

## РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ И ТОКИ ОТ ЛИВНЕЙ И $\mu$ -МЕЗОНОВ, СОЗДАВАЕМЫХ В СРЕДЕ ПУЧКОМ НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Г.А.Аскарьян

Рассмотрен ток, создаваемый  $\mu$ -мезонами и ливнями в пучке нейтрино высоких энергий. Оценена его величина и ЭМ поля, возникающие при его движении и модуляции. Показана возможность создания глубинного источника ЭМ полей, которые могут быть использованы для детектирования пучка нейтрино и для радиоинтроскопии пород.

В последнее время большое внимание уделяется получению и использованию пучка нейтрино высоких энергий для исследования Земли, поиска полезных ископаемых (см., например, <sup>1</sup>). Это становится реальным, так как от ускорителей следующего поколения могут быть получены посылки  $N_\nu \simeq 3 \cdot 10^{13}$   $\mu$ -мезонных нейтрино на импульс ускорителя с энергиями нейтрино  $\epsilon_\nu \sim \text{ТэВ}$  ( $10^{12}$  эВ) с малой угловой расходимостью  $\theta \sim 10^{-5}$  (пучок радиусом 10 м на расстоянии  $10^3$  км).

Такие нейтрино при взаимодействии с ядрами вещества образуют адронно-электронно-фотонные ливни и  $\mu$ -мезоны высоких энергий  $\epsilon_\mu \cong \text{ТэВ}$ , что и предполагается использовать

для исследования Земли: по излучению звука  $2^{-4}$  при энерговыделении от пучков частиц можно определить скорость звука и другие свойства пород, по поглощению и рассеянию  $\mu$ -мезонов – свойства пород под поверхностью Земли и т. п.

В данной работе мы рассмотрим токи и радиоизлучение от ливней и  $\mu$ -мезонов, образованных нейтринным пучком и возможности их использования для детектирования нейтринного пучка, для радиоинтроскопии, исследования свойств и распределения пород внутри Земли.

### 1. Мезонные заряды и токи в пучке нейтрино.

Обычно из-за условий фокусировки пионов в распадном канале летят пионы определенного знака заряда. Поэтому при их распаде получаются или  $\mu$ -мезонные нейтрино (от  $\pi_+$ ) или  $\mu$ -мезонные антинейтрино (от  $\pi_-$ ). Такие пучки нейтрино дают мюонные пучки определенных знаков заряда:  $\mu_-$  – от нейтрино или  $\mu_+$  от антинейтрино.

$$\nu + p \rightarrow \mu_- + \dots; \quad (\sigma_{\nu p \mu_-} \approx 0,17 \text{ отн. ед.}); \quad \nu + n \rightarrow \mu_- + \dots;$$

$$(\sigma_{\nu n \mu_-} \approx 0,3); \quad \bar{\nu} + p \rightarrow \mu_+ + \dots; \quad (\sigma_{\bar{\nu} p \mu_+} \approx 0,13); \quad \bar{\nu} + n \rightarrow \mu_+ + \dots;$$

( $\sigma_{\bar{\nu} n \mu_+} \approx 0,09$ ). Отметим, что даже в пучке смеси  $\nu$  и  $\bar{\nu}$  образуется избыток мюонов определенного знака заряда из-за различия величин сечения рождения мезонов  $\sigma_{\nu \mu_-} \approx 2\sigma_{\bar{\nu} \mu_+}$  в среднем на нуклон (см., например, <sup>6</sup>).

Если задана мощность потока нейтрино  $\dot{N}_\nu$  ( $\sim N_\nu/T$ , где  $T$  время сброса пучка ускорителя, которое может быть изменено в широких пределах), то квазиравновесный ток, создаваемый мезонами  $J_\mu \approx e\dot{N}_\nu L_\mu / L_\nu$ , где  $L_\mu$  – пробег  $\mu$ -мезонов ( $L_\mu \approx 1$  км) и  $L_\nu$  – пробег нейтрино (для интересующих нас энергий  $L_\nu \approx 3 \times 10^4$  км).

Мезонный двужующийся сгусток  $Q_\mu \approx eN_\nu \frac{L_\mu}{L_\nu} \approx 3 \times 10^{-5} eN_\nu$  содержит много частиц и даст сильное когерентное излучение в области длин волн, превосходящих размеры сгустка  $l \sim cT$ . Например, для  $T \approx 10^{-6}$  с и  $N_\nu \approx 3 \cdot 10^{13}$  и при  $L_\mu / L_\nu \approx 3 \times 10^{-5}$  получим  $J_\mu \approx 0,3$  мА и  $N_\mu \approx 1/e Q_\mu \approx 3 \times 10^{-5} N_\nu \approx 10^9$ .

### 2. Движение избыточного заряда ливней в пучке нейтрино

Из-за вовлечения  $\delta$  и комптон электронов в лавину, каждый ливень дает избыточный движущийся отрицательный заряд <sup>7, 8</sup>  $n_{изб} \approx 0,2 n_c \approx 0,2 (E_\nu / 10^2 \text{ МэВ}) \approx 0,2 \cdot 10^4$  зарядов. Средний избыточный заряд  $N_{изб} \sim n_{изб} L_c N_\nu / L_\nu$ , где  $L_c$  – длина каскада ( $L_c \lesssim 5$  м). Сравним величины избыточных зарядов  $N_e / N_\mu \approx n_{изб} L_c / L_\mu \approx n_{изб} 5 \cdot 10^{-3} \approx 10$ , т. е. избыточный заряд ливней может превосходить мезонный.

