**Распад тяжелого нейтрального лептона с дираковским или майорановским нейтрино в конечном состоянии**

***Семыкин В.В.***

*студент, бакалавр*

*Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,*

*институт физики и квантовой инженерии, Москва, Россия*

*E-mail:* *m2102427@edu.misis.ru*

В современной физике частиц нейтрино являются одними из наименее изученных объектов в рамках Стандартной модели. В частности, открытым остается вопрос об их возможной природе. На данный момент все фермионы с известной природой являются фермионами Дирака, но в случае с нейтрино существует значительная вероятность, что они будут первыми открытыми фермионами Майораны. При этом неизвестно существуют ли другие подобные объекты, что есть предмет дискуссии о расширении Стандартной модели, например, её нейтринного сектора.

В настоящей работе был рассмотрен распад гипотетического нейтрального лептона: $N\_{α}\rightarrow l\_{ζ}^{+}l\_{β}^{-}ν\_{i}$ с учетом обоих сценариев природы нейтрино. Их сравнение проводилось на распределении $\frac{dΓ}{ds\_{1}ds\_{2}}$, где инвариантные переменные $s\_{1},s\_{2}$ связаны с $E\_{l\_{ζ}^{+}}, E\_{l\_{β}^{-}}$ в системе покоя $N\_{α}$ как: $s\_{1}=(p\_{N\_{α}}-p\_{l\_{ζ}^{+}})^{2}=s+m\_{l\_{ζ}^{+}}^{2}-2E\_{l\_{ζ}^{+}}\sqrt{s}$*,* $s\_{2}=(p\_{N\_{α}}-p\_{l\_{β}^{-}})^{2}=s+m\_{l\_{β}^{-}}^{2}-2E\_{l\_{β}^{-}}\sqrt{s}$.

Помимо этого, был проведен сравнительный анализ принятых в [2] правил Фейнмана для взаимодействий между майорановскими фермионами и возможных альтернативных правил, введенных с целью устранения неоднозначности, обнаруженной в подходе [2]. Дополнительно была рассмотрена возможность введения CP-асимметрии для обоих вариантов правил, что не было предусмотрено в [2].

Расчеты велись с использованием приближения четырехфермионного взаимодействия согласно [1] и идее об интерференции фейнмановских диаграмм [5].

**Неоднозначность появлялась при следовании принятым в [2, 4] условиям, накладываемым на прямую и обратную константы связи (от разных сверток Вика): $η^{i}g\_{abc}^{i}=g\_{bac}^{i}$ , где *a*, *b* – индексы фермионов, *c* – бозона, *i* – вида тока. $η^{i}=-1$ для векторного тока и 1 для аксиального. В нашем случае неопределенность заключалась в выборе: $g\_{ν\_{i}N\_{α}Z}^{V}=-g\_{N\_{α}ν\_{i}Z}^{V}=\frac{g\_{w}}{4cosϴ\_{w}}(U^{†}Θ)\_{iα}$ либо $g\_{N\_{α}ν\_{i}Z}^{V}=-g\_{ν\_{i}N\_{α}Z}^{V}=\frac{g\_{w}}{4cosϴ\_{w}}(U^{†}Θ)\_{iα}$ – для взаимодействия в (\*) на диаграмме (I). Заметим, что данная диаграмма может существовать только при $β=ζ$. $(U^{†}Θ)\_{iα}$ – фактор смешивания, заимствованный из [3], $U$ и $Θ$ – матрицы смешивания $ν$ с $l$ и $N$ с $l$, соответственно.

В зависимости от выбора искомое распределение имело различные выражения, соотносящиеся друг с другом через перестановку местами индексов$l\_{β}^{+}\leftrightarrow l\_{β}^{-}$(при этом происходил обмен $s\_{1}\leftrightarrow s\_{2}$, не сводящийся к переобозначению дифференциальных инвариантных переменных). Допустимо было бы предположить о существовании неустановленного правила выбора знака между двумя константами, однако без него неоднозначность устранялась с наложением альтернативного условия: $g\_{abc}^{i}=g\_{bac}^{i}$.

Таким образом, было получено три распределения для $β=ζ$.

