

1 НЕДЕЛЯ.

Введение. История создания электрофизических установок для научных исследований.
Применение ЭФУ в народном хозяйстве.

① История ускорителей:

- 1931 г. - первая искусственная ядерная реакция - расщепление ядра молибдена протонами с $W = 700$ кэВ. Кокрофт и Уолтон (Резерфорд лаб.)
- 20-е + 30-е гг. - ускорительные трубки (до 1 МэВ)
- 1930-32 гг. - первый циклотрон (Калифорнийский ун-т, Беркли)
и 352. - д-тактицы с энергией 11 МэВ
382 32 МэВ
- 1940 г. - бетатрон (Керси в АНЛ) $W_e \approx 100$ МэВ (!!!)
- 1944 г. - В.И. Векслер и Мак-Милан описывают принцип автофазировки (Ноб. премия)
- 1947 г. - синхротрон (Векслер, Мельман)
и 49 г. - e^- синхротрон на 280 МэВ (получены мезоны, фототрон (Векслер)
микротрон (Векслер)
и 60 г. - синхротрон до 1 ГэВ
- 1949 г. - фазотрон в Дубне $W_p = 680$ МэВ
в Берли ≈ 700 МэВ
- 1951 г. - синхрофазотрон в Дубне - синхротрон на 10 ГэВ - крупнейший на тот момент ускоритель в мире.
- 1952 г. - Курант, Снайдер, Левингстон предложили принцип местной (самой) фокусировки (также предк. Курант-Снайдер)
20 ГэВ в CERN, 7 ГэВ - ЦТФ, 30 ГэВ - Брукхейвен
- 1959 г. - e^- синхротрон 1959 г. 6 ГэВ, Ереван
- 1967 г. - линейный уск. e^- (3 км, начальные энергии 23 ГэВ, сейчас ок 30 ГэВ)
- с 60-х годов - развиваются коллайдеры
PEP (Сеймур) 18 ГэВ $e^- + e^+$
PETRA (DESY) 19 ГэВ $e^- + e^+$
TRISTAN (КЕК, Япония) 30 ГэВ
протонные
CPS - 25 ГэВ
УФБ (1967 г.) 76 ГэВ
SPS (1976 г.) - 400 ГэВ
Tevatron (Керли) - 400 ГэВ
ТЭВЭТ

Сенсас

LEP (расформирован) CERN $\approx 100 \text{ ТэВ}$ $e^- + e^+$

LHC - (ЕКА - строится) 8 ТэВ протоны

Протонно-нейтронный - 6 ТэВ

ЧЕРА (DESY)

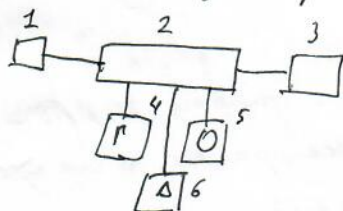
$p^+ + e^-$ коллайдер

$W_p = 820 \text{ ТэВ} + \approx 20 \text{ ТэВ} = W_{e^-}$

② Применение

1. Научные цели:
 - изучение новых частиц и элементов
 - нейтронная физика
2. Практичность:
 - поиск инноваций
 - радиационная модификация полимеров
 - ~~материаловедение~~ материаловедение
 - поиск дефектов в полупроводниках
 - электронно-лучевая сварка.
3. Медицина
 - лечение раковых заболеваний
 - стерилизация
4. Технологии, ядерные технологии

③ Схема ускорителя



1. Источник e^- и e^+
2. Ускорительная структура
3. мишень
4. генератор питания
5. Резонансная система
6. Система управления.

④ Классификация ускорителей

- 1.) Ускорители электронов ионов;
- 2.) Циклотроны и линейные;
- 3.) Ускорители со слабой и сильной фокусировкой;
- 4.) Электростатические, индуцированные и резонансные ускорители
- 5.) С постоянным полем (магнитным или электрическим) и с переменным полем; с постоянной частотой или с переменной частотой.

5.) Основные параметры ускорителей, некоторые константы:

1.) Энергия
$$W = \frac{W_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = \gamma W_0;$$

2.) W_0 - энергия покоя

$$W_0 = m c^2;$$

$$W_{0 p+} = 938 \text{ МэВ}$$

$$W_{0 e-} = 511 \text{ КэВ}$$

$$3.) c - \text{ скорость света } m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг};$$

$$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

4.) Электрон вольт - эВ

энергия порядка связи в атоме (неск. эВ)

5.) Полная энергия

$$W = W_0 + W_k \Rightarrow W_k = W_0 (\gamma - 1);$$

6.)
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad - \text{ Лоренца-фактор, безразмерная энергия;}$$

7.) β - безразмерная скорость; $\beta = v/c$

8.) Импульс

$$p = \frac{m v}{\beta} = m v$$

инвариант

$$pc = m v \cdot c = m c^2 \frac{v}{c} = W \beta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{pc = W \beta}$$

$$\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{W_0}{W}\right)^2} \approx \sqrt{\frac{2 W_k}{W_0}}$$

9.) Константы

$$q_e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \quad 1 \text{ эВ} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

постоянная Больцмана

$$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К};$$

постоянная Планка

$$\hbar = 1.055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} = 6.58 \cdot 10^{-16} \text{ эВ}\cdot\text{с}.$$

10.) Соотношения:

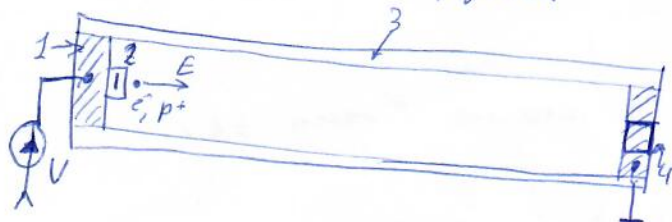
$$\frac{dW}{dp} = v; \quad \frac{dp}{dv} = \frac{1}{v} \frac{dW}{dv} = m_0 \gamma^3$$

2 неделя:

Способы ускорения частиц и типы ускорителей. Источники заряженных частиц. Основные характеристики пучков заряженных частиц. Эмиттеры и акселераторы. Электроны и протоны. Ионы и нейтроны.

① Способы ускорения заряженных частиц. Типы ускорителей.

1. Электростатические ускорители



1. Высоковольтный электрод
2. источник частиц.
3. вакуумная камера.
4. выход вывода частиц.

Ускорительные трубки, ускорители трансформаторного типа, каскадные ускорители, электростатические ускорители.

Трудность энергии

$$\Delta W = e U$$

2. Индукционные ускорители:

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{— уравнение Максвелла}$$

По теореме Стокса:

$$\oint \vec{E} d\vec{r} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} = - \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad \text{где } \Phi = \int \vec{B} d\vec{S} \text{ — магнитный поток}$$

тогда

$$\Delta W = -e \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

Поле должно быть направлено \perp траектории частицы и возрастать, тогда $\frac{\partial \Phi}{\partial t} > 0$.

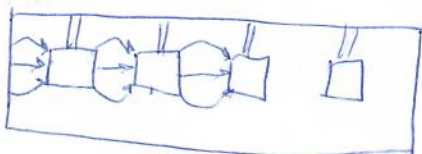
применяется в основном для e^- , т.к. для ионов мало эффективен. Похоже на трансформатор.

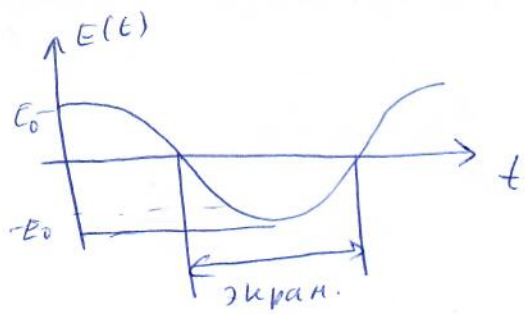
Бетатрон, линейный Бетатрон.

3. Резонансное ускорение

$$E = E_0 \cos \omega t$$

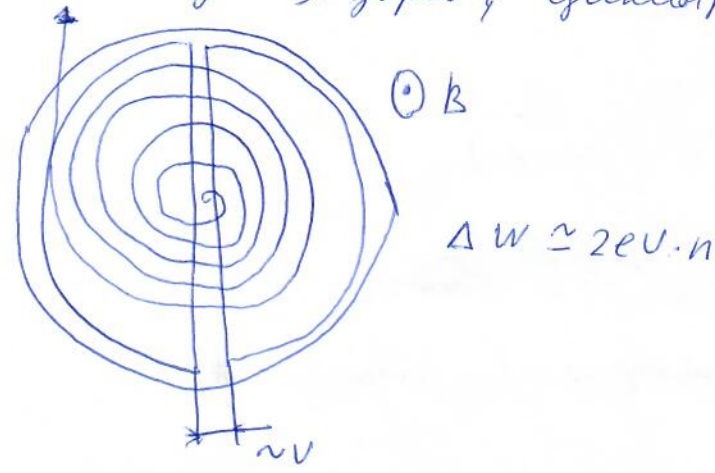
$$\Delta W = e E v$$





Циклический ускоритель:

вместо однократного прохождения Δ зазоров, многократное одно- двух зазоров; циклотрон:



линейные

Амбипот, Вакеррот, RFQ, отдельные резонаторы, К-резонаторы

циклические

микротрон
синхротрон

e^+, e^-

волноводные, резонаторные

циклотрон,
спраотрон,
синхротрон

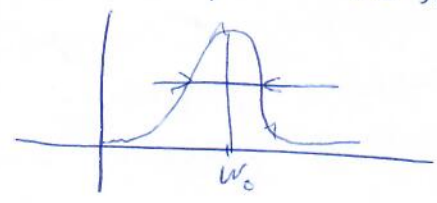
p^+, n и др.

② Основные характеристики пучков

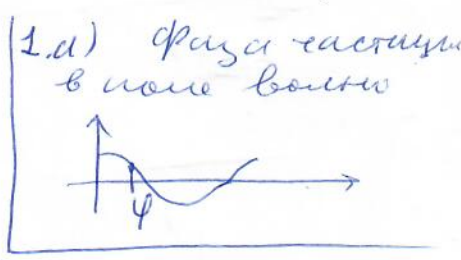
1.) Энергия пучка

$W = \langle W_n \rangle$ - средняя по частицам

2.) Разброс по энергии



ΔW - на полувысоте.



1.а) фаза частицы в поле волны

3.) Ток пучка I .

3а) Мощность $P = IU$

4.) Коэффициент захвата K_3

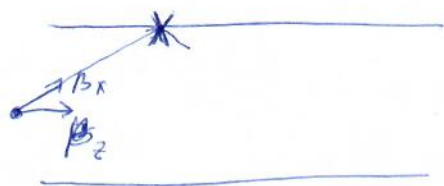
$$K_3 = \frac{N_3}{N} \cdot 100\%$$

5.) Коэффициент прохождения или, правильно
полупрохождение $K_1 = \frac{N_{\text{полд}}}{N} \cdot 100\%$

} расм.
нозднее.

6. Поперечные скорости

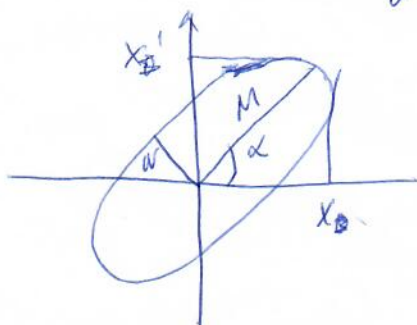
β_x и β_y , обычно меряют $\frac{\beta_x}{\beta_z}$ и $\frac{\beta_y}{\beta_z}$ в %.



7. Период обращения (для циклотрона)

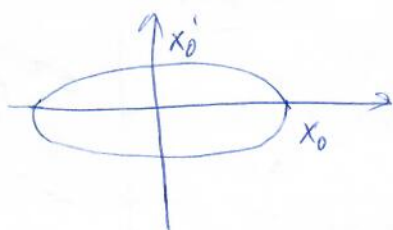
$$T = \frac{U_z}{2\pi R}$$

8. Эллипсис пучка \mathcal{E} , E (амп.)



характеристика пучка !

кривовер



$$\mathcal{E} = \pi x_0 x'_0 \quad \begin{matrix} [\text{мм} \cdot \text{мрад}] \\ \text{или} \\ [\text{см} \cdot \text{мрад}] \end{matrix}$$

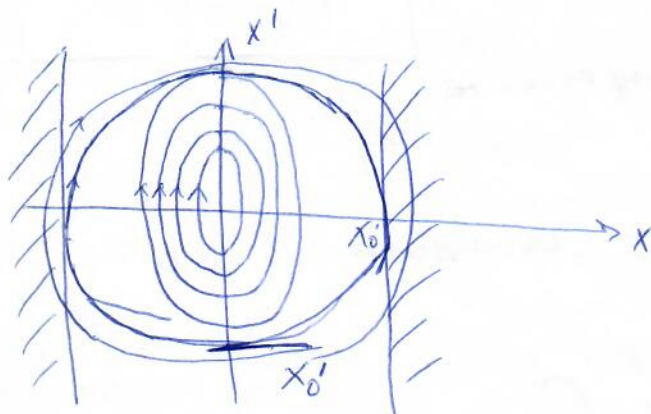
9. Асимптотическая:

$$A \quad [\text{мм} \cdot \text{мрад}]$$

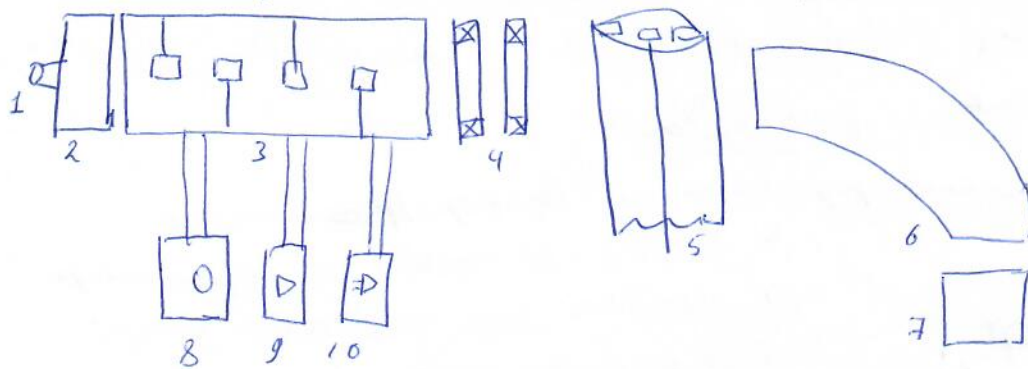
характеристика пучка !

