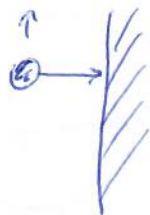


Метод возмущенных ионов. Коллайдер



Керст 1956

Б. Тумен 1965 -

- первый предостан ионит
коллайдер AdA в LNL INFN

$$W_B = T$$

$$W_B = T$$

переломит ионит

$$W_B = T$$

$$W_B = \sqrt{2W_0 W'}$$

переломит. Визуит

В гравитационном ионит $W_k \approx pc, \alpha \quad \varepsilon p^2 = \text{const} \Rightarrow W_k \approx \text{const}$ и

W_B мал

$$W_0 + W = W_0 + \sqrt{W_0^2 + p^2 c^2}$$

в С.У.М. $\varepsilon p^2 = 0$;

Тоже:

$$W_B = \left((W_0 + W_k)^2 - p^2 c^2 \right)^{1/2} = \left(W_0^2 + W_k^2 + 2W_0 W_k - p^2 c^2 \right)^{1/2} =$$

$$= \sqrt{W_0^2 + 2W_0 W_k} = \sqrt{2W_0(W_0 + W_k)}$$

или $W_k \ll W_0$

$$W_B \approx 2W_0 + \frac{W}{2}$$

совпадает с переломит.

или $W_k > W_0$

$$W_B \approx \sqrt{2W_0 W_k}$$

т.е. при увеличении энергии в 100 раз W_B растет только в 10

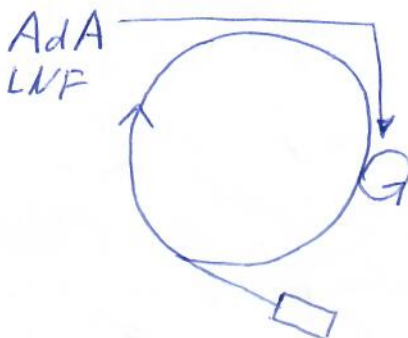
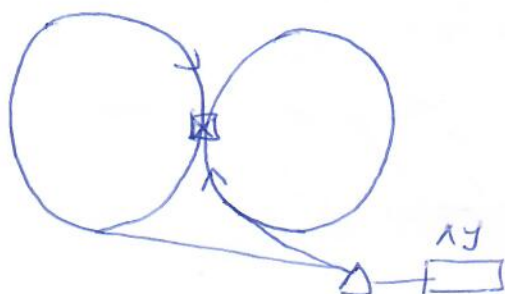
Оценим, насколько энергия надо иметь в режиме стационарного ионит

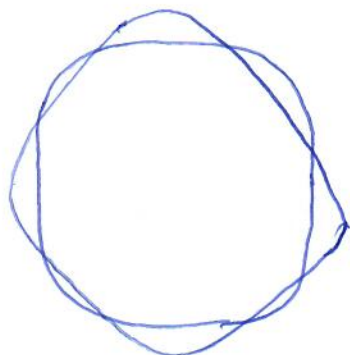
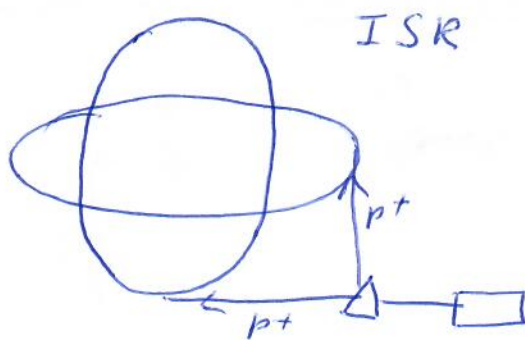
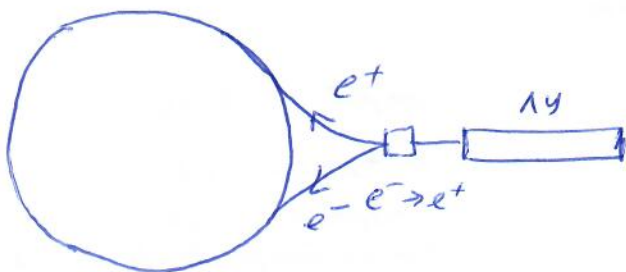
$$W_{\text{эл}} \approx \frac{2W^2}{W_0}$$

$$p^+: W=100 \text{ ГэВ} \Rightarrow W_{\text{эл}} = 20 \text{ ТэВ}$$

$$e^-: W=10 \text{ ГэВ} \Rightarrow W_{\text{эл}} = 4 \cdot 10^{14} \text{ эВ}$$

Необходимо сравнить ионит друг с другом





CERN ISR

Число событий. Светимость.

