

Содержание

1. Коммутативная алгебра с прицелом на алгебраическую геометрию	2
1.1 Предварительные сведения и напоминания	2
1.2 Аффинные алгебраические многообразия	3
1.3 Топология Зарисского на спектре кольца	4
1.4 Словарик алгебраической геометрии	4
1.5 Локализация. Поведение спектра при локализации.	4
1.6 Локализация модуля и плоские модули. Локальный принцип.	6
1.7 Лемма Накаямы	8
1.8 Радикал Джекобсона	9
1.9 Кольца нормирования, кольца дискретного нормирования и Дедекиндовы области	9
1.10 Дедекиндовы кольца	11
1.11 Hauptidealsatz	12
1.12 Пополнения	12
1.13 Градуированные алгебры и модули	14
2. Алгебраическая теория чисел	15
2.1 Алгебраические числа и целые алгебраические числа	15
2.2 След элемента и целый базис кольца \mathcal{O}_K	16
2.3 Размерность кольца целых \mathcal{O}_K	18
2.4 Примеры евклидовых колец целых алгебраических чисел	19
2.5 “Last Fermat’s theorem” для $n = 3$.	20
2.6 Целозамкнутость кольца \mathcal{O}_K	24
2.7 Разложение идеалов в произведение простых в кольцах целых числовых полей	24
2.8 Дискриминант	27
2.9 Норма идеала	31
2.10 Индекс ветвления и степень инерции	32
2.11 Группа классов идеалов и её элементарное вычисление	35
2.12 Дифферента и ветвление	38
2.13 Кольцо целых композита расширений	41
2.14 Теорема Куммера	42
2.15 Первый случай Last Fermat’s theorem	45
2.16 Алгоритм построения целого базиса	50
2.17 Геометрия чисел	51
2.18 Мультипликативная группа кольца целых числового поля	55
2.19 Поле p -адических чисел и лемма Гензеля	61
2.20 Группа квадратов поля \mathbb{Q}_p и норменная группа	64
2.21 Символ Гильберта	67
2.22 Теорема Минковского-Хассе	70
3. Основы теории гомологий	74
3.1 Симплициальные гомологии	74
3.2 Сигнулярные гомологии	76
3.3 Немного гомологической алгебры	77
3.4 Гомотопическая инвариантность гомологий	78
3.5 Относительные гомологии и гомологически точная последовательность пары	80
3.6 Пары Боруска	82
3.7 Относительные гомологии как абсолютные (факторизация)	83
3.8 Вырезание	86
3.9 Точная последовательность Майера-Вьеториса	87
3.10 Гомологии сфер	87
3.11 Гомологии букета и надстройки	88

3.12	Гомологии с коэффициентами	89
3.13	Приложения теории гомологий	89
3.14	Симплициальные комплексы	90
3.15	Эквивалентность симплициальных и сингулярных гомологий	90
3.16	Степень отображения	91
3.17	Клеточные гомологии	93
3.18	Гомологии поверхностей	96
3.19	Пространства Мура	97
3.20	Теорема о вложении дисков и сфер	97
3.21	Когомологии	98
3.22	Формула универсальных коэффициентов для когомологий	99
3.23	Умножение в когомологиях	101
4.	Комплексная алгебраическая геометрия	103
4.1	Комплексные многообразия	103
4.2	Векторные расслоения	105
4.3	Подмногообразия и аналитические подмножества	107
4.4	Когомологии де Рама и Дольбо	108
4.5	Пучки и когомологии	110

1. Коммутативная алгебра с прицелом на алгебраическую геометрию

Замечание. Весь раздел пока что не дописан.

1.1 Предварительные сведения и напоминания

Определение 1. Собственный идеал I в кольце R называется *простым*, если $ab \in I \implies a \in I$ или $b \in I$.

Собственный идеал I в кольце R называется *максимальным*, если он не содержится ни в каком другом собственном идеале.

Простейшие свойства:

1. Для любого собственного идеала существует максимальный идеал, содержащий его.
2. Любой максимальный идеал является простым.
3. Собственный идеал I является простым тогда и только тогда, когда R/I — область целостности.
4. Собственный идеал I является максимальным тогда и только тогда, когда R/I — поле.

Определение 2. Элементы a и b называются *ассоциированными*, если $aR = bR$.

Необратимый элемент $a \in R$ называется *неприводимым*, если из равенства $a = bc$ следует, что или b или c ассоциирован с a .

Элемент называется *простым*, если главный идеал (a) простой.

Замечание. Простой \implies неприводимый. Обратное, вообще говоря, неверно.

Определение 3. Кольцо R называется *нётеровым*, если оно удовлетворяет условию обрыва **возрастающих** цепочек (АСС) для идеалов. Модуль называется *нётеровым*, если он удовлетворяет АСС для подмодулей.

Лемма 1. Следующие условия на кольцо R эквивалентны:

1. R нётерово.
2. Любой идеал в R конечнопорожден.
3. Любой подмодуль конечнопорожденного R -модуля конечнопорожден.
4. Любой конечнопорожденный R -модуль нётеров.

Теорема 1 (Гильберта, о базисе). Кольцо многочленов от конечного числа переменных над нётеровым кольцом нётерово. Иными словами, если R — нётерово кольцо, то любой идеал в кольцо $R[x_1, \dots, x_n]$ порожден конечным числом многочленов.

1.2 Аффинные алгебраические многообразия

Я думаю, что как только я нормально послушаю курс алгебраической, этот параграф будет переписан.

Пусть F — поле, $\mathbb{A}_F^n = F^n$ — аффинное пространство над ним.

Пусть $J \subset A = F[t_1, \dots, t_n]$, обозначим через $V(J)$ множество всех общих нулей всех многочленов из идеала J , то есть

$$V(J) = \{x \in \mathbb{A}_F^n \mid f(x) = 0 \forall f \in J\}.$$

Определение 4. Пусть I — идеал в кольце R . *Радикал* идеала I определяется, как

$$\sqrt{I} \stackrel{\text{def}}{=} \{f \in R \mid \exists n \in \mathbb{N}: f^n \in I\}.$$

Идеал I называется *радикальным*, если он совпадает со своим радикалом.

Замечание. Другими словами, I — радикальный идеал $\Leftrightarrow R/I$ — редуцированное кольцо (т.е. без нильпотентных элементов).

Несложно заметить, что $V(J) = V(AJ)$, где $AJ = \sum_{f \in J} Af$. Действительно, если $f(x) = 0, g(x) = 0$, то $\forall q, p \in F[t_1, \dots, t_n] \quad fq + pg = 0 \Rightarrow V(J) = V(AJ)$. Соответственно, так как $f^m(x) = 0 \Rightarrow f(x) = 0$, мы имеем $V(J) = V(\sqrt{AJ})$, а это говорит нам, что имеет смысл рассматривать только радикальные идеалы.

Определение 5 (Топология зарисского). Определим на \mathbb{A}_F^n *топологию Зарисского*: набором замкнутых множеств будет

$$\{V(J) \subset \mathbb{A}_F^n \mid J \text{ — радикальный идеал в } F[t_1, \dots, t_n]\}.$$

Замкнутые подмножества \mathbb{A}_F^n в этой топологии называют *аффинными алгебраическими многообразиями* (affine algebraic variety).¹

Замечание. Проверим, что это удовлетворяет аксиомам топологии:

- $V(1) = \emptyset$.
- $V(0) = \mathbb{A}_F^n$.
- $V(\bigcup_k J_k) = \bigcap_k V(J_k)$, то есть пересечение замкнутых замкнуто.

Для подмножества $X \subset \mathbb{A}_F^n$ определим $I(X) = \{f \in F[t_1, \dots, t_n] \mid f(x) = 0 \forall x \in X\}$. Легко видеть, что $V(I(X)) = \text{Cl}(X)$ в топологии Зарисского. Совершенно ясно, что $I(X)$ — идеал в кольце $F[t_1, \dots, t_n]$.

Определение 6. *Морфизмом* аффинных алгебраических многообразий $X \subset \mathbb{A}_F^n, Y \subset \mathbb{A}_F^m$ называется полиномиальное отображение $X \rightarrow Y$.

Аффинные многообразия с таким набором морфизмов образуют категорию \mathfrak{Aff} .

Определение 7. Так как $\mathbb{A}_F^1 = F$, морфизмы $X \rightarrow \mathbb{A}_F^1$ — просто какие-то элементы $F[x_1, \dots, x_n]$. Соответственно, морфизмы f и g совпадают, если $f - g \in I(X)$, то есть $\text{Hom}_{\mathfrak{Aff}}(X, \mathbb{A}_F^1) \cong F[t_1, \dots, t_n]/I(X)$. Это кольцо называется *аффинной алгеброй* многообразия X и обозначается $F[X]$.

Так как $\text{Hom}_{\mathfrak{Aff}}(-, \mathbb{A}_F^1)$ является контравариантным функтором, а кольцевые операции определяются на $\text{Hom}_{\mathfrak{Aff}}(X, \mathbb{A}_F^1)$ естественным образом, отображение $X \mapsto F[X]$ определяет контравариантный функтор $\mathfrak{Aff} \rightarrow F\text{-}\mathfrak{Alg}_{fin.gen.}$ — конечнопорожденные редуцированные алгебры.

Построим функтор в обратную сторону. Рассмотрим $R \in F\text{-}\mathfrak{Alg}_{fin.gen.}$ и выберем в ней набор образующих (то есть, выберем эпиморфизм $\pi_R: F[t_1, \dots, t_n] \rightarrow R$). Рассмотрим функтор $\mathcal{X} = \text{Hom}_{F\text{-}\mathfrak{Alg}_{fin.gen.}}(-, R): F\text{-}\mathfrak{Alg}_{fin.gen.} \rightarrow \mathfrak{Set}$.

Множество $\mathcal{X}(A)$ мы можем отождествить с \mathbb{A}_F^n по формуле

$$\varphi \mapsto (\varphi(t_1), \dots, \varphi(t_n)).$$

¹вообще говоря, кажется, что это не вполне правильное определение, так как тут это просто алгебраическое множество, а вот аффинное многообразие — окольцованное пространство. Поговорим об этом позже.

Таким образом, $\mathcal{X}(R)$ вкладывается в \mathbb{A}_F^n при помощи отображения $\psi \mapsto \psi \circ \pi_R$. Кроме того, множество $\mathcal{X}(R) = V(\text{Ker } \pi_R)$ является аффинным алгебраическим многообразием с аффинной алгеброй $F[t_1, \dots, t_n]/I(V(\text{Ker } \pi_R))$. Так мы имеем:

$$\mathcal{X}(F[X]) = \mathcal{X}(A/I(X)) = V(I(X)) = X \quad F[X(R)] = A/I(V(\text{Ker } \pi_R)).$$

Последняя алгебра изоморфна R тогда и только тогда, когда $I(V(J)) = J$, где $R \cong A/J$.

Теорема 2 (Теорема Гильберта о нулях). Пусть $F = F^{alg}$, $J \subset F[t_1, \dots, t_n]$, а $f \in F[t_1, \dots, t_n]$. Тогда $f(V(J)) = 0 \Leftrightarrow f \in \sqrt{RJ}$. Иными словами, $f \in I(V(J)) \Leftrightarrow f \in \sqrt{RJ}$.

Другими словами, теорема Гильберта о нулях говорит нам, что над алгебраически замкнутым полем F аффинные алгебраические многообразия (замкнутые подмножества \mathbb{A}_F^n) взаимно однозначно соответствуют радикальным идеалам в $F[t_1, \dots, t_n]$ и категории $\mathcal{A}ff$ и $F - \mathcal{A}lg_{fin.gen.}$ антиэквивалентны.

Аналогичные рассуждения можно провести и для замкнутых подмножеств аффинного многообразия X и радикальных идеалов его аффинной алгебры $F[X]$. При этом точкам аффинного многообразия X соответствуют максимальные идеалы $F[X]$, то есть, элементы $\text{Specm}(F[X])$.

1.3 Топология Зарисского на спектре кольца

Пусть R — кольцо, $\text{Specm } R$ — его максимальный спектр (множество его максимальных идеалов). Зададим на $\text{Specm } R$ набор замкнутых множеств

$$\tilde{V}(J) \stackrel{\text{def}}{=} \{\mathfrak{m} \in \text{Specm } R \mid \mathfrak{m} \supset J\}, \quad J \subset R.$$

При таком определении топологии X будет гомеоморфно $\text{Specm}(F[X])$ (как мы и отмечали выше, точки соответствуют максимальным идеалам).

В случае незамкнутого поля или бесконечнопорожденных алгебр правильно вместо максимального спектра рассматривать простой спектр. Топология Зарисского на нём определяется следующим образом;

$$J \subset R, \quad V(J) \stackrel{\text{def}}{=} \{\mathfrak{p} \in \text{Spec } R \mid J \subset \mathfrak{p}\}.$$

1.4 Словарик алгебраической геометрии

Геометрия	Алгебра
Замкнутые подмножества X	Идеалы в $F[X]$
Точки X	Максимальные идеалы в $F[X]$
Неприводимые замкнутые подмножества в X	Простые идеалы в $F[X]$
will be upd	will be upd.

1.5 Локализация. Поведение спектра при локализации.

Напомним основные примеры локализаций:

1. Для $s \in R$ можно рассмотреть мультипликативное подмножество $\langle s \rangle = \{s^n \mid n \in \mathbb{N}\}$. Локализация $\langle s \rangle^{-1}R$ называется *главной локализацией* и обозначается R_s .
2. Если \mathfrak{p} — простой идеал кольца R , то $R \setminus \mathfrak{p}$ — мультипликативное подмножество. В этом случае локализация $R_{\mathfrak{p}} \stackrel{\text{def}}{=} (R \setminus \mathfrak{p})^{-1}R$ называется локализацией кольца R в простом идеале \mathfrak{p} .

Определение 8. Кольцо называется *локальным*, если оно имеет ровно один максимальный идеал и *полулокальным*, если максимальных идеалов конечное число.

Если \mathfrak{p} — прсотой идеал, то $R_{\mathfrak{p}}$ — локальное кольцо с единственным максимальным идеалом $\mathfrak{p}R_{\mathfrak{p}}$.

Пусть теперь $\varphi: R \rightarrow A$ — гомоморфизм коолец, тогда он индуцирует следующие отображения на идеалах:

- $\varphi^*: \text{Ideals } A \rightarrow \text{Ideals } R$, $\varphi^*(J) \stackrel{\text{def}}{=} \varphi^{-1}(J)$.
- $\varphi_*: \text{Ideals } R \rightarrow \text{Ideals } A$, $\varphi_*(I) \stackrel{\text{def}}{=} \varphi(I)A$.

Заметим, что так как прообраз простого идеала прост, φ^* можно сузить до отображения $\text{Spec } A \rightarrow \text{Spec } R$.

Лемма 2. Если $I \in \text{Im } \varphi^*$, то $I = \varphi^*(\varphi_*(I))$.

Доказательство. Пусть $I = \varphi^*(J) = \varphi^{-1}(J)$, тогда $\varphi(I) \subseteq J \implies \varphi_*(I) = \varphi(I)A \subseteq JA \subseteq J$. Но тогда $\varphi^*(\varphi_*(I)) \subseteq \varphi^{-1}(J) = I$. С другой стороны, $I \subseteq \varphi^{-1}(\varphi(I)) \subseteq \varphi^*(\varphi_*(I))$. \square

Предыдущее утверждение можно сузить на простые идеалы:

Лемма 3. Пусть $\varphi: R \rightarrow A$ — произвольный гомоморфизм колец. Тогда $\mathfrak{p} \in \varphi^*(\text{Spec } A)$ тогда и только тогда, когда $\mathfrak{p} = \varphi^*(\varphi_*(\mathfrak{p}))$.

Теперь посмотрим на поведение спектра кольца при локализации. Пусть $\lambda: R \rightarrow S^{-1}R$ — локализационный гомоморфизм.

Лемма 4. $\lambda_* \circ \lambda^* = \text{id}$. Следовательно, λ^* инъективно, а λ_* — сюръективно.

Доказательство. Пусть $I \subseteq S^{-1}R$, тогда ясно, что $\lambda_*(\lambda^*(I)) \subset I$. Действительно,

$$\lambda_*(\lambda^*(I)) = \lambda(\lambda^{-1}(I))S^{-1}R \subset IS^{-1}R \subset I.$$

Теперь докажем включение в другую сторону. Пусть $\frac{r}{s} \in I$, тогда $s \cdot \frac{r}{s} = \frac{r}{1} \in I \supset \lambda(\lambda^{-1}(I)) \implies \frac{r}{1} \in \lambda(\lambda^{-1}(I)) \implies \frac{r}{1} \cdot \frac{1}{s} \in \lambda(\lambda^{-1}(I))S^{-1}R = \lambda_*(\lambda^*(I))$. \square

Следствие 1. Локализация нётерова кольца нётерова.

Доказательство. Действительно, по предыдущей лемме $J = \lambda_*(\lambda^*(J)) = \lambda_*(I) = \lambda(I)S^{-1}R$, а так как I — конечнопорождён, $\lambda(I)S^{-1}R$ — конечнопорождён. \square

Лемма 5. Идеал $I \trianglelefteq R$ лежит в образе λ^* (т.е. является прообразом какого-то идеала из локализации) тогда и только тогда, когда образ S в R/I не содержит делителей нуля.

Доказательство. Итак, как мы помни, $I \in \text{Im } \lambda^* \Leftrightarrow I = \lambda^*(\lambda_*(I))$. Пусть ρ — гомоморфизм факторизации $R \rightarrow R/I$. Пусть для некоторых $r \in R$, $s \in S$ $\rho(r)\rho(s) = 0$. Тогда $\rho(rs) = 0 \implies rs = j \in I$. Тогда $\frac{r}{1} = \frac{\lambda(j)}{s} \in \lambda_*(I) \implies r \in \lambda^*(\lambda_*(I)) = I \implies \rho(r) = 0$, то есть $\rho(s)$ — не делитель нуля.

Пусть $r \in \lambda^*(\lambda_*(I)) \setminus I$. Тогда мы можем его представить в виде $\lambda(r) = \lambda(j)\frac{t}{s}$, $t \in R$, $s \in S$, $j \in I$. Но тогда $\exists s' \in S: rss' = jts' \implies \rho(r)\rho(ss') = \rho(j)\rho(ts') = 0$, а так как $\rho(r) \neq 0$ по предположению, $\rho(ss')$ — делитель нуля. \square

Отсюда мы получаем такое следствие.

Следствие 2. Отображение $\lambda^*: \text{Spec } S^{-1}R \rightarrow \text{Spec } R$ инъективно, а его образ равен множеству простых идеалов, не пересекающихся с S .

Сужение λ_* на множество простых идеалов R , не пересекающихся с S , инъективно.

Таким образом, λ^* и λ_* — взаимнообратные биекции между $\text{Spec } S^{-1}R$ и множеством простых идеалов кольца R , не пересекающихся с S .

Применяя это к главной локализации $\langle s \rangle$, мы получаем, что $\text{Im } \lambda^* = \text{Spec } R \setminus V(s)$ — открытое подмножество, а $\{\text{Spec } R_s \mid s \in R\}$ — база топологии Зарисского.

Определение 9. Пусть $I \trianglelefteq R$ — идеал в кольце R . Его радикалом называется

$$\sqrt{I} \stackrel{\text{def}}{=} \{x \in R \mid \exists n: x^n \in I\}.$$

Нильпотентным радикалом кольца R называется $\text{NRad}(R) = \sqrt{0}$ — множество всех нильпотентных элементов кольца R .

Теорема 3. Пусть $I \trianglelefteq R$. Тогда \sqrt{I} равен пересечению всех простых идеалов, содержащих I , то есть

$$\sqrt{I} = \bigcap_{\mathfrak{p} \in \text{Spec } R, \mathfrak{p} \supset I} \mathfrak{p}.$$

В частности, нильпотентный радикал равен пересечению всех простых идеалов кольца R .

Доказательство. Начнём с того, что если $\mathfrak{p} \supset I$, то $\mathfrak{p} \supset \sqrt{I}$, так как если $x \in \sqrt{I}$, то для некоторого n мы имеем $x^n \in I \implies x^n = x \cdot \dots \cdot x \in \mathfrak{p} \implies x \in \mathfrak{p}$. То есть, радикал \sqrt{I} идеала I содержится в любом простом идеале \mathfrak{p} , содержащем сам I .

Пусть сначала $I = 0$, т.е. Возьмём

$$f \in \bigcap_{\mathfrak{p} \in \text{Spec } R} \mathfrak{p}$$

Тогда из предыдущего следствия $\text{Spec } R_f = \emptyset$, так как с $\langle f \rangle$ пересекаются все простые идеалы. Отсюда $R_f = 0$. Но тогда мы имеем равенство

$$\frac{1}{1} = \frac{0}{1} \implies \exists n: f^n = 0.$$

Теперь рассмотрим для произвольного идеала I каноническую проекцию $\rho: R \rightarrow R/I$. Заметим, что

$$\rho^{-1}(\text{NRad}(R/I)) = \sqrt{I}.$$

В самом деле, $\rho(y) = x \in \text{NRad}(R/I) \Leftrightarrow \exists n: \rho(y^n) = x^n = 0 \text{ в } R/I \Leftrightarrow \rho^{-1}(y)^n \in I$.

Теперь вспомним, что при эпиморфизме прообраз простого идеала прост, то есть $\rho^{-1}(\mathfrak{p})$ — простой идеал $\forall \mathfrak{p} \in \text{Spec}(R/I)$. Ну и кроме того, он содержит I (так как содержит 0). Тогда мы имеем такую цепочку включений:

$$\sqrt{I} \subset \bigcap_{I \subset \mathfrak{q} \in \text{Spec } R} \mathfrak{q} \subset \bigcap_{\mathfrak{p} \in \text{Spec } R/I} \rho^{-1}(\mathfrak{p}) = \rho^{-1}\left(\bigcap_{\mathfrak{p} \in \text{Spec } R/I} \mathfrak{p}\right) = \rho^{-1}(\text{NRad}(R/I)) = \sqrt{I}.$$

□

1.6 Локализация модуля и плоские модули. Локальный принцип.

Пусть M — R -модуль, а S — мультипликативное подмножество в R .

Определение 10. Множество $M \times S / \sim$, где $(m, s) \sim (m', s') \Leftrightarrow \exists s'' \in S: ms's'' = m'ss''$ с естественно заданными операциями называется *локализацией модуля M в S* .

Лемма 6. $S^{-1}M \cong M \otimes_R S^{-1}R$.

Доказательство. Рассмотрим отображение $\varphi: S^{-1}M \rightarrow M \otimes_R S^{-1}R$, заданное как

$$\frac{m}{s} \mapsto m \otimes \frac{1}{s}.$$

Ясно, что это сюръективный и инъективный гомоморфизм модулей.

□

Определение 11. Модуль называется *плоским*, если тензорное домножение на него — точный функтор.

Предложение 1. Локализация $S^{-1}R$ плоска, как R -модуль.

Доказательство. Ясно, что достаточно показать, что оно переводит мономорфизмы в мономорфизмы (т.к. точность справа есть всегда).

Пусть $\varphi: M \rightarrow N$ — мономорфизм R -модулей. Рассмотрим

$$\varphi_S: S^{-1}M = M \otimes S^{-1}R \rightarrow N \otimes S^{-1}R = S^{-1}N.$$

Тогда $\varphi_S\left(\frac{m}{s}\right) = 0 \Leftrightarrow \frac{\varphi(m)}{s} = 0 \Leftrightarrow \exists s' \in S: s'\varphi(m) = 0$. Тогда $\varphi(s'm) = 0$, а так как φ инъективен, отсюда $s'm = 0 \implies \frac{m}{s} = 0$.

□

Следствие 3. Локализация модуля сохраняет ядра, коядра и конечные пересечения подмодулей.

Доказательство. Тензорное умножение на $S^{-1}R$ является точным функтором, а точный функтор всегда сохраняет ядра и коядра.

Рассмотрим пересечение $\bigcap_{i=1}^n M_i \subset M$. Тогда

$$\bigcap_{i=1}^n M_i = \text{Ker} \left(M \rightarrow \bigoplus_{i=1}^n M/M_i \right),$$

а ядра, как мы уже убедились, локализация сохраняет. \square

Лемма 7. Отображение

$$M \rightarrow \prod_{\mathfrak{m} \in \text{Specm } R} M_{\mathfrak{m}}$$

инъективно.

Доказательство. Пусть есть $m \in M$ такой, что $m \mapsto 0$. Это означает, что $\forall \mathfrak{m} \in \text{Specm } R \exists s \in S = R \setminus \mathfrak{m}$ (т.е. $s \notin \mathfrak{m}$): $sr = 0$. Напомним такое определение:

Определение 12. Пусть M — R -модуль, $N \subset M$. Тогда аннулятор N определяется как

$$\text{Ann}(N) \stackrel{\text{def}}{=} \{r \in R \mid rn = 0 \forall n \in N\}.$$

Замечание. Если $N \leq M$, то $\text{Ann}(N)$ — идеал в R .

Так вот, предыдущее равенство означает, что $s \in \text{Ann}(r) \setminus \mathfrak{m}$. Но так как $\text{Ann}(r)$ — идеал, а мы имеем такое для любого максимального идеала \mathfrak{m} , это означает, что $\text{Ann}(r) = R$, откуда $r = 0$. \square

Свойство \mathfrak{P} для R -модулей называется *локальным*, если

$$\mathfrak{P}(M) \Leftrightarrow \forall \mathfrak{p} \in \text{Spec } R \quad \mathfrak{P}(M_{\mathfrak{p}}).$$

Теорема 4. Следующие свойства модулей и их гомоморфизмов являются локальными:

1. $M = 0$.
2. φ — инъективен, φ — сюръективен.
3. M — плоский.
4. M — проективный.

Доказательство. Вообще говоря, во всех этих свойствах достаточно пользоваться $\text{Specm } R$.

(1.) В одну сторону очевидно, докажем в другую. Пусть $M_{\mathfrak{m}} = 0 \forall \mathfrak{m} \in \text{Specm } R$. Тогда нужно сделать примерно то же самое, что мы уже делали в доказательстве предыдущего утверждения. Условие выше означает, что $\forall x \in M \exists s \in R \setminus \mathfrak{m} : sx = 0$, откуда следует, что $\text{Ann}(x) \not\subset \mathfrak{m} \forall \mathfrak{m} \in \text{Specm } R$, а аннулятор элемента — идеал кольца R . Значит, $\text{Ann}(x) = R \implies x = 0$.

(2.) В одну сторону это будет выполнено просто в силу того, что локализация плоская. Докажем теперь в другую сторону. Пусть $\forall \mathfrak{m} \in \text{Specm } R \varphi_{\mathfrak{m}} : M_{\mathfrak{m}} \rightarrow N_{\mathfrak{m}}$ инъективен. Так как локализация сохраняет ядра, это означает, что

$$\forall \mathfrak{m} \in \text{Specm } R \quad \text{Ker}(\varphi_{\mathfrak{m}}) = \text{Ker}(\varphi)_{\mathfrak{m}} = 0.$$

Т.е. $\forall \mathfrak{m} \in \text{Specm } R \text{Ker}(\varphi)_{\mathfrak{m}} = 0$. Тогда по пункту (1.) мы имеем $\text{Ker}(\varphi) = 0$. Для сюръективности нужно совершенно аналогично доказать, что коядро будет нулевым.

(3.) Заметим, что если M — плоский, то так как $R_{\mathfrak{m}}$ — плоский,

$$M \otimes R_{\mathfrak{m}} = M_{\mathfrak{m}}$$

тоже будет плоским.

Теперь докажем в обратную сторону. Надо доказать, что если функтор $_{_} \otimes M_{\mathfrak{m}}$ точен $\forall \mathfrak{m} \in \text{Specm } R$, то функтор $_{_} \otimes M$ будет точным. Так как достаточно проверять, что моно переходит в моно, можно просто воспользоваться пунктом (2). \square

Лемма 8. Для любого $\mathfrak{p} \in \text{Spec } R \quad M_{\mathfrak{p}} \neq 0 \Leftrightarrow \text{Ann}(M) \leq \mathfrak{p}$.

1.7 Лемма Накаямы

Пусть $I \subset R$ — идеал, M — конечнопорожденный R -модуль.

Из базового курса алгебры мы знаем такой факт:

Теорема 5 (Гамильтона-Кэли). Пусть $A \in M_n(R)$, где R — коммутативное кольцо. Тогда $\chi_A(A) = 0$.

Докажем теперь некоторое его обобщение.

Теорема 6 (Гамильтона-Кэли). Пусть $\varphi \in \text{End}(M)$ такой, что $\text{Im } \varphi \subset IM$. Тогда существует многочлен $p(t) = t^n + \alpha_{n-1}t^{n-1} + \dots + \alpha_0$ такой что:

- $\alpha_i \in I^{n-i}$.
- $p(\varphi) = 0$.

Доказательство. Пусть у модуля M есть n образующих, тогда есть сюръективное отображение $R^n \twoheadrightarrow M$ (а значит и $IR^n \twoheadrightarrow IM$) и вообще есть следующая коммутативная диаграмма:

$$\begin{array}{ccc} R^n & \xrightarrow{\psi} & IR^n \\ \downarrow f & & \downarrow g \\ M & \xrightarrow{\varphi} & IM \end{array}$$

Верхняя стрелка ψ есть из универсального свойства свободного модуля. Так как каждый базисный элемент переходит в элемент с коэффициентами из I , $\psi \in M_n(I)$. Положим $p = \chi_\psi$. Тогда, так как f — сюръективно, $\forall m \in M \exists x: f(x) = m$. Тогда:

$$p(\varphi)(m) = p(\varphi)(f(x)) = p(\psi)(g(x)) = 0 \implies p(\varphi) = 0.$$

□

Теорема 7 (Лемма Накаямы). Пусть $M = IM$. Тогда $\exists a \in M: \forall m \in I \quad am = m$

Доказательство. $\text{id}_M(M) = IM \implies$, а значит, по теореме Гамильтона-Кэли $\exists p(t) = t^n + \alpha_{n-1}t^{n-1} + \dots + \alpha_0$, $\alpha_i \in I: p(\text{id}_M) = 0$. Тогда

$$\text{id}_M(1 + \alpha_{n-1} + \dots + \alpha_0) = 0 \implies \text{id}_M(-(\alpha_{n-1} + \dots + \alpha_0)) = 1.$$

Тогда $a = -(\alpha_{n-1} + \dots + \alpha_0)$ подходит. В самом деле,

$$am = \text{id}_M(m) = m \quad \forall m \in M.$$

□

Следствие 4. Если $\varphi \in \text{End}(M)$ и φ — эпиморфизм, то φ — изоморфизм.

Доказательство. Определим действие $R[t]$ на M при помощи гомоморфизма θ :

$$\theta: R[t] \rightarrow \text{End}(M) \quad \theta(t) = \varphi.$$

Так как φ — эпиморфизм, $tR[t]M = M$.

Тогда по лемме Накаямы существует $f \in (t) = tR[t]$ такой, что $fm = m \quad \forall m \in M$. Запишем $f = tg$ для некоторого $g \in R[t]$ и спроектируем результат в $\text{End}(M)$:

$$tg(t) \cdot m = m \implies \varphi(g(\varphi)(m)) = m \Leftrightarrow \varphi \circ g(\varphi) = \text{id}.$$

Но, по определению, $g(\varphi) = \varphi(g)$, тогда

$$g(\varphi)(\varphi(m)) = m,$$

$g(\varphi)$ — обратный к φ .

□

1.8 Радикал Джекобсона

Кольцо R , рассматриваемое, как модуль над собой, называется *регулярным R -модулем*.

Определение 13. Аннулятором R -модуля M называется множество $\{r \in R \mid rM = 0\}$.

Лемма 9. Ненулевой простой R -модуль M изоморфен R/\mathfrak{m} для некоторого $\mathfrak{m} \in \text{Spec } R$. Таким образом, $\text{Ann } M$ является максимальным идеалом кольца R .

Доказательство. □

1.9 Кольца нормирования, кольца дискретного нормирования и Дедекиндовы области

Определение 14. Пусть R — область целостности, F — её поле частных. R называется *кольцом нормирования*, если $R \cup (R \setminus 0)^{-1} = F$. То есть, $\forall x \in F$ либо $x \in R$, либо $x^{-1} \in R$.

Пример 1. Например, кольцами нормирования являются $\mathbb{Z}_{(p)}$, \mathbb{Z}_p , $F[[x]]$.

Определение 15. Пусть F — поле, а функция $v: F^* \rightarrow \Gamma$, где Γ — линейно упорядоченная абелева группа, гомоморфизм, т.е. $v(ab) = v(a) + v(b)$, причём выполнено $v(a + b) \geq \min(v(a), v(b))$ называется *нормированием*.

Если v действует в \mathbb{Z} и сюръективна, то её называют *дискретным нормированием* на F .

Следующая теорема устанавливает связь между нормированием на поле и кольцами нормирования.

Теорема 8. 1. Пусть v — нормирование на F , тогда $R \stackrel{\text{def}}{=} \{x \in F \mid v(x) \geq 0\}$ — кольцо нормирования.
2. Если R — кольцо нормирования с полем частных F , то можно положить $\Gamma = F^*/R^{*2}$ и задать на ней порядок следующим образом:

$$aR^* \geq bR^* \Leftrightarrow ab^{-1} \in R.$$

и задать $v: F^* \rightarrow F^*/R^*$. Тогда такое v будет нормированием.

3. Процедуры из пунктов (1) и (2) взаимнообратны с точностью до изоморфизма на $\text{Im } v$ (как упорядоченных групп).

Доказательство. Докажем сначала (1):

$$v(x) + v(x^{-1}) = 0 \implies v(x) \geq 0 \text{ или } v(x^{-1}) \geq 0 \Leftrightarrow x \in R \text{ или } x^{-1} \in R.$$

Теперь докажем (2). Действительно, если R — кольцо нормирования, то либо $ab^{-1} \in R$, откуда $v(a) \geq v(b)$, либо $a^{-1}b \in R$, откуда $v(b) \geq v(a)$, то есть на $\Gamma = F^*/R^*$ порядок будет линейным. Кроме того,

$$\begin{cases} v(a) \geq v(b) \\ v(b) \geq v(a) \end{cases} \Leftrightarrow ab^{-1} \in R^* \Leftrightarrow aR^* = bR^* \Leftrightarrow v(a) = v(b),$$

что показывает антисимметричность.

Кроме того, $v(a + b) \geq v(a)$, либо $v(a + b) \geq v(b)$, откуда

$$\frac{a+b}{a} = 1 + \frac{b}{a} \in R, \text{ либо } \frac{a+b}{b} = 1 + \frac{a}{b} \in R.$$

Доказательство взаимной обратности остается в качестве простого **упражнения**. □

²в аддитивной записи. . .

Предложение 2. Пусть R — кольцо нормирования, тогда R — локально и целозамкнуто.

Доказательство. Положим $\mathfrak{m} \stackrel{\text{def}}{=} \{a \in R \mid v(a) > 0\}$. Ясно, что $\forall x \in R, a \in \mathfrak{m} \ v(ax) = v(a) + v(x) \geq v(a) > 0$ и $\forall a, b \in \mathfrak{m} \ v(a+b) \geq \min(v(a), v(b)) > 0$, что показывает нам, что \mathfrak{m} — идеал. Все остальные элементы имеют нормирование, равное нулю, и поэтому они обратимы (просто по определению), значит \mathfrak{m} — единственный максимальный идеал кольца R .

Теперь докажем целозамкнутость. Действительно, пусть $a \in F$

$$\begin{aligned} a^n + r_{n-1}a^{n-1} + \dots + r_0 = 0, \ r_i \in R &\implies a^n = r'_{n-1}a^{n-1} + \dots + r'_0 \implies v\left(\sum_{i=1}^{n-1} r'_i a^i\right) \geq \\ &\geq \min v(r'_i a^i) \geq \min v(a^i) = \min(i \cdot v(a)) \implies v(a) \geq 0 \implies a \in R. \end{aligned}$$

□

Предложение 3. Пусть R — кольцо дискретного нормирования с нормированием R . Тогда

1. $R \setminus \{0\} \cong R^* \times \langle \pi \rangle^3$
2. $\text{Ideals}(R) = \{0, R, \pi^n R, \text{ где } n \in \mathbb{N}\}$.
3. $\text{Spec } R = \{0, \pi R\}$.
4. $\text{Specm } R = \{\pi R\}$.

Доказательство. Докажем сначала (1). Возьмём $\pi: v(\pi) = 1$ (мы можем так сделать, так как дискретное нормирование сюръективно). Возьмём $a \in R, v(a) = n \in \mathbb{Z} \implies v(a\pi^{-n}) = 0 \Leftrightarrow a\pi^{-n} \in R^* \Leftrightarrow a \in \pi^n R$ (причем очевидно, что такое представление единственно).

Рассмотрим $I \in \text{Ideals}(R)$, возьмём $n = \min_{a \in I} v(a) = v(b) = v(\pi^n \alpha)$, где $\alpha \in R^*$, а значит, $\forall c \in I: c = \pi^k \beta, k \geq n \implies c \in \pi^n R$. □

Лемма 10. Пусть R — нётерова область целостности, $\mathfrak{m} \in \text{Specm } R, \mathfrak{m} \neq 0$, тогда $\mathfrak{m}^k \neq \mathfrak{m}^{k+1} \ \forall k \in \mathbb{N}$.

Доказательство. Рассмотрим $\mathfrak{m}^k / \mathfrak{m}^{k+1}$ — векторное пространство над R/\mathfrak{m} . Тогда

$$\mathfrak{m}^k / \mathfrak{m}^{k+1} \otimes_R R_{\mathfrak{m}} \cong (\mathfrak{m}R_{\mathfrak{m}})^k / (\mathfrak{m}R_{\mathfrak{m}})^{k+1} = 0 \implies \mathfrak{m}R_{\mathfrak{m}}(\mathfrak{m}^k R_{\mathfrak{m}}) = (\mathfrak{m}^k R_{\mathfrak{m}}) \implies \mathfrak{m}^k R_{\mathfrak{m}} = 0 \implies \mathfrak{m} = 0.$$

В предпоследнем переходе мы используем лемму Накаямы (там конечнопорожденный модуль $\mathfrak{m}^k R_{\mathfrak{m}}$ умножается на $\mathfrak{m}R_{\mathfrak{m}} = \text{Rad}(R_{\mathfrak{m}})$). □

Теорема 9. Пусть R — область целостности. Тогда следующие условия эквивалентны:

1. R — кольцо дискретного нормирования.
2. R — нётерово локальное целозамкнутое кольцо размерности Крулля 1.
3. R — локальное нётерово неполе, в котором максимальный идеал главный.
4. R — факториальное кольцо с единственным (с точностью до ассоциированности) неприводимым элементом.
5. Локальное неполе, идеалы которого имеют вид $\text{Ideals}(R) = \{0, \mathfrak{m}^k \mid k \in \mathbb{N}_0\}$

Доказательство. (1) \implies (2) мы уже по сути доказали в утверждении 3. Докажем теперь (2) \implies (3). Мы знаем, что $\text{Specm } R = \{\mathfrak{m}\}$, возьмём $a \in \mathfrak{m} \setminus \mathfrak{m}^2$ по лемме 10. Рассмотрим $aR \subset \mathfrak{m}$. Из примарного разложения aR следует, что aR — \mathfrak{m} -примарный. Тогда существует $k: \mathfrak{m}^k \subset aR \subset \mathfrak{m}$, выберем наименьшее из таких k . Теперь заметим, что

$$b \in \mathfrak{m}^{k-1} \setminus aR \Leftrightarrow \frac{b}{a} \in \frac{\mathfrak{m}^{k-1}}{a}$$

Дописать этот кусок.

(3) \implies (4) : Возьмём $\pi \in R$ — неприводимый, тогда $\pi \in \mathfrak{m} = aR$, а значит, π — ассоциирован с a . □

³тут имеется в виду изоморфизм моноидов.

1.10 Дедекиндовы кольца

Предложение 4. Пусть R — нётерова одномерная область целостности. Тогда следующие условия эквивалентны:

1. R целозамкнуто.
2. Любой примарный идеал имеет вид \mathfrak{m}^k для некоторого $\mathfrak{m} \in \text{Specm } R$.
3. $\forall \mathfrak{m} \in \text{Specm } R$ кольцо $R_{\mathfrak{m}}$ — кольцо дискретного нормирования.

Доказательство. (1) \Leftrightarrow (3) просто в силу того, что целозамкнутость — локальное свойство и теоремы 9. Ну и, в силу того, что $R_{\mathfrak{m}}$ — нётеровы одномерные локальные.

