

$e^+e^-$  коллайдер ВЭПП-2000

И

МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ МЮОНА-



ТЕСТ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

Ю.М. Шатунов

Научная сессия СО РАН

07.10. 2018

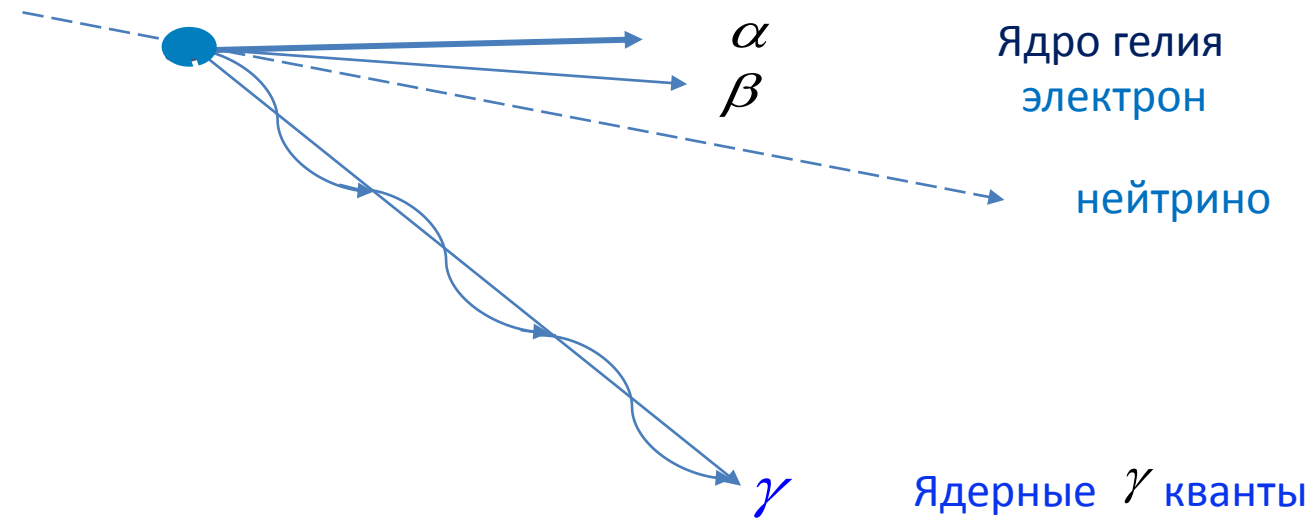
# Содержание

- Физика высоких энергий и ускорители частиц
- Накопители со встречными  $e^+e^-$  пучками в ИЯФ
- Результаты измерений на ВЭПП-2М
- Стандартная модель элементарных частиц
- Магнитные моменты электрона и мюона
- Измерение аномального магнитного момента мюона
- Эксперимент в BNL
- ВЭПП-2М  ВЭПП-2000
- BNL  FNAL

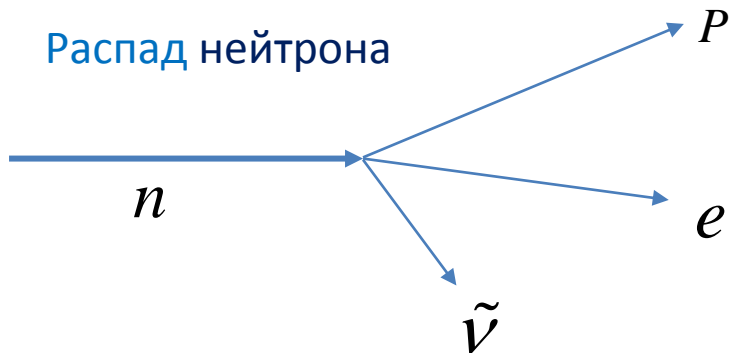
1896

# Физика до ускорителей

$\beta$  Распад ядер - радиоактивность



Распад нейтрона

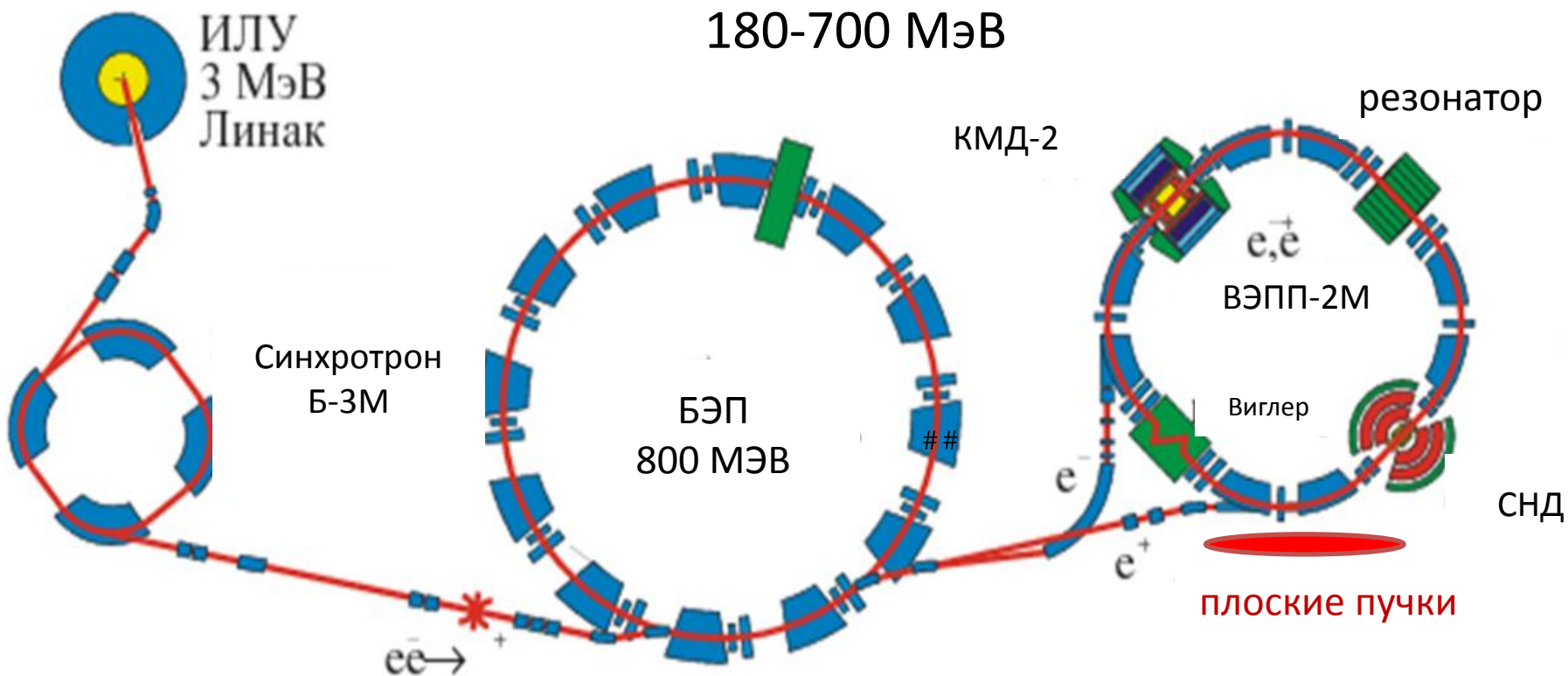


# PROTON SYNCHROTRONS

<a href="#">Космотрон</a>	<a href="#">Брукхейвенская национальная лаборатория</a>	1953—1968	(72 метра)	Протон	3.3 <a href="#">GeV</a>	Появление мезонов.
<a href="#">Бирмингемский синхротрон</a>	<a href="#">Бирмингемский университет</a>	1953—1967		Протон	1 GeV	
<a href="#">Беватрон</a>	Berkeley Rad Lab i.e. LBNL	1954~1970	«Race track»	Протон	6.2 GeV	Антипротоны
<a href="#">Сатурн</a>	<a href="#">Сакле</a> , Франция				3 GeV	
<a href="#">Синхрофазотрон</a>	<a href="#">Дубна</a> , Россия	Декабрь 1957—2003	Круг $\varnothing$ 60 м	Протон	10 GeV	
<a href="#">Zero Gradient Synchrotron</a>	<a href="#">Argonne National Laboratory</a>	1963—1979			12.5 GeV	
<a href="#">Proton Synchrotron</a>	<a href="#">ЦЕРН</a>	1959 — н. в.	Кольцевой круг	Протон	28 GeV	Используется БАК
<a href="#">Proton Synchrotron Booster</a>	<a href="#">ЦЕРН</a>	1972 — н. в.	Кольцевой синхрофазотрон	заряженные частицы	1.4 GeV	
<a href="#">SPS</a>		1980 — н. в.	Кольцевой синхрофазотрон	Заряженные частицы	480 GeV	Компас, OPERA и ICARUS
<a href="#">Alternating Gradient Synchrotron</a>	<a href="#">Брукхейвенская национальная лаборатория</a>	1960-	Кольцевой	протон, дейтерий, тритий, медь	33 GeV	<a href="#">J/ψ</a> , мюонное <a href="#">нейтрино</a> , <a href="#">CP-нарушение</a> в <a href="#">каонах</a> , injects heavy ions and polarized protons into <a href="#">RHIC</a>

Ускоритель	Месторасположение	Годы работы	Форма	Электронная энергия	Позитронная энергия	Эксперименты	Важнейшие открытия
<a href="#">AdA</a>	Италия-Франция	1961—1964	Кольцевой, 3 метра	250 MeV	250 MeV		<a href="#">Эффект Тушека</a>
<a href="#">CBX</a>	Стэнфорд	1962—1967	2 кольца, 12 м	300 MeV	300 MeV		$e^-e^-$ interactions
<a href="#">VEP-1 (e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>)</a>	Новосибирск	1964—1968	2 кольца	130 MeV	130 MeV		$e^-e^-$ scattering; QED
VEPP-2	Новосибирск	1965—1974	, 11.5 м	700 MeV	700 MeV	OLYA, <a href="#">CMD</a>	multihadron production (1966), $e^+e^- \rightarrow \phi$ (1966),
<a href="#">SPEAR</a>	<a href="#">SLAC</a>	1972—1990(?)				Mark	Discovery of Charmonium states
<a href="#">VEPP-2M</a>	Новосибирск	1974-2000	17.88 м	700 MeV	700 MeV	<a href="#">ND</a> , <a href="#">SND</a> , <a href="#">CMD-2</a>	radiative decays of $\rho$ , $\omega$ , and $\phi$ mesons
<a href="#">DORIS</a>	<a href="#">DESY</a>	1974—1993	300m	5 GeV	5 GeV	ARGUS, PLUTO	Осциляция
<a href="#">PETRA</a>	DESY	1978—1986	2 km	20 GeV	20 GeV	MARK-J, PLUTO	Открытие глюона в трёх событиях
<a href="#">CESR</a>	Корнеллский университет	1979-2002	, 768m	6 GeV	6 GeV		
	<a href="#">SLAC</a>	1980—1990(?)				Mark II	
<a href="#">SLC</a>		1988—1998(?)		45 GeV	45 GeV	<a href="#">SLD</a> , Mark II	First linear collider
LEP	<a href="#">ЦЕРН</a>	1989-2000	27 km	104 GeV	104 GeV	<a href="#">Aleph</a> , <a href="#">Delphi</a> , <a href="#">Opal</a> , <a href="#">L3</a>	
<a href="#">BEPC</a>	Китай	1989-2004	Кольцевой, 240m	2.2 GeV	2.2 GeV	<a href="#">Beijing Spectrometer</a>	
<a href="#">VEPP-4M</a>	Новосибирск	1994-	366m	6.0 GeV	6.0 GeV	<a href="#">KEDR</a>	
	SLAC	1998-2008	2.2 km	9 GeV	3.1 GeV		
	<a href="#">KEK</a>	1999-2009	3 km	8.0 GeV	3.5 GeV		
DAFNE	Италия	1999-	98m	0.7 GeV	0.7 GeV	<a href="#">KLOE</a>	Crab-waist collisions (2007)
		2002-2008	768m	6 GeV	6 GeV	<a href="#">CHESS</a> , <a href="#">CLEO-c</a>	
<a href="#">VEPP-2000</a>	Новосибирск	2006-	24.4m	1.0 GeV	1.0 GeV	<a href="#">SND</a> , <a href="#">CMD-3</a>	5
			Кольцевой.			<a href="#">Beijing</a>	

# ВЭПП-2М (1975-2000)

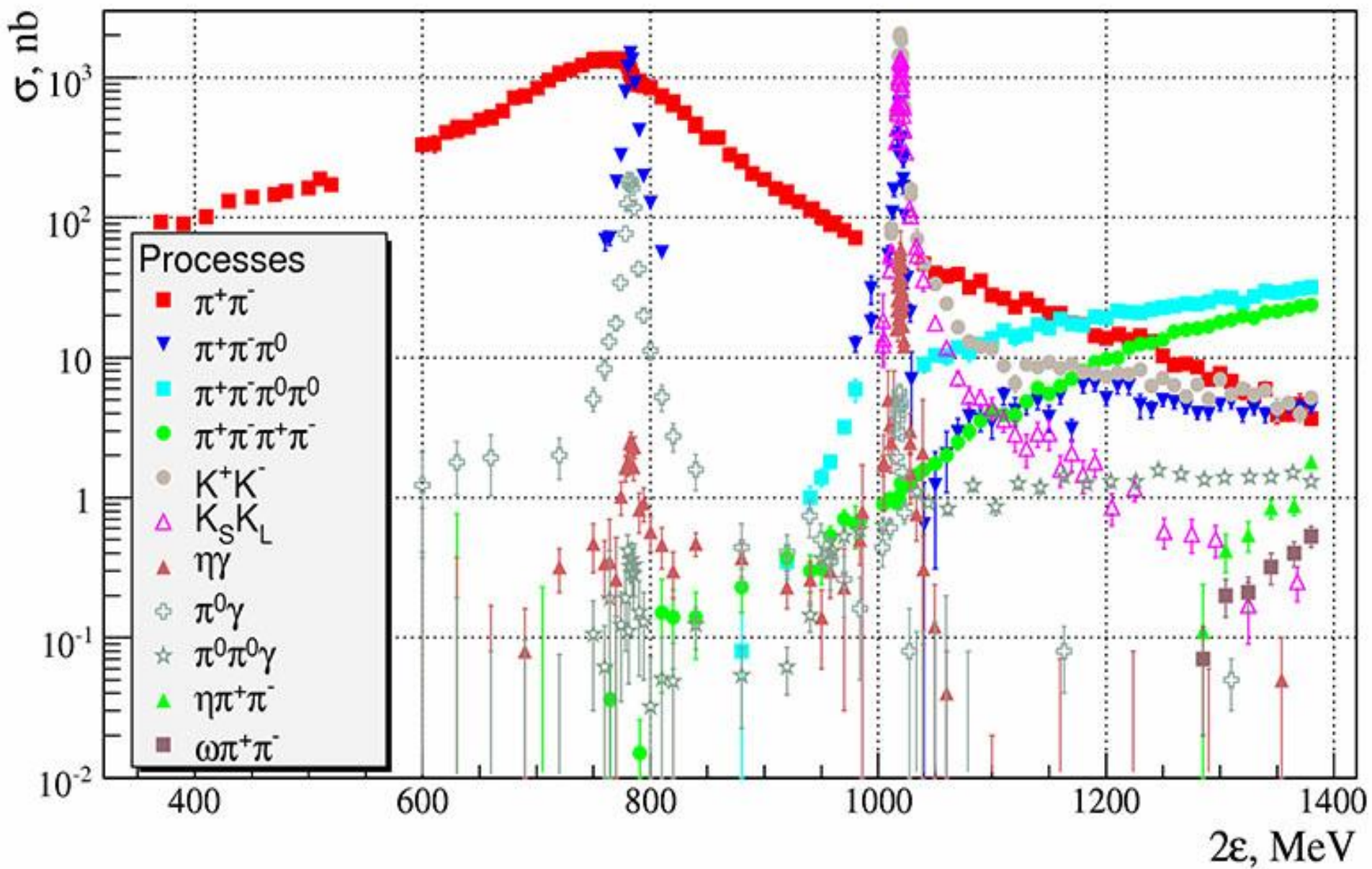


Светимость:

