

# Проверка Стандартной модели в лептонном секторе.

(распад мюона)



Курчатовский институт



TRIUMF, Canada



University of Alberta, Canada



University of British Columbia, Canada



University of Montreal, Canada



University of Regina, Canada



University of Saskatchewan, Canada



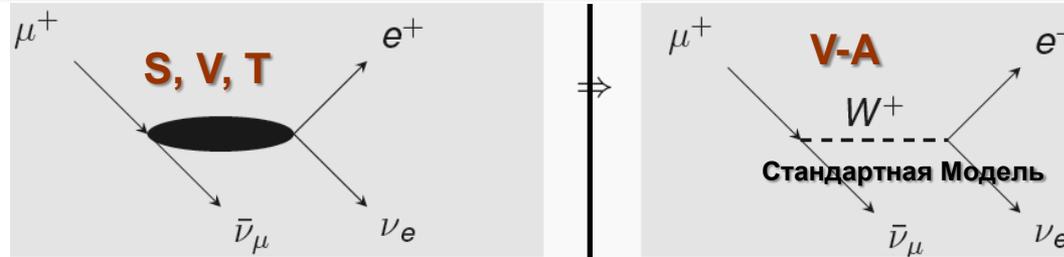
University of Texas A&M, USA



University of Valparaiso, USA

**1993 - 2012**

# Распад поляризованного мюона



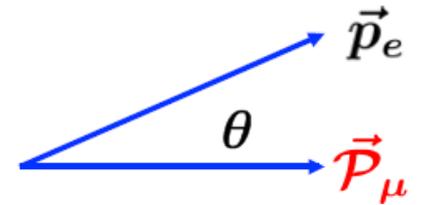
$$M = \frac{4G_F}{\sqrt{2}} \sum_{\substack{\gamma=S,V,T \\ \epsilon,\mu=R,L}} g_{\epsilon\mu}^\gamma \langle \bar{e}_\epsilon | \Gamma^\gamma | (\nu_e)_n \rangle \langle (\bar{\nu}_\mu)_m | \Gamma_\gamma | \mu_\mu \rangle$$

$$\frac{d^2\Gamma}{dx d\cos\theta} = \frac{1}{2\pi^3} m_\mu W_{\mu e}^4 G_F^2 \sqrt{x^2 - x_0^2} \cdot \{ \mathcal{F}_{IS}(x, \rho, \eta) \pm \mathcal{P}_\mu \cos\theta \cdot \mathcal{F}_{AS}(x, \xi, \delta) \}$$

$$\mathcal{F}_{IS}(x, \rho, \eta) = x(1-x) + \frac{2}{9}\rho(4x^2 - 3x - x_0^2) + \eta x_0(1-x)$$

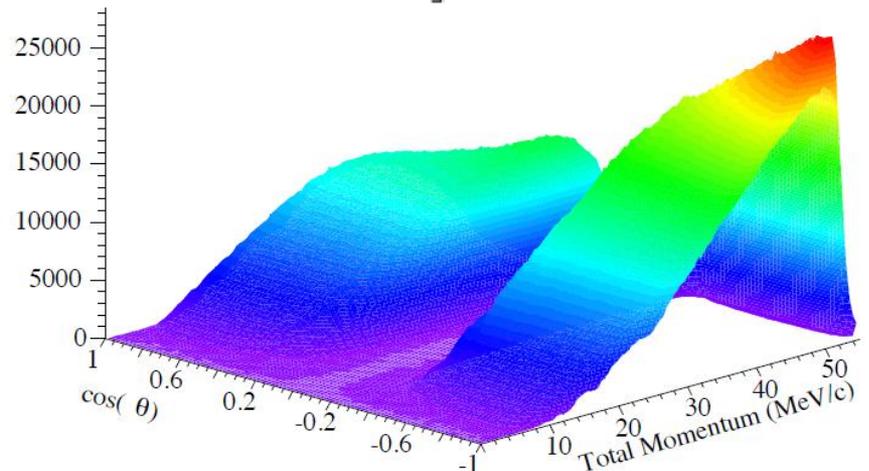
$$\mathcal{F}_{AS}(x, \xi, \delta) = \frac{1}{3}\xi\sqrt{x^2 - x_0^2} \left[ 1 - x + \frac{2}{3}\delta \left\{ 4x - 3 + (\sqrt{1 - x_0^2} - 1) \right\} \right]$$

$$W_{\mu e} = \frac{m_\mu^2 + m_e^2}{2m_\mu}, \quad x = \frac{E_e}{W_{\mu e}}, \quad x_0 = \frac{m_e}{W_{\mu e}}$$



$\rho, \eta, \delta, \xi$  - параметры Мишеля

Standard Model (V-A):  $\rho=\delta=3/4, \eta=0, \xi=1, P_\mu=-1$ .



# Цель проекта – улучшение точности измерения параметров Мишеля в $\sim 10$ раз (до уровня $\sim 10^{-4}$ )

- **Измерение впервые 2D спектра  $e^+$ .**  
Систематика в прежних 1D экспериментах превышала  $10^{-3}$  (ошибки акцептанса  $\theta$ ).
- **Определение впервые всех параметров Мишеля из одного  $N(E, \theta)$  спектра.**  
Улучшение точности в  $\sim 10$  раз только одного параметра невозможно из-за корреляций между параметрами.
- **Необходимо измерять с точностью  $10^{-4}$  энергию позитрона  $E$  и угол  $\cos\theta$  по ансамблю.**
- **Энергетическая калибровка при любых углах  $\theta$  определяется  $E_{\max} = 52.8356$  МэВ и заключена в самом спектре.**  
Внешние калибровки в прежних экспериментах давали систематику  $> 10^{-3}$ .
- **Рассеяние позитрона в детекторе должно быть минимальным.**  
TPC представляется оптимальным вариантом, поскольку  $e^+$  рассеивается только газом камеры. Попытка использовать TPC (эксперимент LAMPF, E455) для измерения  $\rho$  закончилась неудачей из-за искажения электрического поля положительными ионами (NIM A220(1988)126).
- **Необходимо знать с точностью  $10^{-4}$  все размеры детектора (дрейфовые камеры) и иметь эффективность камер  $> 99.9\%$ .**  
Попытка использовать данные MEGA (LAMPF, E969) для определения  $\rho$  с точностью  $10^{-3}$  закончилась неудачей (1990) из-за низкой эффективности камер и низкой точности знания положения детектора (<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-04122001-101532/unrestricted/etd.pdf>).

