



**Создание системы контроля и изучение характеристик  
мюонных счетчиков установки CDF II для проверки  
Стандартной Модели.**

**АЛЕКСАНДР СИМОНЕНКО**

(по материалам кандидатской диссертации)

# СОДЕРЖАНИЕ

- Коллайдер Тэватрон и детектор CDF
- Система контроля счетчиков мюонной системы
- Исследование старения счетчиков (1999-2009 гг.)
- Измерение заряда ТОП-Кварка
- Выводы



# Введение

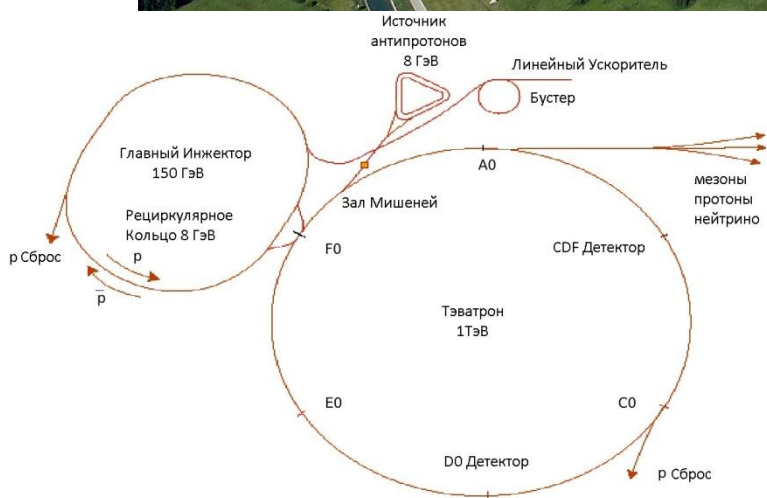
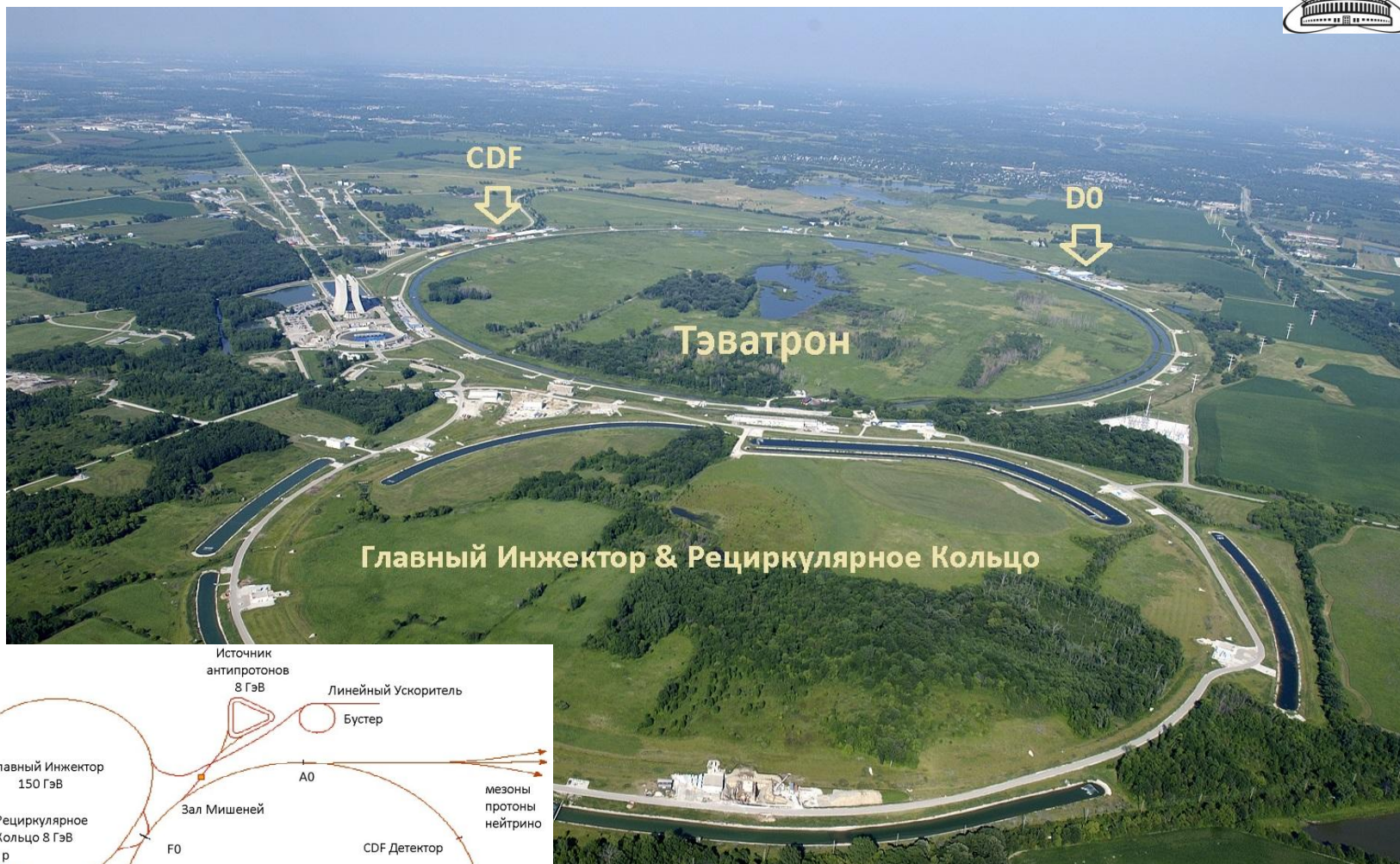
3

- ❑ Экспериментальная проверка Стандартной Модели и явлений за ее пределами является одной из важных задач физики элементарных частиц. Этим занимаются все коллайдерные эксперименты, в частности эксперимент CDF на Тэватроне.
- ❑ Экспериментальная установка CDF («**C**ollider **D**etector experiment at **F**ermilab») расположенная на кольце Тэватрона, представляет собой классический пример коллайдерного универсального детектора, состоящего из трековой части, калориметрии и мюонной системы.
- ❑ Важная роль отводится мюонной системе – исследование процессов с мюонами в конечном состоянии + подавление космического фона.



