

## ИСТОЧНИКИ ПОЗИТРОНОВ

Поскольку нет свободных позитронов, то позитроны не могут быть получены с помощью авто, фото или термоэмиссией. Основные способы получения позитронов это сгенерированные электронами или фотонами электромагнитные ливни, а также радиоактивные источники позитронов. Позитроны получают на конвертерах и имеют широкий энергетический спектр и большим угловым и пространственным разбросом. И генерирующий электронный пучок должен иметь малые размеры и расходимость. На рис.2. представлена одна из возможных схем позитронного источника на основе электронного ускорителя.

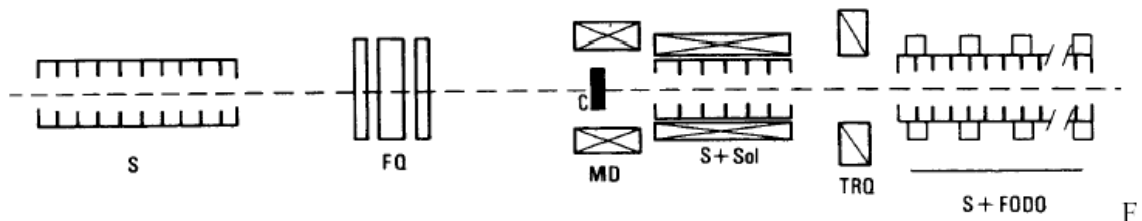


Рис.2. Позитронный источник генерируемый электронами: *S* – ускорительная секция; *FQ* – фокусирующий триплет; *MD* – управляющее устройство, для отсева электронов; *Sol* – соленоид (фокусировка); *TRQ* – транзитная оптика между соленоидом и структурой *FODO*; *C* – конвертер.

При генерации позитронов электронами выделяется очень много энергии в виде тепла, и КПД перевода становится очень малым. Более перспективно генерировать позитроны с помощью фотонов, которые позволяют получать пучки позитронов с малым эмиттансом. Существуют два основных способа получения требуемого ЭМ-излучения: в спиральном ондуляторе и каналирование электронов в кристаллах.

Траектория движения электрона двигающегося в спиральном магнитном поле с периодом  $\lambda_w$  представляет собой спираль, радиуса

$$r = \rho \left( \frac{\lambda_w}{2\pi\rho} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_w}{2\pi\rho} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (16)$$

где  $\rho = mc^2 \beta \gamma / eB$ . Синхротронное излучение испускается в конусе с углом раствора  $\theta \sim \gamma^{-1}$  вдоль направления движения. Если энергия электронов велика и число периодов структуры  $N$  тоже велико, то спектр испущенных фотонов представляет узкий пик возле значения

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} (1 + K^2), \quad (17)$$

$$K = \frac{\lambda_w eB}{2\pi mc}.$$

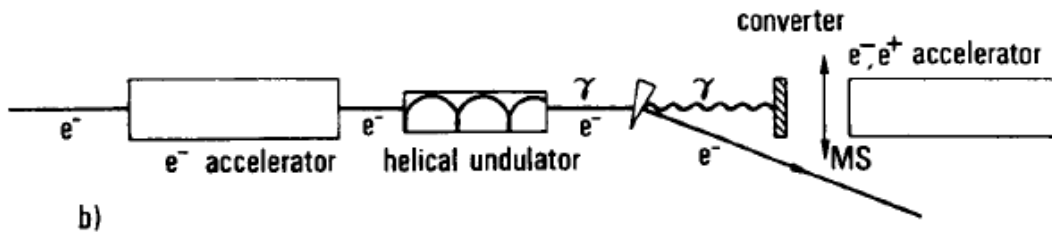
Энергия и число испущенных фотонов даются выражением

$$E_\gamma = \frac{4\pi\hbar c \gamma^2}{(1 + K^2) \lambda_w}, \quad (18)$$

$$N_\gamma = N \frac{2}{3} \pi \alpha K^2 (1 + K^2).$$

где  $\alpha$  - постоянная тонкой структуры. Например, для ондулятора длиной 100 м, с периодом структуры 1 см и энергии электронов 100 ГэВ в расчете на один электрон генерируется 250 фотонов с энергией 5.3. МэВ.

