

## 0.1 Отношение несимметричного и симметричного деления.

Массовые распределения дают информацию о соотношении между симметричной и несимметричной модами деления.

Результаты различных экспериментов на пучках тормозных гамма - квантов представлены в следующей таблице.

| Кузнецов |       |        | Jacobs [2] |       |        | Katz |       |        | Sugarman |       |        | Демехина |       |        |
|----------|-------|--------|------------|-------|--------|------|-------|--------|----------|-------|--------|----------|-------|--------|
| E        | $p/v$ | $dp/v$ | E          | $p/v$ | $dp/v$ | E    | $p/v$ | $dp/v$ | E        | $p/v$ | $dp/v$ | E        | $p/v$ | $dp/v$ |
| 19,5     | 27,2  | 10,0   | 12,0       | 78,0  | 7,0    | 12,0 | 57,7  |        | 9,7      | 196,5 |        | 50,0     | 11,4  | 1,     |
| 29,1     | 11,6  | 3,0    | 15,0       | 35,0  | 4,0    | 13,0 | 42,7  |        | 15,5     | 37,8  |        | 3500,0   | 2,4   | 0,     |
| 48,3     | 11,8  | 3,8    | 20,0       | 32,0  | 2,0    | 13,4 | 37,8  |        | 21,7     | 21,4  |        |          |       |        |
| 67,7     | 7,6   | 2,4    | 30,0       | 13,5  | 0,9    | 13,9 | 33,4  |        | 48,7     | 10,9  |        |          |       |        |
|          |       |        | 70,0       | 8,2   | 0,7    | 15,2 | 29,2  |        | 100,3    | 8,0   |        |          |       |        |
|          |       |        |            |       |        | 16,2 | 25,3  |        | 301,3    | 4,1   |        |          |       |        |
|          |       |        |            |       |        | 17,7 | 18,1  |        |          |       |        |          |       |        |
|          |       |        |            |       |        | 20,2 | 16,4  |        |          |       |        |          |       |        |
|          |       |        |            |       |        | 21,9 | 15,3  |        |          |       |        |          |       |        |
|          |       |        |            |       |        | 24,7 | 13,2  |        |          |       |        |          |       |        |

Стоит отметить, что эксперименты поставлены в различных условиях. В зависимости от характеристик тормозной мишени спектр гамма - квантов имеет различный вид. В случае тонкой мишени будет большее количество жестких фотонов. Например в работе [2] (Jacobs) применялась мишень - конвертер из золота толщиной 0,1 мм, кроме этого стоял коллиматор гамма - квантов и магнит для отвода электронов. Также по разному считается отношение пик - плато. В некоторых случаях это отношение выходов по конкретным массовым числам (например  $A = 140$  и  $A = 115$ ), в других это отношение амплитуд гауссовых распределений после фитирования. (здесь нужно разобраться в каждом эксперименте и привести данные к одному виду)