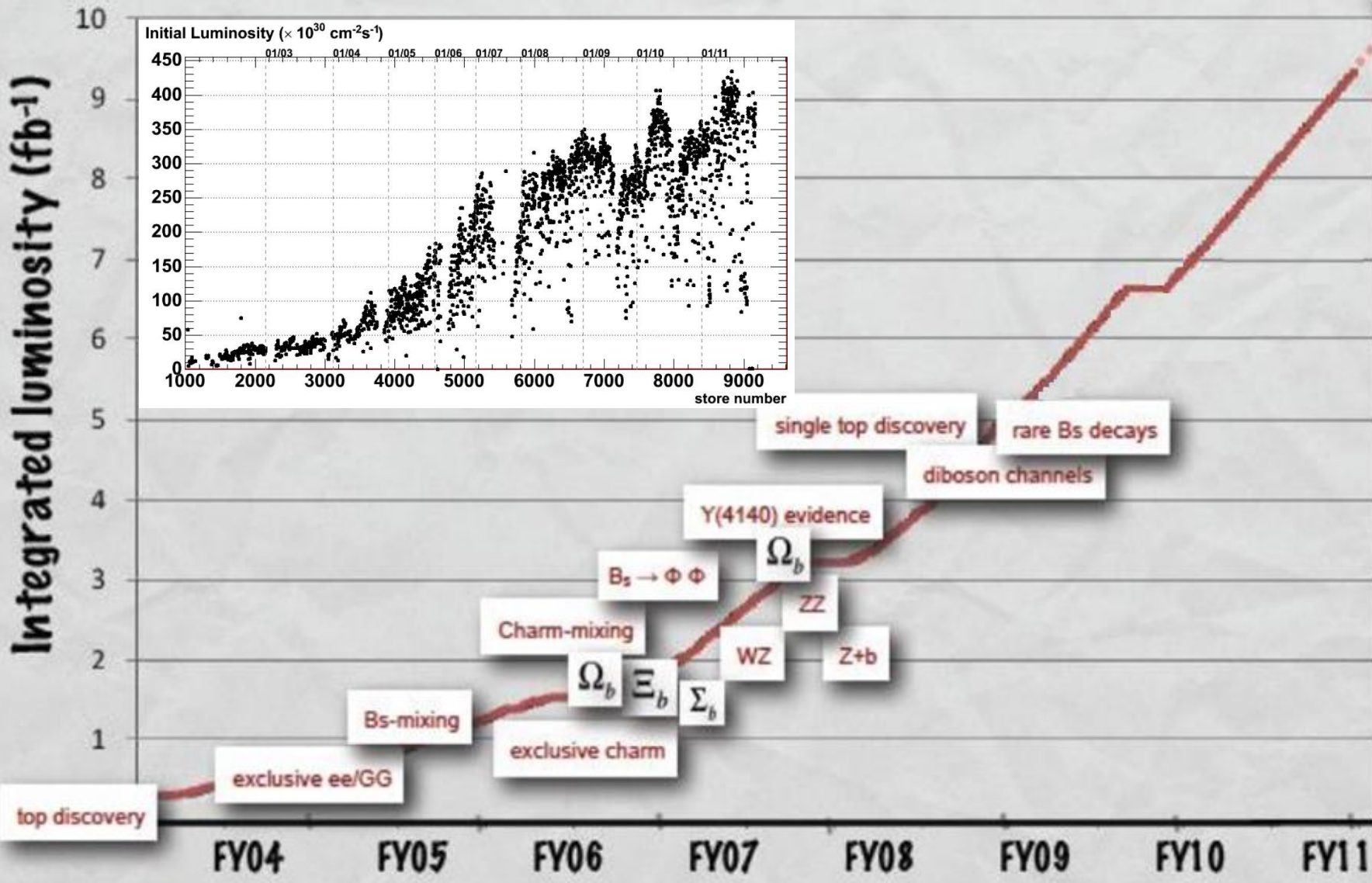
# ТЭВАТРОН и эксперимент CDF



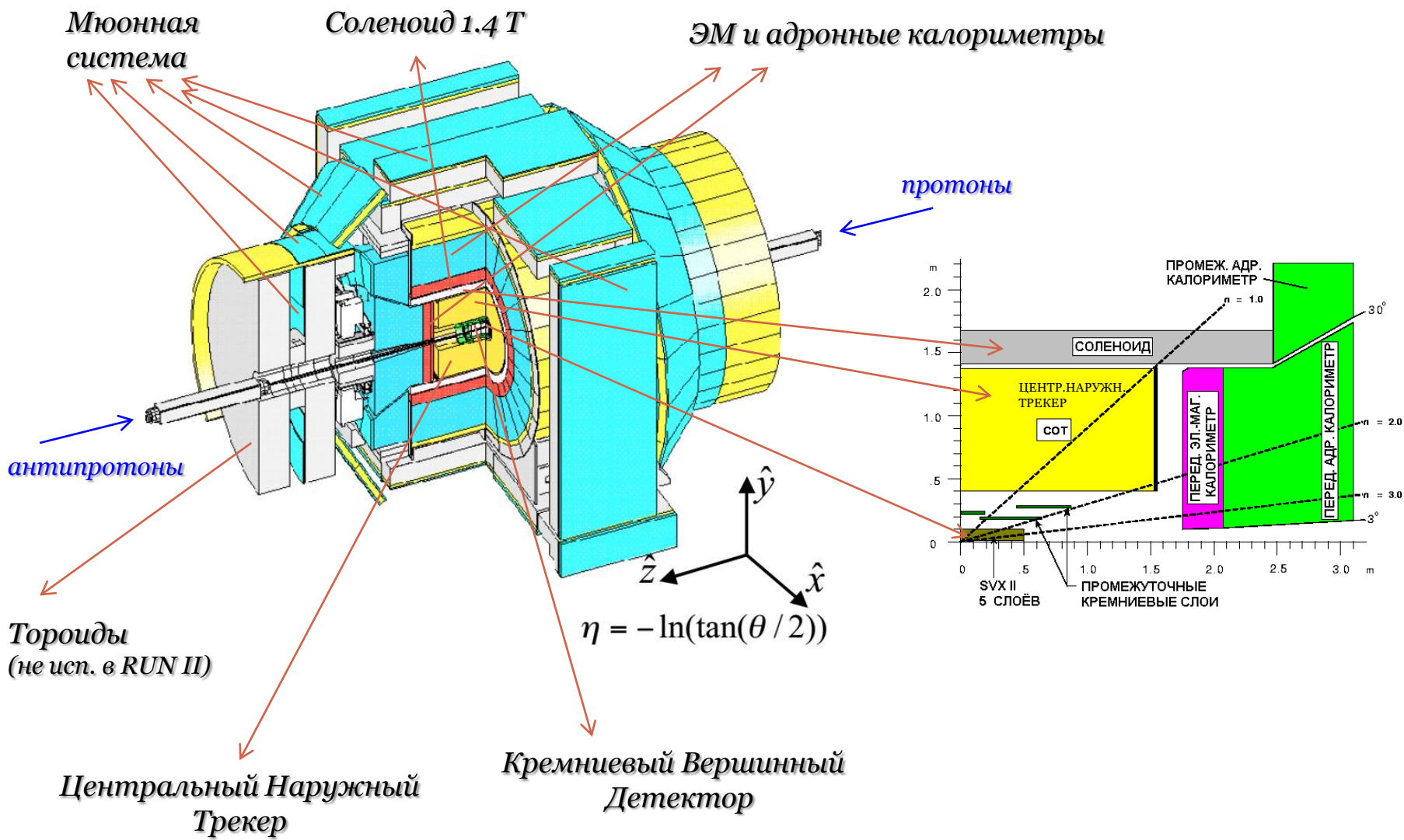


Параметр	Значение для периода RUN II
Кол-во сгустков (bunches)	36
Общая длительность сгустков [нс]	396
Длина сгустка [м]	0.38
Кол-во протонов/сгусток ( $N_p$ )	$2.7 \times 10^{11}$
Кол-во антипротонов/сгусток ( $N_{\bar{p}}$ )	$7 \times 10^{10}$
Типичная мгновенная светимость [ $см^{-2}сек^{-1}$ ]	$2 \times 10^{32}$

# ФИЗИКА ТЭВАТРОНА



# Детектор CDF II



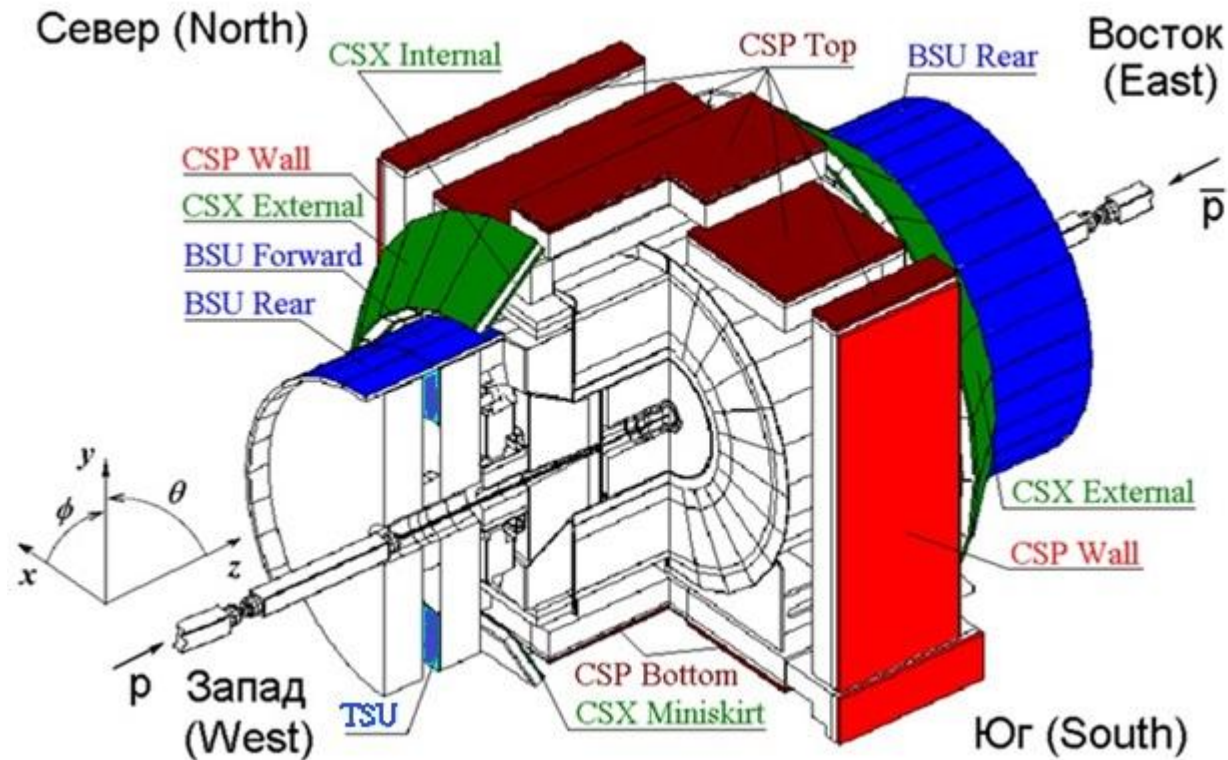


8

# Система контроля счетчиков мюонной системы



# ПОДСИСТЕМЫ МЮОННЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ

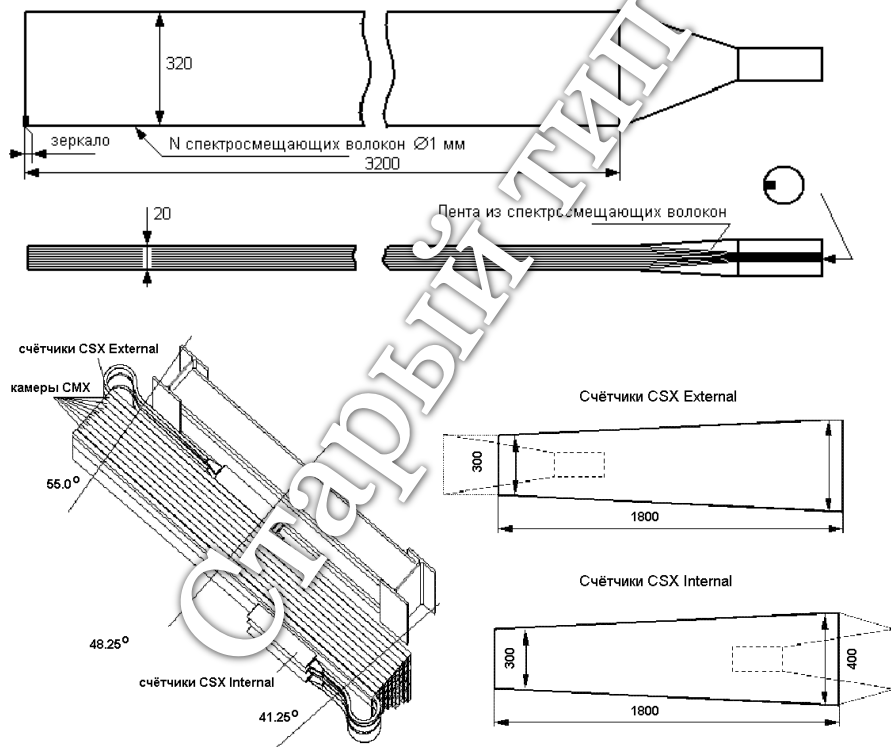


**CSP (CentralScintillatoruPgrate)**  
**CSX (CentralScintillationeXtension)**  
**BSU (BarrelScintillatorUpgrade)**  
**TSU (ToroidScintillatorUpgrade)**

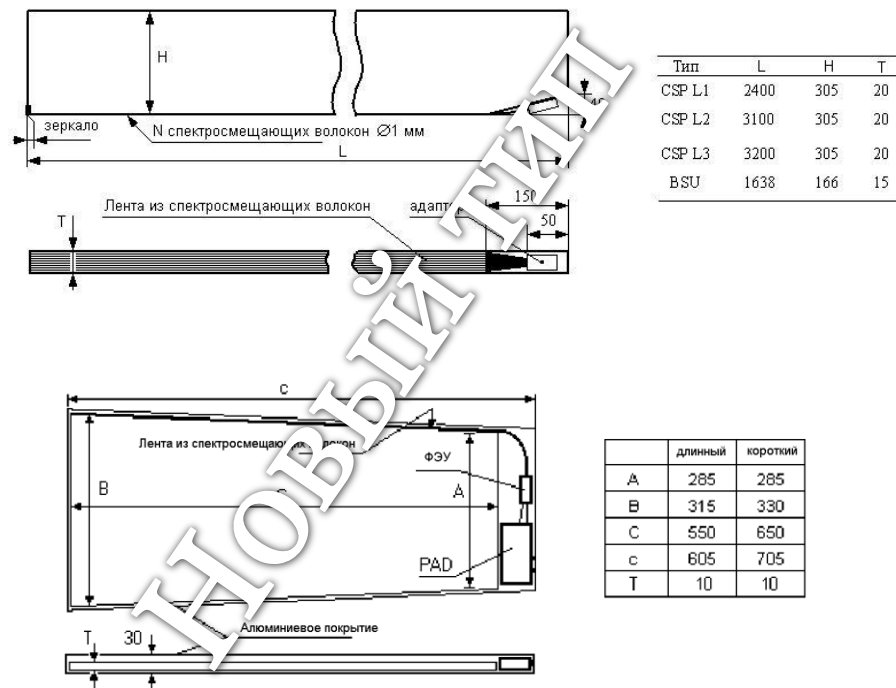
Центральная мюонная система	$0 <  \eta  < 0.6$
Расширение центр. мюон. системы	$0.6 <  \eta  < 1$
Передняя мюонная система	$1.0 <  \eta  < 1.5$

# ТИПЫ МЮОННЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ

## CSW, CSX



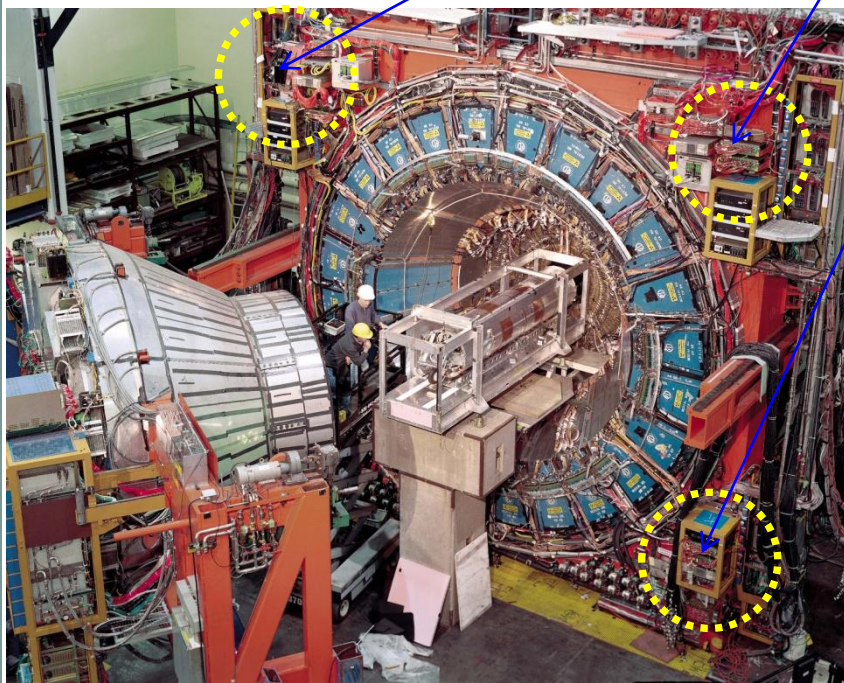
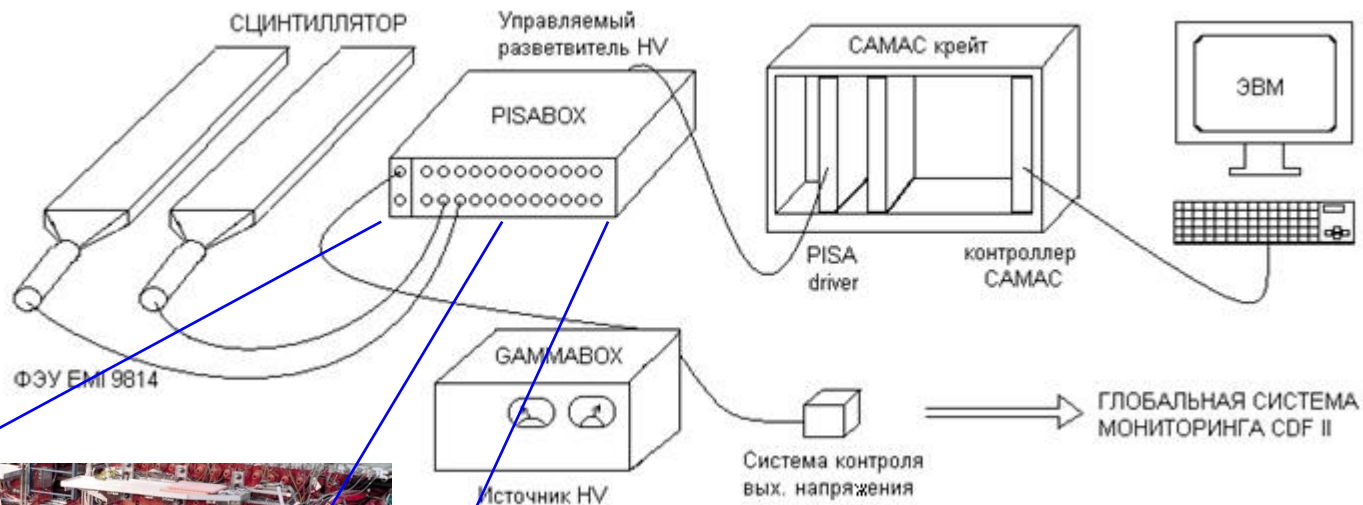
## CSP, BSU, TSU