---

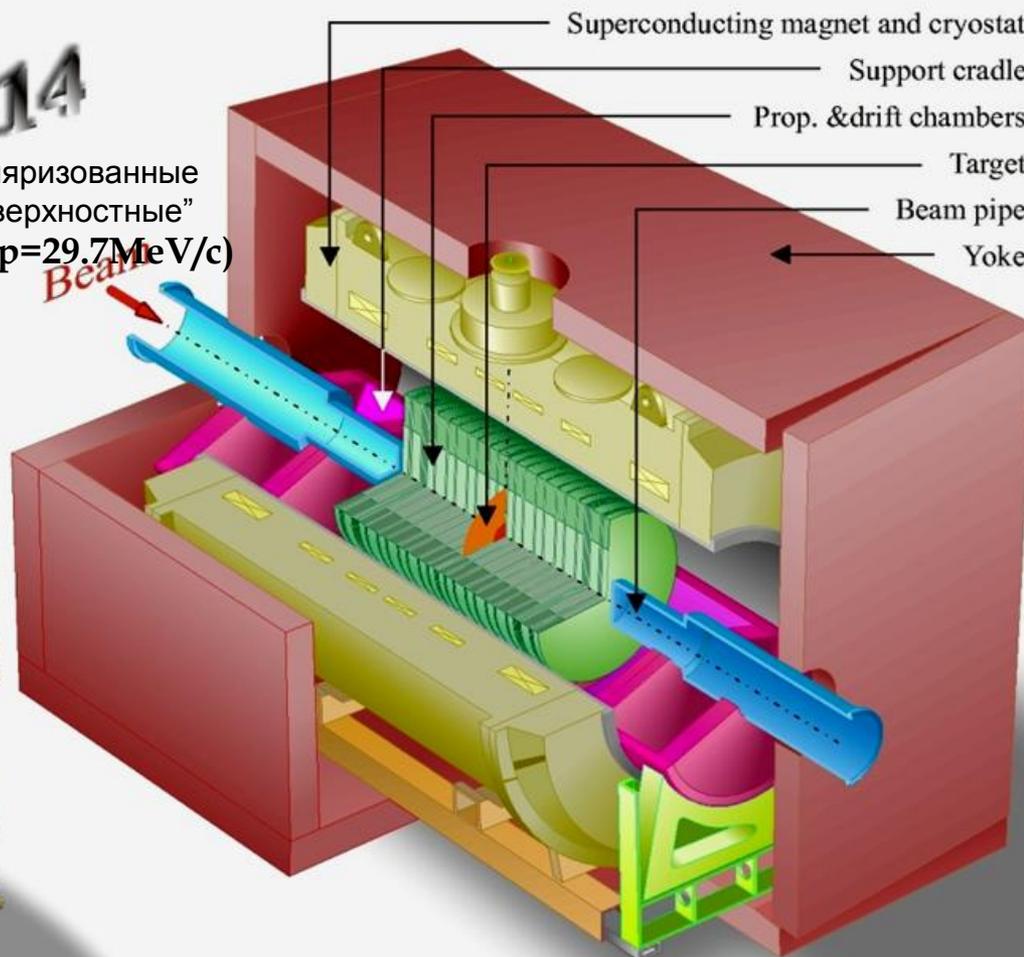
Последние два обстоятельства значительно затруднили утверждение проекта. Три специальных Международных комитета рассматривали работу (1990-1993).

# Спектрометр

Е 614

Поляризованные  
"поверхностные"  
 $\mu^+$  ( $p=29.7\text{MeV/c}$ )

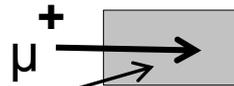
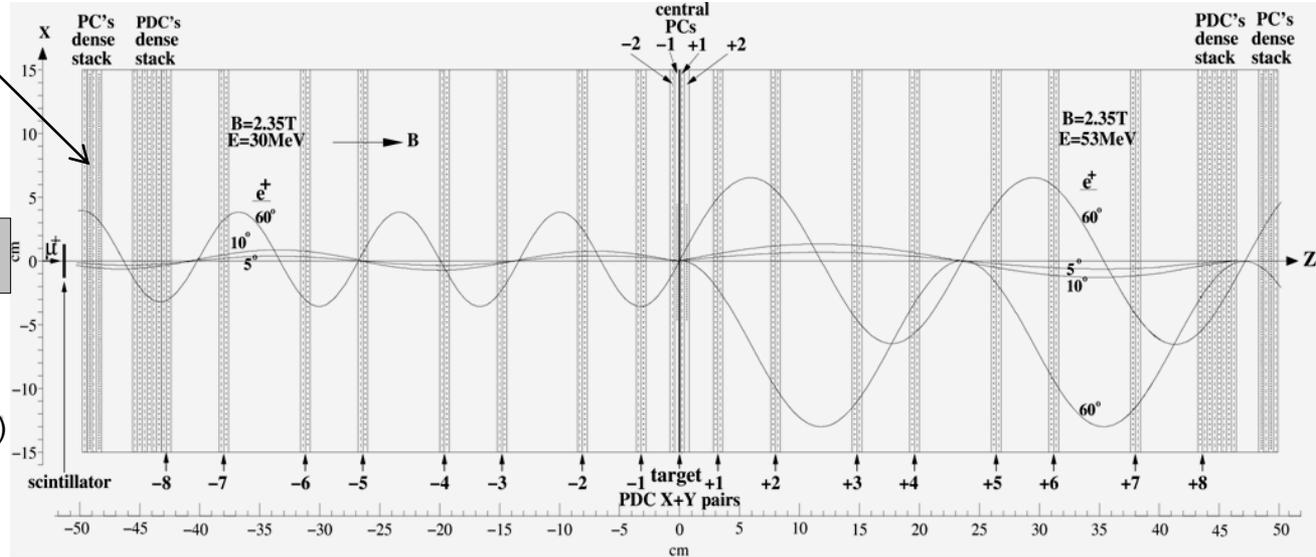
Beam



Размеры: длина 3.6м, высота 2.7м, ширина 2.7м; вес 58 тонн.  $B=2.3\text{T}$ , расход гелия  $\sim 0.3$  литр/час, режим замкнутого контура, неоднородность магнитного поля на детекторе  $< 10^{-3}$ .