(3) \Rightarrow (2) : В таком кольце любой ненулевой примарный идеал I является \mathfrak{m} -примарным, а такие однозначно соответствуют примарным идеалам локализации $R_{\mathfrak{m}}$. Так как $R_{\mathfrak{m}}$ — DVR, там все примарные идеалы имеют вид $\mathfrak{m}^n R_{\mathfrak{m}}$ (так как $R_{\mathfrak{m}}$ — локальное кольцо с единственным максимальным идеалом $\mathfrak{m} R_{\mathfrak{m}}$), а λ_* — биекция на множестве примарных идеалов, не пересекающихся с мультипликативным подмножеством (которое тут $R \setminus \mathfrak{m}$, да), мы имеем $\lambda_*(I) = \lambda_*(\mathfrak{m}^n) \Rightarrow I = \mathfrak{m}^n$.

(2) \Rightarrow (3) : Любой идеал в $R_{\mathfrak{m}}$ имеет примарное разложение \Rightarrow является примарным. $\lambda^*(J) - \mathfrak{m}$ -примарный $\Rightarrow \lambda^*(J) = \mathfrak{m}^n \Rightarrow \lambda_*(\lambda^*(J)) = \lambda_*(\mathfrak{m}^n) = (\mathfrak{m} R_{\mathfrak{m}})^n$, откуда по теореме 9 $R_{\mathfrak{m}}$ — кольцо дискретного нормирования. \square

Определение 16. Кольца, удовлетворяющие условию 4 называют *дедекиндовыми*.

Теорема 10. Пусть Z — Дедекиндово кольцо, Q — его поле частных, F/Q — конечное расщирение (полей), а $R = \text{Int}_F Z$. Тогда R — дедекиндово.

Доказательство. Так как R — целое замыкание, $\dim R = 1$. Так как F — конечное расщирение, $\forall \alpha \in F$ является корнем многочлена

$$\alpha^n + \frac{a_{n-1}}{b_{n-1}} \alpha^{n-1} + \dots + \frac{a_0}{b_0} = 0, \quad a_i, b_i \in \mathbb{Z} \Rightarrow b \alpha^n + c_{n-1} \alpha^{n-1} + \dots + c_0 = 0 \Rightarrow (b\alpha)^n + d_{n-1} (b\alpha)^{n-1} + \dots + d_0 = 0$$

Значит, $b\alpha \in R$, откуда $\alpha \in (Z \setminus 0)^{-1} R$.

Так как F — поле частных R , R целозамкнуто. Для дедекиндовости нам не хватает Нётеровости.

Рассмотрим F , как векторное пространство над Q . Рассмотрим оператор

$$m_{\alpha} \in \text{End}_{Q\text{-mod}}(F), \quad m_{\alpha}(x) = \alpha x.$$

Далее доказательство приводится только для случая сепарабельного расщирения. Так вот, если расщирение сепарабельно, $\exists \alpha \in F: \text{Tr } m_{\alpha} \neq 0$. Рассмотрим невырожденную билинейную форму $B(x, y) = \text{Tr } m_{xy}: F \times F \rightarrow Q$.

Возьмём базис u_1, \dots, u_n — базис F над Q (можно полагать, что $u_i \in R$) и v_1, \dots, v_n — двойственный базис относительно B . Возьмём $x \in F$, тогда

$$x = \sum_{k=1}^n B(x, u_k) v_k.$$

$x \in R$, $u_k \in R$, тогда $xu_k \in R$, а значит, его минимальный многочлен над Q имеет коэффициенты из Z (была такая теорема, надо найти и вставить ссылку). В то же время ясно, что минимальный многочлен xu_k равен минимальному многочлену эндоморфизма m_{xu_k} . Собственные числа m_{xu_k} — это корни минимального многочлена, а они являются целыми над Z , следовательно и их сумма (с учетом кратности) — целая над Z , а это в точности след. Значит, R — подмодуль конечнопорожденного Z -модуля, а значит, так как Z — дедекиндово, R конечнопорождено, как Z -модуль $\Rightarrow R$ — нётерово. \square

В случае $Z = \mathbb{Z}$, кольцо R называется дедекиндовым кольцом *арифметического типа* или *кольцом целых числового поля*. В случае $Z = K[t]$ кольцо R называется дедекиндовым кольцом *функционального типа*.

1.11 Hauptidealsatz

Определение 17. Пусть I — идеал. Тогда его *высота* $h(I)$ — длина наибольшей цепочки вложенных в него простых идеалов.

Теорема 11 (Крулль, о высоте). Пусть $x \in R$ — нётерово коммутативное кольцо с единицей, \mathfrak{p} — минимальный простой идеал, содержащий $(x) = xR$. Тогда $h(\mathfrak{p}) \leq 1$.

Доказательство. Во-первых, условие теоремы располагает к замене R на $R_{\mathfrak{p}}$, т.е. далее будем считать, что R — локально с единственным максимальным идеалом \mathfrak{p} . Так что \mathfrak{p} — единственный минимальный простой, содержащий xR , а xR — \mathfrak{p} -примарным, откуда $\dim(R/xR) = 0$. Значит, R/xR — нульмерное нётерово, то есть Артиново. Действительно, $\sqrt{xR} = \mathfrak{p} \implies \exists n \in \mathbb{N}: \mathfrak{p}^n = xR$, откуда $(\mathfrak{p}/xR)^n = 0$. Значит, если $\mathfrak{p}' \in \operatorname{Spec} R/xR$, то

$$(\mathfrak{p}/xR)^n \subset \mathfrak{p}' \subset \mathfrak{p}/xR \implies \mathfrak{p}/xR \subset \mathfrak{p}' \subset \mathfrak{p}/xR.$$

Определение 18. Пусть $\mathfrak{q} \in \operatorname{Spec} R$, $\lambda = \lambda_{\mathfrak{q}}: R \rightarrow R_{\mathfrak{q}}$. Тогда *символическая степень* идеала \mathfrak{q} используется, как

$$\mathfrak{q}^{(n)} \stackrel{\text{def}}{=} \lambda^*(\lambda_*(\mathfrak{q}^n)).$$

Лемма 11. Идеал $\mathfrak{q}^{(n)}$ — примарный.

Доказательство. $\lambda_*(\mathfrak{q}) \in \operatorname{Spec} R_{\mathfrak{q}} \implies \lambda_*(\mathfrak{q}^n) = \lambda_*(\mathfrak{q})^n$ — примарный, а λ^* отображает примарные в примарные. \square

Пусть $\bar{\cdot}: R \rightarrow R/xR$ — канонический гомоморфизм. Рассмотрим в R/xR такую убывающую цепочку идеалов:

$$\bar{\mathfrak{q}} \supset \bar{\mathfrak{q}}^{(2)} \supset \dots \supset \bar{\mathfrak{q}}^{(n)} = \bar{\mathfrak{q}}^{n+1},$$

так как R/xR — артиново. Возьмём $\mathfrak{q}^{(n)} \ni z = y + xr$, $y \in \mathfrak{q}^{(n+1)}$, $r \in R$. Тогда $xr\mathfrak{q}^{(n)}$ и $x \notin \mathfrak{q} = \sqrt{\mathfrak{q}^{(n)}}$. Тогда отсюда следует, что $r \in \mathfrak{q}^{(n)}$.

Теперь $\mathfrak{q}^{(n)} = \mathfrak{q}^{(n+1)} + x \cdot \mathfrak{q}^{(n)}$. Тогда в $R/\mathfrak{q}^{(n+1)}$ мы имеем $\widetilde{x\mathfrak{q}^{(n)}} = \widetilde{\mathfrak{q}^{(n)}}$, $\widetilde{x} \in \operatorname{Rad} R/\mathfrak{q}^{(n+1)}$ и тогда по лемме Накаямы $\mathfrak{q}^{(n)} = 0$.

Значит, $\mathfrak{q}^{(n)} = \mathfrak{q}^{(n+1)} \implies \lambda^*(\lambda_*(\mathfrak{q}^n)) = \lambda^*(\lambda_*(\mathfrak{q}^{n+1})) \implies \lambda_*(\mathfrak{q})^n = \lambda_*(\mathfrak{q})^n \cdot \lambda_*(\mathfrak{q})$, а $\lambda_*(\mathfrak{q}) \subset \operatorname{Rad}(R_{\mathfrak{q}})$ и тогда опять же по лемме Накаямы мы имеем $\lambda^*(\mathfrak{q}^n) = 0$.

Значит, $\operatorname{Spec} R_{\mathfrak{q}} = \{\mathfrak{q}\} \implies$ в R нет простых, содержащихся в $\mathfrak{q} \implies h(\mathfrak{q}) = 0 \implies h(\mathfrak{p}) \leq 1$. \square

1.12 Пополнения

Пусть A — абелева группа с убывающей фильтрацией

$$A \supset A_0 \supset A_1 \supset \dots \supset A_n \supset$$

A можно сделать топологической группой, взяв в качестве базы окрестностей нуля $\{A_n\}$. В нашем случае A обычно будет кольцом или модулем, а фильтрация будет степенями идеала.

Ясно, что если $0 \neq a \in \bigcap A_i$, то её отделить от остальных не получится. Соответственно, можно просто декларировать, что топология, заданная этой фильтрацией Хаусдорфова тогда и только тогда, когда

$$\bigcap_i A_i = 0.$$

Также заметим, что в этой топологии каждая A_i будет не только открытой, но и замкнутой, так как все их сдвиги $x + A_i$ открыты, значит все смежные классы открыты и достаточно перейти к дополнению всех, кроме одного, откуда мы получим, что этот один смежный класс $y + A_j$ замкнут, следовательно A_j замкнуто.

Возьмём теперь пополнение по этой топологии. А именно, возьмём прямой предел по следующей последовательности:

$$\dots \xrightarrow{\theta_2} A/A_2 \xrightarrow{\theta_1} A/A_1 \xrightarrow{\theta_0} A/A_0, \quad \widehat{A} \stackrel{\text{def}}{=} \varprojlim A/A_n.$$

Определение 19. Соответственно, *пополнением* A в топологии, связанной с фильтрацией $\{A_n\}$ называется определённое выше \widehat{A} .

Пример 2. Например, $\mathbb{Z}_p = \varprojlim \mathbb{Z}/p^k\mathbb{Z}$ или $F[[t]] = \varprojlim F[t]/(t)^n$.

Говорят, что фильтрации (A_n) и (B_n) имеют ограниченную разность, если

$$\exists n_0 \in \mathbb{N}: A_{n+n_0} \subset B_n \text{ и } B_{n+n_0} \subset A_n \quad \forall n.$$

Ясно, что такие фильтрации задают одну и ту же топологию, но, на самом деле это условие сильнее (это мы поймём чуть попозже).

Напомним лемму о змее:

сюда диаграмму про лемму о змее

Лемма 12. Рассмотрим точную последовательность

$$0 \rightarrow A' \rightarrow A \rightarrow A'' \xrightarrow{p} 0,$$

(A_n) — фильтрация на A , $((A_n) \cap A')$ — фильтрация на A' и $(p(A_n))$ на A'' . Тогда после перехода к пополнениям мы также получим точную последовательность

$$0 \rightarrow \widehat{A'} \rightarrow \widehat{A} \rightarrow \widehat{A''} \rightarrow 0.$$

Рабочее крестьянское доказательство. Перейдём к точной последовательности:

$$0 \rightarrow A'/A_n \cap A' \rightarrow A/A_n \rightarrow A''/p(A_n)$$

Определим теперь \widetilde{A} и гомоморфизм d , как

$$\widetilde{A} = \prod_{n=0}^{\infty} A/A_n \xrightarrow{d} \widetilde{A}, \quad d((c_n)) = (c_n - \theta(c_{n+1})).$$

Несложно заметить, что $\text{Ker } d = \widehat{A}$. Соответственно, надо рассмотреть диаграмму

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & \widehat{A'} & \longrightarrow & \widehat{A} & \longrightarrow & \widehat{A''} \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ 0 & \longrightarrow & \widetilde{A'} & \longrightarrow & \widetilde{A} & \longrightarrow & \widetilde{A''} \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow d' & & \downarrow d & & \downarrow d'' \\ 0 & \longrightarrow & \widetilde{A'} & \longrightarrow & \widetilde{A} & \longrightarrow & \widetilde{A''} \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ & & \text{Coker}(d') & \longrightarrow & \text{Coker}(d) & \longrightarrow & \text{Coker}(d'') \end{array}$$

и применить лемму о змее. Засчет сюръективности $\theta' \quad \forall (b_n)$ мы сможем подобрать (c_n) такие, что $d'(c_n) = (b_n)$. А если d' сюръективен, то $\text{Coker } d' = 0$ и из леммы о змее мы получаем нужную диаграмму:

$$0 \rightarrow \widehat{A'} \rightarrow \widehat{A} \rightarrow \widehat{A''} \rightarrow \text{Coker } d' = 0.$$

□

Умногое доказательство. Оказывается, если существуют пределы $\lim X_n, \lim Y_n, \lim Z_n$ (где речь идет об объектах абелевой категории), то последовательность

$$0 \rightarrow \lim X_n \rightarrow \lim Y_n \rightarrow \lim Z_n$$

точна вообще всегда, так как ядро — это предел, а пределы коммутируют, так как предельный функтор сопряжен к диагональному, а значит, сохраняет пределы. □

Следствие 5. $\widehat{A}/\widehat{A}_n \cong A/A_n$.

Доказательство. Из прошлой леммы, полагая $A' = A_n$, мы получаем короткую точную последовательность

$$0 \rightarrow \widehat{A}_n \rightarrow \widehat{A} \rightarrow \widehat{A}/\widehat{A}_n \rightarrow 0$$

А теперь заметим, что

$$(A/A_n) \supset A_1/A_n \supset \dots \supset A_n/A_n \supset 0 \supset \dots,$$

откуда $\widehat{A}/\widehat{A}_n = A/A_n$ и из точности последовательности выше мы получаем нужное. \square

Следствие 6. Переходя в предыдущем следствии к пределу, мы получаем, что

$$\widehat{\widehat{A}} = \varprojlim \widehat{A}/\widehat{A}_n \cong \widehat{A},$$

то есть пополнение полно⁴

Пример 3. На простых примерах видна некоторая эвристика: $\mathbb{Z} \hookrightarrow \mathbb{Z}_p$, $F[t] \hookrightarrow F[[t]]$.

На самом деле, верно такое общее утверждение

Теорема 12. $\text{Ker}(A \rightarrow \widehat{A}) = \bigcap_{n=0}^{\infty} A_n$.

1.13 Градуированные алгебры и модули

Определение 20. Пусть R_i — A -модули. R называют \mathbb{N} -градуированной A -алгеброй, если

$$R = \bigoplus_{i=0}^{\infty} R_i, \quad R_i \cdot R_j \subset R_{i+j}.$$

Градуированным R -модулем называют $M = \bigoplus M_i$ с условием $R_i M_j \subset M_{i+j}$.

Предложение 5. Градуированное кольцо R является Нётеровым тогда и только тогда, когда R_0 — нётерово и R — конечнопорожденная R_0 -алгебра.

Доказательство. В обратную сторону это почти очевидно: достаточно применить теорему Гильберта о Базисе и то, что нётеровость сохраняется при эпиморфизме.

Теперь докажем в обратную сторону. Положим

$$R_+ = \bigoplus_{n=1}^{\infty} R_n \trianglelefteq R,$$

пусть R_+ порождён $\{x_1, \dots, x_s\}$ над R . Эти x_i можно считать однородными, т.к. иначе разобьем на однородные компоненты, которые всё ещё будут порождать. Таким образом, $x_i \in R_{k_i}$ для некоторого k_i . Возьмём $y \in R_n$,

$$y = \sum_{j=1}^m x_j z_j, \quad z_j \in R_{n-k_j}.$$

По индукционному предположению $z_j \in R_0[x_1, \dots, x_s] \implies y \in R_0[x_1, \dots, x_s]$. \square

Пусть $I \trianglelefteq R$, рассмотрим алгебру раздутия:

$$\text{Bl}_I(R) = \bigoplus_{n=1}^{\infty} I^n.$$

⁴что вполне логично.

2. Алгебраическая теория чисел

2.1 Алгебраические числа и целые алгебраические числа

Определение 21. Число $\alpha \in \mathbb{C}$ называется *алгебраическим*, если существует $p \in \mathbb{Z}[x]$, аннулирующий α .

Замечание. Это частный случай общей терминологии, тут речь о том, что α алгебраичен над \mathbb{Q} .

Предложение 6. Пусть $\alpha \in \mathbb{C}$. Тогда следующие утверждения эквивалентны:

1. α — алгебраическое.
2. $\mathbb{Q}[\alpha]$ — конечномерное векторное пространство над \mathbb{Q} .

Доказательство. (1) \implies (2): очевидно, так как если α — алгебраичен над \mathbb{Q} , базисом $\mathbb{Q}[\alpha]$ над \mathbb{Q} будет множество $\{1, \alpha, \dots, \alpha^{n-1}\}$.

(2) \implies (1): действительно, если $\dim_{\mathbb{Q}} \mathbb{Q}[\alpha] = n$, то $1, \alpha, \dots, \alpha^n$ линейно зависимы, то есть $\exists a_0, \dots, a_n \in \mathbb{Q}$:

$$a_n \alpha^n + \dots + a_1 \alpha + a_0 = 0.$$

Домножая на знаменатель, мы имеем нужный многочлен. □

Предложение 7. Множество алгебраических чисел является полем.

Доказательство. Пусть α — алгебраическое число. Тогда

$$a_n \alpha^n + a_{n-1} \alpha^{n-1} + \dots + a_1 \alpha + a_0 = 0, \quad a_i \in \mathbb{Z}.$$

Но тогда $a_n + \dots + a_1 (\alpha^{-1})^{n-1} + a_0 (\alpha^{-1})^n = 0$, то есть α^{-1} алгебраическое. Теперь, пусть α и β алгебраические. Тогда $\dim_{\mathbb{Q}} \mathbb{Q}[\alpha, \beta] < \infty \implies \dim_{\mathbb{Q}} \mathbb{Q}[\alpha\beta], \dim_{\mathbb{Q}} \mathbb{Q}[\alpha + \beta] < \infty$. □

Замечание. Искушенный читатель сразу заметит, что это поле — это в точности \mathbb{Q}^{alg} .

Определение 22. $\alpha \in \mathbb{C}$ мы будем называть *целым алгебраическим числом*, если существует унитарный многочлен $p \in \mathbb{Z}[x]$, аннулирующий α .

Пример 4. $\sqrt{2}$ — целое алгебраическое число, а вот $\sqrt{2}/2$ — нет!

Предложение 8. Следующие утверждения эквивалентны:

1. α — целое алгебраическое число.
2. $\mathbb{Z}[\alpha]$ — конечно-порожденный \mathbb{Z} -модуль.

Доказательство. Опять же, (1) \implies (2) следует просто из того, что если α — целое алгебраическое, то $\{1, \dots, \alpha^{n-1}\}$ — базис $\mathbb{Z}[\alpha]$ над \mathbb{Z} .

Теперь докажем (2) \implies (1). Ясно, что все образующие $\mathbb{Z}[\alpha]$ над \mathbb{Z} — многочлены от α , пусть они $p_1(\alpha), \dots, p_m(\alpha)$. Пусть $N = \max \deg(p_i)$, тогда

$$\alpha^{N+1} = \sum_{i=1}^m a_i p_i(\alpha), \quad \alpha^{N+1} - \sum_{i=1}^m a_i p_i(\alpha) = 0.$$

□

Теорема 13. Множество целых алгебраических чисел является кольцом.

Доказательство. Возьмём α, β — целые алгебраические. Тогда по предыдущему предложению $\mathbb{Z}[\alpha, \beta]$ — конечнопорожденный \mathbb{Z} -модуль, а так как \mathbb{Z} — нётерово, тогда подмодули $\mathbb{Z}[\alpha + \beta]$ и $\mathbb{Z}[\alpha\beta]$ конечнопорождены, откуда $\alpha\beta$ и $\alpha + \beta$ целые алгебраические (также по предыдущему предложению). □

Обозначим кольцо целых алгебраических чисел, как \mathcal{O} . В основном в этом курсе мы будем изучать подкольца в \mathcal{O} , а именно

Определение 23. Пусть K/\mathbb{Q} — конечное расширение. Тогда

$$\mathcal{O}_K \stackrel{\text{def}}{=} \mathcal{O} \cap K$$

мы будем называть *кольцом целых* числового поля K . Иными словами, \mathcal{O}_K — множество элементов K , для которых существует унитарный целочисленный многочлен, аннулирующий их.

2.2 След элемента и целый базис кольца \mathcal{O}_K

Заведём теперь некоторый полезный аппарат.

Определение 24. Пусть L/K — конечное расширение, $[L : K] = n$. Возьмём $\alpha \in L$, его можно рассматривать, как эндоморфизм понятным образом

$$T_\alpha: L \rightarrow L, \quad x \mapsto \alpha x.$$

Соответственно, след этого оператора называют следом элемента α относительно расширения L/K и обозначают $\text{Tr}_{L/K}(\alpha)$.

У этого оператора есть характеристический многочлен χ_α . Выбрав базис L/K , мы можем записать матрицу оператора T_α и тогда

$$\chi_\alpha(t) = \det(Et - T_\alpha) = t^n - \text{Tr}_{L/K}(\alpha)t^{n-1} + \dots$$

Если L/K — расширение Галуа, то можно определять след, как

$$\text{Tr}_{L/K}(\alpha) = \sum_{\sigma \in \text{Gal}(L/K)} \sigma(\alpha).$$

Соответственно, след — это K -линейный функционал $L \rightarrow K$, то есть

$$\forall \alpha, \beta \in K \quad \text{Tr}_{L/K}(\alpha a + \beta b) = \alpha \text{Tr}_{L/K}(a) + \beta \text{Tr}_{L/K}(b).$$

Кроме того, для $\alpha \in K$ $\text{Tr}_{L/K}(\alpha) = [L : K] \cdot \alpha$. Кроме того, след хорошо ведёт себя относительно башни расширений. Если M — расширение K , а K — расширение L , то

$$\text{Tr}_{M/K} = \text{Tr}_{M/L} \circ \text{Tr}_{L/K}.$$

Кроме того, след можно рассматривать и как невырожденную билинейную симметричную форму

$$K \times K \rightarrow \mathbb{Q}, \quad (x, y) \mapsto \text{Tr}_{K/\mathbb{Q}}(xy).$$

Замечание. Если $\alpha \in \mathcal{O}_K$, то $\text{Tr}_{K/\mathbb{Q}}(\alpha) \in \mathbb{Z}$. Действительно, во-первых, $\sigma(\alpha) \in \mathcal{O}_K \forall \sigma \in \text{Gal}(K/\mathbb{Q})$, так как если $\alpha \in \mathcal{O}_K$, то

$$\alpha^n + a_{n-1}\alpha^{n-1} + \dots + a_0 = 0 \implies (\sigma\alpha)^n + a_{n-1}(\sigma\alpha)^{n-1} + a_0 = 0 \implies \sigma\alpha \in \mathcal{O}_K$$

, откуда $\text{Tr}_{K/\mathbb{Q}}(\alpha) \in \mathbb{Z}$.

С другой стороны, по первому определению $\text{Tr}_{K/\mathbb{Q}} \in \mathbb{Q}$, а $\mathcal{O}_K \cap \mathbb{Q} = \mathbb{Z}$.

Предложение 9. Любой элемент поля K представим в виде $\frac{\beta}{d}$, где $\beta \in \mathcal{O}_K$, $d \in \mathbb{Z}$. Иными словами, K — поле частных кольца \mathcal{O}_K .

Доказательство. Во-первых, α является корнем некоторого унитарного многочлена с коэффициентами из \mathbb{Q} :

$$\alpha^n + c_{n-1}\alpha^{n-1} + \dots + c_1\alpha + c_0 = 0, \quad c_i \in \mathbb{Q}.$$

Запишем $c_i = \frac{b_i}{d}$, $b_i, d \in \mathbb{Z}$. Тогда, домножив равенство выше на d^n , мы получаем

$$(\alpha d)^n + b_{n-1}(\alpha d)^{n-1} + b_{n-2}d(\alpha d)^{n-2} + \dots + b_0d^{n-1} = 0.$$

Соответственно, полагая $\beta = d\alpha$ мы видим, что $\beta \in \mathcal{O}_K$ и $\alpha = \beta/d$. □

Так вот, возьмём базис K/\mathbb{Q} . Из предыдущего предложения ясно, что можно полагать, что этот базис состоит из элементов \mathcal{O}_K . Обозначим их за $\omega_1, \dots, \omega_n$. Выберем для этого базиса взаимный базис $\omega_1^*, \dots, \omega_n^*$ относительно формы $\text{Tr}_{K/\mathbb{Q}}$, т.е. такой базис, что

$$\text{Tr}(\omega_i \omega_j^*) = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} = \delta_{ij}.$$

Покажем, что выполнено

$$\bigoplus_i \mathbb{Z}\omega_i \subset \mathcal{O}_K \subset \bigoplus_i \mathbb{Z}\omega_i^*.$$

Первое включение очевидно, докажем второе. Возмём $\alpha \in \mathcal{O}_K$,

$$\alpha = \sum_{i=1}^n x_i \omega_i^*, \quad x_i \in \mathbb{Q}.$$

Покажем, что на самом деле $x_i \in \mathbb{Z}$.

$$\alpha \omega_j = \sum_{i=1}^n x_i \omega_j \omega_i^* \implies \text{Tr}_{K/\mathbb{Q}}(\alpha \omega_j) = x_j.$$

С другой стороны, так как $\alpha \omega_j \in \mathcal{O}_K$, $\text{Tr}_{K/\mathbb{Q}}(\alpha \omega_j) \in \mathbb{Z}$ (как мы отвечали выше). Таким образом, мы имеем

$$\bigoplus_i \mathbb{Z}\omega_i \subset \mathcal{O}_K \subset \bigoplus_i \mathbb{Z}\omega_i^*.$$

Так как слева и справа конечнопорождённые абелевы группы ранга n , мы только что доказали такую теорему:

Теорема 14. Пусть \mathcal{O}_K — кольцо целых числового поля K/\mathbb{Q} , где K/\mathbb{Q} — расширение степени n . Тогда, как абелева группа оно изоморфно конечнопорождённой свободной абелевой группе ранга n :

$$\mathcal{O}_K \cong \bigoplus_{i=1}^n \mathbb{Z}u_i,$$

где $\{u_i\}$ — базис K/\mathbb{Q} , состоящий из элементов кольца \mathcal{O}_K .

В данном контексте $\{u_i\}_{i=1}^n$ называют **целым базисом**.

Из этой теоремы сразу следует вот такой факт:

Теорема 15. Кольцо \mathcal{O}_K — нётерово.

Доказательство. В самом деле, по теореме 14 кольцо \mathcal{O}_K конечно порождено, как абелева группа, а значит, любой его идеал $I \subset \mathcal{O}_K$ тоже конечно порожден, как абелева группа, откуда следует, что он конечно порожден и как идеал. \square

Пример 5. Рассмотрим поле $K = \mathbb{Q}(\sqrt{-3})$. Чему равно его кольцо целых \mathcal{O}_K ?

Ясно, что $\mathbb{Z}[\sqrt{-3}] \subset \mathcal{O}_K$, но вот равенства нет, так как можно рассмотреть

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{-3}}{2}, \quad 2\alpha - 1 = \sqrt{-3} \implies 4\alpha^2 - 4\alpha + 4 = 0 \implies \alpha^2 - \alpha + 1 = 0,$$

то есть $\alpha \in \mathcal{O}_K$ и $\alpha \notin \mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$.

Воспользуемся понятием *нормы*:

Определение 25. Пусть L/K — конечное расширение, $[L : K] = n$. Возьмём $\alpha \in L$, его можно рассматривать, как эндоморфизм понятным образом

$$T_\alpha: L \rightarrow L, \quad x \mapsto \alpha x.$$

Нормой элемента α относительно расширения L/K мы будем называть $N_{L/K}(\alpha) = N(\alpha) = \det(T_\alpha)$. В случае, когда расширение сепарабельно, норму можно определять, как

$$N(\alpha) = \prod_{\sigma \in \text{Gal}(L/K)} \sigma(\alpha).$$

Замечание. Как и в случае со следом, для $\alpha \in \mathcal{O}_K$ $N_{K/\mathbb{Q}}(\alpha) \in \mathcal{O}_K$ (доказывается это так же, как для следа), а из определения через определитель ясно, что $N_{K/\mathbb{Q}}(\alpha) \in \mathbb{Q}$, то есть $N_{K/\mathbb{Q}}(\alpha) \in \mathbb{Z}$.

Ясно, что в случае квадратичного расширения $\mathbb{Q}(\sqrt{d})$ норма $a + b\sqrt{d}$ норма элемента — произведение его на его сопряженный:

$$N(a + b\sqrt{d}) = (a + b\sqrt{d})(a - b\sqrt{d}) = a^2 - db^2$$

Соответственно, рассмотрим $a + b\sqrt{-3} \in \mathbb{Q}(\sqrt{-3})$ (т.е. $a, b \in \mathbb{Q}$) и пусть $\alpha = a + b\sqrt{-3} \in \mathcal{O}_K$. Тогда

$$N_{K/\mathbb{Q}}(a + b\sqrt{-3}) = (a + b\sqrt{-3})(a - b\sqrt{-3}) = a^2 + 3b^2 \in \mathbb{Z}, \quad \text{Tr}_{K/\mathbb{Q}}(a + b\sqrt{-3}) = (a + b\sqrt{-3}) + (a - b\sqrt{-3}) = 2a \in \mathbb{Z}.$$

Соответственно, $2a \in \mathbb{Z}$, то есть или $a = n/2$, где $n \in \mathbb{Z}$ и нечётное, или $a \in \mathbb{Z}$.

1. Пусть $a \in \mathbb{Z}$, тогда так как $a^2 + 3b^2 \in \mathbb{Z}$, $3b^2 \in \mathbb{Z} \implies b \in \mathbb{Z}$.
2. Пусть $2a = 2n + 1$, тогда $4(a^2 + 3b^2) = 4a^2 + 12b^2 \in 4\mathbb{Z} \implies 12b^2 \in 4\mathbb{Z}$, откуда $2b \in \mathbb{Z}$.

Значит, либо a и b одновременно целые, либо a и b одновременно полуцелые. То есть

$$\alpha = \frac{2n+1}{2} + \frac{2m+1}{2}\sqrt{-3} = (n + m\sqrt{-3}) + \frac{1 + \sqrt{-3}}{2} = (n - m) + (2m + 1)\frac{1 + \sqrt{-3}}{2},$$

откуда $\mathcal{O}_K \cong \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z} \cdot \frac{1 + \sqrt{-3}}{2}$.

Пример 6. Если $K = \mathbb{Q}(i)$, то $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[i]$.

Домашнее задание 1. Задачи:

1. Опишите \mathcal{O}_K для $K = \mathbb{Q}(\sqrt{d})$, где $d \in \mathbb{Z}$ и d свободно от квадратов.
2. Докажите, что любое конечное целостное кольцо является полем.
3. Рассмотрим поле $K = \mathbb{Q}(\sqrt{-5})$, $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\sqrt{-5}]$ и идеал $I = (2, 1 + \sqrt{-5})$. Покажите, что он не является главным.
4. Докажите, что кольцо $\mathbb{Z}[\sqrt{-5}]$ не факториальное. А именно, рассмотрите

$$21 = 3 \cdot 7 = (1 + 2\sqrt{-5})(1 - 2\sqrt{-5})$$

и покажите: что это два существенно различных разложения в произведение простых.

2.3 Размерность кольца целых \mathcal{O}_K

Докажем теперь, что для любого числового поля K кольцо целых \mathcal{O}_K одномерно.

Лемма 13. Пусть K/\mathbb{Q} — конечное расширение и $0 \neq I$ — идеал кольца \mathcal{O}_K . Тогда $I \cap \mathbb{Z} \neq 0$, то есть I содержит целое число.

Доказательство. Возьмём $\alpha \in I$, $\alpha \neq 0$. Тогда

$$\alpha^n + a_{n-1}\alpha^{n-1} + \dots + a_1\alpha + a_0 = 0, \quad a_i \in \mathbb{Z}.$$

Не умаляя общности, $a_0 \neq 0$. Но тогда

$$a_0 = -(\alpha^n + a_{n-1}\alpha^{n-1} + \dots + a_1\alpha) \implies a_0 \in \mathbb{Z} \cap I.$$

□

Следствие 7. Пусть I — ненулевой идеал в \mathcal{O}_K . Тогда \mathcal{O}_K/I конечно.

Доказательство. По лемме 13 выберем $n \in I \cap \mathbb{Z}$, $n \neq 0$. Тогда $(n) = n\mathcal{O}_K \trianglelefteq I$, значит достаточно доказать, что $\mathcal{O}_K/n\mathcal{O}_K$ конечно. А это сразу же следует из того, что \mathcal{O}_K — это конечнопорожденная свободная абелева группа ранга n . \square

Теорема 16. Кольцо \mathcal{O}_K одномерно, т.е. $\dim(\mathcal{O}_K) = 1$.

Доказательство. Пусть $\mathfrak{p} \in \text{Spec}(\mathcal{O}_K)$. Тогда $\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}$ — область целостности и конечно по следствию 7. Но тогда по задаче 2 в 1 $\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}$ — поле, что равносильно тому, что \mathfrak{p} — максимальный. \square

Замечание. Эквивалентная формулировка этой теоремы состоит в том, что любой ненулевой простой идеал кольца \mathcal{O}_K является максимальным.

Поговорим теперь еще про строение идеалов в кольце \mathcal{O}_K . Как мы уже убеждались в задаче 3 Д/З 1, кольцо \mathcal{O}_K далеко не всегда является областью главных идеалов.

2.4 Примеры евклидовых колец целых алгебраических чисел

Предложение 10. Рассмотрим $K = \mathbb{Q}(\sqrt{-3})$. Тогда \mathcal{O}_K — евклидово.

Доказательство. Как мы убедились в примере 5,

$$\mathcal{O}_K \cong \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}\omega, \quad \omega = \frac{1 + \sqrt{-3}}{2}.$$

Рассмотрим $a + b\omega$, тогда положим

$$N(\alpha) = (a + b\omega)(a + b\bar{\omega}) = a^2 + ab + b^2.$$

Пусть $a, b, c, d \in \mathbb{Z}$, тогда

$$\frac{a + b\omega}{c + d\omega} = \alpha + \beta\omega, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{Q}.$$

Тогда существуют $u, v \in \mathbb{Z}$ такие, что $|u - \alpha| \leq \frac{1}{2}$, $|v - \beta| \leq \frac{1}{2}$. Положим $\alpha - u = \alpha'$, $\beta - v = \beta'$.

$$a + b\omega = (c + d\omega)(\alpha + \beta\omega) = (c + d\omega)(u + v\omega) + (c + d\omega)(\alpha' + \beta'\omega) = (c + d\omega)(u + v\omega) + r.$$

$$N(r) = N((c + d\omega)(\alpha' + \beta'\omega)) = N(c + d\omega)N(\alpha' + \beta'\omega) = N(c + d\omega)(\alpha'^2 + \alpha'\beta' + \beta'^2) < N(c + d\omega),$$

так как $\alpha'^2 + \alpha'\beta' + \beta'^2 \leq \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4}$, что и требовалось. \square

Сейчас мы посмотрим

Предложение 11. Уравнение $y^2 = x^3 - 2$ над \mathbb{Z} в качестве решений имеет лишь $(3, \pm 5)$.

Доказательство. Во-первых заметим, что можно сразу полагать y нечётным.

Попробуем решить уравнение в $\mathbb{Z}[\sqrt{-2}] = \mathcal{O}_K$ для $K = \mathbb{Q}(\sqrt{-2})$.

$$(y + \sqrt{-2})(y - \sqrt{-2}) = x^3.$$

Пусть $d = (y + \sqrt{-2}, y - \sqrt{-2})$. Покажем, что $d = 1$. Действительно,

$$\begin{cases} y + \sqrt{-2} : d \\ y - \sqrt{-2} : d \end{cases} \implies \begin{cases} 2y : d \\ 2\sqrt{-2} : d \end{cases}.$$

Заметим, что $2\sqrt{-2} : d \implies N(2\sqrt{-2}) : N(d)$. Пусть $d = a + b\sqrt{-2}$, $a, b \in \mathbb{Z}$. Тогда мы имеем $8 : (a^2 + 2b^2)$.

Т.е. $a^2 + 2b^2 = 1, 2, 4$ или 8 . Разберём соответствующие случаи:

1. $a^2 + 2b^2 = 1 \rightsquigarrow a = \pm 1, b = 0$.
2. $a^2 + 2b^2 = 2 \rightsquigarrow a = 0, b = \pm 1$.
3. $a^2 + 2b^2 = 4 \rightsquigarrow a = \pm 2, b = \pm 0$.
4. $a^2 + 2b^2 = 8 \rightsquigarrow a = \pm 0, b = \pm 2$.

Заметим, что так как y — нечётное целое,

$$N(y + \sqrt{-2}) = y^2 + 2 \nmid N(\sqrt{-2}) = 2,$$

откуда следует, что случаи (2) и (4) нам не годятся. Случай (3) нам не подходит просто в силу того, что y нечётное.

Значит, мы доказали, что $y + \sqrt{-2}$ и $y - \sqrt{-2}$ — взаимнопросты, а так как кольцо $\mathbb{Z}[\sqrt{-2}]$ факториально, отсюда мы имеем, что

$$y + \sqrt{-2} = z^3, \quad y - \sqrt{-2} = t^3.$$

Пусть опять же $z = a + b\sqrt{-2}$. Честно возведём в куб:

$$y + \sqrt{-2} = (a + b\sqrt{-2})^3 = a^3 + 3a^2b\sqrt{-2} - 6ab^2 - 2b^3\sqrt{-2},$$

откуда мы имеем

$$\begin{cases} a^3 - 6ab^2 = y \\ 3a^2b - 2b^3 = 1 \end{cases}$$

Соответственно, из второго уравнения ясно, что $b = \pm 1$, откуда либо $3a^2 = 3 \implies a = \pm 1$, либо $3a^2 = -1$, чего быть не может ($a \in \mathbb{Z}$). Соответственно, мы получили, что

$$y = a^3 - 6ab^2 = \pm 5 \implies y = \pm 5.$$

□

2.5 “Last Fermat’s theorem” для $n = 3$.

Все мы знаем следующее (важное для истории математики) утверждение:

Теорема 17 (Last Fermat’s theorem). Для любого натурального $n > 2$ уравнение

$$x^n + y^n = z^n$$

не имеет решений над \mathbb{Z} .

В случае $n = 2$ решения есть и мы даже можем выписать их явно, проделаем это.

$$x^2 + y^2 = z^2 \implies y^2 = (z - x)(z + x)$$

Ясно, что с самого начала можно полагать x, y, z попарно взаимно простыми. Предположим, что $2 \mid y$, $2 \nmid x$. Тогда мы можем переписать уравнение как

$$\left(\frac{y}{2}\right)^2 = \frac{z - x}{2} \cdot \frac{z + x}{2}$$

Заметим, что $(z, x) = 1 \implies (z - x, z + x) = 1$, откуда

$$\frac{z - x}{2} = b^2, \quad \frac{z + x}{2} = a^2 \implies \begin{cases} z = a^2 + b^2, \\ x = a^2 - b^2 \\ y = 2ab, \end{cases} \quad 0 < b < a, (b, a) = 1.$$

Также есть элементарное решение в случае $n = 4$.

Предложение 12. Уравнение $x^4 + y^4 = z^2$ не имеет нетривиальных решений.

Доказательство. Предположим противное и рассмотрим нетривиальное решение (x, y, z) . В частности, это пифагорова тройка, откуда, как мы уже поняли выше

$$x^2 = 2ab, \quad y^2 = a^2 - b^2, \quad z = a^2 + b^2, \quad (a, b) = 1.$$

Рассмотрим решение с минимальным $|z|$. Заметим, что

$$x^2 : 2 \implies x^2 : 4 \implies 2ab : 4 \implies ab : 2$$

Если $b \not\equiv 2$, то $a : 2$ а тогда $y^2 \equiv 0 - 1 \equiv 3 \pmod{4}$, чего быть не может. Тогда

$$\begin{cases} y^2 + b^2 = a^2 \\ b : 2 \end{cases} \implies \begin{cases} b = 2uv \\ a = u^2 + v^2 \\ y = u^2 - v^2 \end{cases}, \quad (u, v) = 1.$$

$$x^2 = 2ab = 4uv(u^2 + v^2) \implies \left(\frac{x}{2}\right)^2 = uv(u^2 + v^2) \implies u = s^2m \quad v = t^2, \quad u^2 + v^2 = r^2,$$

Отсюда получаем $s^4 + t^4 = r^2$, $|r| < |z|$, что даёт нам противоречие. □

Ясно, что из этого следует, что уравнение $x^4 + y^4 = z^4$ не имеет нетривиальных корней над \mathbb{Z} .

Разберёмся теперь с большой теоремой Ферма в случае $n = 3$. Доказательство мы будем проводить в два этапа. Сначала докажем такую вспомогательную лемму:

Лемма 14. Пусть $a, b \in \mathbb{Z}$ — такие, что

- $(a, b) = 1$.
- $a \not\equiv b \pmod{2}$
- $N(a + b\sqrt{-3}) = a^2 + 3b^2$ — полный куб.