$$N = \sigma L$$

σ - сечение взаимодействия

L - светимость $[cm^{-2} \cdot s^{-1}]$

$$\sigma = 10^{-31} \div 10^{-30} cm^2 \Rightarrow L > 10^{30} cm^{-2} \cdot s^{-1}$$

$$L = \frac{n_1 n_2}{S} f_0 = \frac{I_1 I_2}{e^2 f_0 S}$$

S - эфф. поперечное сечение пучка

$I = n e f_0$ - циркулирующий ток

f_0 - частота обращения

при $R \approx 3m$ и $v = c$

$f_0 = 15 \cdot 10^7 s^{-1}$ и при $S = 1 cm^2$ $\sqrt{n_1 n_2} \approx 2.5 \cdot 10^{14}$ частиц или ток $I = 0.5 A$

Требования:

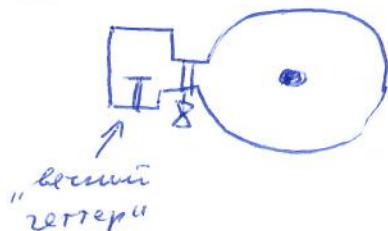
1. Т.к. требуемый циркулирующий ток много больше тока инжекции, то необходимо накачивать.
2. Большое время жизни пучка (вакуум, нулевой заряд)
3. Большое вакуумное объемное зарядов

LEP

PLEP

$\rho = 10^{-12} Pa$ (300 μm^3) вакуум

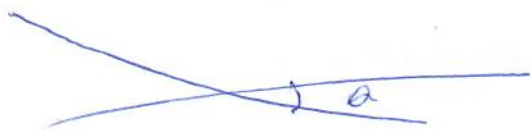
$\rho = 10^{-14} Pa$ (3 μm^3) в точке встречи



Современные идеи:

①

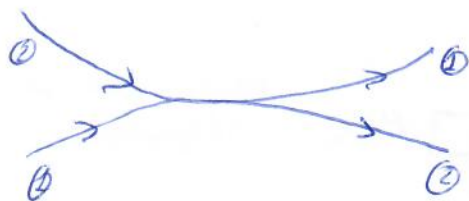
Сравнивают пути с очень разными поперечными размерами σ_x и σ_z под небольшим углом, чтобы $\sigma_x \ll \sigma_z$



$$\varphi = \frac{\sigma_z}{\sigma_x} \lg \frac{\sigma}{2} \approx \frac{\sigma_z}{\sigma_x} \frac{\sigma}{2}$$

- угол Пивенского

② „Crab crossing“
„Crab waist“



угол сжатия
перед столкновением
и $L \uparrow$

φ больше (то
длиннее радиус)

③ Мамонт горит для $e\bar{e}$ и $p\bar{p}$



- один
молит

Главное задание:



- последовательные
записи
сепарации
сужения

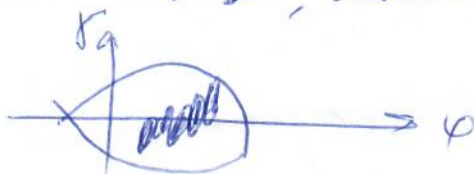
Механизмы:

- радиационное охлаждение;
- кванты \bar{e}

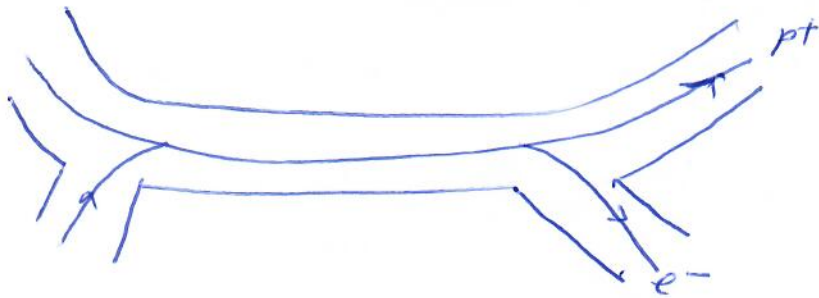
Углы:

- углы в сепарации:

угол инвертируется при энергии неслучайно и не энергия
напряжения и доускорения до неслучайно меньшей энергии и,
соответственно, с длиной волны; дисперсия записывается
линейно и нелинейно



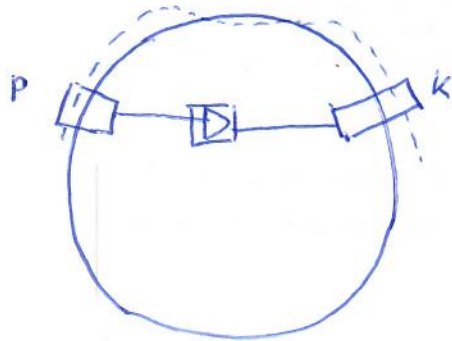
- Электронное охлаждение
Г.И. Будкер



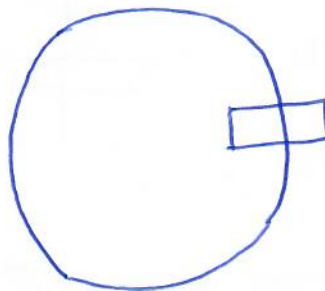
$$\frac{W_{e^-}}{W_{p^+}} = \frac{W_{0e^-}}{W_{0p^+}} \quad (v_{p^+} \approx v_{e^-})$$

канцевые e^- пути

- Стокастическое охлаждение



Ван-дер-Мер



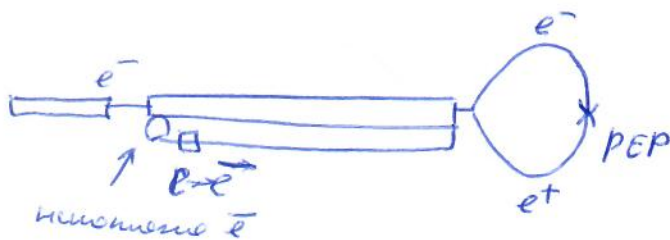
на медленном обороте

осн. проблема - "удар" не может быть "точечным"

- лазерное охлаждение

Линейные коллайдеры:

SLC (SLAC)



1967г

2x19 P+B

2x23 P+B

2x30 P+B

сейчас 2x50 P+B (x55-57 P+B и 5-7 P+B - потери на излучение в PEP)

Поты проектов превратились в два

ВЛЭПП (ИЯФ или Г.И. Будкер)

2x150 (1)

2x500 (2) P+B

TESLA (DESY)

2x500

NLC (SLAC)

2x500

JLC (KEK)

2x500

Объединены в

ILC

(к.ч.)

$$\Delta W_{\text{изл}} = 90 \frac{W^4}{R} \quad [\text{МэВ}]$$

$$[\text{кэВ}]$$

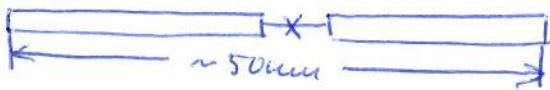
при энергии LEP 2x100 P+B

$\Delta W \approx 200 \text{ МэВ/оборот}$

линейный коллайдер 2x500 P+B

$\Delta W \approx 1,2 \text{ ГэВ}$ - невозможно \Rightarrow

\Rightarrow должен быть линейный



beam 31,5 МэВ/м \Rightarrow
 $\Rightarrow L \approx 17$ м
 $W = 1,3$ РР_у

CLIC (CERN)