# Компоновка элементов системы контроля счетчиков старого типа

GammaBox -> 3000 В, 75 мА

PisaBox имеет 40 каналов  
и 400 В диапазон регулировки



Тип счетчиков	Кол-во	КОЛ-ВО PISABOX
CSP Wall (CSW)	132	4
CSX Internal/External	271	8
CSX MSK	94	4

# Программное обеспечение системы контроля счетчиков старого типа

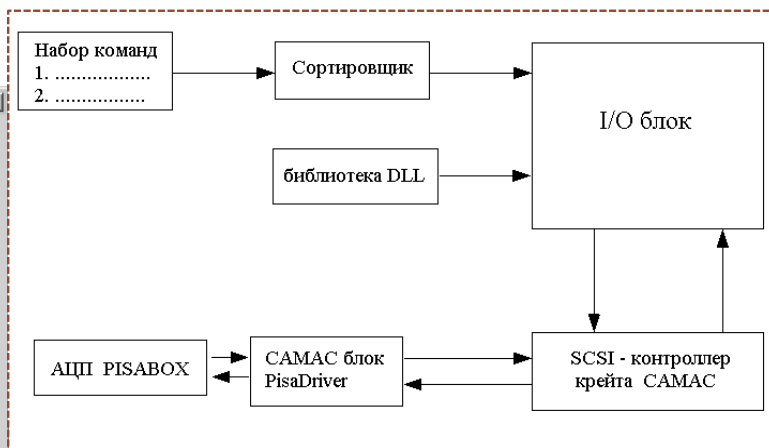
## Интерфейс программы управления разветвителями PisaBox

The screenshot shows the PisaMon software interface. At the top, it displays 'Pisa Mon, Version 1.0 (August 2009)'. The main window is divided into several sections:

- Navigation:** Buttons for North-West, North-East, South-West, and South-East, each with sub-buttons for CSX I Pbox, CSX X Pbox, CSW Pbox, and MSK Pbox.
- Parameters:** Pisa Box# 5, CAMAC slot# 8, Factor 1.72.
- Table:** A large table with columns for #, Volt, update, #, Volt, update. It lists 39 channels with their respective voltages and update status.
- Channel Status Window:** A pop-up window titled 'Pisa Box channel status' showing details for channel 9:
 

PisaBox:	9
PisaBox Channel:	7
PisaBox Units:	3642
HV (V):	2081
Side:	South-West
Counter:	CSW
Counter ID:	7
TDC Number:	6
TDC Channel:	72
Signal Cable:	112399
- Buttons:** Help, Quit, End, and OK.

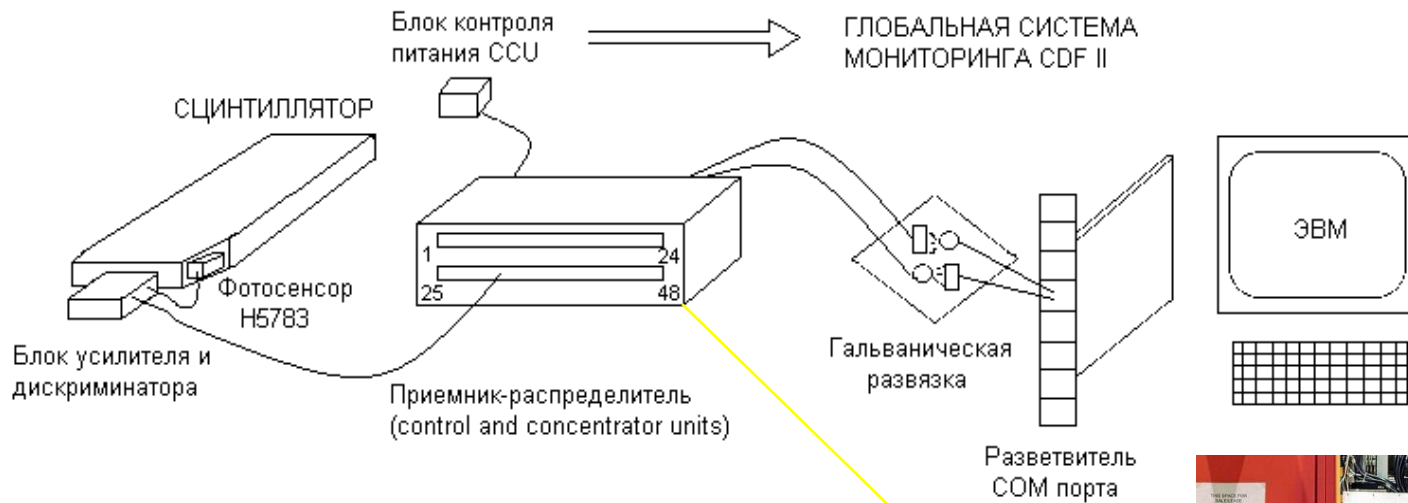
## Блок-схема кода программы



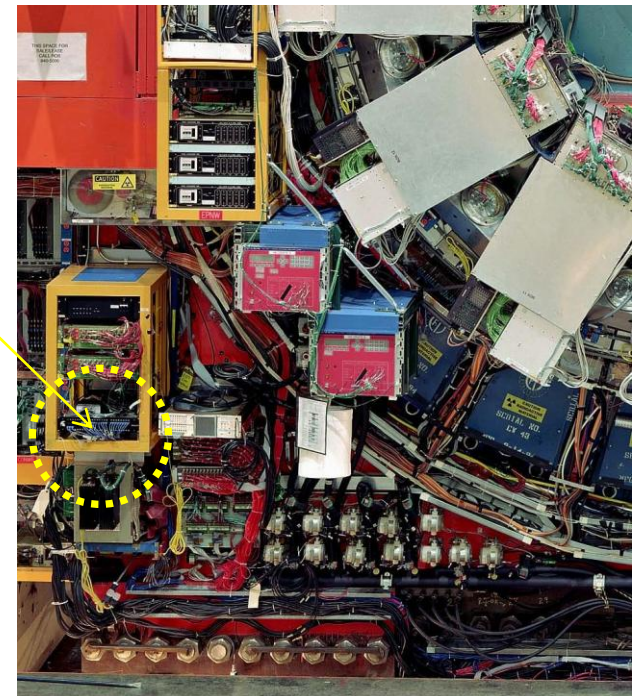
### Программа позволяет:

- ✓ считывать значение высокого напряжения на ФЭУ
- ✓ изменять напряжение на ФЭУ
- ✓ получать доп. информацию о каждом счетчике старого типа

# Компоновка элементов системы контроля счетчиков нового типа



Тип счетчиков	Кол-во	Кол-во ССУ
CSP	142	
BSU	415	20
TSU	144	

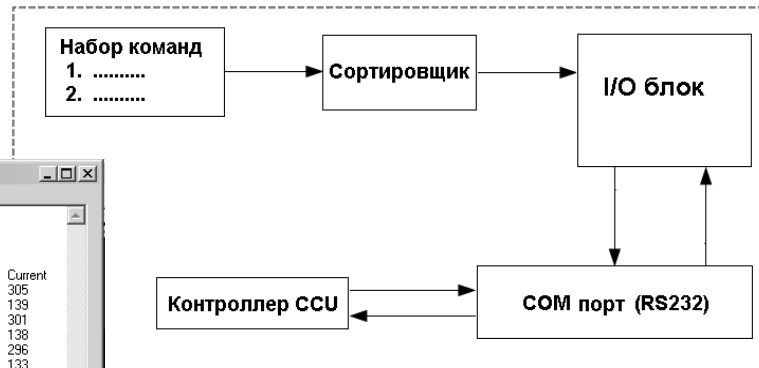


# Программное обеспечение системы контроля счетчиков нового типа

## Интерфейс программы управления блоками ССУ

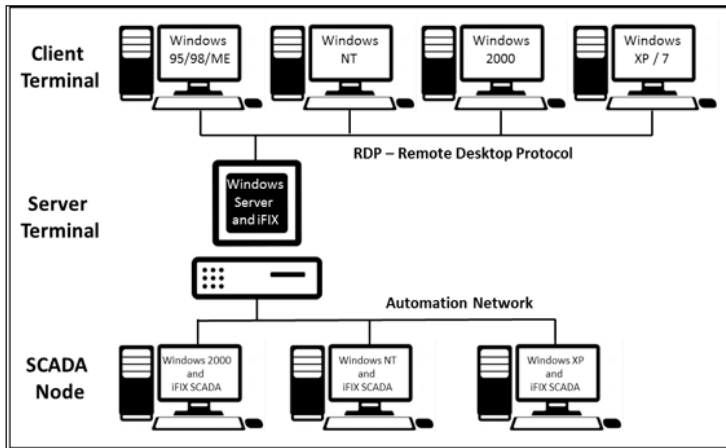
CCU	PAD	Status	Watch	HV_Val	TH_Val	Updates	Current
07	1	1	1	770	3.0	1	305
07	2	0	1	0	3.0	1	139
07	3	1	1	790	3.0	1	301
07	4	0	1	0	3.0	1	138
07	5	1	1	750	3.0	1	296
07	6	0	1	0	3.0	1	133
07	7	1	1	850	3.0	1	300
07	8	0	1	0	3.0	1	132
07	9	1	1	770	3.0	1	294
07	10	0	1	0	3.0	1	128
07	11	1	1	800	3.0	1	324
07	12	0	1	0	3.0	1	128
07	13	1	1	730	3.0	1	291
07	14	0	1	0	3.0	1	124
07	15	1	1	850	3.0	1	282
07	16	0	1	0	3.0	1	123
07	17	1	1	820	3.0	1	373
07	18	0	1	0	3.0	1	150
07	19	1	1	850	3.0	1	337
07	20	0	1	0	3.0	1	151
07	21	1	1	750	3.0	1	313
07	22	0	1	0	3.0	1	144
07	23	1	1	790	3.0	1	312
07	24	0	1	0	3.0	1	143
07	25	1	1	845	3.0	1	350
07	26	1	1	825	3.0	1	318
07	27	1	1	825	3.0	1	315
07	28	1	1	800	3.0	1	327
07	29	1	1	850	3.0	1	317
07	30	1	1	845	3.0	1	312
07	31	1	1	825	3.0	1	319
07	32	1	1	800	3.0	1	317
07	33	1	1	850	3.0	1	306
07	34	1	1	750	3.0	1	309
07	35	1	1	800	3.0	1	302
07	36	1	1	800	3.0	1	302
07	37	1	1	900	3.0	1	307
07	38	1	1	825	3.0	1	322
07	39	1	1	825	3.0	1	290
07	40	1	1	900	3.0	1	297
07	41	1	1	775	3.0	1	338
07	42	1	1	850	3.0	1	338
07	43	1	1	800	3.0	1	344
07	44	1	1	900	3.0	1	335
07	45	1	1	799	3.0	1	332
07	46	1	1	799	3.0	1	333
07	47	1	1	825	3.0	1	335
07	48	1	1	799	3.0	1	339