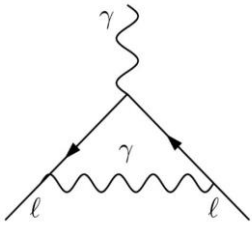
$$L = \frac{N_1 N_2}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*} \cdot f_0 = \frac{\pi \cdot \gamma^2 \cdot \xi_x \xi_y \varepsilon_x}{r_e^2 \beta_z} \cdot f_0 = 3 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1};$$

Параметр встречных пучков:

$$\xi_i = \frac{N r_e \beta_i^*}{2\pi\gamma (\sigma_x^* + \sigma_y^*) \sigma_i^*}; \quad \xi_z = 0.05, \quad \xi_x = 0.02.$$



# КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА



Диаграммы Ферми

$$a_{\mu} \approx \frac{\alpha}{2\pi}; \quad \alpha = \frac{1}{137}$$

Постоянная тонкой структуры

$$a_{e^{-}}^{\text{эксп}} = 1\,159\,652\,193(4) \cdot 10^{-12},$$

$$a_{e^{+}}^{\text{эксп}} = 1\,159\,652\,222(50) \cdot 10^{-12},$$

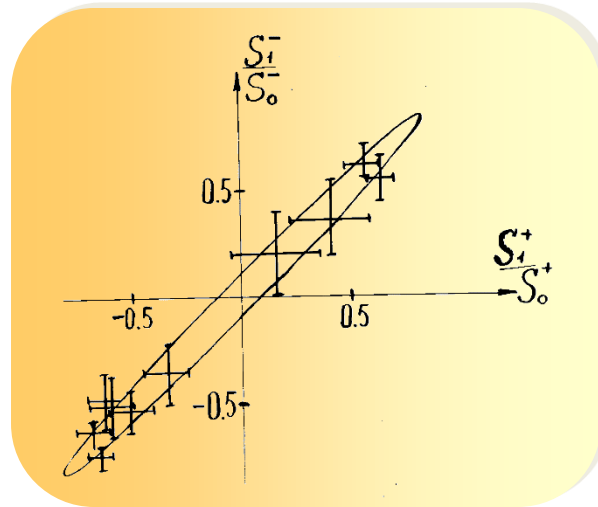
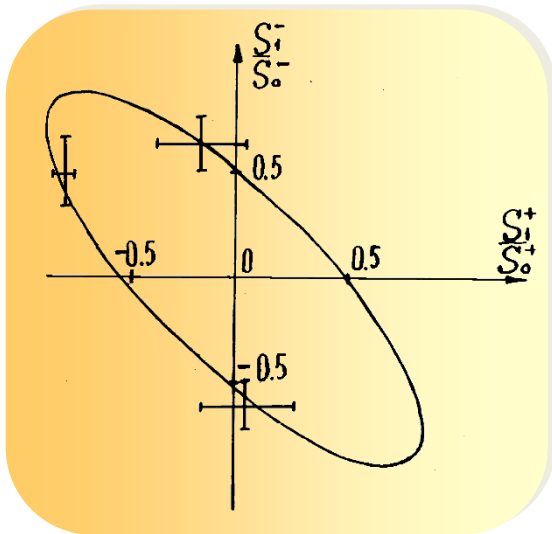
$$a_{\mu^{+}}^{\text{эксп}} = 1\,165\,911(11) \cdot 10^{-9},$$

$$a_{\mu^{-}}^{\text{эксп}} = 1\,165\,937(12) \cdot 10^{-9},$$

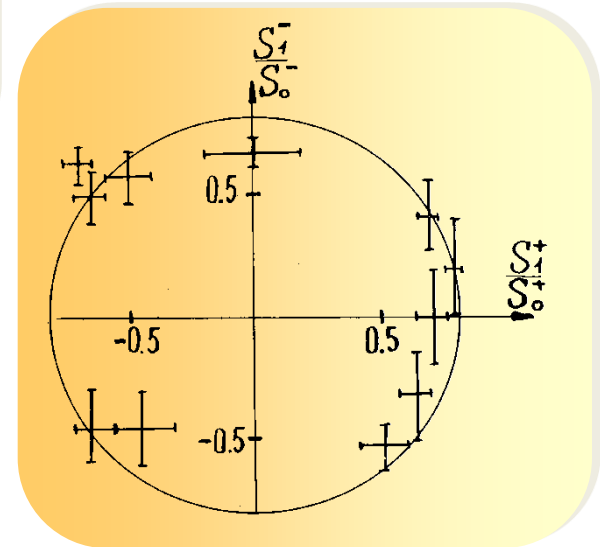


# e+e- anomalous magnetic moments comparison

30 B



20 B



VEPP-2M (1987)

$$\frac{\gamma^- \mu'(e^-) - \gamma^+ \mu'(e^+)}{\gamma \mu_0} = a(e^-) - a(e^+) < 1 \cdot 10^{-11}$$



**Стандартная модель** — это современная теория строения и взаимодействий элементарных частиц, многократно проверенная экспериментально. Эта теория базируется на очень небольшом количестве постулатов и позволяет теоретически предсказывать свойства тысяч различных процессов в мире элементарных частиц. В подавляющем большинстве случаев эти предсказания подтверждаются экспериментом, иногда с исключительно высокой точностью.



# Адроны и кварки

u (+2/3)	d(-1/3)	s(-1/3)
5 МэВ	7 МэВ	150 МэВ

$$\begin{array}{ccc}
 u\bar{u} & u\bar{d} & u\bar{s} \\
 d\bar{u} & d\bar{d} & d\bar{s} \\
 s\bar{u} & s\bar{d} & s\bar{s}
 \end{array}$$

МЕЗОНЫ  $L = 0; S = 0$

$$\pi^+(140 \text{ МэВ}) = u\bar{d}, \quad \pi^-(140 \text{ МэВ}) = \bar{u}d, \quad \pi^0(135 \text{ МэВ}) = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}),$$

$$\eta^0(500 \text{ МэВ}) = \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}), \quad \eta'(960 \text{ МэВ}) = \frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$$

$$K^+ = u\bar{s}, \quad K^- = s\bar{u}, \quad K^0 = d\bar{s}, \quad \bar{K}^0 = \bar{d}s$$

МЕЗОНЫ  $L = 0; S = 1$

$$\underbrace{\rho^+, \rho^-, \rho^0}_{770 \text{ МэВ}} \quad \underbrace{K^{*+}, K^{*-}, K^{*0}, \bar{K}^{*0}}_{892 \text{ МэВ}} \quad \omega^0 \quad \phi^0$$

783 МэВ    1020 МэВ

# Барионы и Гипероны

u (+2/3)	d(-1/3)	s(-1/3)
5 МэВ	7 МэВ	150 МэВ

$J = 1/2$

$uud$	$\leftrightarrow$	$p$	938 МэВ
$udd$		$n$	939 МэВ

:(8)

$J = 3/2$

$ddd$	$udd$	$uud$	$uuu$	$\Delta^- \Delta^0 \Delta^+ \Delta^{++}$	1232 МэВ
$dds$	$uds$	$uus$		$\Sigma^- \Sigma^0 \Sigma^+$	1385 МэВ
$dss$	$uss$			$\Xi^- \Xi^0$	1530 МэВ
$sss$				$\Omega^-$	1672 МэВ

# Барионы и Гипероны

u (+2/3)	d(-1/3)	s(-1/3)
5 МэВ	7 МэВ	150 МэВ

$J = 1/2$

$uud$	$\leftrightarrow$	$p$	938 МэВ
$udd$		$n$	939 МэВ

$\vdots(8)$

$J = 3/2$

$ddd$	$udd$	$uud$	$uuu$	$\Delta^-$	$\Delta^0$	$\Delta^+$	$\Delta^{++}$	1232 МэВ
$dds$	$uds$	$uus$		$\Sigma^-$	$\Sigma^0$	$\Sigma^+$		1385 МэВ
	$dss$	$uss$		$\Xi^-$	$\Xi^0$			1530 МэВ
	$sss$			$\Omega^-$				1672 МэВ

# Глюоны. Цвет

## Квантовая хромодинамика

$$\begin{aligned}
 g_1 &= (\kappa\tilde{c} + c\tilde{\kappa}) / \sqrt{2}, & g_2 &= -i(\kappa\tilde{c} - c\tilde{\kappa}) / \sqrt{2} \\
 g_4 &= (\kappa\tilde{\jmath} + \jmath\tilde{\kappa}) / \sqrt{2}, & g_5 &= -i(\kappa\tilde{\jmath} - \jmath\tilde{\kappa}) / \sqrt{2} \\
 g_6 &= (c\tilde{\jmath} + \jmath\tilde{c}) / \sqrt{2}, & g_7 &= -i(c\tilde{\jmath} - \jmath\tilde{c}) / \sqrt{2} \\
 g_3 &= (\kappa\tilde{\kappa} - c\tilde{c}) / \sqrt{2}, & g_8 &= (\kappa\tilde{\kappa} + c\tilde{c} - 2\jmath\tilde{\jmath}) / \sqrt{6}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P=1, \quad J=1 \quad q_\kappa &\rightarrow q_{\jmath\kappa} + g_{\kappa\tilde{\jmath}}, & q_\kappa + g_{\tilde{\kappa}\jmath} &\rightarrow q_{\jmath\kappa} \\
 q_\kappa &\rightarrow q_c + g_{\kappa\tilde{c}}, & q_\kappa + g_{\tilde{\kappa}c} &\rightarrow q_c
 \end{aligned}$$

# Спин и магнитный момент электрона

1925г. лаборатория Эренфеста (Лейден)

Самюэл Гаудсмит Джордж Юленбек предложили рассматривать электрон как «вращающийся волчок», обладающий собственным

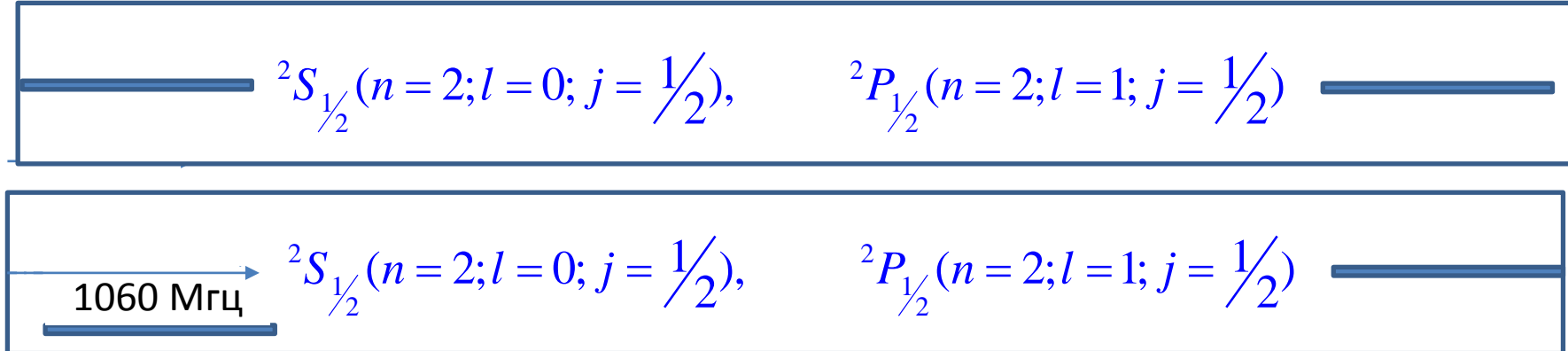
механическим моментом  $s = \frac{\hbar}{2}$  и собственным магнитным моментом, равным  $M = g \cdot \mu_0$  ( $\mu_0 = e \cdot \hbar / 2 \cdot c$  – магнетон Бора)

1926 г. лаборатория Бора (Копенгаген)

Ловвелин Томасс – рел. уравнение движения спина в маг. поле:  $g = 2$

Тонкая структура атомных уровней !