$\mathcal{E} \leq A$ — т.е. Асимптотический — предельный эллипсис пучка, проходящего мимо без потерь.

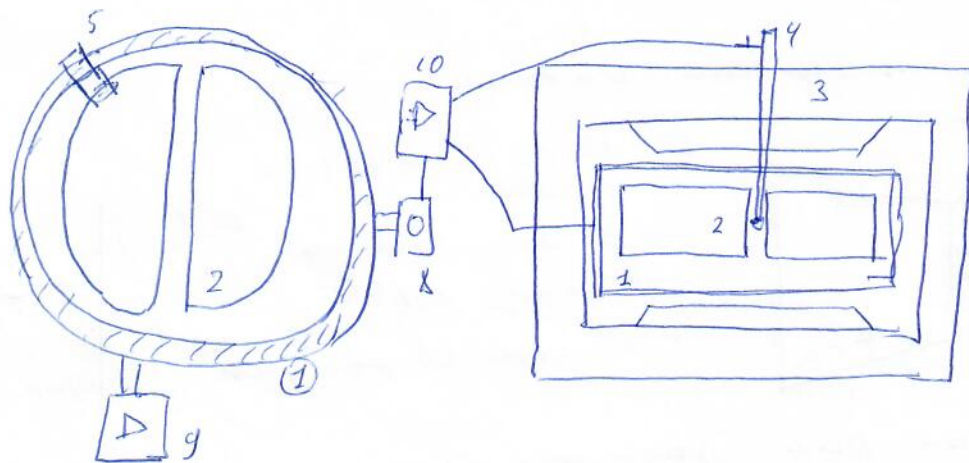
Область устойчивых сфокусированных или поперечных колебаний.



③ Схема ускорителя (линейного и фазин тесного):



1. Источник ионов или электронов с системой формирования.
2. Фокусирующее устройство.
3. Основная секция (DTL, РКФ, М-Р-Р).
4. Фазингирующая система (магнетрон).
5. Пост-ускоритель (1-го, 2-го и много-зазорные резонаторы).
6. Поворотные магниты, сепараторы и т.д.
7. магнетрон.
8. Вакуумная система.
9. генераторы.
10. система управления.



1. Вакуумная камера.
2. ускорительная структура.
3. магнетрон.
4. магнетрон.
5. вход в деи или система ввода.
6. выход из деи или система вывода.

④ Ионные источники:

1. Общая схема:

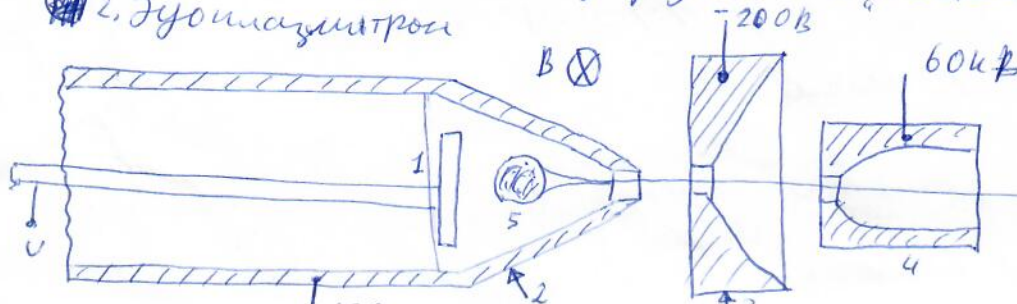


1. источник ионов (катод, пучок).
2. выходной электрод.

Используют газо- и паро-образные в-ва.
(в природе 10% элементов - газы; 23% - жидкости с давлением насыщенного пара $P \geq 0.1 \text{ Па}$ при $T = 300^\circ \div 1000^\circ \text{C}$ - легко испаряются)

Газ или пар ионизируют и «вытесывают».

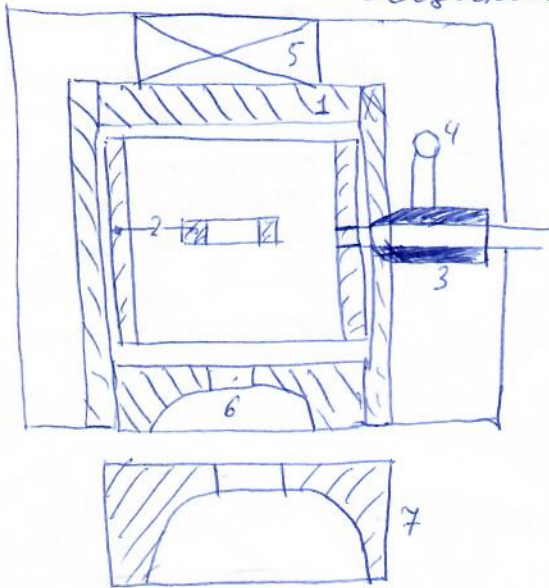
2. Дуодиагнострон



1. катод
2. преэкстракционный электрод
3. анод
4. экстрактор
5. плазма

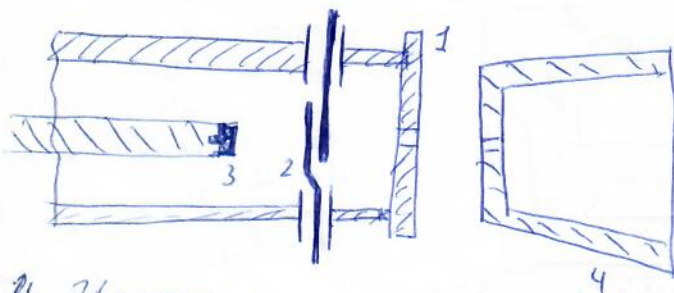
Применяют токены электрод и внешнее магнитное поле обеспечивают создание плазмы и получение высокой мощности дуги ($n \leq 10^{14} \text{ см}^{-3}$), поле $B \approx 0,5 \div 1 \text{ Тл}$
 ток I до $4 \cdot 100 \text{ мА}$; $j \leq 1 \text{ А/см}^2$;

2. Источники с осциллирующими электродами:



1. Катод, 2. анод; 3. изолятор
4. Трубка для подвода газа
5. Постоянное магнит.
6. отверстие для вывода ионов
7. колеблющийся электрод.

3. Источники с испарительными катодами:



1. Анод (графит)
2. Катод
3. разогретый электрод
 $T \approx 600 \div 2000^\circ \text{C}$
4. вытесняющий электрод

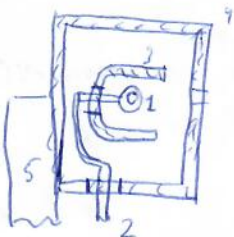
4. Источники на электрон-циклотронном резонансе (интерференционные волны типа 29 В , $^{12} \text{Ar}$)

5. Высокочастотные источники (ВЧ-разряд)

6. Источники с поверхностной ионизацией (щелочные, щелочно-земельные металлы, металлы) 7. Лазерные

Для ↑ энергии применяемой усилительной трубки.

(5) Источники электронов (на примере источника Бетсера)

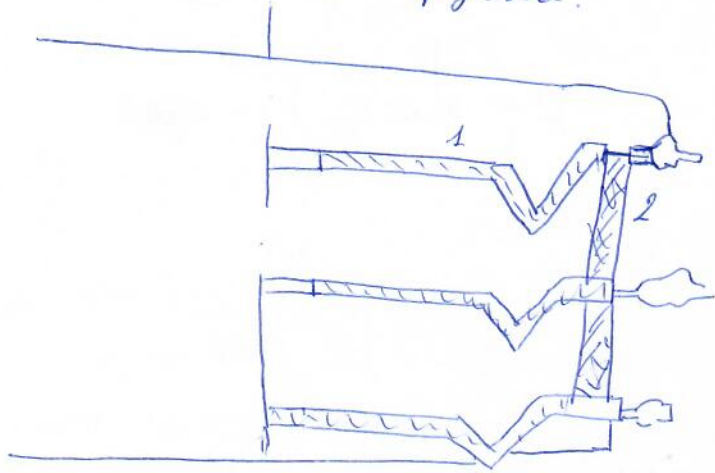


- 1.) Катод
- 2.) нагрев катода
- 3.) фокусирующий (сферич. или параболич. формы) электрод.
- 4.) анод
- 5.) держатель.

Автоэмиссия, взрывная эмиссия.

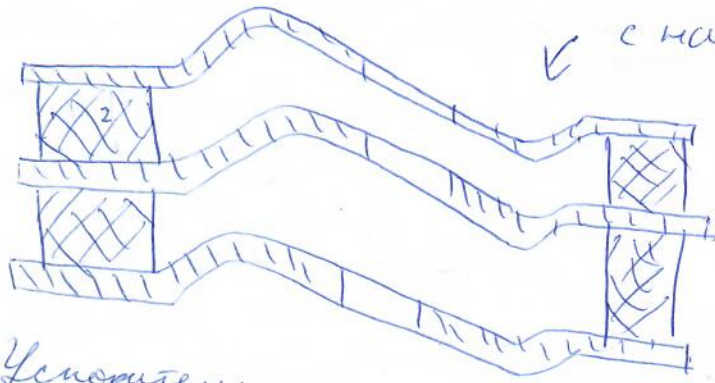
Ускорители прямого действия. Высоковольтные ускорители и ~~и~~ осадывающие и параметры. Сильноточные импульсные ускорители.

① Ускорительные трубки:



1. Металлич. электроды
2. Цилиндр

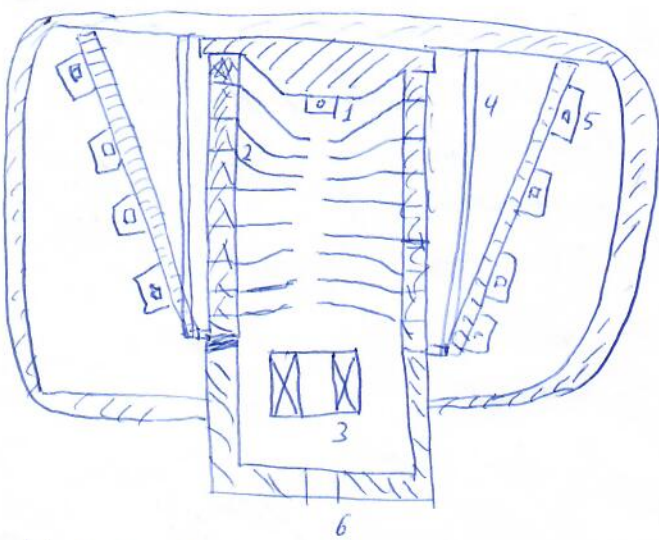
← с ионизатором и электродом



← с намоточным цилиндром

Виды ванн, стержней - газ с высокой ионизацией (N₂, газы SF₆, фреон CCl₂F₂)

② Ускорители трансформаторного типа (высоковольтная трансформатор), потому на ускорительную трубку.



1. Двухфазная пушка
2. Уск. трубка
3. фок. миза (магнит.)
4. Вторичн. обмотка
5. Первичн. обмотка
6. Выводные отверстия

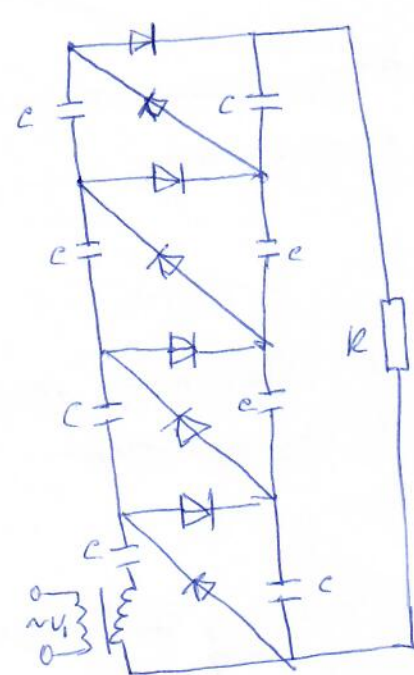
Обычный однофазный ускоритель с рифом в виде емкости, подпитываемый параллельно уск. трубкой

$$V \approx 0,5 \div 1,2 \text{ МВ}$$

$$I \approx 50 \text{ мА}, P \text{ пушки до } 50 \text{ кВт}$$

Самые крупные - у нас НЦЭРА и ИЯФ им. Г.И.Будкера ⑨

3. каскадные ускорители:

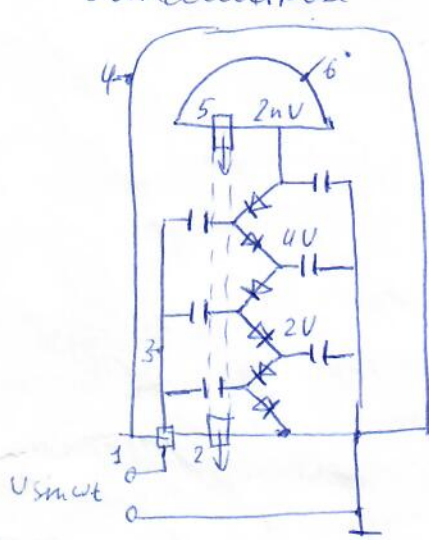


- емкостной наконечник
R - ~~ускоритель~~ (индуктор)

$$\Delta U = \frac{I}{fC} \frac{N}{3} (2N^2 + 1)$$

$$V = 4 \text{ мВ}, p = 25 \text{ кВт}$$

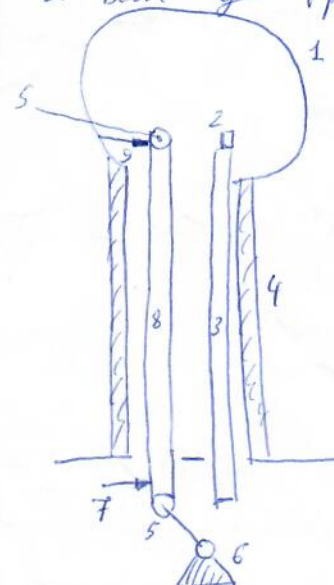
Демонстрация



1. генератор, 2. уск. трубка;
3. ВЧ - электрод; 4. конденсатор;
5. инсектор; 6. выходной электрод.

4. Электростатический ускоритель

1. Ван-де-Граф.