# Детектор

Планарные дрейфовые (PDC) и пропорциональные (PC) пары камер (X+Y)



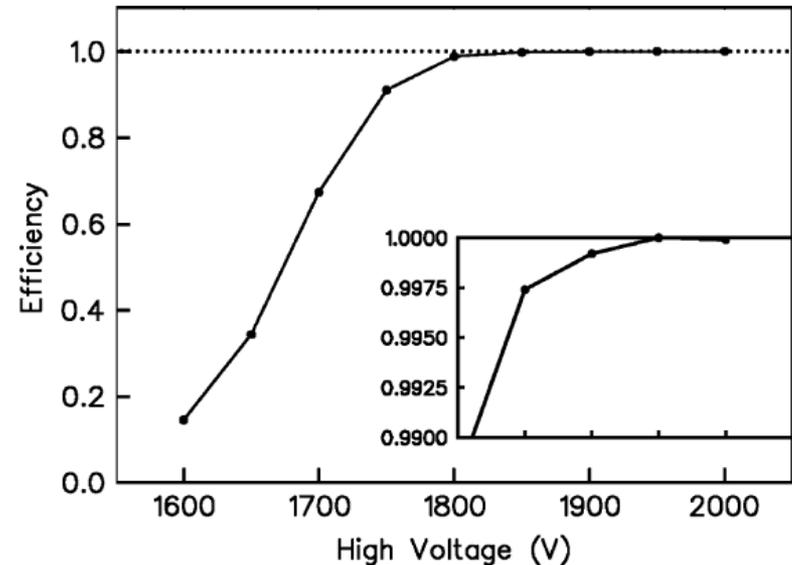
2D ТЕС низкого давления (регистрация траектории  $\mu^+$ )

**Дрейфовые камеры** – 3520 каналов регистрации, проволоки-12.5мкм, шаг-4мм  $\pm$  0.5мкм,  $\sigma$ =3мкм, ячейка-4x4мм газ-DME, HV-(mylar)Al 6мкм.

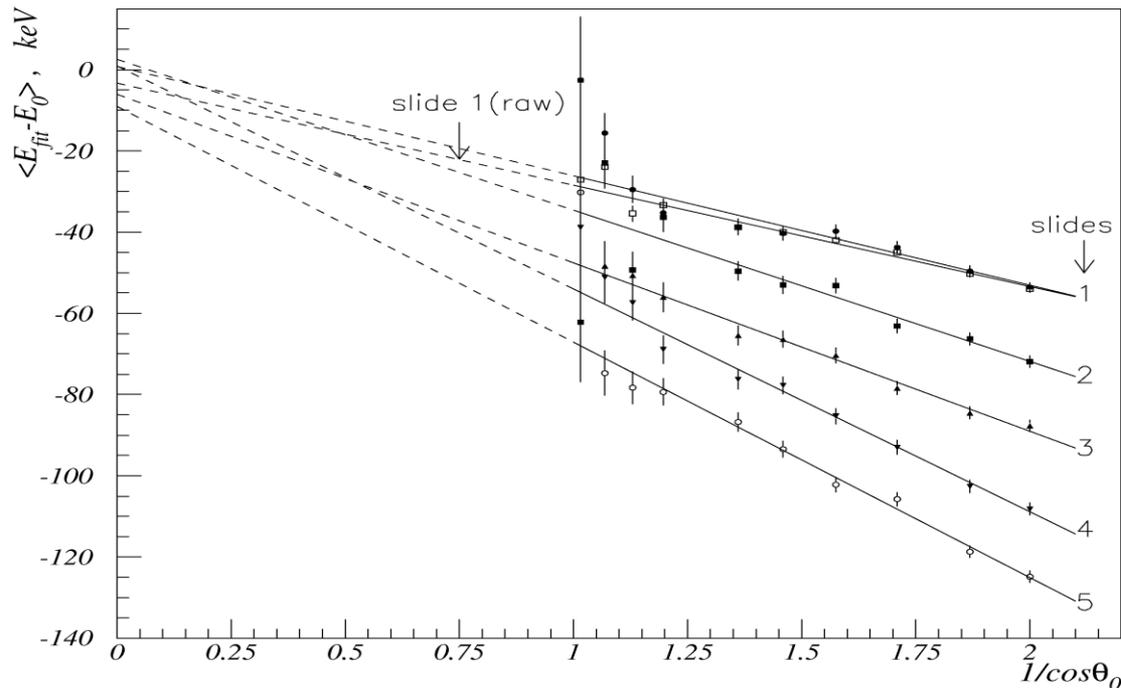
**Пропорциональные камеры** – 1920 каналов регистрации, проволоки-12.5мкм, шаг-2мм, ячейка-2x4мм, газ-CF /ISO, HV-(mylar)Al 6мкм.

**Промежутки между камерами** – газ- He/7%N<sub>2</sub>.

**Регистрация сигналов** – TDC LeCroy 1877,  $\Delta t=0.5$  ns,  $T_{max}=32$   $\mu$ s, 16 hits, интегральная нелинейность=0.



**Эффективность дрейфовых камер**



1. Измеренная точность всех элементов детектора  $< 2\mu\text{m}$ .

► Положиции всех проволок ( $> 5000$ ) в пространстве известны с точностью  $< 2\mu\text{m}$ .

2. Измеренная неидентичность масштабов вдоль осей X, Y, Z -  $< 10^{-4}$  (требование -  $2 \times 10^{-4}$ ).

