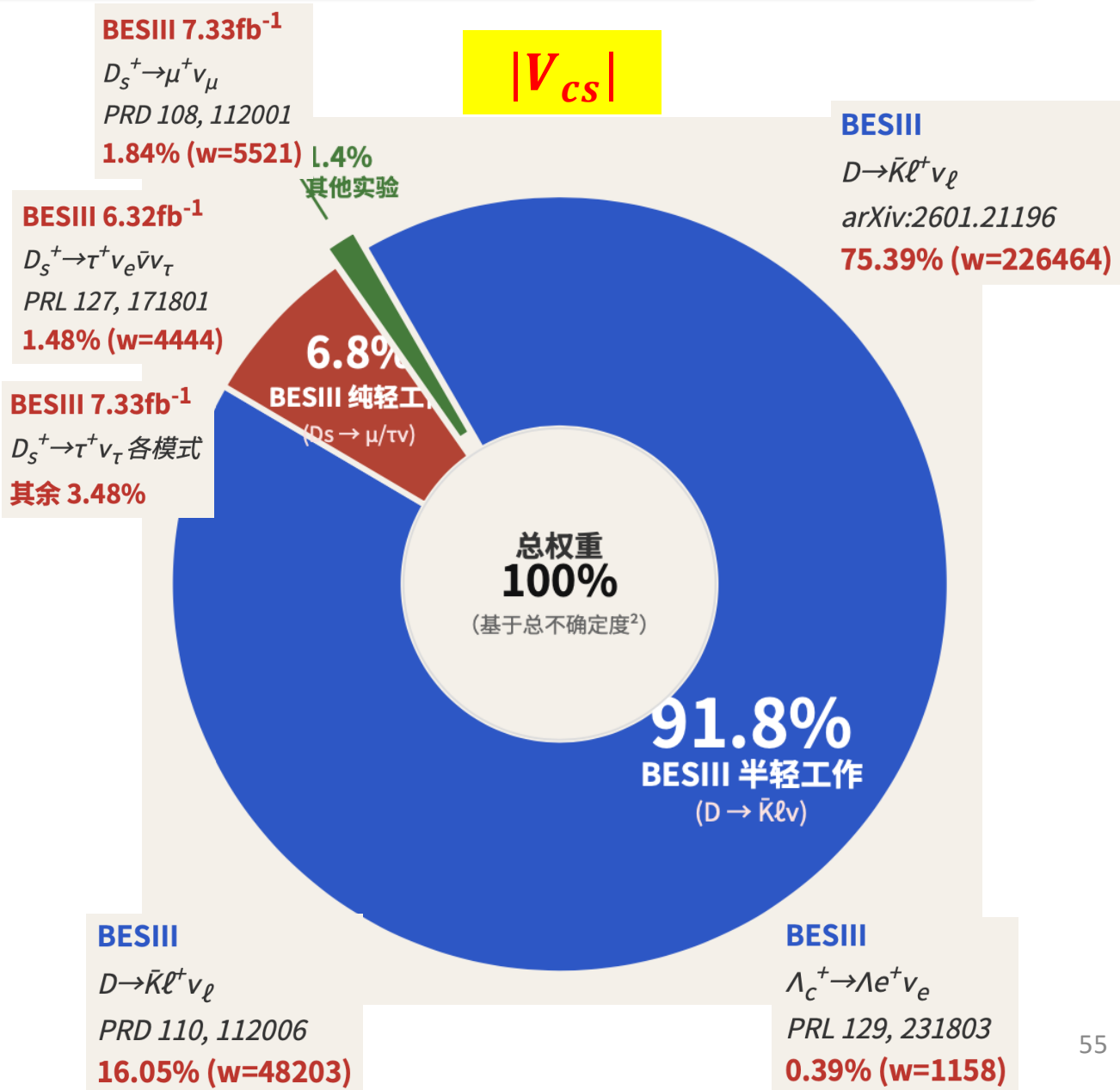
■ Precisions of measured f_{D^+} and $f_{D_s^+}$ from BESIII: 1.2%, 0.9%