1. Кондуктор; 2. источник e^- ; 3. Уск. трубка;
4. опорная изолирующая колонна; 5. валики; 6. двигатель;
7. зарядное устройство; 8. зарядная цепь; 9. обёмное устройство.

$$U = Q \cdot C$$

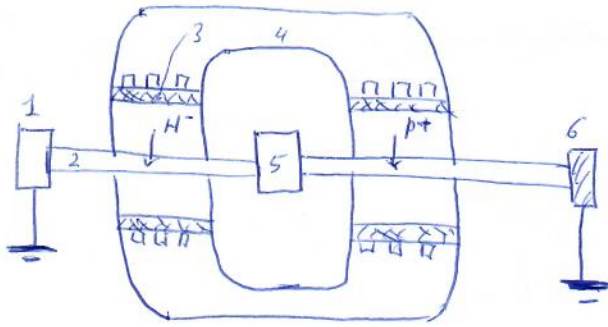
Заряд на кондукторе.
Емк. кондуктора относительно земли

$$E = \frac{U}{R}$$

поле в массе радиус.

при $E = 30 \text{ кВ/см}$ и $W = 3 \text{ МэВ}$ надо $R = 1 \text{ м}$;

2. Перезарядный ускоритель

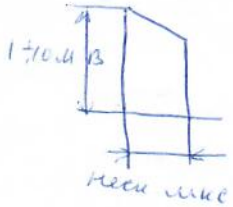
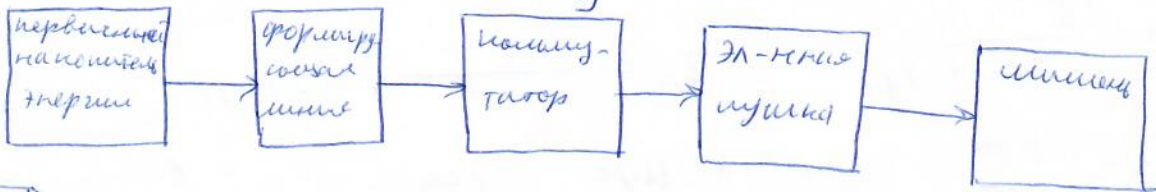


1. Источник отрицательных ионов.
2. Уск. Глубина
3. Изолятор
4. Высоковольтный электрод
5. перезарядная камера
6. мишень.

$W = 3.0 \text{ МэВ}$; $\langle I \rangle \approx 300 \div 550 \text{ нА}$ (В.-де-Г)
 5 нА (перезаряд.)
 $R \approx 2 \text{ м}$; высота/диаметр $\approx 40 \text{ мм} / 11 \text{ м}$.

5. Сильноточные импульсные генераторы электронов: (СГУ)
 $W \approx (1 \div 10) \text{ МэВ}$; $I = 10 \div 100 \text{ нА}$; (до 1 МА)
 $\tau_{\text{имп}} \approx 30 \div 50 \text{ нс}$.

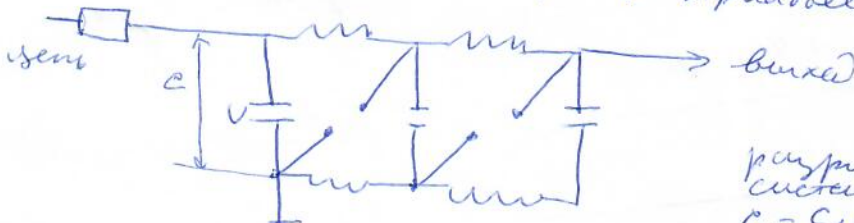
1. Основные узлы СГУ



$$I = \frac{U}{R_{\text{нагр.}}}$$

2. Накопители энергии

— емкостные (генератор Аркадьева - Маркса)
 зарядная цепь



$$W_1 = \frac{C_1 U^2}{2}; \quad W_n = n W_1$$

разрядники срабатывают и система становится устойчивой.
 $C = C_1/n$ $U = n U_1$

- индуктивные (большие времена вывода)
- химические (взрывные) малое время
- ударные генераторы (маховики)
- дирижированные.

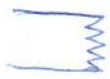
3. Промежуточные формирующие линии:
- коаксиальные и волноводные линии
 - двойные подклемочные линии

4. Коммутаторы

- твердотельные разрядники
- тонкие проводники (Fuses)
- магнитные замыкатели.

5. Пушки:

взрывозимесонные катоды.

 - нити, вольфрамы, молибден. (требуется согласование.)

6. Нагрузка

- Охлаждение (в т.ч. имитация ядерного взрыва)
- генерация мощных импульсных наблюдений.

7. Предельный ток, усредненный в релятивистском случае

$$I_{\text{ср}} = I_A \frac{(\gamma^{2/3} - 1)^{3/2}}{1 + 2v_{\text{ср}} R_{\text{с}} / R_{\text{п}}} ; I_A = \frac{4\pi \epsilon_0 m c^3}{e} \approx 17 \text{ кА} ; \tau_0 = \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 m c^2} - \text{радиус } e^-$$

$R_{\text{с}}$ - радиус трубки ; $R_{\text{п}}$ - радиус нити.

8. Действующие установки:

$$W \approx 3 \div 4 \text{ МДж} ; \tau \approx 30 \div 50 \text{ нс} ; I \approx 100 \text{ кА}.$$

Стрел - генератор Aurora

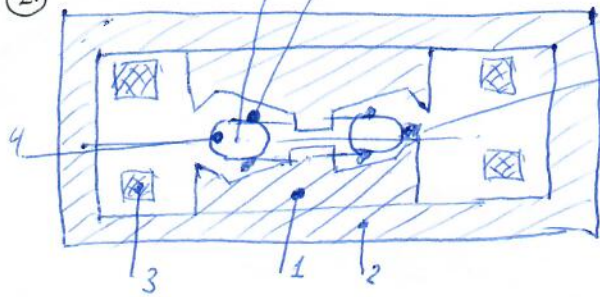
	рабочие	предельные
V	12 МВ	14 МВ
I	4 x 300 кА	до 400 кА
P	14,4 ТВт	
τ	$\approx 12 \text{ нс}$	

для имитации ядерного взрыва.

4 неделя.

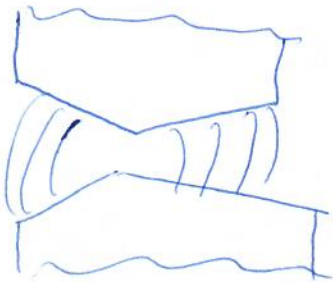
Индукционное ускорение. Бетатрон, мгновенный бетатрон

(1.)



1. Подвижный наконечник магнита
2. Ядро
3. Обмотки электромагнита
4. Мишень
5. Вакуумная камера

6. Экранирующие обмотки;
7. Инжектор.



Индукционный (резонансный) ускоритель. Патентный радиус, Вадеро, 1940г.

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.)$$

или в интегральной форме:

$$\oint \vec{E} d\vec{e} = \frac{d}{dt} \int \vec{B} d\vec{s} \quad (2) \Rightarrow \text{изм. магнитного потока.}$$

За один оборот

$$\oint \vec{E} d\vec{e} = 2\pi r E; \quad (3.)$$

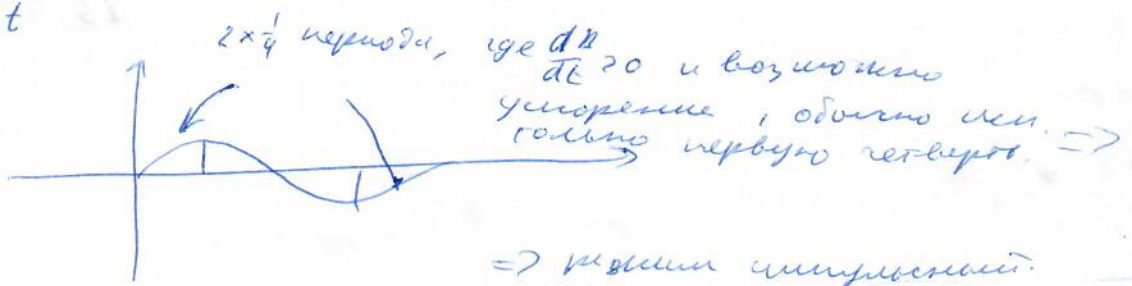
$$- \frac{d}{dt} \int \vec{B} d\vec{s} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (4) \text{ изм. магнитного потока,}$$

из (3) и (4)

$$E = \frac{1}{2\pi r} \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\frac{d\Phi}{dt} > 0$$

$$B = B_0 \sin \omega t$$



Для того, чтобы $R = \text{const.}$

$$F_{\text{ц.б.}} = \frac{m v^2}{R}; \quad F_{\text{усл.}} = +eR \frac{\partial B_0}{\partial t} \quad (\text{т.к. } p = -eR B_0(t))$$

$R_{\text{орб.}}$ - радиус орбиты.

$$\frac{dp}{dt} = eE \Rightarrow \frac{dp}{dt} = e \frac{2\pi R^2}{2\pi R} \frac{\partial B}{\partial t} = \frac{eR}{2} \frac{\partial B}{\partial t}$$

Т.к.

$$E_{\text{усл}} = \frac{1}{2\pi R} \cdot \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \cdot 2\pi R^2 = \frac{R}{2} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

\bar{B} - среднее значение \vec{B} по всей площади магнита

таким образом

$$e E_{\text{усл}} = e R \frac{\partial B_{\text{одорат}}}{\partial t} = e \frac{R}{2} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = \frac{\partial B_{\text{одорат}}}{\partial t}} \quad \text{усл. Вудерост или основное сепарационное уравнение.}$$

(2) Основным возможным процессом термин:

$$\text{напомним } \frac{d\Phi}{dt} \approx \frac{\Phi_{\text{макс}}}{t_{\text{усл}}}$$

$$\Phi_{\text{макс}} = \pi k^2 B_{\text{макс}}$$

тогда

$$E_{\text{усл}} = \frac{R}{2} \frac{B_{\text{макс}}}{t_{\text{усл}}}$$

$$B = 0.5 \text{ Тл}; \quad R = 0.3 \text{ м}; \quad t_{\text{усл}} = 10 \text{ мс} \quad (\text{обычно время формирования} = 40 \text{ мс})$$

$$E_{\text{усл}} = 7.5 \text{ В/м};$$

$$\Delta V_{\text{одорат}} = E_{\text{усл}} \cdot 2\pi R = 15 \text{ В/одорат}$$

Основным предположением термин и число одоратов:

$$\text{учет } \beta = 1 \Rightarrow \sigma = \epsilon = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$\frac{2\pi R \cdot \beta}{c} = t_{\text{одорат}}; \quad t_{\text{усл}} = n \cdot t_{\text{одорат}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n = \frac{t_{\text{усл}}}{2\pi R} = \frac{10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^8}{2} = 1.5 \cdot 10^6 \text{ одоратов} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \underline{W_{\text{усл}} = 23 \text{ МэВ}}$$

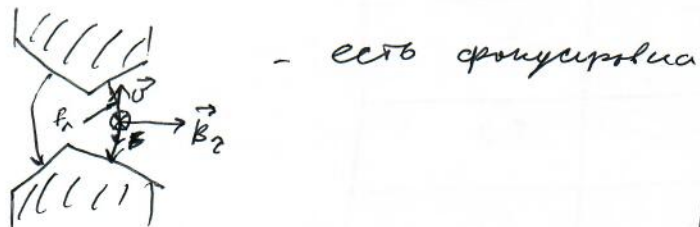
(3) Условие сохранения построенной орбиты:

$$F_{\text{г}} = \frac{m \sigma^2}{R} = \frac{e \sigma B}{F_{\text{л}}} \Rightarrow \frac{v}{R} = \omega = \frac{e B}{m \gamma}$$

~~Ускорение~~

Индукционное ускорение. Бетатрон. Лнейный бетатрон.

4. Фокусировка в бетатроне:
2 системы
"боковообразная"



$$\vec{F}_A = -e[\vec{v}, \vec{B}]$$

"подушкообразная"

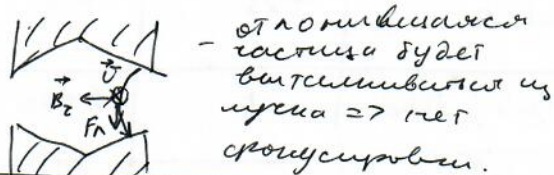


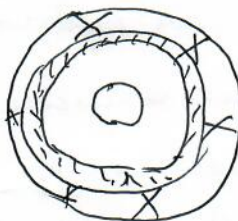
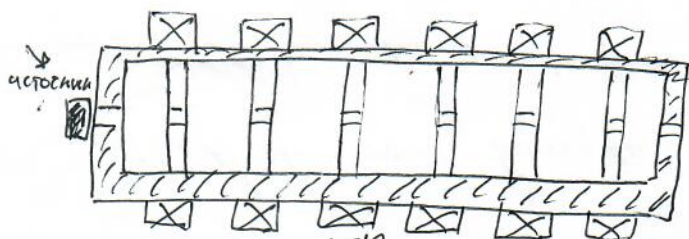
Схема вакуумной камеры



5. Параметры индукционных бетатронов:

		U, МэВ	мощность дозы, е ⁻ Р/мин	мощность дозы γ, Р/мин
Б5-25, СССР	γ, е ⁻	7-25	300	40
Суперс, ФРГ		6-42	500	100
БТ-20А, ФРГ Мишадзу, Япон.		4-20	700	60
25 RTM, ФРГ "Алге-Чайерс", США		10-25	600	20

6. Лнейный бетатрон



$$W = -e \frac{d\Phi}{dt} = eS \frac{dB}{dt} \approx eS \frac{\Delta B}{T}, \text{ где}$$

S - сечение сердечника индуктора; ΔB - максимальное изменение индукции; T - длительность импульса

$$T_{феррит} = 10-50 \text{ нс}$$

$$T_{кратковолна} \approx 1 \text{ нс}$$

$$\frac{\Delta W}{\Delta z} \leq 1 \text{ МэВ/м с исп. современных материалов до } 5 \text{ МэВ/м}$$

(7.) Параметры ионных бетатронов:

	n , мер	$I_{\text{ион}}, \text{А}$	$T_{\text{ион}}, \text{нс}$	связанность ϵ^{-1}
ЛЧУ-3000*, Дудна	3	200	350	25
ЕТА, Инвертор, СМА	4	8000	30	1
ЕКА, Берияч, СМА	4,25	500	45	1
"Спайд",* Дудна	3	2000	20	50
ЛУИ 5/5000, Москва	5	5000	50	1
АТА, инвертор	50	10.000	70	5
АТА 2, инвертор	300	4.000	70	2000

* Все наши ~~ион~~ ион. бетатроны сделаны в НИИЭЧА.

