

ЛЕКЦИЯ 20

КОЛИЧЕСТВО НЕПРИВОДИМЫХ ПРЕД-
СТАВЛЕНИЙ

СУММА КВАДРАТОВ РАЗМЕРНОСТЕЙ

ПРИМЕРЫ

КОЛИЧЕСТВО НЕПРИВОДИМЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

ЛЕММА 1. Пусть Γ — центральная функция на конечной группе G , $\varphi : G \rightarrow \text{GL}(V)$ — неприводимое комплексное представление с характером χ_φ .

Тогда для линейного оператора

$$\varphi_\Gamma = \sum_{h \in G} \overline{\Gamma}(h) \varphi(h) : V \rightarrow V$$

имеет место $\varphi_\Gamma = \lambda E$, где

$$\lambda = \frac{|G|}{\chi_\varphi(e)} (\chi_\varphi, \Gamma)_G.$$

Доказательство. Так как Γ — центральная функция, то

$$\begin{aligned} \varphi(g) \varphi_\Gamma \varphi(g)^{-1} &= \sum_{h \in G} \overline{\Gamma}(h) \varphi(g) \varphi(h) \varphi(g^{-1}) = \\ &= \sum_{h \in G} \overline{\Gamma}(ghg^{-1}) \varphi(ghg^{-1}) = \\ &= \sum_{t \in G} \overline{\Gamma}(t) \varphi(t) = \varphi_\Gamma. \end{aligned}$$

Итак, $\varphi_\Gamma \varphi(g) = \varphi(g) \varphi_\Gamma$ для всех $g \in G$. Лемма Шура, примененная к случаю $\sigma = \varphi_\Gamma$, показывает, что $\varphi_\Gamma = \lambda E$.

Вычисляя след операторов, стоящих в обеих частях этого равенства, находим

$$\begin{aligned} \lambda \chi_\varphi(e) &= \lambda \dim V = \text{tr } \lambda E = \text{tr } \varphi_\Gamma = \\ &= \sum_{h \in G} \overline{\Gamma}(h) \text{tr } \varphi(h) = \\ &= |G| \left(\frac{1}{|G|} \sum_{h \in G} \chi_\varphi(h) \overline{\Gamma}(h) \right) = |G| (\chi_\varphi, \Gamma)_G. \end{aligned}$$

□

ПРЕДЛОЖЕНИЕ 1. *Характеры χ_1, \dots, χ_s всех попарно неэквивалентных неприводимых комплексных представлений конечной группы G образуют ортонормированный базис пространства всех центральных функций из G в \mathbb{C} .*

Доказательство. Как мы уже знаем, система характеров

$$\chi_1, \dots, \chi_s$$

ортонормирована, и ее можно включить в ортонормированный базис пространства центральных функций $X_{\mathbb{C}}(G)$. Пусть Γ — произвольная центральная функция, ортогональная ко всем χ_i :

$$(\chi_i, \Gamma)_G = 0.$$

Тогда по предыдущей лемме линейный оператор $\varphi_{\Gamma}^{(i)}$, отвечающий представлению $\varphi^{(i)}$ с характером χ_i , равен нулю.

По теореме Машке всякое комплексное представление φ можно разложить в прямую сумму

$$\varphi = m_1\varphi^{(1)} + \dots + m_s\varphi^{(s)}$$

неприводимых представлений с некоторыми кратностями m_1, \dots, m_s . В соответствии для этим разложением для оператора φ_{Γ} , определенного соотношением

$$\varphi_{\Gamma} = \sum_{h \in G} \bar{\Gamma}(h)\varphi(h),$$

имеем

$$\varphi_{\Gamma} = m_1\varphi_{\Gamma}^{(1)} + \dots + m_s\varphi_{\Gamma}^{(s)} = 0.$$

В частности, это относится к линейному оператору ρ_{Γ} , где ρ — регулярное представление.