### 3. Излучение от движения зарядов

Движение заряда может вызвать всплеск радиоизлучения. Если это движение происходит в горных породах с хорошими диэлектрическими свойствами  $\epsilon \approx 10$  (с малой проводимостью  $\sigma \approx 10^7 \div 10^6$  абс), то обратный ток не успевает заметно ослабить направленное движение заряда (время компенсации  $\tau \sim \epsilon / 2\pi\sigma$ ) и от его сверхсветового движения должно возникнуть черенковское или переходное излучение.

Используя выражение для погонных потерь энергии для черенковского излучения

$$\epsilon_1 \approx \frac{Q^2}{c^2} \int \omega \left[ 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\omega)} \right] d\omega \sim \frac{Q^2}{c^2} \omega \Delta\omega$$

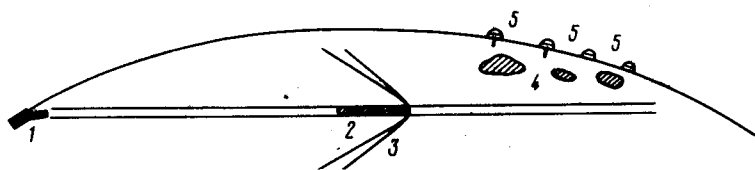
оценим нижний предел для мощности излучения

$$W \sim \epsilon_1 c \approx N^2 e^2 \omega \Delta\omega / c \approx (2\pi)^2 N^2 e^2 / c T^2$$

при  $N \sim 10^{10}$ ; и  $T \sim 1$  мкс получим  $W \approx 3$  мВт; . Это нижняя оценка для очень размытого конуса излучения (при четном конусе напряженность поля излучения гораздо больше на фронте конуса с углом  $\varphi \sim \arccos \frac{1}{n}$ . Большие допустимые размеры

сгустка (из условия когерентности  $\lambda' = \lambda/n > l_{\parallel}$  и  $l_{\perp}$  для частот  $< \text{МГц}$   $l \lesssim 10^2 \text{ м}$ ) и большая мощность импульса позволяет использовать нейтринные пучки больших диаметров и ускорители меньших энергий.

Эти оценки показывают возможность создания глубинного источника радиоизлучения, по искажению которого можно обнаружить зоны повышенной проводимости или повышенного поглощения (пласты нефтеносные, с водяным заполнением, металлические руды и т.п.).



Излучение ЭМ волн от движущегося сгустка заряда, создаваемого пучком нейтрино: 1 – ускоритель – источник пучка нейтрино, 2 – сгусток движущегося заряда, создаваемого потоком нейтрино, 3 – конус черенковского ЭМ излучения, 4 – неоднородности горных пород, 5 – датчики – приемники ЭМ поля

Отметим, что радиоинтроскопия горных пород<sup>9</sup> осуществляется как раз в диапазоне  $10^4 - 10^6$  Гц. Повторяемость и модуляция импульсов облегчает прием и выделение от помех. Возможно применение и иных, более мощных ( $N_{\nu} \sim 10^{18}$ ) транспортабельных источников нейтрино (см., например, <sup>5</sup>) с меньшей энергией и направленностью ( $\theta \lesssim 0,3$ ) на меньших расстояниях.

#### 4. Неоднородности токов и электрического поля

Возникновение тока  $J_{\mu}$  и тока от избыточного заряда каскадов  $J_c$  может вызвать образование электрических зарядов в случае продольной неоднородности токов  $(\partial J / \partial z) = \dot{Q}_1 + \frac{2\pi\sigma}{\epsilon} Q_1$ , где  $Q_1$  – погонный заряд. Для хороших диэлектриков ( $T\sigma < 1$ ) заряд  $Q_1$  дает на расстоянии  $R \lesssim l$  поле  $E \sim 2Q_1/R$ . При размере неоднородности тока  $l < 1 \text{ км}$  получим  $E \approx (2eN_{\nu}/lR)/(L_{\mu}/L_{\nu}) \approx \text{мкВ/см}$  только от мезонного тока.

Из вышеизложенного видно, что электромагнитные поля, возникающие от нейтринного пучка вполне детектируемы и могут быть использованы для регистрации и исследования распределения пород. По изменению распределения сигнала и по изменению его запаздывания (при смещении пучка, натывающегося на неоднородность) можно оценить свойства и размеры неоднородности.

Отметим, что предложенный в работах<sup>7, 8</sup> способ радиорегистрации редких частиц в больших объемах природных сред с малым поглощением радиоволн был повторен недавно в статье<sup>10</sup>.

В заключение выражаю глубокую благодарность Е.Л.Фейнбергу за стимулирующее воздействие и весьма ценные обсуждения.

#### Литература

1. De Rujula A., Glashow S.L., Wilson R., Charpak G. Preprint CERN (Switz) – Harvard (USA) 1983.
2. Аскарьян Г.А. АЭ, 1957, 3, 152.
3. Аскарьян Г.А., Долгошеин Б.А. Письма в ЖЭТФ, 1977, 25, 232.
4. Askarjan G.A., Dolgoshein B.A., Kalinovsky A.N., Mokhov A.V. Nucl. Instr. and Meth., 1979, 164, 267.
5. Аскарьян Г.А., УФН, 1974, 128, 727; Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, 322.
6. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки, М.: Наука, 1981, стр. 142.
7. Аскарьян Г.А. ЖЭТФ, 1961, 41, 616.
8. Аскарьян Г.А. ЖЭТФ, 1965, 48, 988.
9. Ржевский В.В., Коренберг Е.Б. Рудничная радиоинтроскопия и радиосвязь, М.: Недра, 1978.
10. Гусев Г.А., Железных И.М. Письма в ЖЭТФ, 1983, 38, 505.