(8.) Бетатронные колебания:



$$\frac{m v^2}{R} = e v B_0 - \text{на равновесной траектории;}$$

Пусть частица отклонится на ординату радиуса z и $z = R + x$, где $x \ll R$

Тогда можно у.о. силу разности в маг:

$$F_{\text{и.о}} = \frac{m v^2}{z} = \frac{m v^2}{R+x} = \frac{m v^2}{R(1+x/R)} \approx \frac{m v^2}{R} - \frac{m v^2}{R} \frac{x}{R} + \dots$$

$$F_{\text{век}} = e v B_z(z) = e v B_0 - e v \left. \frac{\partial B_z}{\partial z} \right|_{x=0} \cdot x + \dots$$

Тогда приравняем, искомое равновесие составляющую и получаем:

$$F = \frac{m v^2}{z} - e v B_z(z) =$$

$$= - \frac{m v^2}{k^2} x - e v \frac{\partial B_z}{\partial z} x \approx - \frac{m v^2}{k^2} \left(1 - \frac{k}{B_0} \frac{\partial B}{\partial r} \Big|_{x=0, z=0} \right) x =$$

$$\approx - \frac{m v^2}{k^2} (1-n) x, \text{ где } n - \text{показатель силы магнитного поля.}$$

$$k = \frac{m v^2}{e B_0} \quad \text{и} \quad \frac{\partial B_z}{\partial z} = - \frac{B_0}{R}$$

$$e v \frac{\partial B_z}{\partial z} x = \frac{m v^2}{k^2} x \left(\frac{\partial B_z}{\partial z} \frac{k^2 e}{v m} \right) = \left(\frac{m v^2}{k^2} x \cdot \frac{\partial B_z e k}{\partial z B_0} \right)$$

Если магнитное поле 1.) однородное, то $n=0$
 2.) растет с радиусом $n < 0$
 3.) падает с радиусом $n > 0$,
 применим, если на поверхности $B \sim 1/r$, то $n \rightarrow 1$

Аналогично можно найти и ~~и~~ силу в вертикальном направлении:

тот $\vec{B} = 0$ - упр. Максвелла \Rightarrow

$$\Rightarrow \frac{\partial B_r}{\partial z} \Big|_{z=0, z=k} = \frac{\partial B_z}{\partial r} \Big|_{z=0, r=k} = - n \frac{B_0}{R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_z = - n \frac{m v^2}{k^2} z;$$

или

Обозначим

$$\boxed{\frac{v^2}{k^2} = \omega^2}$$

$$\boxed{\begin{aligned} F_x &= -(1-n) \omega^2 m x \\ F_z &= -m \cdot n \cdot \omega^2 z \end{aligned}}$$

Как известно:

$$\frac{d v_x}{d t} = \frac{d^2 x}{d t^2} = \frac{F_x}{m} \quad \text{и} \quad \frac{d v_z}{d t} = \frac{d^2 z}{d t^2} = \frac{F_z}{m}; \text{ перепишем:}$$

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{d^2 x}{d t^2} + \omega^2 (1-n) x &= 0 \\ \frac{d^2 z}{d t^2} + \omega^2 n z &= 0 \end{aligned}}$$

- уравнение гармонических колебаний.

Решение:

$$\begin{cases} x = A_x \sin(\omega_x t + \varphi_x) \\ z = A_z \sin(\omega_z t + \varphi_z) \end{cases}, \text{ где } \omega_x = \omega \sqrt{1-n}; \quad \omega_z = \sqrt{n} \omega;$$

Тип малых возмущений от равновесной орбиты:

$$\frac{dS}{dt} \approx U_z, \text{ где } S - \text{направление вдоль траектории}$$

и

$$\frac{d^2 x}{dS^2} + (1-n) \frac{x}{R^2} = 0$$

$$\frac{d^2 z}{dS^2} + n \frac{z}{R^2} = 0$$

$$\frac{dp_x}{dt} = F_x$$

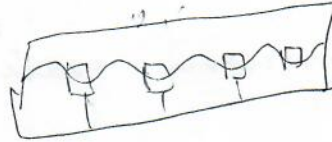
$$\frac{dp_z}{dz} = F_z$$

$$\frac{d^2 S}{dt^2}$$

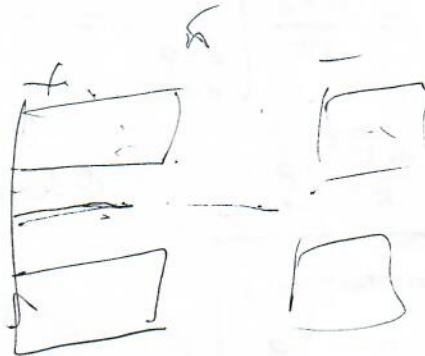
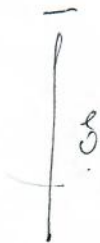
Для устойчивого движения необходимо

$$\omega_x^2 \geq 0 \text{ и } \omega_z^2 \geq 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0 < n < 1$$



$$|E|/J_c$$



1)

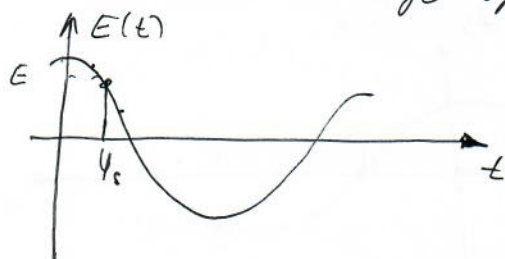
Резонанс

миссия резонансного ускорения. Амплитудирование
луча. Поперечная ускоренность и фокусировка луча
в продольном магнитном поле.

Бегущая

Линейные резонансные ускорители: генератор Вандерпола,
Анодировка, ускорители на бегущей волне.

① Резонансное ускорение:



$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{e}{m} E \cos \varphi$$

② Амбипольность, переносимость микроволн:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{e}{m} E \cos \varphi$$

$$\frac{d\psi_s}{dt} = \frac{e}{m} E \cos \varphi_s, \quad \text{где } \psi_s - \text{скорость сфокусированной}$$

расширения

$$\frac{d(\psi - \psi_s)}{dt} = \frac{e}{m} E (\cos \varphi - \cos \varphi_s)$$

$$\varphi = k z - \omega t, \quad k = \frac{\omega}{v_{gr}} - \text{продольное волновое}$$

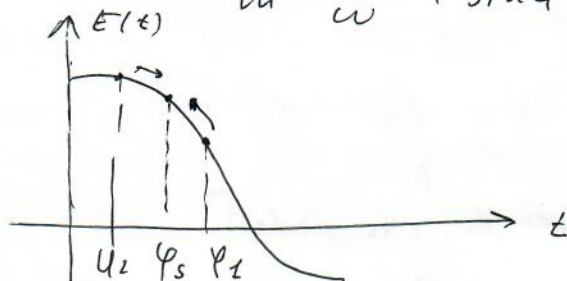
число

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega \left(\frac{1}{v_{gr}} - \frac{1}{v} \right) v = \frac{\omega}{v_{gr}} (\psi - \psi_s)$$

$$\frac{\omega}{v_{gr}} \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{1}{2} (\psi - \psi_s)^2 \right) = \frac{e}{m} \{ E (\cos \varphi - \cos \varphi_s) \frac{d\varphi}{dt} \}$$

тогда

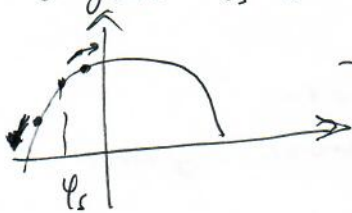
$$(\psi - \psi_s)^2 - \frac{2e}{m} \frac{E \psi_s}{\omega} (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s) = \text{const}$$



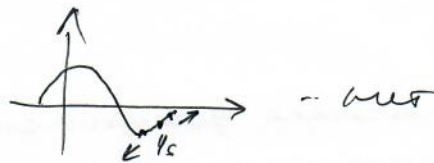
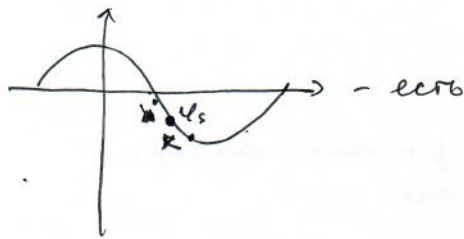
для φ_1 прирост скорости
меньше, чем для φ_s \Rightarrow она
будет отставать по фазе
для φ_2 - наоборот.

(74)

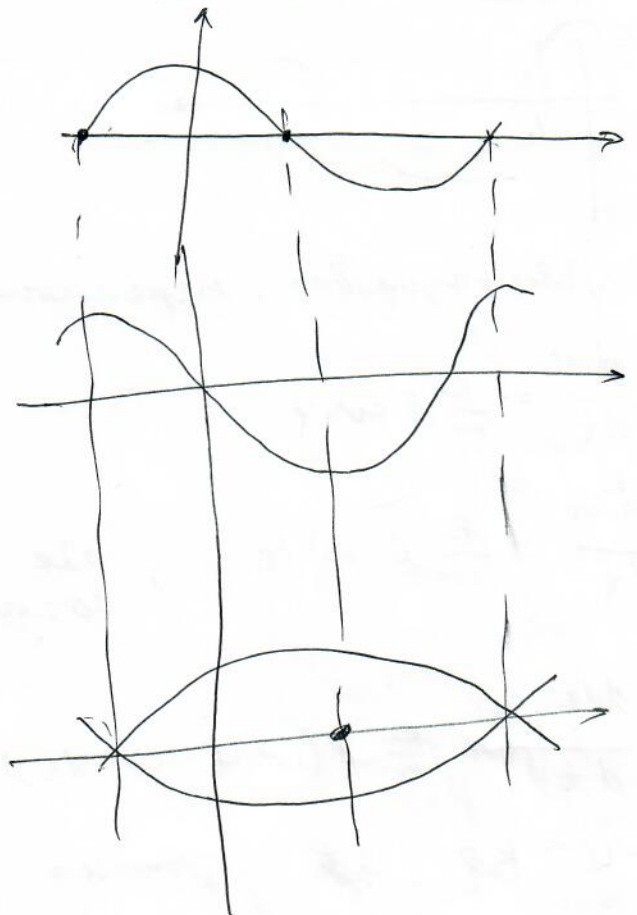
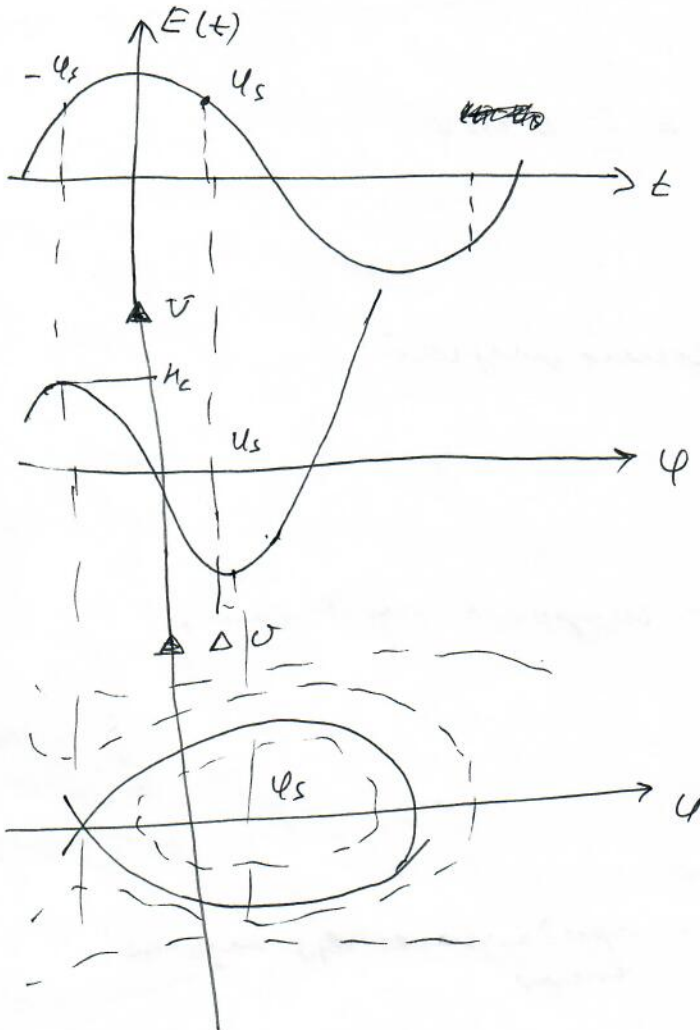
Рисунок $\psi_s < 0$ (cos мнимая)



- вет абсорбируется



Средний случай
 $\psi_s = \pi/2$



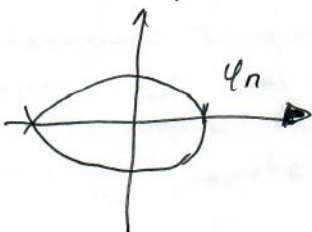
Найдем H_c при $\psi = \psi_s$

$$-\frac{2eE\psi_s}{m\omega} (-\sin\psi_s - \psi_s \cos\psi_s) = H_c$$

То же:

$$(\psi - \psi_s)^2 - \frac{2eE\psi_s}{m\omega} ((\sin\psi - \sin\psi_s) - (\psi - \psi_s) \cos\psi_s) = 0$$

2. Контуры замкнутого контура:



$$-\frac{2eE\psi_s}{m\omega} (\sin\psi_n - \psi_n \cos\psi_s) = H_c =$$

$$= \frac{2eE\psi_s}{m\omega} (\sin\psi_s - \psi_s \cos\psi_s)$$

$$-(\sin \varphi_A - \varphi_n \cos \varphi_s) = \sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s$$

Введем новую фазовую переменную:

$$\Psi = \varphi_n - (-\varphi_s) = \varphi_n + \varphi_s \Rightarrow \varphi_n = -\varphi_s + \Psi$$