Распределение для майорановских нейтрино с $g\_{ν\_{i}N\_{α}Z}^{V}=-g\_{N\_{α}ν\_{i}Z}^{V}=\frac{g\_{w}}{4cosϴ\_{w}}(U^{†}Θ)\_{iα}$:

$$\frac{dΓ\_{iββ}^{M}}{ds\_{1}ds\_{2}}=-\frac{G\_{F}^{2}}{16π^{3}m\_{N\_{α}}^{3}}\{f\_{1}\left(s\_{1}\right)A\_{1}+ f\_{2}\left(s\_{2}\right)A\_{2}+2f\_{3}\left(s\_{1,2}\right)A\_{3}+2f\_{4}\left(s\_{1,2}\right)A\_{4}+8f\_{5}A\_{5}\}.$$

Распределение для майорановских нейтрино с $g\_{ν\_{i}N\_{α}Z}^{V}=g\_{N\_{α}ν\_{i}Z}^{V}=\frac{g\_{w}}{4cosϴ\_{w}}(U^{†}Θ)\_{iα}$:

$$\frac{dΓ\_{iββ}^{M}}{ds\_{1}ds\_{2}}=-\frac{G\_{F}^{2}}{64π^{3}m\_{N\_{α}}^{3}}\{[f\_{1}\left(s\_{1}\right)+ f\_{2}\left(s\_{2}\right)]B\_{1}+2f\_{3}\left(s\_{1,2}\right)B\_{2}+4f\_{4}\left(s\_{1,2}\right)B\_{3}+16f\_{5}B\_{4}\}.$$

Распределение для дираковского нейтрино:

$$\frac{dΓ\_{iββ}^{D}}{ds\_{1}ds\_{2}}=-\frac{G\_{F}^{2}}{16π^{3}m\_{N\_{α}}^{3}}\{f\_{1}\left(s\_{1}\right)A\_{1}+ f\_{2}\left(s\_{2}\right)C\_{2}^{2}|(U^{†}Θ)\_{iα}|^{2}+4f\_{4}\left(s\_{1,2}\right)C\_{0}\}.$$

Введены обозначения:$f\_{5}=m\_{N\_{α}}m\_{ν\_{i}}m\_{l\_{β(ζ)}^{+}}m\_{l\_{β}^{-}}, C\_{0}=[C\_{1}|(U^{†}Θ)\_{iα}|^{2}+Re\{(U^{†}Θ)\_{iα}U\_{βi}Θ\_{βα}^{\*}\}],$

$f\_{1}\left(s\_{1}\right)=\left(s+m\_{l\_{β(ζ)}^{+}}^{2}-s\_{1}\right)\left(s\_{1}-m\_{l\_{β}^{-}}^{2}-m\_{ν\_{i}}^{2}\right),f\_{2}\left(s\_{2}\right)=\left(s+m\_{l\_{β}^{-}}^{2}-s\_{2}\right)\left(s\_{2}-m\_{l\_{β(ζ)}^{+}}^{2}-m\_{ν\_{i}}^{2}\right), f\_{3}\left(s\_{1,2}\right)=m\_{N\_{α}}m\_{ν\_{i}}\left(s+m\_{ν\_{i}}^{2}-s\_{1}-s\_{2}\right),f\_{4}\left(s\_{1,2}\right)=m\_{l\_{β(ζ)}^{+}}m\_{l\_{β}^{-}}\left(s\_{1}+s\_{2}-m\_{l\_{β(ζ)}^{+}}^{2}-m\_{l\_{β}^{-}}^{2}\right),$

$$A\_{1}=[C\_{1}^{2}|(U^{†}Θ)\_{iα}|^{2}+2C\_{1}Re\{(U^{†}Θ)\_{iα}U\_{βi}Θ\_{βα}^{\*}\}+|U\_{βi}|^{2}|Θ\_{βα}|^{2}],$$

$$A\_{2}=[C\_{2}^{2}|(U^{†}Θ)\_{iα}|^{2}+|U\_{βi}|^{2}|Θ\_{βα}|^{2}] , A\_{3}=Re\{(U\_{βi}Θ\_{βα}^{\*})^{2}+C\_{1}(U^{†}Θ)\_{iα}U\_{βi}Θ\_{βα}^{\*}\},$$

$$A\_{4}=Re\{C\_{1}C\_{2}(U^{†}Θ)\_{iα}^{2}+C\_{2}(U^{†}Θ)\_{iα}U\_{βi}Θ\_{βα}^{\*}\},A\_{5}=Re\{C\_{2}(U^{†}Θ)\_{iα}U\_{βi}Θ\_{βα}^{\*}\},$$