## Блок-схема кода программы



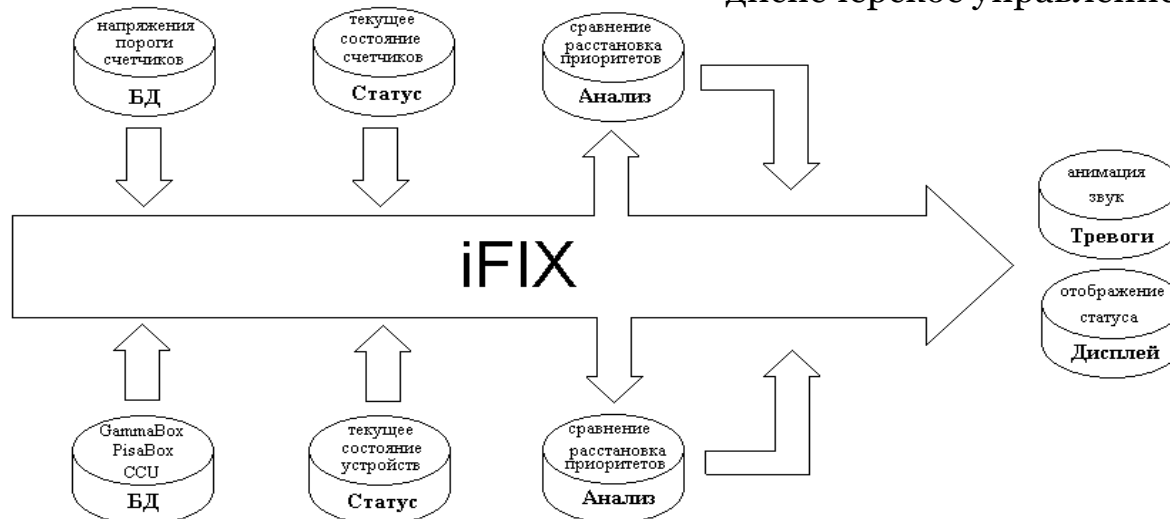
- Программа позволяет:**
- ✓ считывать значение высокого напряжения на ФЭУ
  - ✓ считывать порог дискриминации вых. сигнала
  - ✓ изменять напряжение на ФЭУ
  - ✓ изменять порог
  - ✓ перегружать контроллер ССУ
  - ✓ быстрая настройка блока ССУ при замене
  - ✓ наличие командной строки для специализированных функций

# Интеграция системы контроля мюонных счетчиков в Глобальную Систему Мониторинга CDF II



## SCADA система iFIX

(аббр. англ. Supervisory Control and Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных)









# Результаты:

18

- ❑ Создано программное обеспечение для системы контроля параметрами всей совокупности сцинтилляционных счетчиков мюонной системы. Программы дифференцированы в зависимости от типа используемых счетчиков. Данная совокупность программ позволяет считывать и менять значения напряжений питания ФЭУ и величину порога дискриминации фоновых сигналов.
- ❑ Созданы программы, написанные в среде iFIX 5.0 для интеграции системы контроля мюонными счетчиками в глобальную среду мониторинга установки CDF II. В результате был реализован непрерывный оперативный контроль за мюонной системой CDF II.
- ❑ В систему управления внедрены новые аппаратные возможности: перезагрузка чип-контроллеров блоков CCU (т.н. «soft reset») и дистанционное обесточивание счетчиков BSU и TSU через отключение соответствующих блоков CCU (т.н. «hard reset»). Они позволили сократить на 2 порядка время восстановления работы блоков управляющих напряжением на мюонных счетчиках в случае сбоев.
- ❑ Создана процедура проверки коммуникативной связи между главным и мюонным серверами в рамках Глобальной Системы Контроля (т.н. «heart beat»). Данная процедура позволяет своевременно разделить поступающие с установки CDF данные на «достоверные» (до потери коммуникативной связи) и «требующие внимания» ввиду отсутствия контроля параметров мюонной системы на тот момент времени.
- ❑ Внедрена система «Voltman» для контроля выходных напряжений высоковольтных источников питания для счетчиков старого типа и низковольтных напряжений питания блоков CCU обслуживающих счетчики нового типа. Является источником быстрых сигналов в системе триггерных запретов. Позволяет получать практически мгновенные уведомления о случившихся сбоях в системе питания мюонных счетчиков.



# Исследование старения мюонных счетчиков

# Введение:

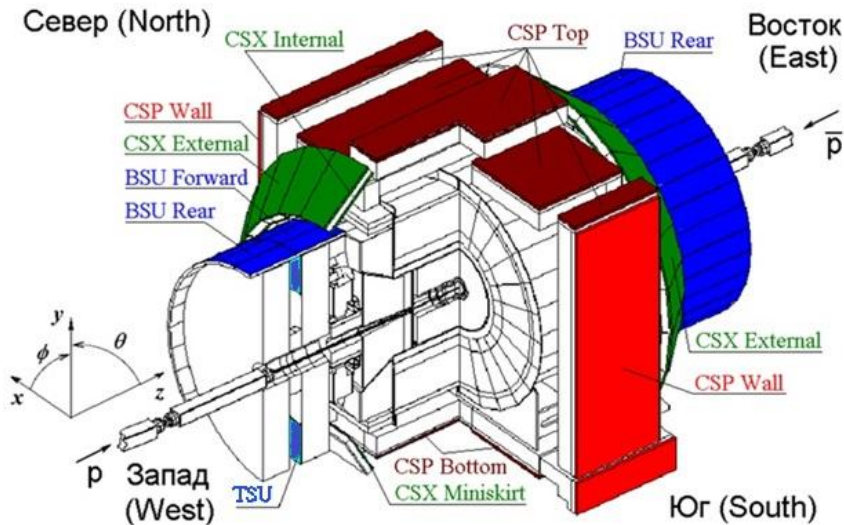
20

- ❑ Мюонный триггер необходим для большинства физических задач на Теватроне, будь то изучение тяжелых кварков, поиск экзотических частиц, изучение электро-слабой теории и прочее.
- ❑ С учетом важности мюонного триггера в физической программе установки CDF, было проведено исследование старения сцинтилляционных счетчиков. Данное исследование имеет важное значение для создания долгосрочного прогноза их эффективной работы.

Общее время наблюдения – до 10 лет.



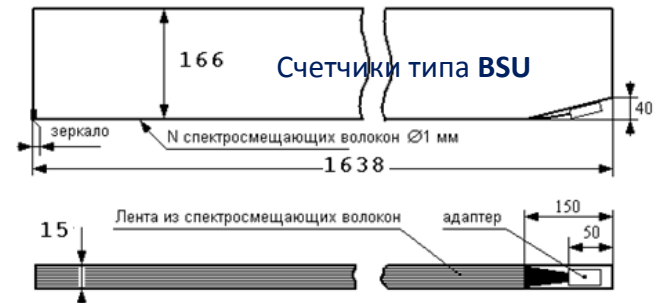
# Состав выборки мюонных счетчиков для тестирования



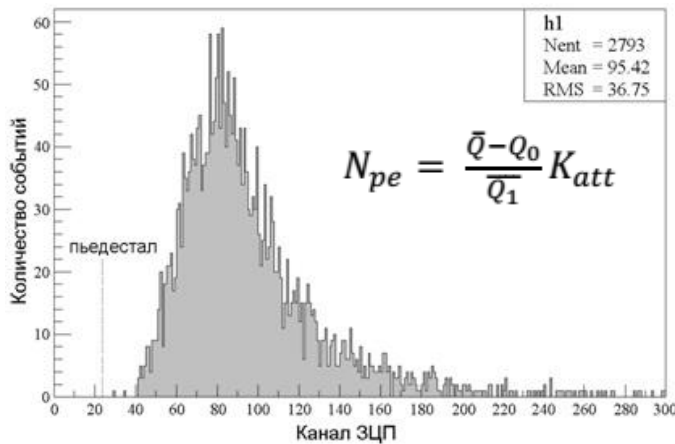
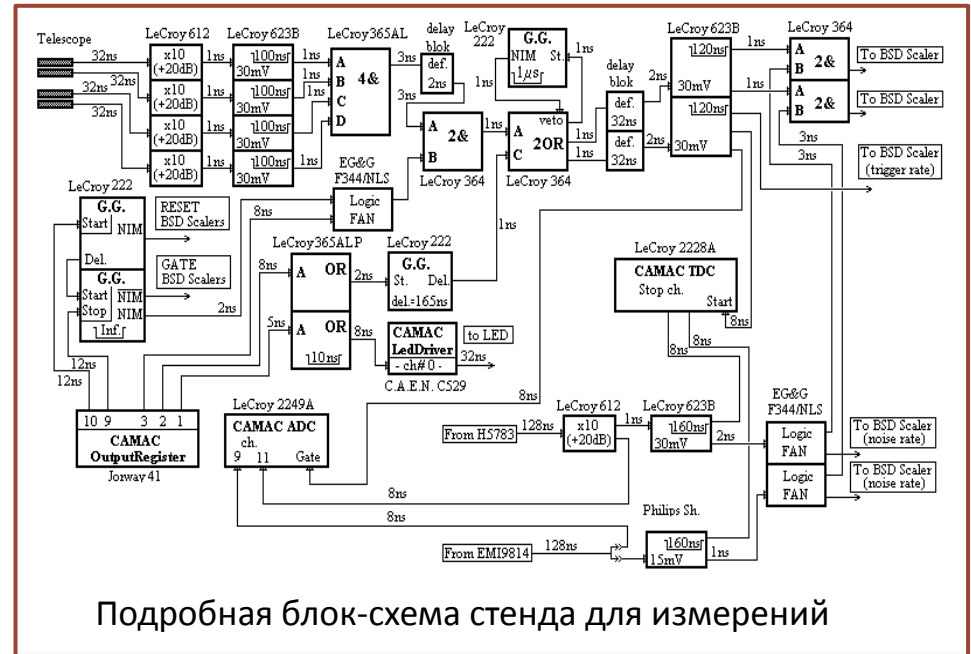
## СОСТАВ ВЫБОРКИ:

- 2 счетчика типа **CSP Top/Bottom**
- 17 счетчиков типа **BSU Forward/Rear**
- 17 счетчиков типа **CSX Internal**
- 23 счетчика **CSP Wall**

Тип «CSP» и «BSU» – съём света WLS волокнами,  
 Тип «CSX» – съём света «рыбьим хвостом»  
 Тип «CSP Wall» – модернизированные счетчики со смешанным способом съема света.



# МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

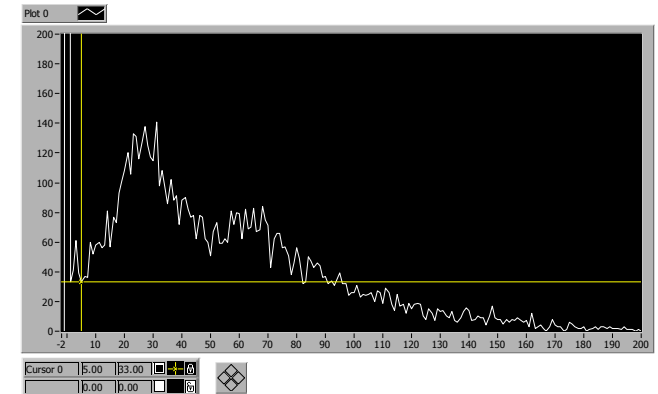


Спектр от «космики» с аттенуатором

где  $\bar{Q}$  – средняя амплитуда мюонного спектра,  $Q_0$  - значение пьедастала,  
 $\bar{Q}_1$  – усредненный калибровочный параметр,  $K_{att}$  – коэффициент ослабления.