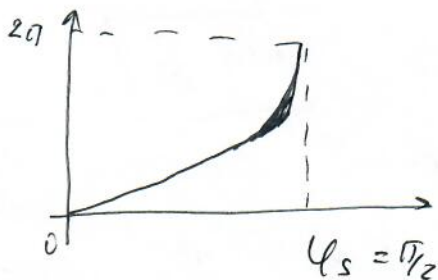
$$-\sin(\Psi - \varphi_s) + (\Psi - \varphi_s) \cos \varphi_s = \sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s$$

$$\sin(\varphi_s - \Psi) + \Psi \cos \varphi_s = \sin \varphi_s$$

$$\sin \varphi_s \cos \Psi - \cos \varphi_s \sin \Psi = \sin \varphi_s - \Psi \cos \varphi_s \quad / \frac{1}{\cos \varphi_s}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_s \cdot \cos \Psi - \sin \Psi = \operatorname{tg} \varphi_s - \Psi$$

$$\boxed{\operatorname{tg} \varphi_s = \frac{\sin \Psi - \Psi}{\cos \Psi - 1}} \quad - \text{вызб} \varphi_s \text{ и } \Psi.$$



$$\text{при } \varphi_s \approx \pi/3 \\ \Psi \approx 3\varphi_s$$

② Матричные фазовые уравнения:

$$\frac{d(\psi - \psi_s)}{dt} = \frac{e}{m} E (\cos \varphi - \cos \varphi_s)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\omega}{\varphi_p} (\psi - \psi_{cr})$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{\omega}{\varphi_p} \frac{d\psi - \psi_{cr}}{dt} = \frac{e E \omega}{m \varphi_p} (\cos \varphi - \cos \varphi_s) =$$

$$= \frac{e E \omega}{m \varphi_p} (\cos(\varphi_s + \Delta\varphi) - \cos \varphi) \approx \frac{e E \omega}{m \varphi_p} (\cos \varphi_s -$$

$$- \sin \varphi_s \Delta\varphi - \cos \varphi_s) = - \frac{e E \omega}{m \varphi_p} \sin \varphi_s \Delta\varphi$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \Omega^2 \Delta\varphi = 0 \quad \text{или} \quad \boxed{\frac{d^2 \Delta\varphi}{dt^2} + \Omega^2 \Delta\varphi = 0}$$

(4) Автофазирование в ~~разделительных зонах~~ коммунальных предприятий

$$\varphi = \varphi_0 - \omega_0 t$$

— фаза в момент времени

q - кратность ускорения (const, кратное микропотенци) q -фактор
 $w = \frac{w_0}{q}$ - уzm. скорости. Ускорения q -фактор

$w = \frac{\omega_0}{q}$ - угл. скорость. ускорение $\omega = \frac{dw}{dt}$

Застава Обращення = застой укл. чина, или если они известны, иль

$W = eU$ - кинетическая энергия электронов

Tor da $V = 25 K E_0$

$$\begin{cases} \frac{dw}{d\theta} = \frac{1}{2\pi} eV \cos \varphi \\ \frac{d\varphi}{d\theta} = 1 - \frac{w_0}{w} \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{dw_s}{d\theta} = \frac{eV}{2\pi} \cos \varphi_s \end{cases}$$

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{eV}{2\pi} (\cos\phi - \cos\phi_s)$$

$$w = \frac{v}{R}$$

~~Наименование и адрес организации, в которой производится работа~~

[Handwritten signature]

$$H = -\frac{eV}{2\pi} (\sin\varphi - q \cos\varphi_s) + \int_0^w \left[q - \frac{w_0}{w(w)} \right] dw \quad T = \frac{2\pi}{\omega_c}$$

5. автофазировка в реперных точках:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw}{dz} &= eE \cos \varphi \\ \frac{d\varphi}{dz} &= \omega \left(\frac{1}{v_0} - \frac{1}{v} \right) \end{aligned} \right\}$$

введем новые переменные

$$g^2 = \frac{u}{u_0}; \quad \beta = \frac{v}{c}; \quad \xi = \frac{2\pi z}{\lambda}$$

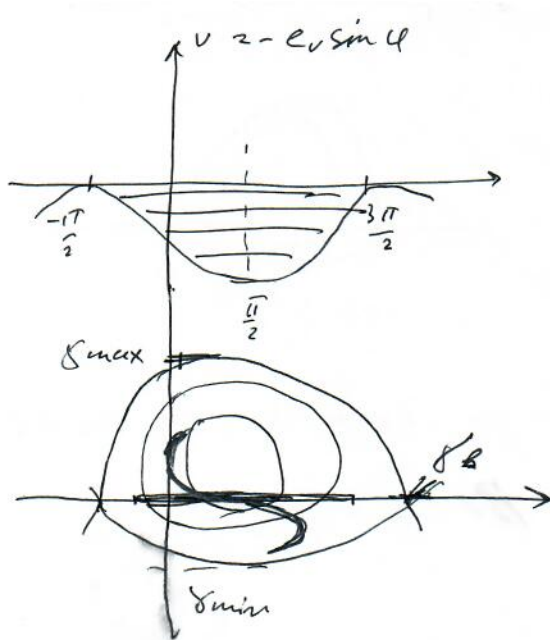
გუდა

$$\begin{cases} \frac{d\gamma}{d\xi} = \frac{eE\lambda}{2\pi mc^2} \cos\varphi = e\nu \cos\varphi = -\frac{\partial H}{\partial\varphi} \\ \frac{d\varphi}{d\xi} = \frac{1}{\beta\gamma} - \frac{1}{\beta} = \frac{\partial H}{\partial\gamma} \end{cases}$$

5

$$H = -e_v \sin \varphi + \left(\frac{f_g}{\beta g} - \sqrt{f_g^2 - 1} \right) = v + T$$

$$P_6 = \frac{\sqrt{86^2 - 1}}{86}$$



$$\begin{aligned}
 H_c &= e_v + \frac{\gamma_B}{\beta_B} - \sqrt{\gamma_B^2 - 1} = \\
 &= e_v + \left(\frac{\gamma_B^2}{\sqrt{\gamma_B^2 - 1}} - \sqrt{\gamma_B^2 - 1} \right) = \\
 &= e_v + \frac{(\gamma_B^2 - \gamma_B^2 + 1)}{\sqrt{\gamma_B^2 - 1}} = \\
 &= e_v + \frac{1}{\sqrt{\gamma_B^2 - 1}} \\
 \boxed{H_c = e_v + \frac{1}{\sqrt{\gamma_B^2 - 1}}}
 \end{aligned}$$

Рассмотрим теперь координаты:

$$e_v \sin \varphi = \left(\frac{\gamma}{\beta_B} - \sqrt{\gamma^2 - 1} \right) - H;$$

$$e_v \cos \varphi = \frac{d\gamma}{d\xi}$$

$$\begin{aligned}
 e_v^2 \sin^2 \varphi + e_v^2 \cos^2 \varphi &= \left(\frac{\gamma}{\beta_B} - \sqrt{\gamma^2 - 1} - H \right)^2 + \left(\frac{d\gamma}{d\xi} \right)^2 \Rightarrow \\
 \Rightarrow \left(\frac{d\gamma}{d\xi} \right)^2 + \left(\frac{\gamma}{\beta_B} - \sqrt{\gamma^2 - 1} - H \right)^2 &= e_v^2 \quad \text{или} \\
 &2v
 \end{aligned}$$

$$\boxed{\left(\frac{d\gamma}{d\xi} \right)^2 + 2v = e_v^2}$$



6. Найдем теперь вертикальный изгиб сепаратрисы:

$$\Delta \gamma = \gamma_{\max} - \gamma_{\min} \quad \text{при} \quad \varphi = \pi/2$$

$$-e_v \sin \varphi + \left(\frac{\gamma}{\beta_B} - \sqrt{\gamma^2 - 1} \right) = H$$

$$e_v + \frac{1}{\sqrt{\gamma_B^2 - 1}} = H_c$$

$$\text{или} \quad \varphi = \pi/2$$

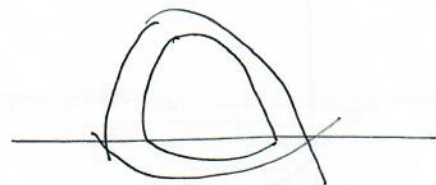
$$\frac{\gamma_m}{\beta_B} - \sqrt{\gamma_m^2 - 1} = 2e_v + \frac{1}{\sqrt{\gamma_B^2 - 1}}$$

$$\gamma_m - \beta_B \sqrt{\gamma_m^2 - 1} = \boxed{2e_v \beta_B + \frac{\beta_B}{\sqrt{\gamma_B^2 - 1}}} = C$$

$$\beta \sqrt{\gamma_m^2 - 1} = C + \gamma_m$$

$$\beta^2 (\gamma_m^2 - 1) - \gamma_m^2 + 2C\gamma_m - C^2 = 0$$

$$\gamma_m^2 (\beta^2 - 1) + 2C\gamma_m - (C^2 + \beta^2) = 0$$



$$\gamma_{\min}^{\max} = C \pm \sqrt{C^2 - (C^2 + \beta^2)(\beta^2 - 1)} \quad - \text{всегда 2 решения, т.к. } \beta \leq 1$$

(7) Рассмотрим предельный случай $\beta = 1$

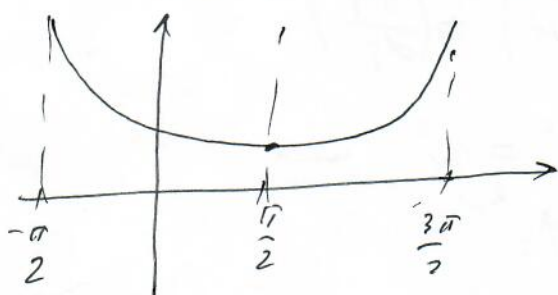
$$-e_v \sin \varphi + (\gamma - \sqrt{\gamma^2 - 1}) = H$$

$$H_c = e_v + \frac{1}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} = e_v \quad (\text{т.к. } \gamma \rightarrow \infty)$$

Преобразуем:

$$-e_v \sin \varphi + \gamma \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}\right) = \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$= -e_v \sin \varphi + \gamma (1 - \beta) = H$$



в этом случае $\gamma_{\min} = 2C = 4e_v$

Можно убедиться, что

$$\sin \varphi \rightarrow -\frac{H}{e_v} \Rightarrow \boxed{H \leq e_v} \quad - \text{при этом условии траектории могут достигать только угодно больших значений}$$

? Задача: найти γ_{\min} в этом случае

(8) Поперечная устойчивость ионизированного пучка в продольном и.и. аналогична рассмотренной для движения по оси, необходимо рассмотреть поперечную устойчивость движения пучка;

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{E} + e[\vec{v}, \vec{B}] \quad - \text{если ускорение в продольном направлении и дефокussирован в поперечном.}$$

Рассмотрим систему (сильноид), где есть только продольная компонента магнитного поля:

$$\vec{B} = (0, 0, B_2);$$

тогда

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{dp_z}{dt} \vec{e}_z + \frac{dp_\theta}{dt} \vec{e}_\theta + \frac{dp_r}{dt} \vec{e}_r$$

магнитное поле

$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{внеш}} + \vec{B}_{\text{ядро}} ; \quad \frac{d\vec{p}}{dt} = e[\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}]] = \vec{F}_{\text{ядро}} + \vec{F}_{\text{внеш}}$$

$$\vec{F}_{\text{ядро}} = e[\vec{v}, \vec{B}_{\text{ядро}}];$$

$$p_z = m\gamma \frac{dz}{dt} ; \quad p_r = m\gamma r \frac{dr}{dt} ; \quad p_\theta = m\gamma r \frac{d\theta}{dt} \quad - \text{в цилиндрической системе координат } (r, \theta, z).$$

$$\vec{p} = p_r \vec{e}_r + p_z \vec{e}_z + p_\theta \vec{e}_\theta;$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \dot{p}_r \vec{e}_r + p_r \dot{\vec{e}}_r ; \quad \frac{d\vec{e}_\theta}{dt} = -\dot{\theta} \vec{e}_r$$

Заменим теперь \vec{p} :

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{p}}{dt} &= \frac{dp_z}{dt} \vec{e}_z + \frac{dp_r}{dt} \vec{e}_r + \frac{dp_\theta}{dt} \vec{e}_\theta + p_r \dot{\vec{e}}_r + p_\theta \dot{\vec{e}}_\theta = \\ &= \vec{e}_z \left(\frac{dp_z}{dt} - p_\theta \dot{\theta} \right) + \vec{e}_r \left(\dot{p}_r + \frac{dp_\theta}{dt} \right) + \vec{e}_\theta p_z \end{aligned}$$

тогда получим уравнения движения

$$\frac{dp_z}{dt} = e v_\theta B_z ; \quad \frac{dp_\theta}{dt} = -e v_r B_z ;$$

выразим:

$$\begin{cases} \frac{dp_z}{dt} - p_\theta \dot{\theta} = e v_\theta B_z + e E_z ; & - \text{хотим, чтобы правая часть была нуль.} \\ \frac{dp_\theta}{dt} + p_r \dot{\theta} = -e v_r B_z + e E_\theta ; \\ \frac{dp_r}{dt} \pm p_\theta E_z ; \end{cases}$$

$$p = m\gamma v, \text{ тогда}$$

$$(*) \begin{cases} m \frac{d\gamma}{dt} \frac{dz}{dt} + m\gamma \frac{d^2 z}{dt^2} - m\gamma z \frac{d\theta}{dt} \dot{\theta} = e v_\theta B_z + e E_z & (z) \\ m z \gamma \frac{d^2 \theta}{dt^2} + m r \gamma \frac{d\theta}{dt} \dot{\theta} + m\gamma \frac{dr}{dt} \dot{\theta} = -e v_r B_z + e E_\theta & (\theta) \\ m \frac{d\gamma}{dt} \frac{dz}{dt} + m\gamma \frac{d^2 z}{dt^2} = e E_z \end{cases}$$

Рассмотрим теперь движение по z:

$$F_z = e v_\phi B_z + e E_z$$

c другой стороны:

$$m \frac{d\gamma}{dt} \cdot \frac{dz}{dt} + m \gamma \frac{d^2 z}{dt^2} - m \gamma z \frac{d\phi}{dt} \dot{\phi} =$$

$$= m \frac{d(\gamma \dot{r})}{dt} - m \gamma z \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2$$

и

$$\begin{cases} \frac{d(\gamma \dot{r})}{dt} - \gamma r \dot{\phi}^2 = \frac{e}{m} (v_\phi B_z + E_z); \\ \text{аналогично} \\ \frac{1}{z} \frac{d(z^2 \gamma \dot{\phi})}{dt} = \frac{e}{m} (E_\phi - \cancel{v_\phi} \dot{r} B_z); \\ \frac{d(\gamma \dot{z})}{dt} = \frac{e}{m} E_z \end{cases}$$

Оценим зависимость сгруппировали: (для РФ)

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{E} + e[\vec{v} \times \vec{B}]; \quad \text{если есть только } B_z:$$

$$\frac{dp_z}{dt} = m \gamma \frac{dz}{dt} \Rightarrow$$

$$\begin{matrix} E_r & B_\phi \\ E_z & \end{matrix}$$

$$\Rightarrow m \frac{d\gamma}{dt} \cdot \frac{dz}{dt} + m \gamma \frac{d^2 z}{dt^2} = e [E_z + v_\phi B_z]; \quad \sim \frac{E_r}{\gamma^2} \frac{v_\phi}{c}$$

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\gamma}{dt} \cdot \frac{dz}{dt} + \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{e}{m \gamma} [E_z + v_\phi B_z]$$

$$B_\phi = -\frac{v}{c} E_r$$

второй член - незначим

первый - зависит от $\gamma \Rightarrow$ деэкренирован
зависит от скорости.