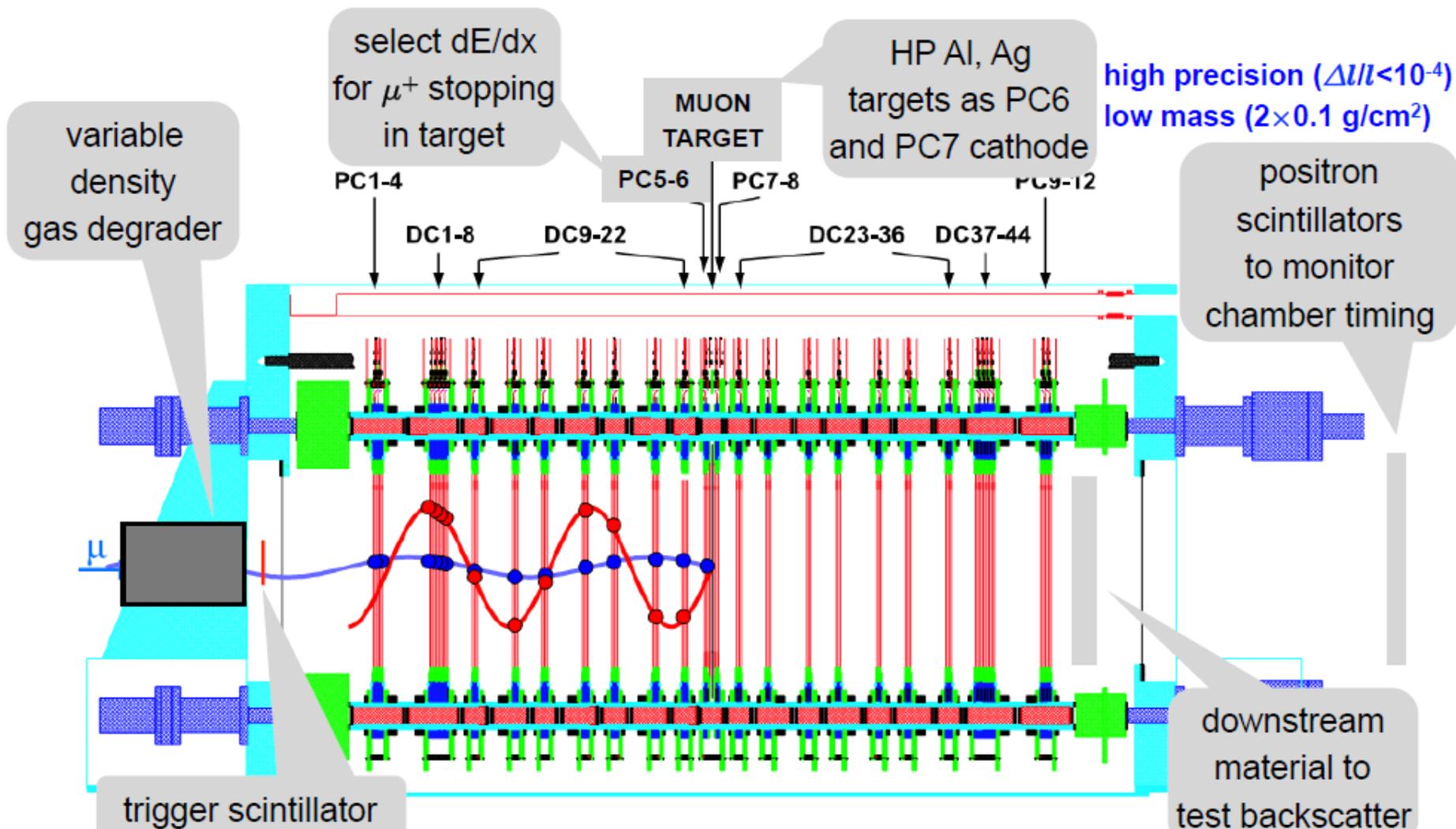
3. Потери энергии позитрона вдоль оси Z равны  $E(Z) = E_0 - dE(Z, \cos=0) / |\cos\theta|$ .

Формула верна для всех элементов детектора (газ, проволоки, фольги из майлара).

►  $E_0$  – энергия позитрона в момент распада может быть вычислена без знания потерь энергии в мишени и детекторе. Это проверено с точностью 10keV (требование - 10keV).

4. Максимальный импульс позитрона ( $p_e = 52.8356 \text{ MeV}/c^2$ ) используется для энергетической калибровки детектора. Не требуется внешних источников энергетической калибровки.

# Конструкция детектора





# Спектрометр на мюонном канале



# Разработка и утверждение проекта

1990 – Проект предложен физиками Центра.

1990-1996 – Разработка конструкции детектора, изготовление в России точных ( $<\pm 1\mu\text{m}$ ) деталей дрейфовых камер и вспомогательных устройств общей стоимостью более 1.5 млн. долларов. Разработка и испытания электроники съёма информации с дрейфовых камер. Монте-Карло оценки всех ошибок эксперимента.

1993 – Проект E614 утверждён ЕЕС TRIUMF с высшим приоритетом. Авторы проекта – физики Центра.

MEETING OF THE

TRIUMF

EXPERIMENTS EVALUATION COMMITTEE

DECEMBER 9 & 10, 1993

E.614      PRECISION MEASUREMENT OF MUON DECAY  
PARAMETERS

V. SELIVANOV

The experiment has the goal of measuring the Michel parameters of muon decay with a precision of  $10^{-4}$ , a factor of 5-20 improvement on the current values. Such an improvement will lead to important constraints on electroweak theory. In particular, it will set a limit of  $> 800 \text{ GeV}$  on the mass of a right-handed boson.

The committee recommends approval of the proposal with high priority and cautions the TRIUMF management to monitor the progress. The committee would like to receive a report on this experiment in a year showing that the above concerns have been satisfactorily resolved.

# Выполнение проекта

**1996** – Образована международная коллаборация физиков России, Канады и США для выполнения проекта. Руководители проекта – G. Marshall (TRIUMF), В. Селиванов, R. Tribble (Texas A&M). Эксперимент вошёл в число приоритетных проектов Канады.