BESIII结果对CKM矩阵元 $|V_{cs(d)}|$ 测量的贡献

$|V_{cd}|$

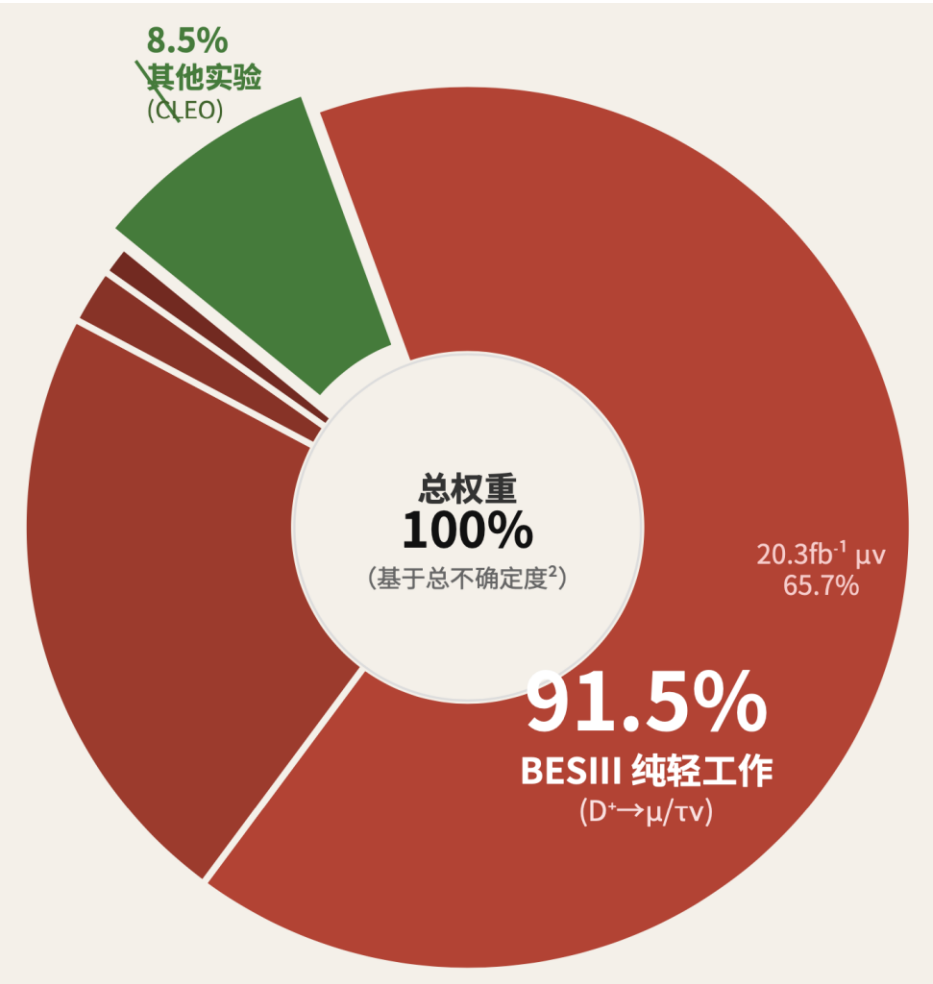


$|V_{cs}|$



BESIII结果对衰变常数 $f_{D(s)}$ 的贡献

f_D



其他实验

CLEO

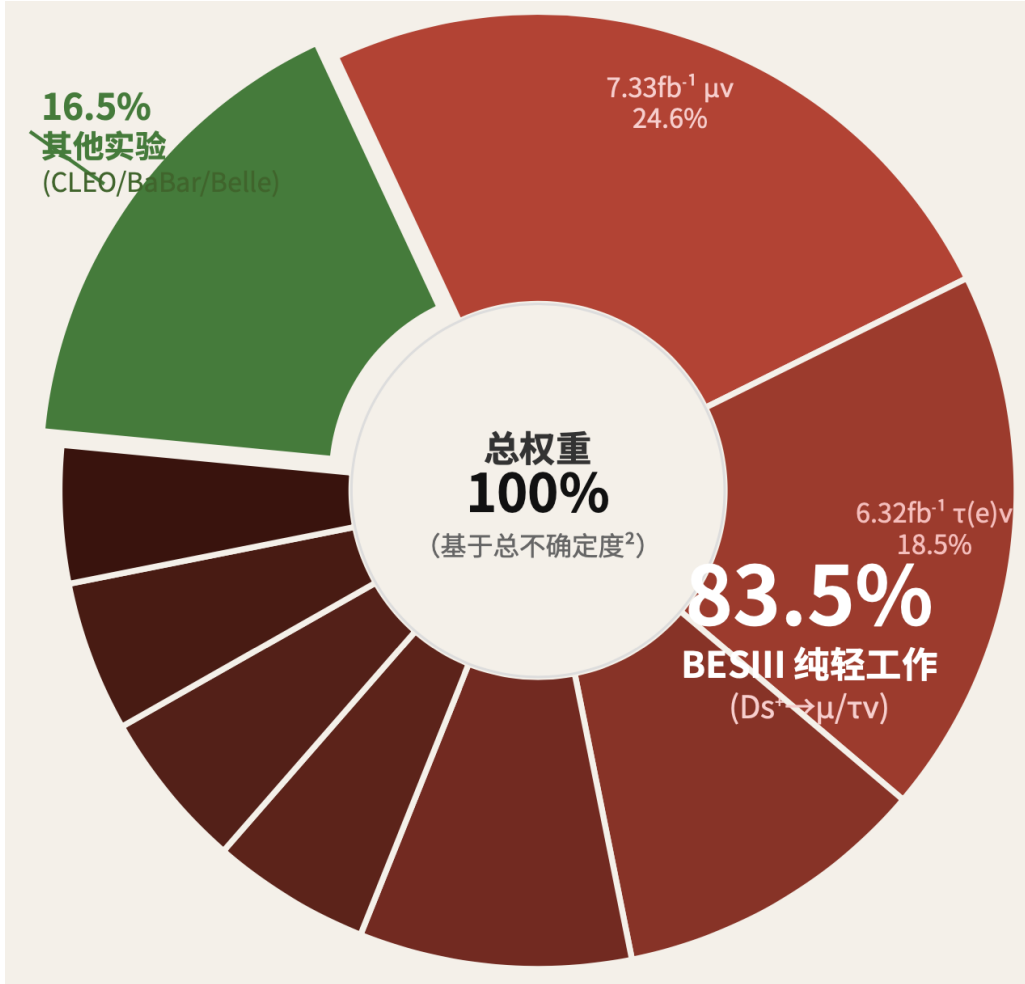
$D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

PRD 107, 052008

$207.2 \pm 8.7 \pm 2.5$ MeV

占比 8.5%

f_{D_s}



其他实验

CLEO

$D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, PRD 79, 052001

$256.7 \pm 10.2 \pm 4.0$ MeV 2.3%

BaBar

$D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, PRD 82, 091103

$264.9 \pm 8.4 \pm 7.6$ MeV 2.1%

Belle

$D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, JHEP 09 139

$248.8 \pm 6.6 \pm 4.8$ MeV 4.1%

CLEO

$D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$, PRD 79, 052002

$251.8 \pm 11.2 \pm 5.3$ MeV 1.8%

CLEO / BaBar / Belle

$D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ 其余模式

合计 6.2%