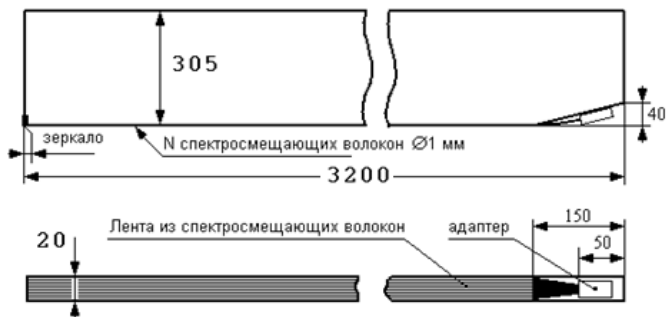
$$N_t = N_0 e^{-(t/\tau)}$$

$\tau$  – постоянная старения  
счётчика



Зарядовый спектр от калибровочного светодиода

# Тестирование счетчиков верхней центральной части установки (CSP Top)



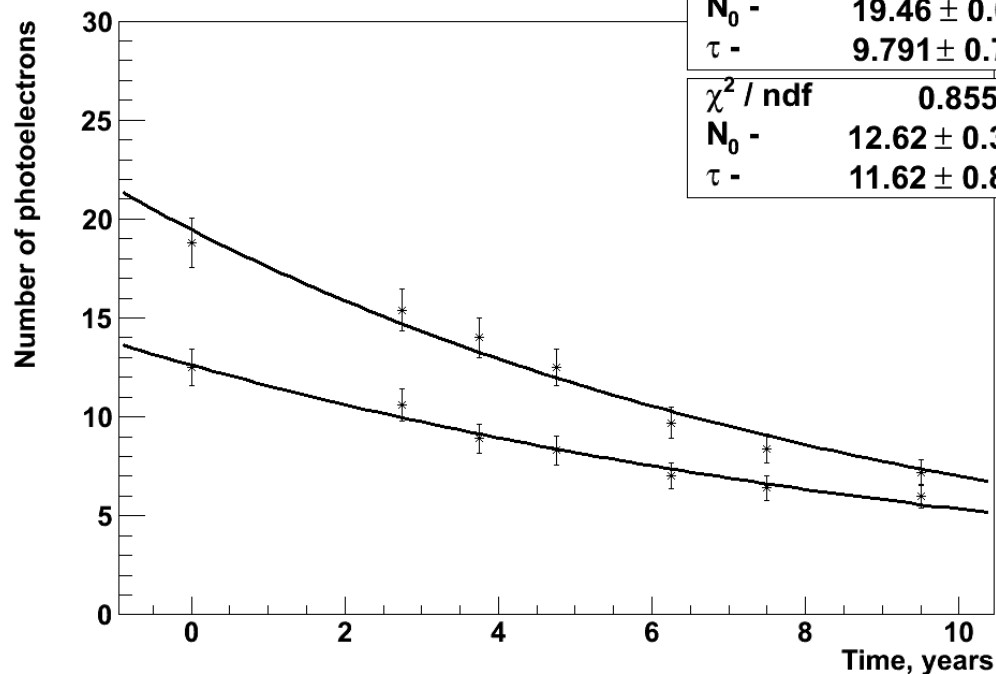
основа полистирол UPS 923А

на CDF с 2000 года

	Постоянная старения $\tau$ (в годах)
1-ый счетчик	$9.8 \pm 0.7$
2-ой счетчик	$11.6 \pm 0.85$
Среднее	$10.7 \pm 1.1$

CSP counters

$\chi^2 / \text{ndf}$	2.522 / 5
$N_0$ -	$19.46 \pm 0.6151$
$\tau$ -	$9.791 \pm 0.7057$
$\chi^2 / \text{ndf}$	0.8557 / 5
$N_0$ -	$12.62 \pm 0.3556$
$\tau$ -	$11.62 \pm 0.8495$



ПРОГНОЗ:

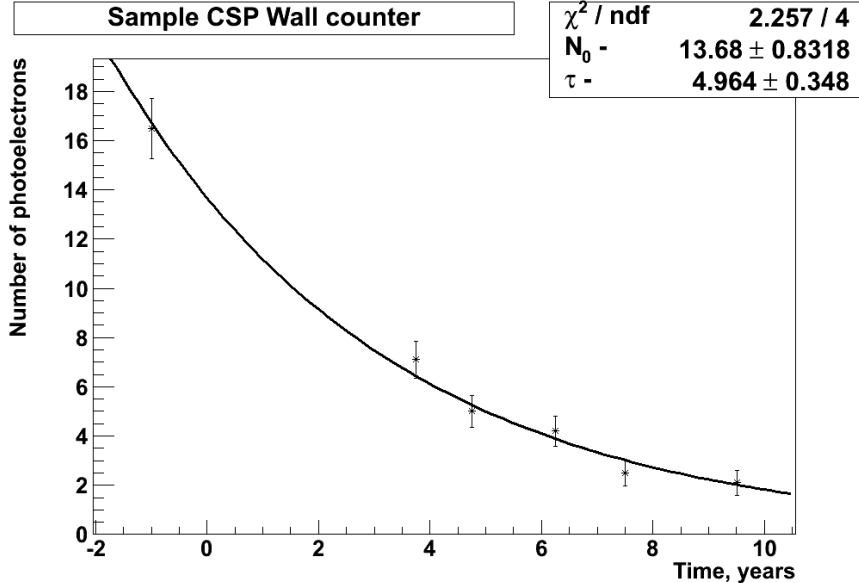
эффективность CSP Top/Bottom счетчиков не будет опускаться ниже 95% до 2014 года (на тот момент предполагаемого срока завершения эксперимента CDF)

# Тестирование обновленных счетчиков центральной части установки (CSP Wall)



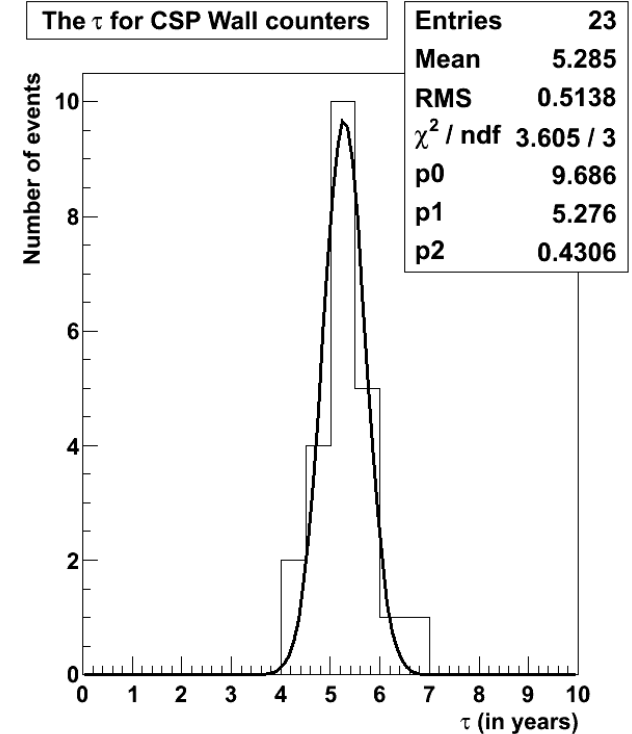
основа поливинилтолуол NE 114  
 начало использования с 1992 года.  
 в 1999 году модернизированны  
 клейкой на торец полосы из WLS волокон

## Нахождение постоянной старения $\tau$ для одного счетчика CSP Wall



Год (сезон) измерений	Усредненное кол-во ф.э. для выборки
1999	$14.4 \pm 3.8$
2003 (Осень)	$5.9 \pm 1.6$
2004 (Осень)	$4.5 \pm 1.3$
2006 (Весна)	$3.8 \pm 1.3$
2007 (Лето)	$2.6 \pm 0.9$
2009 (Лето)	$2.3 \pm 0.8$

## Нахождение постоянной старения $\tau$ для всей выборки счетчиков CSP Wall



### ДИАГНОЗ:

средняя эффективность выборки на 2009 год равна 85% (усредненный светосбор = 2.3 ф.э.)

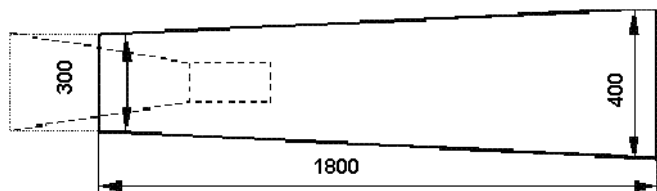
### ПРОГНОЗ:

эффективность CSP Wall счетчиков составит не более 70% к 2014 году.

**По результатам измерений коллаборация приняла решение о замене.**



# Тестирование счетчиков расширения центральной части установки (CSX internal)

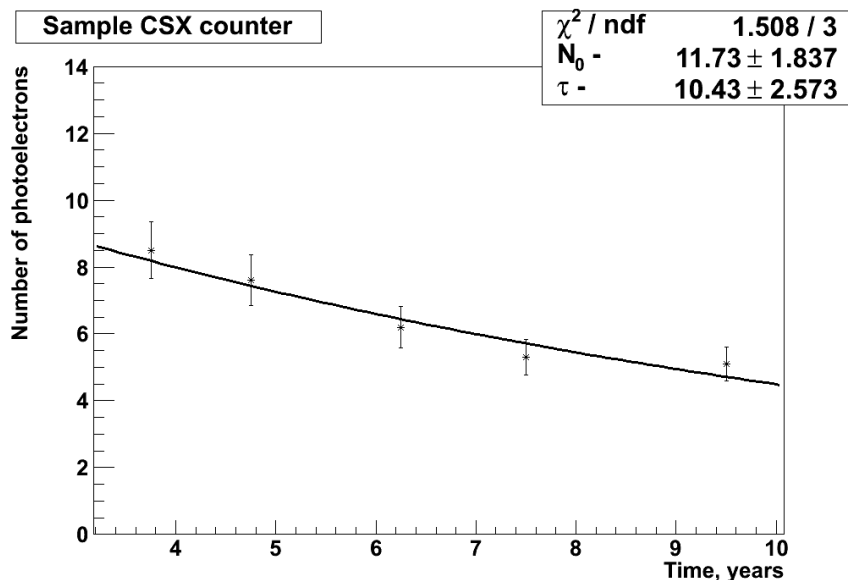
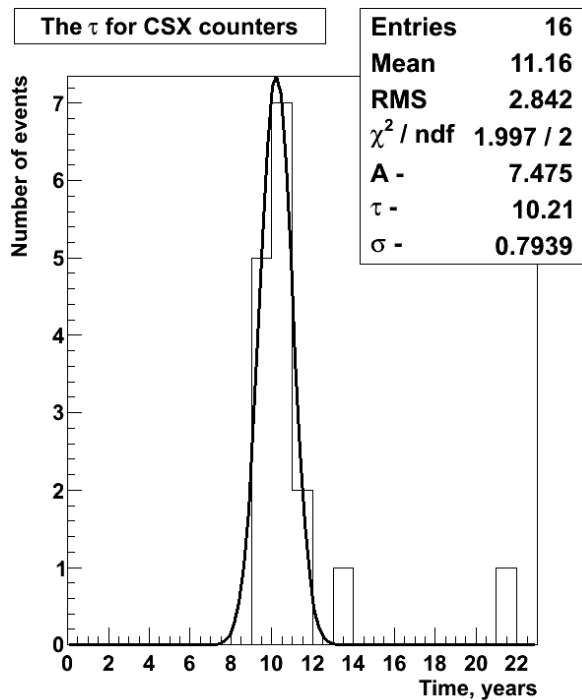


основа поливинилтолуол NE 114,  
на установке CDF с 1994 года

Нахождение постоянной старения  $\tau$   
для одного счетчика CSX

Год (сезон) измерений	Усредненное кол-во ф.э. для выборки
2003 (Осень)	$8.1 \pm 2.4$
2004 (Осень)	$7.3 \pm 2.2$
2006 (Весна)	$5.9 \pm 1.7$
2007 (Лето)	$5.2 \pm 1.4$
2009 (Лето)	$5.0 \pm 1.0$

Нахождение постоянной старения  $\tau$   
для всей выборки счетчиков CSX



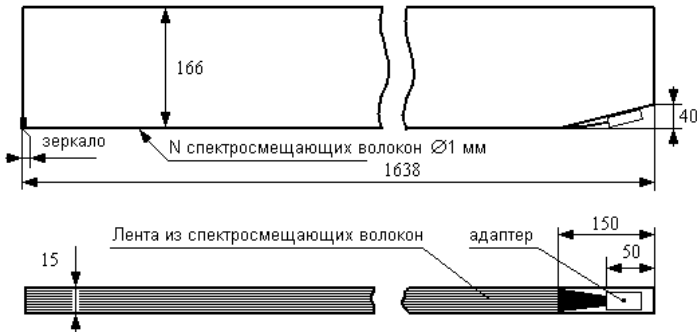
**ДИАГНОЗ:**

средняя эффективность выборки на 2009 год равна 95%  
(усредненный светосбор = 5 ф.э.)