Тогда существуют $s, t \in \mathbb{Z}$ такие, что

$$\begin{cases} a = s^3 - 9st^2 \\ b = 3t(s^2 - t^2). \end{cases}$$

Доказательство. Рассмотрим кольцо целых \mathcal{O}_K для поля $K = \mathbb{Q}(\sqrt{-3})$.

Шаг 1: найдём группу обратимых элементов \mathcal{O}_K^* :

Пусть ξ — первообразный корень шестой степени из единицы,

$$\xi = \frac{-1 + \sqrt{-3}}{2}.$$

Тогда $\pm\xi^i$, $i = 0, 1, 2$ — обратимые. Докажем, что других обратимых элементов нет. Пусть $u \in \mathcal{O}_K^*$, тогда $u = a + b\xi$, $a, b \in \mathbb{Z}$. Тогда, так как u обратим, $uv = 1$ для некоторого v . Но тогда $N(u)N(v) = 1$, откуда $N(u)$ обратима в \mathbb{Z} , а так как она неотрицательна, $N(u) = 1$. Тогда

$$N(u) = (a + b\xi)(a + b\bar{\xi}) = a^2 + ab + b^2 = 1 \implies (2a + b)^2 + 3b^2 = 4.$$

1. Пусть $b = 0$. Тогда $2a = \pm 2 \implies a = \pm 1 \implies u = \pm 1$.
2. $b = 1 \implies 2a - 1 = \pm 1$, откуда $a = 0$ или $a = 1$ и, в этом случае, $u = -1 + \xi = \xi^2$, либо $u = \xi$.
3. $b = -1 \implies 2a - 1 = \pm 1 \implies a = 1$ или $a = 0$, откуда $u = 1 + \xi = -\xi^2$, или $u = -\xi$.

Шаг 2: докажем, что $(a + b\sqrt{-3}, a - b\sqrt{-3}) = (1)$.

Пусть $a \div 3$, тогда $x^3 = a^2 + 3b^2 \div 3 \implies x \div 3$, откуда $a^2 + 3b^2 = x^3 \div 27$, а значит,

$$3\left(\frac{a}{3}\right)^2 + b^2 \div 3 \implies b \div 3,$$

что противоречит тому, что $(a, b) = 1$. Значит, $a \nmid 3$.

Предположим, что для некоторого $\alpha \in \mathcal{O}_K$

$$\begin{cases} a + b\sqrt{-3} \div \alpha \\ a - b\sqrt{-3} \div \alpha \end{cases} \implies \begin{cases} 2a \div \alpha \\ 2b\sqrt{-3} \div \alpha \end{cases} \implies \begin{cases} N(2a) \div N(2\alpha) \\ N(2b\sqrt{-3}) \div N(\alpha) \end{cases} \implies \begin{cases} 4a^2 \div N(\alpha) \\ 12b^2 \div N(\alpha) \end{cases},$$

а так как $a \nmid 3$, из этого следует, что $4a^2 \div N(\alpha)$ и $4b^2 \div N(\alpha)$, что даёт нам, что $4 \div N(\alpha)$ (так как $(a, b) = 1$)

Переберём теперь варианты (помня, что мы ищем $\alpha: N(\alpha) > 1$):

1. Пусть $N(\alpha) = 2$. Пусть $\alpha = c + d\omega$, тогда

$$4N(\alpha) = 4(c^2 + cd + d^2) = (2c + d)^2 + 3d^2 = 8,$$

а это уравнение не имеет решений в целых числах.

2. Пусть $N(\alpha) = 4$, $\alpha = c + d\omega$. Тогда

$$4N(\alpha) = (2c + d)^2 + 3d^2 = 16.$$

Пусть $d = 0$, тогда $c = \pm 2$, откуда $\alpha = \pm 2$, но тогда $a + b\sqrt{-3} \div 2$, а это возможно только когда a и b одной четности.

Пусть $d = 2$, тогда $c = 0$, то есть $\alpha = 2\omega$, откуда снова $a + b\sqrt{-3} \div 2$.

И аналогично, когда $d = -2$, так как в этом случае $c = 0$ или $c = 2$, то есть либо $\alpha = -2\omega$, либо $\alpha = 2 - 2\omega$, откуда снова $a + b\sqrt{-3} \div 2$.

Шаг 3: Таким образом, так как $a^2 + 3b^2 = (a + b\sqrt{-3})(a - b\sqrt{-3})$ — полный куб, а так как $(a + b\sqrt{-3}, a - b\sqrt{-3}) = 1$, мы получаем, что с точностью до домножения на обратимый $a + b\sqrt{-3}$ и $a - b\sqrt{-3}$ — кубы. Именно чтоб разобраться шаг с домножением на обратимый, мы делали шаг 1. То есть,

$$(\pm\xi)^i(a + b\sqrt{-3}) = (s + t\sqrt{-3})^3, \quad s + t\sqrt{-3} \in \mathcal{O}_K.$$

Пусть $i \neq 0$, тогда

$$(a + b\sqrt{-3}) \cdot \xi^i = (a + b\sqrt{-3}) \cdot \frac{1 \pm \sqrt{-3}}{2} = \frac{a \pm 3b}{2} + \frac{a \pm b}{2}\sqrt{-3}.$$

Тогда s и t оба полуцелые, то есть

$$(a + b\sqrt{-3})(\pm\xi^i) = \left(\frac{c + d\sqrt{-3}}{2}\right)^3 = \frac{(c^3 - 9cd^2) + (3c^2d - 3d^3)\sqrt{-3}}{8}, \quad c, d \nmid 2.$$

Посмотрим на числитель по модулю 8. Так как $c, d \equiv 1 \pmod{2}$, $c^2 \equiv d^2 \equiv 1 \pmod{8}$, а тогда

$$c^3 - 9cd^2 \equiv c^3 - cd^2 \equiv c(c^2 - d^2) \equiv 0 \pmod{8}.$$

$$3c^2d - 3d^3 = 3d(c^2 - d^2) \equiv 3d(1 - 1) \equiv 0 \pmod{8}.$$

Таким образом, $a + b\sqrt{-3} = (s + t\sqrt{-3})^3$, но s и t могут быть полуцелые.

Шаг 4: Пусть $c = \frac{2k+1}{2}$, $d = \frac{2\ell+1}{2}$, тогда, так как

$$\left(\frac{-1 \pm \sqrt{-3}}{2}\right)^3 = 1 \implies (c + d\sqrt{-3})^3 = \left((c + d\sqrt{-3}) \cdot \frac{-1 \pm \sqrt{-3}}{2}\right)^3$$

Вычисляя $(c + d\sqrt{-3}) \cdot \frac{-1 \pm \sqrt{-3}}{2}$, легко убедиться, что знак всегда можно подобрать так, чтоб $c, d \in \mathbb{Z}$. \square

При помощи этой леммы уже совсем несложно доказать большую теорему Ферма для $n = 3$. Рассмотрим уравнение

$$x^3 + y^3 = z^3, \quad (x, y) = 1, \quad (x, z) = 1, \quad (y, z) = 1.$$

Не умаляя общности, также можно полагать $x \not\equiv 2, y \not\equiv 2, z \not\equiv 2$. Выберем решение с минимальным $|x|$. Сделаем такую замену:

$$y = p - q, \quad z = p + q, \quad p, q \in \mathbb{Z}, \quad (p, q) = 1, \quad p \not\equiv_2 q.$$

Тогда, подставляя это в уравнение, мы имеем

$$x^3 = (p + q)^3 - (p - q)^3 = 2q(q^2 + 3p^2).$$

Так как $x \not\equiv 2, 2q(q^2 + 3p^2) \equiv 0 \pmod{8}$, откуда $q \equiv 0 \pmod{4}$. Значит,

$$\left(\frac{x}{2}\right)^3 = \frac{q}{4}(q^2 + 3p^2).$$

I. Предположим, что $q \not\equiv 3$. Тогда

$$\left(\frac{q}{4}, q^2 + 3p^2\right) = 1 \implies q^2 + 3p^2 = t^3.$$

Соответственно, мы попадаем в условие леммы 14:

$$\begin{cases} q^2 + 3p^2 = t^3 \\ p \not\equiv q \pmod{2} \\ (p, q) = 1 \end{cases} \xRightarrow{\text{л. 14}} \begin{cases} q = s^3 - 9st^2 \\ p = 3t(s^2 - t^2) \end{cases}$$

С другой стороны, $q/4$ — тоже куб, а тогда

$$2q = 2s(s - 3t)(s + 3t) \text{ — тоже куб.}$$

Так как $q \not\equiv 3, s \not\equiv 3$. Кроме того, $s - 3t \not\equiv 2 \implies (s, s - 3t) = (s, s + 3t) = (s + 3t, s - 3t) = 1$, то есть мы имеем

$$\begin{cases} 2s = x_1^3 \\ 3t - s = y_1^3 \\ 3t + s = z_1^3 \end{cases} \implies x_1^3 + y_1^3 = z_1^3.$$

$|x_1|^3 = |2s| \leq |2q| < |x|^3$, то есть мы получили решение с меньшим модулем x .

II. Пусть $q \equiv 3, q = 3r$. Тогда

$$\left(\frac{x}{2}\right)^3 = \frac{q}{4}(q^2 + 3p^2) = \frac{3r}{4}(9r^2 + 3p^2) = \frac{9r}{4}(3r^2 + p^2).$$

Так как сомножители взаимнопросты, каждый из является кубом. Опять применим лемму 14:

$$\begin{cases} p = s(s^2 - 9t^2) \\ r = 3t(s^2 - t^2) \end{cases}.$$

С другой стороны, $9r/4$ — тоже куб, то есть

$$\ell^3 = \frac{9r}{4} = \frac{27t}{4}(s^2 - t^2) \implies 2t(t + s)(s - t) \text{ — куб.}$$

Опять же, так как $(2t, t + s) = (s - t, t + s) = (2t, s - t) = 1$, откуда

$$\begin{cases} 2t = x_1^3 \\ s - t = y_1^3 \\ s + t = z_1^3 \end{cases},$$

и опять же, $|x_1|^3 < |2t| < |r| < |q| < |x|^3$, то есть мы снова получили решение с меньшим $|x|$.

2.6 Целозамкнутость кольца \mathcal{O}_K

Определение 26. Пусть $f \in \mathbb{Z}[x]$. Тогда *содержание* $f = a_n x^n + \dots + a_0$ — это $(a_0, \dots, a_n) \stackrel{\text{def}}{=} \text{cont}(f)$.

Замечание. Как мы помним, $\cong (fg) = \text{cont}(f) \text{cont}(g)$.

Теорема 18. Пусть α — целое алгебраическое число. Тогда минимальный многочлен α имеет целые коэффициенты.

Доказательство. Пусть $\alpha \in \mathcal{O}_K$, а f — минимальный многочлен α , p — унитарный многочлен с целыми коэффициентами, аннулирующий α . Тогда $p : f$, то есть существует $g(x) \in \mathbb{Q}[x]$: $p(x) = f(x)g(x)$.

Ясно, что существуют $r_1, r_2 \in \mathbb{Q}$ такие, что $\tilde{f}(x) = r_1 f(x) \in \mathbb{Z}[x]$ и $\tilde{g}(x) = r_2 g(x) \in \mathbb{Z}[x]$, причем $\text{cont}(\tilde{f}) = \text{cont}(\tilde{g}) = 1$. Тогда старший коэффициент $r_1 r_2 f(x)g(x) = r_1 r_2 p(x)$ равен $r_1 r_2$, откуда $r_1 r_2 \in \mathbb{Z}$.

$$r_1 r_2 \text{cont}(r_1 r_2 p(x)) = \text{cont}(\tilde{f}(x) \text{cont}(\tilde{g}(x))) = 1 \implies r_1 r_2 = \pm 1.$$

Изменяя знак, можем добиться, чтоб $r_1 r_2 = 1$.

Тогда старший коэффициент $p(x) = r_1 r_2 p(x) = \tilde{f}(x)\tilde{g}(x)$ равен ± 1 , откуда старшие коэффициенты \tilde{f} и \tilde{g} равны ± 1 . Опять же, меняя знак, можно считать, что старший коэффициент $\tilde{f}(x)$ равен 1.

$\tilde{f}(x) = r_1 f(x)$, а старшие коэффициенты f и \tilde{f} равны, откуда $\tilde{f}(x) = f(x)$, то есть $f(x) \in \mathbb{Z}[x]$. \square

Определение 27. Пусть A — область целостности, K — поле частных A . Пусть $\alpha \in K$, $\alpha^n + a_{n-1}\alpha^{n-1} + \dots + a_0 = 0$. Если из этого следует, что $\alpha \in A$, то кольцо A называют *целозамкнутым*.

Пример 7. \mathbb{Z} — целозамкнуто.

Теорема 19. Пусть K/\mathbb{Q} — конечное расширение. Тогда кольцо \mathcal{O}_K целозамкнуто.

Доказательство. Пусть $\alpha \in K$, $\alpha^n + a_{n-1}\alpha^{n-1} + \dots + a_0 = 0$, $a_i \in \mathcal{O}_K$. Покажем, что $\mathbb{Z}[\alpha]$ — конечно порожденная абелева группа.

В самом деле,

$$\mathbb{Z}[\alpha] \leq \mathbb{Z}[\alpha, a_0, \dots, a_{n-1}] = \langle \alpha^m a_0^{k_0} \dots a_{n-1}^{k_{n-1}} \mid m < n, k_i < n_i \rangle,$$

где n_i — степень унитарного многочлена с корнем a_i . \square

2.7 Разложение идеалов в произведение простых в кольцах целых числовых полей

Лемма 15. Пусть A — нётерово, $I \subset A$ — ненулевой идеал. Тогда существуют такие простые идеалы $\mathfrak{p}_1, \dots, \mathfrak{p}_k$, что $\mathfrak{p}_1 \mathfrak{p}_2 \dots \mathfrak{p}_k \subset I$.

Доказательство. Предположим противное, то есть, что существуют идеалы, для которых не выполнено условие леммы. Выберем среди таких максимальный (мы можем так сделать в силу нётеровости кольца), назовём его I . Заметим, что I — не простой идеал, что означает, что $\exists x, y: \notin I: xy \in I$. Кроме того, I — собственный идеал. Значит,

$$(x) \subsetneq (x) + I, (y) \subsetneq I + (y),$$

Тогда для идеалов $I + (x)$ и $I + (y)$ условие леммы уже выполняется, то есть $\exists \mathfrak{p}_1, \dots, \mathfrak{p}_k$ и $\mathfrak{q}_1, \dots, \mathfrak{q}_m$ такие, что $\mathfrak{p}_1 \dots \mathfrak{p}_k \subset I + (x)$, $\mathfrak{q}_1 \dots \mathfrak{q}_m \subset I + (y)$. Но тогда мы имеем

$$\mathfrak{p}_1 \dots \mathfrak{p}_k \mathfrak{q}_1 \dots \mathfrak{q}_m \subset (I + (x))(I + (y)) \subset I, \text{ так как } xy \in I,$$

что даёт нам противоречие. \square

Определение 28. Пусть K/\mathbb{Q} — конечное расширение, $0 \neq I \subset \mathcal{O}_K$ — идеал. Тогда введём

$$I^{-1} \stackrel{\text{def}}{=} \{x \in K \mid xI \subset \mathcal{O}_K\}.$$

Свойства:

1. $x, y \in I^{-1} \implies x + y \in I^{-1}$.
2. Если $x \in I^{-1}$, а $a \in \mathcal{O}_K$, то $ax \in I^{-1}$.

Доказательство. Действительно, $(x + y)I \subset xI + yI \subset \mathcal{O}_K$. Если $xI \subset \mathcal{O}_K$, то для $a \in \mathcal{O}_K$ мы получим $axI = xaI = xI$, так как I — идеал в \mathcal{O}_K . \square

Замечание. Заметим, что I^{-1} — \mathcal{O}_K -модуль. Кроме того, если $a \in I$, то aI^{-1} — идеал в \mathcal{O}_K . В частности, aI^{-1} конечнопорожден, а значит, aI^{-1} — конечнопорожденный \mathcal{O}_K -модуль.

Пример 8. Пусть $K = \mathbb{Q}$, тогда $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}$ и любой идеал $I \subset \mathbb{Z}$ имеет вид $I = (a)$. Тогда $(a)^{-1} = a^{-1}\mathbb{Z}$.

Лемма 16. Пусть $I \subset \mathcal{O}_K$ — ненулевой собственный идеал. тогда $I^{-1} \neq \mathcal{O}_K$.

Доказательство. Докажем, что существует $x \in K$ такой, что $x \notin \mathcal{O}_K$ и при этом $xI \subset \mathcal{O}_K$. Выберем в I ненулевой элемент a . Рассмотрим $(a) \subset I$, по лемме 15 найдутся такие ненулевые $\mathfrak{p}_1, \dots, \mathfrak{p}_k \in \text{Срес } \mathcal{O}_K$, что $\mathfrak{p}_1 \dots \mathfrak{p}_k \subset (a)$.

Так как I — собственный, а кольцо \mathcal{O}_K одномерно, I лежит в некотором простом идеале \mathfrak{p} . Так мы получаем цепочку включений

$$\mathfrak{p}_1 \dots \mathfrak{p}_k \subset (a) \subset \mathfrak{p} \implies \exists i: \mathfrak{p}_i \subset \mathfrak{p}.$$

Так как оба идеала максимальны, это не включение, а равенство. Не умаляя общности, пусть $\mathfrak{p}_1 = \mathfrak{p}$. Теперь, пусть $k = 1$. Тогда мы имеем $\mathfrak{p} \subset (a) \subset I \subset \mathfrak{p} \implies I = \mathfrak{p} = (a) \implies I^{-1} = a^{-1}\mathcal{O}_K$. Значит, $x = a^{-1} \notin \mathcal{O}_K$, так как иначе $I = \mathcal{O}_K$.

Теперь пусть $k \geq 2$, выберем k минимально возможным. Тогда

$$\mathfrak{p}_2 \dots \mathfrak{p}_k \not\subset (a) \implies \exists b \in \mathfrak{p}_2 \dots \mathfrak{p}_k \setminus (a).$$

Тогда мы можем взять $x = \frac{b}{a}$ и он подойдёт. В самом деле,

$$xI = \frac{b}{a}I \subset \frac{b}{a}\mathfrak{p}_1 \underbrace{\subset}_{b \in \mathfrak{p}_2 \dots \mathfrak{p}_k} \frac{\mathfrak{p}_1 \dots \mathfrak{p}_k}{a} \subset \frac{(a)}{a} = \mathcal{O}_K$$

Остаётся проверить, что $\frac{b}{a} \notin \mathcal{O}_K$. В самом деле, если $\frac{b}{a} \in \mathcal{O}_K$, то $b \in (a)$, что противоречит выбору b . \square

Замечание. Ясно, что включение $\mathcal{O}_K \subset I^{-1}$ верно всегда, так как просто по определению идеала: $\forall x \in \mathcal{O}_K \ xI \subset \mathcal{O}_K$

Возьмём $\mathfrak{p} \in \text{Срес } \mathcal{O}_K$ и рассмотрим $\mathfrak{p}\mathfrak{p}^{-1}$. С одной стороны, это идеал в \mathcal{O}_K , причём он содержит \mathfrak{p} .

Лемма 17. Пусть $\mathfrak{p} \in \text{Срес } \mathcal{O}_K$, тогда $\mathfrak{p}\mathfrak{p}^{-1} = (1) = \mathcal{O}_K$.

Доказательство. Предположим противное, тогда в силу максимальной идеала \mathfrak{p} мы имеем $\mathfrak{p}\mathfrak{p}^{-1} = \mathfrak{p}$. Пусть $\mathfrak{p} = (u_1, \dots, u_n)$, тогда если $\alpha \in \mathfrak{p}^{-1} \setminus \mathcal{O}_K$ (тут мы пользуемся леммой 16), то $\alpha u_1 \in \mathfrak{p}$ (так как мы предположили, что $\mathfrak{p}\mathfrak{p}^{-1} = \mathfrak{p}$) и мы можем написать систему уравнений

$$\begin{cases} \alpha u_1 = \sum_{i=1}^n a_{1i} u_i \\ \alpha u_2 = \sum_{i=1}^n a_{2i} u_i \\ \vdots \\ \alpha u_n = \sum_{i=1}^n a_{ni} u_i \end{cases}$$

В матричной форме эта система будет иметь вид

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \alpha - a_{11} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \alpha - a_{22} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \alpha - a_{nn} \end{pmatrix}}_{=B} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix} = 0.$$

Значит, $\det B = 0$, что даёт нам унитарный многочлен с коэффициентами из \mathcal{O}_K , обнуляющий α . Тогда, так как \mathcal{O}_K — целостно, $\alpha \in \mathcal{O}_K$, противоречие. \square

Теперь мы достаточно подготовились, чтоб доказать, что в кольце \mathcal{O}_K любой идеал единственным образом раскладывается в произведение простых.

Теорема 20 (Основная теорема арифметики для идеалов). Пусть $0 \neq I \subset \mathcal{O}_K$ — идеал. Тогда I однозначно (с точностью до перестановки сомножителей) раскладывается в произведение простых идеалов.

Доказательство. Как обычно, проходит в два этапа.

Существование: Предположим, что существуют идеалы, не раскладывающиеся в произведение простых. Среди таких идеалов возьмём максимальный, обозначим его I (мы можем так сделать, потому что \mathcal{O}_K — нётерово кольцо). Он содержится в некотором максимальном идеале $\mathfrak{p} \in \text{Spec } \mathcal{O}_K$. Тогда $I\mathfrak{p}^{-1} \subset \mathfrak{p}\mathfrak{p}^{-1} = \mathcal{O}_K$ — идеал. Значит, нам остаётся показать, что $I\mathfrak{p}^{-1} \neq I$ (кроме того, ясно, что $I \subset \mathfrak{p}^{-1}I$, надо просто показать, что равенства не бывает). Покажем, что $II^{-1} = \mathcal{O}_K$, тогда мы сможем просто домножить и всё получится.

Лемма 18. Для любого идеала $I \subset \mathcal{O}_K$ мы имеем $II^{-1} = \mathcal{O}_K$.

Доказательство. Пусть это не так, тогда $II^{-1} \subset \mathfrak{q}$, где \mathfrak{q} — максимальный идеал. Тогда

$$II^{-1}\mathfrak{q}^{-1} \subset \mathfrak{q}\mathfrak{q}^{-1} = \mathcal{O}_K \implies I^{-1}\mathfrak{q}^{-1} \subset I^{-1}$$

Так как \mathfrak{q}^{-1} не совпадает с \mathcal{O}_K , мы можем выбрать $\alpha \in \mathfrak{q}^{-1} \setminus \mathcal{O}_K$. Прodelывая рассуждение, аналогичное лемме 17 мы получаем, что $\alpha \in \mathcal{O}_K$, что даёт нам противоречие. \square

Итак, если $I\mathfrak{p}^{-1} = I$, то $\mathfrak{p}^{-1} = \mathcal{O}_K$, что противоречит лемме 16. Значит, $I \subset I\mathfrak{p}^{-1}$, следовательно мы можем разложить $I\mathfrak{p}^{-1}$ в произведение простых:

$$I\mathfrak{p}^{-1} = \mathfrak{p}_1\mathfrak{p}_2 \dots \mathfrak{p}_k \implies I = \mathfrak{p}_1\mathfrak{p}_2 \dots \mathfrak{p}_k \cdot \mathfrak{p},$$

что и требовалось.

Единственность: Пусть $\mathfrak{p}_1 \dots \mathfrak{p}_m = \mathfrak{q}_1 \dots \mathfrak{q}_n$, тогда $\mathfrak{p}_1\mathfrak{p}_2 \dots \mathfrak{p}_m \subset \mathfrak{q}_1 \implies \exists i: \mathfrak{p}_i \subset \mathfrak{q}_i$, а так как они максимальны, $\mathfrak{p}_i = \mathfrak{q}_i$, что даёт нам противоречие. \square

Определение 29. Пусть $I \subset K$. I называется *дробным идеалом*, если $\exists x \neq 0: xI \subset \mathcal{O}_K$ — идеал.

Пример 9. I^{-1} — дробный идеал.

Предложение 13. Ненулевые дробные идеалы образуют группу по умножению.

Доказательство. Легко заметить, что произведение дробных идеалов — дробный идеал. Обратный определяется как и раньше:

$$I^{-1} \stackrel{\text{def}}{=} \{x \in K \mid xI \subset \mathcal{O}_K\}.$$

Нетрудно убедиться в том, что $II^{-1} = \mathcal{O}_K$. \square

Из теоремы 20 следует, что любой дробный идеал раскладывается в произведение простых идеалов (возможно, с отрицательными степенями). Действительно, пусть J — дробный идеал, тогда для некоторого $x \in K$ $xJ = I$ — идеал в \mathcal{O}_K , тогда

$$J = (x)^{-1}I = \mathfrak{p}_1^{-1} \dots \mathfrak{p}_k^{-1} \mathfrak{q}_1 \dots \mathfrak{q}_m.$$

Значит, группа дробных идеалов — свободная абелева группа, образующие которой — элементы $\text{Spec } \mathcal{O}_K$.

Пример 10. Для кольца \mathbb{Z} дробные идеалы соответствуют рациональным числам.

Домашнее задание 2. Задачи:

1. Докажите, что кольцо \mathcal{O}_K факториально тогда и только тогда, когда \mathcal{O}_K — кольцо главных идеалов.
2. Разложите число $33 + 11\sqrt{-7}$ на неприводимые в кольце \mathcal{O}_K , где $K = \mathbb{Q}(\sqrt{-7})$.
3. Пусть $\mathfrak{p} \in \text{Spec } \mathcal{O}_K$. Введём на группе дробных идеалов *нормирование* следующим образом: $v_{\mathfrak{p}}(I) =$ степень, с которой \mathfrak{p} входит в разложение дробного идеала I . Иными словами,

$$I = \mathfrak{p}^{v_{\mathfrak{p}}(I)} \cdot \mathfrak{q}_1 \cdot \mathfrak{q}_2 \cdot \dots \cdot \mathfrak{q}_m.$$

Для $a \in K^*$ определим $v_{\mathfrak{p}}(a) \stackrel{\text{def}}{=} v_{\mathfrak{p}}((a))$. Так вот, докажите, что:

- $v_{\mathfrak{p}}(I + J) = \min(v_{\mathfrak{p}}(I), v_{\mathfrak{p}}(J))$.
- $v_{\mathfrak{p}}(I \cap J) = \max(v_{\mathfrak{p}}(I), v_{\mathfrak{p}}(J))$.
- $v_{\mathfrak{p}}(a + b) \geq \min(v_{\mathfrak{p}}(a), v_{\mathfrak{p}}(b))$ и равенство достигается в случае $v_{\mathfrak{p}}(a) \neq v_{\mathfrak{p}}(b)$.
- $v_{\mathfrak{p}}(IJ) = v_{\mathfrak{p}}(I) + v_{\mathfrak{p}}(J)$.
- $v_{\mathfrak{p}}(ab) = v_{\mathfrak{p}}(a) + v_{\mathfrak{p}}(b)$.

Таким образом, $v_{\mathfrak{p}}$ — гомоморфизм $K^* \rightarrow \mathbb{Z}$. Этот гомоморфизм называют *дискретным нормированием*, соответствующим идеалу \mathfrak{p} .

2.8 Дискриминант

Определение 30. Пусть K/F — конечное сепарабельное расширение, $[K : F] = n$ и $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in K$. Тогда *дискриминант* набора $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ — это

$$\text{disc}(\alpha_1, \dots, \alpha_n) \stackrel{\text{def}}{=} \det(\text{Tr}_{K/F}(\alpha_i \alpha_j)).$$

Так как расширение K/F сепарабельно, у нас есть ровно $n = [K : F]$ вложений $\sigma_1, \dots, \sigma_n : K \rightarrow \mathbb{C}$ (на самом деле, мы знаем, что в \mathbb{Q}^{alg}).

Предложение 14. $\text{disc}(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = (\det(\sigma_i(\alpha_j)))^2$.

Доказательство. Положим $(\sigma_i(\alpha_j))_{i,j=1}^n = A$ и рассмотрим $A^t A$, тогда

$$(A^t A)_{ij} = \sum_{k=1}^n \sigma_k(\alpha_i) \sigma_k(\alpha_j) = \sum_{k=1}^n \sigma_k(\alpha_i \alpha_j) = \text{Tr}_{K/F}(\alpha_i \alpha_j).$$

□

Посмотрим теперь, как дискриминант меняется при линейном преобразовании. Пусть $(\beta_1, \dots, \beta_n) = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)M$, $M \in M_n(F)$.

Предложение 15. $\text{disc}(\beta_1, \dots, \beta_n) = \text{disc}(\alpha_1, \dots, \alpha_n) \cdot (\det M)^2$.

Доказательство. Действительно, это напрямую следует из предложения 14:

$$\text{disc}(\beta_1, \dots, \beta_n) = \det(\sigma_i(\beta_j))^2 = \det(\sigma_i(\alpha_j)M)^2 = \text{disc}(\alpha_1, \dots, \alpha_n) \cdot (\det M)^2.$$

□

Предложение 16. $\text{disc}(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = 0 \Leftrightarrow \alpha_1, \dots, \alpha_n$ — линейно зависимы.

Доказательство. Пусть $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ — линейно зависимы, e_1, \dots, e_n — базис K/F . Тогда

$$(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = (e_1, \dots, e_n)M, \quad \det M = 0.$$

Значит, по предложению 15 мы имеем $\text{disc}(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = 0$.

Теперь докажем в обратную сторону. Предположим, что $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ — линейно независимы, но $\text{disc}(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = \det(\text{Tr}_{K/F}(\alpha_i \alpha_j)) = 0$. Рассмотрим систему линейных уравнений

$$\text{Tr}_{K/F}((x_1 \alpha_1 + \dots + x_n \alpha_n) \alpha_j) = 0, \quad 1 \leq j \leq n.$$

Так как матрица коэффициентов этой системы — $\text{Tr}_{K/F}(\alpha_i \alpha_j)$, а она вырождена, система имеет нетривиальное решение (x_1, \dots, x_n) . Так как $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ — линейно независимы,

$$y = x_1 \alpha_1 + \dots + x_n \alpha_n \neq 0.$$

С другой стороны, $\text{Tr}_{K/F}(y \alpha_j) = 0 \forall j$. Так как α_i образуют базис K/F , по линейности мы получаем, что $\text{Tr}_{K/F}(yu) = 0 \forall u \in K$. Но, так как расширение K/F сепарабельно, $\text{Tr}_{K/F}$ должен быть невырожденной формой⁵.

□

Лемма 19. Пусть $B \subset A$ — свободные абелевы группы ранга n . Пусть $\omega_1, \dots, \omega_n$ — базис A , а $\left\{ \sum_{j=1}^n a_{ij} \omega_j \right\}$ — базис B , $a_{ij} \in \mathbb{Z}$. Тогда $|A/B| = |\det(a_{ij})|$.

Доказательство. Приведём матрицу (a_{ij}) нормальной форме Смита. Перечислим теперь элементы A/B : это в точности элементы $x_1 \omega_1 + \dots + x_n \omega_n$, $0 \leq x_i \leq a_{ii} - 1$. Если мы докажем, что это в точности все попарно-различные элементы группы A/B , то утверждение будет ясно.

Пусть $\sum_{i=1}^n x_i \omega_i = \sum_{i=1}^n y_i \omega_i$, тогда $\sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \omega_i \in B$. Посмотрим на коэффициент при ω_{11} , он может получаться только из первой строки матрицы (так как матрица верхнетреугольная), тогда $\ell a_{11} = x_1 - y_1$, но это равенство возможно только в случае, когда $x_1 = y_1$ (так как есть ограничения на x_i и y_i). Далее мы проделаем аналогичное рассуждение $\sum_{i=2}^n (x_i - y_i) \omega_i \in B$ и в итоге получим, что все такие элементы различны.

Теперь рассмотрим $a = x_1 \omega_1 + \dots + x_n \omega_n$, $x_i \in \mathbb{Z}$. Поделим с остатком: $x_1 = a_{11}q + r$, $0 \leq r < a_{11}$, и рассмотрим $x_1 \omega_1 + \dots + x_n \omega_n - q(a_{11} \omega_1 + \dots + a_{1n} \omega_n) = r \omega_1 + x'_2 \omega_2 + \dots$. Так как мы вычли из a элемент из B , класс $\bar{a} \in A/B$ не изменился, а старшим коэффициентом стал r , лежащий в нужном диапазоне. Продолжая в том же духе, мы получим, что все коэффициенты лежат в нужном диапазоне. □

Как мы помним из теоремы 14, \mathcal{O}_K — конечнопорожденная свободная абелева группа ранга $n = [K : \mathbb{Q}]$ и $\mathcal{O}_K = \bigoplus_{i=1}^n \mathbb{Z} \omega_i$, где $\{\omega_i\}$ — целый базис.

Определение 31. Пусть K/\mathbb{Q} — расширение степени n , $\mathcal{O}_K = \bigoplus_{i=1}^n \mathbb{Z} \omega_i$. Тогда

$$\text{disc}(K) \stackrel{\text{def}}{=} \text{disc}(\omega_1, \dots, \omega_n).$$

Замечание. Дискриминант поля не зависит от выбора целого базиса. Действительно, если у нас есть какой-то другой целый базис (u_1, \dots, u_n) , то

$$(\omega_1, \dots, \omega_n)M = (u_1, \dots, u_n), \quad M \in \text{SL}_n(\mathbb{Z}).$$

$$(u_1, \dots, u_n)M^{-1} = (\omega_1, \dots, \omega_n)$$

$$\text{disc}(u_1, \dots, u_n) = \text{disc}(\omega_1, \dots, \omega_n) \cdot \underbrace{(\det M)^2}_{=1}$$

Определение 32 (Индекс целого алгебраического числа). Пусть $K = \mathbb{Q}(\theta)$, $\theta \in \mathcal{O}_K$, положим $\text{ind}(\theta) = [\mathcal{O}_K : \mathbb{Z}[\theta]] = |\mathcal{O}_K/\mathbb{Z}[\theta]|$.

Предложение 17. В описанной выше ситуации $\text{disc}(1, \theta, \dots, \theta^{n-1}) = \text{ind}(\theta)^2 \cdot \text{disc}(K)$.

Доказательство. Пусть $\omega_1, \dots, \omega_n$ — целый базис. Тогда

$$(1, \theta, \dots, \theta^{n-1}) = (\omega_1, \dots, \omega_n)M \implies \text{disc}(1, \dots, \theta^{n-1}) = \text{disc}(K)(\det M)^2.$$

Нетрудно заметить, что по лемме 19 для $\mathbb{Z}[\theta] = B \subset A = \mathcal{O}_K$ мы имеем $|\det M| = \text{ind}(\theta)$.

□

⁵Этим утверждением из теорий полей мы пользуемся без доказательств. Доказательство этого утверждения можно прочитать в S. Lang “Algebra”.

Пример 11. Пусть $K = \mathbb{Q}(\theta)$, где $\theta^3 - \theta - 1 = 0$. Как мы помним из домашнего задания, $\text{disc}(1, \theta, \theta^2) = -23$. Пользуясь предложением 17 мы получаем, что $-23 = (\text{ind}(\theta))^2 \cdot \text{disc } K \implies \text{ind } \theta = 1$, из чего следует, что $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\theta]$.

Пример 12. Пусть $K = \mathbb{Q}(\theta)$, где $\theta^3 - \theta - 4 = 0$. Как мы помним, $\text{disc}(1, \theta, \theta^2) = -4 \cdot 107 = (\text{ind } \theta)^2 \cdot \text{disc } K$. Тогда $\text{ind } \theta = 1$ или $\text{ind } \theta = 2$. С другой стороны, так как $\frac{\theta + \theta^2}{2} \in \mathcal{O}_K, \notin \mathbb{Z}[\theta]$, $\text{ind}(\theta) \neq 1$. Значит, $\text{ind } \theta = 2$, из чего мы имеем разложение

$$\mathcal{O}_K = \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}\theta \oplus \mathbb{Z}\frac{\theta + \theta^2}{2}.$$

Домашнее задание 3. Задачи:

1. Предположим, что K/F — расширение Галуа, $[K : F]$ — нечётна. Докажите, что тогда для любого базиса e_1, \dots, e_n расширения K/F будет выполнено $\text{disc}(e_1, \dots, e_n) \in F^{*2}$.
2. Рассмотрим $K = \mathbb{Q}(\sqrt[p]{1})$. Тогда $\zeta, \zeta^2, \dots, \zeta^{p-1}$ образуют базис K/\mathbb{Q} . Докажите, что $|\text{disc}(\zeta, \zeta^2, \dots, \zeta^{p-1})| = p^{p-2}$. *Hint:* тут можно действовать строго согласно определению 30.
3. Пусть K/\mathbb{Q} — расширение степени n , $K = \mathbb{Q}(\theta)$, где $\theta^n + a_{n-1}\theta^{n-1} + \dots + a_0 = 0$ и пусть p — такое простое число, что $v_p(a_0) = 1$ и $v_p(a_i) \geq 1$. Докажите, что тогда $p \nmid \text{ind}(\theta)$.
4. Докажите, что если $K = \mathbb{Q}(\sqrt[p]{1})$, где p — простое, то $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\zeta]$, где $\zeta^p = 1$.
5. Пусть $\mathfrak{p}_1, \dots, \mathfrak{p}_k$ — максимальные идеалы кольца \mathcal{O}_K , $n_1, \dots, n_k \in \mathbb{Z}$. Докажите, что существует $\alpha \in K^*$: $v_{\mathfrak{p}_i}(\alpha) = n_i \forall 1 \leq i \leq k$.
6. Пусть $I \subset \mathcal{O}_K$ — идеал, J — дробный идеал. Докажите, что $\exists x \in K^*$: $xJ + I = \mathcal{O}_K$.
7. Докажите, что любой дробный идеал порождается двумя элементами.

Приведём сейчас другое, конструктивное доказательство того, что \mathcal{O}_K — конечнопорожденная абелева группа.

Возьмем $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n \in \mathcal{O}_K$, где $\omega_1, \dots, \omega_n$ — базис K на \mathbb{Q} . Тогда $\text{disc}(\omega_1, \dots, \omega_n) \in \mathbb{Z}$, возьмем набор $(\omega_1, \dots, \omega_n)$ с минимальным модулем дискриминанта. Докажем, что тогда он и будет целым базисом.

Возьмем $x \in \mathcal{O}_K$, $x = \sum a_i \omega_i$, $a_i \in \mathbb{Q}$ и покажем, что $a_i \in \mathbb{Z}$. Предположим противное, не умаляя общности $a_1 \notin \mathbb{Z}$.

$$x \in \mathcal{O}_K \implies \sum \{a_i\} \omega_i = x - \sum [a_i] \omega_i \in \mathcal{O}_K.$$

Перейдём к набору $(\sum \{a_i\} \omega_i, \omega_2, \dots, \omega_n)$. Покажем, что модуль его дискриминанта уменьшился. Действительно,

$$(\sum \{a_i\} \omega_i, \omega_2, \dots, \omega_n) = (\omega_1, \dots, \omega_n) \cdot \begin{pmatrix} \{a_1\} & 0 & \dots & 0 \\ \{a_2\} & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \{a_n\} & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

а определитель матрицы, написанной справа равен $\{a_1\} \leq 1$ (так как матрица нижнетреугольная).

Теорема 21. Пусть p — простое, а $K = \mathbb{Q}(\sqrt[p]{1})$. Тогда $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\zeta]$, где $\zeta^p = 1$.

Доказательство. Вычислим сначала $\text{disc}(1, \zeta, \dots, \zeta^{p-2}) = \det(\text{Tr}(\zeta^{i+j}))_{i,j=1}^n$. Ясно, что для каждого $i = 2, \dots, p-2$ найдётся единственный $j = 2, \dots, p-2$ такой, что $i+j \equiv 0 \pmod{p}$ ⁶. Значит, в каждом столбце, кроме второго, будет стоять элемент $\text{Tr}(\zeta^0) = \text{Tr}(1) = [K : \mathbb{Q}] = p-1$, причем ровно один раз (и аналогичное верно для строк).

Минимальным многочленом для ζ является

$$\frac{t^p - 1}{t - 1} = 1 + \dots + t^{p-1},$$

⁶ Действительно, это $p-i$.

откуда $\text{Tr}(\zeta^k) = 0, k = 1, \dots, p-2$. Значит, нам нужно вычислить вот такой определитель:

$$\det \begin{pmatrix} p-1 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -1 & -1 & p-1 & \dots & -1 \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} p-1 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -1 & -1 & p-1 & \dots & -1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} p & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & p & \dots & 0 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} p & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & p & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

Отсюда уже ясно, что $\text{disc}(1, \zeta, \dots, \zeta^{p-2}) = (-1)^{\frac{p-1}{2}} p^{p-2}$.