$$B\_{1}=[(C\_{1}^{2}+C\_{2}^{2})|(U^{†}Θ)\_{iα}|^{2}+4C\_{1}Re\{(U^{†}Θ)\_{iα}U\_{βi}Θ\_{βα}^{\*}\}+4|U\_{βi}|^{2}|Θ\_{βα}|^{2}],$$

$$B\_{2}=Re\{(C\_{1}^{2}+C\_{2}^{2})(U^{†}Θ)\_{iα}^{2}+4C\_{1}(U^{†}Θ)\_{iα}^{\*}U\_{βi}Θ\_{βα}^{\*}+4(U\_{βi}Θ\_{βα}^{\*})^{2}\},$$

$$B\_{3}=C\_{1}C\_{2}|(U^{†}Θ)\_{iα}|^{2}+2C\_{2}Re\{(U^{†}Θ)\_{iα}U\_{βi}Θ\_{βα}^{\*}\},$$

$$B\_{4}=Re\{C\_{1}C\_{2}(U^{†}Θ)\_{iα}^{2}+2C\_{2}(U^{†}Θ)\_{iα}^{\*}U\_{βi}Θ\_{βα}^{\*}\},C\_{1}=sin^{2}ϴ\_{w}-0.5 ,C\_{2}=sin^{2}ϴ\_{w}.$$

Прямое сопоставление выражений показывает, что распределение для майорановского случая с принятым соглашением о $η^{i}g\_{abc}^{i}=g\_{bac}^{i}$ не переходит в себя после перестановки $l\_{β}^{+}\leftrightarrow l\_{β}^{-}$, подобно распределению дираковского сценария. При этом соглашение $g\_{abc}^{i}=g\_{bac}^{i}$ дает инвариантный по $l\_{β}^{+}\leftrightarrow l\_{β}^{-}$ результат, что видится подобающим для распада майорановской частицы. Между тем, симметрией по $l\_{ζ}^{+}\leftrightarrow l\_{β}^{-}$ обладает случай $β\ne ζ$:

$$\frac{dΓ\_{iβζ}^{M}}{ds\_{1}ds\_{2}}=-\frac{G\_{F}^{2}}{32π^{3}m\_{N\_{α}}^{3}}[f\_{1}\left(s\_{1}\right)|U\_{βi}|^{2}|Θ\_{ζα}|^{2}+ f\_{2}\left(s\_{2}\right)|U\_{ζi}|^{2}|Θ\_{βα}|^{2}+2f\_{4}\left(s\_{1,2}\right)Re\{U\_{βi}^{\*}Θ\_{ζα}U\_{ζi}Θ\_{βα}^{\*}\}].$$

При таком сценарии вопрос о соглашениях не стоит, так как остаются только диаграммы (II) и (III). Перестановка же подразумевается и для знаков, и для ароматов.

В довершение анализа был дан механизм введения CP-асимметрии для майорановского сценария с $β=ζ$, что не предусматривалось в [2]. Для этого переопределялись условия на константы связи с вынесением из равенств факторов $(U^{†}Θ)\_{iα}$. Это дало выражения аналогичные написанными выше, но с заменой $(U^{†}Θ)\_{iα}\rightarrow Re\{(U^{†}Θ)\_{iα}\}$ для $η^{i}g\_{abc}^{i}=g\_{bac}^{i}$ и с $(U^{†}Θ)\_{iα}\in С$ для $g\_{abc}^{i}=g\_{bac}^{i}$.

**Литература**

1. Byckling E., Kajantie K. Particle Kinematics, 1973.
2. Denner A., Eck H., Hahn O., Küblbeck J. Feynman rules for fermion-number-violating interactions // Nuclear Physics B, Volume 387, Issue 2, 1992, Pages 467-481.
3. Dubinin M.N., Kazarkin D.M. Lepton universality in a model with three generations of sterile Majorana neutrinos. // Phys. Rev. D 109, 055004, 4 March, 2024.
4. Haber H.E., Kane G.L. The search for supersymmetry: Probing physics beyond the standard model // Physics Reports, Volume 117, Issues 2–4, 1985, Pages 75-263.
5. Márquez, J.M., Castro, G.L. & Roig, P. Michel parameters in the presence of massive Dirac and Majorana neutrinos // J. High Energ. Phys. 2022, 117 (2022).