**ПРОГНОЗ:**

эффективность CSX Int/Ext счетчиков опустится ниже  
93% к 2014 года.

# Тестирование счетчиков расположенных вокруг магнитных тороидов (BSU)

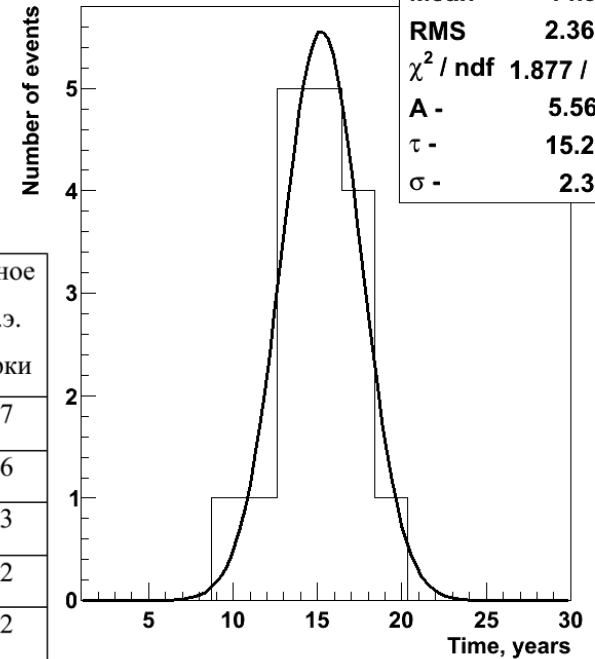


основа полистирол UPS 923A  
на CDF с 2000 года

Нахождение постоянной старения  $\tau$   
для всей выборки счетчиков BSU

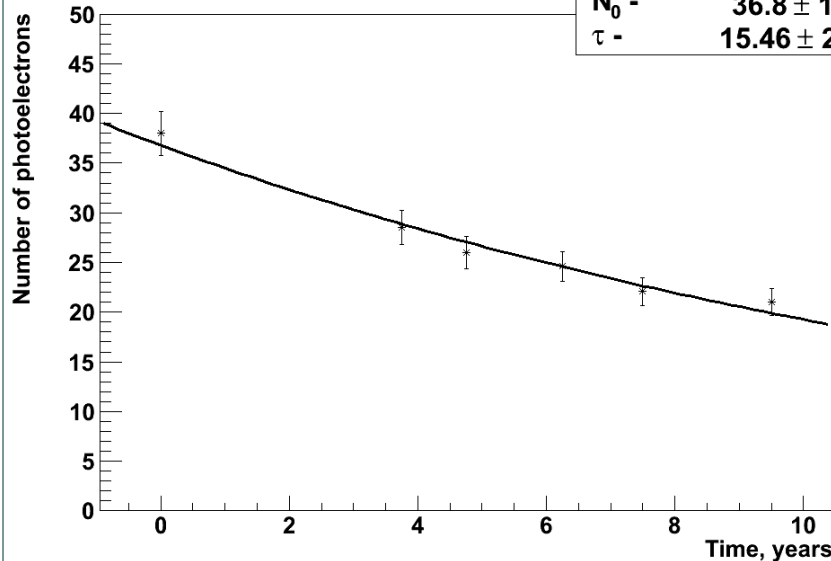
The  $\tau$  for BSU counters

Entries	17
Mean	14.91
RMS	2.366
$\chi^2 / \text{ndf}$	1.877 / 3
A -	5.561
$\tau$ -	15.23
$\sigma$ -	2.37



Нахождение постоянной старения  $\tau$   
для одного счетчика BSU

Sample BSU counter

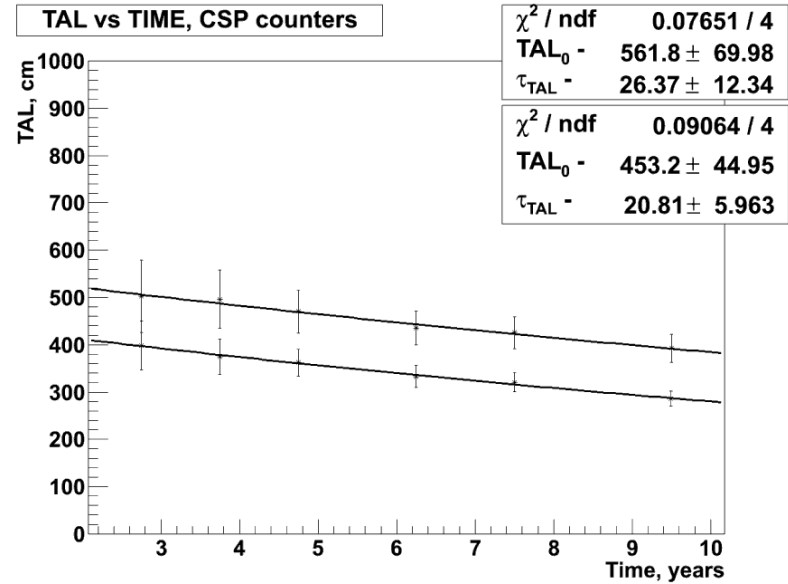
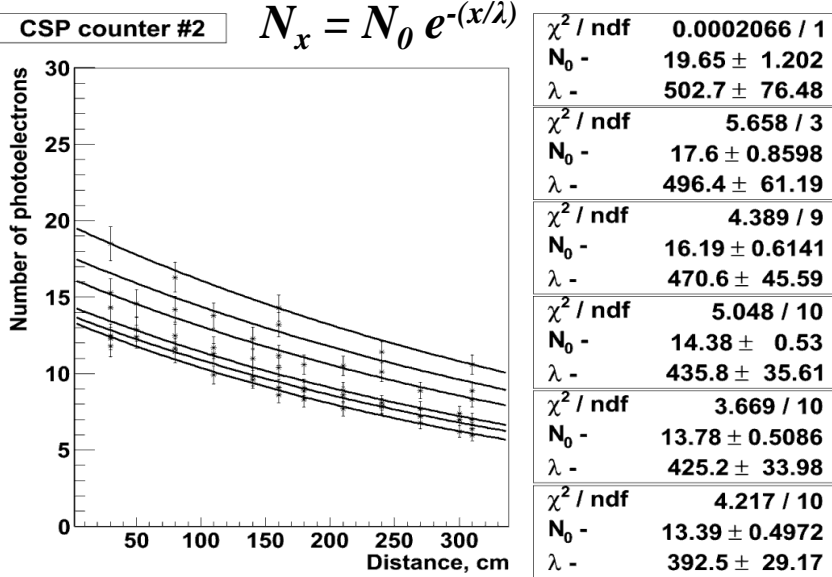


$\chi^2 / \text{ndf}$	1.601 / 4
$N_0$ -	$36.8 \pm 1.859$
$\tau$ -	$15.46 \pm 2.061$

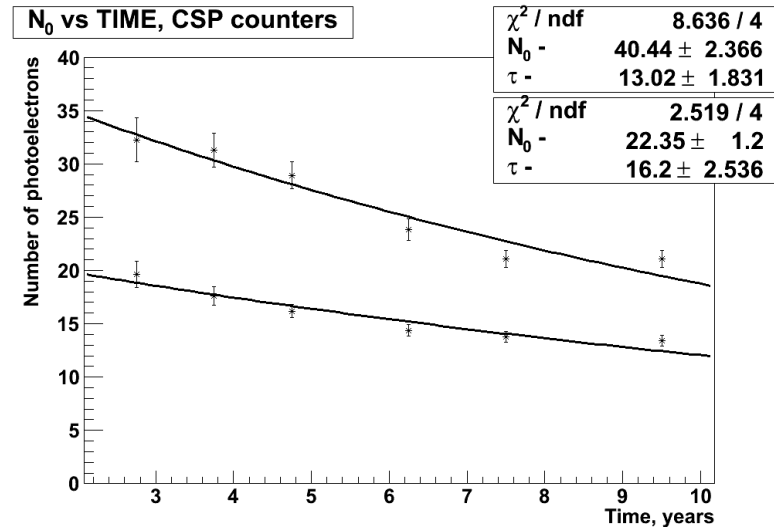
Год (сезон) измерений	Усредненное кол-во ф.э. для выборки
2000	$32.9 \pm 4.7$
2003 (Осень)	$24.7 \pm 3.6$
2004 (Осень)	$23.0 \pm 3.3$
2006 (Весна)	$20.9 \pm 3.2$
2007 (Лето)	$18.9 \pm 3.2$
2009 (Лето)	$17.6 \pm 3.3$

**ПРОГНОЗ:**  
эффективность BSU счетчиков будет не менее 99.9% к 2014 году.

# Изучение TAL для системы «сцинтиллятор + СС волокно»



TAL для системы «ПС+ССВолокно» мало меняется со временем, не более 25% за 7-летний период.



Постоянная старения $\tau$	ПС (в годах)	ПС+ССВолокно (в годах)
1-ый счетчик	$13.0 \pm 1.8$	$9.8 \pm 0.7$
2-ой счетчик	$16.2 \pm 2.5$	$11.6 \pm 0.85$
Среднее	<b><math>14.6 \pm 3.1</math></b>	<b><math>10.7 \pm 1.1</math></b>

Соотношение вклада в деградацию системы «пластик/спектрсмещающее волокно» равно 3/1.

**Таблица результатов исследования старения  
сцинтилляционных счётчиков мюонного триггера CDF II**

Тип счётчика	Основа	Метод светосбора	Длина, м	Кол-во, (шт.)	Средний светосбор, (ф.э.)	Постоянная старения $\tau$ , (лет)	Уменьшение светосбора, (% в год)
BSU	ПС	волокно	1.6	17	<b>17.6 ± 3.3</b>	<b>14.6 ± 2.6</b>	~6
CSX	ПВТ	световод	1.8	16	<b>5.0 ± 1.0</b>	<b>10.2 ± 1.2</b>	~10
CSW	ПВТ	комбин.	3.2	23	<b>2.3 ± 0.8</b>	<b>5.3 ± 0.5</b>	~18
CSP	ПС	волокно	3.2	2	<b>6.6 ± 0.9</b>	<b>10.7 ± 1.1</b>	~10
CSP точка «0»	ПС	волокно	---	2	<b>17.2 ± 3.1</b>	<b>14.6 ± 3.1</b>	~6

- ❑ Впервые, на основе 10-летних измерений, показано, что у сцинтилляционных счетчиков на основе полистирола ухудшение светосбора происходит в 2 раза медленнее по сравнению со счетчиками на основе поливинилтолуола ( $\tau = 10,7$  и  $\tau = 5,3$  лет соответственно).
- ❑ Установлено, что для сцинтилляционных счетчиков на основе полистирола, использующих оптоволоконный способ съема света, старение системы "сцинтиллятор + спектросмещающее волокно" определяется в большей степени деградацией сцинтилляционной пластины, а не волокном. Соотношение вклада в деградацию системы «пластик/спектросмещающее волокно» равно 3/1.
- ❑ Впервые, на основе 7-летних наблюдений, показано, что техническая длина ослабления света (TAL) для системы «сцинтиллятор + спектросмещающее волокно» меняется со временем < 25% от начального значения.
- ❑ Оценена эффективность работы различных типов сцинтилляционных счетчиков в RUN II. Составлен их план замены.