Оценим, если $F_z = 0$

$$|E_z| = |v_\phi B_z|$$

учет $E = 100 \text{ кВ/см}$, а $B = 0.1 \text{ Тл}$, тогда

$$1.10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 0.1 \cdot v \Rightarrow v \approx 1.10^8 \text{ м/с} \approx \frac{c}{3}$$

? где γ велико, но не 1, а скорости
уже большие? Только для e^- ,

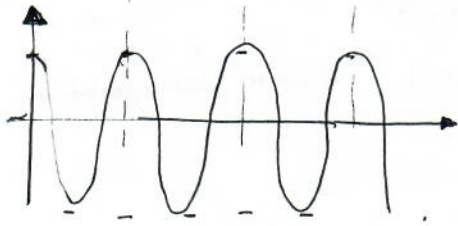
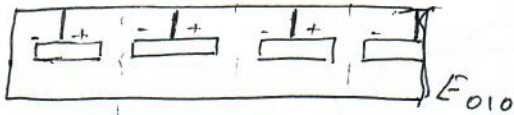
для ионов $\gamma \approx 1$, а $v \approx 0.01 c$ - неэкренировано.

затренировано
только при
больших
скоростях

Линейные ускорители протонов и ионов

9) Анварец (1946г.)

10) Вадероз (1928г.)



$$\mu = 2\pi$$

$$\rho = \beta \lambda$$

длина периода и глубина

$$C_1 = \lambda \sqrt{\frac{2W}{W_0}}$$

$$\mu = \pi$$

$$\rho = \beta \lambda / 2$$

$$C_1 = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2W}{W_0}}$$

вид колебаний

$$\mu = KD$$

↑ ↑
вдоль поперек
узла

$$K = \frac{\omega}{v_{gr}} = \frac{\omega}{d\psi/dt} = \text{наим. скорость}$$

~~$$K_{zn} = \frac{\mu}{\rho} + \frac{2\pi}{\rho} n$$~~

$$K_{zn} = \frac{\mu}{\rho} + \frac{2\pi}{\rho} n$$

Оценить размеры и начальную и предельную энергии:

$$L_{min} \approx 2 \text{ см}$$

$$L_{max} \approx 20 \text{ см}; \quad \lambda \approx 2 \text{ м} \quad (f = 150 \text{ МГц})$$

$$W_{min} \approx 600 \div 700 \text{ кэВ}$$

$$W_{min} \approx 300 \text{ кэВ}$$

$$W_{max} \approx 2 \div 4 \text{ МэВ}$$

$$W_{max} \approx 2 \div 3 \text{ МэВ}$$

$$I_{min} \approx 600 \div 700 \text{ нА/см}$$

$$I_{min} \approx 1 \text{ нА/см}$$

Немного исп. при больших энергиях, т.к.:

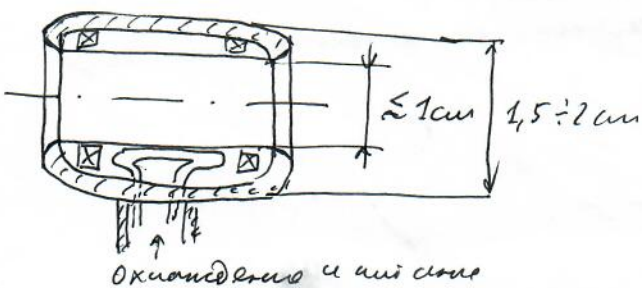
1. растет длина гребня;
2. сдвигаются резонансные частоты E_{010} и H_{110}

Изготовление



← биметаллический и притертый
(т.к. медь хорошо проводит, но не прочная)
делают сверху Fe или стальной корпус.
окисление, ферромагнитного на уровне
 $\pm 0.1 \div 0.2 \text{ к}$, иначе ивнет резонанс частота.

Глубина дрейфа:

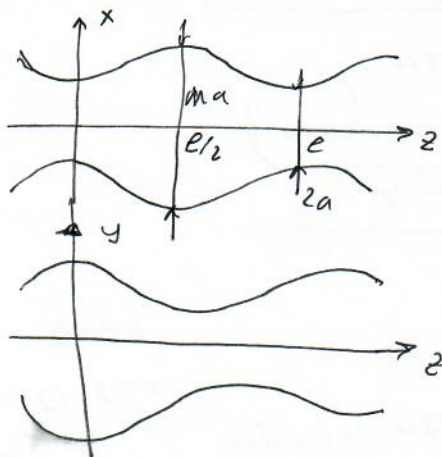


исп. стальные и вварочные материалы

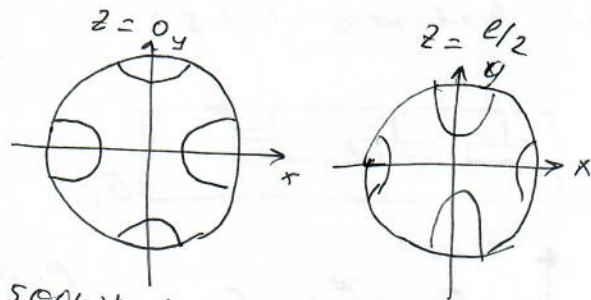
Sm Co, Na Co и т.д.,
радиопрозрачные, поэтому
выбирают графитов.

Окисление и антиоксид.

(11) KFG мм ^{происходит от одного корня}
~~исходного~~ исходного происхождения
 (каганский - Теандянов) ^{допускается}

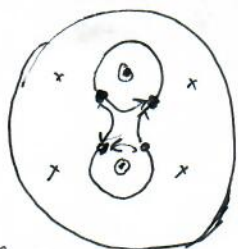


а - апертура
m - параметр
модуляции

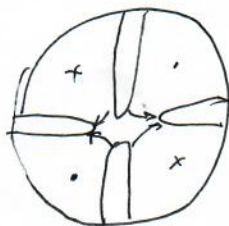


изменит (500 км в год) Дел и географический

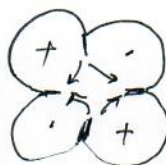
Примеры:



Животный
H-резонатор



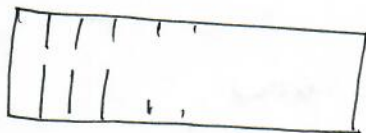
сетевых кабели и резонаторы.



12. Линейные ускорители электронов.

используется в других войнах

$\sigma_{\text{ср}} > 1$ в каждом выводе, сч. разн. замедляющие системы.



— K P B

$$\phi_{KPB} \approx \gamma$$

$$K_{nocn} = \frac{E^2}{2P} ; \quad K_w = \frac{E^2}{2P_{not}} = \frac{E^2}{2dP}$$

$$E = E_0 e^{i(\mu z - \omega t)}$$

Х дисназон 10 Р Ру

↓ Transition 3rd

- кисточки
- грунтовать.

$$G = \frac{w}{r_g d} \int_V w_{\text{sam}} dV$$

$$p_d = -dP/dz = \rho D$$

(13.) Функции равны

и Дедю кудирова

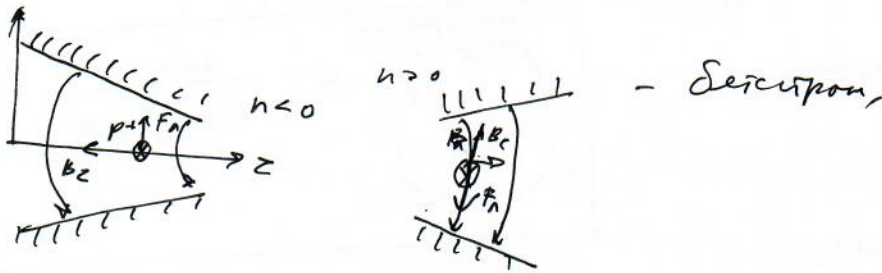
- 1.) Солимониды (в т.т. сверхпроводящие)
- 2.) и вадрумолит,
- 3.) ~~фторид~~ ВЧ-спинирование
(в т.т. фтф)

- 1.) деформированная усн. чешуя;
- 2.) купол;
- 3.) неготовность конструкции или
- 4.) резонанс;
- 5.) рассеяние на остаточном слое.

7 неделя.

Циклотронные ускорители с постоянным полем: циклотрон и фазотрон. Принцип сильной фокусировки.

1. Слабая фокусировка:



Движение частицы в постоянном м.п. см. стр. 26

Уравнение колебаний

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 (1-n) x = 0 \\ \frac{d^2 z}{dt^2} + \omega^2 n z = 0 \end{cases} \quad - \text{слабая фокусировка}$$

Найдём коэффициент расширения орбиты для слабой фокусировки:

$$\frac{\Delta K}{K} = \Delta \frac{\Delta P}{P}$$

радиус-импульс - относительное изменение импульса

$$pc = m \gamma \frac{c}{\beta} = m c^2 \beta = p W$$

$$p^2 c^2 = W^2 \beta^2 = W^2 \left(1 - \left(\frac{W_0}{W} \right)^2 \right)$$

$$p^2 c^2 = W^2 - W_0^2 \Rightarrow \boxed{W^2 = p^2 c^2 + W_0^2} \quad - \text{инвариант}$$

$$\boxed{p = e B R} \quad (1)$$

Пусть $B = \frac{A}{R^n}$ - при слабой фокусировке.

Продифференцируем и проинтегрируем (1):

$$\frac{dp}{p} = \frac{dB}{B} + \frac{dR}{R}$$

из (2.)

$$dB = -n A R^{-n-1} dR = -n A R^{-n} \frac{dR}{R} = -n B \frac{dR}{R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{dB}{B} = -n \frac{dR}{R} \quad - \text{инвариант}$$

$$\frac{dP}{P} = (1-n) \frac{dR}{R}$$

$$\alpha = \frac{\Delta R/R}{\Delta P/P} = \frac{1}{1-n} \quad - \text{коэффициент усиления} \\ \text{оформки.}$$

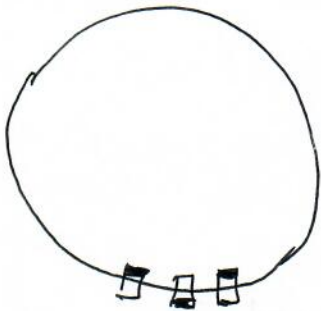
При слабой фокусировке

$$0 < n < 1 \Rightarrow \alpha > 1$$

② Сильная фокусировка:

$$\alpha < 1 \quad \text{и} \quad \alpha \rightarrow 0$$

При слабой фокусировке $B_z(z) = \text{const}$
при сильной



$$B_z(z) = \begin{cases} B_0 - \text{в магнитах} \\ 0, \text{ между магнитами.} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 (1-n) x = 0 \\ \frac{d^2 z}{dt^2} + \omega^2 n z = 0 \end{cases}$$

n - показатель преломления среды м.ч

$$n = \frac{R}{B_0} \left. \frac{\partial B}{\partial z} \right|_{\substack{x=0 \\ z=0}}$$

тогда

$$\frac{\partial B}{\partial z} = n \frac{B_0}{R}, \quad \text{интегрируем}$$

$$B_z(z) = n \frac{B_0}{R} z, \quad \text{тогда} \quad B_z(z) = -n \frac{B_0}{R} x + B_0$$

учет $n \gg 1$, тогда $(1-n) \approx -n$ и

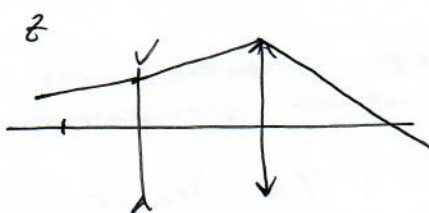
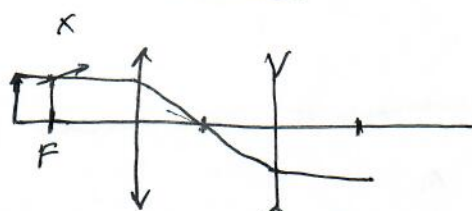
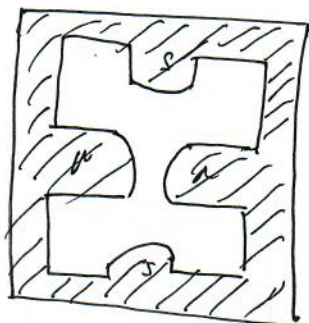
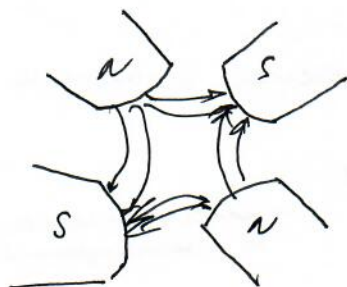
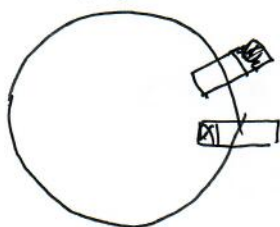
$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} - n \omega^2 x = 0 & - \text{дефокусирует} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} + n \omega^2 z = 0 & - \text{фокусирует} \end{cases}$$

Чередуются направления фокусировки.
~~Катодная фокусировка~~

рестрейк

$$\alpha = \frac{1/(1-n)}{1 + 2e/IR}$$

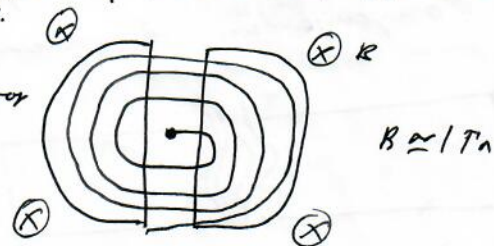
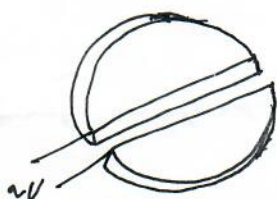
③ квадрупольные массы:



расходимость определяется.

(4) Цинкострон:

24. Доуленс Berclay 1930-32г., $B = \text{const}$, купитов 1938г.
авторизирован в титан леде нит.