2x500 Р+В

2x3 Р+В

Команды:

$e^- e^+$

ADONE, ADA (INFN LNF) 2x1,5 Р+В

DORIS (DESY) 2x5,5

$2,5 \cdot 10^{31}$

CESR (Cornell Univ.) 2x8

10^{32}

БЭПП-1
-2
-3
-4 м

УАФ им. П.А. Бугдасаря

2x1,0

2x1,3

2x3

2x5,5

10^{20}

10^{21}

TRISTAN
KEK-B

KEK

2x30

$1,4 \cdot 10^{31}$

10^{32}

BEPC

IHEP, Baj. Univ

2x2,8

LEP

CERN

2x100 (106)

$1,7 \cdot 10^{31}$

Проекти

Super KEK-B KEK

Super B LNL

"Синхротронная фабрика"

УАФ им. Бугдасаря

$p^+ p^+$ и $p \bar{p}$

ISR

CERN

2x31

10^{31}

pp

SPS

2x450

10^{29}

$p \bar{p}$

$2,8 \cdot 10^{30}$

$p \bar{p}$

LHC

2x4000 (7000)

10^{34}

$p \bar{p}$

проект

$\approx 10^{32}$

$p \bar{p}$

используемо

ISABELLE

BNL

2x400

10^{30}

pp

TEVATRON

FNAL

2x980

$1,6 \cdot 10^{32}$

проекти:

УМК

УФБТ

2x3000

SSC

2x20000

p^+e^-

HERA DESY $820 \text{ pt} \rightarrow 19 e^- \Gamma_{2B}$
upstream
LHeE

Gamma nucleus nucleus

| | | | | | | |
|---------|------|----|----------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| RHIC | BNL | go | 2×100 | $\Gamma_{2B}/\text{nucleon}$ | $1.4 \cdot 10^{31}$ 10^{27} | p^+ Au, Pt, Fe... |
| LHC | CERN | go | 5.5 | TaB nucleus | | |
| FAIR | GSI | | | | | |
| SIS-100 | | | | | | |
| SIS-300 | | | 20 20 | $\Gamma_{2B}/\text{nucleon}$ | | |
| NICA | OJGU | | 20 4.5 | $\Gamma_{2B}/\text{nucleon}$ | | |

$$w_{B3} = 2w_0(\gamma - 1) = 2w_0\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right) = 6 \text{ e.u.m.}$$

① $w \ll w_0$

$$w_{B3} = 2w_0\left(1 + \frac{1}{2} \frac{w_0}{2w} - 1\right) \approx \frac{w}{2}$$

② $w \gg w_0$

$$w_{B3} = 2w_0 \sqrt{\frac{w}{2w_0}} \Rightarrow w_{B3} = \sqrt{2ww_0}$$

$$w^2 - p^2 c^2 = w_0^2$$

$$(w_1 + w_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 c^2 = (w_{01} + w_{02})^2 = (w_1 + w_2)^2 = w'^2$$

a) $w_2 = w_{02}; p = 0;$

$$(w_1 + w_{02})^2 - p_1^2 c^2 = w_{01}^2 + 2w_{01}w_{02} + w_{02}^2$$

$$w_1^2 + 2w_1w_{02} + w_{02}^2 - p_1^2 c^2 = w_{01}^2$$

$$w_{01}^2 + w_{02}^2 + 2w_1w_{02} = w'^2$$

$$w' = \sqrt{2ww_0}$$

Точный расчет энергии взаимодействия:

$$\omega^2 - p^2 c^2 = \omega_0^2 = \hbar \nu$$

$$\text{ЛСО: } (\omega_1 + \omega_02)^2 - p_1^2 c^2 = (\omega_01 + \omega_02)^2$$

$$p_1 > 0 \\ \omega_1 = \omega_02 \\ \omega_1^2 + \omega_02^2 + 2\omega_1\omega_02 - p_1^2 c^2 = \omega_01^2 + 2\omega_01\omega_02 + \omega_02^2$$