Но в таком случае будем иметь (обозначая временно единичный элемент группы G символом 1, чтобы избежать сочетания e_e)

$$0 = \rho_{\Gamma}(e_1) = \sum_{h \in G} \bar{\Gamma}(h)\rho(h)e_1 = \sum_{h \in G} \bar{\Gamma}(h)e_h \Rightarrow \bar{\Gamma}(h) = 0.$$

Это верно при любом $h \in G$, поэтому $\bar{\Gamma} = 0$ и, следовательно, $\Gamma = 0$. \square

ТЕОРЕМА 1. *Число неприводимых попарно неэквивалентных комплексных представлений конечной группы G равно числу ее классов сопряженных элементов.*

Доказательство. Число классов сопряженности группы G можно интерпретировать как размерность пространства $X_{\mathbb{C}}(G)$ всех центральных функций на группе G . Так как характеры различных неприводимых представлений образуют базис этого пространства, то их ровно искомое число. \square

РАЗМЕРНОСТИ НЕПРИВОДИМЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

ТЕОРЕМА 2. *Каждое неприводимое представление φ_i входит в разложение регулярного представления ρ с кратностью, равной его размерности n_i . Порядок $|G|$ и размерности n_1, \dots, n_r всех ее неприводимых представлений связаны соотношением*

$$\sum_{i=1}^r n_i^2 = |G|.$$

Доказательство. Для доказательства рассмотрим более подробно регулярное представление, введенное в прошлой лекции.

Обозначим его через

$$(\rho, \langle e_g \mid g \in G \rangle_{\mathbb{C}}).$$

Обозначим через R_h матрицу линейного оператора $\rho(h)$ в данном базисе $\{e_g \mid g \in G\}$.

Так как $\rho(h)e_g = e_{hg}$, то все диагональные элементы матрицы R_h при $h \neq e$ равны нулю и $\text{tr } R_h = 0$.

Таким образом,

$$\chi_\rho(e) = |G|, \quad \chi_\rho(h) = 0 \text{ при } h \neq e.$$

Пусть теперь (φ, V) — произвольное неприводимое представление группы G над \mathbb{C} . Как мы помним, кратность вхождения φ в ρ равна скалярному произведению $(\chi_\varphi, \chi_\rho)_G$:

$$\begin{aligned} (\chi_\varphi, \chi_\rho)_G &= \frac{1}{|G|} \sum_{h \in G} \chi_\rho(h) \overline{\chi_\varphi(h)} = \\ &= \frac{1}{|G|} \chi_\rho(e) \overline{\chi_\varphi(e)} = \frac{1}{|G|} |G| \overline{\chi_\varphi(e)} = \dim V. \end{aligned}$$

Таким образом, мы видим, что каждое неприводимое представление входит в регулярное с кратностью, равное своей размерности.

По предыдущей теореме имеется r попарно неэквивалентных неприводимых представлений

$$\varphi_1, \dots, \varphi_r$$

(r — число классов сопряженности группы G), которым соответствуют характеры

$$\chi_1, \dots, \chi_r$$

размерностей

$$n_1, \dots, n_r.$$

Таким образом, мы доказали, что

$$\rho = n_1 \varphi_1 + \dots + n_r \varphi_r,$$

откуда

$$\chi_\rho = n_1 \chi_1 + \dots + n_r \chi_r.$$

В частности,

$$|G| = \chi_\rho(e) = n_1 \chi_1(e) + \dots + n_r \chi_r(e) = n_1^2 + \dots + n_r^2.$$

□

ПРИМЕРЫ

ПРИМЕР 1. Найдем все неприводимые комплексные представления группы диэдра \mathbf{D}_n .

Для начала найдем все одномерные представления.

Коммутант группы \mathbf{D}_n — это подгруппа, порожденная поворотом a для нечетного n , и подгруппа, порожденная поворотом a^2 , — для четного n .

Таким образом, для нечетных n фактор-группа по коммутанту изоморфна \mathbb{Z}_2 , поэтому одномерных представлений ровно два: единичное (все элементы \mathbf{D}_n отображаются в единицу) и такое, что повороты отображаются в единицу, а отражения — в -1 .

Для четных n фактор-группа по коммутанту изоморфна группе \mathbf{V}_4 . Таким образом, имеется четыре одномерных представления:

- единичное;
- такое, что все повороты переходят в 1, а отражения — в -1 ;
- такое, что все четные повороты переходят в 1, нечетные — в -1 отражения вида $a^{2k}b$ — в 1, отражения вида $a^{2k+1}b$ — в -1 ;
- такое, что все четные повороты переходят в 1, нечетные — в -1 отражения вида $a^{2k+1}b$ — в 1, отражения вида $a^{2k}b$ — в -1 .

Теперь построим двухмерное неприводимое представление группы \mathbf{D}_n .

Поворот a переведем в матрицу

$$\begin{pmatrix} \xi_1 & 0 \\ 0 & \xi_1^{-1} \end{pmatrix},$$

где ξ_1 — это некоторый корень из единицы n -й степени (не равный 1 или -1).