Теперь воспользуемся одной из домашних задач. Заметим, что в нашем случае совершенно ясно, что минимальный многочлен ζ Эйзенштейнов, а тогда $\text{ind}(\zeta) \nmid p$. С другой стороны, по предложению 17 $\text{ind}(\zeta) \mid \text{disc}(1, \zeta, \dots, \zeta^{p-2}) (-1)^{\frac{p-1}{2}} p^{p-2}$. Значит, $\text{ind}(\theta) = 1$ то есть

$$|\mathcal{O}_K/\mathbb{Z}[\theta]| = 1 \implies \mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\theta].$$

□

Теорема 22 (Д/З №7, задача 2). Пусть $K = \mathbb{Q}(\sqrt[p^n]{1})$, то $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\zeta]$, где $\zeta^{p^n} = 1$

Доказательство. В доказательстве первообразный корень степени m мы будем обозначать, как ζ_m . Воспользуемся задачей 4 Д/З №5, то есть вот таким фактом

Лемма 20. Пусть K/F — конечное сепарабельное расширение, $K = F(\theta)$, $[K : F] = n$. Докажите, что

$$\text{disc}(1, \theta, \theta^2, \dots, \theta^{n-1}) = \prod_{i \neq j} (\sigma_i(\theta) - \sigma_j(\theta)) = N_{K/F}(f'(\theta)), \text{ где}$$

f — минимальный многочлен θ .

Минимальный многочлен ζ_{p^n} — это

$$\Phi_{p^n}(x) = \frac{x^{p^n} - 1}{x^{p^{n-1}} - 1}, \quad \text{disc}(1, \zeta_{p^n}, \dots, \zeta_{p^n}^{\varphi(p^n)-1}).$$

Значит, нам надо вычислить норму числа

$$\Phi'_{p^n}(\zeta_{p^n}) = \frac{p^n \zeta_{p^n}^{p^n-1}}{\zeta_{p^{n-1}}^{p^{n-1}} - 1} = \frac{p^n \zeta_{p^n}^{-1}}{\zeta_{p^{n-1}}^{p^{n-1}} - 1} = \frac{p^n \zeta_{p^n}^{-1}}{\zeta_p - 1}.$$

так как $\zeta_{p^n}^{p^{n-1}} = \zeta_p$. Теперь, так как $p^n \in \mathbb{Q}$, а $[\mathbb{Q}(\zeta_{p^n}) : \mathbb{Q}] = p^n - p^{n-1}$, мы имеем

$$N_{\mathbb{Q}(\zeta_{p^n})/\mathbb{Q}}(p^n \zeta_{p^n}^{-1}) = p^{n(p^n - p^{n-1})}.$$

Так как $N_{\mathbb{Q}(\zeta_p)/\mathbb{Q}}(\zeta_p - 1) = p$. Тогда мы можем вычислить норму телескопически. Так как $\zeta_p - 1 \in \mathbb{Q}(\zeta_p)$, а $[\mathbb{Q}(\zeta_{p^n}) : \mathbb{Q}(\zeta_p)] = p^{n-1}$, мы имеем

$$N_{\mathbb{Q}(\zeta_{p^n})/\mathbb{Q}}(\zeta_p - 1) = N_{\mathbb{Q}(\zeta_p)/\mathbb{Q}}(N_{\mathbb{Q}(\zeta_{p^n})/\mathbb{Q}(\zeta_p)}(\zeta_p - 1)) = N_{\mathbb{Q}(\zeta_p)/\mathbb{Q}}(\zeta_p - 1)^{p^{n-1}} = (N_{\mathbb{Q}(\zeta_p)/\mathbb{Q}}(\zeta_p - 1))^{p^{n-1}} = p^{p^{n-1}}.$$

Таким образом, мы наконец получаем, что

$$N_{\mathbb{Q}(\zeta_{p^n})/\mathbb{Q}}\left(\frac{p^n \zeta_{p^n}^{-1}}{\zeta_p - 1}\right) = \frac{p^{n(p^n - p^{n-1})}}{p^{p^{n-1}}} = p^{p^{n-1}(np - n - 1)}.$$

□

Напоминание про нормальную форму Смитта:

Пусть $B \subset A$ — свободные абелевы группы ранга n , причем $A = \bigoplus \mathbb{Z}x_i$, $B = \langle \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j, 1 \leq i \leq n \rangle$. Тогда мы можем явно вычислить задание факторгруппы A/B образующими и соотношениями.

Рассмотрим матрицу

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Рассмотрим автоморфизм группы A , который переводит x_1 в $x_1 + cx_2$, $c \in \mathbb{Z}$, а остальные образующие переводит в себя. Что произойдет с матрицей в результате этого изоморфизма? Ко второму столбцу прибавится первый, умноженный на c . Аналогично мы можем делать для любых столбцов. Кроме того, мы можем менять их местами посредством изоморфизмов вида $x_1 \mapsto x_2, x_2 \mapsto x_1$. При таких преобразованиях факторгруппа B/A будет оставаться такой же, так как: $A/B \cong A/f(B)$. Соответственно, с помощью таких операций матрицу мы можем диагонализировать. В итоге мы получим диагональную матрицу

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha_{nn} \end{pmatrix}$$

2.9 Норма идеала

Определение 33. Пусть K/\mathbb{Q} — конечное расширение, $0 \neq I \subset \mathcal{O}_K$ — идеал. Тогда, как мы знаем из теоремы 7, $|\mathcal{O}_K/I| < \infty$. *Нормой идеала I* мы будем называть целое число

$$N_{K/\mathbb{Q}}(I) \stackrel{\text{def}}{=} |\mathcal{O}_K/I|$$

Замечание. Вообще говоря, норма идеала определяется для любого дедекиндова кольца, соответствующего некоторому расширению и обычно является идеалом. В нашем случае мы рассматриваем кольцо целых, где для любого идеала можно выбрать наименьшую по модулю неотрицательную порождающую, поэтому у нас норма — число.

Хотелось бы, чтоб норма главного идеала была равна норме порождающего его элемента (в смысле нормы для расширения полей).

Предложение 18. Пусть $a \in \mathcal{O}_K$, тогда $N((a)) = |N_{K/\mathbb{Q}}(a)|$.

Доказательство. Пусть $\omega_1, \dots, \omega_n$ — целый базис \mathcal{O}_K , а

$$a\omega_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}\omega_j, \quad b_{ij} \in \mathbb{Z}$$

Тогда с одной стороны мы посчитали оператор умножения на a на базисных векторах, то есть по определению $N_{K/\mathbb{Q}}(a) = \det((b_{ij}))$.

С другой стороны, по предложению 19 мы имеем $|\det(b_{ij})| = |\mathcal{O}_K/a\mathcal{O}_K|$, что и требовалось. \square

Заметим, что тогда мы получаем и мультипликативность для главных идеалов:

$$N((a))N((b)) = |N_{K/\mathbb{Q}}(a)||N_{K/\mathbb{Q}}(b)| = |N_{K/\mathbb{Q}}(ab)| = N((ab)).$$

Хотелось бы теперь обобщить это на произвольные идеалы. Для этого нам понадобятся задачи из ДЗ 3.

Лемма 21 (Задача 5 из ДЗ 3). Пусть $\mathfrak{p}_1, \dots, \mathfrak{p}_k$ — максимальные идеалы кольца \mathcal{O}_K , $n_1, \dots, n_k \in \mathbb{Z}$. Докажите, что существует $\alpha \in K^*$: $v_{\mathfrak{p}_i}(\alpha) = n_i \forall 1 \leq i \leq k$.

Доказательство. Заметим, что идеалы $\mathfrak{p}_i^{n_i}$ попарно взаимнопросты. Выберем $x_i \in \mathfrak{p}_i^{n_i} \setminus \mathfrak{p}_i^{n_i+1}$. Тогда по КТО существует $x \equiv x_i \pmod{\mathfrak{p}_i^{n_i+1}}$. Тогда

$$v_{\mathfrak{p}_i}(x) = v_{\mathfrak{p}_i}((x - x_i) + x_i) = \min(v_{\mathfrak{p}_i}(x - x_i), v_{\mathfrak{p}_i}(x_i)) = \min(n_i, n_i + 1) = n_i.$$

□

Лемма 22 (Задача 6 из ДЗ 3). Пусть $I \subset \mathcal{O}_K$ — идеал, J — дробный идеал. Докажите, что $\exists x \in K^*: xJ + I = \mathcal{O}_K$.

Доказательство. Во-первых, J сразу можно полагать целым, так как мы можем сначала домножить его на элемент, превращающий его в целый, а потом уже что-то с ним делать. Разложим I в произведение простых:

$$I = \mathfrak{p}_1^{k_1} \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_m^{k_m}.$$

Соответственно, легко найти $y \in K^*: v_{\mathfrak{p}_i}(yJ) = 0$. Проблема в том, что yJ может оказаться не целым идеалом. Предположим, что это так.

$$yJ = \prod_{i=1}^{\ell} \mathfrak{q}_i^{-r_i} \cdot \prod_{j=1}^r \mathfrak{r}_j^{\ell_j}, \text{ где } \ell_i \geq 0, r_i \geq 0.$$

По лемме 21 $\tilde{y} \in \mathcal{O}_K: v_{\mathfrak{q}_i}(\tilde{y}) = r_i, v_{\mathfrak{p}_i}(\tilde{y}) = 0$, тогда ясно, что $y\tilde{y}J$ — целый идеал, который не делится на \mathfrak{p}_i , следовательно он взаимнопрост с I , что и требовалось. □

Теорема 23 (Задача 7 из ДЗ 3). Любой дробный идеал I порождается двумя элементами.

Доказательство. Возьмем $x \in \mathcal{O}_K$ такой, что $xI^{-1} \subset \mathcal{O}_K$ — целый идеал. Тогда по лемме 22 (тут у нас xI^{-1} — целый идеал, I^{-1} — дробный) найдётся $y \in K^*$ такой, что

$$xI^{-1} + yI^{-1} = \mathcal{O}_K \implies xI^{-1}I + yI^{-1}I = I \implies I = (x) + (y) = (x, y).$$

□

Домашнее задание 4 (Осторожно, открытая задача). Существует ли кольцо, в котором каждый идеал порождается тремя элементами, причём, есть идеал, который не порождается двумя элементами.

Теорема 24 (Мультипликативность нормы идеала). Если I, J — два ненулевых идеала в \mathcal{O}_K , то для их норм верно равенство $N(IJ) = N(I)N(J)$.

Доказательство. Сравним индексы: $|\mathcal{O}_K/IJ| = |\mathcal{O}_K/I| \cdot |I/IJ|$. Значит, остаётся показать, что $|\mathcal{O}_K/J| = |I/IJ|$. По лемме 22 найдём $x \in K^*: xI + J = \mathcal{O}_K$. Тогда воспользуемся теоремой о гомоморфизме и взаимной простотой:

$$|\mathcal{O}_K/J| = |(xI + J)/J| = |xI/xI \cap J| = |xI/xIJ| = |I/IJ|.$$

□

2.10 Индекс ветвления и степень инерции

Определение 34. Возьмем простое число $p \in \mathbb{Z}$ и рассмотрим главный идеал $(p) = p\mathbb{Z} \subset \mathbb{Z}$. Этот же идеал мы можем рассматривать, как главный идеал в кольце \mathcal{O}_K . Там он уже не обязательно будет простым, но будет раскладываться в произведение простых:

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1^{e_1} \mathfrak{p}_2^{e_2} \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_k^{e_k},$$

причем набор идеалов \mathfrak{p}_i будет своим для каждого простого числа p (т.е. для различных простых чисел эти наборы не будут пересекаться, так как $p\mathcal{O}_K$ и $q\mathcal{O}_K$ взаимнопросты для простых p и q). Тогда число e_i называют индексом ветвления идеала \mathfrak{p}_i .

Пусть теперь $\mathfrak{p} \in \text{Specm}(\mathcal{O}_K)$, тогда $\mathfrak{p} \cap \mathbb{Z}$ — простой идеал в \mathbb{Z} , значит $\mathfrak{p} \cap \mathbb{Z} = (p)$ для некоторого простого $p \in \mathbb{Z}$, при том $(p) \subset \mathfrak{p} \implies (p)\mathfrak{p}^{-1} \subset \mathcal{O}_K$ — идеал. Его мы можем разложить на простые:

$$(p)\mathfrak{p}^{-1} = \mathfrak{p}_1^{e_1} \mathfrak{p}_2^{e_2} \cdots \mathfrak{p}_k^{e_k} \implies (p) = \mathfrak{p} \cdot \mathfrak{p}_1^{e_1} \mathfrak{p}_2^{e_2} \cdots \mathfrak{p}_k^{e_k}$$

Таким образом, простые идеалы в \mathcal{O}_K находятся в соответствии с простыми числами.

Определение 35. Как известно, для $\mathfrak{p} \in \text{Spec } \mathcal{O}_K$ факторкольцо $\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}$ будет полем. Это поле — конечное расширение \mathbb{F}_p так как у нас есть естественное вложение $\mathbb{F}_p = \mathbb{Z}/p\mathbb{Z} \rightarrow \mathcal{O}_K/\mathfrak{p}$. Значит, $|\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}| = p^f$. Число f называется *степенью инерции* идеала \mathfrak{p} . Иными словами, *степень инерции* — это $[\mathcal{O}_K/\mathfrak{p} : \mathbb{F}_p]$.

Замечание. Заметим, что сразу из нашего определения нормы идеала мы имеем $|\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}| = N(\mathfrak{p})$.

Возьмем простое число p и рассмотрим главный идеал $p\mathcal{O}_K$. Тогда если $n = [K : \mathbb{Q}]$, то с одной стороны,

$$p^n = N_{K/\mathbb{Q}}(p) \underset{\text{Предл. 18}}{=} N(p\mathcal{O}_K),$$

а с другой стороны мы имеем

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1^{e_1} \cdot \mathfrak{p}_2^{e_2} \cdots \mathfrak{p}_k^{e_k}, \quad N(\mathfrak{p}_i) = |\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_i| = p^{f_i}$$

применяя к этому равенству норму, и, пользуясь её мультипликативностью, имеем

$$p^n = N(p\mathcal{O}_K) = \prod_{i=1}^k N(\mathfrak{p}_i)^{e_i} = \prod_{i=1}^k (p^{f_i})^{e_i}.$$

Тогда, приравнявая степени, мы получаем формулу, устанавливающую соотношение между *индексом ветвления*, *степенью инерции* и *степенью расширения*:

$$\sum_{i=1}^k e_i f_i = n. \quad (1)$$

Из этой формулы можно сделать много полезных выводов. Нетрудно заметить, что случае квадратичного расширения индекс ветвления, как и степень инерции, будут равны единице. Также ясно, что $1 \leq e_i f_i \leq n$, то есть, эти числа не могут быть произвольными.

Ветвление при расширении Галуа:

Пусть K/\mathbb{Q} — конечное расширение. Тогда группа Галуа $\text{Gal}(K/\mathbb{Q})$ действует и на идеалах кольца \mathcal{O}_K . Кроме того, она оставляет на месте $\text{Specm } \mathcal{O}_K$ (т.е. $\forall \mathfrak{p} \in \text{Specm}(\mathcal{O}_K) \ \sigma \mathfrak{p} \in \text{Specm}(\mathcal{O}_K)$), так как $\forall \sigma \in \text{Gal}(K/\mathbb{Q}) \ \mathcal{O}_K/\mathfrak{p} \cong \sigma \mathcal{O}_K/\sigma \mathfrak{p} \cong \mathcal{O}_K/\sigma \mathfrak{p}$.

Определение 36. Если $\mathfrak{p} \in \text{Specm}(\mathcal{O}_K)$ и $\mathfrak{p} \cap \mathbb{Z} = (p)$, то будем говорить, что идеал \mathfrak{p} *висит* или *сидит* над простым числом $p \in \mathbb{Z}$.

Теорема 25. Действие $\text{Gal}(K/\mathbb{Q})$ на множестве простых идеалов, висящих над простым числом p .

Доказательство. Предположим, что есть два простых идеала $\mathfrak{p}, \tilde{\mathfrak{p}}: \mathfrak{p} \cap \mathbb{Z} = p\mathbb{Z} = \tilde{\mathfrak{p}} \cap \mathbb{Z}$, для которых утверждение теоремы не верно. То есть, $\forall \sigma \in \text{Gal}(K/\mathbb{Q}) \ \sigma \mathfrak{p} \neq \tilde{\mathfrak{p}}$. Тогда

$$\{\sigma \mathfrak{p} \mid \sigma \in \text{Gal}(K/\mathbb{Q})\} \cap \{\sigma \tilde{\mathfrak{p}} \mid \sigma \in \text{Gal}(K/\mathbb{Q})\} = \emptyset.$$

По КТО мы можем выбрать такой элемент $x \in \mathcal{O}_K$, что

$$x \equiv 0 \pmod{\sigma \mathfrak{p}} \quad x \equiv 1 \pmod{\sigma \tilde{\mathfrak{p}}} \quad \forall \sigma \in \text{Gal}(K/\mathbb{Q}).$$

Применим теперь норму:

$$N_{K/\mathbb{Q}}(x) = \prod_{\tau \in \text{Gal}(K/\mathbb{Q})} \tau x \in \mathfrak{p} \cap \mathbb{Z} = p\mathbb{Z} = \tilde{\mathfrak{p}} \cap \mathbb{Z} \implies N_{K/\mathbb{Q}}(x) \in \tilde{\mathfrak{p}}.$$

Значит, так как $\tilde{\mathfrak{p}} \in \text{Spec } \mathcal{O}_K$, $\exists \tau \in \text{Gal}(K/\mathbb{Q}): \tau x \in \tilde{\mathfrak{p}} \Leftrightarrow x \in \tau^{-1} \tilde{\mathfrak{p}}$. Но, с другой стороны, ранее мы отметили, что $\forall \tau \in \text{Gal}(K/\mathbb{Q}) \ \tau x \equiv 1 \pmod{\tilde{\mathfrak{p}}}$. \square

⁷В самом начале курса мы уже отмечали, что $\forall \alpha \in \mathcal{O}_K, \forall \sigma \in \text{Gal}(K/\mathbb{Q}) \ \sigma \alpha \in \mathcal{O}_K$.

Следствие 8. Пусть K/\mathbb{Q} — расширение Галуа, p — простое и

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1^{e_1} \mathfrak{p}_2^{e_2} \cdots \mathfrak{p}_k^{e_k}$$

Тогда все индексы ветвления и все степени инерции равны.

Доказательство. Так как действие транзитивно, для любой пары $\mathfrak{p}_i, \mathfrak{p}_j$ найдётся $\sigma \in \text{Gal}(K/\mathbb{Q})$ такой, что $\sigma\mathfrak{p}_i = \mathfrak{p}_j$. Тогда

$$p^{f_i} = |\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_i| = |\sigma\mathcal{O}_K/\sigma\mathfrak{p}_i| = |\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_j| = p^{f_j} \implies f_i = f_j.$$

Теперь докажем, что равны индексы ветвления. В самом деле,

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_i^{e_i} \mathfrak{p}_j^{e_j} \cdots \mathfrak{p}_k^{e_k} = \sigma(p\mathcal{O}_K) = \sigma(\mathfrak{p}_i)^{e_i} \sigma(\mathfrak{p}_j)^{e_j} \cdots = \mathfrak{p}_j^{e_i} \cdots,$$

Тогда, в силу единственности разложения, мы имеем $e_i = e_j$. Делая так для всех пар индексов, получаем нужное. \square

Тогда равенство (1) примет весьма простой вид: $efk = n$.

Ветвление при квадратичном расширении:

Пусть $p \neq 2$ — простое число, рассмотрим расширение $\mathbb{Q}(\sqrt{d})/\mathbb{Q}$, где d — целое и свободно от квадратов. Тогда в силу формулы $\sum e_i f_i = 2$ мы получаем, что возможны такие варианты разложения:

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1 \mathfrak{p}_2, \quad \mathfrak{p}_1 \neq \mathfrak{p}_2, \quad p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}, \quad p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}^2.$$

Пусть $p \mid d$, тогда $p\mathcal{O}_K = (p, \sqrt{d})^2$. Действительно, нам надо проверить

$$(p) = (p^2, p\sqrt{d}, d) \Leftrightarrow (1) = \left(p, \sqrt{d}, \frac{d}{p}\right),$$

а это так, потому что $(p, \frac{d}{p}) = 1$ (так как d свободно от квадратов). Кроме того, заметим, что отсюда в частности следует, что идеал $(p, \sqrt{d})^2$ — простой.

Теперь рассмотрим случай, когда $p \nmid d$. Начнём со случая, когда $\left(\frac{d}{p}\right) = 1$. Тогда $x^2 - d = pm$. Тогда

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1 \mathfrak{p}_2, \quad \text{где } \mathfrak{p}_1 = (p, x + \sqrt{d}), \quad \mathfrak{p}_2 = (p, x - \sqrt{d}).$$

Действительно, перемножим эти идеалы:

$$\mathfrak{p}_1 \mathfrak{p}_2 = (p^2, p(x - \sqrt{d}), p(x + \sqrt{d}), pm) = (p) \Leftrightarrow (p, x - \sqrt{d}, x + \sqrt{d}, m) = (2x, x + \sqrt{d}, m) = (1),$$

так как $(p, 2x) = 1$, а это так в силу того, что $x^2 = d + pm$, $d \not\equiv p \implies 2x \not\equiv p$ (тут мы предположили, что $p \neq 2$, этот случай надо разбирать отдельно).

Остаётся случай, когда $\left(\frac{d}{p}\right) = -1$. Предположим, что $d \not\equiv 1 \pmod{4}$. Тогда

$$\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\sqrt{d}] = \mathbb{Z}[x]/(x^2 - d) \implies \mathcal{O}_K/(p) \cong \mathbb{Z}[x]/(x^2 - d, p) = \mathbb{F}_p[x]/(x^2 - d) - \text{поле},$$

так как $x^2 - d$ неприводим над \mathbb{F}_p . Ясно, что отсюда следует, что $p\mathcal{O}_K$ максимален. Тепеь, если $d \equiv 1 \pmod{4}$,

$$\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}\left[\frac{1 + \sqrt{d}}{2}\right] \implies \mathcal{O}_K/(p) \cong \mathbb{Z}[x]/\left(x^2 - x + \frac{1-d}{4}, p\right) \cong \mathbb{F}_p/\left(x^2 - x + \frac{1-d}{4}\right) - \text{поле},$$

так как дискриминант многочлена $x^2 - x + \frac{1-d}{4}$ равен d , а d — нечет по модулю p .

Домашнее задание 5. Задачи:

1. Разобрать случай $p = 2$ в выкладках выше.
2. Пусть K/\mathbb{Q} — расширение степени n , $K = \mathbb{Q}(\theta)$, где $\theta^n + a_{n-1}\theta^{n-1} + \dots + a_0 = 0$ и пусть p — такое простое число, что $v_p(a_0) = 1$ и $v_p(a_i) \geq 1$. Докажите, что тогда $p \nmid \text{ind}(\theta)$. *Hint 1:* рассмотрите $x \in \mathcal{O}_K: px \in \mathbb{Z}[\theta]$. Покажите, что достаточно доказать, что в этом случае $x \in \mathbb{Z}[\theta]$. *Hint 2:* докажите, что если $p \mid (p)$, то $v_p(\theta) = 1$ и индекс ветвления числа p равен n . *Hint 3:* $px = b_0 + b_1\theta + \dots + b_{n-1}\theta^{n-1}$. Предположите, что не все b_i делятся на p и придите к противоречию.
3. Исследуйте разложение идеала $2\mathcal{O}_K$, где $K = \mathbb{Q}(\sqrt{d})$.
4. Пусть K/F — конечное сепарабельное расширение, $K = F(\theta)$, $[K : F] = n$. Докажите, что

$$\text{disc}(1, \theta, \theta^2, \dots, \theta^{n-1}) = \prod_{i \neq j} (\sigma_i(\theta) - \sigma_j(\theta)) = N_{K/F}(f'(\theta)), \text{ где}$$

f — минимальный многочлен θ .

5. Докажите, что для $\zeta = \sqrt[n]{1}$ и $K = \mathbb{Q}(\zeta)$ будет справедлив результат, аналогичный 3, то есть $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\zeta]$.
6. Пусть $f, g \in \mathcal{O}_K[x]$, то $\text{cont}(fg) = \text{cont}(f) \cdot \text{cont}(g)$. *Hint:* применить локальный принцип.

2.11 Группа классов идеалов и её элементарное вычисление

Понятие нормы легко распространить на дробные идеалы: если $I, J \subset \mathcal{O}_K$ — целые идеалы, то мы можем положить

$$N(IJ^{-1}) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N(I)}{N(J)}$$

Проверим, что это определение корректно. Действительно, пусть $I_1 J_1^{-1} = I_2 J_2^{-1}$, тогда $I_1 J_2 = I_2 J_1$, что означает, что

$$N(I_1) N(J_2) = N(I_2) N(J_1) \implies N(I_1) N(J_1)^{-1} = N(I_2) N(J_2)^{-1}.$$

Определение 37. Как мы помним, у нас есть понятие группы дробных идеалов $I(K)$ (и в силу основной теоремы арифметики, она порождена простыми идеалами). В ней есть подгруппа из *главных дробных идеалов* $a\mathcal{O}_K$, $a \in K^*$. Эту подгруппу мы будем обозначать, как $\text{PI}(K)$. Факторгруппу $I(K)/\text{PI}(K)$ называют *группой классов идеалов* и обозначают

$$\mathcal{Cl}(K) \stackrel{\text{def}}{=} I(K)/\text{PI}(K).$$

Теорема 26. Пусть K/\mathbb{Q} — конечное расширение. Тогда группа $\mathcal{Cl}(K)$ конечна.

Доказательство. Итак, пусть $n = [K : \mathbb{Q}]$, $\omega_1, \dots, \omega_n$ — целый базис. Пусть $\sigma_i: K \rightarrow \mathbb{C}$ — все вложения K в \mathbb{C} , а $C = \max |\sigma_i(\omega_j)| > 0$. Возьмём произвольный элемент $\alpha \in \mathcal{Cl}(K)$, тогда

$$\alpha^{-1} = [J], \quad J \text{ — целый идеал в кольце } \mathcal{O}_K.$$

Тогда $\alpha = [J^{-1}]$. Рассмотрим множество

$$S = \left\{ \sum_{i=1}^n x_i \omega_i \mid 0 \leq x_i \leq \left[N(J)^{\frac{1}{n}} \right] \right\}, \quad |S| > \left(|N(J)|^{\frac{1}{n}} \right) N(J) = |\mathcal{O}_K/J|.$$

Из оценки на порядок следует, что найдутся $\sum_{i=1}^n x_i \omega_i$, $\sum_{j=1}^n y_j \omega_j \in S$ такие, что

$$z = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \omega_i \in J.$$

Рассмотрим идеал $I = zJ^{-1}$, это целый идеал кольца \mathcal{O}_K (так как $z \in J$), $[I] = [J^{-1}] = \alpha$, так как они отличаются на главный идеал. Рассмотрим $[I] \cdot [J] = (z) = z\mathcal{O}_K$ и оценим норму этого главного идеала:

$$\begin{aligned} N(I)N(J) &= N(IJ) = N((z)) = |N(z)| = \prod_{j=1}^n \left| \sigma_j \left(\sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \omega_i \right) \right| \leq \prod_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n |x_i - y_i| |\sigma_j(\omega_i)| \right) \leq \\ &\leq \prod_{\substack{|x_i - y_i| < 2N(J)^{\frac{1}{n}}, \\ |\sigma_j(\omega_i)| < C}}^n \left(n \cdot 2N(J)^{\frac{1}{n}} \cdot C \right) = 2n^n C^n N(J) \implies N(I) \leq 2n^n \cdot C^n. \end{aligned}$$

Таким образом мы показали, что для любого класса из $\mathcal{C}\ell(K)$ мы можем выбрать представителя с ограниченной нормой. Но, идеалов с ограниченной нормой лишь конечное число, так как

$$I = \mathfrak{p}_1^{k_1} \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_m^{k_m} \implies N(I) = \prod_{i=1}^m N(\mathfrak{p}_i)^{k_i} \leq 2 \cdot n^n C^n.$$

, а для выполнения этого неравенства можно подобрать лишь конечное число \mathfrak{p}_i , так как $N(\mathfrak{p}_i) = |\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_i| \geq p$ (так как $\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_i$ — это векторное пространство над \mathbb{F}_p , где $p\mathbb{Z} = \mathbb{Z} \cap \mathfrak{p}_i$). Это даёт нам, что у нас конечное число классов идеалов. □

Пример 13. Вычислим группу классов идеалов для поля $K = \mathbb{Q}(\sqrt{-14})$.

Основной факт состоит в том, что произвольный $\mathfrak{p} \in \text{Spec } \mathcal{O}_K$ выражается через максимальные идеалы, висящие только над (2) и (3). Пока что поверим в это и посчитаем при помощи этого факта группу $\mathcal{C}\ell(K)$.

Нетрудно убедиться в том, что

$$2\mathcal{O}_K = (2) = (2, \sqrt{-14})^2 = \mathfrak{p}_2^2, \quad N(\mathfrak{p}_2) = 2.$$

Так как $(\frac{-14}{3}) = 1$, $3\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_3\mathfrak{p}_3'$. Как мы знаем, $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\sqrt{-14}]$, а в этом кольце

$$N_{K/\mathbb{Q}}(a + b\sqrt{-14}) = a^2 + 14b^2 \neq 2 \implies \mathfrak{p}_2 \text{ — не может быть главным идеалом,}$$

из чего следует, что образ \mathfrak{p}_2 нетривиален в группе $\mathcal{C}\ell(K)$.

Кроме того, так как $N((3)) = 9$, $N(\mathfrak{p}_3^3) = N(\mathfrak{p}_3')^3 = 3$, что даёт нам то же самое. Заметим, что \mathfrak{p}_3^2 не является главным идеалом, но $[\mathfrak{p}_3^2] = [\mathfrak{p}_2]$. Действительно, возьмем $(2 + \sqrt{-14})$, $N((2 + \sqrt{-14})) = 18$, но идеал $(2 + \sqrt{-14})$ раскладывается в произведение максимальных, лежащих либо над (2), либо над (3), так $N(2 + \sqrt{-14}) = 18 = 2 \cdot 3^2$. Это даёт нам, что

$$(2 + \sqrt{-14}) = \mathfrak{p}_2\mathfrak{p}_3^{(?)}\mathfrak{p}_3'^{(?)}.$$

Так как $(1 + \sqrt{-14})(1 - \sqrt{-14}) = 15$, мы можем положить $\mathfrak{p}_3 = (3, 1 + \sqrt{-14})$, а $\mathfrak{p}_3' = (3, 1 - \sqrt{-14})$. Так как $(2 + \sqrt{-14}) \in (3, 1 - \sqrt{-14})$, мы можем заключить, что $\mathfrak{p}_2\mathfrak{p}_3^{(?)}\mathfrak{p}_3'^{(?)} \subset \mathfrak{p}_3'$, что даёт нам

$$[\mathfrak{p}_2][\mathfrak{p}_3']^2 = [1], \quad [\mathfrak{p}_2] = [\mathfrak{p}_3']^2$$

Теперь докажем озвученный в начале примера факт индукцией по p : $p\mathbb{Z} = \mathbb{Z} \cap \mathfrak{p}$.

$$\mathfrak{p}_2^2 = (2), \quad \mathfrak{p}_7^2 = (7), \quad \mathfrak{p}_2^2\mathfrak{p}_7^2 = (14) = (\sqrt{-14})^2 \implies \mathfrak{p}_2\mathfrak{p}_7 = (\sqrt{-14}) \implies [\mathfrak{p}_2]^{-1} = [\mathfrak{p}_7] \implies [\mathfrak{p}_2] = [\mathfrak{p}_2]^{-1} = [\mathfrak{p}_7].$$

Теперь рассмотрим остальные простые числа. Все они делятся на две группы: по модулю которых -14 — квадратичный вычет и по модулю которых соответственно невычет.

Пусть сначала -14 — невычет по модулю p . Тогда идеал $p\mathbb{Z}$ остаётся простым в \mathcal{O}_K . Таким образом, мы имеем единственный простой идеал, сидящий над p и этот идеал главный, что даёт нам что $[\mathfrak{p}]$ тривиален в $\mathcal{C}\ell(K)$.

Теперь пусть -14 — квадратичный вычет по модулю p . Тогда $\exists x \in \mathbb{Z}: p \mid x^2 + 14$. Можно считать, что $0 \leq x \leq \frac{p-1}{2}$. Тогда мы имеем, что $x^2 + 14 = pm \leq \left(\frac{p-1}{2}\right)^2 + 14$. Кроме того, в этом случае

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1\mathfrak{p}_2, \quad N(\mathfrak{p}_1) = N(\mathfrak{p}_2) = p, \quad \mathfrak{p}'_1 = (p, x + \sqrt{-14}), \quad \mathfrak{p}'_2 = (p, x - \sqrt{-14}).$$

Если $p \geq 5$, то $m < p$, так как будут справедливы такие неравенства:

$$m < \frac{\frac{p^2}{4} + 14}{p} < p.$$

Кроме того, $(x + \sqrt{-14}) \in \mathfrak{p}'_1 \implies (x + \sqrt{-14}) \in \mathfrak{p}'_1 I$. Заметим, что $pm = N(x + \sqrt{-14}) = N(\mathfrak{p}'_1) N(I)$, а $N(\mathfrak{p}'_1) = p$, то есть $N(I) = m < p$. Это даёт нам, что в разложении I на максимальные лежат только идеалы, лежащие над меньшими простыми числами. Иными словами, если

$$I = \mathfrak{q}_1^{k_1} \cdot \dots \cdot \mathfrak{q}_s^{k_s}, \quad \mathfrak{q}_i \cap \mathbb{Z} = q_i \mathbb{Z}, \quad q_i \leq p, \quad q_i - \text{простое}.$$

А это, в свою очередь, даёт нам возможность применить индукционное предположение: $[q_i]$ выражаются только через \mathfrak{p}_2 и \mathfrak{p}_3 . Теперь заметим, что $[\mathfrak{p}'_1] = [I^{-1}]$, из чего следует, что $\mathfrak{p} = \mathfrak{p}'_1 \mathfrak{p}'_2$ тоже выражается через \mathfrak{p}_2 и \mathfrak{p}_3 , что и требовалось.

Группа классов идеалов мнимого квадратичного поля $\mathbb{Q}(\sqrt{d})$

1. Если $d = -1, -2, -3, -7$, то \mathcal{O}_K — еклидово, а значит, кольцо главных идеалов, то есть $\mathcal{C}\ell(K) = e$.
2. Если $d = -11, -19$, то справедлив аналогичный результат. Кольцо $\mathbb{Z}[\sqrt{-11}]$ также евклидово, но установить это сложнее. Кольцо $\mathbb{Z}[\sqrt{-19}]$ уже не является евклидовым, но является кольцом главных идеалов. Аналогичное верно и для $d = -43, -67, -163$.
3. Невероятно, но выполняется следующий факт:

$$\frac{\log |\mathcal{C}\ell(\mathbb{Q}(\sqrt{-d}))|}{\log \sqrt{\text{disc } K}} \xrightarrow{d \rightarrow \infty} 1.$$

4. Табличку с группами классов идеалов мнимых квадратичных полей можно найти в конце книжки Бореви́ч-Шафаревич.

Следствия из теоремы о конечности групп классов идеалов:

1. Если $h = |\mathcal{C}\ell(K)|$, то для любого дробного идеала I : I^h является главным.
2. Если $(\ell, h) = (1)$ и I^ℓ главный, то I — главный. Действительно,

$$a\ell + bh = 1 \implies I = I^{a\ell + bh} = (I^\ell)^a (I^h)^b.$$

3. Существует такое конечное расщирение L/K , что для любого дробного идеала I кольца \mathcal{O}_K идеал $I\mathcal{O}_L$ будет главным.

Доказательство. Итак, пусть I_1, \dots, I_m — представители группы классов идеалов. Пусть $I_i^h = (x_i)$. В качестве поля L мы возьмём:

$$L = K(\sqrt[h]{x_1}, \dots, \sqrt[h]{x_m}).$$

$$I_j^h \mathcal{O}_L = (\sqrt[h]{x_j})^h \mathcal{O}_L \implies I_j \mathcal{O}_L = (\sqrt[h]{x_j}) \mathcal{O}_L.$$

□

Домашнее задание 6. Задачи:

1. Вычислите группу классов идеалов для $K = \mathbb{Q}(\sqrt{-5}), \mathbb{Q}(\sqrt{-6}), \mathbb{Q}(\sqrt{10}), \mathbb{Q}(\sqrt{-19})$.
2. Положим $\mathcal{O}_K^* = \{x \in K \mid \text{Tr}_{K/\mathbb{Q}}(xy) \in \mathbb{Z} \forall y \in \mathcal{O}_K\}$.
 - (а) Доказать, что \mathcal{O}_K^* — дробный идеал и $\mathcal{O}_K \subset \mathcal{O}_K^*$.

- (b) Доказать, что $|\text{disc}(K)| = |\mathcal{O}_K^*/\mathcal{O}_K|$.
 (c) Доказать, что $|\text{disc}(K)|$ есть норма некоторого идеала в \mathcal{O}_K .
3. Пусть V — конечномерное векторное пространство над полем F , $A \in \text{End}(V)$, причём A — нильпотентный. Докажите, что тогда $\text{Tr}(A) = 0$.
4. Пусть I — дробный идеал. Докажите, что как абелева группа $d(N(I))$ (дробный идеал в \mathbb{Z}) порождается элементами $N(x), x \in I$.

2.12 Дифференда и ветвление

Определение 38. Пусть K/\mathbb{Q} — конечное расширение. Простое число p называется *неразветвлённым* в числовом поле K , если

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1 \cdot \mathfrak{p}_2 \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_k, \quad \mathfrak{p}_i \neq \mathfrak{p}_j \text{ — максимальные.}$$

Иными словами, p неразветвлено, если все индексы ветвления равны единице.

Если же выполнено

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1 \cdot \mathfrak{p}_2^{e_2} \cdot \dots,$$

то идеал \mathfrak{p}_1 называется *неразветвлённым*.

Рассмотрим $\mathcal{O}_K^* = \{x \in K \mid \text{Tr}_{K/\mathbb{Q}}(xy) \in \mathbb{Z} \forall y \in \mathcal{O}_K\}$ и покажем, что это дробный идеал.

Пусть $\omega_1, \dots, \omega_n$ — целый базис, а $\omega_1^*, \dots, \omega_n^*$ — взаимный базис, то есть

$$\text{Tr}(\omega_i \omega_j^*) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

Возьмём $x \in \mathcal{O}_K^*$ и разложим его по взаимному базису;

$$x = a_1 \omega_1^* + \dots + a_n \omega_n^*, \quad a_i \in \mathbb{Q}.$$

Тогда $\text{Tr}(x \omega_i) = a_i \implies a_i \in \mathbb{Z}$ по определению \mathcal{O}_K^* . Таким образом мы показали, что

$$\mathcal{O}_K^* \subset \bigoplus \mathbb{Z} \omega_i^*.$$

Теперь рассмотрим $\sum a_i \omega_i^*$, тогда

$$\text{Tr}\left(\sum a_i \omega_i^* \omega_j\right) = a_j \in \mathbb{Z} \implies \forall y \in \mathcal{O}_K \quad \text{Tr}\left(\sum a_i \omega_i^* y\right) \in \mathbb{Z}$$

по линейности следа. Это доказывает, что $\bigoplus \mathbb{Z} \omega_i^* \subset \mathcal{O}_K^*$.

Таким образом, \mathcal{O}_K^* — просто свободная абелева группа, порожденная взаимным базисом. Заметим также, что $\forall y \in \mathcal{O}_K, x \in \mathcal{O}_K^* \quad yx \in \mathcal{O}_K^*$. Действительно,

$$\text{Tr}(xy \mathcal{O}_K) = \text{Tr}(x \mathcal{O}_K) \subset \mathbb{Z} \implies yx \in \mathcal{O}_K^*.$$

Так как K — поле частных кольца \mathcal{O}_K , каждую образующую \mathcal{O}_K^* мы можем записать в виде $\omega_i^* = \frac{u_i}{v_i}$, где $u_i, v_i \in \mathcal{O}_K$. Положим $x = v_1 \dots v_n$, тогда $x \mathcal{O}_K^*$ — целый идеал, так как

$$x \mathcal{O}_K^* = x \left(\frac{u_1}{v_1}, \dots, \frac{u_n}{v_n} \right) \subset \mathcal{O}_K,$$

а то, что оно уважает домножение на элементы \mathcal{O}_K мы уже проверили выше. Таким образом, \mathcal{O}_K^* — дробный идеал.