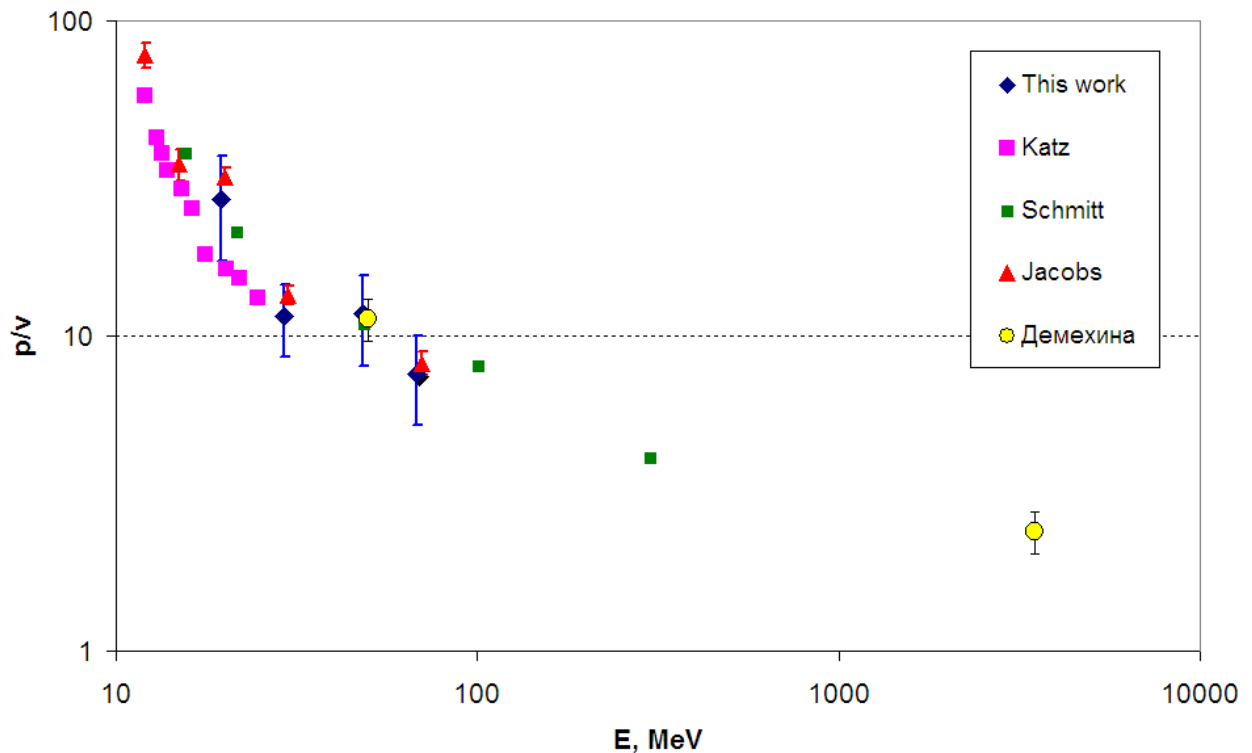


Рисунок 1. Отношение несимметричного и симметричного канала деления в различных экспериментах в зависимости от энергии электронов от ускорителя.

Чтобы сравнивать результаты экспериментов по делению для различных частиц необходимо рассчитывать энергию возбуждения составного ядра.

При реакциях под действием частиц определенной энергии, энергия возбуждения составного ядра равна:

$$E_{compound}^* = T_{projectile} + E_{pr,compound} \quad (1)$$

, где  $T_{projectile}$  - энергия налетающей частицы,  $E_{pr,compound}$  - энергия отделения налетающей частицы от составного ядра.

При использовании немонохроматического источника средняя энергия возбуждения ядра в реакции зависит от спектра налетающих частиц и сечения исследуемой реакции. Для экспериментов на тормозных гамма - квантах, средняя энергия возбуждения ядра будет [1]:

$$\langle E_{compound}^*(E_e) \rangle = \frac{\int_0^{E_e} E_\gamma \cdot \sigma_{\gamma,f}(E_\gamma) \cdot \phi(E_e, E_\gamma) dE_\gamma}{\int_0^{E_e} \sigma_{\gamma,f}(E_\gamma) \phi(E_e, E_\gamma) dE_\gamma} \quad (2)$$

, где  $E_e$  - энергия электронов от ускорителя,  $E_\gamma$  - энергия гамма - квантов,  $\phi(E_e, E_\gamma)$  - тормозной спектр,  $\sigma_{\gamma,f}$  - сечение фотodelения.