**1997-2003** – Изготовление и испытания детектора.

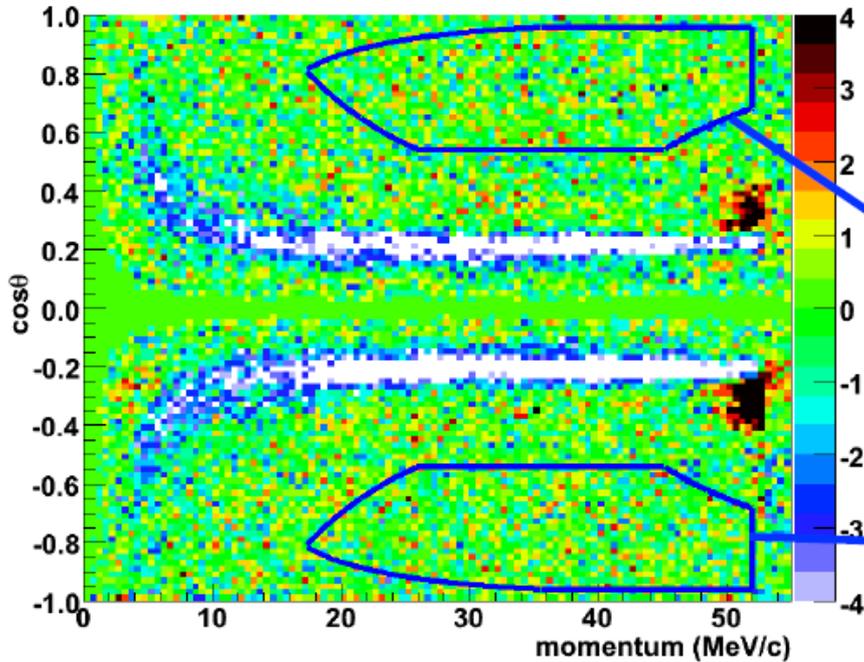
**2003-2006** – Набор статистики более  $10^9$  случаев  $\mu \rightarrow e$  распадов для измерения параметров с точностью  $\sim 10^{-3}$  и оценок систематических ошибок. Публикация результатов измерения  $\rho$ ,  $\delta$  и  $P_{\mu\xi}$  параметров. Точность измерения параметров улучшена в 2-3 раза.

**2007-2012** – Переделки детектора, модификация программ, набор и обработка  $\sim 10^{11}$  случаев. Улучшение экспериментальной точности параметров в  $\sim 10$  раз. Публикация окончательных результатов.

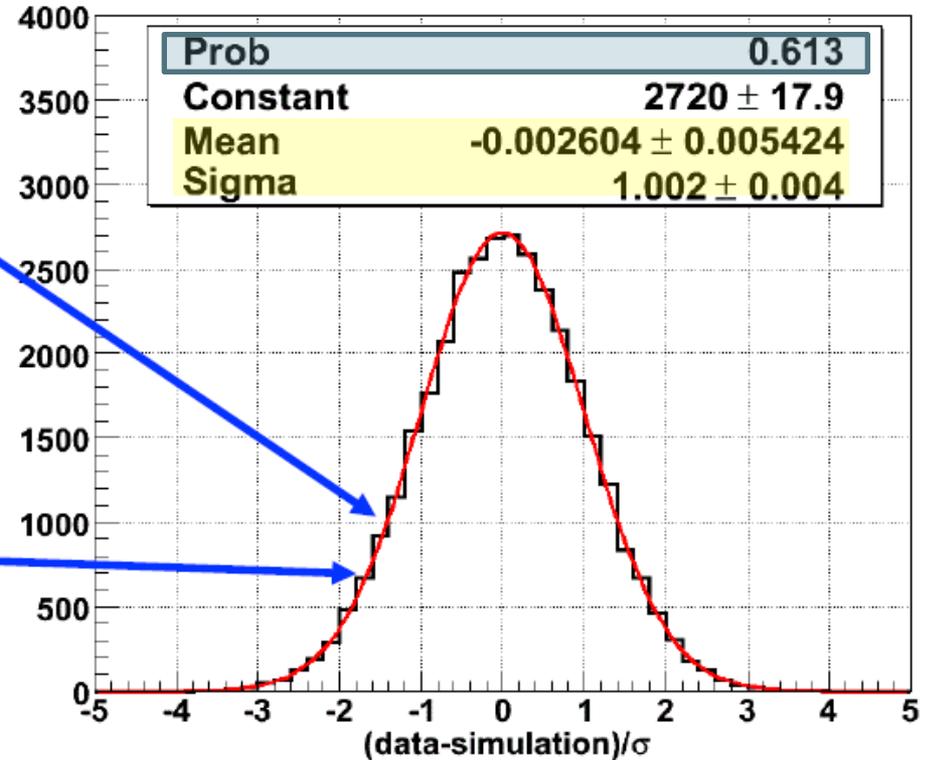
# Эксперимент

1. Разработка программ реконструкции экспериментальных данных и результатов Монте-Карло моделирования (GEANT) данных с учётом всех процессов и взаимодействий мюонов и позитронов с детектором и систематических ошибок. Доказано, что программа дает приемлемый уровень достоверности вплоть до суммарной статистики  $\sim 10^{12}$ .
2. Моделируется влияние систематических ошибок на параметры Мишеля (радиационные поправки, внешние условия, взаимодействия мюона и позитрона с материалом детектора и т.д. – всего 19 источников ошибок).
3. Моделируется (GEANT) двухмерный спектр позитронов с неизвестными параметрами Мишеля и со статистикой в 3-5 бóльшей экспериментальной. Спектр обрабатывается и определяются параметры Мишеля  $m_k$ , которые остаются скрытыми – “слепой анализ” (“blinding analysis”).
4. Обрабатывается экспериментальный спектр. Найденные экспериментальные значения параметров Мишеля  $m_j$  также остаются скрытыми.
5. Пересчитывается теоретический моделированный спектр для значений  $m_j$ .
6. Вычисляется двухмерная поканальная разница между экспериментальным и пересчитанным теоретическим спектрами.
7. Эксперимент принимается, если эта разница статистически значима (приемлемый уровень достоверности) как на следующем слайде.