$$\text{Следств.: } (\omega_1' + \omega_2)^2 = (\omega_01 + \omega_02)^2$$

$$\omega_1'^2 + \omega_02^2 + 2\omega_1'\omega_02 = \omega_1'^2$$

Сложим:

$$\omega_1'^2 + 2\omega_1'\omega_02 + \omega_02^2 - p_1^2 c^2 = \omega_1'^2 + 2\omega_1'\omega_2 + \omega_2^2$$

$$\omega_01^2 + 2\omega_1'\omega_02 + \omega_02^2 = \omega_1'^2$$

$$\omega_01^2 + 2\omega_02(\omega_01 + \tau_1) + \omega_02^2 = \omega_1'^2$$

$$\tau_1 = \frac{\omega_1'^2 - \omega_01^2 - \omega_02^2}{2\omega_02} = \omega_01 - \omega_03$$

$$a) \quad \tau_1 \approx \omega_01 \quad (\tau_1 \ll \omega_01)$$

$$(\omega_01 + \omega_02)^2 + 2\omega_02\omega_1 = \omega_1'^2$$

$$\text{Если } \omega_01 = \omega_02, \text{ то } \tau_1 = 2\omega_0 \sqrt{1 + \frac{\omega_1}{2\omega_0}} \Rightarrow \omega_3 \approx 2\omega_0 + \frac{\omega_1}{2}$$

$$b) \quad \omega_2 = \omega_02 \quad p_1 = 0$$

$$(\omega_1 + \omega_02)^2 - p_1^2 c^2 = \omega_1'^2$$

$$\omega_01^2 + \omega_02^2 + 2\omega_1\omega_02 = \omega_1'^2$$

$$\omega_1' = \sqrt{2\omega_1\omega_0}$$

Пороговая энергия порождения частиц

Минимальная (пороговая) энергия порождения

в поимидере:
непов. миним

$$A + B \rightarrow a + b + c + \dots$$

С.У.М:

$$T_A + W_{0A} + W_{0B} = \sum W_{0f} + \sum T_f ; \quad p_A = \sum p_f ; \quad - \text{непов. миним}$$

$$T'_A + T'_B + W_{0A} + W_{0B} = \sum W_{0f} + \sum T'_f ; \quad p'_A + p'_B = \sum p'_f = 0 \quad \text{С.У.М}$$

Порог реакции соответствует минимальному значению $\sum T_f$, в том случае с учетом $W^2 = p^2 c^2 + W_0^2$

$$(T_A + W_{0A} + W_{0B})^2 - p_A^2 c^2 = (\sum W_{0f})^2$$

$$T_A = \frac{1}{2 W_{0B}} \left[(\sum W_{0f})^2 - (W_{0A} + W_{0B})^2 \right] =$$

$$= \frac{1}{2 W_{0B}} (\sum W_{0f} - W_{0A} - W_{0B})(\sum W_{0f} + W_{0A} + W_{0B})$$

или:

$$T_A = |Q| \left\{ 1 + \frac{W_{0A}}{W_{0B}} + \frac{|Q|}{2 W_{0B}} \right\}$$

где

$$Q = W_{0A} + W_{0B} - \sum W_{0f} - \text{энергия реакции}$$

Пример

реакция порождения π^0 -мезона на неподвижном водородном миним:



$$(T_e)_{\min} = \frac{W_{0\pi}}{2 W_{0p}} (2 W_{0p} + 2 W_{0e} + W_{0\pi})$$

Компидер

$$T_A + T_B + W_{0A} + W_{0B} = \sum W_{0f}$$

и тогда

$$(T_A)_{\min} = \frac{1}{2} (\sum W_{0f} - W_{0A} - W_{0B})$$

Общее выражение определению электрического

Меннер, 1947.

$$L = \frac{1}{c} \int P_+ (\vec{x}, t) P_- (\vec{x}, t) \cdot \sqrt{c^2 (\vec{v}_+^2 - \vec{v}_-^2) - (\vec{v}_+ \times \vec{v}_-)^2} d\vec{x} dt$$

$$L_{sc} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(\sigma_{B_1}^2 + \sigma_{B_2}^2) (\sigma_{\text{top}}^2 + \sigma_{\text{top}}^2) \left(1 + \frac{\sigma_{\text{top}_1}^2 + \sigma_{\text{top}_2}^2}{\sigma_{\text{top}_1}^2 + \sigma_{\text{top}_2}^2} \tan^2 \frac{\theta}{2} \right)}$$

