

1 Адронная калориметрия

1.1 Прохождение адронов через вещество

$$R_{\text{я}} = r_0 A^{1/3}, \quad r_0 \simeq 1.1 \text{ ФМ} = 1.1 \cdot 10^{-13} \text{ см}$$

Процессы:

- (1) Упругий σ_{el} $h + A \rightarrow h + A$ (с ядром как целое)
- (2) Квазиупругий σ_q $h + A \rightarrow h + A^*$ (с нуклоном; возбуждение ядра)
- (3) Неупругий σ_{in} $h + A \rightarrow a + b + c + \dots$

$$\sigma_{tot} = \sigma_{el} + \sigma_q + \sigma_{in} = \sigma_{el} + \sigma_a, \quad \sigma_a - \text{сечение поглощения.}$$

В модели черного диска и по оптической теореме

$$\sigma_{el} = \pi R^2$$

$$\sigma_a = \pi R^2$$

$$\sigma_{tot} = 2\pi R^2,$$

все $\propto A^{2/3}$.

Экспериментально: $\sigma_a = \sigma_0 A^\alpha$

| h | π^\pm | K^\pm | p | \bar{p} |
|------------------------|-----------|---------|------|-----------|
| $\sigma_0, \text{ mb}$ | 30 | 25 | 45 | 50 |
| α | 0.75 | 0.75 | 0.70 | 0.67 |

$$\frac{\sigma_{el}}{\sigma_a} \simeq 0.3(Al) \div 0.7(Pb)$$

$$\frac{\sigma_q}{\sigma_a} \simeq 0.10(Al) \div 0.02(Pb)$$

Характеристики неупругого процесса:

- (1) Коэффициент неупругости K - доля энергии на рождение "новых" (не "лидирующих") частиц
 $a + b \rightarrow i + (a + b)$
 $K = \frac{\sum E_i}{E_a + E_b}$
 $\bar{K} = 0.5$ и слабо зависит от E и A .

(2) Множественность образования частиц

$$\text{для } pp \quad \bar{n}_{\pm} = (0.88 \pm 0.10) \pm (0.44 \pm 0.05) \ln s + (0.118 \pm 0.006) \ln^2 s, \\ s = [\text{ГэВ}^2] \\ \bar{n} \propto A^{0.1}$$

Распределение по множественности очень широкое: $\sigma_n = 0.5\bar{n}$ (ср. с Пуассоновским $\sigma = \sqrt{\bar{n}}$).

В основном - π , причем $N(\pi^0) = 1/2 (N(\pi^+) + N(\pi^-))$, грубо $N(\pi^+) = N(\pi^-)$.

$$N(K^{\pm}) \sim 10\%, \quad N(\bar{p}) \sim 1\%.$$

(3) Угловое распределение вторичных частиц

Для малых углов (высоких энергий) $\theta = \frac{p_{\perp}}{p}$. Оказывается, $\langle p_{\perp}(i, E) \rangle \simeq \text{const}$:

$$\langle p_{\perp}(\pi) \rangle \simeq 300 \div 350 \text{ МэВ}$$

$$\langle p_{\perp}(K) \rangle \simeq 400 \div 450 \text{ МэВ}$$

$$\langle p_{\perp}(\bar{p}) \rangle \simeq 500 \text{ МэВ}$$

$$\text{Для У-70 характерно } \langle p \rangle = \frac{p_0}{\langle n \rangle} = \frac{50 \text{ ГэВ}/c}{5} = 10 \text{ ГэВ}/c \Rightarrow \langle \theta \rangle \sim \frac{0.3 \div 0.5}{10} = 0.03 \div 0.05$$

Поглощение адронов в веществе: $N(x) = N_0 e^{-\sigma_a n x}$;

средний пробег (он же - *ядерная длина*) $\lambda_a = 1/(\sigma_a n) = \frac{A}{\sigma_a \rho N_A} [\text{см}] = 100 \div 200 [\text{г/см}^2]$.

1.2 Адронный (ядерно-электромагнитный) ливень

Адронные неупругие взаимодействия в толстом слое вещества приводят к развитию адронного ливня. В отличие от э/м ливня - много различных процессов и участвующих частиц. Основной состав - π и $N(=n, p)$.

Распады $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $f_{\pi^0} \sim 0.1 \ln E(\text{ГэВ})$, дают электромагнитную компоненту. Ее доля в ливне во многом определяется первым взаимодействием, в среднем $\sim 20 \div 40 \%$ при 5 ГэВ и $40 \div 70 \%$ при 100 ГэВ.