PART THREE

纯轻研究展望

纯轻测量有必要继续做吗？

① 幺正性精确检验

目前~1%，推进到~0.1%需精度提高~10倍 → 完全有可能

② 卡比博角异常问题

$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2$ 约2-3 σ 偏低; $|V_{cd}|$ 纯轻也偏低~2 σ → 什么原因？

③ LQCD精确检验

f_{D^+} , f_{D_s} 有望在5-10年达~0.1%精度 → 实验要跟上

④ 轻子普适性检验

$R^{\mu/\tau}$ 从~3%推进到~1% → 约束更多BSM模型

⑤ 新物理寻找

理论上非常简明 → 检验新粒子(H^+ , Leptoquark等)

非常有必要，越精确越好！

新技术？

① AI辅助的全Tag算法

Belle II 已经有了FEI算法包，BESIII也可以有。

② AI辅助的本底压低

AI 在事例分类方面的应用已有很多，亦可用于纯轻分析，尤其是 τ 道。

③ AI辅助的系统误差分析

AI辅助的MC修正，可望有效降低系统误差。

新实验?

① STCF (1 ab^{-1} at 3.773/4.009 GeV)

$V_{cs}(d)$ 从1%提高到~0.1%; $f_{D_{(s)}^+}$ 从1%提高到~0.1%; $R_D^{\tau/\mu}$ 从8%提高到~0.4%; $R_D^{\tau/\mu}$ 从3%提高到~0.4%。

② Belle II (50 ab^{-1} at $\Upsilon(nS)$)

$R_D^{\tau/\mu}$ 从8%提高到~0.4%; $R_D^{\tau/\mu}$ 从3%提高到~0.4%。

③ LHCb

Run1数据的半轻相对测量, 对 V_{cs}/V_{cd} 的测量精度可达0.2% (prospect); 纯轻测量值得期待。

谢谢大家

Thank You

味物理讲座·第110期
2026·05·21