Отражение b переведем в матрицу

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Тогда полученное отображение

$$\varphi : \mathbf{D}_n \rightarrow \mathrm{GL}_2(\mathbb{C})$$

является представлением, так как все соотношения на элементы a и b выполняются для образов этих элементов.

Заметим, что мы получили не одно представление, а целый класс представлений:

— если n нечетно, то мы таким способом получим $(n-1)/2$ не эквивалентных друг другу неприводимых двухмерных представлений (так как для двух не равных друг другу и не обратных друг другу корней n -й степени из единицы ξ_1, ξ_2 следы соответствующих матриц различны — $\xi_1 + 1/\xi_1 \neq \xi_2 + 1/\xi_2$);

— если n четно, то получим $(n-2)/2$ не эквивалентных друг другу неприводимых двухмерных представлений (так как представления, для которых $\xi = 1$ или -1 , приводимы).

Сумма квадратов размерностей всех найденных представлений равна порядку группы: для четного $n = 2k$ мы имеем 4 одномерных представления и $k-2$ двухмерных; для нечетного $n = 2k+1$ мы имеем два одномерных представления и k двухмерных.

Значит, мы нашли все неприводимые представления группы \mathbf{D}_n .

ПРИМЕР 2. Теперь найдем все неприводимые представления группы подстановок \mathbf{S}_4 .

Как мы уже знаем (так как коммутант \mathbf{S}_4 — это подгруппа \mathbf{A}_4 индекса два), что у группы \mathbf{S}_4 ровно два одномерных представления: единичное и представление “знак” (четные подстановки переходят в единицу, а нечетные — в -1).

У группы \mathbf{S}_4 пять классов сопряженных элементов, поэтому у данной группы есть три неприводимых представления размерности, большей одного. С другой стороны, размерности n_1, n_2, n_3 этих представлений удовлетворяют соотношению

$$n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 = 22.$$

Ясно, что мы должны найти два трехмерных и одно двухмерное представление.

Двухмерное представление можно построить из следующего общего соображения.

Представим себе, что есть группа G , а у нее имеется нормальная подгруппа H .

Рассмотрим фактор-группу $G_1 = G/H$.

Любое неприводимое представление группы G_1 естественным образом достраивается до неприводимого представления группы G той же размерности: весь смежный класс gH в представлении группы G переходит туда же, куда в исходном представлении группы G' переходил этот же класс как элемент.

Таким образом, у группы \mathbf{S}_4 есть представление, продолженное из ее факторгруппы

$$\mathbf{S}_4/\mathbf{V}_4 \cong \mathbf{S}_3.$$

У группы \mathbf{S}_3 есть два одномерных представления (которые нам уже не нужны, так как мы их рассмотрели выше), а также одно двухмерное представление (описанное в предыдущем примере, так как $\mathbf{S}_3 \cong \mathbf{D}_3$).

Это представление и будет продолжено до двухмерного представления группы \mathbf{S}_4 .

Чтобы найти первое из трехмерных представлений \mathbf{S}_4 , вспомним, что \mathbf{S}_4 — это группа всех движений правильного тетраэдра.

Так как тетраэдр — трехмерная фигура, то движения записываются трехмерными матрицами, откуда следует, что мы получаем трехмерное представление группы \mathbf{S}_4 .

Остается только показать, что данное представление неприводимо.

Действительно, если бы оно было приводимо, то было бы и вполне приводимо, то есть разложилось бы на два представления: двухмерное и одномерное. Это означает, что у представления существовала бы собственная прямая.

Однако у поворота вокруг оси, проходящей через вершину A тетраэдра $ABCD$, перпендикулярно плоскости BCD , инвариантна только эта ось, а у поворота вокруг оси, проходящей через B перпендикулярно

плоскости ACD , единственная собственная прямая — это именно такая ось. Данные прямые не совпадают, откуда следует, что представление неприводимо.

Второе трехмерное неприводимое представление можно получить из того, что \mathbf{S}_4 изоморфно группе собственных движений куба. Данное представление неприводимо и тех же самых соображений, что и в предыдущем случае, при этом оно не может быть эквивалентно предыдущему представлению, так как все матрицы, ему соответствующие, обязательно имеют определитель 1 (так как являются собственными движениями), а при движениях тетраэдра возникают отражения, являющиеся несобственными движениями и имеющими определитель -1 .

УПРАЖНЕНИЕ 1. Пусть даны две конечные группы G_1 и G_2 , для которых известны все их неприводимые представления. Как найти все неприводимые представления группы $G_1 \times G_2$?