Есть не детектируемая или частично детектируемая энергия (плохой и/или различный отклик на n, γ , заряженные частицы):

- развал (возбуждение и его снятие, $t_{\text{хар}} \sim 10^{-18 \div -13}$ с) ядер
 - энергия связи (~ 8 МэВ/нуклон) не детектируется;
 - быстрые нейтроны с длиной пробега $\lambda_n \simeq 100 \text{ г/см}^2 \gg \lambda_p \simeq 20 \text{ г/см}^2$

Типичный баланс энергии при развале ядер:

- (1) энергия "испарения" ($\gamma, n \sim 10 \text{ МэВ}$) $\simeq 10\%$
- (2) энергия связи $\simeq 10\%$
- (3) быстрые ($\sim 100 \text{ МэВ}$) $n \simeq 40\%$
- (4) быстрые $p \simeq 40\%$

- распады частиц(π, K, μ)
 - μ^\pm с малыми потерями энергии;
 - ν практически не взаимодействуют.
- Доля "невидимой" энергии $\sim 0.04/\ln E[\text{ГэВ}]$.

(Энергетические) Характеристики ливня

- (1) $t_{max}(\lambda) \sim 0.2 \ln E(\text{ГэВ}) + 0.7$ от начала вещества
 $t_{max} \searrow$ при $Z \nearrow$ (из-за роста λ/X_0).
- (2) $L_{0.95}(\lambda) \simeq t_{max} + 2.5\lambda_{att}$
 $\lambda_{att} \simeq \lambda E^{0.13}(\text{ГэВ})$
- (3) узкий "ствол" $R_{FWHM} = (0.1 \div 0.5)\lambda$ на глубинах $(1 \div 4)\lambda$ соответственно
 широкое гало $R_{0.95} \sim \lambda$ - очень грубо, не масштабируется с λ
- (4) полезная параметризация продольного развития от точки рождения

$$\frac{dE}{ds} = K[wt^a e^{-bt} + (1-w)l^c e^{-dl}],$$

где t - в ед. X_0 , l - в ед. λ ; w, a, b, c, d - параметры подгонки.

Разрешение адронного калориметра

- *доминирует внутреннее*: из-за разнообразия частиц и процессов - разные отклики, флуктуирует доля энергии на ионизацию.

$$\left(\frac{\sigma_E}{E}\right) \sim \frac{50\%}{\sqrt{E(\text{ГэВ})}}$$

(кроме калориметра из ^{238}U).

Важный фактор - различие откликов на электромагнитную и "чисто адронную" компоненты $e/h > 1 (\sim 1.4)$.

Из-за больших λ адронные калориметры почти всегда - "выборочного" типа, с соответствующими флуктуациями "выборки".

$(\sigma_E/E)_{\text{sampl}} \sim 9\% \sqrt{\Delta E(\text{МэВ})/E(\text{ГэВ})}$ - в 2-3 раза $>$ чем для ЭМК из-за:
 - сильно коррелированные пересечения (1 π - 50 слоев ионизации);
 - меньшее число пересечений при том же сигнале ($dE/dx \gg (dE/dx)_{\text{mip}}$).
 N.B. Эффект Биркса приводит к насыщению сигнала от сильно ионизирующих частиц.

Флуктуации утечек дают низко-энергетичный "хвост" и вклад в разрешение: $\sigma/E \sim (\sigma/E)_{f=0} \cdot (1 + 4f)$ при доле продольной утечки f .

Следствия $e/h \neq 1$:

- (1) Распределение по измеренной энергии не гауссово

- (2) $\frac{\sigma}{E} \neq \frac{c}{\sqrt{E}} \Rightarrow \frac{c}{\sqrt{E}} + K$ (из-за флуктуаций f_{π^0})
- (3) сигнал $\not\propto E$ (т.к. $f_{\pi^0} = f(E)$).

e/h -компенсация:

- (1) подавление э.м. - компоненты (e) за счет свойств низкоэнергичной части э.м. ливня (область фотоэффект). Используются абсорбер с большим Z , активное вещество с малым Z .
- (2) усиление вклада адронной компоненты (h) за счет увеличения относительного отклика на нейтроны в Н-обогащенном активном в.-ве.
1) и 2) регулируется подбором относительных вкладов слоев.
- (3) усиление h при использовании ^{238}U **абсорбера**.

В основе - частичная компенсация "недостачи" на энергию связи за счет n -индуцированных распадов ядер урана, около 30 на 1 ГэВ первичной энергии. Захват n и распад ядра сопровождаются испусканием нескольких γ - квантов суммарной энергией ~ 20 МэВ. Т.о. достигается $e/h \simeq 1$.

Для урановых калориметров получены рекордные разрешения

$$\frac{\sigma_E}{E} \simeq \frac{30\%}{\sqrt{E(\text{ГэВ})}}.$$

При разделении э.м. и адронной компонент (например, по форме ливня при в калориметре с продольной сегментацией) возможна пособытийная e/h -коррекция.