Normalised residuals for nominal set (s87)



Residuals in fiducial only (all sets)



- ▶ Fiducial region:  $p < 52.0$  MeV/c,  $0.54 < |\cos\theta| < 0.96$ ,
- ▶  $10.0$  MeV/c  $< p_T < 38.0$  MeV/c,  $|p_z| > 14.0$  MeV/c
- ▶ All data sets:  $11 \times 10^9$  events,  $0.55 \times 10^9$  in  $(p, \cos\theta)$  fiducial
- ▶ Simulation sets: 2.7 times data statistics

# J. Beringer et al. (PDG), Physical Review, D86, 010001 (2012)

## $\rho$ PARAMETER

(V-A) theory predicts  $\rho = 0.75$ .

VALUE	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	CHG	COMMENT
<b><math>0.74979 \pm 0.00026</math></b>					<b>OUR AVERAGE</b>
$0.74977 \pm 0.00012 \pm 0.00023$		<sup>30</sup> BAYES	11	TWST +	Surface $\mu^+$
$0.7518 \pm 0.0026$		DERENZO	69	RVUE	

## $\delta$ PARAMETER

(V-A) theory predicts  $\delta = 0.75$ .

VALUE	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	CHG	COMMENT
<b><math>0.75047 \pm 0.00034</math></b>					<b>OUR AVERAGE</b>
$0.75049 \pm 0.00021 \pm 0.00027$		<sup>39</sup> BAYES	11	TWST +	Surface $\mu^+$
$0.7486 \pm 0.0026 \pm 0.0028$		<sup>40</sup> BALKE	88	SPEC +	Surface $\mu^+$

## $|(\xi \text{ PARAMETER}) \times (\mu \text{ LONGITUDINAL POLARIZATION})|$

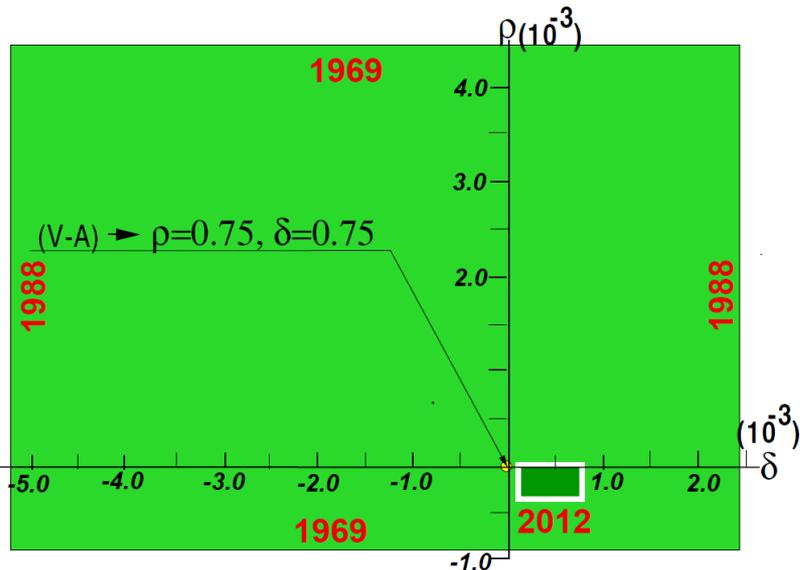
(V-A) theory predicts  $\xi = 1$ , longitudinal polarization = 1.

VALUE	DOCUMENT ID	TECN	CHG	COMMENT
<b><math>1.0009^{+0.0016}_{-0.0007}</math></b>				<b>OUR AVERAGE</b>
$1.00084 \pm 0.00029^{+0.00165}_{-0.00063}$	BUENO	11	TWST	Surface $\mu^+$ beam
$1.0027 \pm 0.0079 \pm 0.0030$	BELTRAMI	87	CNTR	SIN, $\pi$ decay in flight

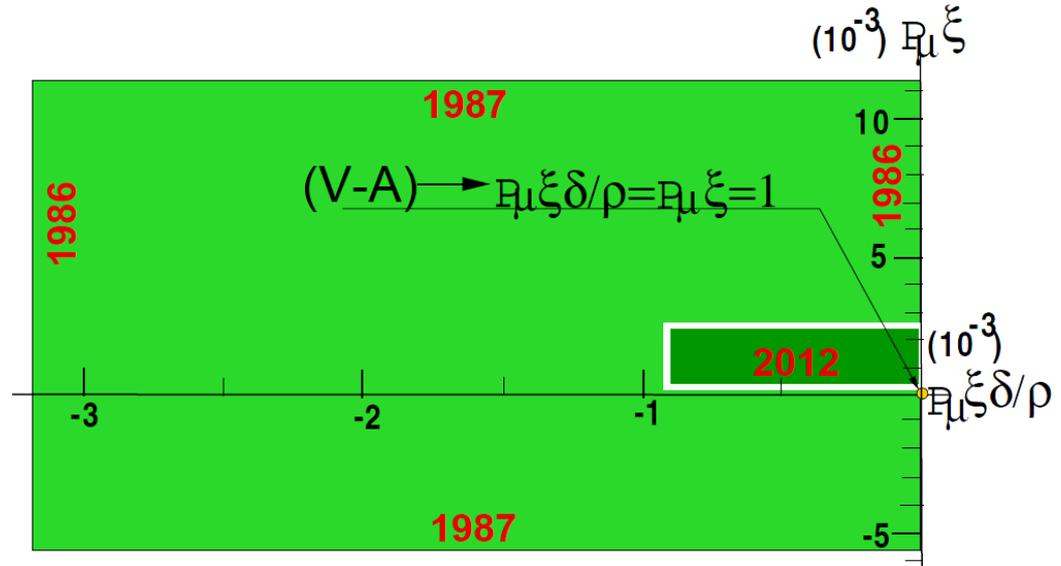
## $\xi \times (\mu \text{ LONGITUDINAL POLARIZATION}) \times \delta / \rho$

VALUE	CL%	DOCUMENT ID	TECN	CHG	COMMENT
$1.00179^{+0.00156}_{-0.00071}$		<sup>44</sup> BAYES	11	TWST +	Surface $\mu^+$ beam

