

## УНИВЕРСАЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФЕРМИ И АСТРОФИЗИКА

Б. Понтекерво

Гипотеза о глубокой аналогии разных медленных процессов распада элементарных частиц как лептонных [1], так и нелептонных [2], нашла недавно блестящую формулировку в теории универсального (векторного и аксиально-векторного) взаимодействия Сударшана — Маршака [3] и Фейнмана — Гелл-Манна [4]. Согласно этой теории, процесс рассеяния нейтрино электронами описывается взаимодействием первого порядка по константе слабого взаимодействия [4, 5]. Экспериментальное обнаружение такого процесса было бы очень желательным. Однако постановка опытов по прямому наблюдению рассеяния электронами антинейтрино из реактора (т. е. по обнаружению ионизации, обусловленной антинейтрино, не связанной с обратными ядерными  $\beta$ -процессами), хотя и не исключена, но в настоящее время кажется очень затруднительной.

Цель настоящей заметки — обратить внимание на то, что существовавшие взаимодействия  $\gamma - e$  первого порядка могло бы приводить к макроскопическим эффектам. Из такого взаимодействия следует, что позитрон-электронная аннигиляция может происходить с испусканием нейтрино-антинейтринной пары<sup>1</sup>. Поэтому в электромагнитных процессах вместо испускания фотона становится возможным испускание пары  $\tilde{\nu}\bar{\nu}$  (через виртуальную пару  $e^+e^-$ ). Эта общая фундаментальная связь между электромагнитными явлениями и лептонными процессами прямо вытекает из универсального взаимодействия Ферми.

Правда, испускание пары  $\tilde{\nu}\bar{\nu}$  крайне маловероятно по отношению к испусканию фотона, однако огромная проникающая способность нейтрино заставляет думать о возможности эффектов, связанных с нейтрино-электронным взаимодействием в больших телах, находящихся при высокой температуре  $T$ . Рассмотрим процесс тормозного излучения электрона с испусканием фотона или пары  $\tilde{\nu}\bar{\nu}$  в соударении электрона с ядром  $A$  заряда  $Z$ :

$$\begin{aligned} e + A &\rightarrow e + A + \gamma \quad (\text{фотонное тормозное излучение}), \\ e + A &\rightarrow e + A + \nu + \bar{\nu} \quad (\text{лептонное тормозное излучение}). \end{aligned}$$

Обозначим через  $\alpha$  отношение вероятностей  $W_\gamma$  и  $W_{\tilde{\nu}\bar{\nu}}$  того, что при отклонении электрона с энергией  $E$  ядром испускаются соответственно фотон или пара  $\tilde{\nu}\bar{\nu}$ . Соображения размерности наводят на мысль, что

$$\alpha = \frac{W_\gamma}{W_{\tilde{\nu}\bar{\nu}}} \approx \frac{(e^2 Z / \hbar c)^2 e^2 / \hbar c}{(e^2 Z / \hbar c)^2 G^2 (E / mc^2)^4}.$$

где  $G = gm^2 c / \hbar^3$  — безразмерная константа слабого взаимодействия,  $g = 1,4 \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3$  — константа Ферми и  $m$  — масса электрона.

Ясно, что  $\alpha$  — огромная величина при любых температурах, которые встречаются в астрофизике. Однако из-за разницы проникающей способности фотонов и нейтрино излучение данной энергии (скажем,  $\sim kT$ ) в виде фотонов звездами в пространство происходит, в конечном счете, благодаря огромному числу актов фотонного тормозного излучения, несравнимо превышающему число ( $\sim 1$ ) актов лептонного тормозного излучения, при которых излучается в виде нейтрино та же энергия  $\sim kT$ . Поэтому на некоторой стадии эволюции звезд может оказаться, что энергии, излученные в пространство в виде нейтрино и фотонов, становятся сравнимыми, несмотря на малость отношения  $W_{\tilde{\nu}\bar{\nu}} / W_\gamma$  в каждом элементарном акте. Обращает

<sup>1</sup> В частности, аннигиляции ортопозитрония с испусканием пары  $\tilde{\nu}\bar{\nu}$  примерно в  $10^{15}$  раз менее вероятна, чем его аннигиляция на три  $\gamma$ -кванта. Из-за продолжительности нейтрино парапозитроний не может аннигилировать с испусканием нейтрино и антинейтрино.

на себя внимание связанная с размерностью константы Ферми резкая зависимость от температуры вероятности процесса лептонного тормозного излучения. Кроме того, с увеличением  $Z$  длина свободного пробега фотонов уменьшается, что приводит к увеличению веса нейтринного процесса в энергетическом балансе.

Все это наводит на мысль, что процесс может становиться важным в стадии эволюции звезд, когда их температура и средний  $Z$  значительно превышают соответствующие величины для солнца. Нетрудно видеть, что механизм лептонного тормозного излучения практически не играет роли в энергетическом балансе солнца ( $kT \sim 1 \text{ keV}$ ,  $Z \sim 1$ ).

Механизм испускания нейтрино звездами, предложенный выше, связан с нейтрино-электронным взаимодействием и фундаментально отличается от процесса, предложенного Гамовым и Шенбергом [6], связанного с ядерными (прямыми и обратными)  $\beta$ -процессами. Лептонное тормозное излучение электрона — процесс беспороговый, а процесс Гамова — Шенберга — эффект с определенным порогом.

В последнее время Г. М. Гандельманом и В. С. Пинаевым были количественно исследованы эффекты в астрофизике, связанные с описанным выше механизмом лептонного тормозного излучения электрона. Ими показано, что в области температуры  $kT > 30 \text{ keV}$  при плотности  $> 10^4 \text{ г.см}^{-3}$  энергия, унесенная нейтрино из звезд ( $Z \approx 20$ ), превышает энергию, унесенную фотонами.

В заключение мне очень приятно поблагодарить Я. Б. Зельдовича, Д. А. Франк-Каменецкого и Л. Б. Окуня за критические замечания и интерес к работе, а также Г. М. Гандельмана и В. С. Пинаева, любезно информировавших меня о результатах их работы.

Объединенный институт  
ядерных исследований

Поступило в редакцию  
23 марта 1959 г.

#### Литература

- [1] B. Pontecorvo. Phys. Rev., 72, 246, 1947. G. Puppi. Nuovo Cim., 5, 505, 1948. D. Klein. Nature, 161, 897, 1948. T. D. Lee, M. Resenbluth C. N. Yang. Phys. Rev., 75, 905, 1949. J. Tiomno, J. A. Wheeler. Rev. Mod. Phys., 21, 144, 1949.
- [2] N. Dallaporta. Nuovo Cim., 1, 962, 1955. G. Costa, N. Dallaporta. Nuovo Cim., 2, 519, 1955. Б. Понтекорво. Гипероны, К-мезоны и универсальное взаимодействие Ферми, Отчет ИЯП АН СССР, 637, 1955. M. Gell-Mann. Proc. of the Sixth Rochester Conf. on high energy physics, 1956.
- [3] E. C. G. Sudarshan, R. E. Marshak. Proc. of the Padua — Venice conf. on mesons and newly discovered particles, 1957.
- [4] R. P. Feynman, M. Gell-Mann. Phys. Rev., 109, 193, 1958.
- [5] В. М. Шехтер. ЖЭТФ, 34, 257, 1958
- [6] G. Gamow, M. Schoenberg. Phys. Rev., 59, 539, 1941.