Определение 39. Дифферендой числового поля K называют идеал $\mathcal{D} = \mathcal{O}_K^{*-1}$.

Как мы помним, дискриминант числового поля K — это

$$\text{disc}(K) = \det(\text{Tr}(\omega_i \omega_j))_{i,j=1}^n, \quad \text{где } \{\omega_i\} \text{ — целый базис.}$$

Предложение 19. $N(\mathcal{D}) = |\text{disc}(K)|$.

Доказательство. Будем действовать строго по определению:

$$N(\mathcal{D}) = |\mathcal{O}_K/\mathcal{D}| = \left| \mathcal{O}_K/\mathcal{O}_K^{*-1} \right| = |\mathcal{O}_K^*/\mathcal{O}_K|$$

Как мы уже замечали выше, $\mathcal{O}_K = \bigoplus \omega_i \mathbb{Z} \subset \bigoplus \mathbb{Z} \omega_i^* = \mathcal{O}_K^*$. Разложим элемент целого базиса по взаимному базису:

$$\omega_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \omega_j^* \implies \text{Tr}(\omega_i \omega_j) = a_{ij}.$$

Тогда по лемме 19 об индексе подгруппы ранга n в свободной абелевой группе ранга n мы имеем нужное:

$$|\mathcal{O}_K^*/\mathcal{O}_K| = \det(\text{Tr}(\omega_i \omega_j))_{i,j=1}^n = |\text{disc}(K)|.$$

□

Сейчас мы покажем, что дифферента числового поля K отвечает за ветвление и выведем из этого хороший критерий разветвлённости простых чисел.

Теорема 27. *Максимальный идеал $\mathfrak{p} \subset \mathcal{O}_K$ разветвлён тогда и только тогда, когда $\mathcal{D} \subset \mathfrak{p}$.*

Доказательство. В процессе доказательства нам понадобятся несколько лемм. Докажем сначала импликацию (\implies):

Лемма 23 (Задача 3 ДЗ 6). Пусть V — конечномерное векторное пространство над полем F , $A \in \text{End}(V)$, причём A — нильпотентный. Докажите, что тогда $\text{Tr}(A) = 0$.

Доказательство леммы. Приведём, например, доказательство без Жордановой формы. Ясно, что достаточно показать, что характеристический многочлен является чистой степенью переменной t .

$$t^m E - A^m = (tE - A)((tE)^{m-1} + (tE)^{m-2}A + \dots) = (tE - A) \cdot B.$$

Применим к этому равенству \det :

$$t^{mn} = \det(t^m E - A^m) = \det(tE - A) \det(B) \implies \det(tE - A) = t^n.$$

□

Пусть p — простое число. Тогда, как мы помним, $\mathcal{O}_K/p\mathcal{O}_K$ — векторное пространство над \mathbb{F}_p . Пусть $x \in \mathcal{O}_K$, а $\bar{x} = x + p\mathcal{O}_K$ — его образ в факторкольце. Рассмотрим оператор умножения на \bar{x} :

$$\mathcal{O}_K/p\mathcal{O}_K \rightarrow \mathcal{O}_K/p\mathcal{O}_K, y + p\mathcal{O}_K \mapsto xy + \mathcal{O}_K.$$

Тогда ясно, что $\text{Tr}(\bar{x}) = \text{Tr}(x) + p\mathbb{Z}$. Тогда из леммы 23 мы получим вот такое следствие:

Следствие 9. *Пусть $x \in \mathcal{O}_K$, $x^m \in p\mathcal{O}_K$. Тогда $\text{Tr}_{K/\mathbb{Q}}(x) \in p\mathbb{Z}$.*

Доказательство следствия. Действительно, так как $x^m \in p\mathcal{O}_K$, умножение \bar{x} будет нильпотентным оператором $\mathcal{O}_K/p\mathcal{O}_K \rightarrow \mathcal{O}_K/p\mathcal{O}_K$, а значит, по лемме 23 $\text{Tr}(\bar{x}) = 0$ (в $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$), что и означает, что $\text{Tr}(x) \in p\mathbb{Z}$. □

Перейдём теперь к доказательству теоремы. Пусть \mathfrak{p}_1 разветвлён, то есть

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1^{e_1} \cdot \mathfrak{p}_2^{e_2} \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_k^{e_k}, e_1 > 1.$$

Докажем, что $\forall x \in \mathfrak{p}_1^{-1}$ выполнено $\text{Tr}(x) \in \mathbb{Z}$. Этого будет достаточно, так как тогда

$$\forall y \in \mathcal{O}_K, \forall x \in \mathfrak{p}_1^{-1} \quad (xy \in \mathfrak{p}_1^{-1} \implies \text{Tr}(xy) \in \mathbb{Z}) \implies x \in \mathcal{O}_K^* \implies \mathfrak{p}_1^{-1} \subset \mathcal{O}_K^* = \mathcal{D}^{-1} \implies \mathcal{D} \subset \mathfrak{p}_1.$$

Докажем теперь само утверждение. Заметим, что так как $x \in \mathfrak{p}_1^{-1}$, $px \in \mathfrak{p}_1^{e_1-1} \mathfrak{p}_2^{e_2} \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_k^{e_k}$, а тогда

$$(px)^2 \in \mathfrak{p}_1^{2(e_1-1)} \mathfrak{p}_2^{2e_2} \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_k^{2e_k}$$

Так как $2(e_1 - 1) \geq e_1$, мы получаем, что

$$(px)^2 \in \mathfrak{p}_1^{2(e_1-1)} \mathfrak{p}_2^{2e_2} \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_k^{2e_k} \subset p\mathcal{O}_K.$$

Тогда, по следствию 9 мы получаем, что $\text{Tr}(px) \in p\mathbb{Z} \implies \text{Tr}(x) \in \mathbb{Z}$.

Докажем теперь импликацию (\Leftarrow). Вспомним для начала такое утверждение:

Предложение 20. Если F — конечное поле, а L/F — конечное расширение, то $\text{Tr}_{L/F} \neq 0$.

Замечание. В случае характеристики 0 это утверждение очевидно, так как можно рассматривать след единицы.

Доказательство предложения 20. Если $|F| = q$, то $\text{Gal}(L/F) = \langle \sigma \rangle$ — циклическая и она порождена автоморфизмом Фробениуса $\sigma(x) = x^q$ (множество неподвижных элементов — как раз поле). Предположим, что $[L:F] = m$. Тогда Группа Галуа будет иметь вид

$$\text{Gal}(L/F) = \langle \text{id}, \sigma, \sigma^2, \dots, \sigma^{m-1} \rangle,$$

а значит, след будет иметь вид

$$\text{Tr}(x) = x + \sigma x + \sigma^2 x = \dots + \sigma^{m-1} x = x + x^q + x^{q^2} + \dots + x^{q^{m-1}}.$$

Заметим, что многочлен выше не может быть тождественно нулём. Действительно, он имеет не больше, чем q^{m-1} корней, а $|L| = q^m > q^{m-1}$. \square

Итак, вернёмся к доказательству теоремы. Предположим, что \mathfrak{p}_1 неразветвлён, то есть

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1 \mathfrak{p}_2^{e_2} \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_k^{e_k}.$$

По китайской теореме об остатках:

$$\mathcal{O}_K/p\mathcal{O}_K \cong \mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_1 \oplus \mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_2^{e_2} \oplus \dots \oplus \mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_k^{e_k}.$$

Пусть $x \in \mathfrak{p}_2^{e_2} \cdot \mathfrak{p}_3^{e_3} \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_k^{e_k} \setminus \mathfrak{p}_1$. Тогда в разложении в прямую сумму такой x будет иметь лишь одну ненулевую координату (первую). Значит, так как след можно вычислять по координатам, достаточно посчитать след в первом прямом слагаемом, которое является полем (так как мы факторизуем по максимальному идеалу), причём, конечным расширением $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$. По утверждению 20 существует такой $\bar{x} \in \mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_1$, что $\text{Tr}(\bar{x}) \neq 0$ в $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$. Тогда существует $x \in \mathcal{O}_K$ такой, что $\text{Tr}(x) \notin p\mathbb{Z}$, то есть $\text{Tr}\left(\frac{x}{p}\right) \notin \mathbb{Z}$. Но тогда

$$\begin{cases} \frac{x}{p} \in \mathfrak{p}_1^{-1} \\ \text{Tr}\left(\frac{x}{p}\right) \notin \mathbb{Z} \end{cases} \implies \frac{x}{p} \notin \mathcal{O}_K^* \implies \mathfrak{p}_1^{-1} \not\subset \mathcal{O}_K^* \implies \mathcal{D} \not\subset \mathfrak{p}_1,$$

что мы и хотели доказать. \square

Теорема 28. Простое число p разветвлено тогда и только тогда, когда $p \mid \text{disc}(K)$.

Доказательство. Докажем сначала (\Rightarrow). Так как p разветвлено, по определению

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1^{e_1} \cdot \mathfrak{p}_2^{e_2} \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_k^{e_k}, e_1 > 1.$$

Тогда по теореме 27 $\mathcal{D} \subset \mathfrak{p}_1$, но тогда

$$|\text{disc}(K)| = N(\mathcal{D}) : N(\mathfrak{p}_1) = p^{f_1} \implies \text{disc}(K) : p.$$

Теперь докажем (\Leftarrow). Теперь пусть p неразветвлено, то есть

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1\mathfrak{p}_2 \cdots \mathfrak{p}_k, \quad \mathcal{D} \not\subset \mathfrak{p}_1.$$

Разложим дифференту в произведение простых идеалов.

$$\mathcal{D} = \mathfrak{q}_1 \cdot \mathfrak{q}_2 \cdots \mathfrak{q}_m.$$

Так как каждый \mathfrak{p}_i неразветвлён, $\mathcal{D} \not\subset \mathfrak{p}_i \implies \mathfrak{p}_i \neq \mathfrak{q}_j$ для всех i и j .

Применим к этому равенству норму:

$$|\text{disc}(K)| = N(\mathcal{D}) = N(\mathfrak{q}_1) \cdot N(\mathfrak{q}_2) \cdots N(\mathfrak{q}_m) = p_1^{f_1} \cdot p_2^{f_2} \cdots p_m^{f_m}, \quad p_i \neq p - \text{простые.}$$

Значит, $\text{disc}(K) \not\equiv p$. □

Отсюда ясно, что для каждого расширения разветвлённых простых чисел только конечное число — простые делители дискриминанта. Иными словами, для каждого конкретного расширения почти все простые числа являются неразветвленными.

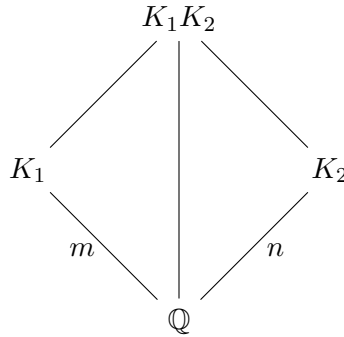
2.13 Кольцо целых композита расширений

В общем случае о вычислении кольца целых композита расширений сказать что-то сложно. Мы будем рассматривать один из частых случаев, который также весьма полезен при вычислении колец целых числовых полей.

Теорема 29. Рассмотрим композит расширений K_1/\mathbb{Q} степени m и K_2/\mathbb{Q} степени n , причем таких, что $[K_1K_2:\mathbb{Q}] = mn$ (что равносильно тому, что $K_1K_2 = K_1 \otimes_{\mathbb{Q}} K_2$), а также $(\text{disc}(K_1), \text{disc}(K_2)) = 1$.

Пусть $\{u_i\}$ — целый базис \mathcal{O}_{K_1} , а $\{v_j\}$ — целый базис \mathcal{O}_{K_2} . Тогда $\{u_i v_j\}$ — целый базис $\mathcal{O}_{K_1K_2}$.

Доказательство. Нарисуем композит расширений:



Пусть τ_i , $1 \leq i \leq m$ — вложения K_1 в \mathbb{Q}^{alg} , а σ_j , $1 \leq j \leq n$ — вложения K_2 в \mathbb{Q}^{alg} . Во-первых, заметим, что $\{u_i v_j\}$ — базис композита K_1K_2 над \mathbb{Q} . Тогда элементы

$$\tau_i \otimes \sigma_j(u_k v_\ell) = \sigma_j(u_k) \tau_i(v_\ell)$$

будут попарно различными, а $\tau_i \otimes \sigma_j$ будут давать все вложения $K_1K_2 \rightarrow \mathbb{Q}^{alg}$. Рассмотрим $\alpha \in \mathcal{O}_{K_1K_2}$, разложим его по базису:

$$\alpha = \sum a_{ij} u_i v_j \in \mathcal{O}_{K_1K_2}, \quad a_{ij} \in \mathbb{Q}$$

и докажем, что $a_{ij} \in \mathbb{Z}$.

Рассмотрим $\beta_j = \sum_{i=1}^m a_{ij} u_i$. Тогда выполняется следующее матричное тождество (которое мы преобразовываем далее, домножая на транспонированную, а после на взаимную к $A^t A$):

$$\underbrace{(\sigma_i v_j)}_A \cdot \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 \otimes \sigma_1)(\alpha) \\ (1 \otimes \sigma_2)(\alpha) \\ \vdots \\ (1 \otimes \sigma_n)(\alpha) \end{pmatrix} \implies A^t A \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} = A^t \cdot \begin{pmatrix} (1 \otimes \sigma_1)(\alpha) \\ (1 \otimes \sigma_2)(\alpha) \\ \vdots \\ (1 \otimes \sigma_n)(\alpha) \end{pmatrix} \implies \text{disc}(K_2) \cdot \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{pmatrix},$$

где $\gamma_i \in \mathcal{O}_{K_1}$. Тогда $\text{disc}(K_1) \cdot a_{ij} \in \mathbb{Z}$. Заметим, что такое же рассуждение мы могли проделать, заменив u_i на v_j в определении β_j , и получить, что $\text{disc}(K_1)a_{ij} \in \mathbb{Z}$. Тогда, так как $(\text{disc}(K_1), \text{disc}(K_2)) = 1$, мы имеем $a_{ij} \in \mathbb{Z}$. \square

Домашнее задание 7. Задачи:

1. Пусть K/\mathbb{Q} — расширение степени n , $K = \mathbb{Q}(\theta)$, где $\theta^n + a_{n-1}\theta^{n-1} + \dots + a_0 = 0$ и пусть p — такое простое число, что $v_p(a_0) = 1$ и $v_p(a_i) \geq 1$. Докажите, что тогда $p \nmid \text{ind}(\theta)$. *Hint 1:* рассмотрите $x \in \mathcal{O}_K$: $px \in \mathbb{Z}[\theta]$. Покажите, что достаточно доказать, что в этом случае $x \in \mathbb{Z}[\theta]$. *Hint 2:* докажите, что если $p \mid (p)$, то $v_p(\theta) = 1$ и индекс ветвления числа p равен n . *Hint 3:* $px = b_0 + b_1\theta + \dots + b_{n-1}\theta^{n-1}$. Предположите, что не все b_i делятся на p и придите к противоречию.
2. Докажите, что если $K = \mathbb{Q}(\sqrt[n]{1})$, то $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\zeta]$, где $\zeta^{p^n} = 1$.
3. Пусть $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{Q}$, $b_1, \dots, b_n \in \mathbb{Q}$, $b_i > 0$, $k \geq 2$ и $\sqrt[k]{\frac{b_i}{b_j}} \notin \mathbb{Q}$. Предположим, что

$$a_1 \sqrt[k]{b_1} + \dots + a_n \sqrt[k]{b_n} = 0.$$

Докажите, что тогда $a_i = 0 \quad \forall i$.

4.

Теорема 30 (Баше). Пусть $d \in \mathbb{N}$, d свободно от квадратов, $d \not\equiv_4 3$ и $|\mathcal{Cl}(\mathbb{Q}(\sqrt{-d}))| \nmid 3$. Тогда

$$y^2 = x^3 - d$$

не имеет решений в \mathbb{Z} , если d не имеет вид $3a^2 \pm 1$, $a \in \mathbb{Z}$. А если $d = 3a^2 \pm 1$, то уравнение имеет целое решение

$$x = a^2 + d, \quad y = \pm a(a^2 - 3d).$$

2.14 Теорема Куммера

Начнём с вот такой полезной леммы:

Лемма 24. Следующие условия равносильны:

1. $p \nmid \text{ind}(\theta) = |\mathcal{O}_K/\mathbb{Z}[\theta]|$.
2. $\mathbb{Z}[\theta]/p\mathbb{Z}[\theta] \rightarrow \mathcal{O}_K/p\mathcal{O}_K$ — изоморфизм.

Доказательство. *Дописать! Не очень сложно. Но, надо аккуратнее.* \square

Теорема 31 (Куммер). Пусть $K = \mathbb{Q}(\theta)$, $\theta \in \mathcal{O}_K$, а p — такое простое число, что $p \nmid \text{ind}(\theta)$. Пусть f — минимальный многочлен θ , причем над полем $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ его редукция \bar{f} раскладывается в неприводимые, как

$$\bar{f} = \prod_i \bar{g}_i^{a_i} \in \mathbb{F}_p[t], \quad \deg g_i = d_i, \quad g_i \text{ — унитарные.}$$

Тогда:

1. Идеалы $\mathfrak{p}_i = (g_i(\theta), p)$ — все простые идеалы, висящие над простым числом p . Причём, они попарно различны.
2. $|\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_i| = p^{d_i}$, а значит, d_i — степень инерции идеала \mathfrak{p}_i .
3. $p\mathcal{O}_K = \prod \mathfrak{p}_i^{a_i}$, то есть a_i есть индексы ветвления идеалов \mathfrak{p}_i .

Доказательство. I. Покажем, что \mathfrak{p}_i максимальны. Для этого достаточно проверить, что фактор — поле. Действительно, это простое вычисление:

$$\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_i = \mathcal{O}_K/(g_i(\theta), p) \underbrace{=}_{\text{л. 24.}} \mathbb{Z}[\theta]/(g_i(\theta), p) \cong \mathbb{Z}[t]/(f(t), p, g_i(t)) \cong \mathbb{F}_p[t]/\bar{g}_i,$$

которое является полем, так как многочлен g_i неприводим над \mathbb{F}_p .

II. Теперь покажем, что $\mathfrak{p}_i \neq \mathfrak{p}_j$ при $i \neq j$. Предположим противное. Тогда

$$\mathfrak{p}_i = \mathfrak{p}_j = (g_i(\theta), p, g_j(\theta)).$$

Но, $\overline{g_i}$ и $\overline{g_j}$ — различные неприводимые многочлены из $\mathbb{F}_p[t]$, а мы можем линейно представить их НОД:

$$\exists \overline{h_i}, \overline{h_j}: \overline{h_i} \overline{g_i} + \overline{h_j} \overline{g_j} = \overline{1} \implies h_i g_i + h_j g_j = 1 + p \cdot q(t) \in \mathbb{Z}[t].$$

Подставляя в последнее равенство θ , мы получаем, что $1 \in (g_i(\theta), g_j(\theta), p) = \mathfrak{p}_i = \mathfrak{p}_j$, что противоречит тому, что \mathfrak{p}_i и \mathfrak{p}_j максимальны.

III. Теперь проверим, что d_i — степень инерции. Действительно,

$$\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_i \cong \mathbb{F}_p[t]/(\overline{g_i}) \implies |\mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_i| = p^{d_i},$$

так как $\mathbb{F}_p[t]/(\overline{g_i})$ — расширение \mathbb{F}_p степени d_i (так как многочлен g_i неприводим).

Из условия теоремы мы знаем, что

$$f(t) = \prod g_i(t)^{a_i} + ph(t) \implies 0 = f(\theta) = \prod g_i(\theta)^{a_i} + ph(\theta) \implies \prod g_i(\theta)^{a_i} \in p\mathcal{O}_K \implies \prod \mathfrak{p}_i^{a_i} \subset p\mathcal{O}_K.$$

Отсюда уже видно, что над p не висит никаких других идеалов. Действительно,

$$p\mathcal{O}_K \subset \mathfrak{q} \implies \prod \mathfrak{p}_i^{a_i} \subset \mathfrak{q} \implies \mathfrak{p}_i \subset \mathfrak{q} \implies \mathfrak{p}_i = \mathfrak{q}.$$

Значит, $\prod \mathfrak{p}_i^{a_i} = p\mathcal{O}_K \cdot I$. Из этого следует, что $a_i \geq e_i$. Остается заметить, что

$$\sum a_i d_i = n, \quad a_i \geq e_i \implies a_i = e_i \forall n.$$

□

Имеет смысл разобрать полезный частный случай этой теоремы: когда все a_i равны 1.

Теорема 32. Пусть $K = \mathbb{Q}(\theta)$, $\theta \in \mathcal{O}_K$, f — минимальный многочлен θ , а p — простое число. Предположим, что

$$\overline{f} = \overline{g_1} \cdot \overline{g_2} \cdot \dots \cdot \overline{g_k} \in \mathbb{F}_p[t], \text{ причем}$$

$\overline{g_i}$ — попарно различные и унитарные. Тогда $p \nmid \text{ind}(\theta)$.

Доказательство. Пусть $I = (p, g_i(\theta)) = I \trianglelefteq \mathbb{Z}[\theta]$ — идеал. По тем же соображениям, что и в предыдущей теореме, $I \in \text{Specm}(\mathbb{Z}[\theta])$:

$$\mathbb{Z}[\theta]/(g_i(\theta), p) \cong \mathbb{Z}[t]/(f(t), p, g_i(t)) \cong \mathbb{F}_p[t]/\overline{g_i}.$$

Покажем, что $I\mathcal{O}_K \neq \mathcal{O}_K$. Предположим противное и выберем в \mathcal{O}_K целый базис $\omega_1, \dots, \omega_n$. Тогда мы можем записать каждый элемент базиса с коэффициентами из идеала:

$$\omega_i = \sum a_{ij} \omega_j$$

Переносим всё в одну часть и обозначая $A = (a_{ij})$, мы имеем такую систему уравнений:

$$(E - A) \cdot \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

В таком случае $\det(E - A) = 0$, из чего следует, что $1 \in I$ (так как $\det(E - a) \in 1 + I$), что противоречит тому, что $I \in \text{Specm}(\mathbb{Z}[\theta])$.

Тогда $I\mathcal{O}_K$ — собственный идеал в \mathcal{O}_K , а значит, содержится в некотором максимальном идеале, $(p, g_i(\theta)) \subset \mathfrak{p}_i \subset \mathcal{O}_K$. Теперь нам достаточно показать, что (по лемме 24)

$$\mathbb{Z}[\theta]/(p) \cong \mathcal{O}_K/(p).$$

Рассмотрим следующую коммутативную диаграмму:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{Z}[\theta]/(p) & \xrightarrow{\varphi} & \mathcal{O}_K/(p) \\ \downarrow \psi & & \downarrow \\ \mathbb{Z}[\theta]/(p, g_i(\theta)) & \hookrightarrow & \mathcal{O}_K/\mathfrak{p}_i \end{array}$$

Достаточно проверить, что $\text{Ker } \varphi = 0$. Действительно, пусть $\bar{\alpha} \in \text{Ker } \varphi$, тогда $\psi(\bar{\alpha}) = 0$, а значит, $\alpha \in (p, g_i(\theta)) \forall i$, из чего следует, что

$$\alpha^k \in \prod_i (p, g_i(\theta)) \in p\mathbb{Z}[\theta] \implies \bar{\alpha}^k = \bar{0} \text{ в } \mathbb{Z}[\theta]/(p),$$

то есть мы нашли нильпотентный элемент. С другой стороны,

$$\mathbb{Z}[\theta]/(p) \cong \mathbb{F}_p[t]/(\bar{f}) \cong \bigoplus \mathbb{F}_p[t]/(\bar{g}_i),$$

а то, что написано справа — прямое произведение полей. Значит, $\bar{\alpha} = 0$ и ядро тривиально. \square

Ветвление при круговом расширении

Оказывается, теорема Куммера 31 позволяет полностью исследовать ветвление при круговом расширении.

Пусть p — простое число, $K = \mathbb{Q}(\zeta_m)$ и $m \nmid p$. Как мы знаем, минимальный многочлен ζ_m — это круговой многочлен Φ_m . Ясно, что

$$x^m - 1 : \Phi_m,$$

так как Φ_m — минимальный. С другой стороны, многочлен $\overline{x^m - 1}$ имеет m попарно различных корней в \mathbb{F}_p^{alg} , так как он взаимнопрост со своей производной:

$$(x^m - 1, (x^m - 1)') = (x^m - 1, mx^{m-1}) = 1.$$

Но тогда, так как $x^m - 1 : \Phi_m$,

$$\overline{\Phi_m} = \bar{g}_1 \cdot \dots \cdot \bar{g}_n,$$

где \bar{g}_i — попарно различные и неприводимые. Тогда по теореме 32 $p \nmid \text{ind}(\zeta_m)$, то есть мы можем применить теорему Куммера 31:

$$p\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1 \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_k, \quad \mathfrak{p}_i = (p, g_i(\zeta_m)).$$

С другой стороны, так как $\mathbb{Q}(\zeta_m)/\mathbb{Q}$ — расширение Галуа, все степени инерции равны. Значит, достаточно вычислить хотя бы одну.

Предложение 21. *Степени инерции f идеалов \mathfrak{p}_i — это минимальные такие f , что $(p^f - 1) : m$.*

Доказательство. Корни многочлена $\overline{x^m - 1}$ образуют циклическую группу, так как это подгруппа в мультипликативной группе конечного расширения \mathbb{F}_p . Пусть θ — образующая этой группы, $\theta \in \mathbb{F}_p^{alg}$.

$$x^m - 1 = \Phi_m(x) \cdot \prod_{k|m, k \neq m} \Phi_k(x) \implies \overline{x^m - 1} = \overline{\Phi_m(x)} \cdot \prod_{k|m, k \neq m} \overline{\Phi_k(x)}.$$

Пусть $\Phi_k(\theta) = 0$, тогда так как $x^k - 1 : \Phi_k$, $\theta^k - 1 = 0$, откуда $k : m$ (так как θ — образующая циклической группы из m элементов). Значит, $\overline{\Phi_m} = 0$.

Не умаляя общности, пусть $\bar{g}_1(\theta) = 0$. Тогда

$$\{1, \theta, \dots, \theta^{m-1}\} = \langle \theta \rangle \leq (\mathbb{F}_p[x]/(g_1))^*.$$

Тогда, если $\deg g_1 = f_1$, мы имеем

$$|(\mathbb{F}_p[x]/(g_1))^*| = p^{f_1} - 1, \quad \langle \theta \rangle \leq \text{lr} * \mathbb{F}_p[x]/(g_1)^* \implies p^{f_1} - 1 : m,$$

откуда $f_1 \geq f$. Теперь докажем, что $f_1 \leq f$. Действительно,

$$\begin{cases} \theta^m = 1 \\ m \mid p^f - 1 \end{cases} \implies \theta^{p^f - 1} = 1 \implies \theta^{p^f} = \theta.$$

Значит, $\theta \in \mathbb{F}_{p^f} \implies \mathbb{F}_p[x]/(g_1) = \mathbb{F}_p[\theta] \leq \mathbb{F}_{p^f}$, откуда $p^f : p^{f_1} \implies f_1 \leq f$. \square

Домашнее задание 8. Задачи:

1. Рассмотрим кубическое расширение $K = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{15}) = \mathbb{Q}(\rho)$.
 - 0) Посчитать кольцо \mathcal{O}_K .
 - а) Вычислить $N(\rho)$, $N(\rho - 1)$, $N(\rho + 1)$, $N(\rho - 3)$.
 - б) Докажите, что над простым числом 3 лежит ровно один простой идеал ρ_3 .
 - в) Докажите, что ρ_3 — главный. Найдите его образующую с помощью разложений $(\rho - 3)$ и $(\rho + 3)$.
 - г) Докажите, что $\frac{9(\rho+1)^3}{(\rho-3)^6} \in \mathcal{O}_K^*$.
2. Вычислить \mathcal{O}_K , где $K = \mathbb{Q}(\sqrt{p_1}, \dots, \sqrt{p_k})$, если p_i — простые и $p_i \equiv 1 \pmod{4}$.
3. Доказать, что $v_p(\mathcal{D}) \geq e - 1$, где $e = e(\mathfrak{p})$ — индекс ветвления.

2.15 Первый случай Last Fermat's theorem

Мы можем полагать, что показатель n — простое число, а также рассматривать уравнение в виде

$$x^p + y^p + z^p = 0, \quad (x, y, z) = 1. \quad (2)$$

Первым случаем Большой теоремы Ферма называют доказательство большой теоремы Ферма в предположении $p \nmid xyz$.

Теорема 33 (Софи Жермен). Если простое число p таково, что $2p + 1 = q$ — простое число, то имеет место первый случай Большой теоремы Ферма.

Доказательство. Перепишем уравнение в виде

$$y^p + z^p = (-x)^p \Leftrightarrow (y + z)(y^{p-1} - y^{p-2}z + \dots - yz^{p-1} + z^{p-1}) = (-x)^p.$$

Покажем, что $(y + z, y^{p-1} - y^{p-2}z + \dots + z^{p-1}) = 1$. Пусть r — простое ($r \neq p$) и такое, что $r \mid y + z$, $r \mid y^{p-1} - y^{p-2}z + \dots + z^{p-1}$. Тогда

$$y \equiv -z \pmod{r} \implies y^{p-1} - y^{p-2}z + \dots - yz^{p-1} + z^{p-1} \equiv py^{p-1} \pmod{r} \implies y : r \implies z : r,$$

что противоречит тому, что $(y, z) = 1$.

$$\begin{cases} y + z = A^p \\ y^{p-1} - y^{p-2}z + \dots - yz^{p-1} + z^{p-1} = T^p \end{cases}$$

Так как наше условие симметрично относительно переменных, $x + y = B^p$, $x + z = C^p$. Теперь заметим, что по условию

$$x^p + y^p + z^p = 0 \Leftrightarrow x^{\frac{q-1}{2}} + y^{\frac{q-1}{2}} + z^{\frac{q-1}{2}} = 0, \quad p = \frac{q-1}{2}. \quad (3)$$

Заметим, что если $q \nmid x$, то по малой теореме Ферма:

$$x^{q-1} \equiv 1 \pmod{q} \implies x^{\frac{q-1}{2}} \equiv \pm 1 \pmod{q}.$$

Отсюда ясно, что не может быть такого, что $q \nmid x$, $q \nmid y$, $q \nmid z$, так как иначе 3 выполняться не может. Значит, $q \mid xyz$. Не умаляя общности, пусть $q \mid x$. Тогда

$$2x = B^p + C^p - A^p = B^{\frac{q-1}{2}} + C^{\frac{q-1}{2}} - A^{\frac{q-1}{2}} \equiv 0 \pmod{p}.$$

Отсюда ясно, что по аналогичным соображениям не может быть такого, что $ABC \not\equiv 0 \pmod{q}$. С другой стороны, если $B : q$, то $B^p : q$, а тогда

$$\begin{cases} x + y = B^p : q \\ x : q \end{cases} \implies y : q,$$

что противоречит $(x, z) = 1$. По аналогичным причинам $q \nmid C$. Тогда $A \not\equiv q$, откуда $y + z = A^p \not\equiv q$, откуда $T^p \equiv py^{p-1} \pmod{q}$. С другой стороны, так как $(A, T) = 1$, как мы показали выше, $T \not\equiv q$, а тогда по малой теореме Ферма

$$T^{\frac{q-1}{2}} \equiv \pm 1 \pmod{q} \implies py^{p-1} \equiv \pm 1 \pmod{q}. \quad (4)$$

А так как $x \not\equiv q$, $B^{\frac{q-1}{2}} = B^p = x + y \equiv y \pmod{q}$, но тогда так как $B \not\equiv q$, по малой теореме Ферма

$$y \equiv B^{\frac{q-1}{2}} \equiv \pm 1 \pmod{q}.$$

Подставляя это в 4, получаем, что

$$py^{p-1} \equiv p(\pm 1)^{p-1} \equiv p \equiv \pm 1 \pmod{q},$$

что даёт нам противоречие, так как $q = 2p + 1$.

Так как $(A, T) = 1$, $q \nmid T$. Тогда $T^{\frac{q-1}{2}} \equiv py^{p-1} \pmod{q}$, тогда по малой теореме Ферма $\pm 1 = py^{p-1} \pmod{q}$. Так как $q \mid x$, $B^p = x + y \equiv y \pmod{q}$. Значит,

$$y \equiv B^{\frac{q-1}{2}} \equiv \pm 1 \pmod{1}, \text{ так как } q \nmid B.$$

Значит, $\pm 1 \equiv \pm p \pmod{q}$, а этого быть не может, так как $q = 2p + 1$. □

Домашнее задание 9. Получите элементарное доказательство случая $p = 5$ в первом случае большой теоремы Ферма.

Рассмотрим $K = \mathbb{Q}(\zeta_m)$ над \mathbb{Q} . Мы доказывали, что если q простое и $q \nmid m$, то оно неразветвлено, то есть

$$q\mathcal{O}_K = \mathfrak{p}_1 \cdot \mathfrak{p}_2 \cdot \dots \cdot \mathfrak{p}_k.$$

В частности, если $m = p$ — простое, то $q \nmid p$ и это будет выполнено. А вот p будет полностью разветвлено в $\mathbb{Q}(\zeta_p)$. Убедимся в этом:

Предложение 22. Простое число p полностью разветвлено в $\mathbb{Q}(\zeta_p)$.

Доказательство.

$$x^p - 1 = (x - 1)(x - \zeta)(x - \zeta^2) \dots (x - \zeta^{p-1}) = (x - 1)(x^{p-1} + \dots + x + 1).$$

$$x^{p-1} + \dots + x + 1 = (x - \zeta)(x - \zeta^2) \dots (x - \zeta^{p-1})$$

Подставим $x = 1$ и от числового равенства перейдём к равенству идеалов:

$$p\mathcal{O}_K = (1 - \zeta)(1 - \zeta^2) \dots (1 - \zeta^{p-1}).$$

Ясно, что $1 - \zeta^j \mid 1 - \zeta$, а так как $\exists i: (\zeta^j)^i = \zeta$, $1 - \zeta \mid 1 - \zeta^j$, то есть все идеалы в правой части совпадают и мы имеем

$$p\mathcal{O}_K = ((1 - \zeta))^{p-1}.$$

Покажем теперь, что $(1 - \zeta)$ — простой идеал. Действительно, пусть

$$(1 - \zeta) = \mathfrak{p}_1 \mathfrak{p}_2 \dots \mathfrak{p}_k \implies p\mathcal{O}_K = ((1 - \zeta))^{p-1} = \mathfrak{p}_1^{p-1} \mathfrak{p}_2^{p-1} \dots \mathfrak{p}_k^{p-1},$$

откуда индекс ветвления $e_i \geq p - 1$, но с другой стороны, $efk = [K : \mathbb{Q}] = p - 1$ (так как у нас расширение Галуа), откуда ясно, что

$$p\mathcal{O}_K = ((1 - \zeta))^{p-1} = \mathfrak{p}^{p-1}, \quad \mathfrak{p} \in \text{Specm}(\mathcal{O}_K).$$

□

Лемма 25. Пусть p — простое число, не равное двум. Множество корней из единицы⁸ в поле $\mathbb{Q}(\zeta_p)$ равно $\{\pm\zeta_p^i\}$.

Доказательство. Возьмем $\zeta_n \in \mathbb{Q}(\zeta_p)$.

1). Предположим, что $n \equiv 0 \pmod{4}$. Тогда $i = \zeta_4 \in \mathbb{Q}(\zeta_p)$. Заметим, что $2i = (1+i)^2$ а значит, $(2) = ((1+i))^2$, то есть двойка разветвлена в $\mathbb{Q}(\zeta_p)$ (а это противоречит предыдущему утверждению). Значит $n \not\equiv 0 \pmod{4}$.

2). Теперь рассмотрим случай $n = 2n_0$, n — нечётное. Тогда $\zeta_n^i = \pm\zeta_{n_0}^i$ и нам достаточно рассматривать n_0 . Пусть у n_0 есть какие-то простые делители, кроме p , например, p' . Тогда, так как $n_0 \vdots p'$,

$$\mathbb{Q}(\zeta_{p'}) \leq \mathbb{Q}(\zeta_{n_0}) \leq \mathbb{Q}(\zeta_p).$$

Но тогда по предложению 22 p' будет полностью разветвлено в $\mathbb{Q}(\zeta_{p'})$ и при этом, так как $p' \nmid p$, неразветвлено в $\mathbb{Q}(\zeta_p)$, что даёт нам противоречие.

3). Значит, $n_0 = p^a$, а тогда $\zeta_{p^a} \in \mathbb{Q}(\zeta_p)$, то есть $\mathbb{Q}(\zeta_{p^a}) \leq \mathbb{Q}(\zeta_p)$. С другой стороны, тогда

$$[\mathbb{Q}(\zeta_{p^a}) : \mathbb{Q}] = p^a - p^{a-1} \leq [\mathbb{Q}(\zeta_p) : \mathbb{Q}] = p - 1 \implies a = 1 \implies n_0 = p.$$

□

Лемма 26. Пусть K/\mathbb{Q} — конечное расширение, $\sigma_i: K \rightarrow \mathbb{Q}^{alg}$ — все вложения ($1 \leq i \leq n$, $n = [K : \mathbb{Q}]$). Предположим, что $\alpha \in \mathcal{O}_K$ и $\forall i |\sigma_i \alpha| \leq 1$. Тогда α является корнем из единицы какой-то степени.⁹

Доказательство. Выпишем многочлен с целыми коэффициентами, корнем которого является α :

$$\prod_i (x - \sigma_i \alpha) \in \mathbb{Z}[x].$$

В силу предположения теоремы, его коэффициенты ограничены, так как они являются симметрическими функциями от $\sigma_i \alpha$. Заметим теперь, что из условия следует, что $|\sigma_i(\alpha^k)| \leq 1$, а значит, для α^k мы также получим многочлен с ограниченными коэффициентами. Заметим, что k — произвольное натуральное, а значит, мы получаем бесконечное число α^k , которые являются корнями коненого набора многочленов над \mathbb{Z} (так как коэффициенты каждого мы можем ограничить одной и той же константой). Значит, $\exists m, n: \alpha^m = \alpha^n$, что и даёт нам, что α — корень из 1. □

Лемма 27. Пусть $u \in \mathcal{O}_K^* = \mathbb{Z}[\zeta_p]$ для $K = \mathbb{Q}(\zeta_p)$. Тогда $\exists s: u \zeta_p^s \in \mathbb{R}$.

Доказательство. Положим $\zeta = \zeta_p$. Рассмотрим $v = u/\bar{u}$ и возьмем $\rho \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_p)/\mathbb{Q}) \cong (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$. Тогда по лемме 26:

$$\rho(v) = \frac{\rho(u)}{\rho(\bar{u})} = {}^{10} \frac{\rho(u)}{\rho(u)} \implies |\rho(v)| = 1.$$

Значит, по лемме 26 v — является корнем из единицы какой-то степени, а тогда по лемме 25 $v = \pm\zeta^n$.

Положим $\lambda = 1 - \zeta$, тогда

$$\rho(\zeta) \equiv \zeta^k \equiv \zeta \pmod{\lambda} \implies \rho(\zeta^i) \equiv \zeta^i \pmod{\lambda},$$

а так как $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\zeta_p]$, мы имеем такое сравнение для всех элементов \mathcal{O}_K . В частности, из этого следует, что $\rho(u) \equiv u \pmod{\lambda}$. В частности, мы можем положить $\rho(x) = \bar{x}$ и отсюда получить, что $\bar{u} \equiv u \pmod{\lambda}$. Так как $v = u/\bar{u}$, а $v = \pm\zeta^n$, то есть $u = \pm\zeta^n \bar{u}$, мы имеем

$$\pm\zeta^n = \bar{u} \equiv u \pmod{\lambda}.$$

Предположим, что реализуется знак минус. Тогда, так как $\zeta^n \equiv 1 \pmod{\lambda}$, отсюда мы получаем

$$-\bar{u} \equiv \bar{u} \pmod{\lambda} \implies 2\bar{u} \equiv 0 \pmod{\lambda},$$

⁸не обязательно степени p

⁹Обратное утверждение очевидно.

¹⁰Так как сопряжение — тоже автоморфизм, а группа Галуа абелева, $\rho(\bar{x}) = \overline{\rho(x)}$

а так как \bar{u} обратим, отсюда $2 : \lambda = 1 - \zeta$. Но тогда $2^{p-1} : (1 - \zeta)^{p-1}$, а как мы уже видели в предложении 22, $((1 - \zeta)^{p-1}) = p\mathcal{O}_K$, то есть $2^{p-1} : p$, что даёт нам противоречие.