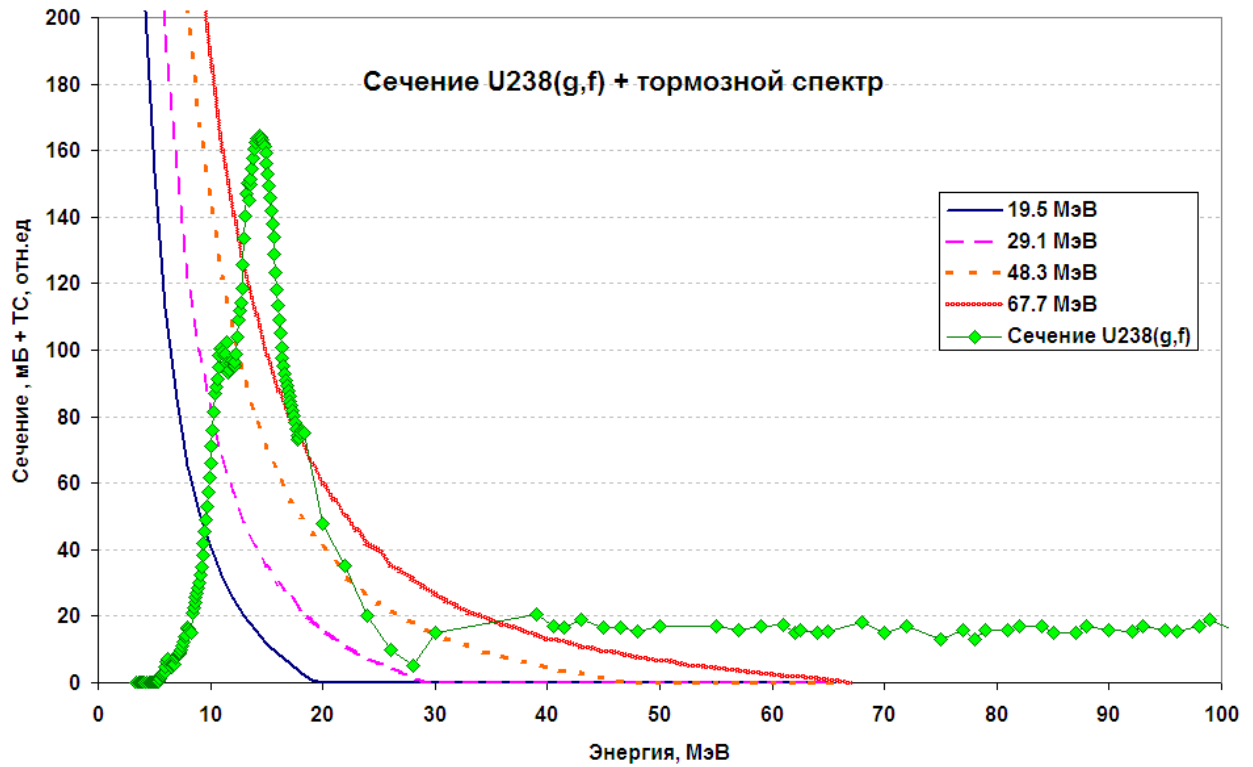


Рисунок 2. Сечение фотodelения  $^{238}_{92}\text{U}(\gamma, f)$  и тормозной спектр гамма - квантов.

Тормозной спектр рассчитывается с помощью программы Geant4. Средние энергии возбуждения для нашего эксперимента в зависимости от энергии электронов ускорителя и отношение несимметричного к симметричному делению представлены в следующей таблице:

| $E_e$ | $E_{excitation}$ | $p/v$ | $dp/v$ |
|-------|------------------|-------|--------|
| 19,5  | 12,0             | 27,2  | 10,0   |
| 29,1  | 13,0             | 11,6  | 3,0    |
| 48,3  | 13,8             | 11,8  | 3,8    |
| 67,7  | 14,7             | 7,6   | 2,4    |

В следующей таблице приведены значения энергии электронов ускорителя и средние энергии возбуждения ядра для эксперимента [2], а также их отношение несимметричного и симметричного канала деления. Характеристики эксперимента у нас разные (см. выше), расчет тормозного спектра проводился по формуле Шиффа, а сечение они брали доступное на тот момент. (там только до 20 МэВ, а дальше линейно до нуля.)

| E e  | E exitation | $p/v$ | $dp/v$ |
|------|-------------|-------|--------|
| 12,0 | 9,7         | 78,0  | 7,0    |
| 15,0 | 11,6        | 35,0  | 4,0    |
| 20,0 | 13,4        | 32,0  | 2,0    |
| 30,0 | 14,7        | 13,5  | 0,9    |
| 70,0 | 19,9        | 8,2   | 0,7    |

Видно существенное различие в средней энергии возбуждения составного ядра при одинаковой энергии электронов от ускорителя.