Период обрешетки:

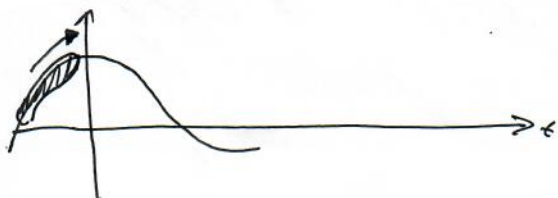
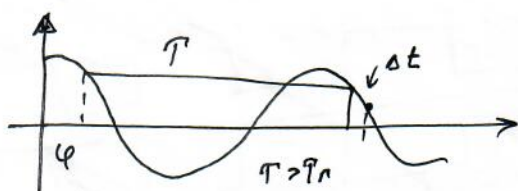
$$V = V_0 \cos(\omega t + \phi) \quad ; \quad \frac{\Delta W_{\text{av}}}{\Delta n} = e V \cos \phi \quad (1)$$

Период обращения:

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi mc^2}{e\hbar c^2} = \frac{2\pi\hbar}{e\hbar c^2}$$

$$T_r = \frac{2\pi \omega_0}{e B c^2} \quad - \text{период генератора}$$

$$\left(\omega = \frac{v}{R} = \frac{e \hbar}{m} \quad , \quad \text{t.k.} \quad p = e \hbar k \right)$$



$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dn} &= \omega_r \frac{\Delta t}{\Delta n} = \omega_r \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi_r}{2} \right) = \\ &= \frac{2\pi}{T_r} \cdot \frac{1}{2} (T - T_r) = \pi \frac{T - T_r}{T_r} = \pi \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \\ &= \pi \frac{\omega_k}{\omega_0} \quad (2) \end{aligned}$$

Перемножим (1.) и (2.)

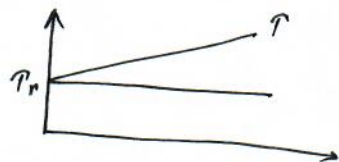
$$\pi \frac{W_k}{W_0} \frac{\Delta W_k}{\Delta n} = eV \cos \varphi \frac{\Delta \varphi}{\Delta n}, \text{ если } n \text{ велико, то } \Delta n \ll n$$

$$W_k = \sqrt{\frac{2e}{\pi} W_0 eV (\sin \varphi_k - \sin \varphi_0)}$$

— максимальная энергия в излучении

если $\varphi_k = \pi/2$ и $\varphi_0 = 0$, то

$$W_k = \sqrt{2/\pi} W_0 eV$$



Увеличить энергию можно, если выбрать $\Gamma_r < \Gamma$, тогда $\Delta \varphi < 0$,

или $\Delta \varphi < 0$ — дефокусирован, но при данном R она мала и поддается частотной фокусировкой.

Если $\varphi_0 = -\pi/2$ и $\varphi_k = \pi/2$, то

$$W_{k \text{ макс}} = 2 \sqrt{W_0 eV / \pi}$$

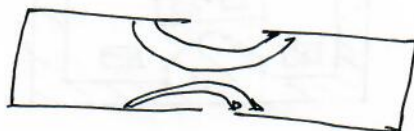


Максимальная энергия $10 \div 25 \text{ МэВ}$

⑤ Фокусировка в синхротроне (термическая фокусировка)



Электрическое поле

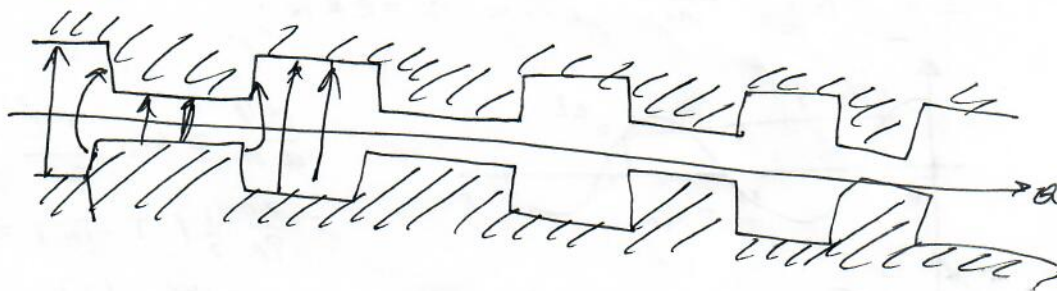
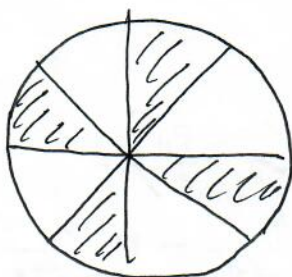


или магнитное поле

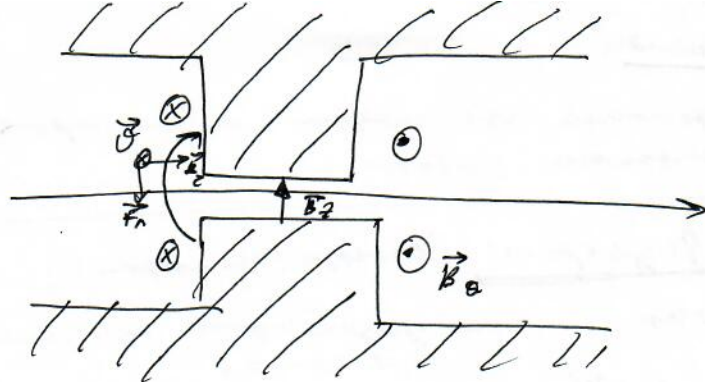
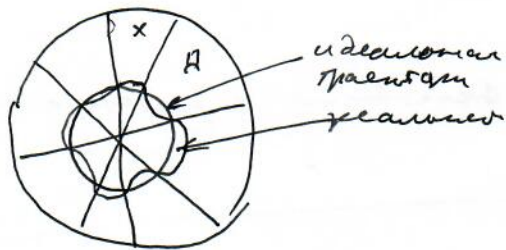
+ фокусировка внешним м.п.

⑥ Ускоренный синхротрон. $B = \text{var.}$

$\Gamma = \text{const} \Rightarrow \frac{B}{W} = \text{const}$, нет предела по энергии при дефокусировании (в вертикальном направлении) краевая фокусировка

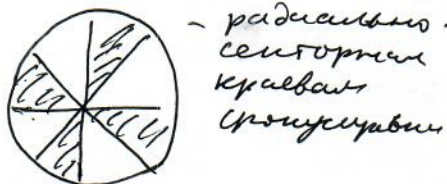


сепараторы — магниты



Чем больше времени
наполнения, тем лучше

таблица находится на краю
фотопленки



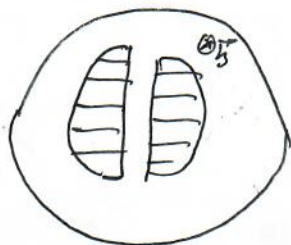
- спирально-сегментная.

Среднее поле

$$\langle B \rangle = \frac{1}{2\pi} \int B(r) d\theta$$

$\langle B(\theta) \rangle = B_0 \gamma^2(z)$ - условие изосинхронизма.

- 7) Параметры синхротронов и ускорителей синхротронов.
- 1.) Первый синхротрон радиальной структуры - дисперсионный режим
 - 2.) КИАЭ, Курчатов, преведен и рад. структура 12 МэВ, $d \approx 80$ см
 - 3.) У-150 (Дубна) 18 МэВ, $B \approx 1,6$ Тл; $I_{max} \approx 300$ мА, $d \approx 1$ м
 - 4.) У-240 (Киев, узопр.) 80 МэВ (p^+) и 70 МэВ (K^+), $I \approx 100$ мА
 - 5.) У-400 (Дубна), 1978 г. Житков, 20400 мэВ, от 93 до 110.
 напыление новых элементов
 вертикальных элементов, быстрый вывод (Спартер Осиневский)
 - 6.) Kerely ≈ 20 МэВ (p^+)
 - 7.) CERN ≈ 590 МэВ узопр. (PSI)
 - 8.) GSI узопр ≈ 480 МэВ
 - 9.) TRIUMF (Ванкувер, Канада)
 нет диантов, вместо них система резонаторов.
 $B = 0,58$ Тл; $d \approx 17$ м $W_p = 520$ МэВ; $I = 100 \div 150$ мА



Изображений сущности и микротом. Основные характеристики

$f_n = \text{var.}$, но эмпирические продолжение сущ. системы данных
 $f = f_{w_0}$ в $L_{\text{прод.}}$.

$$f = f_0 \frac{w_0}{w} \quad , \quad w_{max} \approx 1/P_2 k$$



- стимулирующий режим работы.

$$V \simeq 10.5 \text{ OeK}$$

$$t_g \approx 50 \div 100 \text{ ns}. \quad I \approx 1 \text{ mA}$$

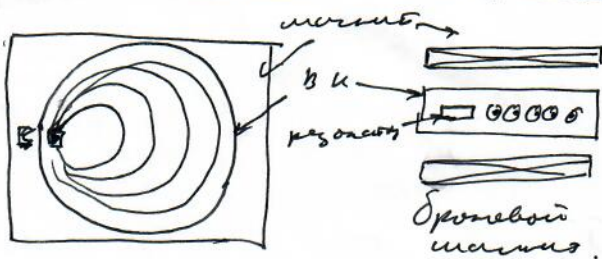
Основные сражения:

- 1.) Газовый Сиб УДФ
 $w = 1 \text{ ГВт}$; $w_1 = 29 (28,88 \div 13,18 \text{ МВт})$ $k \approx 1,8 \div 1,97$ / без учета
 мощности отражения); $d = 6,85 \text{ м}$, $V = 7,5 \text{ м}^3$ - всего.
- 2.) CERN $w = 600 \text{ МВт}$
- 3.) Дубна $w = 680 \text{ МВт}$
- 4.) Беркли (капак., см.) $w_{\text{max}} = 740 \text{ МВт}$
 (каждый, в сумме!).

Оценки:

- 1) подается автоклавирован.
- 2) кудыс расклет слабо (до 10 кг меда, чем сильнее)

(9) Микропроц. (электронный микропроц.), вычисл.
мощность



- 1.) на каждой орбите
число атомов = численности
участков 2) Длина
первой орбиты λ , второй
 2λ и т.д.

$$\omega = \frac{e\hbar c^2}{W} \quad - \text{частота облучения:}$$

$$T = \frac{2\pi W}{e B c^2} \quad ; \quad T_n = \frac{2\pi}{e B c^2} (W_1 + (n-1) \Delta W)$$

За 105 лет

$$\Gamma_1 = \frac{2\pi}{c^2 k} (u_0 + \Delta u) = u_1 \Gamma_r$$

$$\Delta \Gamma = \frac{2\pi \Delta W}{c B c^2} = p \Gamma_r - \text{принцип работы, (ум. симметричным с введением)}$$

$$\gamma \rightarrow 1$$

введем

$$q = m - 1 \Rightarrow \frac{\Delta W}{W} = q$$

$$\begin{cases} \frac{2\pi W_0}{c B c^2} (1+q) = m \Gamma_r - \text{1-е условие работы} \\ \frac{2\pi W_0}{c B c^2} q = p \Gamma_r \end{cases}$$

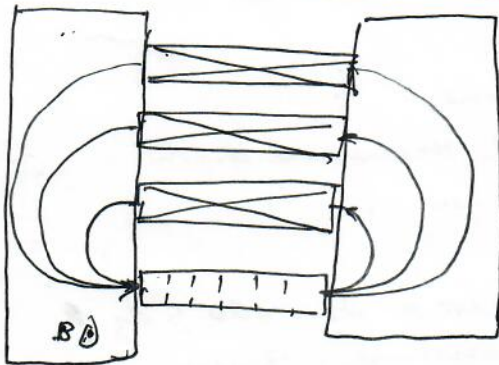
$$\frac{1+q}{q} = \frac{m}{p} \Rightarrow \boxed{q = \frac{p}{m-p}} \quad \text{2-е (осн. условие)}$$

$$\Gamma_r = \frac{2\pi W_0}{c B c^2} \frac{q}{p} = \frac{2\pi W_0}{c B c^2} (m - p)$$

Обычно

$$B \approx 0.1 \text{ Тл}; \quad W_{g0} = 20 \div 50 \text{ мкВ, ток } 20 \div 200 \text{ мА.}$$

Разрезной микротрон.



1. Важно, чтобы после первого уел. $\gamma \approx 1$ ($W \geq 0.5 \text{ мкВ}$).
2. Требуется, чтобы расстояние не пошла на внешнюю сторону резонатора.

9 неделя

Ускорители с постоянным радиусом орбиты. Электроны синхротрона.

10 неделя

Прогонные ~~и~~ синхротроны с сильной и слабой фокусировкой. Импульсные ускорители релятивистских пучков.

11 неделя

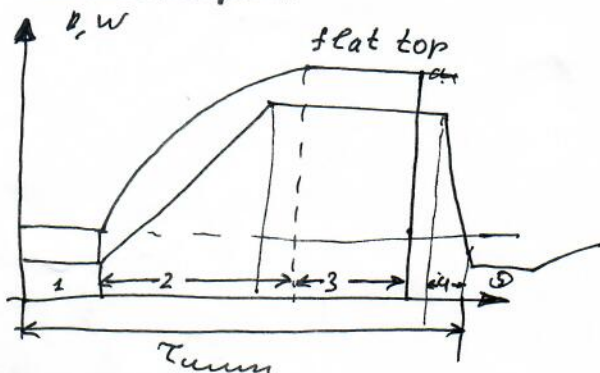
Накопительные кольца. Комбайны для пучков и релятивистских частиц.

1. Принцип работы синхротрона



$$|B(t)| = \sigma \alpha r$$

2.) Угловой спектр энергии, радиус, большое время ускорения.



1. пауза.
2. ускорение
3. вывод, экстримум
4. спад пучка

Появляются до 100 рад!
Период нарастания пучка много больше периода синхротронных колебаний.

3.) Большая энергия ускорения
 $\beta \approx 1$

4.) Меньше частота генератора при ускорении:

$$W^2 = W_0^2 + p^2 c^2 = W_0^2 + e^2 c^2 B^2(t) R^2(2), \text{ т.к. } p = e B(t) R$$

$R = \text{const.}$

$h W_{\text{одр}} = W_r$ - частота ускорения.

$$W = \frac{e}{m} B = \frac{e B c^2(2)}{w} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow W = \sqrt{\left(\frac{W_0}{e c R B}\right)^2 + 1} \cdot e c R B \Rightarrow W_r = \frac{c}{R} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_0}{e c R B(t)}\right)^2}} \quad (3)$$

5.) Энергия ускорения:

из (1) можно получить:

$$W_{\text{инт}} \approx \sqrt{W_0^2 + \left(\frac{W_{\text{макс}}}{\beta}\right)^2}, \text{ где } \frac{B_{\text{макс}}}{B_{\text{мин}}} = \beta$$

т.к. $W \gg W_0$, то $W_{\text{инт}} \approx \frac{W_{\text{макс}}}{\beta}$

5) Ограничение по энергии в синхротроне, синхротронное излучение.