Значит, знак минус невозможен и реализуется случай

$$\zeta^n \bar{u} \equiv \bar{u} \equiv u \pmod{\lambda}.$$

Тогда $\zeta^n \bar{u} = u$, значит $u\zeta^s = \zeta^{n+s}\bar{u}$. Попробуем подобрать такое s , что

$$u\zeta^s = \overline{\zeta^{n+s}\bar{u}} \implies \overline{\zeta^{n+s}} = \zeta^s \implies 2s + n \equiv 0 \pmod{p},$$

и достаточно взять $s \equiv -n/2 \pmod{p}$. □

Лемма 28. Пусть $x^p + y^p = z^p$, $p \nmid xyz$, $(x, y, z) = 1$, разложим левую часть в линейные множители:

$$x^p + y^p = (x + y)(x + \zeta y) \dots (x + \zeta^{p-1} y).$$

Тогда сомножители в правой части равенства попарно взаимнопросты.

Доказательство. Предположим противное, тогда $x + \zeta^i y$, $x + \zeta^j y \in \mathfrak{q}$ для некоторых i, j . Тогда

$$(x + \zeta^i y) - (x + \zeta^j y) = \zeta^i(1 - \zeta^{j-i})y \in \mathfrak{q}.$$

1. Если $y \in \mathfrak{q}$, то, так как $1 + \zeta^i y \in \mathfrak{q}$, мы имеем $x \in \mathfrak{q}$, но по условию $(x, y) = (1)$.
2. Если $(1 - \zeta^{j-i}) \in \mathfrak{q}$, то $1 - \zeta \in \mathfrak{q}$, а так как $(1 - \zeta) \in \text{Spem}(\mathcal{O}_K)$ (что мы доказывали в 22), $\mathfrak{q} = (1 - \zeta)$.
Но тогда $x + y \in \mathfrak{q} \implies z^p \in \mathfrak{q} \implies z \in \mathfrak{q}$. Тогда

$$(z)^{p-1} : \mathfrak{q}^{p-1} = ((1 - \zeta))^{p-1} = (p) \implies z : p,$$

что даёт нам противоречие. □

Сейчас, пользуясь всей подготовкой выше, мы докажем первый случай большой теоремы Ферма для регулярных простых.

Теорема 34. Пусть $p \nmid |\mathcal{C}\ell(\mathbb{Q}(\zeta_p))|^{11}$. Тогда имеет место первый случай Великой теоремы Ферма.

Доказательство. Пусть $x^p + y^p = z^p$, разложим левую часть на множители:

$$\prod_{i=0}^{p-1} (x + \zeta^i y) = z^p.$$

Так как все сомножители в левой части равенства взаимнопросты по лемме 28, все они являются p -ми степенями, в частности для $i = 1$. То есть

$$(x + \zeta y) = I^p,$$

значит I находится в p -кручении $\mathcal{C}\ell(\mathbb{Q}_{\zeta_p})$. Но так как p не делит порядок группы классов, оно тривиально, значит I — главный, то есть $I = (\alpha)$ для некоторого α . Значит,

$$(x + \zeta y) = (\alpha^p) \implies x + \zeta y = \varepsilon \alpha^p, \text{ где } \varepsilon \in \mathbb{Z}[\zeta]^*,$$

Тогда по лемме 27 мы имеем

$$x + \zeta y = \zeta^s u \alpha^p, \quad u \in \mathbb{R}.$$

С другой стороны, $\alpha = a_0 + a_1 \zeta + \dots + a_{p-2} \zeta^{p-2}$, $a_i \in \mathbb{Z}$. Тогда

$$\alpha^p \equiv \underbrace{a_0^p + a_1^p + \dots + a_{p-2}^p}_{\stackrel{\text{def}}{=} n} \pmod{p}.$$

¹¹такие простые числа называются *регулярными*

Тогда $x + \zeta y \equiv \zeta^s un \pmod{p}$. Переходя в этом сравнении к сопряженным, мы получаем

$$\overline{x + \zeta y} = x + \zeta^{-1}y \equiv \zeta^{-s}\bar{u}n = \zeta^{-s}un \pmod{p} \implies \zeta^s(x + \zeta^{-1}y) \equiv un \pmod{p}.$$

$$\begin{cases} \zeta^{-s}(x + \zeta y) \equiv un \pmod{p} \\ \zeta^s(x + \zeta^{-1}y) \equiv un \pmod{p} \end{cases} \implies \zeta^{-s}(x + \zeta y) \equiv \zeta^s(x + \zeta^{-1}y) \pmod{p}$$

$$x + \zeta y \equiv \zeta^{2s}(x + \zeta^{-1}y) \pmod{p} \implies x + \zeta y - \zeta^{2s}x - \zeta^{2s-1}y \in p\mathbb{Z}[\zeta]$$

Теперь рассмотрим несколько случаев:

1. Элементы $S = \{1, \zeta, \zeta^{2s}, \zeta^{2s-1}\}$ попарно различны.

(а) Если $\zeta^{p-1} \notin S$, то $p \mid x, p \mid y$.

(б) Если $\zeta^{p-1} = \zeta^{2s-1}$, то $s \equiv p$, а значит $(\zeta - \zeta^{-1})y \in p\mathbb{Z}[\zeta]$ откуда следует, что $p \mid 1 - \zeta^2$, что даёт нам противоречие.

(с) Если $\zeta^{p-1} = -(1 + \zeta + \dots + \zeta^{p-2}) = \zeta^{2s}$, а тогда

$$x + \zeta y + ((1 + \zeta + \dots + \zeta^{p-2}))x - \zeta^{p-2}y = 2x + \zeta(x + y) + x\zeta^2 + \dots + x\zeta^{p-3} + (x - y)\zeta^{p-2} \implies 2x \equiv p,$$

что даёт нам противоречие.

2. Некоторые из этих степеней совпадают.

(а) $\zeta^{2s} = 1$. В этом случае $s \equiv p$, а как мы уже видели, это влечёт $(\zeta - \zeta^{-1})y \equiv p$, что невозможно.

(б) $\zeta^{2s-1} = 1$. В этом случае $x - y + \zeta y - \zeta x \equiv p \implies (x - y)(1 - \zeta) \equiv p \implies x - y \equiv p$, то есть $x \equiv y \pmod{p}$. Исходное уравнение мы можем записать в виде

$$z^p + (-y)^p = x^p,$$

и рассуждая аналогично, мы можем получить, что $(y + z) \equiv p$, $(x + z) \equiv p$. Тогда

$$0 \equiv x^p + y^p - z^p \equiv x + y - z \equiv 3x \pmod{p},$$

откуда либо $p = 3$ (а в этом случае мы Большую теорему Ферма доказали), либо $p \mid x$, что даёт нам противоречие.

(с) $\zeta = \zeta^{2s-1}$. Тогда $x - \zeta^2 x \equiv p$, откуда следует, что $1 - \zeta^2 \equiv p$, а это, как мы уже видели, противоречие.

□

Дадим теперь хороший критерий для проверки условия теоремы. Этот критерий мы дадим без доказательства, так как он доказывается методами аналитической теории чисел.

Определение 40. Рассмотрим экспоненциальную производящую функцию

$$\frac{t}{e^t - 1} = \sum_{m=0}^{\infty} B_m \frac{t^m}{m!},$$

тогда

Подставим $-t$:

$$\frac{-t}{e^{-t} - 1} = \frac{te^t}{e^t - 1} = \frac{t(e^t - 1) + t}{e^t - 1} = t + \frac{t}{e^t - 1}.$$

Отсюда мы можем понять, чему равны коэффициенты:

$$m > 1, m \equiv_2 1 \implies B_m = -B_m \implies B_m = 0.$$

Замечание. Так как все нечётные коэффициенты равны нулю, авторы часто используют обозначение B_n для $2n$ -го числа Бернулли. Например, известно, что

$$B_n = -n\zeta(1 - n), n > 1.$$

Также отсюда мы имеем такую формулу:

Предложение 23.

$$-(n+1)B_n = \binom{n+1}{n-1}B_{n-1} + \dots + \binom{n+1}{k}B_k + \dots + \binom{n+1}{1}B_1 + 1.$$

Следствие 10. Знаменатели B_2, B_4, \dots, B_{p-3} не делятся на p .

Доказательство. Докажем это утверждение по индукции, база очевидна, докажем переход.

$$v_p\left(\binom{n+1}{n-1}B_{n-1} + \dots + \binom{n+1}{k}B_k + \dots + \binom{n+1}{1}B_1 + 1\right) \geq 0 \implies v_p((n+1)B_n) \geq 0 \implies v_p(B_n) \geq 0.$$

□

Так вот, нам числа Бернулли полезны, так как справедлива такая теорема:

Теорема 35. Простое число p — регулярно тогда и только тогда, когда числители всех чисел Бернулли B_2, B_3, \dots, B_{p-3} не делятся на p .

Пример 14. Например, таким образом нетрудно показать, что число 7 является регулярным. Действительно,

$$\overline{B_0} = 1, \overline{B_1} = \overline{3}, -3\overline{B_2} = 3\overline{B_1} + \overline{1} = \overline{10} \implies \overline{B_3} = -\frac{\overline{10}}{\overline{3}} = -\overline{1}, \overline{B_3} = 0, \overline{B_4} = 10\overline{B_2} + 5\overline{3} + 1 = -\overline{1} \implies \overline{B_4} = \frac{\overline{1}}{\overline{5}} = \overline{3}.$$

Теперь, немного отвлечёмся и приведём алгоритм построения целого базиса.

2.16 Алгоритм построения целого базиса

Итак, для $d = \text{disc}(1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{n-1})$ мы наем, что $d\mathcal{O}_K \subset \mathbb{Z}[\alpha] \subset \mathcal{O}_K$, откуда

$$\mathbb{Z}[\alpha] \subset \mathcal{O}_K \subset d^{-1}\mathbb{Z}[\alpha].$$

Тогда, как мы помним, $\bigcup(\omega_i + \mathbb{Z}[\alpha]) = d^{-1}\mathbb{Z}[\alpha]$, причем, каждый класс, либо вообще не содержит целых алгебраических чисел, либо целиком из них состоит. То есть, отсюда мы имеем

$$\mathcal{O}_K = \bigcup_{i \in I} (\omega_i + \mathbb{Z}[\alpha]),$$

откуда следует, что \mathcal{O}_K порождена ω_i и α^s при $0 \leq s \leq n-1$. Значит, $d\mathcal{O}_K$ будет порождена $d\omega_i$ и $d\alpha^s$. С другой стороны, $d\mathcal{O}_K$ — подгруппа свободной абелевой группы $\mathbb{Z}[\alpha]$, значит мы попадаем в контекст нормальной формы Смита.

Домашнее задание 10. 1.

Теорема 36 (Штикельберг). Дискриминант конечного расширения K/\mathbb{Q} сравним с нулём или единицей по модулю 4.

Hint: Можно действовать так: $\text{disc}(K) = (\det(\sigma_i))^2$, и раскрывая определитель, мы получаем $\det(\sigma_j \omega_j) = P - N$, где P — сумма произведений со знаком +, а N — сумма произведений со знаком минус. Тогда $\text{disc}(K) = (P - N)^2 = (P + N)^2 - 4PN$. Значит, достаточно показать, что числа $P + N$ и PN — целые. *Hint:* Целое число — это рациональное число, которое еще и целое алгебраическое.

2.

2.17 Геометрия чисел

Рассмотрим евклидово пространство \mathbb{R}^n , выберем в нём набор из k линейно независимых векторов e_1, \dots, e_k и рассмотрим порожденную ими свободную абелеву группу:

$$L = \bigoplus_{i=1}^k \mathbb{Z}e_i$$

Тогда L мы будем называть *решёткой*, натянутой на вектора e_1, \dots, e_k . В случае $k = n$ решётка L называется *полной*.

Пример 15. Картинка для $L \subset \mathbb{R}^2$.

Предложение 24. В любом ограниченном подмножестве \mathbb{R}^n лежит конечное число точек решётки.

Доказательство. В самом деле, можно сделать линейное преобразование, которое переводит произвольную решётку в прямоугольную. Оно будет переводить ограниченное множество в ограниченное, а для прямоугольной решётки необходимое свойство очевидно. \square

Оказывается, верно и обратное утверждение.

Предложение 25. Пусть $A \leq \mathbb{R}^n$ — подгруппа (как абелевой группы), причем такая, что в любом ограниченном подмножестве \mathbb{R}^n лежит конечное число элементов из A . Тогда A — решётка.

Доказательство. Рассмотрим подпространство $\text{span}(A)$ в \mathbb{R}^n . Оно порождено некоторым линейно независимым набором векторов:

$$\text{span}(A) = \langle e_1, \dots, e_m \rangle, \quad e_i \in A \text{ — линейно независимы.}$$

Рассмотрим свободную абелеву группу, порожденную этими векторами:

$$A_0 = \mathbb{Z}e_1 + \dots + \mathbb{Z}e_m.$$

Покажем, что A/A_0 конечна. Рассмотрим *фундаментальную область*

$$\Delta = \left\{ \sum_{i=1}^m x_i e_i \mid 0 \leq x_i < 1 \right\}$$

Ясно, что $\forall a \in A \exists a_0 \in A_0: a - a_0 \in \Delta$. Но так как Δ ограничено, в нём может лежать только конечное число элементов решётки, значит количество значений, которые может принимать $a - a_0$ конечно и A/A_0 конечна.

Значит, $\exists s \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}: sA \subset A_0$. Тогда

$$A \subset \frac{1}{s}A_0 = \mathbb{Z}\frac{e_1}{s} \oplus \mathbb{Z}\frac{e_2}{s} \oplus \dots \oplus \mathbb{Z}\frac{e_m}{s} = A_1.$$

Значит, $A_0 \subset A \subset A_1$, а A_0 и A_1 — свободные абелевы группы одного и того же ранга. Значит и A — свободная абелева группа,

$$A = \mathbb{Z}u_1 \oplus \mathbb{Z}u_2 \oplus \dots \oplus \mathbb{Z}u_m.$$

Остаётся проверить, что u_1, \dots, u_m будут линейно независимы над \mathbb{R} . Но, это так, потому что

$$m = \dim \text{span}(A_0) \leq \dim \text{span}(A_1) = \dim \langle u_1, \dots, u_m \rangle.$$

\square

Это предложение даёт хороший критерий для проверки, является ли какое-то подпространство решёткой.

Определение 41. Если $L \leq \mathbb{R}^n$ — решётка с порождающим набором e_1, \dots, e_m , то множество

$$\Delta = \left\{ \sum_{i=1}^m x_i e_i \mid 0 \leq x_i < 1 \right\}$$

называют *основным параллелепипедом* решётки или же *фундаментальной областью* решётки.

Если e_1, \dots, e_m — порождающий набор решётки L , то $\mathbb{R}^m = \text{span}\{e_1, \dots, e_m\}$ и тогда мы можем вычислить объем фундаментальной области, как

$$\text{Vol}(\Delta) = \det |(a_{ij})|,$$

где $e_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$.

Лемма 29. Пусть T — ограниченное измеримое множество в \mathbb{R}^m , L — решётка ранга m в \mathbb{R}^m , Δ — её фундаментальная область. Предположим, что $\forall \ell_1, \ell_2 \in L$ множества $T + \ell_1$ и $T + \ell_2$ не пересекаются. Тогда

$$\text{Vol}(T) \leq \text{Vol}(\Delta).$$

Доказательство. В самом деле, так как множества $T + \ell$ дизъюнкты,

$$\text{Vol}(\Delta) \geq \sum_{\ell \in L} \text{Vol}(\Delta \cap T_\ell) = \sum_{\ell \in L} \text{Vol}(\Delta - \ell \cap T) = \text{Vol}\left(\bigcup_{\ell \in L} \Delta_\ell \cap T\right) = \text{Vol}(\mathbb{R}^m \cap T) = \text{Vol}(T).$$

□

Лемма 30 (Г. Минковский, О выпуклом теле). Пусть T — ограниченное выпуклое центрально-симметричное (относительно нуля) измеримое подмножество \mathbb{R}^n , L — решётка ранга n в \mathbb{R}^n , Δ — её фундаментальная область. Предположим, что выполнена следующая оценка на объемы:

$$\text{Vol}(T) > 2^n \text{Vol}(\Delta).$$

Тогда $\exists 0 \neq \ell \in L: \ell \in T$. Кроме того, если T компактно, то это будет верно и в случае нестрогого неравенства $\text{Vol}(T) \geq 2^n \text{Vol}(\Delta)$.

Доказательство. Рассмотрим тело $\frac{1}{2}T$, тогда $\text{Vol}(\frac{1}{2}T) = \frac{1}{2^n} \text{Vol}(T) > \text{Vol}(\Delta)$. Тогда по предыдущей лемме 29 $\exists \ell_1, \ell_2 \in L: \frac{1}{2}T_{\ell_1} \cap \frac{1}{2}T_{\ell_2} \neq \emptyset$. Это означает, что

$$\exists t_1, t_2 \in T: \frac{x_1}{2} + \ell_1 = \frac{x_2}{2} + \ell_2 \implies 0 \neq \frac{x_1 - x_2}{2} = \ell_1 - \ell_2 \in L \cap T.$$

В последнем равенстве $\frac{x_1 - x_2}{2} \in T$ так как T — выпукло и центрально симметрично.

Теперь докажем вторую часть теоремы. Рассмотрим $T_\varepsilon = (1 + \varepsilon)T$, для него неравенство уже будет строгим и по первой части теоремы мы получим $0 \neq \ell \in L \cap T_\varepsilon$. Понятно, что если $\ell \in T$, всё доказано. Пусть теперь $\ell \in T_\varepsilon \setminus T$. Вообще говоря, в $T_\varepsilon \setminus T$ лежит лишь конечное число точек из L . Так как T_ε замкнуто, мы можем уменьшить ε так, чтоб все точки из ℓ , лежащие в $T_\varepsilon \setminus T$ уже не лежали там. □

Определение 42. Рассмотрим конечное расширение K/\mathbb{Q} , $[K : \mathbb{Q}] = n$. Тогда у нас есть n вложений $\sigma_i: K \rightarrow \mathbb{Q}^{alg}$. Среди них есть *вещественные* вложения, то есть такие, что $\text{Im}(\sigma_i) \subset \mathbb{R}$. Остальные вложения называют *комплексными* (или, *невещественными*).

С каждым не вещественным вложением σ_i связано вложение $\overline{\sigma_i} \neq \sigma_i$. Пронумеруем наши вложения следующим образом:

$$\sigma_1, \dots, \sigma_s \text{ — вещественные вложения, } \sigma_{s+1}, \overline{\sigma_{s+1}}, \sigma_{s+2}, \overline{\sigma_{s+2}}, \dots, \sigma_{s+t}, \overline{\sigma_{s+t}} \text{ — комплексные вложения.}$$

Так как количество вложений равно степени расширения, $s + 2t = n$.

Рассмотрим отображение $\varphi: K \rightarrow \mathbb{R}^n$, которое действует так:

$$\alpha \in K, \alpha \mapsto (\sigma_1(\alpha), \sigma_2(\alpha), \dots, \sigma_s(\alpha), \operatorname{Re}(\sigma_{s+1}(\alpha)), \operatorname{Im}(\sigma_{s+1}(\alpha)), \dots, \operatorname{Re}(\sigma_{s+t}(\alpha)), \operatorname{Im}(\sigma_{s+t}(\alpha))) \in \mathbb{R}^n.$$

Пусть I — ненулевой идеал в \mathcal{O}_K . Возьмём его базис как абелевой группы — $\alpha_1, \dots, \alpha_n$. Тогда $\varphi(I)$ — решётка в \mathbb{R}^n с базисом $\varphi(\alpha_1), \dots, \varphi(\alpha_n)$. Нужно проверить также что линейную независимость.

Пусть $\sigma_{s+k}(\alpha) = a + bi$, будем делать следующие преобразования:

$$\begin{aligned} (\operatorname{Re} \sigma_{s+k} \alpha, \operatorname{Im} \sigma_{s+k} \alpha) = (a, b) &\mapsto (a, bi) \mapsto (a + bi, bi) \mapsto (a + bi, 2bi) \mapsto (a + bi, -a + bi) \mapsto \\ &\mapsto (a + bi, a - bi) = (\sigma_{s+k} \alpha, \overline{\sigma_{s+k} \alpha}). \end{aligned}$$

Посмотрим, что будет происходить с определителем при проделывании этих операций. Нетрудно проследить, что по итогу определитель умножится на $-2i$. В итоге мы получим, что

$$\det \left(\begin{pmatrix} \varphi(\alpha_1) \\ \varphi(\alpha_2) \\ \vdots \\ \varphi(\alpha_n) \end{pmatrix} \right) = \frac{1}{(2i)^t} \det \begin{pmatrix} \sigma_1(\alpha_1) & \dots & \sigma_{s+1}(\alpha_1) & \overline{\sigma_{s+1}(\alpha_1)} & \dots & \overline{\sigma_{s+t}(\alpha_1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_1(\alpha_n) & \dots & \sigma_{s+1}(\alpha_n) & \overline{\sigma_{s+1}(\alpha_n)} & \dots & \overline{\sigma_{s+t}(\alpha_n)} \end{pmatrix} = \pm \frac{1}{(2i)^t} \sqrt{|\operatorname{disc}(\alpha_1, \dots, \alpha_n)|}.$$

А теперь заметим, что левая часть — объем фундаментальной области, а правую мы можем переписать в терминах $\operatorname{disc}(K)$, пользуясь предложением 17

$$\operatorname{Vol}(\Delta) = \left| \det \begin{pmatrix} \varphi(\alpha_1) \\ \varphi(\alpha_2) \\ \vdots \\ \varphi(\alpha_n) \end{pmatrix} \right| = \frac{1}{2^t} \sqrt{|\operatorname{disc}(\alpha_1, \dots, \alpha_n)|} = \frac{1}{2^t} \sqrt{|\operatorname{disc}(K)| \cdot [\mathcal{O}_K : I]^2} = \frac{1}{2^t} N(I) \sqrt{|\operatorname{disc}(K)|}.$$

Рассмотрим теперь для некоторого фиксированного $a > 0$.

$$T = \left\{ (x_1, x_2, \dots, x_s, y_1, z_1, \dots, y_t, z_t) \mid |x_1| + \dots + |x_s| + 2\sqrt{y_1^2 + z_1^2} + \dots + 2\sqrt{y_t^2 + z_t^2} \leq a \right\}.$$

T — выпуклое, центрально-симметричное и $\operatorname{Vol}(T) = 2^s \left(\frac{\pi}{2}\right)^t \frac{a^n}{n!}$. Подберём a так, что для $0 \neq I \subset \mathcal{O}_K$ будет выполнено неравенство

$$2^s \left(\frac{\pi}{2}\right)^t \frac{a^n}{n!} > 2^n \frac{\sqrt{|\operatorname{disc}(K)|}}{2^t} N(I). \quad (5)$$

Тогда по лемме Минковского 30 $\exists 0 \neq \alpha \in I$:

$$|\sigma_1(\alpha)| + \dots + |\sigma_s(\alpha)| + 2|\sigma_{s+1}(\alpha)| + \dots + 2|\sigma_{s+t}(\alpha)| \leq a.$$

Это неравенство мы можем переписать в виде:

$$|\sigma_1(\alpha)| + \dots + |\sigma_s(\alpha)| + |\sigma_{s+1}(\alpha)| + |\overline{\sigma_{s+1}(\alpha)}| + \dots + |\sigma_{s+t}(\alpha)| + |\overline{\sigma_{s+t}(\alpha)}| \leq a.$$

Тогда по неравенству о средних мы имеем

$$\left| \sigma_1(\alpha) \cdot \dots \cdot \sigma_s(\alpha) \sigma_{s+1}(\alpha) \overline{\sigma_{s+1}(\alpha)} \cdot \dots \cdot \sigma_{s+t}(\alpha) \overline{\sigma_{s+t}(\alpha)} \right| \leq \left(\frac{a}{n}\right)^n \Leftrightarrow N(\alpha) \leq \left(\frac{a}{n}\right)^n$$

Заметим, что в неравенстве (5) равенство будет достигаться при

$$a^n = \frac{2^n \sqrt{|\operatorname{disc}(K)|} N(I) n!}{2^t 2^s} \cdot \left(\frac{2}{\pi}\right)^t = \left(\frac{4}{\pi}\right)^t n! N(\alpha) \sqrt{|\operatorname{disc}(K)|}.$$

В этом случае будет выполняться неравенство

$$N(\alpha) \leq \left(\frac{a}{n}\right)^n = \left(\frac{4}{\pi}\right)^t \frac{n!}{n^n} N(I) \sqrt{\operatorname{disc} K}.$$

Замечание. Подставим в этом неравенство, например, единичный идеал. Тогда мы получим неравенство

$$1 \leq \left(\frac{4}{\pi}\right)^t \frac{n!}{n^n} \sqrt{\text{disc } K}.$$

Например, из этого неравенства следует, что $\text{disc}(K) \neq 1$ (в случае нетривиального расширения).

Теорема 37. Пусть K/\mathbb{Q} — конечное расширение, $[K : \mathbb{Q}] = n > 1$. Тогда $\text{disc}(K) \neq 1$. Кроме того,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \text{disc}(K) = \infty.$$

Получим теперь при помощи новых методов некоторые результаты, связанные с группой классов идеалов числового поля.

Мы доказали, что для ненулевого идеала I в \mathcal{O}_K существует $\alpha \in I$:

$$N(\alpha) \leq \left(\frac{4}{\pi}\right)^t \frac{n!}{n^n} N(I) \sqrt{\text{disc } K}.$$

Возьмём класс $[J] \in \mathcal{C}\ell(K)$, для него существует целый идеал I такой, что $[J] = [I^{-1}] \in \mathcal{C}\ell(K)$. Пусть $\alpha \in I$. С одной стороны, αI^{-1} представляет тот же класс в группе классов, а с другой стороны,

$$|N(\alpha)| \leq \left(\frac{4}{\pi}\right)^t \cdot \frac{n!}{n^n} N(I) \sqrt{|\text{disc}(K)|}.$$

$$N(\underbrace{\alpha I^{-1}}_{\text{целый}}) = N(\alpha) N(I^{-1}) \leq \left(\frac{4}{\pi}\right)^t \frac{n!}{n^n} \sqrt{|\text{disc}(K)|}.$$

Но, как мы уже замечали, существует лишь конечное число целых идеалов с ограниченной нормой. Значит, мы получили еще одно (геометрическое) доказательство теоремы 26.

Пример 16. Рассмотрим $K = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{6})$. Посмотрим сначала на количество вложений. Нетрудно убедиться в том, что $n = 3, t = 1$. Сосчитаем теперь дискриминант K . Для этого покажем, что $\mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\sqrt[3]{6}]$. Обозначим $\theta = \sqrt[3]{6}$ и посчитаем $[\mathcal{O}_K : \mathbb{Z}[\theta]]$. Заметим, что минимальный многочлен θ — это $x^3 - 6$, а минимальный многочлен θ^2 — это $x^2 - 36$, а тогда

$$\text{disc}(K) \cdot (\text{ind}(\theta))^2 = \text{disc}(1, \theta, \theta^2) = \det \begin{pmatrix} \text{Tr}(1) & \text{Tr}(\theta) & \text{Tr}(\theta^2) \\ \text{Tr}(\theta) & \text{Tr}(\theta^2) & \text{Tr}(\theta^3) \\ \text{Tr}(\theta^2) & \text{Tr}(\theta^3) & \text{Tr}(\theta^4) \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 18 \\ 0 & 18 & 0 \end{pmatrix} = -2^2 3^5.$$

Заметим, что многочлен $x^3 - 6$ является многочленом Эйзенштейна относительно и двойки и тройки, а значит, $\text{ind}(\theta)$ не может делиться на 2 и 3, откуда $\text{ind}(\theta) = 1$. Значит, $\text{disc}(K) = -2^5 \cdot 3^5$. Подставим это в полученное выше неравенство:

$$N(\underbrace{\alpha I^{-1}}_{\text{целый}}) = N(\alpha) N(I^{-1}) \leq \left(\frac{4}{\pi}\right)^t \frac{n!}{n^n} \sqrt{|\text{disc}(K)|} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{6}{27} \cdot \sqrt{2^5 \cdot 3^5} < \frac{16}{\sqrt{3}} < 10.$$

То есть, в любом классе есть целый представитель, норма которого меньше 10. Значит, чтоб показать, что группа классов тривиальна, нам достаточно показать, что любой идеал, висящий над 2, 3, 5, 7 — главный.

Из теоремы Куммера 31 легко понять, что

$$2\mathcal{O}_K = (2, \theta)^3 = (\theta - 2)^3,$$

так как $N(\theta - 2) = -2 \implies (\theta - 2)$ — простой и он тоже висит над двойкой, откуда $(2, \theta) = (\theta - 2)$.

Аналогичное явление будет и с тройкой:

$$3\mathcal{O}_K = (3, \theta)^3 = \left(\frac{\theta}{\theta - 2}\right)^3 = \left(\frac{6 + 2\theta^2 + 4\theta}{-2}\right)^3 = (3 + \theta^2 + 2\theta)^3.$$

Действительно, $N(\theta) = 6$, $N(\theta - 2) = -2$, откуда $N\left(\frac{\theta}{\theta-2}\right) = -3$, то есть $\frac{\theta}{\theta-2}$ — простой, висящий над тройкой, $(3, \theta) = \left(\frac{\theta}{\theta-2}\right)$.

Теперь, опять же из теоремы Куммера 31, мы получаем, что

$$5\mathcal{O}_K = (5, \theta - 1)(5, \theta^2 + \theta + 1)^2$$

и надо показать, что эти идеалы главные. В самом деле, $N(\theta - 1) = 5$ и при этом

$$\frac{5}{\theta - 1} = \theta^2 + \theta + 1,$$

откуда $(5, \theta^2 + \theta + 1) = (\theta^2 + \theta + 1)$, $(5, \theta - 1) = (\theta - 1)$. Теперь, делаем то же самое над семёркой:

$$x^3 - 6 = x^3 + 1 = (x + 1)(x^2 - x + 1) = (x + 1)(x - 3)(x - 5) \text{ в } \mathbb{F}_7[x].$$

Тогда семёрка будет раскладываться, как

$$7\mathcal{O}_K = (7, \theta + 1)(7, \theta - 3)(7, \theta - 5).$$

Во-первых, заметим, что

$$\frac{7}{\theta + 1} = \frac{7(\theta^2 - \theta + 1)}{\theta^3 + 1} \implies (7, \theta + 1) = (\theta + 1).$$

$$N(\theta - 3) = 21, N\left(\frac{\theta}{\theta - 2}\right) = -2 \implies N\left(\frac{(\theta - 3)(\theta - 2)}{\theta}\right) = -7$$

Этот элемент даёт нам максимальный главный идеал, висящий над семёркой. Нетрудно заметить, что

$$(7, \theta - 3) \subset \left(\frac{(\theta - 3)(\theta - 2)}{\theta}\right)$$

а так как оба идеала максимальные, они совпадают. Значит и третий идеал главный (так как произведение трех главных идеалов равно главному идеалу).

Таким образом, мы показали, что любой идеал кольца \mathcal{O}_K является главным, то есть, что $\mathcal{Cl}(\mathbb{Q}(\sqrt[3]{6})) = 0$.

Домашнее задание 11. Задачи:

1. Докажите, что для любого простого p уравнение

$$3x^2 + 4y^3 + 5z^3 = 0$$

имеет ненулевое решение над \mathbb{F}_p .

2. Докажите, что $1 - 6\theta + 3\theta^2 \in \mathcal{O}_K^*$, где $K = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{6})$.
3. Докажите, что $\text{Cl}(\mathbb{Q}(\sqrt{-23})) = \mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$.

2.18 Мультипликативная группа кольца целых числового поля

Пусть числа s и t , связанные с количеством вложений числового поля $K \rightarrow \mathbb{Q}^{alg}$ определены как в . В этом параграфе мы докажем, что мультипликативная группа кольца целых числового поля имеет вид

$$\mathcal{O}_K^* \cong \mu \oplus \mathbb{Z}^{s+t-1},$$

где μ — группа корней из единицы. Этот факт будет иметь множество приложений. Этот факт обычно называют *сильной формой теоремы Дирихле о единицах*.

Пример 17. Рассмотрим квадратичное расширение $K = \mathbb{Q}(\sqrt{d})$. Если $\mathbb{Q}(\zeta_n) \subset \mathbb{Q}(\sqrt{d})$, то $[\mathbb{Q}(\zeta_n) : \mathbb{Q}] \leq 2$, но с другой стороны $[\mathbb{Q}(\zeta_n) : \mathbb{Q}] = \varphi(n)$, откуда $n = 1, 2, 3, 4, 6$. Если $n = 3$, то $d = -3$, если $n = 4$, то $d = -1$, если $n = 6$, то $d = -3$, но $\mathbb{Q}(\zeta_6) = \mathbb{Q}(\zeta_3)$, так как $\zeta_6 = -\zeta_3$, а в остальных случаях нетривиальных корней из единицы в этом поле нет.

Пусть s и t определены как тут. Соответственно, если $d > 0$, то $s = 2, t = 0 \implies s + t - 1 = 1 \implies \mathcal{O}_K^* = \{\pm\theta \mid \theta \in \mathbb{Z}\}$.

Если $d > 0$ и $d \not\equiv 1 \pmod{4} \implies \mathcal{O}_K = \mathbb{Z}[\sqrt{d}]$. Как мы помним, $u \in \mathcal{O}_K^* \Leftrightarrow N_{K/\mathbb{Q}}(u) = \pm 1$. В нашем случае

$$N(x + y\sqrt{d}) = x^2 - dy^2 = \pm 1 \quad (6)$$

и из другого описания \mathcal{O}_K^* мы получаем, что все решения уравнения (6) имеют вид $\{\pm\theta^m \mid m \in \mathbb{Z}\}$. Из этого, например, следует, что решений уравнения (6) бесконечно много.

Вообще говоря, этот самый элемент $\theta = \theta_d$ может иметь очень неприятный вид. Например, $\theta_2 = 1 + \sqrt{2}$, $\theta_3 = 2 + \sqrt{3}$, $\theta_{94} = 2143295 + 221064\sqrt{94}$.

Если же $d < 0$, то вполне ясно, что $s = 0, t = 1 \implies s + t - 1 = 0$, откуда следует, что $\mathcal{O}_K^* = \mu$, откуда, в частности, следует, что уравнение (6) имеет конечно число решение.

Теорема 38 (Дирихле, о единицах, слабая форма). Мультипликативная группа кольца целых \mathcal{O}_K числового поля K имеет вид

$$\mathcal{O}_K^* \cong \mu \oplus \mathbb{Z}^m, \text{ где } m \leq s + t - 1.$$

Доказательство. Рассмотрим отображение $\ell: K^* \rightarrow \mathbb{R}^{s+t}$, действующее следующим образом

$$\ell(\alpha) = (\log |\sigma_1 \alpha|, \log |\sigma_2 \alpha|, \dots, \log |\sigma_s \alpha|, \log |\sigma_{s+1} \alpha|^2, \dots, \log |\sigma_{s+t} \alpha|^2).$$

Заметим, что это гомоморфизм групп, $\ell(\alpha\beta) = \ell(\alpha) + \ell(\beta)$. Рассмотрим сужение $\ell: \mathcal{O}_K^* \rightarrow \mathbb{R}^{s+t}$ (чтоб не перегружать обозначения, с этого момента мы называем сужение той же буквой ℓ). Посчитаем ядро этого отображения:

$$\alpha \in \text{Ker } \ell \Leftrightarrow \forall i = 1, \dots, s+t \quad |\sigma_i \alpha| = 1 \xRightarrow{\text{Л. 26}} \text{Ker } \ell = \mu.$$

Теперь посчитаем $\text{Im } \ell$, $\ell: \mathcal{O}_K^* \rightarrow \mathbb{R}$. Пусть $\alpha \in \mathcal{O}_K^*$, тогда мы знаем, что $N(\alpha) = \pm 1$, откуда

$$\log |N(\alpha)| = \log |\sigma_1 \alpha| + \dots + \log |\sigma_{s+1} \alpha| + \log |\bar{\sigma}_{s+1} \alpha| + \dots = 0,$$

что даёт нам, что образы всех обратимых элементов лежат в гиперплоскости

$$x_1 + x_2 + \dots + x_{s+t} = 0.$$

Лемма 31. $\text{Im } \ell$ — решётка в \mathbb{R}^{s+t} .

Доказательство. Надо проверить, что $\text{Im } \ell$ — это дискретная подгруппа в \mathbb{R}^{s+t} (то, что это подгруппа — очевидно). Иными словами, нам надо показать, что в любом ограниченном множестве содержится конечное число точек из $\text{Im } \ell$. Ясно, что это достаточно проверять для шаров, рассмотрим шар $\bar{B}_r(0)$.

Ясно, что неравенства

$$\log |\sigma_j \alpha| \leq r \quad \forall j \Leftrightarrow |\sigma_j \alpha| \leq e^r \quad \forall j = 1, \dots, s, \quad |\sigma_j \alpha| < e^{\frac{r}{2}} \quad \forall j = s+1, \dots, s+t.$$

Нетрудно заметить, что из этих неравенств следуют неравенства на мнимую и вещественную часть координат $s+1, \dots, s+t$, то есть мы имеем

$$|\sigma_j \alpha| \leq e^r \quad \forall j = 1, \dots, s, \quad |\text{Im } \sigma_j \alpha| \leq e^{\frac{r}{2}}, \quad |\text{Re } \sigma_j \alpha| \leq e^{\frac{r}{2}} \quad \forall j = s+1, \dots, s+t.$$

Но, в предыдущем параграфе мы уже рассматривали отображение φ

$$\varphi(\alpha) = (\sigma_1(\alpha), \sigma_2(\alpha), \dots, \sigma_s(\alpha), \text{Re}(\sigma_{s+1}(\alpha)), \text{Im}(\sigma_{s+1}(\alpha)), \dots, \text{Re}(\sigma_{s+t}(\alpha)), \text{Im}(\sigma_{s+t}(\alpha))) \in \mathbb{R}^n,$$

и доказывали, что $\text{Im } \varphi$ — решётка. Тогда по предложению 24 в шаре \bar{B}_{e^r} лежит лишь конечное число точек из образа φ , но тогда, по отмеченному выше, там будет лежать лишь конечное число точек из $\text{Im } \ell$, а тогда по предложению 25 $\text{Im } \ell$ — решётка. \square

Значит, $\text{Im } \ell$ порождён m линейно-независимыми в \mathbb{R}^{s+t} векторами и $\text{Im } \ell \cong \mathbb{Z}^m$. С другой стороны, так как $\text{Im } \ell$ лежит в гиперплоскости, $m \leq s + t - 1$. Тогда у нас есть короткая точная последовательность

$$0 \rightarrow \text{Ker } \ell \hookrightarrow \mathcal{O}_K^* \xrightarrow{\ell} \text{Im } \ell \rightarrow 0.$$

Как мы уже выяснили выше, $\text{Ker } \ell \cong \mu$, а $\text{Im } \ell \cong \mathbb{Z}^m$, $m \leq s + t - 1$, а значит

$$0 \rightarrow \mu \hookrightarrow \mathcal{O}_K^* \xrightarrow{\ell} \mathbb{Z}^m \rightarrow 0, \quad m \leq s + t - 1.$$

откуда $\mathcal{O}_K^* \cong \mu \oplus \mathbb{Z}^m$, $m \leq s + t - 1$. □

Даже слабая форма теоремы Дирихле о единицах позволяет успешно вычислять мультипликативные группы колец целых числовых полей.

Пример 18. Из 2.19 мы знаем, что в $K = \mathbb{Q}(\theta)$, где $\theta^3 = 6$ мы имеем

$$\frac{1}{1 - 6\theta + 3\theta^2} = 109 + 60\theta + 33\theta^2$$

В данном случае $s = 1, t = 1 \implies s + t - 1 = 1$, откуда $m = 1$, так как ясно, что $m \leq 1$, так как если $m = 0$, то никаких обратимых элементов, кроме μ в \mathcal{O}_K нет, а из корней из единицы в этом кольце есть только ± 1 , так как если $\mathbb{Q}(\zeta_n) \subset \mathbb{Q}(\sqrt[3]{6})$, то $\varphi(n) = 1$ или 2 (но ± 1 там всё-таки лежит, откуда $n = 2$). Таким образом, мы имеем

$$\mathcal{O}_K^* \cong \mu_2 \oplus \mathbb{Z}.$$

Предложение 26. Элемент $1 - 6\theta + 3\theta^2$ — основная единица в \mathcal{O}_K^* .

Доказательство. Этот пример со всеми сопутствующими вычислениями будет добавлен несколько позже, приношу извинения. □

Домашнее задание 12. • Рассмотрим $K = \mathbb{Q}(\zeta_5)$. Докажите, что \mathcal{O}_K — евклидово.

- Приведите пример неизоморфных расширений K_1, K_2 над \mathbb{Q} одинаковой степени и таких, что $\text{disc}(K_1) = \text{disc}(K_2)$.

Рассмотрим $K_1 = \mathbb{Q}(\theta)$, $\theta^3 - 18\theta - 6 = 0$, $K_2 = K(\xi)$, $\xi^3 - 36\xi - 78 = 0$, $K_3 = \mathbb{Q}(\theta^3 - 54\theta - 150) = 0$.