# Результаты



**Объём допустимых значений параметров уменьшен в 111 раз**

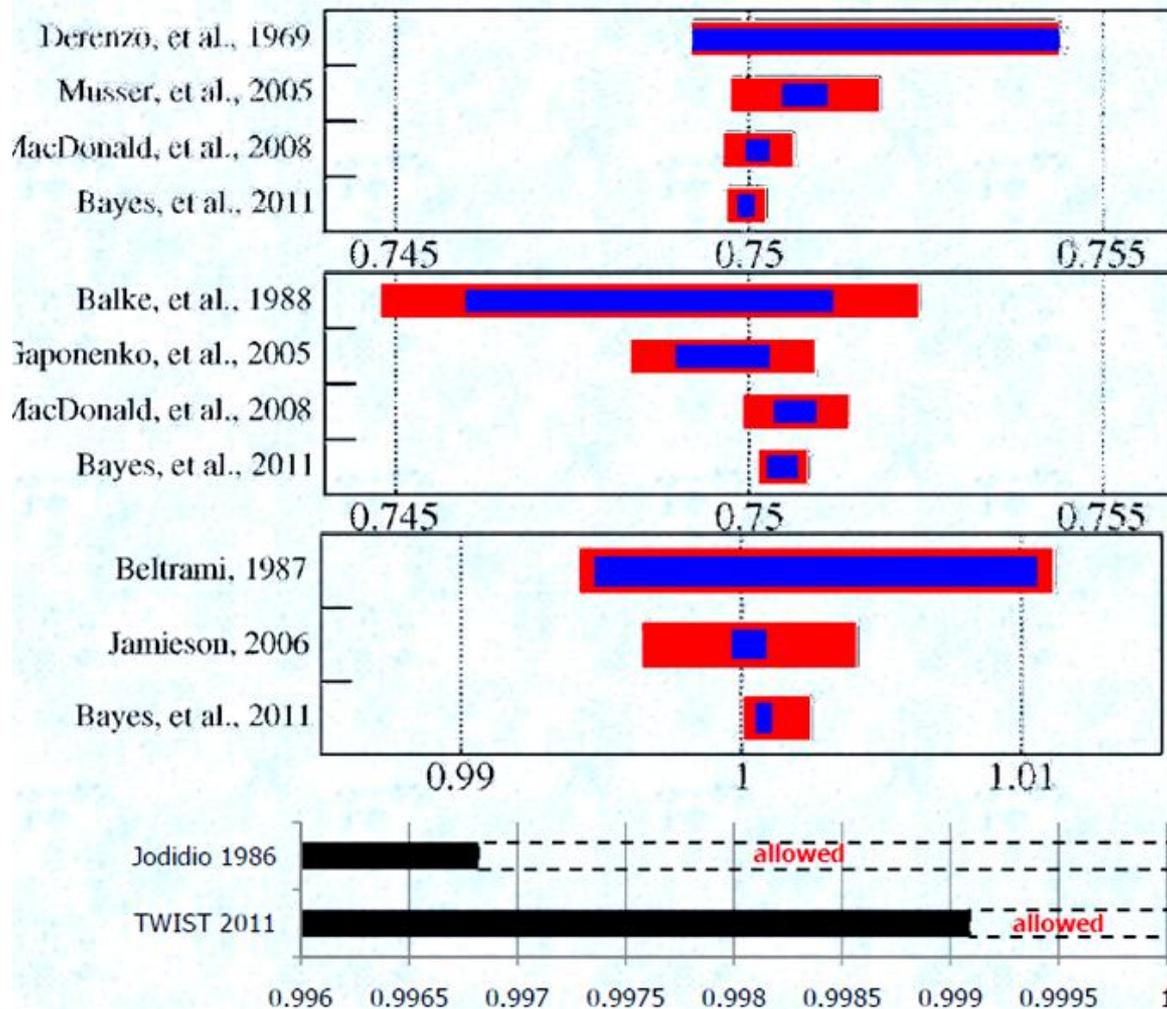


**Объём допустимых значений параметров уменьшен в 26 раз**

Экспериментальные ограничения на константы электрослабых взаимодействий  $g_{\mu\nu}^Y$ .  $Y=S$  (скаляр),  $V$  (вектор) или  $T$  (тензор). 90% уровень значимости. Данные 1988 г. – Physics Letters, B204(1988)1, данные 2012 г. – Physical Review, D85(2012)092013-1.

	$ g_{RR}^S $	$ g_{LR}^S $	$ g_{RL}^S $	$ g_{LL}^S $	$ g_{RR}^V $	$ g_{LR}^V $	$ g_{RL}^V $	$ g_{LL}^V $	$ g_{LR}^T $	$ g_{RL}^T $
1988г.	<0.066	<0.125	<0.424	<0.550	<0.033	<0.060	<0.110	>0.960	<0.036	<0.122
2012г.;E614	<0.035	<0.050	<0.420	<0.550	<0.017	<0.023	<0.105	>0.960	<0.015	<0.105
Улучшение	1.89	2.5	1.01	1.0	1.94	2.61	1.05	1.0	2.4	1.62
V – A	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