При движении по окружности радиуса излучает

$$P_{\text{изл}} = \frac{8\pi}{3} \gamma^2 \beta^2 r_0^2 \epsilon_0 c,$$

где $r_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_0} \approx 2,8 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ - классический радиус электрона

При $\gamma \gg 1$ для оценки потерь энергии за оборот используется приближённая формула

$$\Delta W_{\text{изл}} \approx 90 \frac{W^4}{R}, \quad W = [\text{ГэВ}], \quad R = [\text{м}], \quad \Delta W = [\text{кэВ/1}]$$

Оценим

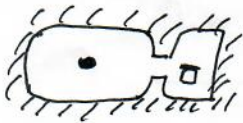
$$W = 10 \text{ ГэВ}, \quad R = 30 \text{ м} \Rightarrow \Delta W_{\text{изл}} = 30 \text{ мэВ} \Rightarrow$$

\Rightarrow для ускорения необходимо, чтобы прирост энергии был больше 30 мэВ/оборот.

Синхротронное излучение используется!

6.) Вакуум в синхротронах:

распределение насосов ("веселый геллер")

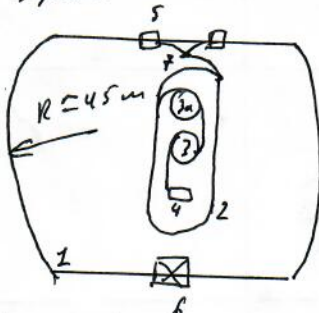


- по всей длине ускорителя.

$$P \approx 10^{-12} \div 10^{-14} \text{ Па} \quad \text{на границе излучения}$$

② Энергетика синхротрона:

1) ВЗПП



ВЗПП-2 - 3 есть щитки.

1) ВЗПП-4 2) ВЗПП-3

3) синхротрон 200 мкВ [5-4] 3а) Booster 900 мкВ

4) мн. фак e^-

5.) ВЧ резонаторы; 6.) точка сгущения, КЕРР



7.) линия для получения p^+

~~Протонная синхротрон~~

2) DESY - DESY - DESY

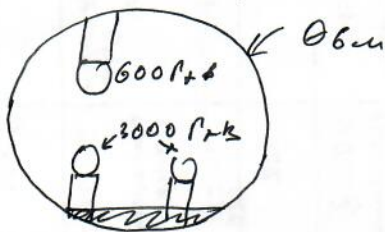


Электронные синхротроны и коллайдеры. Источники СИ

Название, родники	где находится	Wing / P _{7B} W _{max}	R, см	интенсивность, частиц/см	Вид X, Вид Y, T ₀	Особенности.	ΔU, кВ, МэВ
АРУС	АУФФ, Ереван	0,075 / 6,1	34,5	5 · 10 ¹²	6.6 · 10 ⁻³ ÷ 0,792	самая спонтанная.	0,26
DESY	Рандольф, Германия	0,04 / 7,5	50,4	2,5 · 10 ¹³	g ₀ ≈ 17 n	исп. в К. e ⁻ ↔ p ⁺ , начинается POTIS	-
Корпускулярный	УИ-Т, СБСК	0,3 / 18	120	10 ¹¹	-	слепящий.	-
NINA	Nato Institute National Accelerator	≈ 4 + 4,5	≈ 30	-	-	,	-
БЭПП	УФФ им БЭВачи, Новосибирск	2 x 1,3 (2) 2 x 3 (3) 2 x ≈ 5,5 (4) ≈ 19 x 2 (5)	 R = 45 m, длина ВПП 4 ВПП-2 ≈ 3 m	Светимость с.см ⁻² 10 ³⁰		К, см рмс 1, ВПП-3, не совсем СИ. иногда сфокусируется	
BORIS	DESY	2 x 5,3	L = 288	2,5 · 10 ³¹		К, см. DESY	
TRISTAN	KEK, Япония	2 x 30	L = 3018	1,4 · 10 ³¹		К, слепящий.	
PEP	CWA, SLAC	2 x 16	26658	$\frac{5 \cdot 10^{31}}{1,7 \cdot 10^{31}}$		К, самая высокая интенсивность	
LEP	CERN	2 x 55	L = 240	1,7 · 10 ³¹		К, самый большой ускоритель	
BEPC	Китай	2 x 2,8		1,7 · 10 ³¹		К	
Indigo-2	КША	7	R ≈ 35 m			СИ, фокусируется	
DESY	Dуга	12	L ≈ 200 m			СИ, фокусируется.	
ADONE	Италия	2 x 1,5	L = 109 m			СИ	
CESR	США	2 x 8	L = 768			К, СИ.	
PETRA, 1978.	DESY	2 x 19,25				слепящие, К Y ⁺ ↔ e ⁻	

③ Пороговое сечение микропроцессора.

1.) Оценки - чик



④. Метод встречных лучей, Кембридж:

1.) Энергия взаимодействия.

$$W_{\text{вз}} = 2W_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad \text{— в системе центра масс}$$

Энергия взаимодействия:

$$W < W_0$$

$$W_{\text{вз}} = 2W_0 \left[1 + \frac{W_0}{2W} - 1 \right] = \frac{W}{2}$$

$$W \gg W_0$$

$$W_{\text{вз}} \approx 2W_0 \sqrt{\frac{W}{2W_0}} \quad \underline{W = \sqrt{2W_0 W_{\text{вз}}}}$$

$$W = 2W_0 \left[\left(\frac{W_{\text{вз}}}{2W_0} + 1 \right)^2 - 1 \right]$$

Пример

для 6 ГэВ
900 ГэВ

энерг. θ_z .

2 ГэВ (33%)

44 ГэВ (4,4%)

То есть почти

$$W^2 - p^2 c^2 = W_0'^2 = i\hbar \omega$$

$$\text{ЛСО: } (W_1 + W_2)^2 - p_1^2 c^2 = (W_{01} + W_{02})^2$$

$$W_1^2 + W_2^2 + 2W_1 W_2 - p_1^2 c^2 = W_{01}^2 + W_{02}^2 + 2W_{01} W_{02} = i\hbar \omega \quad (1.)$$

СЧМ:

$$(W_1' + W_2)^2 = (W_{01} + W_{02})^2$$

$$W_1'^2 + W_2^2 + 2W_1' W_2 = i\hbar \omega \quad (2.)$$

Сложим:

$$W_1^2 + 2W_1 W_2 + W_2^2 - p_1^2 c^2 = W_1'^2 + 2W_1' W_2 + W_2^2$$

$$W_{01}^2 + 2W_1 W_2 + W_{02}^2 = W_1'^2$$

$$W_{01}^2 + 2W_2 (W_{01} + W_1) + W_{02}^2 = W_1'^2$$

$$W_1 = \frac{W_1'^2 - W_{01}^2 - W_{02}^2}{2W_2} = W_{01} \quad \text{— э.т. } \theta_z.$$

$$a.) \quad W_1 \approx W_{01} \quad (W_1 \ll W_{01})$$

$$(W_{01} + W_{02})^2 + 2W_{02} W_1 = W_1'^2, \quad \text{if } W_{01} = W_{02} = W_0$$

$$W_1' = 2W_0 \sqrt{1 + \frac{W_1'}{2W_0}} \Rightarrow W_1' \approx 2W_0 + \frac{W_0}{2}$$

$$W^2 - p^2 c^2 = W_0'^2$$

$$(W_1 + W_2)^2 - (p_1 + p_2)^2 c^2 =$$

$$= (W_{01} + W_{02})^2 = (W_1 + W_2)^2 = W_{\text{сум}}^2$$

$$a.) \quad W_2 = W_{02} \quad p_2 = 0$$

$$(W_1 + W_{02})^2 - p_1^2 c^2 =$$

$$= W_{01}^2 + 2W_1 W_{02} + W_{02}^2$$

$$= W_1^2 + 2W_1 W_{02} + W_{02}^2 - p_1^2 c^2 =$$

$$= W_{\text{сум}}^2$$

$$W_{01}^2 + W_{02}^2 + 2W_1 W_{02} = W_1'^2$$

$$W_1' = \sqrt{2W_1 W_{02}}$$

$$\text{Эк } 100 \text{ ГэВ } p^+$$

$$W_1' \approx 14 \text{ ГэВ}$$

б.) $w_1 - T_1 \gg w_0$

$w' = \sqrt{2 w_1 w_0}$ $w_1 = w_0 = w_2$

$\frac{w}{w_0} = \sqrt{2 \gamma_1}$ $\gamma_1 = \frac{\gamma'^2}{2}$

Ex:

$w_e = 100 \text{ ГэВ}; \quad \gamma' = 4 \cdot 10^5;$
 $\gamma = \frac{\gamma'^2}{2} = 8 \cdot 10^{10} - \text{всесмысленно}$

2.) Светимость:

$L = \frac{n_1 n_2 f_0}{S} Z$, n_1, n_2 - число частиц
 S - эффективная площадь взаимодействия.
 $Z = \frac{I_1 I_2}{e^2 f_0 S}$ f_0 - частота обращения.

3.) Взаимодействие

а.) 2 пучка (e^- и e^+ или p^+ и p^-) в одном пучке, затем столкновение

б.) ISK.

в.) расно ведущий за обдув

$W = L \cdot S = 11, 5 / S$

5.) Накопители

$S = 10^{-30} + 10^{-31}$
 - сечение взаимодействия
 см.

1.) Повышение интенсивности и светимости;

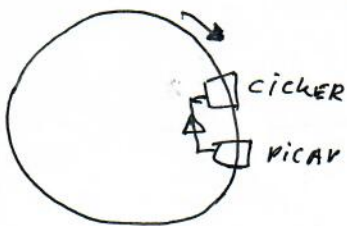
2.) Энергетическое ограничение



Пучки

$\frac{w_{p+}}{w_{e-}} = \frac{w_{op+}}{w_{op-}}$ $\epsilon_{x'}$ $w_{p+} \approx 1 \text{ ГэВ}$
 $w_{e-} \approx 0,5 \text{ МэВ}$

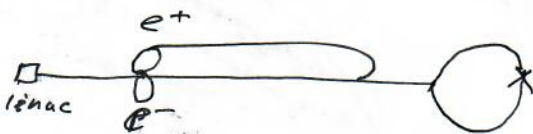
3.) Стохастическое ограничение



6.) Линейные накопители:

1.) Высокий темп ускорения, высокая интенсивность.

2.) SLAC, 1989г. (Two mile accelerator = 3 км ускорителя)



$w_{max} = 55 \text{ ГэВ}$, на входе и в конце
 диаметр 20 ГэВ (первоначально 20 ГэВ)
 $f = 2856 \text{ МГц}; \quad L = 6 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{с.см.}}$
 $L = 3,4 \text{ км}$

3.) БЛЭПП (Новосибирск) - проект $w = 150 \times 2 \text{ ГэВ}$, $L = 2 \times 1,5 \text{ км}$, $L = 10^{32} - 10^{33} \frac{1}{\text{с.см.}}$

4.) СТИС (СЕРН) - проект $w = 2 \times 500 \text{ ГэВ}$, $L = 2 \times 4 \text{ км}$, $L = 1,2 \cdot 10^{32} \frac{1}{\text{с.см.}}$

5.) TESLA (DESY) $L = 2 \times 30 \text{ км}$

14 недель:

Ускорители для использования в медицине и в промышленности.
Ознакомление с действующими электрофизическими установками.

18 недель:

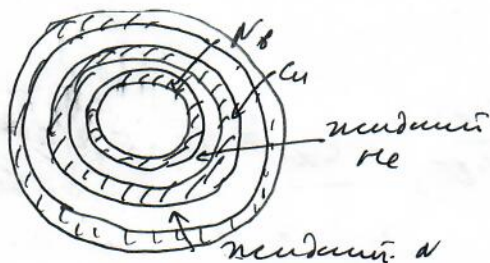
Применение сверхпроводимости и перспективные направления развития эфр.

(1) Новые методы ускорения и фокусирования:

- 1.) Когерентное ускорение:
лучи получают энергию из внешнего поля;
- 2.) Ускорение волнами в плазме;
- 3.) Ускорение в электронных пучках;
- 4.) Лазерные методы;
- 5.) ФПФ и ВЧ фокусировка;
- 6.) Ускорение без силовых радиационных потерь.

(2) Сверхпроводимость в ускорителях:

Высокая добротность $\approx 10^9$, обратный темп ускорения $\Delta W_p \approx 405 \text{ МэВ/м}$; $\Delta W_e \approx 2050 \text{ МэВ/м}$.
NB - медный
Высокая стабильность течения.
 $T \approx 2-4^\circ \text{K}$



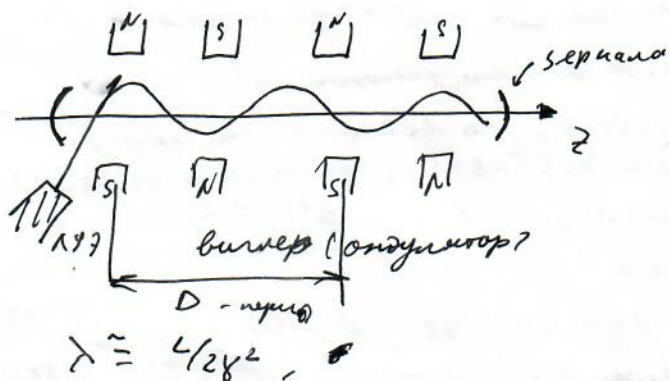
2K можно получить, стабилизируя темп. He.

Сваривают e-лучи или пучки.

(3) Основные действующие установки:

ср. энергии.

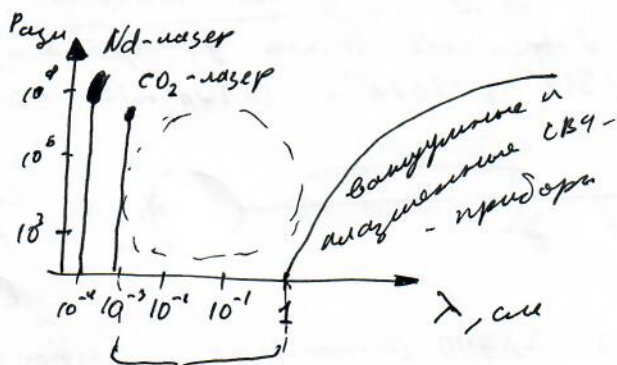
(4) ЛСЭ (FEL)



$$\lambda \approx \frac{4}{\gamma^2}$$

Ex: $W = 50 \text{ МэВ}$; $\gamma = 100$ $\gamma^2 = 10^4$

\Rightarrow при $L = 2 \text{ см}$ $\lambda = 10^{-4} \text{ см}$ - видимый свет.



ЛСЭ, другим способом получить большую мощность в этом диапазоне времени.