- Тут была еще задача, её надо с фотки переписать.

Докажем теперь сильную теорему Дирихле о единицах:

Теорема 39. Пусть K/\mathbb{Q} — конечное расширение, $[K : \mathbb{Q}] = a$, а числа s, t связаны с количествами вещественных и комплексных вложений. Тогда

$$\mathcal{O}_K^* \cong \mu \oplus \mathbb{Z}^{s+t-1},$$

где μ — группа всех корней из единицы в \mathcal{O}_K .

Доказательство. Ясно, что для этого нам достаточно доказать оценку $m \geq s + t - 1$, а это равносильно тому, что $\text{Im } \ell$ — полная решётка в гиперплоскости

$$x_1 + x_2 + \dots + x_{s+t} = 0.$$

Для этого необходимо найти систему из $(s + t - 1)$ -го линейно независимого над \mathbb{R} элемента $\ell(\mathcal{O}_K^*)$.

Соответственно, надо найти $s + t$ элементов $u_1, \dots, u_{s+t} \in \mathcal{O}_K^*$, которые дадут нам $s + t - 1$ линейно независимый над \mathbb{R} вектор в образе. Мы постараемся найти такие u , что их образы имеют вид

$$u_1 \mapsto (+, -, -, \dots, -), u_2 \mapsto (-, +, -, \dots, -), \dots, u_n \mapsto (-, -, \dots, +).$$

Обозначение выше означает, что на соответствующей координате стоит число соответствующего знака. Покажем сначала, что такие векторы нам подойдут. Возьмём первые $s + t - 1$ координату первых $s + t - 1$

столбцов матрицы, где $\ell(u_i)$ записаны по строкам и обозначим за A . Для ясности, выпишем еще раз эту матрицу:

$$A = \begin{pmatrix} + & - & - & \dots & - \\ - & + & - & \dots & - \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ - & - & - & \dots & + \end{pmatrix}, \quad A \in M_{s+t-1}(\mathbb{R}).$$

Ясно, что достаточно доказать, что эта матрица имеет полный ранг. Заметим, что так как образ лежит в гиперплоскости $x_1 + \dots + x_{s+t} = 0$ изначально сумма по каждой строке равна нулю, то есть

$$a_{i,1} + a_{i,2} + \dots + a_{i,s+t} = 0,$$

а так как $\forall i = 1, \dots, s+t-1 \quad a_{i,s+t} < 0$, в усеченной матрице (которую мы обозначили за A), сумма по каждой строке будет равна

$$a_{i,1} + a_{i,2} + \dots + a_{i,s+t-1} > 0.$$

Докажем теперь такую лемму:

Лемма 32. Пусть $A \in M_m(\mathbb{R})$ такая, что $\forall i \quad a_{ii} > 0$, $\forall i \neq j \quad a_{ij} < 0$, $\forall i \quad \sum_{j=1}^m a_{ij} > 0$. Тогда $\text{rank } A = m$.

Доказательство. Предположим, что $\text{Ker } A \neq \{0\}$, то есть система

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1m}x_m = 0 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mm}x_m = 0 \end{cases}.$$

имеет нетривиальное решение.

Не умаляя общности, x_1 — максимальная по модулю координата. Тогда

$$0 = |a_{11}x_1 + \dots + a_{1m}x_m| \geq |a_{11}x_1| - |a_{12}x_2| - \dots - |a_{1m}x_m| \geq |x_1| \underbrace{(a_{11} - |a_{12}| - \dots - |a_{1m}|)}_{>0} \geq 0,$$

откуда $|x_1| = 0 \implies |x_i| = 0 \quad \forall i = 1, \dots, m$. □

Остаётся найти систему u_1, \dots, u_{s+t} , которые в образе дадут нужные знаки координат. Пусть $n = s + 2t$, рассмотрим множество

$$Y = \{(x_1, \dots, x_s, y_1, z_1, \dots, y_t, z_t), \quad |x_i| < C_i \forall 1 \leq i \leq s, y_i^2 + z_i^2 < C_{s+i}\}.$$

Нетрудно проверить, что Y — ограниченное, выпуклое и центрально-симметричное. Кроме того,

$$\text{Vol}(Y) = 2^s \prod_{i=1}^s C_i \cdot \pi^t \cdot \prod_{i=1}^t C_{s+i} = 2^s \pi^t \cdot \prod_{i=1}^{s+t} C_i.$$

Пусть Γ — полная решётка, Δ — объем фундаментальной области. Тогда, если

$$2^s \pi^t \prod_{i=1}^{s+t} C_i > 2^n \Delta,$$

то Y будет содержать точку из решетки Γ (по лемме Минковского о выпуклом теле 30). В качестве Γ мы возьмём $\text{Im } \varphi$, где

$$\varphi(\alpha) = (\sigma_1(\alpha), \sigma_2(\alpha), \dots, \sigma_s(\alpha), \text{Re}(\sigma_{s+1}(\alpha)), \text{Im}(\sigma_{s+1}(\alpha)), \dots, \text{Re}(\sigma_{s+t}(\alpha)), \text{Im}(\sigma_{s+t}(\alpha))) \in \mathbb{R}^n.$$

Заметим, что неравенство выше равносильно тому, что

$$\prod_{i=1}^{s+t} C_i > \left(\frac{4}{\pi}\right)^t \cdot \Delta.$$

Возьмём $C > \left(\frac{4}{\pi}\right)^t \Delta$ и рассмотри все главные идеалы $a_i \mathcal{O}_K \subset \mathcal{O}_K$: $N(a_i \mathcal{O}_K) < C$. Пусть $\varepsilon = \min(|\sigma_i a_j|, |\sigma_{s+i} a_j|^2) > 0$.

Зафиксируем теперь некоторый $\sigma_j \in \{\sigma_1, \dots, \sigma_s, \sigma_{s+1}, \dots, \sigma_{s+t}\}$ и определим

$$C_i = \begin{cases} \varepsilon, i \neq j \\ C \cdot \varepsilon^{-(s+t-1)}, i = j \end{cases}.$$

Нетрудно заметить, что всё подобрано таким образом, что

$$\prod_{i=1}^{s+t} C_i > \left(\frac{4}{\pi}\right)^t \Delta.$$

Тогда по лемме 30 $\exists 0 \neq x \in \mathcal{O}_K$:

$$|\sigma_1 x| < C_1, \dots, |\sigma_s x| < C_s, \quad |\sigma_{s+1} x|^2 < C_{s+1}, \dots, |\sigma_{s+t} x|^2 < C_{s+t}.$$

Вычислим норму этого $x \in \mathcal{O}_K$

$$N(x \mathcal{O}_K) = |N(x)| = |\sigma_1 x| \dots |\sigma_s x| |\sigma_{s+1} x|^2 \dots |\sigma_{s+t} x|^2 < \prod_{i=1}^{s+t} C_i = C.$$

Значит, для некоторого i мы имеем $x \mathcal{O}_K = a_i \mathcal{O}_K$. Положим $u = \frac{x}{a_i}$. Тогда $N(u) = 1 \implies u \in \mathcal{O}_K^*$.

Так для каждого σ_j мы находим свой u (назовём его u_j). Проверим, что $\{u_j\}$ подойдут. Пусть $\tau = \sigma_i$,

$$|\tau u_j| = \frac{|\tau x|}{|\tau a_k|},$$

докажем, что для всех $\tau \neq \sigma_j$ будет выполнено $|\tau u_j| < 1$ (это означает, что в соответствующей координате будет знак минус). Ясно, что этого будет достаточно, так как сумма координат равна нулю. Рассмотрим два случая:

- Пусть $\tau \in \{\sigma_1, \dots, \sigma_s\}$, $\tau = \sigma_i$, тогда

$$|\tau u_j| = \frac{|\tau x|}{|\tau a_k|} < \frac{C_i}{\varepsilon} = 1, \text{ так как } i \neq j.$$

- Пусть $\tau \in \{\sigma_{s+1}, \dots, \sigma_{s+t}\}$, тогда

$$|\tau u_j| = \frac{|\tau x|}{|\tau a_j|} < \frac{\sqrt{C_i}}{\sqrt{\varepsilon}} = 1.$$

Таким образом, мы показали, что $\text{Im } \ell$ — полная решетка в гиперплоскости, то есть $\text{Im } \ell \cong \mathbb{Z}^{s+t-1}$, откуда, как мы уже замечали в доказательстве слабой теоремы Дирихле о единицах 38

$$\mathcal{O}_K^* \cong \mu \oplus \mathbb{Z}^{s+t-1}.$$

□

Предложение 27 (ДЗ 11, задача 3). Пусть $K = \mathbb{Q}(\alpha)$, $\alpha^3 + a\alpha + \beta$, где $a, \beta \in \mathbb{Z}$. Пусть $(p) = \mathfrak{p}_1 \mathfrak{p}_2 \mathfrak{p}_3$ и $\alpha \in \mathfrak{p}_1 \mathfrak{p}_2$. Тогда $\alpha \in \mathfrak{p}_3$.

Доказательство. Перепишем данное равенство, как $\alpha(\alpha^2 + a) = -\beta$ и возьмём норму от обеих частей:

$$N(\alpha) N(\alpha^2 + a) = -\beta^3 \implies N(\alpha) = -\beta, N(\alpha^2 + a) = \beta^2.$$

Далее разберём несколько случаев:

1. Если $a \in p\mathbb{Z}$, несложно убедиться, что $p \mid \beta$ а тогда $\alpha^3 \in p\mathcal{O}_K \subset \mathfrak{p}_3 \implies \alpha \in \mathfrak{p}_3$, так как идеал простой.

2. Пусть теперь $a \notin p\mathbb{Z}$. Положим $v_p(b) = n \geq 1$. Тогда $\alpha^2 + a \notin \mathfrak{p}_1, \notin \mathfrak{p}_2$, но с другой стороны $N(\alpha^2 + a) : p \implies \alpha^2 + a \in \mathfrak{p}_3$. Заметим, что $N(\mathfrak{p}_3) = p$, $\alpha^2 + a = \mathfrak{p}_3 q$, откуда

$$b^2 = N(\alpha^2 + a) = p^s \underbrace{N(q)}_{\not\equiv p}, v_p(b) = 2n \implies s = 2n.$$

Тогда $\alpha(\alpha^2 + a) = -b$, откуда $v_{\mathfrak{p}_3}(\alpha(\alpha^2 + a)) = 2n$, а с другой стороны

$$\alpha(\alpha^2 + a) = p^n \cdot d, (d, p) = 1 \implies \alpha(\alpha^2 + a) = \mathfrak{p}_1^n \cdot \mathfrak{p}_2^n \cdot \mathfrak{p}_3^n,$$

что даёт нам противоречие.

Итак, в качестве контрпримера мы будем рассматривать кубическое уравнение

$$3x_1^3 + 4y_1^3 + 5z_1^3 = 0.$$

Сделаем такие замены переменных:

$$z = -z_1, \quad x = 2y_1, y = x_1.$$

В результате мы получим уравнение

$$x^3 + 6y^3 = 10z^3.$$

Наша задача будет состоять в том, чтобы доказать, что оно не имеет нетривиальных целых решений. Предположим противное и выберем решение с минимальным $|z|$. Заметим, что в таком случае мы работаем в кольце целых поля $\mathbb{Q}(\theta)$, где $\theta^3 = 6$ и тогда

$$N(x + \theta y) = 10z^3.$$

Положим $\alpha = x + \theta y$, $(\alpha) = \mathfrak{p}_1^m q$, где $\mathfrak{p}_1 \nmid 2$, $\mathfrak{p}_1 \nmid 5$, но $\mathfrak{p}_1 \mid p \neq 2, 5$.

Далее рассмотрим два случая:

1. $q \nmid p$: применяя норму к равенству выше, получаем

$$(10z^3) = (N(\mathfrak{p}_1))^m N(q).$$

В левую часть p входит в кратной трём степени, посмотрим на правую часть. $N(\mathfrak{p}_1)$ — некоторая степень p от единицы до тройки, пусть $N \mathfrak{p}_1 = p^s$. Тогда мы получаем, что $sm : 3$, откуда или s , или p делится на 3. Пусть $s : 3$, тогда $N \mathfrak{p}_1 = p^3 \implies \mathfrak{p}_1 = \mathfrak{p}$ (так как эта степень — степень инерции), но тогда $\alpha : p \implies p \mid x, p \mid y$ и мы сможем перейти к аналогичному решению с меньшим модулем, просто поделив на p .

Значит $m : 3 \implies$.

2. Пусть $(q, (p)) \neq 1 \implies (\alpha) = \mathfrak{p}_1^m \mathfrak{p}_2 q'$ (где \mathfrak{p}_2 — ещё один простой идеал над p). Если $p = \mathfrak{p}_1 \mathfrak{p}_2 \mathfrak{p}_3$ и мы можем применить задачу 27 для

$$\alpha\theta = (x + y\theta)\theta = x\theta + y\theta^2 \implies \text{Tr}(\alpha\theta) = 0 \implies \alpha\theta \notin \mathbb{Q}.$$

Т.е. α — порождающий элемент нашего расширения. Так вот, по предыдущей задаче $\alpha\theta \in (p)$.

В противном случае $(p) = \mathfrak{p}_1^2 \mathfrak{p}_2$ или $(p) = \mathfrak{p}_1 \mathfrak{p}_2$ или $(p) = \mathfrak{p}_1 \mathfrak{p}_2^2$. В любом из этих случаев мы получаем, что $\alpha^2 : p$, но в то же время

$$\alpha^2 = (x + y\theta)^2 = x^2 + 2xy\theta + y^2\theta^2 \implies p \mid x, p \mid y$$

и мы снова можем сделать спуск.

Теперь мы можем заключить, что $\alpha^3 = I^3 \cdot \mathfrak{m}$, где \mathfrak{m} — произведение максимальных идеалов над 2 и над 5.

Совершенно ясно, что z нечётно. Посмотрим, какие идеалы висят над двойкой: по модулю два уравнение имеет вид $x^3 - 6 = 0$, откуда над двойкой висит единственный максимальный идеал $\mathfrak{p}_2 = (2, \theta) = (\theta - 2)$ и двойка является его кубом. В то же время, $N(\theta - 2) = 2$, откуда $v_{\mathfrak{p}_2}(\alpha) = 1$. Теперь посмотрим на идеалы, висящие над пятеркой:

$$x^3 - 6 = (x - 1)(x^2 + x + 1) \pmod{5} \implies \mathfrak{p}_5 = (5, \theta - 1) = (\theta - 1), \quad \mathfrak{p}' = (5, \theta^2 + \theta + 1) = (\theta^2 + \theta + 1).$$

$N(\theta - 1) = 6$, а так как норма пятёрки — это 5^3 , мы имеем $N(\theta^2 + \theta + 1) = 5^2$.

Значит, в α входит либо \mathfrak{p}_5 , либо \mathfrak{p}'_5 , но не одновременно, так как иначе α делится на 5 и можно сделать спуск.

Проанализируем по отдельности эти два случая:

1. $(\alpha) = \mathfrak{p}_2 \mathfrak{p}_5^2 \cdot \dots$, возьмём норму в этом равенстве:

$$10z^3 = N((\alpha)) = N(\mathfrak{p}_5)^{3s+1} \cdot \dots$$

2. В этом случае $(\alpha) = \mathfrak{p}_2 \mathfrak{p}_5^{3r+2} \cdot \dots$

Тогда $(\alpha) = \mathfrak{p}_2 \mathfrak{p}_5 J^3 = (\theta - 2)(\theta - 1)J^3 = (\theta - 2)(\theta^2 + \theta + 1)^2 J^3 = ((\theta - 2)(\theta - 1)t^3) = ((\theta - 2)(\theta^2 + \theta + 1)^2 t^3)$. Значит, идеалы отличаются на обратимый элемент, а из теоремы Дирихле о единицах, мы знаем все обратимые элементы, то есть

$$(\alpha) = \alpha_0 t_0^3, \quad \alpha_0 \in \{(\theta - 2)(\theta - 1), (\theta - 2)(\theta^2 + \theta + 1)^2, x_1, x_2, x_3, x_4\},$$

где x_i — результат домножения первых двух элементов на первую и вторую степени основной единицы $\varepsilon = 1 - 6\theta + 3\theta^2$ (кратную трём степень основной единицы мы можем заносить в t_0^3). Итак, пусть

$$\alpha = (\theta - 2)(\theta - 1)(u + v\theta + w\theta^2)^3 = (\theta^2 - 3\theta + 2)(u + v\theta + w\theta^2)^3 = x + y\theta.$$

Посмотрим на это равенство по модулю 3 и приравняем коэффициенты при θ^2 : Скобка с кубом (так как $\theta^3 = 6$) по модулю 3 равна u^3 , откуда при θ^2 коэффициент по модулю три в левой части равенства будет равен u^3 в левой части и 0 в правой части. Значит, $u \equiv 0 \pmod{3}$. Тогда $(u + v\theta + w\theta^2)^3 \equiv 0 \pmod{3}$, откуда $\alpha : 3 \implies x, y : 3$ и мы можем сделать спуск. Так как $\varepsilon \equiv 1 \pmod{3}$, при домножении на ε и ε^2 ничего существенно нового не происходит (а оставшийся случай разбирается аналогично). □

2.19 Поле p -адических чисел и лемма Гензеля

Напомним вкратце определение поля \mathbb{Q}_p . Как мы помним из курса алгебры, *кольцо целых p -адических чисел* определяется как

$$\mathbb{Z}_p = \varprojlim \mathbb{Z}/p^\ell \mathbb{Z}$$

Соответственно, его элементы имеют вид $\sum_{k=1}^{\infty} a_k p^k$, а операции определяются по координатам по модулю p . Кроме того ясно, что элемент \mathbb{Z}_p обратим тогда и только тогда, когда $a_0 \not\equiv 0 \pmod{p}$, а любой элемент $x \in \mathbb{Z}_p$ единственным образом представляется в виде

$$x = p^k \cdot \varepsilon, \quad \varepsilon \in \mathbb{Z}_p^*, k \in \mathbb{N}. \quad (7)$$

Отсюда в частности следует, что кольцо \mathbb{Z}_p локальное с единственным максимальным идеалом (p) .

Кольцо \mathbb{Z}_p целостное и его поле частных мы называем полем p -адических чисел \mathbb{Q}_p . Также ясно, что любой $x \in \mathbb{Q}_p$ представляется в виде

$$x = p^k \cdot \varepsilon, \quad \varepsilon \in \mathbb{Z}_p^*, k \in \mathbb{Z}. \quad (8)$$

Отметим также, что кольцо \mathbb{Z}_p является кольцом дискретного нормирования (со всеми вытекающими из этого хорошими свойствами), нормирование на нём определяется следующим образом:

$$x = p^n u, \quad u \in \mathbb{Z}_p^* \rightsquigarrow v_p(x) = n.$$

Полагая $\mathcal{U} = \mathbb{Z}_p^*$ мы имеем такую точную последовательность

$$1 \rightarrow \mathcal{U} \rightarrow \mathbb{Q}_p^* \xrightarrow{v} \mathbb{Z} \rightarrow 0.$$

Кроме того, на \mathbb{Q}_p при помощи этого нормирования можно определить *неархимедову p -адическую норму*

$$|x|_p = \begin{cases} p^{-v_p(x)}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$$

Она удовлетворяет всем аксиомам нормы, но вместо неравенства треугольника имеет место более сильное *ультраметрическое неравенство*:

$$v_p(x + y) \geq \min(v_p(x), v_p(y)) \rightsquigarrow |x + y|_p \leq \max(|x|_p, |y|_p).$$

Соответственно, нетрудно убедиться в том, что \mathbb{Q}_p — пополнение \mathbb{Q} по p -адической норме (и это даёт другую конструкцию этого поля). Одним из самых частых применений p -адических чисел является следующая известная многим со школьных лет лемма:

Лемма 33 (Лемма Гензеля). Пусть для многочлен $F(x_1, \dots, x_n)$ с целыми p -адическими коэффициентами и набора чисел $y_1, \dots, y_n \in \mathbb{Z}_p$ при некотором $1 \leq i \leq n$ мы имеем

- $F(y_1, \dots, y_n) \equiv 0 \pmod{p^{2a+1}}$.
- $\frac{\partial F}{\partial x_i}(y_1, \dots, y_n) \equiv 0 \pmod{p^a}$
- $\frac{\partial F}{\partial x_i}(y_1, \dots, y_n) \not\equiv 0 \pmod{p^{a+1}}$,

где $a \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$. Тогда существуют целые p -адические числа z_1, \dots, z_n такие, что

$$F(z_1, \dots, z_n) = 0, \quad z_i \equiv y_i \pmod{p^{a+1}}.$$

Доказательство. Во-первых, от случая многочлена многих переменных можно моментально перейти к случаю многочлена одной переменной, полагая $y = y_i$ и рассматривая

$$f(x) = F(y_1, \dots, y_{i-1}, x, y_{i+1}, \dots, y_n).$$

Тогда для доказательства теоремы нам достаточно показать, что для многочлена $f(x) \in \mathbb{Z}_p[x]$, для которого

$$f(y) \equiv 0 \pmod{p^{2a+1}}, \quad f'(y) = up^a, \quad u \in \mathbb{Z}_p^* \text{ (т.е. } v_p(f'(y)) = a),$$

найдётся $z \in \mathbb{Z}_p$ такой, что

$$f(z) = 0, \quad z \equiv y \pmod{p^{k+1}}.$$

Существование z мы докажем известным *методом касательных Ньютона*. Положим $t_0 = y$ и построим последовательность $\{t_n\}$, как

$$t_{n+1} = t_n - \frac{f(t_n)}{f'(t_n)}.$$

Сейчас про эту последовательность $\{t_n\}$ мы докажем, что

- $t_n \in \mathbb{Z}_p \quad \forall n \in \mathbb{N}$.
- $f(t_n) \equiv 0 \pmod{p^{2a+1+n}}, n \geq 0$.
- $t_n \equiv t_{n-1} \pmod{p^{a+n}}, n \geq 1$.

Докажем это мы индукцией по n . Предположим, что для некоторого $n \geq 0$ это выполнено, сделаем переход. Так как из сравнимости по модулю большей степени следует сравнимость по модулю меньшей степени,

$$t_n \equiv t_{n-1} \pmod{p^{a+n}} \implies t_n \equiv t_{n-1} \pmod{p^{a+n-1}}$$

$$\begin{cases} t_n \equiv t_{n-1} \pmod{p^{a+n-1}} \\ t_{n-1} \equiv t_{n-2} \pmod{p^{a+n-1}} \end{cases} \implies t_n \equiv t_{n-1} \equiv t_{n-2} \pmod{p^{a+n-1}}.$$

Таким образом мы имеем сравнение

$$t_n \equiv t_0 = y \pmod{p^{a+1}} \implies f'(t_n) \equiv f'(y) \pmod{p^{a+1}},$$

а $v_p(f'(y)) = a$. Тогда $v_p(f'(t_n)) = a$ и отсюда моментально следует, что

$$t_{n+1} = t_n - \frac{f(t_n)}{f'(t_n)} \in \mathbb{Z}_p,$$

так как по индукционному предположению $v_p(f(t_n)) = 2a + 1 + n$. Кроме того,

$$\frac{f(t_n)}{f'(t_n)} : p^{2a+n+1-a} = p^{a+n+1} \implies t_{n+1} \equiv t_n \pmod{p^{a+n+1}}.$$

Теперь разложим $f(x)$ по степеням $(x - t_n)$:

$$f(x) = f(t_n) + f'(t_n)(x - t_n) + (x - t_n)^2 G(x), \quad G(x) \in \mathbb{Z}_p[x].$$

Подставим $x = t_{n+1}$:

$$f(t_{n+1}) = f(t_n) + f'(t_n)(t_{n+1} - t_n) + (t_{n+1} - t_n)^2 G(t_{n+1}) = \left(\frac{f(t_n)}{f'(t_n)} \right)^2 G(t_{n+1}).$$

$$\frac{f(t_n)}{f'(t_n)} : p^{a+n+1} \implies f(t_{n+1}) : p^{2a+n+2},$$

что и требовалось.

Теперь заметим, что так как $v_p(t_n - t_{n-1}) = a + n \rightarrow \infty$, последовательность t_n сходится, положим

$$z = \lim_{n \rightarrow \infty} t_n.$$

Но тогда, с одной стороны $v_p(f(t_n)) = 2a + n + 1$, откуда $f(t_n) \rightarrow 0$, а с другой стороны, по непрерывности,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(t_n) = f(z) \implies f(z) = 0,$$

что и требовалось. □

Очень часто лемма Гензеля используется в вот таком виде

Следствие 11 (Лемма Гензеля, упрощенная форма). Пусть $f \in \mathbb{Z}_p[x]$ и $x_0 \in \mathbb{Z}_p$ таково, что

- $f(x_0) \equiv 0 \pmod{p}$
- $f'(x_0) \not\equiv 0 \pmod{p}$.

Тогда $\exists x \in \mathbb{Z}_p : x \equiv x_0 \pmod{p}, f(x) = 0$.

В следующих нескольких параграфах мы займёмся изучением принципа Минковского-Хассе, или локально-глобального принципа.

Локально-глобальным принципом в теории чисел называют рассуждения примерно такого вида:

Уравнение разрешимо над $\mathbb{Z} \Leftrightarrow$ уравнение разрешимо по модулю всех простых p .

Для линейных уравнения это утверждение очевидно выполняется. Также оно выполнено для квадратичных форм: это уже весьма нетривиальное утверждение, доказанное Минковским и Хассе:

Рациональная квадратичная форма представляет ноль над \mathbb{Q} тогда и только тогда, когда она представляет 0 над \mathbb{R} , а также представляет 0 над \mathbb{Q}_p для всех простых p .

Это весьма сильное и полезное утверждение мы докажем в следующих параграфах.

Для кубических форм локально-глобальный принцип уже не верен. В ДЗ мы показывали, что уравнение $3x^3 + 4y^3 + 5z^3 = 0$ разрешимо над \mathbb{F}_p для любого простого p . Сейчас, при помощи леммы Гензеля, мы докажем, что оно разрешимо над \mathbb{Q}_p для любого простого p . Доказать, что оно не имеет решений над \mathbb{Z} (и над \mathbb{Q} , соответственно) существенно сложнее, это мы сделаем несколько позже.

Теорема 40. Уравнение $F(x, y, z) = 3x^3 + 4y^3 + 5z^3$ разрешимо над \mathbb{Z}_p для любого простого p .

Доказательство. Пусть сначала $p \neq 2, 3, 5$. Как мы уже убеждались,

$$\exists x_0, y_0, z_0: 3x_0^3 + 4y_0^3 + 5z_0^3 \equiv 0 \pmod{p},$$

и x_0, y_0 и z_0 одновременно не делятся на p (иначе это тривиальный корень, такие нас не интересуют). Не умаляя общности, пусть $x_0 \not\equiv 0 \pmod{p}$. Тогда применим лемму Гензеля с $a = 0$ (т.е. следствие 11) к многочлену

$$f(x) = 3x^3 + (4y_0^3 + 5z_0^3).$$

Мы действительно можем её применить, так как $f(x_0) \equiv 0 \pmod{p}$, как отмечено выше, а

$$f'(x_0) = 9x_0^2 \not\equiv 0 \pmod{p}.$$

Тогда существует $x_1 \in \mathbb{Z}_p$ такой, что $3x_1^3 + 4y_0^3 + 5z_0^3 = 0$, что мы и хотели.

Теперь разберёмся с $p = 2, 3, 5$.

- При $p = 2$ рассмотрим $(x_0, y_0, z_0) = (1, 0, 1)$, который, очевидно, даст корень и аналогично случаю выше применим лемму Гензеля с $a = 0$. Действительно,

$$\frac{\partial F}{\partial x}(1, 0, 1) = 9 \not\equiv 0 \pmod{2}.$$

- При $p = 3$ рассмотрим $(x_0, y_0, z_0) = (0, 2, -1)$ и применим лемму Гензеля с $a = 1$. В самом деле, $v_9(F(0, 2, -1)) = v_{27}(27) = 1$, а рассматривая

$$\frac{\partial F}{\partial y}(0, 2, -1) = 12 \cdot 2^3 \not\equiv 0 \pmod{9},$$

становится ясно, что лемма Гензеля применима.

- При $p = 5$ рассмотрим $(x_0, y_0, z_0) = (2, -1, 0)$ и применим лемму Гензеля с $a = 0$. Действительно, $v_5(F(2, -1, 0)) = v_5(20) = 1$, а

$$\frac{\partial F}{\partial x}(2, -1, 0) = 9 \cdot 4 \not\equiv 0 \pmod{5}.$$

□

2.20 Группа квадратов поля \mathbb{Q}_p и норменная группа

Перед тем, как изучать квадратичные формы, хорошо понимать строение группы квадратов поля \mathbb{Q}_p . Её изучением мы сейчас и займёмся. Пусть сначала $p \neq 2$. Так как любое p -адическое число представимо в виде $\alpha = p^m \varepsilon$, $\varepsilon \in \mathbb{Z}_p^*$, если α является квадратом числа $\gamma = p^k \varepsilon_0$, то $m = 2k$, $\varepsilon = \varepsilon_0^2$. Соответственно, для описания группы квадратов поля \mathbb{Q}_p , достаточно понимать, какие элементы \mathbb{Z}_p являются квадратами.

Предложение 28. Пусть $p \neq 2$, тогда для того что бы целое p -адическое число

$$\varepsilon = a_0 + a_1p + a_2p^2 + \dots, \quad 0 \leq a_i < p, \quad a_0 \neq 0,$$

было квадратом, необходимо и достаточно, чтоб a_0 было квадратичным вычетом по модулю p .

Доказательство. Ясно, что если $\varepsilon = \xi^2$ и $\xi \equiv b \pmod{p}$, то $a_0 \equiv b^2 \pmod{p}$, то есть является квадратичным вычетом по модулю p .

Теперь докажем в другую сторону. Пусть $a_0 \equiv b^2 \pmod{p}$. Рассмотрим многочлен

$$f(x) = x^2 - \varepsilon, \quad f(b) \equiv 0 \pmod{p}, \quad f'(b) = 2b \not\equiv 0 \pmod{p}.$$

Значит, по лемме Гензеля 11, $\exists \xi \in \mathbb{Z}_p: f(\xi) = 0$, то есть $\varepsilon = \xi^2$. □

Это предложение позволяет нам определить символ Лежандра для элементов \mathbb{Z}_p^* . Действительно, пусть $\varepsilon = a_0 + a_1p + \dots$, положим

$$\left(\frac{\varepsilon}{p}\right) = \left(\frac{a_0}{p}\right).$$

Корректность этого определения ясна как раз из предложения 28. Кроме того, если $\eta \in \mathbb{Z}_p^*$, $\eta = b_0 + b_1p + \dots$, то

$$\left(\frac{\varepsilon\eta}{p}\right) = \left(\frac{a_0b_0}{p}\right) = \left(\frac{a_0}{p}\right)\left(\frac{b_0}{p}\right) = \left(\frac{\varepsilon}{p}\right)\left(\frac{\eta}{p}\right),$$

так как обычный (на \mathbb{Z}) символ Лежандра мультипликативен.

Изложенное выше поможет нам убедиться в том, что

$$\mathbb{Q}_p^*/\mathbb{Q}_p^{*2} = \{1, \varepsilon, p, \varepsilon p\}, \quad \varepsilon \in \mathbb{Z}_p^*, \quad \left(\frac{\varepsilon}{p}\right) = -1.$$

Во-первых, ясно, что если $\varepsilon \in \mathbb{Z}_p^*$ не является квадратом, то отношение любых из чисел $1, \varepsilon, p, \varepsilon p$ не является квадратом (т.е. это разные классы в фаторгруппе).

Во-вторых, возьмём $\xi \in \mathbb{Q}_p^*$, $\xi = p^m \theta = p^m(a_0 + a_1p + \dots)$, $\theta \in \mathbb{Z}_p^*$.

- Если $m : 2$ и a_0 , квадратичный вычет, то $[\xi] = 1 \in \mathbb{Q}_p^*/\mathbb{Q}_p^{*2}$.
- Если $m = 2k + 1$ и a_0 квадратичный вычет, то $\theta = \eta^2$ и

$$\xi = p \cdot p^{2k} \theta = p \cdot (p^k \eta)^2 \implies [\xi] = p.$$

- Если $m = 2k$, но a_0 — квадратичный невычет, то

$$\xi = p^{2k} \cdot \theta = \varepsilon \cdot (\theta \varepsilon^{-1} \cdot p^{2k}) \implies [\xi] = \varepsilon.$$

- Если $m = 2k + 1$ и a_0 — квадратичный невычет, то

$$\xi = p \cdot \varepsilon \cdot (\theta \varepsilon^{-1} \cdot p^{2k}) \implies [\xi] = p\varepsilon.$$

В последних двух пунктах мы воспользовались тем, что если ε — квадратичный невычет, то ε^{-1} — тоже, а тогда

$$\left(\frac{\theta \varepsilon^{-1}}{p}\right) = \left(\frac{\theta}{p}\right)\left(\frac{\varepsilon^{-1}}{p}\right) = (-1)^2 = 1.$$

Теперь обратимся к случаю $p = 2$. Сначала докажем такую лемму:

Лемма 34. Элемент $x \in \mathbb{Z}_2^*$ лежит в \mathbb{Q}_2^{*2} тогда и только тогда, когда $x \equiv 1 \pmod{8}$.

Доказательство. Необходимость следует из того, что квадрат нечетного числа всегда сравним с 1 по модулю 8.

Теперь докажем достаточность. Рассмотрим многочлен $f(t) = t^2 - x$. Тогда

$$f(1) = 1 - x \equiv 0 \pmod{8}, \quad f'(t) = 2t \rightsquigarrow f'(1) = 2 \implies v_2(f'(1)) = 1.$$

Тогда по лемме Гензеля 33 с $a = 1$ мы имеем нужное. □

Отсюда следует, что $\{1, 3, 5, 7, 2, 6, 10, 14\}$ представляют \mathbb{Q}_2^* по модулю \mathbb{Q}_2^* . Действительно, пусть сначала $x \in \mathbb{Z}_2$, $x \not\equiv 2$. Тогда

$$x = a_0 + 2a_1 + 4a_2 + 8y, a_0 \not\equiv 2.$$

Тогда $x \equiv a_0 + 2a_1 + 4a_2 \pmod{8}$, а $a_0 + 2a_1 + 4a_2$ обратимо по модулю 8 (так как не делится на 2). Тогда

$$\frac{x}{a_0 + 2a_1 + 4a_2} \equiv 1 \pmod{8} \implies \frac{x}{a_0 + 2a_1 + 4a_2} = z^2,$$

откуда $[x] \in \mathbb{Q}_2^*/\mathbb{Q}_2^{*2}$ будет иметь вид $[x] = a_0 + 2a_1 + 4a_2$. Так как $a_0 = 1$, а остальные коэффициенты равны единице или нулю, так мы получаем классы 1, 3, 5, 7. В случае, когда $x \equiv 2$ мы можем применить абсолютно аналогичное рассуждение к $x/2$ и получить классы 2, 6, 10, 14.

В то же время ясно, что все эти элементы будут различны. Таким образом, мы доказали такое предложение:

Предложение 29. При $p = 2$ индекс подгруппы квадратов равен $[\mathbb{Q}_p^* : \mathbb{Q}_p^{*2}] = 8$. Кроме того,

$$\mathbb{Q}_p^*/\mathbb{Q}_p^{*2} = \{1, 3, 5, 7, 2, 6, 10, 14\}.$$

Определение 43. Пусть $a \in \mathbb{Q}_p^* \setminus \mathbb{Q}_p^{*2}$. Тогда группу

$$N = N_a = \{0 \neq x^2 - ay^2 \mid x, y \in \mathbb{Q}_p\}$$

называют *норменной группой* для квадратичного расширения $\mathbb{Q}_p(\sqrt{a})$.

Замечание. То, что N это в самом деле группа следует из мультипликативности нормы в квадратичном расширении $\mathbb{Q}_p(\sqrt{a})$.

Ясно, что $\mathbb{Q}_p^{*2} \subset N$, так как можно положить $y = 0$.

Предложение 30. $|\mathbb{Q}_p^*/N| = 2$.

Доказательство. Пусть сначала $p \neq 2$. Сначала докажем, что $N \neq \mathbb{Q}_p^{*2}$. Если $-a \notin \mathbb{Q}_p^{*2}$, то это очевидно. Предположим, что $-a \in \mathbb{Q}_p^{*2}$. Тогда

$$N = \{x^2 + y^2 \mid x, y \in \mathbb{Q}_p\}.$$

Но, квадратичная форма $x^2 + y^2$ представляет все элементы \mathbb{Z}_p^{*12} что даёт нам, что $N \neq \mathbb{Q}_p^{*2}$.

Теперь докажем, что $N \neq \mathbb{Q}_p^*$. Ясно, что нам важен лишь класс a по модулю группы квадратов. Покажем, что каким бы он ни был, найдётся число, которое нельзя будет представить формой $x^2 - ay^2$.

- Пусть $[a] = \varepsilon$. Тогда $x^2 - \varepsilon y^2 = p$ не имеет решений, так как можно перейти к сравнению по модулю p :

$$x^2 - \varepsilon y^2 \equiv 0 \pmod{p} \rightsquigarrow x^2 \equiv \varepsilon y^2 \pmod{p} \implies x, y \equiv p,$$

что даёт нам противоречие, так как тогда

$$v_p(x^2 - \varepsilon y^2) = 2, \quad v_p(p) = 1.$$

- Все оставшиеся случаи для $a \in \{1, p, p\varepsilon\}$ сводятся к случаю выше.

$$\mathbb{Q}_p^{*2} \leq N \leq \mathbb{Q}_p^* \implies [\mathbb{Q}_p^* : \mathbb{Q}_p^{*2}] : [\mathbb{Q}_p^* : N],$$

а так как $N \neq \mathbb{Q}_p^{*2}$ и $N \neq \mathbb{Q}_p^*$, мы имеем $[\mathbb{Q}_p^* : N] = 2$.

Доказательство случая $p = 2$ является переборным и будет приведено дальше при доказательстве мультипликативности символа Гильберта в случае $p = 2$. \square

¹²Это следует, например, из теоремы Коши-Девенпорта, или еще из чего-нибудь.

2.21 Символ Гильберта

Определение 44. Пусть p — простое число, $a, b \in \mathbb{Q}_p^*$. Тогда *символом Гильберта* мы будем называть

$$(a, b)_p = \begin{cases} 1, & \text{если } x^2 - ay^2 - bz^2 \text{ представляет } 0 \text{ над } \mathbb{Q}_p \\ -1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Замечание. Для квадратичной формы $a_1x_1^2 + \dots + a_nx_n^2$ в этом параграфе мы будем использовать более удобное обозначение $\langle a_1, \dots, a_n \rangle$.

Предложение 31. Форма $\langle 1, -a, -b \rangle$ изотропна¹³ тогда и только тогда, когда $b = N_{\mathbb{Q}_p(\sqrt{a})/\mathbb{Q}_p}(\alpha)$ для некоторого $\alpha \in \mathbb{Q}_p(\sqrt{a})$.

Доказательство. Ясно, что если $b = N_{\mathbb{Q}_p(\sqrt{a})/\mathbb{Q}_p}(\alpha)$, то

$$b = (x + y\sqrt{a})(x - y\sqrt{a}) = x^2 - ay^2$$

и тогда $(x, y, 1)$ даёт представление нуля.

Теперь докажем в обратную сторону. Пусть для $x_0, y_0, z_0 \in \mathbb{Q}_p$ $x_0^2 - ay_0^2 - bz_0^2 = 0$.

- Предположим, что $z_0 \neq 0$. Тогда

$$b = \left(\frac{x_0}{z_0}\right)^2 - a\left(\frac{y_0}{z_0}\right)^2.$$

- Пусть $z_0 = 0$. Тогда

$$x_0^2 - ay_0^2 = 0 \implies a = \left(\frac{x_0}{y_0}\right)^2 = c^2 \implies b = x^2 - c^2y^2 = (x - cy)(x + cy), \text{ где } x = \frac{1+b}{2}, y = \frac{b-1}{2c}.$$

□

Замечание. Заметим, что $(a, u^2 - av^2)_p = 1 \quad \forall u, v \in \mathbb{Q}_p$. Действительно:

$$x^2 - ay^2 - (u^2 - av^2)z^2 = 0 \Leftrightarrow x^2 - ay^2 = (u^2 - av^2)z^2$$

и тогда нам очевидно подходит набор $(u, v, 1)$.

В частности, $\forall a \in \mathbb{Q}_p^* (a, 1 - a)_p = 1$.

Предложение 32. Символ Гильберта мультипликативен, то есть $(a_1a_2, b)_p = (a_1, b)_p \cdot (a_2, b)_p$.