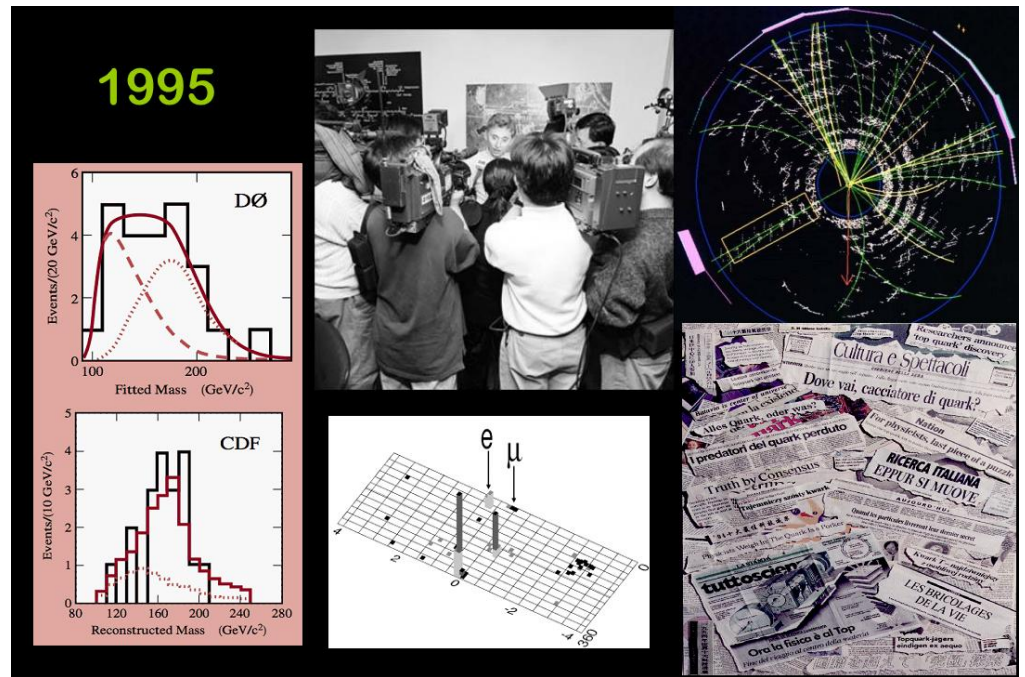


# Измерение заряда ТОП-Кварка



24 февраля 1995 г., коллаборации CDF и DØ представили статьи об открытии t-кварка в журнал Physical Review Letters.

масса →	≈ 2.3 МэВ/c <sup>2</sup>	≈ 1.275 ГэВ/c <sup>2</sup>	≈ 173.07 ГэВ/c <sup>2</sup>	0	≈ 126 ГэВ/c <sup>2</sup>
заряд →	2/3	2/3	2/3	0	0
спин →	1/2	1/2	1/2	1	0
<b>КВАРКИ</b>	<b>u</b> верхний	<b>c</b> очарованный	<b>t</b> истинный	<b>g</b> глюон	<b>H</b> бозон Хиггса
	≈ 4.8 МэВ/c <sup>2</sup>	≈ 95 МэВ/c <sup>2</sup>	≈ 4.18 ГэВ/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> нижний	<b>s</b> странный	<b>b</b> прелестный	<b>γ</b> фотон	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 МэВ/c <sup>2</sup>	1.777 ГэВ/c <sup>2</sup>	91.2 ГэВ/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> электрон	<b>μ</b> мюон	<b>τ</b> тау	<b>Z</b> Z бозон	
<b>ЛЕПТОНЫ</b>	< 2.2 эВ/c <sup>2</sup>	< 0.17 МэВ/c <sup>2</sup>	< 15.5 МэВ/c <sup>2</sup>	80.4 ГэВ/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> Электронное нейтрино	<b>ν<sub>μ</sub></b> мюонное нейтрино	<b>ν<sub>τ</sub></b> тау нейтрино	<b>W</b> W бозон	
					<b>КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ</b>



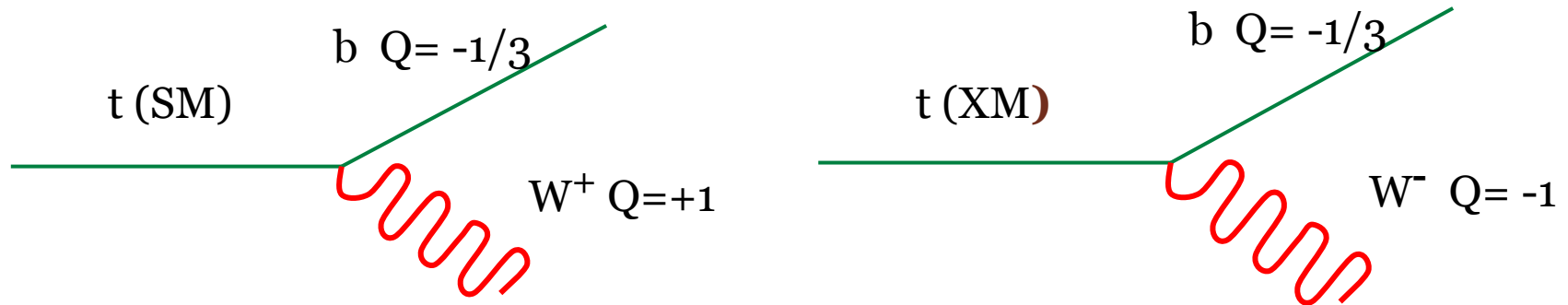
в 1999 г. в журнале Phys.Rev.D59 появилась статья «Alternative interpretation of the Fermilab Tevatron top events». Авторы: D. Chang, W.F. Chang и E. Ma.

Суть предположения:

- t-кварк с массой  $\approx 170$  ГэВ/c<sup>2</sup> не является кварком из СМ
- найденная частица является экзотическим тяжелым кварком дублета  $(Q_1, Q_4)_R$
- $Q_4$  обладает зарядом  $-4/3$  и распадается по каналу  $bW^-$
- $Q_1$  смешивается с правой компонентой b-кварка и обладает зарядом  $-1/3$

# Измерение заряда топ-кварка по продуктам распада

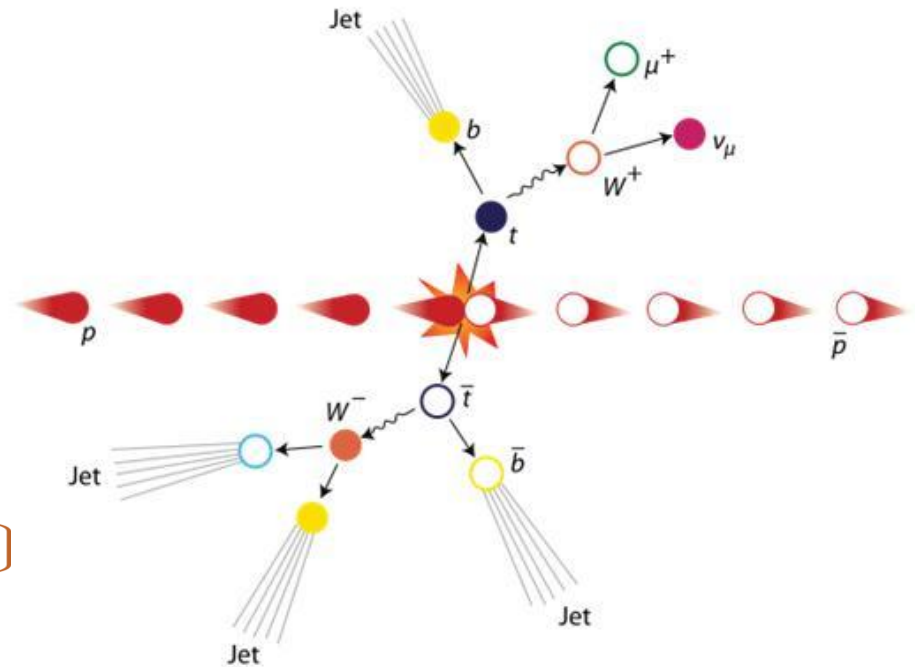
Гипотеза о существовании экзотического кварка на CDF может быть подтверждена, если при распаде  $t$ -кварка будут обнаружены события, содержащие  $W^-$ -бозон и  $b$ -кварк, а при распаде анти  $t$ -кварка –  $W^+$ -бозон и анти- $b$ -кварк.



# Определение заряда топ-кварка

1. Определение заряда  $W$ -бозона (по заряду лептона)
2.  $b$  – мечение
3. Выбор пары  $W$ -бозон и  $b$ -струи
4. Определение заряда  $b$ -струи

## лептон-струйная мода распада



Decay Mode	Branching Fraction	Relative Background	Final State
Dilepton - no $\tau$ s	$\sim 5\%$	Low	$ll \nu\nu bb$
Lepton + Jets - no $\tau$ s	$\sim 30\%$	Medium	$l \nu bb jj$
All Hadronic	$\sim 45\%$	High	$bb jjjj$
Tauonic	$\sim 20\%$	High	





# ОТБОР СОБЫТИЙ

## Лептон+струя («L+J»)

лептон  $E_t (P_t) > 20$  ГэВ/c

недостающая энергия  $E_t > 20$  ГэВ

по крайней мере 3 струи  $E_t > 20$  ГэВ и 4 струя с энергией  $E_t > 12$  GeV

$\geq 2$   $b$ -струи содержат вторичные вершины от  $B$  - мезона

## Выбор пары $W$ -бозон и $b$ -струя

$$\chi^2 = \sum_{i=l,4jets} \frac{(\hat{p}_T^i - p_T^i)^2}{\sigma_i^2} + \sum_{j=x,y} \frac{(\hat{p}_j^{UE} - p_j^{UE})^2}{\sigma_j^2} + \frac{(m_{jj} - m_W)^2}{\Gamma_W^2} + \frac{(m_{l\nu} - m_W)^2}{\Gamma_W^2} + \frac{(m_{bjj} - m_t)^2}{\Gamma_t^2} + \frac{(m_{bl\nu} - m_t)^2}{\Gamma_t^2}$$

Для правильного соотнесения лептона с  $b$ -струей, использовалась процедура кинематического фита. Комбинация с минимальным значением  $\chi^2$  указывала на правильность присвоения.

## Результат выбора пары



Эффективность  $\chi^2 < 9$  53%

Чистота присвоения  $\chi^2 < 9$  83%





# Ожидаемое число сигнальных и фоновых событий

Процесс	$N_{bef}$	Эффективность применения $\chi^2$	Эффективность JetQ-отбора	$N_{aft}$
<b>W+HF</b>	66±22	0,152±0,004	0,970±0,003	19,5±6,4
<b>QCD fake</b>	18±14	0,17±0,08	0,88±0,12	5,4±4,8
Diboson	4,7±0,7	0,22±0,02	0,97±0,01	2,0±0,4
<b>Mistag</b>	9,7±2,6	0,15±0,02	0,96±0,02	2,8±0,8
<b>Single top</b>	10,6±1,3	0,23±0,004	0,972±0,003	4,4±0,5
$N_{bgd}$	109±26	не опр.	не опр.	34±8
$N_{sgn}$	670±110	0,532 <sup>+0,001 (стат.)</sup> <sub>-0,005 (сист.)</sub>	0,979 <sup>+0,0 (стат.)</sup> <sub>-0,002 (сист.)</sub>	700±120

**W+HF** - события с W-бозоном и 2 b-струями

**Mistag** – струи из легких кварков опознавались как b-струями

**QCD fake** – одна струя опознавалась как лептон

**Single top** – события с одиночным рождением t-кварка

Diboson – двухбозонные события



# Определение чистоты сигнала

$$p_s = f_{nb}SF_{nb}p_{nb} + (1 - f_{nb}SF_{nb})[p_{Wb}p_{JQ}SF_{JQ} + (1 - p_{Wb})(1 - p_{JQ}SF_{JQ})]$$

$p_s$  - доля событий с правильным определением заряда топ-кварка

$p_{nb}$  - вероятность, что в событии с ошибкой в определении  $b$ -струи правильно определен заряд топ-кварка

$p_{Wb}$  - чистота соотнесения для  $W$  и  $b$ -струи (правильно спарили)

$p_{JQ}$  - чистота соотнесения для заряда струи (правильно определили)

$f_{nb}$  - доля событий где одна или более струй определенных как « $b$ » ими не являются

$SF_{nb}$  - корректировочные коэф-ты между данными и МС

$SF_{JQ}$

Параметр	Значение
$f_{nb}$	$0,079 \pm 0,001$
$SF_{nb}$	$1,01 \pm 0,03$
$p_{nb}$	$0,50 \pm 0,01$
$p_{Wb}$	$0,833 \pm 0,001$ (стат.) $\pm 0,008$ (сист.)
$p_{JQ}$	$0,608 \pm 0,001$ (стат.) $\pm 0,003$ (сист.)
$SF_{JQ}$	$0,99 \pm 0,01$ (стат.) $\pm 0,03$ (сист.)