нормировка
Падениями

При делении числит: $\theta = \pi/2$

$$L_{\text{erm}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(\sigma_{B_1}^2 + \sigma_{B_2}^2) (\sigma_{\text{top}_1}^2 + \sigma_{\text{top}_2}^2 + \sigma_{\text{top}_1}^2 + \sigma_{\text{top}_2}^2)}$$

нормировка

$$L = f_0 N_B \cdot N_{P_1} \cdot N_{P_2} \cdot L_{sc}$$

| Ускоритель | Центр, город, страна | Год запуска | Ускоряемые частицы | Максимальная энергия пучка, ГэВ | Светимость, 1030 см ⁻² сек ⁻¹ | Периметр (длина), км |
|------------|------------------------------------|-------------|-------------------------------|---------------------------------|---|----------------------|
| AdA | Frascati, Италия; Орсэ, Франция | 1962 - 1964 | e ⁺ e ⁻ | 0,25 | | 0,003 |
| CBX | Стэнфорд, США | 1963 - 1965 | e ⁺ e ⁻ | 0,3 | | 0,012 |
| ВЭП-1 | ИЯФ, Новосибирск, Россия | 1963 - 1968 | e ⁺ e ⁻ | 0,16 | 0,005 | 0,0027 |
| ВЭПП-2 | ИЯФ, Новосибирск, Россия | 1965 - 1974 | e ⁺ e ⁻ | 0,7 | | 0,0115 |
| ACO | Орсэ, Франция | 1966 - ? | e ⁺ e ⁻ | 1 | | |
| ADONE | Frascati, Италия | 1969 - 1993 | e ⁺ e ⁻ | 1,5 | | |
| CEA | Кембридж, Великобритания | 1971 - ? | e ⁺ e ⁻ | 6 | | |
| ISR | CERN | 1971 - 1984 | pp | 31,5 | | 0,948 |
| SPEAR | SLAC, Стэнфорд, США | 1972 - 1990 | e ⁺ e ⁻ | 3 | | |
| ВЭПП-2М | ИЯФ, Новосибирск, Россия | 1974 - 2000 | e ⁺ e ⁻ | 0,7 | 3 | 0,012 |
| DORIS | DESY, Германия | 1974 - 1993 | e ⁺ e ⁻ | 5 | | |
| DCI | Орсэ, Франция | 1976 - ? | e ⁺ e [±] | 3,6 | | |
| PETRA | DESY, Германия | 1978 - 1986 | e ⁺ e ⁻ | 20 | | |
| CESR | Cornell | 1979 - 2002 | e ⁺ e ⁻ | 6 | 1280 на 5,3 ГэВ | 0,768 |
| PEP | SLAC, Стэнфорд, США | 1980 - 1990 | e ⁺ e ⁻ | 30 | | |
| SppS | CERN | 1981 - 1984 | pp | 315 | | 6,9 |
| Tristan | КЕК, Япония | 1936 - ? | e ⁺ e ⁻ | 60 | | |
| SLC | SLAC, Стэнфорд, США | 1988 - 1998 | e ⁺ e ⁻ | 45 | | |

| | | | | | | |
|--------|---------------------|-------------|------|----------------|----------------------------------|--------|
| LEP | CERN | 1989 - 2000 | e+e- | 104,6 | 24 на Z0; 100 при >90 ГэВ | 26,659 |
| ВЕРС | ИИЕР, Пекин, Китай | 1989 - 2005 | e+e- | 2,2 | 5 на 1,55 ГэВ; 12,6 на 1,843 ГэВ | 0,2404 |
| HERA | DESY, Германия | 1992 - 2007 | e+p | e±: 30; p: 920 | 75 | 6,336 |
| PEP-II | SLAC, Стэнфорд, США | 1999 - 2008 | e+e- | e-: 12; e+: 4 | 10025 | 2,2 |
| КЕКВ | КЕК, Япония | 1999 - 2010 | e+e- | e-: 8; e+: 3,5 | 16270 | 3,016 |
| CESR-C | Cornell | 2002 - 2008 | e+e- | 6 | 60 на 1,9 ГэВ | 0,768 |