## Лэмбовский сдвиг и аномальный магнитный момент

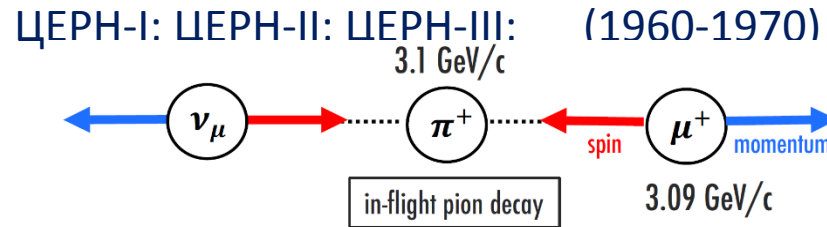
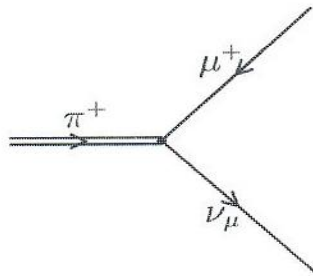


магнитный момент электрона: 1.00115965

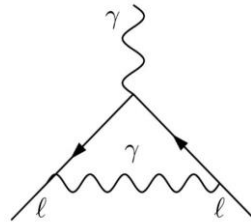
Лэмб У. Е., Ризерфорд Р. К. • [Нобелевская премия по физике 1955 г.](#)



# МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ МЮОНА



1)  $a_\mu \approx \alpha/2\pi$ ;  $\alpha = 1/137$



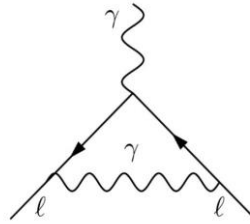
По аналогии с электронами

2) мюон рождается поляризованным при слабом распаде пионов.

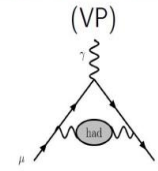
3) При распаде мюона  $\mu \rightarrow \vec{e} + \nu_e$  электрон вылетает в направлении спина мюона; т.е. мюон еще и сам себе поляриметр.

# Мюон $(g - 2)/2$

- Magnetic moment of Dirac particle:  $\vec{\mu} = g \frac{e\hbar}{2mc} \vec{s}$ , gyromagnetic factor  $g$  for point-like fermions = 2



Hadronic Vacuum Polarisation



This talk

- Higher order contributions make muon magnetic anomaly  $a_\mu \equiv (g - 2)/2 \neq 0$

$$a_\mu^{\text{theory(SM)}} = a_\mu^{\text{QED}} + a_\mu^{\text{had}} + a_\mu^{\text{weak}}$$

- $a_\mu^{\text{had,LO}}$  is calculated by integrating experimental  $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})$  1.00115965

$$a_\mu^{\text{had}} = \frac{\alpha^2}{3\pi^2} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds \frac{K(s)}{s} R(s)$$

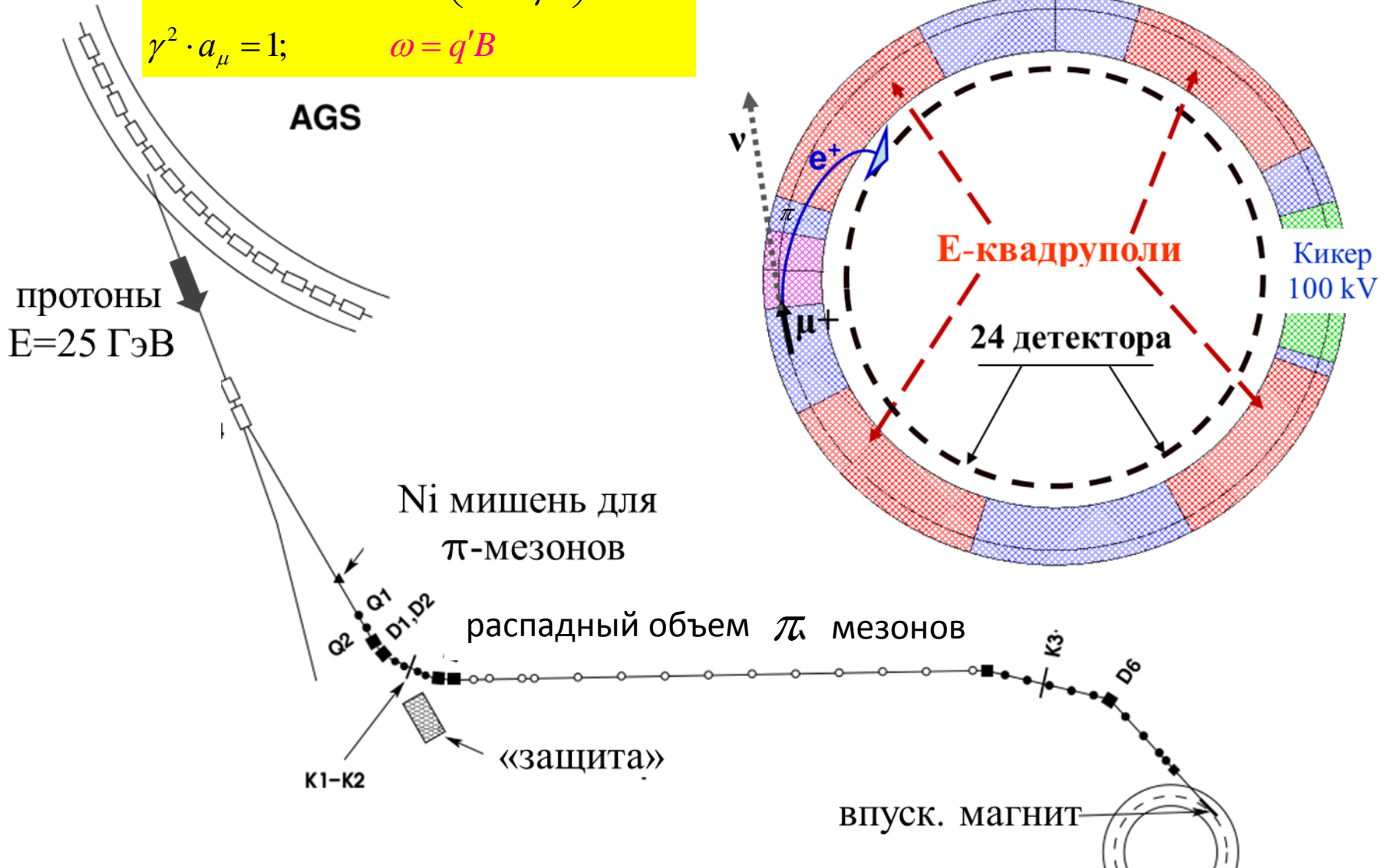
$$a_{\mu^+}^{\text{эксп}} = 1165911(11) \cdot 10^{-9}$$

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

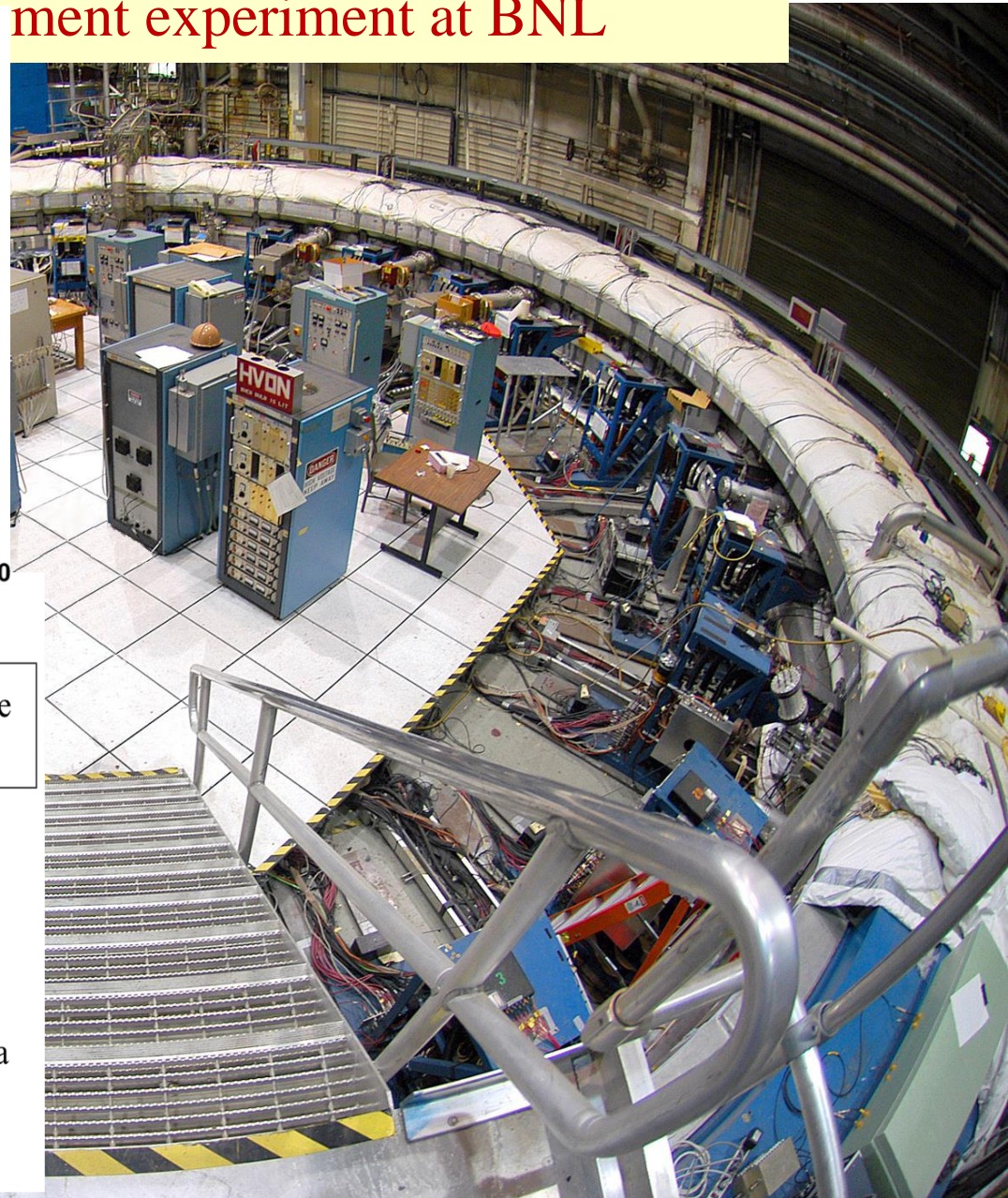
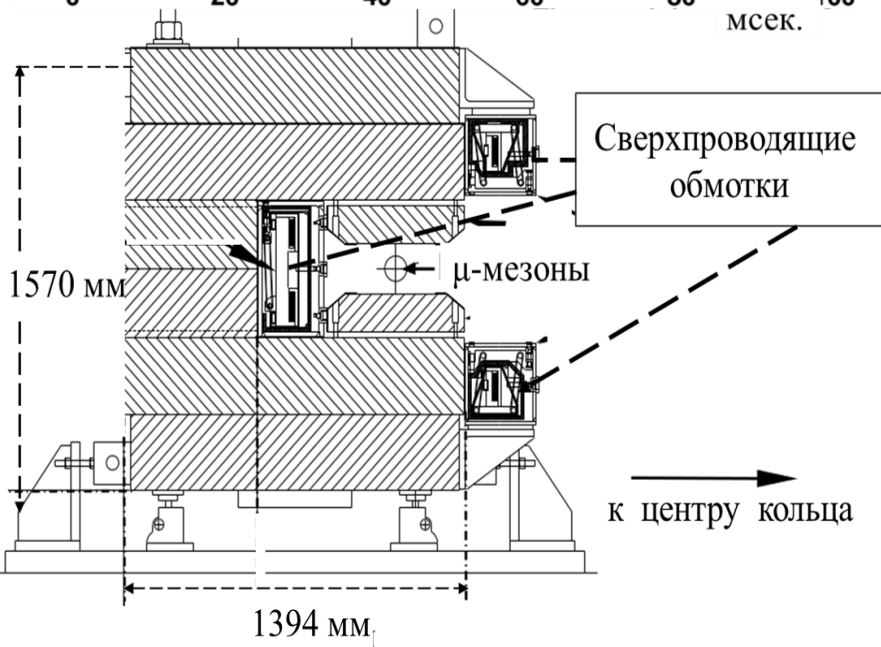
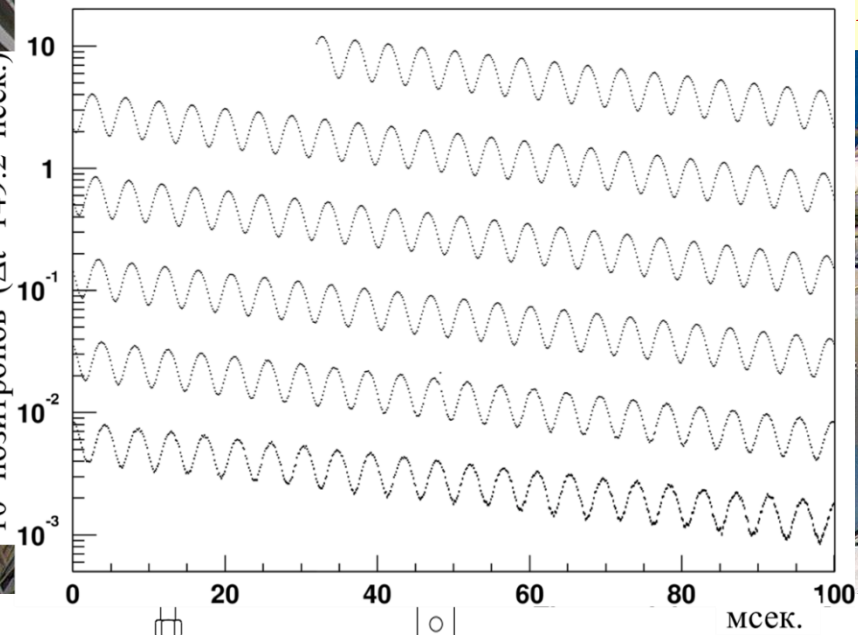
# Muon (g-2) experiment at BNL

$$\omega = \Omega - \omega_0 = q'B + q_0 \left( a_\mu - \frac{1}{\gamma^2} \right) [E \times V]$$

$$\gamma^2 \cdot a_\mu = 1; \quad \omega = q'B$$

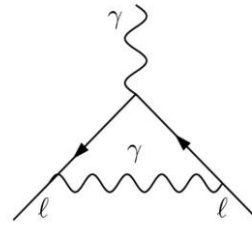


# ment experiment at BNL

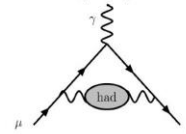


# Мюон $(g - 2)/2$

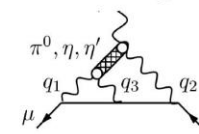
- Magnetic moment of Dirac particle:  $\vec{\mu} = g \frac{e\hbar}{2mc} \vec{s}$ , gyromagnetic factor  $g$  for point-like fermions = 2



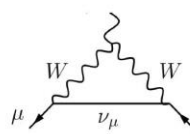
Hadronic Vacuum Polarisation (VP)