Дальнейшее сравнение будем проводить с результатами по делению ядра U235 нейтронами, так как экспериментальных данных по делению U237 нейтронами нет. (Стоит отметить, что U235 в основном состоянии имеет спин и четность  $\frac{7}{2}^-$ , а U237 -  $\frac{1}{2}^+$ )

Энергия отделения нейтронов от ядра U236 - 6,445 МэВ.

В таблице приведены результаты эксперимента по делению U235 нейтронами различных энергий. (PHYSICAL REVIEW C VOLUME 24, NUMBER 6 DECEMBER 1981 Mass distributions for monoenergetic-neutron-induced fission of U L. E. Glendenin, J. E. Gindler, 13. J. Henderson, and J. Argonne Nationa/ Laboratory, Argonne, Illinois 60439 (Received 7 August 1981))

| E n  | E exitation | $p/v$ |
|------|-------------|-------|
| 0,17 | 6,62        | 590   |
| 0,55 | 7,00        | 330   |
| 1,00 | 7,45        | 290   |
| 2,00 | 8,45        | 110   |
| 4,00 | 10,45       | 51    |
| 5,50 | 11,95       | 19    |
| 6,30 | 12,75       | 16    |
| 7,10 | 13,55       | 15    |
| 8,10 | 14,55       | 13    |

Стандартные данные:

| E n   | E exitation | $p/v$ |
|-------|-------------|-------|
| 0     | 6,45        | 509,8 |
| 14,00 | 20,45       | 7,1   |

Используя понятие средней энергии возбуждения нужно понимать, что зависимость величины  $p/v$  от энергии возбуждения ядра нелинейная, поэтому для данных от тормозного спектра нужно пересчитывать и усреднять величину отношения симметричного и несимметричного деления.