| | | | | | | |
|-----------|--------------------------|--------|------------------------|--|--|---------|
| ВЭПП-2000 | ИЯФ, Новосибирск, Россия | с 2006 | e+e- | 1,0 | 100 | 0,024 |
| ВЭПП-4М | ИЯФ, Новосибирск, Россия | с 1994 | e+e- | 6 | 20 | 0,366 |
| ВЕРС-II | ИИЕР, Пекин, Китай | с 2007 | e+e- | 1,89 | 2700 | 0,23753 |
| DAFNE | Frascati, Италия | с 1999 | e+e- | 0,7 | 150 | 0,098 |
| Tevatron | Fermilab, США | с 1987 | pp | 980 | 171 | 6,28 |
| RHIC | BNL, США | с 2000 | pp, Au-Au, Cu-Cu, d-Au | 100/n | 10, 0,0015, 0,02, 0,07 | 3,834 |
| LHC | CERN | с 2008 | pp, Pb-Pb | 3500 (планируется 7000), 1380/n (планируется 2760/n) | 10000 (достигнута 3000), 0,001 (планируется) | 26,659 |

Действующие коллайдеры

Данные взяты с сайта Particle Data Group (<http://pdg.lbl.gov>)^[5] и из справочника «*Handbook of accelerator physics and engineering*»^[6].

| Ускоритель | Центр, город, страна | Год запуска | Ускоряемые частицы | Максимальная энергия пучка, ГэВ | Светимость, $10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ | Периметр (длина), км |
|------------|--------------------------|-------------|------------------------|--|--|----------------------|
| ВЭПП-2000 | ИЯФ, Новосибирск, Россия | с 2006 | e^+e^- | 1,0 | 100 | 0,024 |
| ВЭПП-4М | ИЯФ, Новосибирск, Россия | с 1994 | e^+e^- | 6 | 20 | 0,366 |
| БЕРС-II | ИНЕР, Пекин, Китай | с 2007 | e^+e^- | 1,89 | 2700 | 0,23753 |
| DAFNE | Frascati, Италия | с 1999 | e^+e^- | 0,7 | 150 | 0,098 |
| p^+ RHIC | BNL, США | с 2000 | pp, Au-Au, Cu-Cu, d-Au | 100/n | 10, 0,0015, 0,02, 0,07 | 3,834 |
| p^+ LHC | CERN | с 2008 | pp, Pb-Pb, p-Pb | 4000 (планируется 7000), 1380/n (планируется 2760/n) | 10000 (достигнута 7000), 0,001 (планируется) | 26,659 |

Строящиеся и проектируемые коллайдеры

| Ускоритель | Центр, город, страна | Год запуска | Ускоряемые частицы | Максимальная энергия пучка, ГэВ | Светимость, $10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ | Периметр (длина), км |
|-------------|--------------------------|-------------|--------------------|--------------------------------------|--|----------------------|
| SuperKEKB | КЕК, Япония | 2016 | e^+e^- | e^- : 7; e^+ : 4 | 800 000 | 3 |
| NICA | ОИЯИ, Дубна, Россия | 2017 | Au-Au(79+) | 4.5/нуклон | 0.001 | 0.503 |
| Super c-tau | ИЯФ, Новосибирск, Россия | ? | e^+e^- | 2.5 | 100 000 | 0,780 |
| eRHIC | BNL, США | ? | e-p, e-Au | 10-30 (e^-), 250 (p), 130/n (Au) | 1000 (e-p) | 3,834 |
| LEP3 | CERN | ? | e^+e^- | 125 | 10 000 | 26,659 |
| ILC | Япония | 2026? | e^+e^- | 500? | | 30-50? |