Hadronic light-by-light Scattering



Weak Interactions



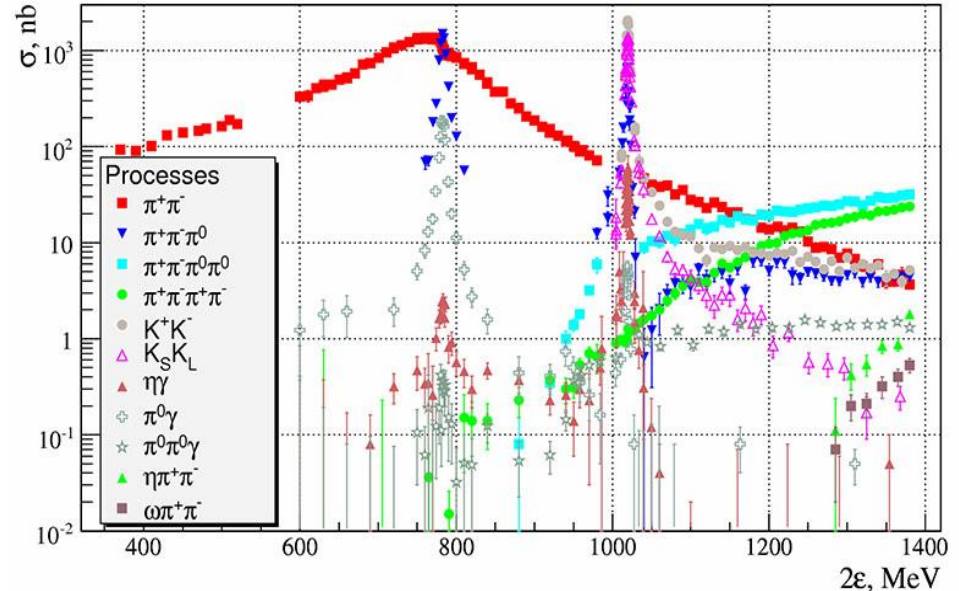
- Higher order contributions make muon magnetic anomaly  $a_\mu \equiv (g - 2)/2 \neq 0$

$$\mathbf{a}_\mu^{\text{theory(SM)}} = \mathbf{a}_\mu^{\text{QED}} + \mathbf{a}_\mu^{\text{had}} + \mathbf{a}_\mu^{\text{weak}}$$

- $a_\mu^{\text{had,LO}}$  is calculated by integrating experimental  $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})$

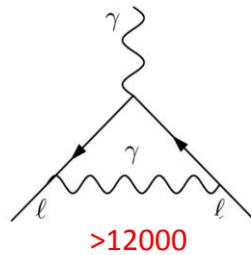
$$a_\mu^{\text{had}} = \frac{\alpha^2}{3\pi^2} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds \frac{K(s)}{s} R(s)$$

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

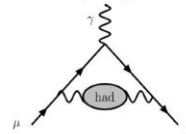


# Мюон $(g - 2)/2$

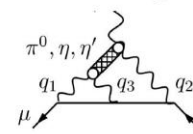
- Magnetic moment of Dirac particle:  $\vec{\mu} = g \frac{e\hbar}{2mc} \vec{s}$ , gyromagnetic factor  $g$  for point-like fermions = 2



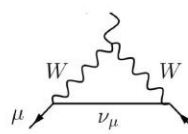
Hadronic Vacuum Polarisation (VP)



Hadronic light-by-light Scattering

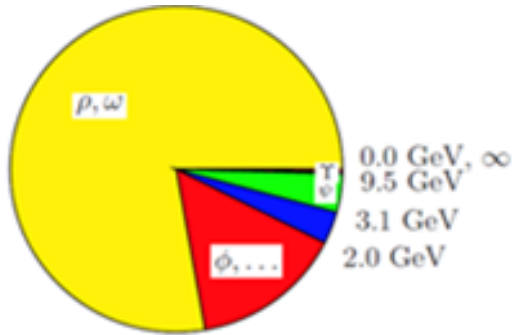


Weak Interactions

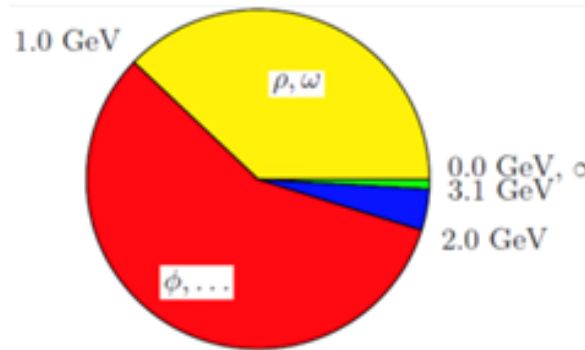


- Higher order contributions make muon magnetic anomaly  $a_\mu \equiv (g - 2)/2 \neq 0$

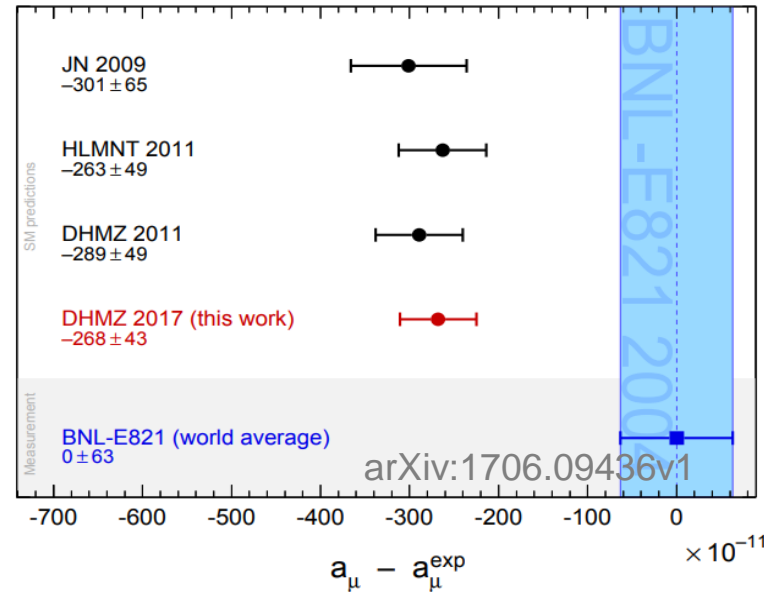
$$a_\mu^{\text{theory(SM)}} = a_\mu^{\text{QED}} + a_\mu^{\text{had}} + a_\mu^{\text{weak}}$$



$a_\mu$  integral



$a_\mu$  uncertainty



**High precision hadronic cross sections measurements in  $E_{\text{cm}} < 2 \text{ GeV}$  are needed**

# Final Report of the Muon E821 Anomalous Magnetic Moment Measurement at BNL

G.W. Bennett<sup>2</sup>, B. Bousquet<sup>10</sup>, H.N. Brown<sup>2</sup>, G. Bunce<sup>2</sup>, R.M. Carcy<sup>1</sup>, P. Cushman<sup>10</sup>,  
G.T. Danby<sup>2</sup>, P.T. Debevec<sup>8</sup>, M. Deile<sup>13</sup>, H. Deng<sup>13</sup>, W. Deninger<sup>8</sup>, S.K. Dhawan<sup>13</sup>,  
V.P. Druzhinin<sup>3</sup>, L. Duong<sup>10</sup>, E. Efsthadiadis<sup>1</sup>, F.J.M. Farley<sup>13</sup>, G.V. Fedotov<sup>3</sup>,  
S. Giron<sup>10</sup>, F.E. Gray<sup>8</sup>, D. Grigoriev<sup>3</sup>, M. Grosse-Perdekamp<sup>13</sup>, A. Grossmann<sup>7</sup>,  
M.F. Hare<sup>1</sup>, D.W. Hertzog<sup>8</sup>, X. Huang<sup>1</sup>, V.W. Hughes<sup>13†</sup>, M. Iwasaki<sup>12</sup>, K. Jungmann<sup>6,7</sup>,  
D. Kawall<sup>13</sup>, M. Kawamura<sup>12</sup>, B.I. Khazin<sup>3</sup>, J. Kindem<sup>10</sup>, F. Krienen<sup>1</sup>, I. Kronkvist<sup>10</sup>,  
A. Lam<sup>1</sup>, R. Larsen<sup>2</sup>, Y.Y. Lee<sup>2</sup>, I. Logashenko<sup>1,3</sup>, R. McNabb<sup>10,8</sup>, W. Meng<sup>2</sup>, J. Mi<sup>2</sup>,  
J.P. Miller<sup>1</sup>, Y. Mizumachi<sup>11</sup>, W.M. Morse<sup>2</sup>, D. Nikas<sup>2</sup>, C.J.G. Onderwater<sup>8,6</sup>, Y. Orlov<sup>4</sup>,  
C.S. Özben<sup>2,8</sup>, J.M. Palcy<sup>1</sup>, Q. Peng<sup>1</sup>, C.C. Polly<sup>8</sup>, J. Pretz<sup>13</sup>, R. Prigl<sup>2</sup>, G. zu Putnitz<sup>7</sup>,  
T. Qian<sup>10</sup>, S.I. Redin<sup>3,13</sup>, O. Rind<sup>1</sup>, B.L. Roberts<sup>1</sup>, N. Ryskulov<sup>3</sup>, S. Sedykh<sup>8</sup>,  
Y.K. Semertzidis<sup>2</sup>, P. Shagin<sup>10</sup>, Yu.M. Shatunov<sup>3</sup>, E.P. Sichtermann<sup>13</sup>, E. Solodov<sup>3</sup>,  
M. Sossong<sup>8</sup>, A. Steinmetz<sup>13</sup>, L.R. Sulak<sup>1</sup>, C. Timmermans<sup>10</sup>, A. Trofimov<sup>1</sup>, D. Urner<sup>8</sup>,  
P. von Walter<sup>7</sup>, D. Warburton<sup>2</sup>, D. Winn<sup>5</sup>, A. Yamamoto<sup>9</sup> and D. Zimmerman<sup>10</sup>

(Muon ( $g - 2$ ) Collaboration)

<sup>1</sup>*Department of Physics, Boston University, Boston, MA 02215*

<sup>2</sup>*Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973*

<sup>3</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia*

<sup>4</sup>*Newman Laboratory, Cornell University, Ithaca, NY 14853*

<sup>5</sup>*Fairfield University, Fairfield, CT 06430*

<sup>6</sup>*Kernfysisch Versneller Instituut, Rijksuniversiteit Groningen,  
NL-9747 AA, Groningen, The Netherlands*

<sup>7</sup>*Physikalisches Institut der Universität Heidelberg, 69120 Heidelberg, Germany*

<sup>8</sup>*Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801*

<sup>9</sup>*KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan*

<sup>10</sup>*Department of Physics, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455*

<sup>11</sup>*Science University of Tokyo, Tokyo, 153-8902, Japan*

# The Concept of Round Colliding Beams

- Small and equal  $\beta$ -functions at IP:  $\beta_x = \beta_z$
- Equal beam emittances:  $\varepsilon_x = \varepsilon_z$
- Equal betatron tunes :  $\nu_x = \nu_z$



**Сохранение углового момента:**  $M_y = x'z - xz'$

**Параметр встречных пучков**  $\xi = \frac{N^- r_e}{4\pi\gamma\varepsilon} \approx 0.15$

**Светимость**

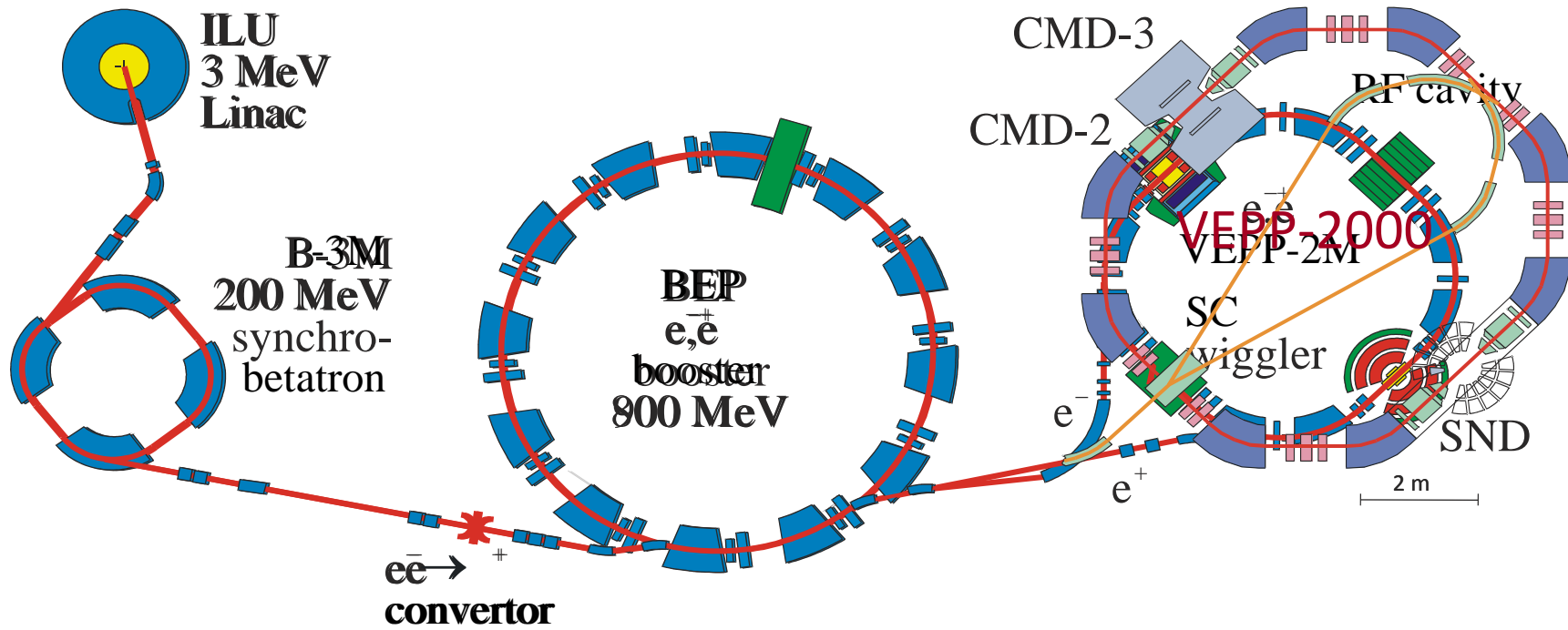


# VEPP-2M



# VEPP-2000

(200-2000)