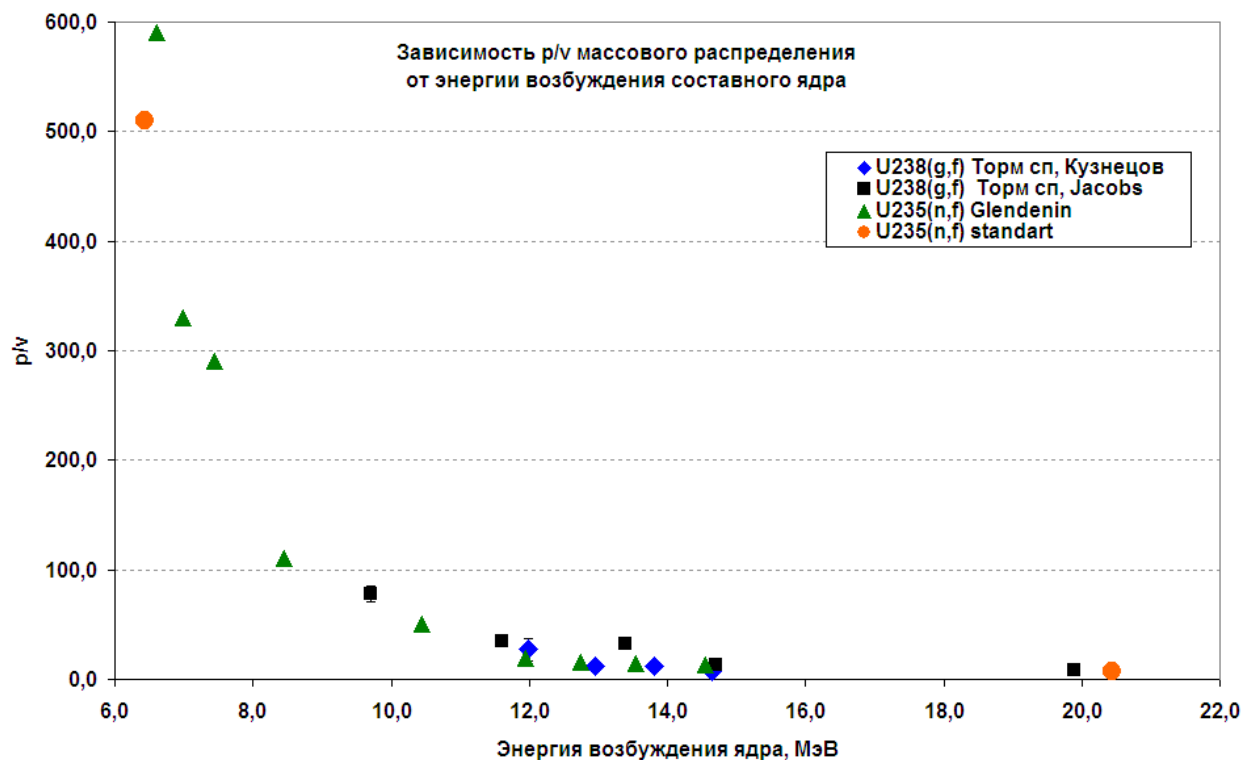


Рисунок 3.

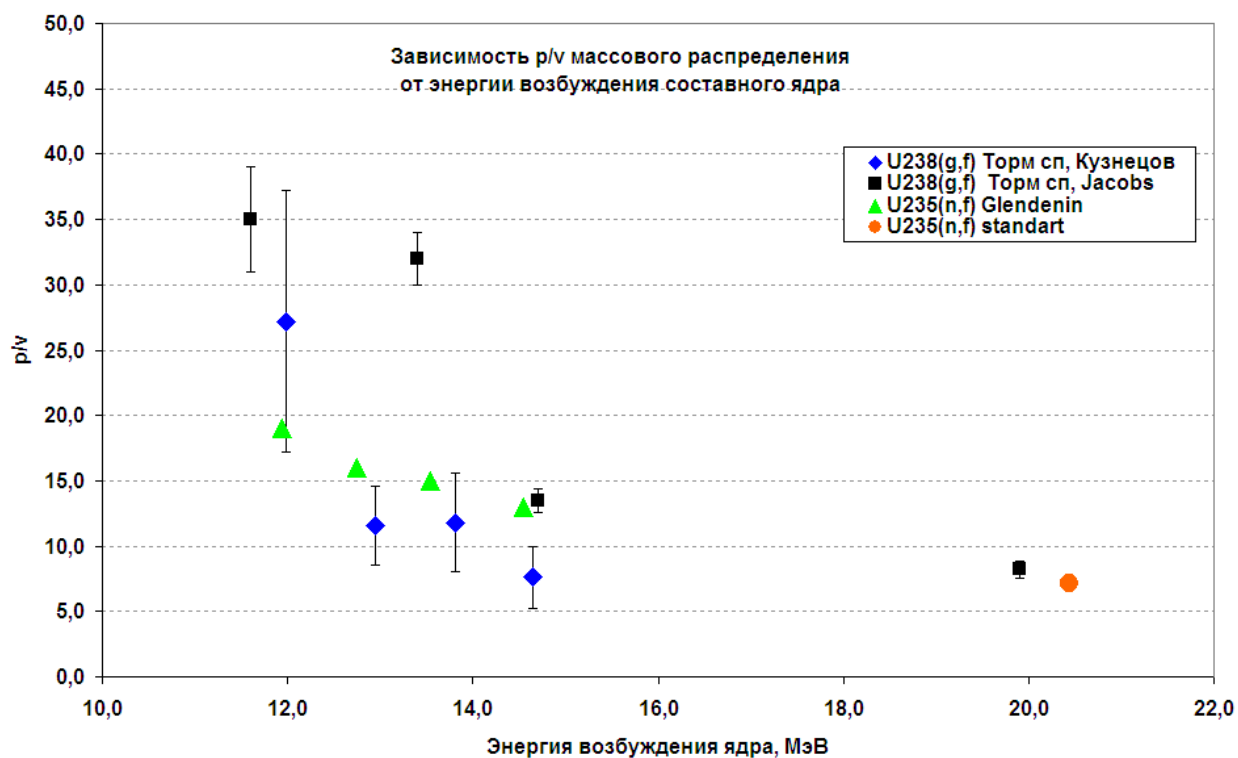


Рисунок 4.