## Определение чистоты (ассиметрия) фона

$$p_b = \frac{N_+}{N_+ + N_-}$$

$N_+$  кол-во SM кандидатов  
 $N_-$  кол-во ХМ кандидатов

Параметр	Значение
$N_s$	$700 \pm 120$
$N_b$	$34 \pm 8$
$p_s$	$0,562 \pm 0,004$ (стат.) $\pm 0,011$ (сист.)
$p_b$	$0,50 \pm 0,01$



# Статистическая обработка

Функция правдоподобия для оценки параметра  $f_+$  - доли SM-событий,  $f_+ = 1$  (SM-гипотеза),  $f_+ = 0$  (ХМ-гипотеза)

$$L = L_S \cdot L_{N_b} \cdot L_{N_s} \cdot L_{p_s} \cdot L_{p_b}$$



$$L_S(x^+, x^-) = \frac{\langle N_+ \rangle^{x^+} e^{-\langle N_+ \rangle}}{x^+!} \cdot \frac{\langle N_- \rangle^{x^-} e^{-\langle N_- \rangle}}{x^-!}$$



$$\langle N_+ \rangle = p_s N_s f_+ + (1 - p_s) N_s (1 - f_+) + p_b N_b$$

$$\langle N_- \rangle = (1 - p_s) N_s f_+ + p_s N_s (1 - f_+) + (1 - p_b) N_b$$

ожидаемые средние значения для  $N_+$  и  $N_-$

$$L_{N_s}(y_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{N_s}} e^{-\frac{(y_s - N_s)^2}{2\sigma_{N_s}^2}}$$

.....

$$L_{p_s}(z_{p_s}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{p_s}} e^{-\frac{(z_{p_s} - p_s)^2}{2\sigma_{p_s}^2}}$$

.....



$N_s$  и  $\sigma_{N_s}$  - кол-во сигнальных событий и погрешность  
 $p_s$  и  $\sigma_{p_s}$  - чистота сигнала и его погрешность

## Проверка стат. гипотезы

$$p_{SM} = \int_{-\infty}^{f_+^{data}} f(X|H_0) dX$$

$$p_{XM} = \int_{f_+^{data}}^{+\infty} f(X|H_1) dX$$

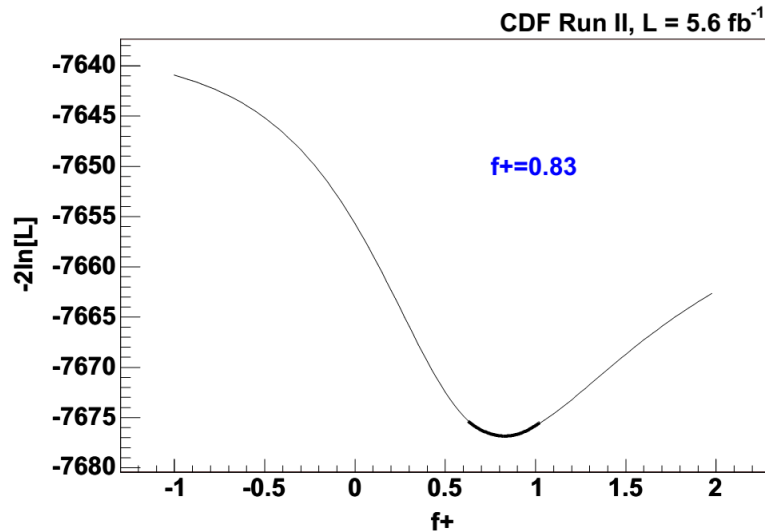
- 1)  $p_{SM} < 1,3 \cdot 10^{-3}$  ( $2,87 \cdot 10^{-7}$ ), то на уровне значимости 3 (5)  $\sigma$  будет подтверждено существование экзотического  $t$ -кварка с зарядом  $-4/3$ ;
- 2)  $p_{SM} > 1,3 \cdot 10^{-3}$ , то нельзя исключить существование  $t$ -кварка из SM;
- 3)  $p_{XM} < 0,05$  (0,01), то существование экзотического  $t$ -кварка исключено с 95 (99) % уровнем достоверности. (требования Particle Data Group)



# РЕЗУЛЬТАТЫ

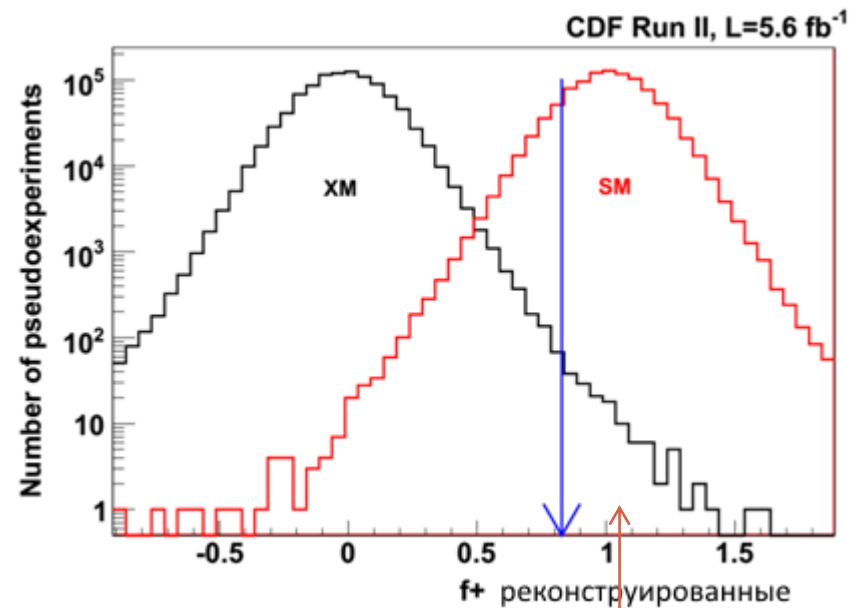
Данные набраны с 2002 по 2010 гг.

Наблюдалось **815** «L+J» событий->критерии отбора->**774**. 416 – SM события, 358 – XM события



Распределение  $-2 \ln L$  для данных CDF

$f_+$  распределение для SM/XM – гипотез на псевдоэкспериментах



*$P_{XM}$  -> Экзотического  $t$ -кварка не существует с 99% C.L.*

$P_{XM} = 0.014\%$



# Результаты, выносимые на защиту



- ❖ Разработана и создана уникальная аппаратно-программная система управления всей совокупностью сцинтилляционных счетчиков мюонной системы установки CDF II. Система эффективно отработала во время набора данных с 2009 г. до остановки Тэватрона в 2011 г. и позволила записать одни из самых важных наборов триггеров с мюоном с большим поперечным импульсом;
- ❖ Разработана и внедрена принципиально новая система контроля параметров сцинтилляционных счетчиков установки CDF II на основе пакета iFIX 5.0. В результате был реализован непрерывный оперативный контроль за мюонной системой CDF II;
- ❖ Впервые, на основе 10-летних измерений, показано, что у сцинтилляционных счетчиков на основе полистирола уменьшение светосбора происходит в 2 раза медленнее по сравнению со счетчиками на основе поливинилтолуола ( $\tau = 10.7$  и  $\tau = 5.3$  лет соответственно) Сделан вывод и доведена до сведения коллаборации необходимость замены счетчиков на основе поливинилтолуола;
- ❖ Проведена статистическая проверка гипотез в анализе данных CDF II по измерению заряда топ-кварка на выборке событий кандидатов пары топ-анти топ в моде «лептон + струи»;
- ❖ При участии автора измерен заряд топ кварка на статистике  $5.6 \text{ fb}^{-1}$ . Гипотеза о существовании экзотического кварка четвертого поколения с зарядом  $-4/3$  и массой  $170 \text{ ГэВ}/c^2$  отвергнута на 99 % уровне достоверности;



## ЛИЧНЫЙ ВКЛАД СОИСКАТЕЛЯ

- создание программного обеспечения системы контроля всей совокупности (1200 штук) сцинтилляционных счетчиков мюонной системы установки CDF II, включая программы интеграции в глобальную систему мониторинга установки CDF II на основе пакета iFIX 5.0.
- обеспечение непрерывной и эффективной работы мюонного триггера, работал экспертом данной подсистемы с 2007 до 2011 года включительно.
- в 2007 и 2009 гг. измерение эффективности образцов сцинтилляционных счетчиков из различных подсистем мюонного триггера установки CDF для контроля их светосбора и определения срока их замены.
- участие в статистическом анализе гипотез при определении заряда топ-кварка.
- участие (дважды) в 4-х месячных сменах на установке CDF II в качестве «Асе» оператора.







Спасибо за внимание

## Дополнение:

## Публикации

- ❖ А.В. Симоненко, А.М. Артиков, В.В. Глаголев, Ф.В. Прокошин, Д. Чохели. Модернизированная система контроля сцинтилляционных счетчиков мюонного триггера установки CDF II. Письма в ЭЧАЯ. (2010) Т.7, №6(162). С. 686-698.
- ❖ A. Artikov, D. Chokheli, G. Pauletta, A. Simonenko. The loss of light yield with time in the CDF II scintillation counters. Nucl. Instr. Meth. A. 672 P.46-51(2012).
- ❖ T. Aaltonen, ..., A. Simonenko et al. (CDF Collaboration). Exclusion of exotic top-like quarks with  $-4/3$  electric charge using jet-charge tagging in single-lepton events at CDF. Phys.Rev D88, 032003 (2013).
- ❖ А.Артиков, П.Бартош, Ю.А.Будагов, В.В.Глаголев, Ф.В.Прокошин, А.В.Симоненко, И.А.Суслов, И.В.Титкова, С.Токар, Д.Чохели. Участие ОИЯИ в эксперименте CDF в Фермилаб. Препринт ОИЯИ Р1-2017-76, направлено в журнал ЭЧАЯ.



# Апробация

- ❖ Международные конференции TOP'08 (Эльба, Италия 18-24.05.2008), Workshop on Jet Spectroscopy (Пиза, Италия, 18-19.04.2011), EPS HEP'2013 (Стокгольм, Швеция, 17-24.07.2013);
- ❖ Научно-методические семинары ЛЯП;
- ❖ Семинары коллаборации CDF;
- ❖ Основные результаты опубликованы в журналах «Письма в ЭЧАЯ», «Nuclear Instruments and Methods in Physics A», «Physical Review D», «ЭЧАЯ».



# Подсчет ошибок определения количества фотоэлектронов

## Статистическая ошибка

$$N_{ph.e.} = Att * \frac{Q_{cos}}{k}$$

$$k = - \ln \left( \frac{N_{ped}}{N_{all}} \right)$$

$$\Delta k = \frac{N_{all}}{N_{ped}} \Delta \left( \frac{N_{ped}}{N_{all}} \right) = \frac{1}{N_{ped}} \Delta N_{ped}$$

$$\Delta N_{ph.e.} \approx \left( \frac{Att}{k} \right) \Delta Q_{cos} \oplus \frac{Att * Q_{cos}}{k^2} \Delta k = \left( \frac{Att}{k} \right) \Delta Q_{cos} \oplus \frac{Q_{cos}}{k^2} \frac{Att}{N_{ped}} \Delta N_{ped} \approx \left( \frac{Att}{k} \right) \Delta Q_{cos}$$

## Систематическая ошибка

$$\Delta N_{ph.e.}^{sys} = \left( \frac{Att}{k} \right) \Delta Q_{cos}^{sys} \oplus \frac{Att * Q_{cos}}{k^2} \Delta k^{sys} = \frac{Att * Q_{cos}}{k^2} \Delta k^{sys}$$