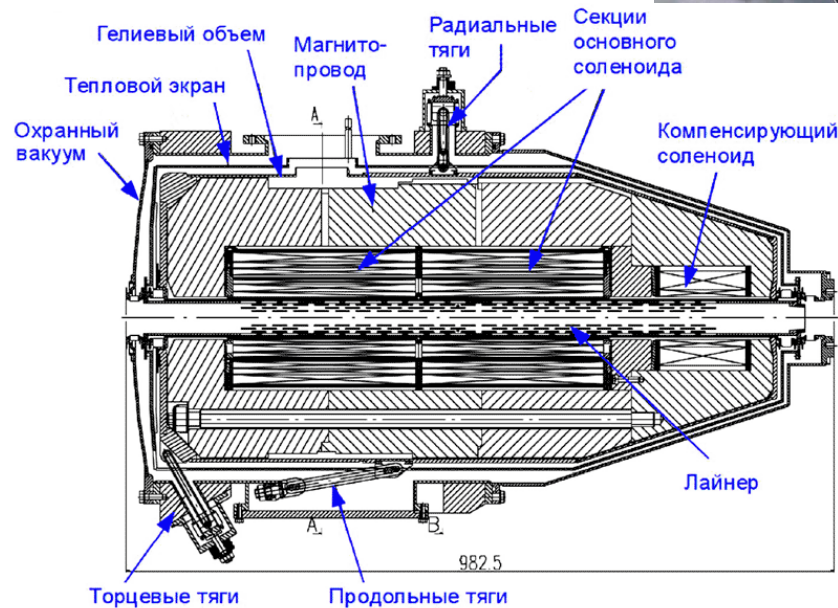
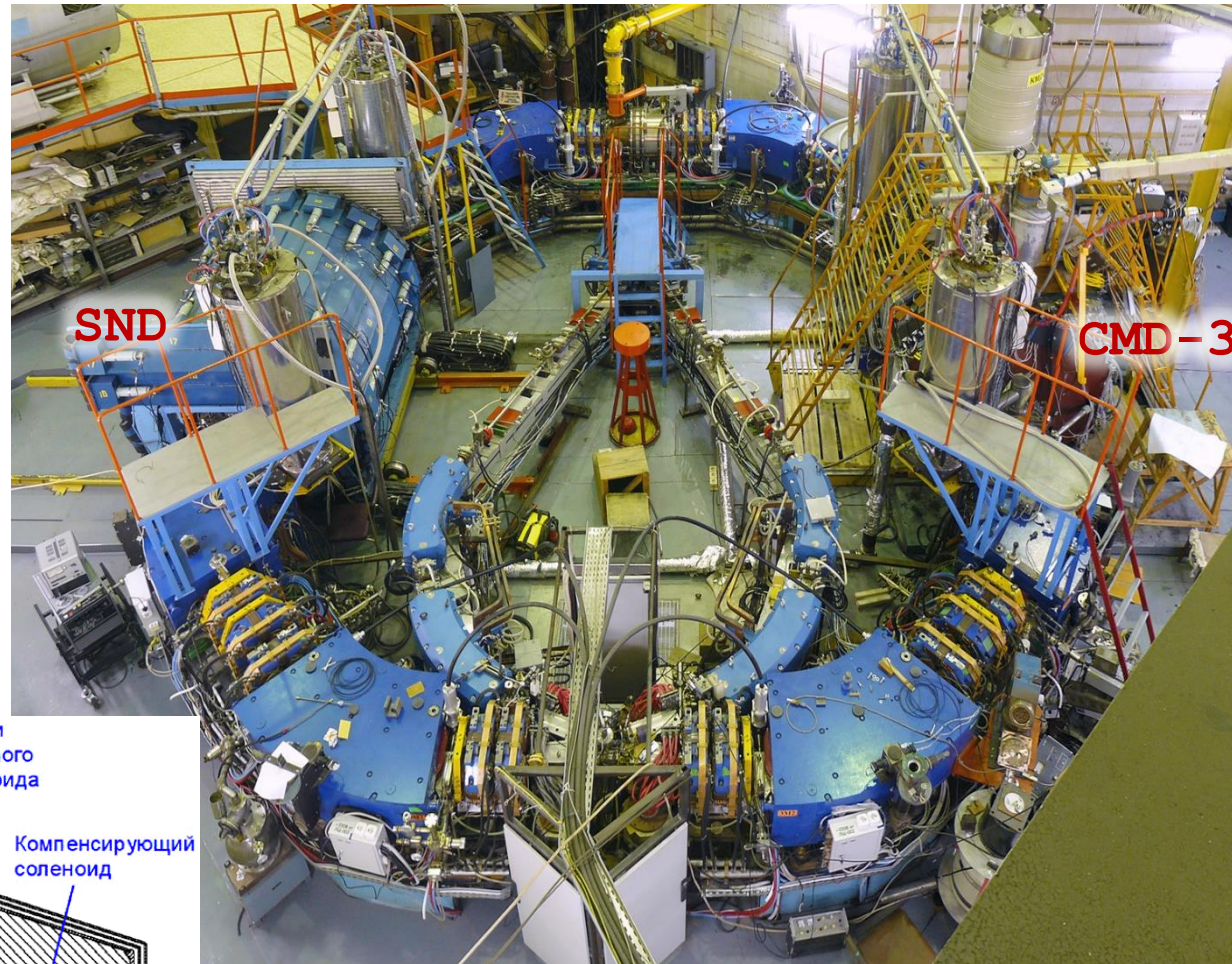


- ◆  $E \approx 1 \text{ GeV}$  (per beam)
- ◆  $L \approx 1 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  (1x1 bunch)

# VEPP-2000 overview

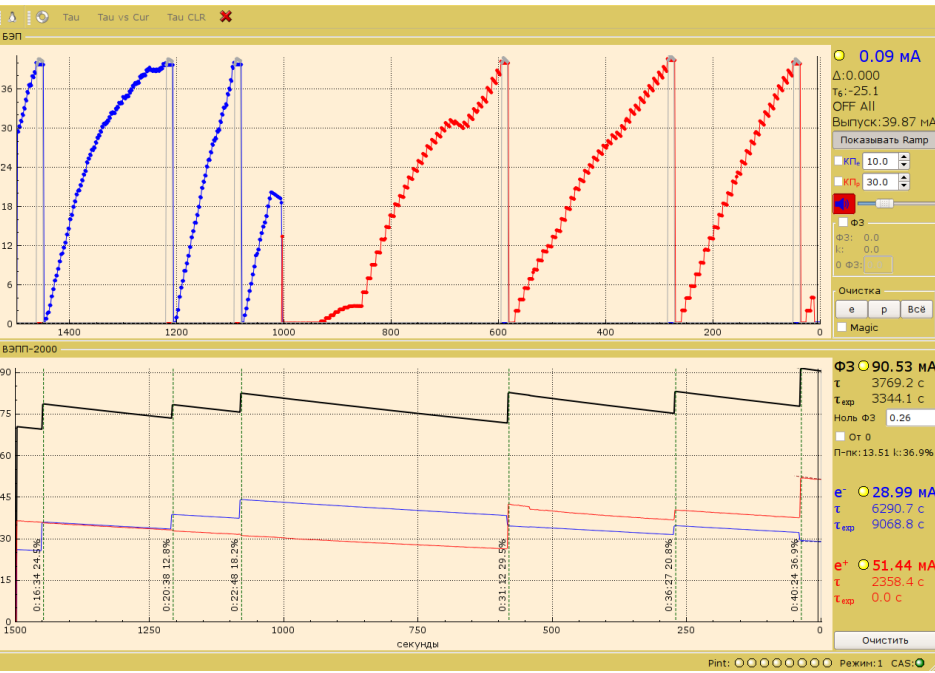
## Design parameters @ 1 GeV

Circumference	24.388 m
Beam energy	150 ÷ 1000 MeV
N of bunches	1×1
N of particles	1×10 <sup>11</sup>
Betatron tunes	4.14 / 2.14
Beta*	8.5 cm
BB parameter	0.15
Luminosity	1×10 <sup>32</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>



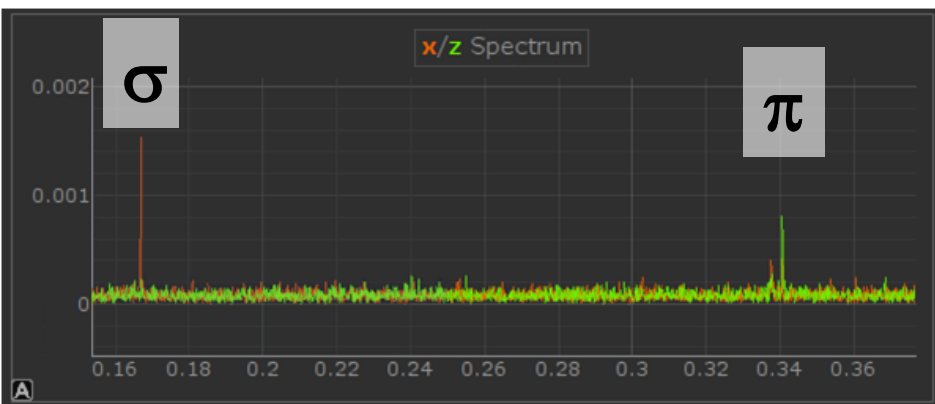
- Round beams concept
- 13 T solenoids for FF
- 2.4 T NC dipoles @ 1 GeV

# Светимость (2010-2013 гг.)

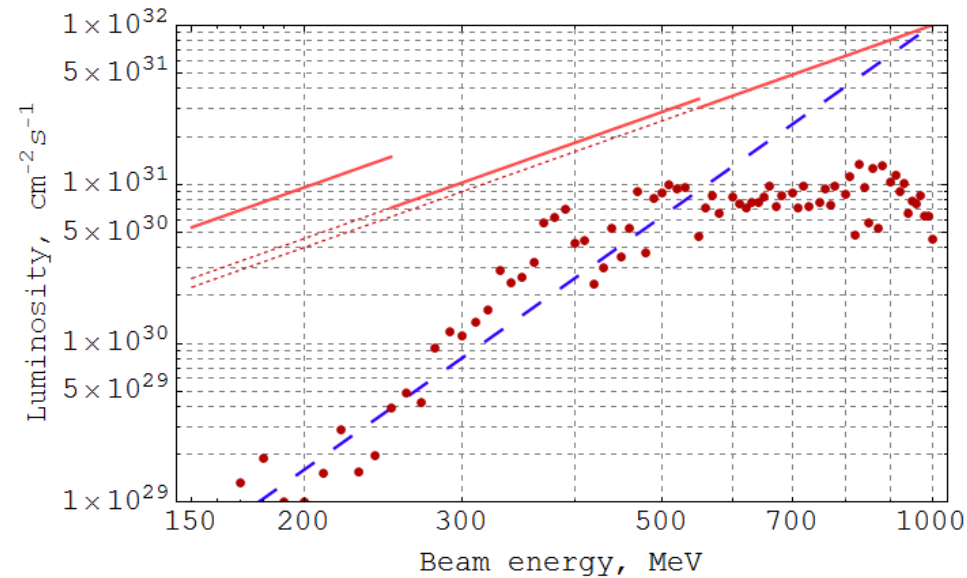


$$L_o = \frac{\pi \cdot \gamma^2 \cdot \xi^2 \varepsilon_x}{r_e^2 \beta_z} \cdot f_0 = 1 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1};$$

$$\xi = 0.15$$

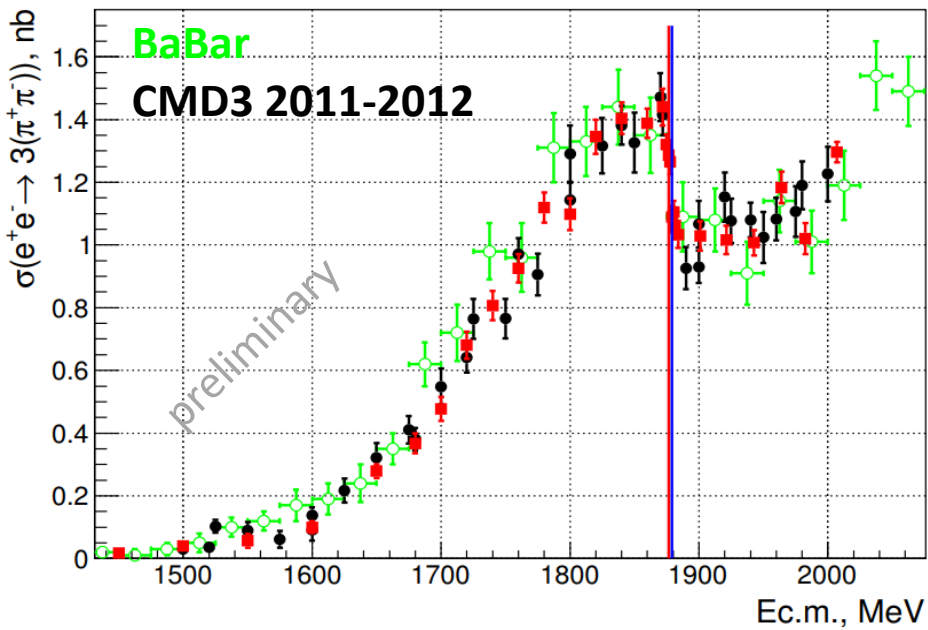


$$\Delta v = 0.175 \rightarrow \xi = \mathbf{0.125/IP}$$

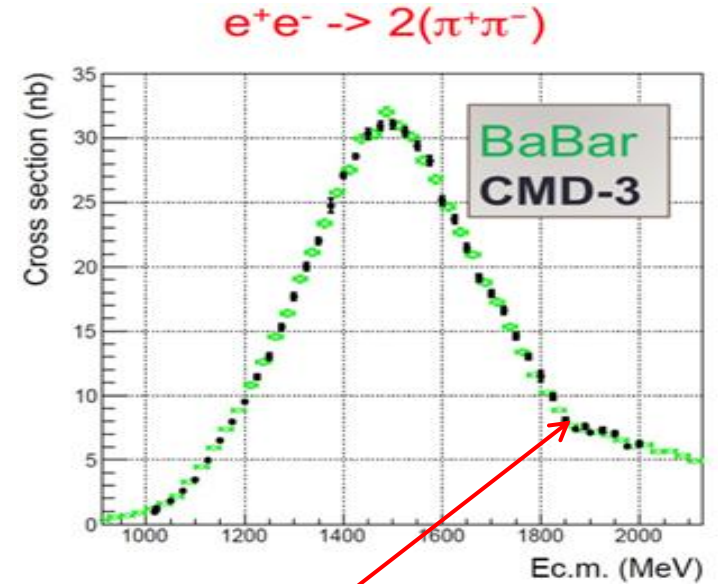


# $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ & $N\bar{N}$ threshold

- The 2011-2012-based results were published in PLB 723, 82 197 (2013)