**Допустимый объём констант уменьшен в 98.65 раз.**



$$\rho = 0.74977 \pm 0.00012 \text{ (stat)} \\ \pm 0.00023 \text{ (syst)}$$

$$\delta = 0.75049 \pm 0.00021 \text{ (stat)} \\ \pm 0.00027 \text{ (syst)}$$

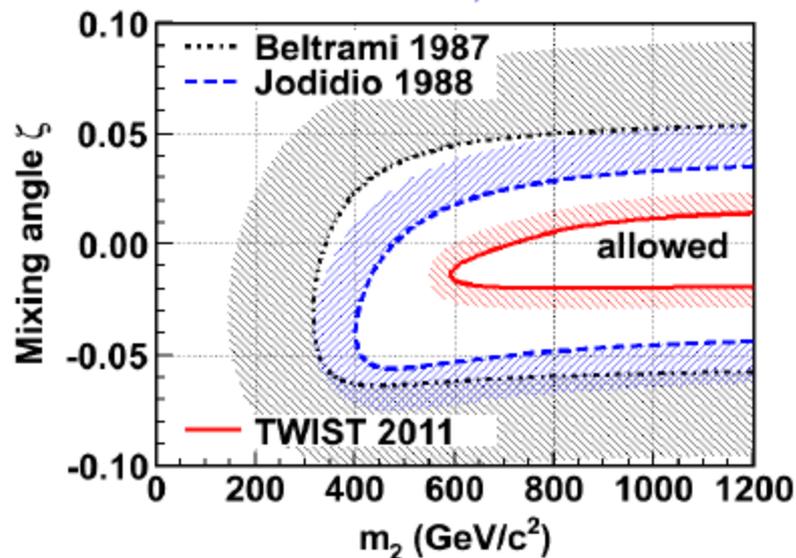
$$P_{\mu}\xi = 1.00084 \pm 0.00029 \text{ (stat)} \\ +0.00165 \\ -0.00063 \text{ (syst)}$$

$$P_{\mu}\xi\delta/\rho > 0.99909 \text{ (90\%CL)} \\ \text{from global analysis}$$

Основные результаты опубликованы в 9 статьях в Physical Review, Physical Review Letters, Nuclear Instruments and Methods, и представлены в более чем в 120 докладах на Международных конференциях. Статьи цитировались более 170 раз. Семь участников проекта (А. Garonenko, В. Jamieson, J.R. Musser, R. MacDonald, A.Hillairet, R.D. Bayes, J.Vuono) защитили диссертации (PhD).

# Left-Right Symmetric limit comparison

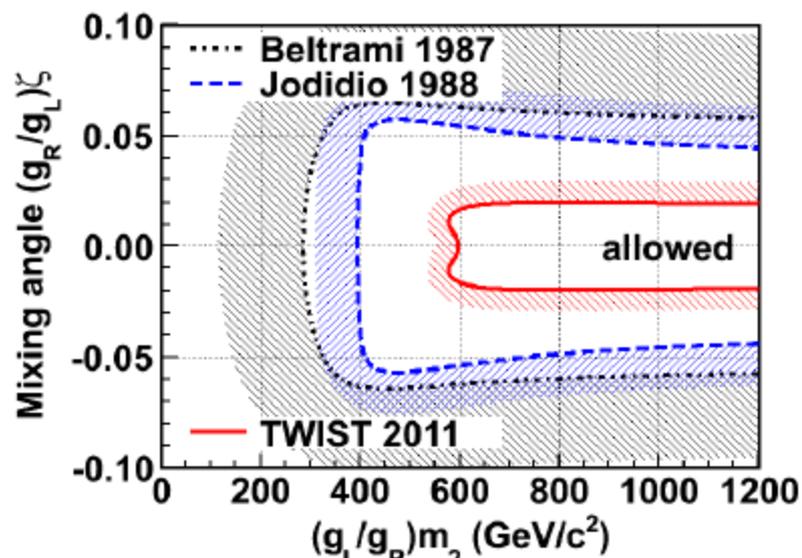
“manifest” LRS, 90%CL



$m_2 > 592 \text{ GeV}/c^2$   
 $-0.020 < \zeta < +0.017$

J.F. Bueno et al., Phys. Rev. D 84, 032005 (2011).

generalized or non-manifest LRS, 90%CL



$(g_L/g_R)m_2 > 578 \text{ GeV}/c^2$   
 $-0.020 < (g_R/g_L)\zeta < +0.020$

## 2003

N.L. Rodning,<sup>4</sup> P. Amaudruz,<sup>3</sup> W. Andersson,<sup>3</sup> M. Comyn,<sup>3</sup> Yu. Davydov,<sup>1,3</sup>  
P. Depommier,<sup>6</sup> J. Doornbos,<sup>3</sup> W. Faszler,<sup>3</sup> C.A. Gagliardi,<sup>2</sup> D.R. Gill,<sup>3</sup>  
P. Green,<sup>4</sup> P. Gumplinger,<sup>3</sup> J.C. Hardy,<sup>2</sup> M. Hasinoff,<sup>5</sup> R. Helmer,<sup>3</sup>  
R. Henderson,<sup>3</sup> A. Khruchinsky,<sup>1</sup> P. Kitching,<sup>4</sup> D.D. Koetke,<sup>10</sup> E. Korkmaz,<sup>7</sup>  
Y. Lachin,<sup>1</sup> D. Maas,<sup>3</sup> J.A. Macdonald,<sup>3</sup> R. Manweiler,<sup>10</sup> T. Mathie,<sup>8</sup>  
J.R. Musser,<sup>2</sup> P. Nord,<sup>10</sup> A. Olin,<sup>3</sup> D. Ottewell,<sup>3</sup> R. Openshaw,<sup>3</sup>  
L. Piilonen,<sup>11</sup> T. Porcelli,<sup>7</sup> J-M. Poutissou,<sup>3</sup> R. Poutissou,<sup>3</sup> M.A. Quraan,<sup>4</sup>  
J. Schaapman,<sup>4</sup> V. Selivanov,<sup>1</sup> G. Sheffer,<sup>3</sup> B. Shin,<sup>8</sup> F. Sobratce,<sup>4</sup>  
J. Soukup,<sup>4</sup> T.D.S. Stanislaus,<sup>10</sup> G. Stinson,<sup>4</sup> R. Tacik,<sup>8</sup> V. Torokhov,<sup>1</sup>  
R.E. Tribble,<sup>2</sup> M.A. Vasiliev,<sup>2</sup> H-C. Walter,<sup>3</sup> D. Wright<sup>3</sup>

1) RRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

2) Texas A&M University, College Station, Texas, USA

3) TRIUMF, Vancouver, British Columbia, Canada

4) University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada

5) University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada

6) University of Montreal, Montreal, Quebec, Canada

7) University of Northern British Columbia, Prince George, BC, Canada

8) University of Regina, Regina, Saskatchewan, Canada

9) University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada

10) Valparaiso University, Valparaiso, Indiana, USA

11) Virginia Polytechnic Institute and State University,

Blacksburg, Virginia, USA

2005