Выход позитронов из конвертора зависит от материала и толщины конвертора. Например, для конвертора из вольфрама толщиной 0.2 радиационных длины выход позитронов составляет порядка  $8 \cdot 10^{-3}$  позитрона/фотон. Таким образом, для выше приведенных условий имеем выход 2 позитрона/электрон, для увеличения выхода требуется увеличивать длину ондулятора и/или энергию электронов. Общая схема установки приведена на рис.3. Вместо ондулятора можно использовать эффекты каналирования фотонов или электронов в кристаллах.



b) Lay out of a positron source using a magnetic undulator

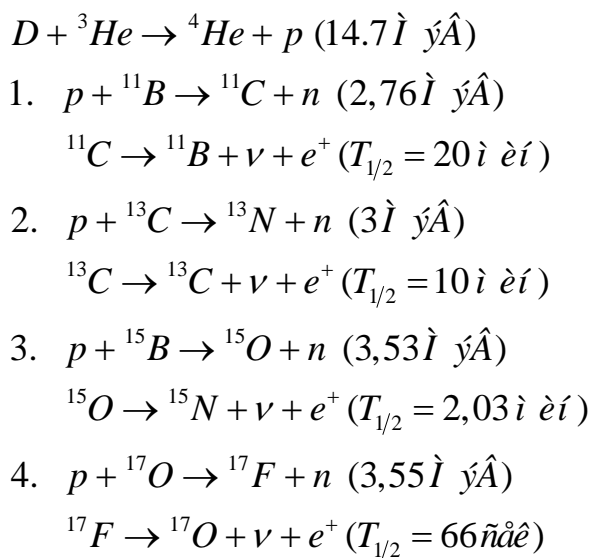
Рис.3. Ондюляторный источник позитронов.

Другим способом генерации позитронов является рождение пар фотонами, продуцированными при обратном комптоновском рассеянии ультрафиолетового излучения на пучке релятивистских электронов. Данные процессы описываются уравнениями:

$$\begin{aligned}
 e^- + h\omega &\rightarrow e^- + \gamma \\
 \gamma + h\omega &\rightarrow e^- + e^+
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

При использовании лазера с длительностью 0.5 пикосекунды и энергией 1-Дж и пучка электронов 500 ГэВ, получаются позитроны с энергией 2-3 ГэВ.

Еще одним источником являются радиоактивные ядра, получаемые искусственным путем. Основные реакции:



5.  $p + {}^{18}\text{O} \rightarrow {}^{18}\text{F} + n$  (2,45Ì ýÂ)  
 ${}^{18}\text{F} \rightarrow {}^{18}\text{O} + \nu + e^+$  ( $T_{1/2} = 1,87 \text{ ÷ àñ}$ )
6.  $p + {}^{19}\text{F} \rightarrow {}^{19}\text{Ne} + n$  (4,03Ì ýÂ)  
 ${}^{19}\text{Ne} \rightarrow {}^{19}\text{F} + \nu + e^+$  ( $T_{1/2} = 18\tilde{n}\hat{a}\hat{e}$ )
7.  $p + {}^{26}\text{Mg} \rightarrow {}^{26}\text{Al} + n$  (5,01Ì ýÂ)  
 ${}^{26}\text{Al} \rightarrow {}^{26}\text{Mg} + \nu + e^+$  ( $T_{1/2} = 6.5\tilde{n}\hat{a}\hat{e}$ )
8.  $p + {}^{22}\text{N} \rightarrow {}^{22}\text{Na} + n$   
 ${}^{22}\text{Na} \rightarrow {}^{22}\text{N} + \nu + e^+$  ( $T_{1/2} = 2.6\tilde{a}\tilde{i}$ )

Мощность источника на протонах достигает  $10^8$  позитронов в секунду. Либо возможны реакции типа  $(n, \gamma)$ , например, для меди



Мощность позитронного источника в этом случае составляет

$$\frac{dN_{e^+}}{dt} = \gamma_{64} \overline{\sigma} \Phi V N,
 \tag{21}$$

где  $\gamma_{64}$  - величина, описывающая выход позитронов на один распад (поскольку возможны разные каналы реакций);  $\sigma$  - сечение взаимодействия нейтронов;  $\Phi$  - поток нейтронов;  $V$  - объем мишени;  $N$  - плотность атомов мишени. Для реакции (20) мощность источника достигает значений  $2 \times 10^{12} e^+ / \tilde{n}\hat{a}\hat{e}$ .