**CMD3**

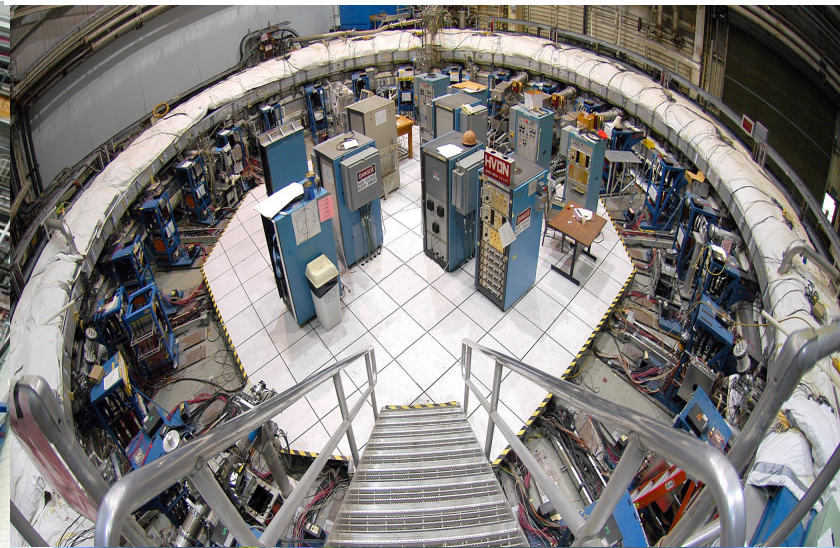
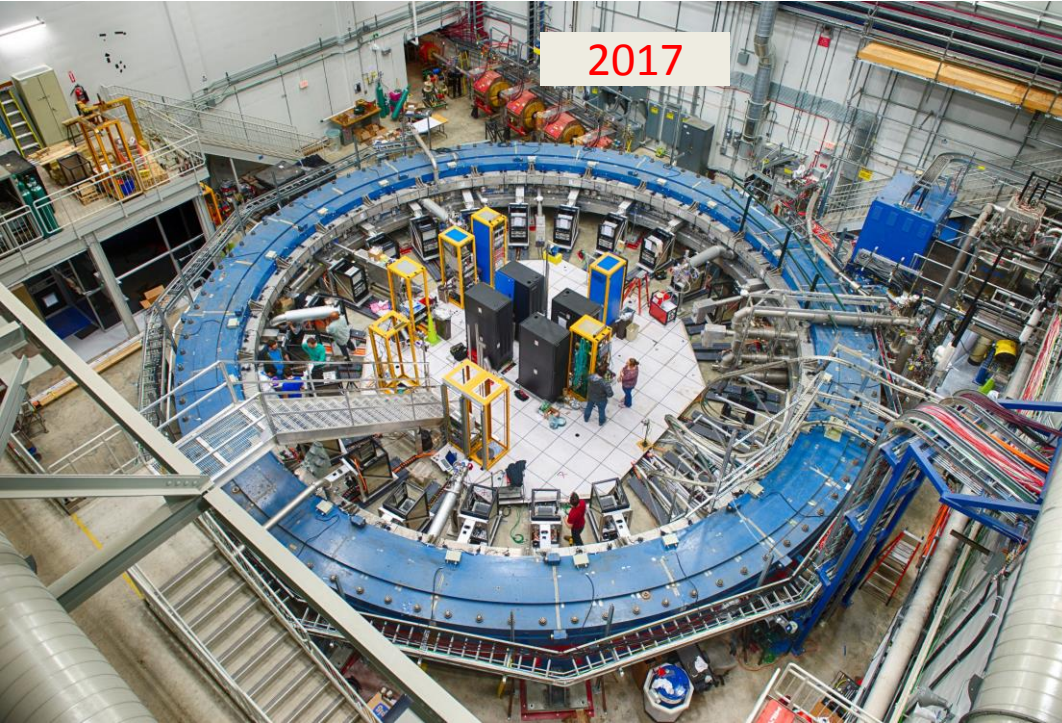


Порог Р-антиР

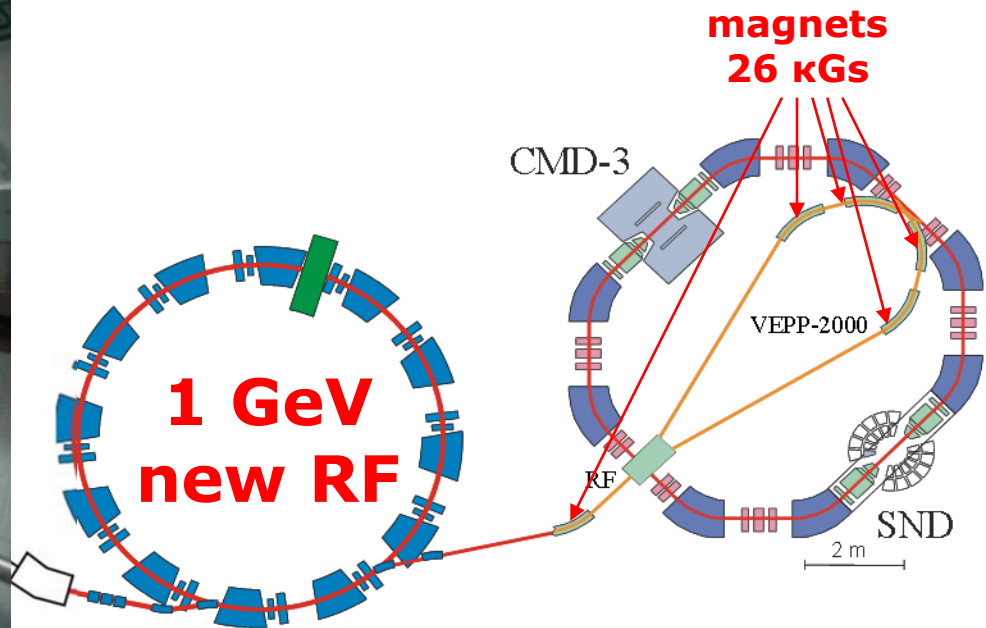
# muon (g-2) measurements

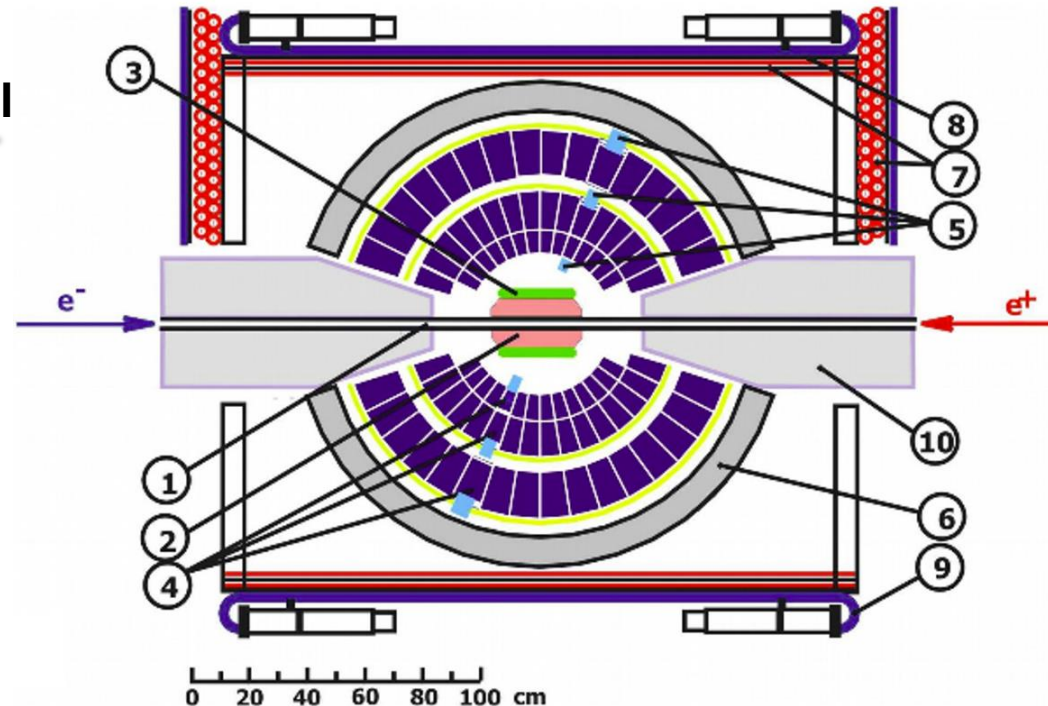
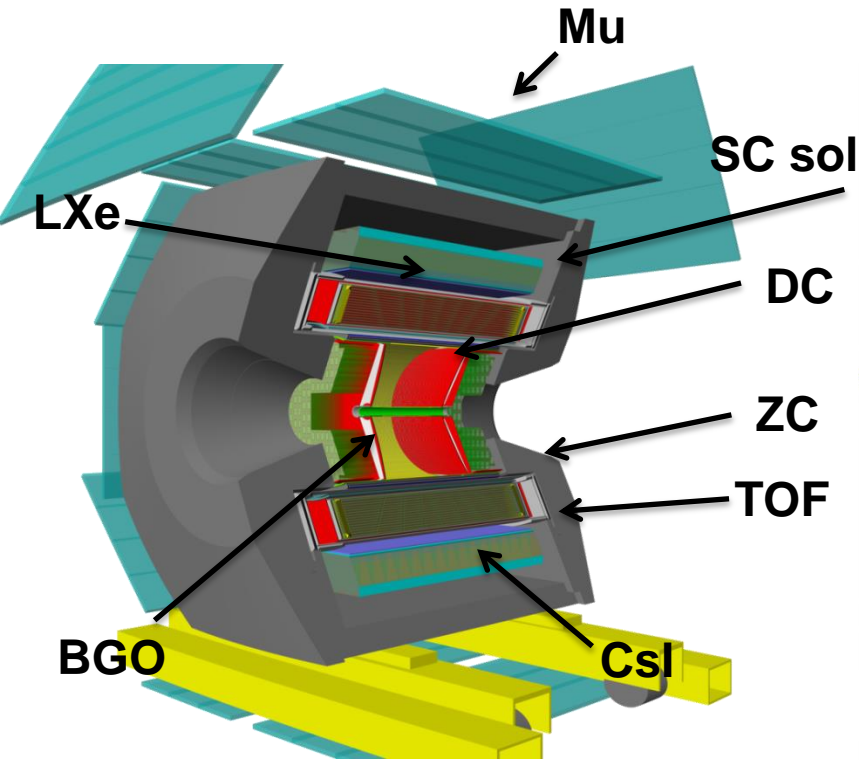
Experiment: E969 (FNAL)  $\rightarrow$  0.14 (0.42) ppm

Experiment: E821 (BNL)  $\rightarrow$  0.56 ppm



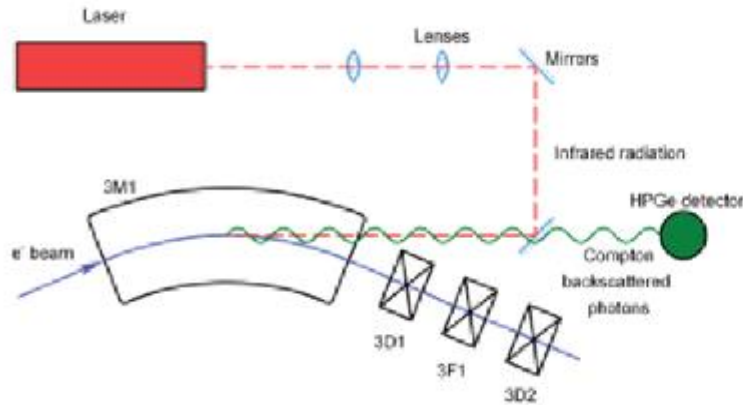
# VEPP-2000 complex upgrade (2014-2017)



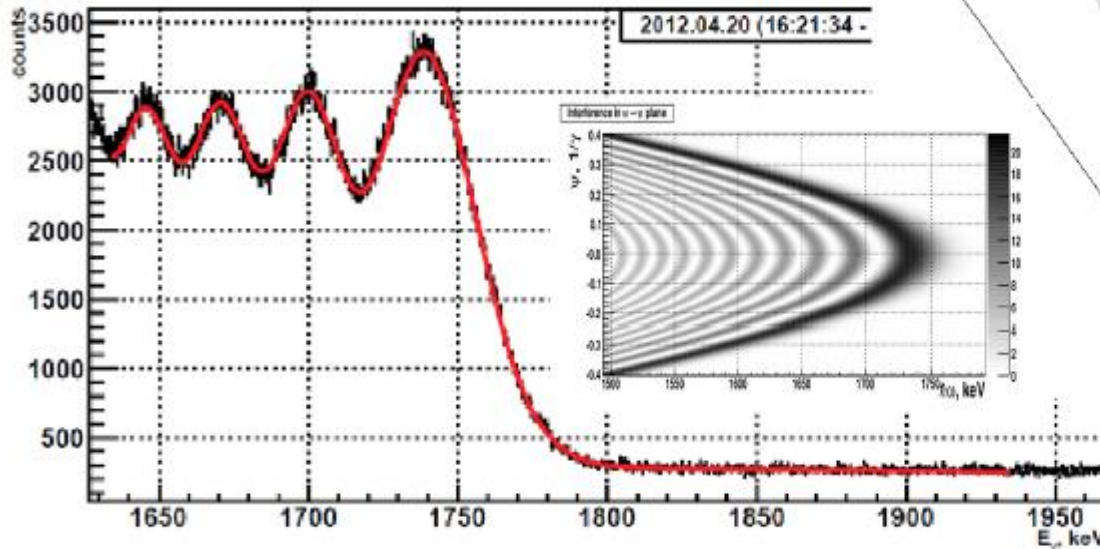
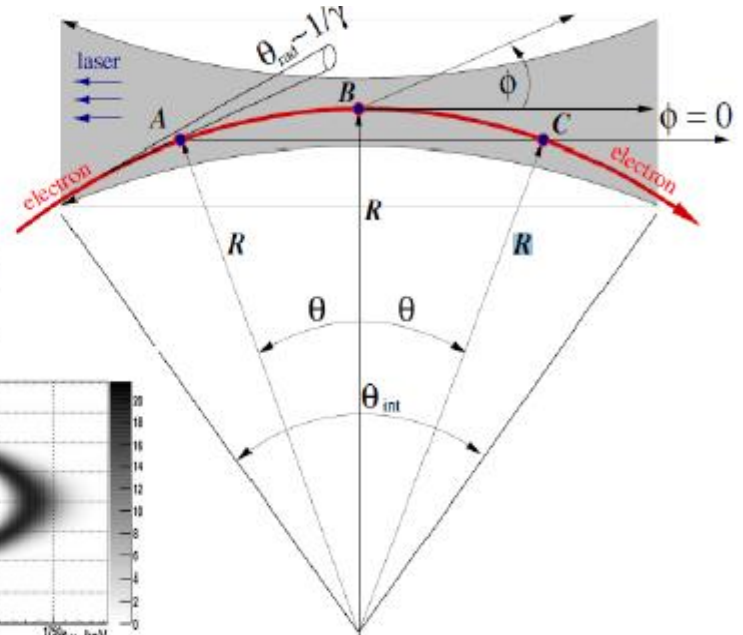