На последнем графике [рис. 5] добавлен расчет массовых распределений по программе Talys при стандартных настройках.

Параметры расчета те же, что и в эксперименте по делению U235 монохроматическими нейтронами [Glendenin].

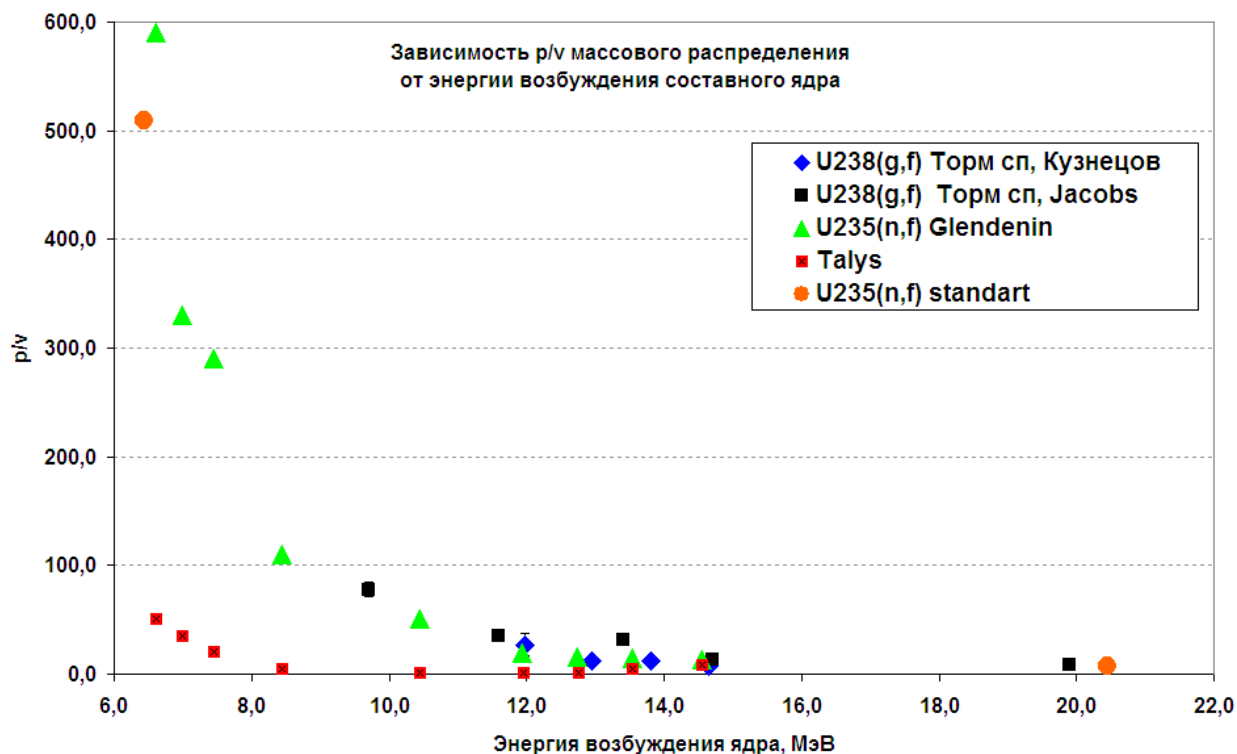


Рисунок 5.

## Список литературы

- [1] Fragment mass and kinetic energy distributions for the photofission of  $^{238}\text{U}$  with 12-, 15-, 20-, 30-, and 70-mev bremsstrahlung / E. Jacobs, A. De Clercq, H. Thierens et al. // *Phys. Rev. C*. — 1979. — Dec. — Vol. 20. — Pp. 2249–2256. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.20.2249>.
- [2] Product yields for the photofission of  $^{238}\text{U}$  with 12-, 15-, 20-, 30-, and 70-mev bremsstrahlung / E. Jacobs, H. Thierens, D. De Frenne et al. // *Phys. Rev. C*. — 1979. — Feb. — Vol. 19. — Pp. 422–432. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.19.422>.