- Precise measurement of  $R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$  to achieve  $<1\%$  systematic for major channels
- Study of exclusive hadronic channels of  $e^+e^-$  annihilation, test isotopic relations
- Study of the “excited” vector mesons:  $\rho', \rho'', \omega', \phi' \dots$
- Study of  $G_E/G_M$  for nucleons near threshold
- CVC tests: comparison of isovector part of  $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})$  with  $\tau$  –decay spectra
- Diphoton physics (e.g.  $\eta'$  production)

# Energy measurement by Compton back scattering



By  $\phi=0$  radiation from A and C points are interfered



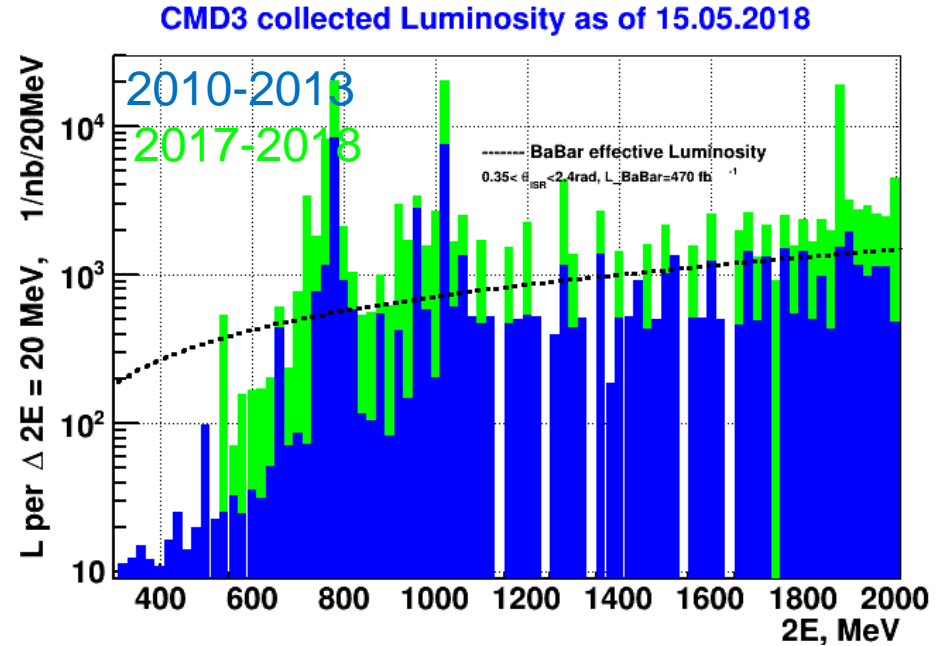
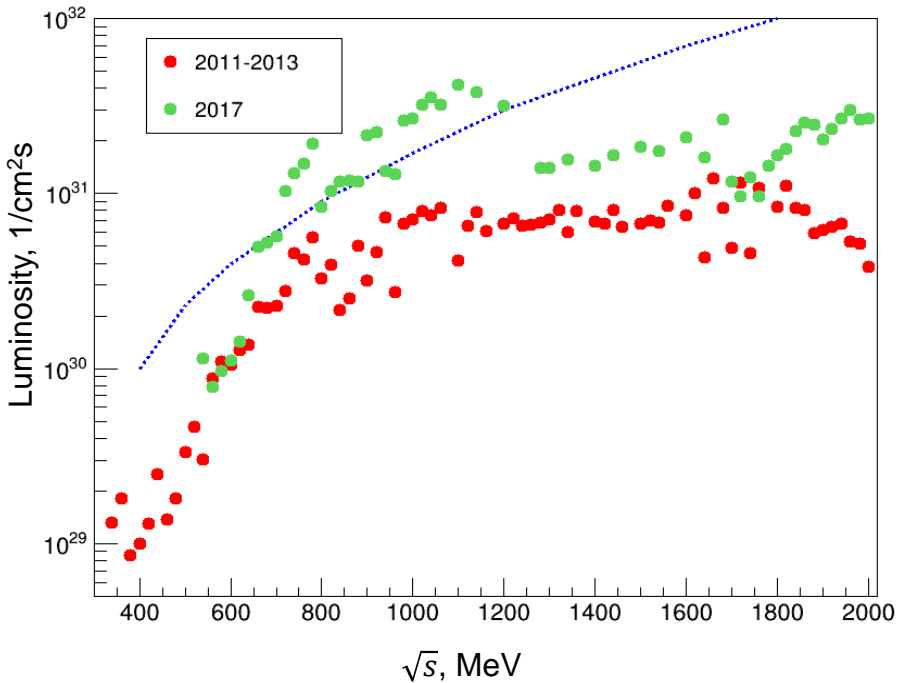
$$E = 993.662 \pm 0.016 \text{ MeV}$$

M.N. Achasov et al. arXiv:1211.0103v1 [physics.acc-ph] 1 Nov 2012

In few points this method have been controlled by the resonant beam depolarization



# CMD-3: overview of datataking



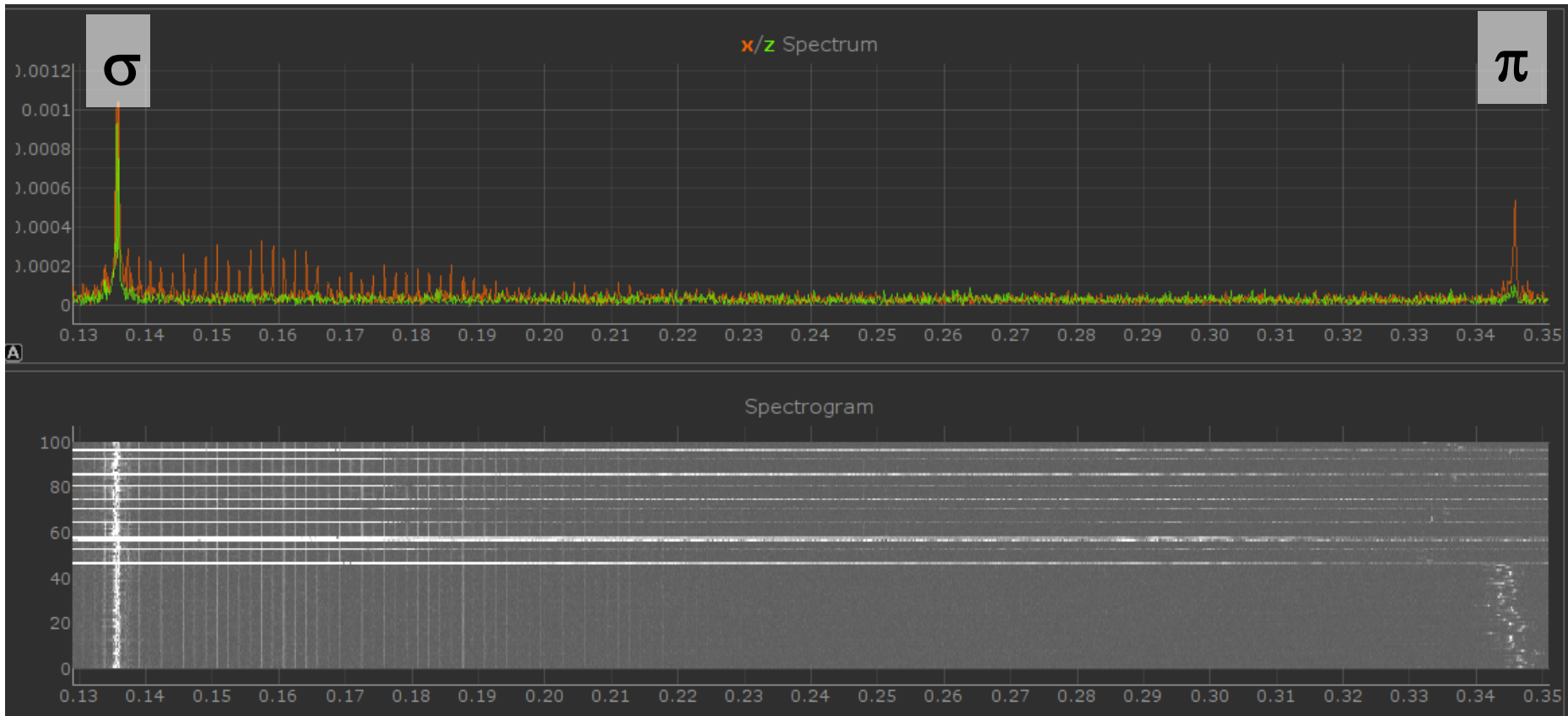
## 2010-2013 runs

$\sqrt{s}$ region	$L, \text{pb}^{-1}$
$\omega(782)$	8.3
$\sqrt{s} < 1 \text{ GeV}$ (w/o $\omega$ )	9.4
$\phi(1020)$	8.4
$\sqrt{s} > 1.04 \text{ GeV}$	34.5
<b>Total</b>	<b>60</b>

## 2017-2018 runs

$\sqrt{s}$ region	$L, \text{pb}^{-1}$
2.007 GeV ( $e^+e^- \rightarrow D^{0*}$ )	4
$N\bar{N}$ threshold scan	14
Overall 1.28 – 2.007 GeV	50
$\sqrt{s} < 1.0 \text{ GeV}$	> 50
<b>Total</b>	<b>~100</b>

# Coherent beam-beam spectrum



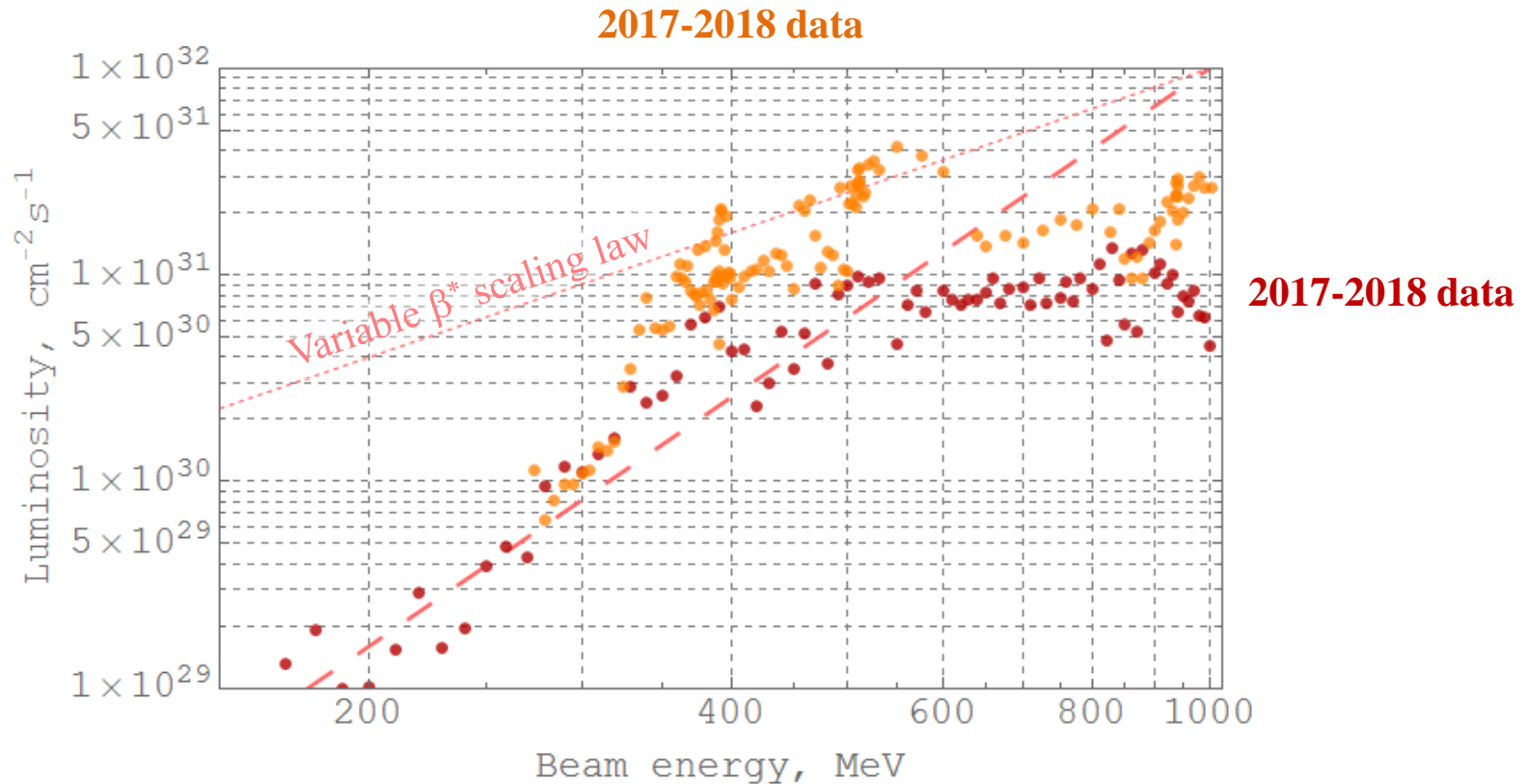
$$\Delta \nu = \arccos(\cos(\pi \nu_0) - 2\pi \xi \sin(\pi \nu_0)) / \pi - \nu_0$$

$$\nu_\sigma = 0.135, \nu_\pi = 0.345$$

$$\Delta \nu = 0.21 \rightarrow \xi = \mathbf{0.17/IP}$$

# Data collection

**CMD-3 luminosity,  
averaged over 10%  
of best runs**

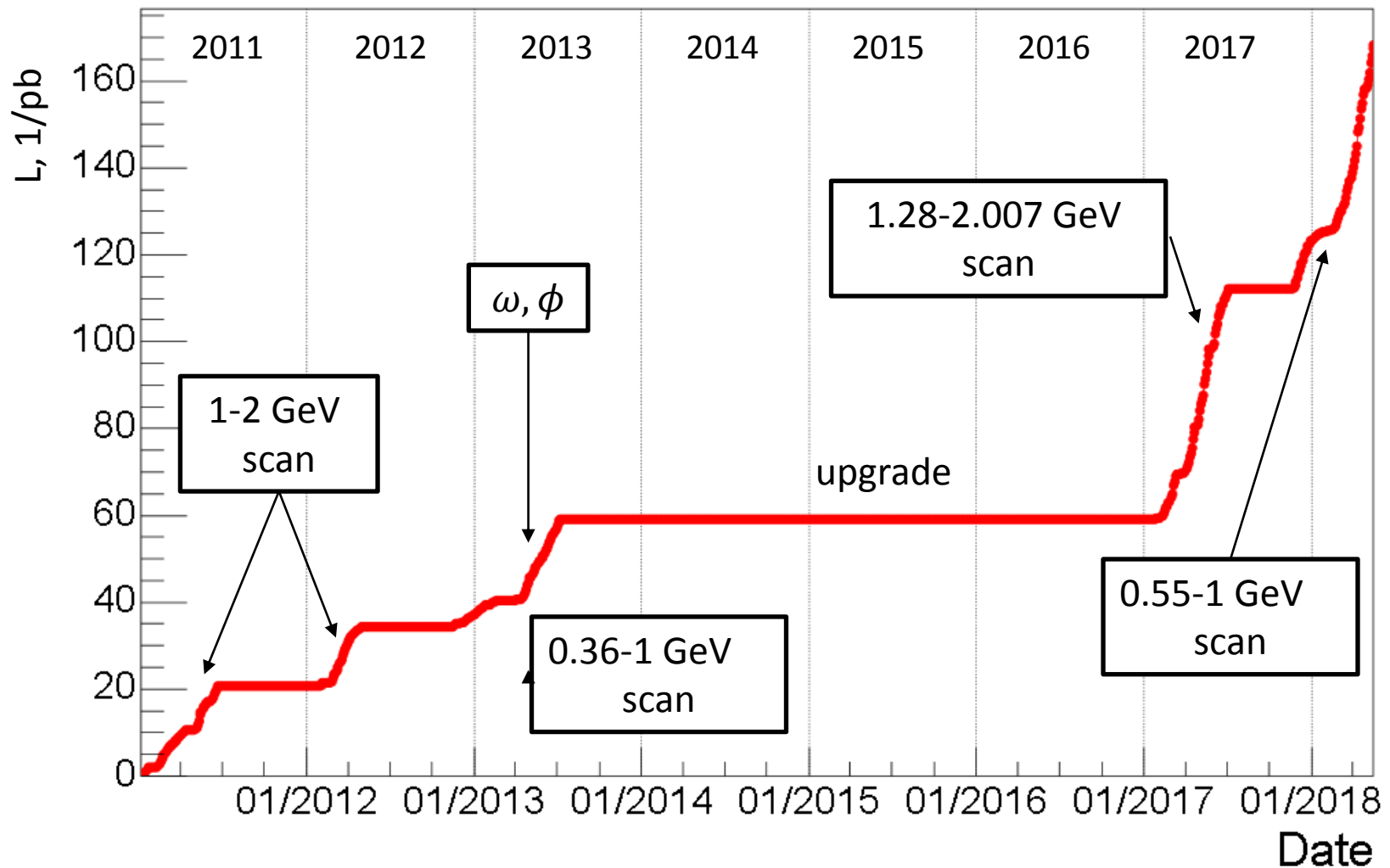


Highest luminosity achieved

$$L_{\text{peak}} = 5 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

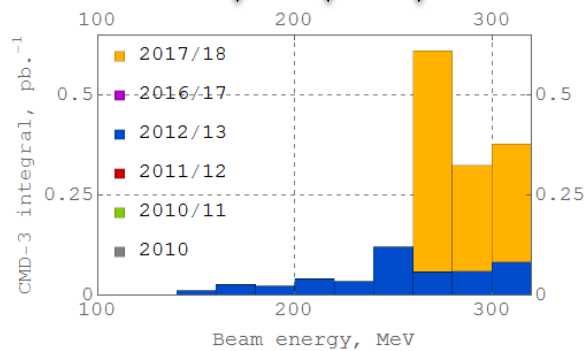
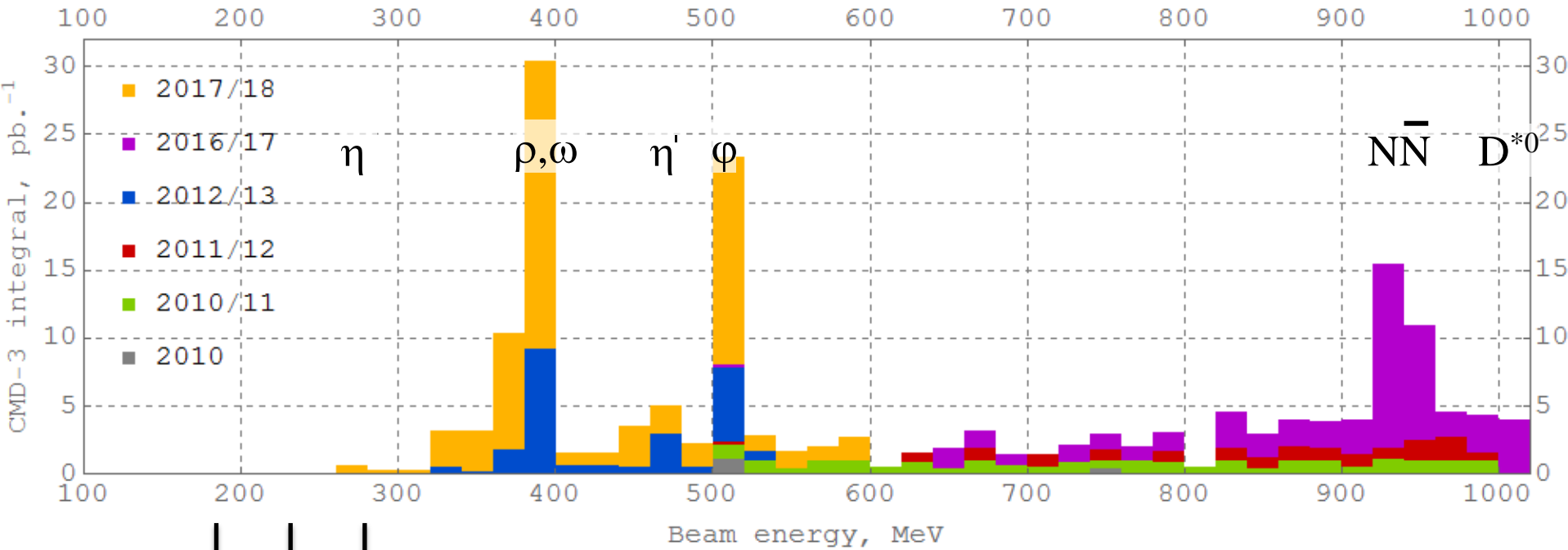
@ 550 MeV

# CMD-3: overview of data taking

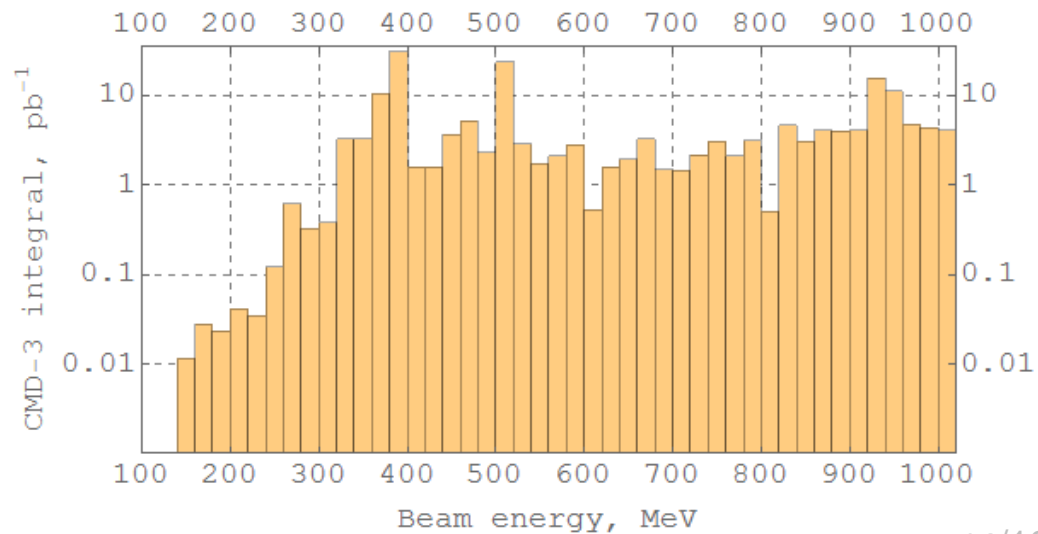


- Data taking will be continued to collect  $\sim 1 \text{ fb}^{-1}$  in the next 5-10 years

# Total luminosity integral

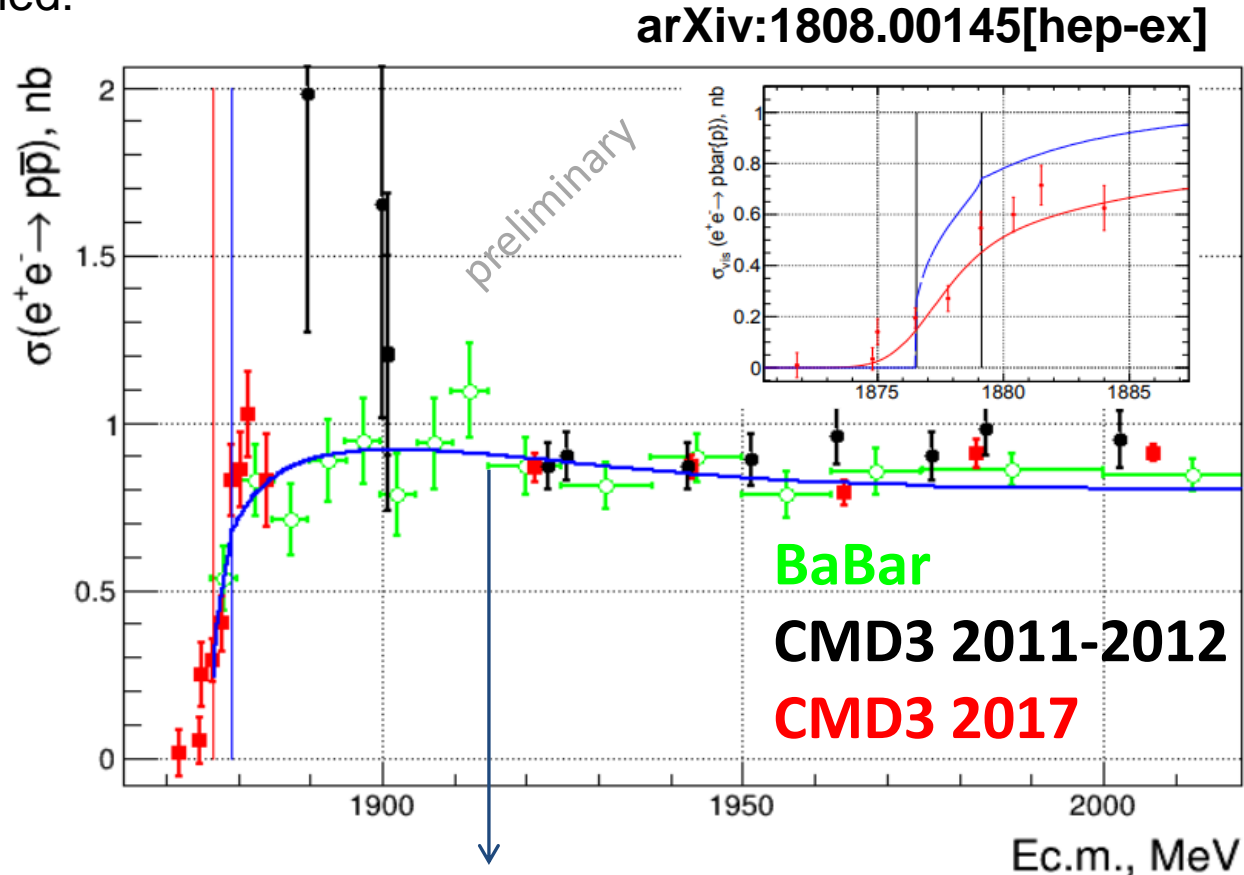


Lowest energy ever obtained in e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> colliders



# Scanning of $N\bar{N}$ threshold

- The 2011-2012-based results  $p\bar{p}$  cross section measurements and the results for  $\frac{G_E}{G_M}$  ratio were published (PLB 759 (2016) 634). In 2017 a more thorough threshold scan was performed:



- A solid curve shows the prediction from recent works:

A.I. Milstein and S. G. Salnikov, arXiv:1804.01283v1 [hep-ph]

V. F. 200 Dmitriev, A. I. Milstein and S. G. Salnikov, Phys. Rev. D93, 034033 201 (2016)

A. I. Milstein, S. G. Salnikov, Nucl.Phys. A966, 54 (2017)

# Conclusion

- CMD-3 and SND has taken  $>300 \text{ pb}^{-1}$  of data in the whole energy range  $0.32 \leq \sqrt{s} \leq 2.0 \text{ GeV}$  and will take  $\sim 2 \text{ fb}^{-1}$  in the next years
- The detector subsystems upgrades are planned (endcap and barrel coordinate counters, possibly a new drift chamber)
- New particle identification technique based on the  $dE/dx$  in 14 layers of LXe-calorimeter has been developed, and will be applied in the next seasons for  $K^+K^-$ ,  $K^+K^-\pi^0$ ,  $K^+K^-2\pi^0$ ,  $K_S K^\pm \pi^\mp$  final states analyzes
- This is just a beginning, do not oversleep new interesting results from us!