Доказательство. 1. Если $(a_1, b)_p = 1$ и $(a_2, b)_p = 1$, то по предложению 31

$$\begin{aligned} a_1 &= N_{\mathbb{Q}_p(\sqrt{b})/\mathbb{Q}_p}(\alpha_1), \quad a_2 = N_{\mathbb{Q}_p(\sqrt{b})/\mathbb{Q}_p}(\alpha_2), \quad \alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{Q}_p(\sqrt{b}) \implies \\ \implies a_1a_2 &= N_{\mathbb{Q}_p(\sqrt{b})/\mathbb{Q}_p}(\alpha_1) N_{\mathbb{Q}_p(\sqrt{b})/\mathbb{Q}_p}(\alpha_2) = N_{\mathbb{Q}_p(\sqrt{b})/\mathbb{Q}_p}(\alpha_1\alpha_2), \end{aligned}$$

а тогда, опять же, по предложению 31 $(a_1a_2, b)_p = 1$.

2. Пусть $(a_1, b)_p = 1$, $(a_2, b)_p = -1$ (или наоборот). Тогда если $(a_1a_2, b)_p = 1$, то по первому пункту

$$1 = (a_1, b)_p \cdot (a_1a_2, b)_p = (a_1^2a_2, b)_p.$$

С другой стороны, совершенно ясно, что символ Гильберта не меняется при доножении на элемент \mathbb{Q}_p^{*2} , откуда $(a_1^2a_2, b)_p = (a_2, b)_p = -1$. Таким образом, мы пришли к противоречию.

3. Пусть $p \neq 2$ $(a_1, b)_p = -1$, $(a_2, b)_p = -1$. Ясно, что мы можем полагать $b \notin \mathbb{Q}_p^{*2}$ (иначе всё очевидно). Тогда в предложении 30 мы доказали, что

$$|N_b/\mathbb{Q}_p^{*2}| = 2, \quad |\mathbb{Q}_p^*/N_b| = 2.$$

Тогда, так как $(a_1, b)_p = 1$, $(a_2, b)_p = -1$, по предложению 31 мы имеем $a_1, a_2 \in \mathbb{Q}_p^* \setminus N_b$, а тогда $a_1a_2 \in N_b$ и по предложению 31 $(a_1a_2, b)_p = 1$.

	1	3	5	7	2 · 1	2 · 3	2 · 5	2 · 7
1	+	+	+	+	+	+	+	+
3	+	−	+	−	−	+	−	+
5	+	+	+	+	−	−	−	−
7	+	−	+	−	+	−	+	−
2 · 1	+	−	−	+	+	−	−	+
2 · 3	+	+	−	−	−	−	+	+
2 · 5	+	−	−	+	−	+	+	−
2 · 7	+	+	−	−	+	+	−	−

Таблица 1: Значения символа Гильберта на $\mathbb{Q}_2^*/\mathbb{Q}_2^{*2}$.

4. Теперь пусть $p = 2$ и $(a_1, b)_p = 1$, $(a_2, b)_p = -1$. Тогда по предложению 29 достаточно рассматривать $a_1, a_2, b \in \{1, 3, 5, 7, 2, 6, 10, 14\}$. На этих элементах символ гильберта можно просто вычислить: \square

Замечание. Если внимательно взглянуть в эту таблицу, становится заметно, что в каждой строке ровно 4 плюса и 4 минуса. Значит, $|\mathbb{N}/\mathbb{Q}_2^{*2}| = 4$, а так как по предложению 29 $|\mathbb{Q}_2^*/\mathbb{Q}_2^{*2}| = 8$, мы получаем, что $|\mathbb{Q}_2^{*2}/\mathbb{N}| = 4$.

Замечание. Очевидно, что символ Гильберта симметричен, то есть $(a, b)_p = (b, a)_p$. Тогда из предложения 32 следует, что

$$(a, b_1 b_2)_p = (a, b_1)_p \cdot (a, b_2)_p.$$

Предложение 33. Пусть p — нечетное простое, $\varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_2 \in \mathbb{Z}_p^*$. Тогда справедливы следующие свойства символа Гильберта:

1. $(p, \varepsilon)_p = \left(\frac{\varepsilon}{p}\right)$.
2. $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)_p = 1$.

Если же $p = 2$, они имеют следующий вид:

1. $(2, \varepsilon)_2 = (-1)^{\frac{\varepsilon^2-1}{8}}$.
2. $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)_2 = (-1)^{\frac{\varepsilon_1-1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_2-1}{2}}$.

Доказательство. Пусть $p \neq 2$, докажем второе свойство. Рассмотрим форму

$$f(x, y, z) = x^2 - \varepsilon_1 y^2 - \varepsilon_2 z^2.$$

Так как $\varepsilon_1 \not\equiv p$, $\varepsilon_2 \not\equiv p$, по теореме Шевалле сравнение

$$x^2 - \varepsilon_1 y^2 - \varepsilon_2 z^2 \equiv 0 \pmod{p}$$

имеет ненулевое (в $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$) решение, пусть оно (x_0, y_0, z_0) . Тогда

$$f(x_0, y_0, z_0) \equiv 0 \pmod{p}, \quad \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_0, y_0, z_0) = 2x_0 \not\equiv p,$$

а значит, по лемме Гензеля 33, форма $x^2 - \varepsilon_1 y^2 - \varepsilon_2 z^2$ изотропна.

Докажем теперь первое свойство. Пусть $\left(\frac{\varepsilon}{p}\right) = 1$, то есть $\varepsilon = \theta^2$. Так как символ Гильберта не изменяется при домножении на квадраты, в этом случае $(p, \varepsilon)_p = (p, 1)_p$. Рассмотрим форму

$$f(x, y, z) = x^2 - py^2 - z^2.$$

$$f(1, 1, 1) \equiv 0 \pmod{p}, \quad \frac{\partial f}{\partial x}(1, 1, 1) = 1 \not\equiv p,$$

¹³Из определения ясно, что это равносильно тому, что $(a, b)_p = 1$.

а значит, по лемме Гензеля она анизотропна, то есть $(p, 1)_p = 1$.

Теперь, предположим, что $(p, \varepsilon)_p = 1$. Тогда существуют $x_0, y_0, z_0 \in \mathbb{Q}_p$ такие, что

$$x_0^2 - py_0^2 - z_0^2 = 0.$$

Ясно, что мы можем полагать, что $x_0, y_0, z_0 \in \mathbb{Z}_p$. Выберем корень с минимальным $\min(v_p(x_0), v_p(y_0), v_p(z_0))$. Если z_0 не делится на p , то $z_0 \in \mathbb{Z}_p^*$ и

$$\varepsilon \equiv \left(\frac{x_0}{z_0}\right)^2 \pmod{p} \implies \left(\frac{\varepsilon}{p}\right) = 1.$$

Если же $z_0 \vdots p$, то так как $x_0^2 - \varepsilon z_0^2 = py_0^2$, видно, что мы можем сделать спуск.

□

Теорема 41 (Закон взаимности для символа Гильберта). Пусть $a, b \in \mathbb{Q}^*$, тогда

$$\prod_{p \in \mathbb{P} \cup \{\infty\}} (a, b)_p = 1,$$

Замечание. Под \mathbb{Q}_∞ обычно понимают \mathbb{R} и символ Гильберта $(a, b)_\infty$ определяется аналогично. Отметим, что его вычисление существенно легче в силу того, что над \mathbb{R} есть критерий Сильвестра.

Доказательство закона взаимности для символа Гильберта. В силу мультипликативности достаточно проверить это равенство для пяти случаев:

1. $a = -1, b = -1$.
2. $a = -1, b = 2$.
3. $a = -1, b = q$, где $q \in \mathbb{P} \setminus \{2\}$.
4. $a = 2, b = q$, где $q \in \mathbb{P} \setminus \{2\}$.
5. $a = p, b = q$, где $p, q \in \mathbb{P} \setminus \{2\}$ и $p \neq q$.

Проверим, например, формулу в случае 5. Если $r \in \mathbb{P} \setminus \{2, p, q\}$, то ясно, что $(p, q)_r = 1$ (так как в этом случае $p, q \in \mathbb{Z}_r^*$). Рассмотрим остальные случаи. По предложению 33:

$$(p, q)_p = \left(\frac{q}{p}\right), \quad (p, q)_q = \left(\frac{p}{q}\right), \quad (p, q)_2 = (-1)^{\frac{(p-1)(q-1)}{4}}.$$

Но так как по квадратичному закону взаимности

$$\left(\frac{p}{q}\right) \left(\frac{q}{p}\right) = (-1)^{\frac{(p-1)(q-1)}{4}},$$

при перемножении получится 1.

Остальные пункты тоже проверяются непосредственно.

□

Теперь докажем некоторую техническую теорему об изотропности квадратичных форм с p -адическими коэффициентами, которая поможет нам в доказательстве теоремы Минковского-Хассе. Рассмотрим неособую квадратичную форму $f \simeq \langle b_1, \dots, b_n \rangle$, $b_i \in \mathbb{Q}_p^*$. Линейной заменой переменных её всегда можно привести к виду

$$f = f_0 + pf_1 = a_1x_1^2 + \dots + a_rx_r^2 + p(a_{r+1}x_{r+1}^2 + \dots + a_nx_n^2), \quad a_i \in \mathbb{Z}_p^*.$$

Если мы говорим об изотропности формы, можно всегда полагать $r \geq n - r$, так как pf и f изотропны одновременно, а $pf \simeq f_1 + pf_0$.

Теорема 42. Пусть $p \neq 0 < r < n$. Тогда форма f изотропна над \mathbb{Q}_p тогда и только тогда, когда хотя одна из форм f_0 или f_1 изотропна над \mathbb{Q}_p .

Доказательство. Пусть форма f представляет нуль:

$$a_1\xi_1^2 + \dots + a_r\xi_r^2 + p(a_{r+1}\xi_{r+1}^2 + \dots + a_n\xi_n^2) = 0. \quad (9)$$

Мы можем полагать, что $\xi_i \in \mathbb{Z}_p$ и хотя бы одно из них не делится на p .

- Если не все ξ_1, \dots, ξ_r делятся на p , то переходя в равенстве (9) к сравнению по модулю p мы имеем

$$f_0(\xi_1, \dots, \xi_r) \equiv 0 \pmod{p}, \quad \frac{\partial f_0}{\partial x_1}(\xi_1, \dots, \xi_r) = 2a_1\xi_1 \not\equiv 0 \pmod{p}.$$

Тогда по лемме Гензеля 33 форма f_0 изотропна.

- Пусть $\xi_j : p \nmid \xi_j = 1, \dots, r$. Тогда

$$a_1\xi_1^2 + \dots + \xi_r^2 \equiv 0 \pmod{p^2}.$$

Тогда перейдём в равенстве (9) к сравнению по модулю p^2 и сократим его на p , получится

$$f_1(\xi_{r+1}, \dots, \xi_n) \equiv 0 \pmod{p},$$

причём хоть одно из ξ_{r+1}, \dots, ξ_n не делится на p . Применяя лемму Гензеля аналогично первому случаю, имеем нужное. □

Следствие 12. Если $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{Z}_p^*$, то при $p \neq 2$ форма $f = \langle a_1, \dots, a_r \rangle$ всегда изотропна над \mathbb{Q}_p при $r \geq 3$.

Доказательство. По теореме Шевалле квадратичная форма от хотя бы трёх переменных всегда имеет нуль в $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$, значит, сравнение

$$f(x_1, \dots, x_n) \equiv 0 \pmod{p}$$

будет иметь нетривиальное решение. Но тогда остаётся лишь применить лемму Гензеля. □

2.22 Теорема Минковского-Хассе

Теорема 43 (Принцип Минковского-Хассе). Пусть f — рациональная квадратичная форма. Тогда f изотропна над \mathbb{Q}_p для всех $p \in \mathbb{P} \cup \{\infty\}$ тогда и только тогда, когда она изотропна над \mathbb{Q} .

Замечание. Ясно, что с самого начала f можно полагать невырожденной и диагональной, то есть $f \simeq \langle a_1, \dots, a_n \rangle$, $a_1 \cdot \dots \cdot a_n \neq 0$.

Пусть $n = \dim f$, случай $n = 1$ тривиален.

Доказательство теоремы 43 в случае $n = 2$: Ясно, что с самого начала можно полагать $f = \langle 1, -a \rangle$, где $a \in \mathbb{Z}_{>0}$ (так как f изотропна над \mathbb{R}). Кроме того, можно считать a свободным от квадратов (так как все квадраты простых, входящих в a , можно занести внутрь переменной, делая линейную замену).

Пусть $a = p_1 \dots p_k$. Тогда, так как $\forall i \ v_{p_i}(a) = 1$, a не является квадратом ни над каким \mathbb{Q}_{p_i} , значит $a = 1$ и $f \simeq \langle 1, -1 \rangle$. □

Доказательство теоремы 43 в случае $n = 3$: По соображениям аналогичным размерности 2, с самого начала можно полагать $f \simeq \langle 1, -a, -b \rangle$, где $a, b \in \mathbb{Z}$, $ab \neq 0$ и a и b свободны от квадратов.

Будем вести индукцию по $|a| + |b|$.

База: Пусть $|a| + |b| = 1$. Тогда $a = \pm 1$, $b = \pm 1$, а так как f изотропна над \mathbb{R} , они не могут быть одновременно отрицательными. Но тогда f имеет гиперболическую плоскость $\langle 1, -1 \rangle$ в качестве подформы, а она представляет 0 над \mathbb{Q} .

Переход: Не умаляя общности, пусть $|a| \leq |b|$. Пусть

$$b = \pm p_1 p_2 \dots p_k, \quad p_i \neq p_j \text{ при } i \neq j.$$

Тогда, так как f изотропна над каждым \mathbb{Q}_{p_i} , a является квадратичным вычетом по модулю каждого p_i , откуда a является квадратом в $\mathbb{Z}/b\mathbb{Z}$. Тогда

$$\exists t, b' \in \mathbb{Z}: t^2 - a = bb'.$$

и при этом, ясно, что можно полагать $|t| < b/2$, а отсюда $|b'| \leq |b|/4 + 1$. Рассмотрим форму

$$f' \cong \langle 1, -a, -b' \rangle.$$

$$|a| + |b'| \leq |a| + \left| \frac{|b|}{4} + 1 \right| < |a| + |b|.$$

Чтоб применить индукционное предположение, осталось понять, почему f' изотропна над \mathbb{Q}_p для всех простых p . Действительно, по свойству, отмеченному в этом замечении,

$$1 = (a, t^2 - a)_p = (a, b'b)_p = \underbrace{(a, b)_p}_{=1} \cdot (a, b')_p \implies (a, b')_p = 1.$$

Значит, $\langle 1, -a, -b' \rangle$ изотропна над \mathbb{Q}_p для всех $p \in \mathbb{P} \cup \{\infty\}$. Тогда, по индукционному предположению она изотропна над \mathbb{Q} . По предложению 31 это равносильно тому, что

$$b' = N_{\mathbb{Q}(\sqrt{a})/\mathbb{Q}}(\alpha).$$

С другой стороны, так как $bb' = t^2 - a$, $bb' = N_{\mathbb{Q}(\sqrt{a})/\mathbb{Q}}(\beta)$. Но тогда

$$bb'^2 = N_{\mathbb{Q}(\sqrt{a})/\mathbb{Q}}(\alpha\beta) \implies b = N_{\mathbb{Q}(\sqrt{a})/\mathbb{Q}}\left(\frac{\alpha\beta}{b'}\right),$$

откуда по предложению 31 форма $\langle 1, -a, -b \rangle$ изотропна над \mathbb{Q} . □

Доказательство теоремы 43 в случае $n = 4$: Пусть $f \simeq \langle a_1, a_2, a_3, a_4 \rangle$, $a_i \in \mathbb{Z}$. Так как f изотропна над \mathbb{R} , мы можем полагать $a_1 > 0$, $a_4 < 0$. Рассмотрим формы

$$g \simeq \langle a_1, a_2 \rangle, \quad h \simeq \langle -a_3, -a_4 \rangle.$$

Заметим, что для доказательства нам достаточно найти такое ненулевое рациональное c , которое представляют обе эти формы, то есть

$$a_1\xi_1^2 + a_2\xi_2^2 = c = -a_3\xi_3^2 - a_4\xi_4^2,$$

Рассмотрим множество S , определённое как

$$S \stackrel{\text{def}}{=} \{2, \text{ все простые делители } a_i\}.$$

По условию теоремы для каждого простого p существуют $\xi_{ip} \in \mathbb{Q}_p$ (не все равные нулю) и $b_p \in \mathbb{Z}_p$ такие, что

$$a_1\xi_{1p}^2 + a_2\xi_{2p}^2 = -a_3\xi_{3p}^2 - a_4\xi_{4p}^2 = b_p \neq 0.$$

По китайской теореме об остатках мы можем выбрать такое $a \in \mathbb{Z}_{>0}$, что

$$\forall p_i \in S, p_i \neq 2 \quad a \equiv b_{p_i} \pmod{p_i^2}, \quad a \equiv b_2 \pmod{16}.$$

Так как мы можем полагать, что $0 \leq v_{p_i}(b_{p_i}) \leq 1$, мы имеем

$$\begin{cases} v_{p_i}(a) = v_{p_i}(b_{p_i}) \\ v_2(a) = v_2(b_2) \end{cases} \implies b_{p_i} - a = p_i^2 d \rightsquigarrow \frac{b_{p_i}}{a} = 1 + \frac{p_i^2}{a} d \in \mathbb{Z}_p.$$

То есть мы имеем

$$\frac{b_i}{a} \in \mathbb{Z}_{p_i} \text{ и } \frac{b_i}{a} \equiv 1 \pmod{p_i}.$$

Тогда, так как $\left(\frac{1}{p_i}\right) = 1$, по предложению 28 $a^{-1}b_{p_i}$ является квадратом в \mathbb{Z}_{p_i} . Аналогично и $a^{-1}b_2$ является квадратом в \mathbb{Z}_2 .

Теперь заметим, что по определению b_{p_i} формы $\langle a_1, a_2, -b_{p_i} \rangle$ и $\langle -a_3, -a_4, -b_{p_i} \rangle$ изотропны над \mathbb{Q}_{p_i} , а так как $a^{-1}b_{p_i}$ — квадрат в \mathbb{Z}_{p_i} , формы $\langle a_1, a_2, -a \rangle$ и $\langle -a_3, -a_4, -a \rangle$ изотропны над \mathbb{Q}_{p_i} для всех $p_i \in S$. В самом деле, пусть $a^{-1}b_{p_i} = \theta^2$, тогда $b_{p_i} = a \cdot \theta^2$ и

$$a_1\eta_1^2 + a_2\eta_2^2 - b_{p_i} = 0 \rightsquigarrow a_1\eta_1^2 + a_2\eta_2^2 - a \cdot \theta^2 = 0,$$

и аналогично для второй формы.

Если же $p \notin S$ и $p \nmid a$, то так как $a_i \nmid p$, формы $\langle a_1, a_2, -a \rangle$ и $\langle -a_3, -a_4, -a \rangle$ также будут изотропны над \mathbb{Q}_p .

Значит, нам остаётся рассмотреть лишь простые делители a , не лежащие в s . От a мы требовали, чтоб

$$\forall p_i \in S, p_i \neq 2 \quad a \equiv b_{p_i} \pmod{p_i^2}, \quad a \equiv b_2 \pmod{16}, \quad a \in \mathbb{Z}_{>0}.$$

Так как мы свободно можем изменять a на $16p_1^2 \dots p_k^2 \cdot n$, всевозможные подходящие a лежат в арифметической прогрессии $\{c_n\}$, где c_0, a

$$c_n = c_0 + 16p_1^2 \dots p_k^2 \cdot n = d \cdot \left(\frac{c_0}{d} + \frac{16p_1^2 \dots p_k^2}{d} n \right), \quad d = (c_0, 16p_1^2 \dots p_k^2).$$

Тогда по теореме Дирихле о простых в арифметической прогрессии существует n такой, что $c_n = dp_0$, где p_0 — простое. Возьмём в качестве искомого a этот самый c_n . Так как любой простой делитель d будет лежать в S , всего один простой делитель a не будет лежать там — это p_0 .

Заметим, что тогда форма $\langle a_1, a_2, -a \rangle$ изотропна над \mathbb{Q}_p для всех p , кроме p_0 . Но тогда, в силу закона взаимности Гильберта 41, она изотропна и над \mathbb{Q}_{p_0} . Аналогично и для формы $\langle -a_3, -a_4, -a \rangle$.

Тогда для каждой из них мы можем применить теорему Минковского-Хассе для $n = 3$ и получить, что $\langle a_1, \dots, a_4 \rangle$ изотропна над \mathbb{Q} . \square

Доказательство теоремы 43 в случае $n \geq 5$: Пусть $f \simeq \langle a_1, \dots, a_n \rangle$. Рассмотрим формы

$$g \simeq \langle a_1, a_2 \rangle, \quad h \simeq \langle -a_3, -a_4, \dots, -a_n \rangle.$$

Определим множество S аналогичным образом и также, как и в случае $n = 4$ найдём a такое, что формы

$$\langle a_1, a_2, -a \rangle \text{ и } \langle -a_3, \dots, -a_n, -a \rangle$$

изотропны над всеми \mathbb{Q}_p , кроме, может быть, \mathbb{Q}_{p_0} . Тогда по закону взаимности Гильберта 41 форма $\langle a_1, a_2, -a \rangle$ будет изотропна над всеми \mathbb{Q}_p , $p \in \mathbb{P} \cup \{\infty\}$.

Пусть теперь $n \geq 5$. По следствию 12 (оно применимо, так как $a_3, a_4, a_5 \nmid p_0 \implies a_3, a_4, a_5 \in \mathbb{Z}_{p_0}^*$) форма h будет изотропна над $\mathbb{Q}_{p_0}^*$. Значит, она представляет любой элемент $\mathbb{Q}_{p_0}^{*14}$, в частности a . Но, тогда форма $\langle -a_3, -a_4, -a_5, -a \rangle$ изотропна над \mathbb{Q}_{p_0} . Значит, по теореме Минковского-Хассе для $n = 4$ она изотропна над \mathbb{Q} . Но тогда формы g и h представляют рациональное число a , откуда f изотропна над \mathbb{Q} .

Теперь пусть $n > 5$. Тогда достаточно заметить, что нашу форму f можно будет представить в виде $f_0 + f_1$, где f_0 — неопределённая форма от пяти переменных. По доказанному выше она будет изотропна над \mathbb{Q} , а значит и f будет изотропна над \mathbb{Q} . \square

Следствие 13. Пусть f — рациональная квадратичная форма и f гиперболична над всеми \mathbb{Q}_p . Тогда f гиперболична.

Доказательство. Так как f гиперболична над всеми \mathbb{Q}_p , она, в частности, изотропна над всеми \mathbb{Q}_p , откуда по теореме Минковского-Хассе она изотропна над \mathbb{Q} . Тогда мы можем представить её в виде

$$f = \mathbb{H} \oplus f' \implies f_{\mathbb{Q}_p} = \mathbb{H} \oplus f'_{\mathbb{Q}_p}.$$

¹⁴Это общий факт, справедливый над любым полем: изотропная форма представляет любой элемент.

С другой стороны, так как f гиперболична над всеми \mathbb{Q}_p , мы имеем

$$\underbrace{\mathbb{H} \oplus \dots \oplus \mathbb{H}}_{t \text{ раз}} = f_{\mathbb{Q}_p} = \mathbb{H} \oplus f'_{\mathbb{Q}_p}.$$

Применяя теорему Витта о сокращении, мы получаем, что f' гиперболична, а значит, f гиперболична. \square

Следствие 14. Пусть f, g — рациональные квадратичные формы одинаковой размерности, $\dim f = \dim g = n$. Тогда они эквивалентны над полем рациональных чисел тогда и только тогда, когда они эквивалентны над полями \mathbb{Q}_p для всех $p \in \mathbb{P} \cup \{\infty\}$.

Доказательство. Так как $f \simeq g$ над \mathbb{Q}_p для всех $p \in \mathbb{P} \cup \{\infty\}$, форма $f \oplus (-g)$ будет гиперболична над \mathbb{Q}_p для всех $p \in \mathbb{P} \cup \{\infty\}$. Тогда по предыдущему следствию $f \oplus (-g)$ будет гиперболична над \mathbb{Q} . С другой стороны, форма $g \oplus (-g)$ тоже гиперболична и имеет такую же размерность. Тогда остаётся применить теорему Витта о сокращении:

$$f \oplus (-g) \simeq g \oplus (-g) \implies f \simeq g$$

над полем \mathbb{Q} . \square

3. Основы теории гомологий

3.1 Симплициальные гомологии

Определение 45. Цепным комплексом абелевых групп (C_\bullet, ∂) называется последовательность абелевых групп и морфизмов вида

$$\dots \xrightarrow{\partial_{q+2}} C_{q+1} \xrightarrow{\partial_{q+1}} C_q \xrightarrow{\partial_q} \dots, \quad \text{где } C_i \text{ — абелевы группы}$$

при условии $\partial_q \circ \partial_{q+1} = 0$. Если комплекс обрывается с одной из сторон, то мы считаем, что он дополнен нулями.

Элементы группы C_q называют q -мерными цепями, а отображение ∂ называют (граничным) дифференциалом.

Замечание. Ясно, что условие $\partial_q \circ \partial_{q+1} = 0$ равносильно тому, что $\text{Ker } \partial_q \supset \text{Im } \partial_{q+1}$.

Замечание. Когда комплекс снабжают отображением $C_0 \xrightarrow{\varepsilon} \mathbb{Z}$, это отображение называют *аугументацией*.

Определение 46. Гомологиями комплекса (C_\bullet, ∂) называют абелевы группы

$$H_q(C_\bullet, \partial) \stackrel{\text{def}}{=} \text{Ker } \partial_q / \text{Im } \partial_{q+1}.$$

Если комплекс снабжен аугументацией и обрывается на нулевом члене, то у него также есть *приведённые гомологии*

$$H_0(C_\bullet, \partial) = C_0 / \text{Im } \partial_1, \quad \widetilde{H}_0(C_\bullet, \partial) = \text{Ker } \partial_0 / \text{Im } \partial_1, \quad \widetilde{H}_q = H_q \quad \forall q > 0,$$

которые отличаются от обычных только в нулевом члене.

Перед тем как что-то строго определять, посмотрим нестрого на какие-то мотивирующие примеры вычислений. Для этого лучше всего подойдут *симплициальные гомологии*. Неформально, идея состоит в том, что мы разбиваем топологическое пространство X на симплексы всех размерностей и говорим, что $C_q(X, \mathbb{Z})$ — свободная абелева группа, порожденная всеми q -мерными симплексами (то есть, мы рассматриваем целочисленные формальные линейные комбинации симплексов). Дифференциалом ∂ будет оператор взятия границы (топологической).

Пример 19 (Симплициальные гомологии отрезка (нестрого)). Пусть X — отрезок $[a, b]$ с ориентацией из b в a . В нём две нульмерные клетки, значит $C_0(X, \mathbb{Z}) = \mathbb{Z}^2$, одномерная клетка одна — ребро e , то есть $C_1(X, \mathbb{Z}) = \mathbb{Z}$ и комплекс устроен следующим образом:

$$\dots 0 \rightarrow C_1 \xrightarrow{\partial_1} C_0 \xrightarrow{\varepsilon} \mathbb{Z},$$

так как мы можем определить аугументацию следующим образом: $x \in C_0 \Rightarrow x = k_1 a + k_2 b$, положим $\varepsilon(x) = k_1 + k_2$. То есть, на самом деле комплекс выглядит вот так:

$$\dots \rightarrow 0 \rightarrow \mathbb{Z} \xrightarrow[e \rightarrow \partial e = a - b]{} \mathbb{Z}^2 \xrightarrow[a \rightarrow 1, b \rightarrow 1]{} \mathbb{Z}.$$

Заметим, что $\varepsilon \circ \partial = 0$.

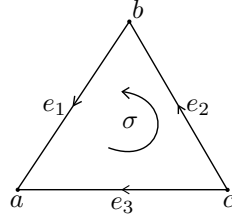
Гомологиями топологического пространства называют гомологии построенного по нему комплекса. В нашем случае

$$H_1(X, \mathbb{Z}) = \text{Ker } \partial_1 / \text{Im } \partial_2 = 0/0 = 0.$$

$$\widetilde{H}_0(X, \mathbb{Z}) = \text{Ker } \varepsilon / \text{Im } \partial_1 = \langle a - b \rangle / \langle a - b \rangle = 0.$$

$$H_0(X, \mathbb{Z}) = C_0(X, \mathbb{Z}) = C_0(X, \mathbb{Z}) / \text{Im } \partial_1 = \mathbb{Z}^2 / \mathbb{Z} = \langle a, b \rangle / \langle a - b \rangle = \langle a \rangle = \mathbb{Z}$$

Пример 20 (Симплициальные гомологии треугольника). Рассмотрим треугольник (abc) с внутренностью σ , ориентированной против часовой стрелки, и рёбрами $b \xrightarrow{e_1} a$, $c \xrightarrow{e_3} a$, $c \xrightarrow{e_2} b$.



Тогда цепной комплекс, построенный по треугольнику будет устроен следующим образом:

$$\dots \rightarrow 0 \rightarrow \mathbb{Z} \xrightarrow[\sigma \rightarrow e_1 + e_2 - e_3]{\partial_2} \mathbb{Z}^3 \xrightarrow{\partial_1} \mathbb{Z}^3 \xrightarrow{\varepsilon} \mathbb{Z}$$

Из ориентации σ ясно, что $\partial\sigma = e_1 + e_2 - e_3$, $\partial e_1 = b - c$, $\partial e_2 = a - b$, $\partial e_3 = c - a$. Ясно, что вторые гомологии нулевые:

$$H_2(X, \mathbb{Z}) = \text{Ker } \partial_2 / 0 = 0$$

Посчитаем теперь первые.

$$\begin{aligned} \partial(k_1 e_1 + k_2 e_2 + k_3 e_3) &= k_1(b - c) + k_2(a - b) + k_3(c - a) = a(k_2 + k_3) + b(k_1 - k_2) + c(-k_1 - k_3) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \text{Ker } \partial_1 = \langle (k_1, k_2, k_3) \in \mathbb{Z}^3 \mid k_1 = k_2 = -k_3 \rangle \end{aligned}$$

С другой стороны, $\text{Im } \partial_2 = k(e_1 + e_2 - e_3)$. Тем самым, $H_1(X, \mathbb{Z}) = 0$. Аналогичным вычислением мы получаем, что $H_0(X, \mathbb{Z}) = \mathbb{Z}$.

Пример 21 (Симплициальные гомологии треугольника без внутренности). Пусть теперь всё также, как в примере 20, но у треугольника нет внутренности. Тогда цепной комплекс будет иметь вид

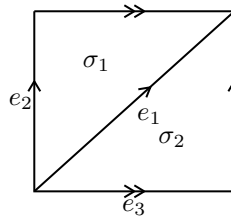
$$\dots \rightarrow 0 \rightarrow \mathbb{Z}^3 \rightarrow \mathbb{Z}^3 \rightarrow \mathbb{Z}$$

Из того, как поменялись отображения, ясно, что поменялись только первые гомологии. Теперь $H_1(X, \mathbb{Z}) = \mathbb{Z}/\{0\} = \mathbb{Z}$, а образующая — это цикл $e_1 + e_2 - e_3$. С другой стороны, $\pi_1(\Delta) = \mathbb{Z}$.

Замечание. Когда-нибудь позже мы докажем, что для любого симплициального пространства X есть отображение

$$\pi_1(X) \rightarrow H_1(X) = \pi_1(X)^{ab} = \pi_1(X)/[\pi_1(X), \pi_1(X)].$$

Пример 22 (Симплициальные гомологии тора \mathbb{T}^2). Рассмотрим двумерный тор \mathbb{T}^2 , разбитый на симплексы следующим образом:



Из такой триангуляции ясно, что комплекс будет иметь вид:

$$\dots \rightarrow 0 \rightarrow \mathbb{Z}^2 \xrightarrow{\partial_2} \mathbb{Z}^3 \xrightarrow{\partial_1} \mathbb{Z} \xrightarrow{\varepsilon} \mathbb{Z}$$

Посчитаем дифференциал на двумерных клетках: $\partial\sigma_1 = e_1 - e_3 - e_2$, $\partial\sigma_2 = e_2 + e_3 - e_1$. С другой стороны, ясно, что дифференциал зануляется на любой одномерной клетке, $\partial e_i = a - a = 0$.

$$H_2(\mathbb{T}^2, \mathbb{Z}) = \text{Ker } \partial_2 / 0 = \mathbb{Z}.$$

так как $\partial\sigma_1 = -\partial\sigma_2 \Rightarrow \text{Ker } \partial_2 = \mathbb{Z}$.

Также прямыми вычислениями можно убедиться, что $H_1(\mathbb{T}^2, \mathbb{Z}) = \mathbb{Z}^2 = \pi_1(\mathbb{T}^2)^{ab}$. Образующими первых гомологий будут e_2 и e_3 .

Упражнения.

1. Посчитать по определению одномерные гомологии связного дерева.
2. Посчитать по определению все гомологии n -мерного симплекса T^n

$$T^n \stackrel{\text{def}}{=} \left\{ (t_0, \dots, t_n) \mid t_i \geq 0, \sum_{i=1}^n t_i = 1 \right\}.$$

3. Покажите, что барицентрическое подразбиение не меняет симплициальных гомологий.

Вообще говоря, далее нужно формально доказывать, что гомологии не зависят от симплициального разбиения пространства (и выяснять, у каких пространств это симплициальное разбиение вообще есть), но мы этим всем заниматься не будем, так как в нашем курсе основной будет другая теория.

3.2 Сигнулярные гомологии

Определение 47. Пусть X — топологическое пространство.

- *Сингулярным q -мерным симплексом* мы будем называть непрерывное отображение $f: T^q \rightarrow X$.
- Его граница определяется, как формальная линейная комбинация

$$\partial f \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=0}^q (-1)^i \Gamma_i f,$$

где $\Gamma_i f$ — сужение f на грань $t_i = 0$ (сумма именно такая, так как у q -мерного симплекса $q+1$ грань).

- *Сингулярными q -мерными цепями $C_q(X, \mathbb{Z})$* мы будем называть формальные целочисленные линейные комбинации конечного числа q -мерных сингулярных симплексов (то есть порожденную ими свободную абелеву группу).
- Дифференциал комплекса¹⁵ C_\bullet определяется, как продолжение по линейности оператора взятия границы q -мерного сингулярного симплекса.
- Комплекс сингулярных цепей может быть снабжен аугументацией $\varepsilon: C_0 \rightarrow \mathbb{Z}$, $\sum k_i f_i \rightarrow \sum k_i$.

Замечание. Формально говоря, мы пока не знаем, что комплекс из сингулярных цепей — это комплекс. Для этого нам понадобится следующая техническая

Лемма 35. В контексте определения 47 $\partial^2 = 0$.

Доказательство. Посчитаем $\partial \partial f$:

$$\partial \partial f = \partial \left(\sum_i (-1)^i \Gamma_i f \right) = \sum_{i,j} (-1)^{i+j} \Gamma_j \Gamma_i f.$$

Ясно, что любую грань коразмерности 2 можно получить взятием границы двумя способами. Действительно, если $j < i$, то $\Gamma_i \Gamma_j = \Gamma_j \Gamma_{i+1}$ (i -я из оставшихся после выкидывания j -й координаты — $i+1$ -я изначально), а в сумме слагаемые $\Gamma_i \Gamma_j$ и $\Gamma_j \Gamma_{i+1}$ будут с разным знаком, значит $\partial \partial f = 0$. \square

Определение 48. *Сингулярными гомологиями* топологического пространства X называются гомологии комплекса сингулярных цепей. Мы будем обозначать их, как $H_k(X)$ или $H_k^{\text{sing}}(X)$.

В топологическом контексте группу $Z_q(X) \stackrel{\text{def}}{=} \text{Ker } \partial_q$ часто называют q -циклами¹⁶, а группу $B_q(X) \stackrel{\text{def}}{=} \text{Im } \partial_{q+1}$ — q -границами. В этом смысле $H_q(X)$ — циклы с точностью до границ.

Замечание. Из определения очевидно, что сингулярные гомологии зависят только от класса гомеоморфизма пространства X (их основной плюс и состоит в том, что тут это очевидно).

Теперь попробем посчитать по определению сингулярные гомологии для какого-нибудь пространства. Оказывается, что по определению сделать это возможно разве что для точки.

¹⁵ формально, мы пока еще не знаем, что это комплекс.

¹⁶ позже мы увидим, какая в этом геометрическая интуиция

Теорема 44 (Сингулярные гомологии точки).

$$H_q^{\text{sing}}(*, \mathbb{Z}) = 0, \quad H_0^{\text{sing}}(*, \mathbb{Z}) = \mathbb{Z}, \quad \tilde{H}_0^{\text{sing}}(*, \mathbb{Z}) = 0.$$

Итак, как мы помним, $C_q(*)$ — все линейные комбинации отображений $f: T^q \rightarrow *$. Так как отображений из T^n в точку всего одно, $\forall n \ C_n(X, \mathbb{Z}) = \mathbb{Z}$, а значит, наш комплекс сингулярных цепей $(C_\bullet(*, \mathbb{Z}), \partial)$ будет иметь вид:

$$\dots \mathbb{Z} \xrightarrow{\partial} \mathbb{Z} \xrightarrow{\partial} \dots \xrightarrow{\partial_2} \mathbb{Z} \xrightarrow{\partial_1} \mathbb{Z} \xrightarrow{\varepsilon} \mathbb{Z}.$$

Теперь посчитаем дифференциалы комплекса.

Возьмем $f \in C_1$, это какая-то формальная линейная комбинация отображений из $[a, b] \rightarrow \{*\}$. Тогда ∂f — это $f|_a - f|_b = 0$. Впрочем, и сразу ясно, что в случае любого n , так как наше отображение действует в точку (оно постоянно), сужения на все грани будут совпадать и результат в сумме будет зависеть лишь от четности n , то есть дифференциалы комплекса будут иметь вид:

$$\dots \mathbb{Z} \xrightarrow{\cdot 0} \mathbb{Z} \xrightarrow{\cdot 1} \dots \xrightarrow{\cdot 1 = \text{id}} \mathbb{Z} \xrightarrow{0} \mathbb{Z} \xrightarrow{\varepsilon} \mathbb{Z}$$

Иными словами, $\partial_n = 0$, если n — нечетное и тождественно иначе. Теперь, как нетрудно заметить,

$$\forall q > 0 \quad \text{Ker } \partial_q = \text{Im } \partial_{q+1} \Rightarrow H_q^{\text{sing}}(*, \mathbb{Z}) = 0, \quad H_0^{\text{sing}}(*, \mathbb{Z}) = \mathbb{Z}, \quad \tilde{H}_0^{\text{sing}}(*, \mathbb{Z}) = 0.$$

Трудности, возникшие при подсчетах, намекают на то, что для отрезка, например, это будет сделать еще гораздо труднее. С другой стороны, если вдруг окажется, что гомологии гомотопически инвариантны, то мы будем знать, какие гомологии у всех стягиваемых пространств (так как для точки мы посчитали).

В дальнейшем, будем использовать для сингулярных гомологий обозначение H_k .

3.3 Немного гомологической алгебры

Рассмотрим категорию цепных комплексов \mathfrak{Ch} (в нашем случае абелевых групп, но в принципе, всё что тут будет сказано справедливо и в случае $R - \mathfrak{Mod}$). Морфизмом цепных комплексов (C_\bullet, ∂) и (D_\bullet, δ) называется набор отображений $f = \{f_i\}$, где $f_i \in \text{Hom}(C_i, D_i)$ такой, что диаграмма

$$\begin{array}{ccccccc} \dots & \xrightarrow{\partial_{q+2}} & C_{q+1} & \xrightarrow{\partial_{q+1}} & C_q & \xrightarrow{\partial_q} & C_{q-1} \xrightarrow{\partial_{q-1}} \dots \\ \downarrow & & \downarrow f_{q+1} & & \downarrow f_q & & \downarrow f_{q-1} \\ \dots & \xrightarrow{\delta_{q+2}} & D_{q+1} & \xrightarrow{\delta_{q+1}} & D_q & \xrightarrow{\delta_q} & D_{q-1} \xrightarrow{\delta_{q-1}} \dots \end{array}$$

коммутативна, то есть $\forall i \ f_i \circ \partial_{i+1} = \delta_{i+1} \circ f_{i+1}$.

Лемма 36. Сопоставление цепному комплексу его k -й группы гомологий функториально, то есть отображение

$$(C_\bullet, \partial) \mapsto H_k(C_\bullet, \delta)$$

задаёт ковариантный функтор $\mathfrak{Ch} \rightarrow \mathfrak{Ab}$.

Доказательство. Всё, кроме того, что композиция переходит в композицию — совсем очевидно. Нам надо проверить, что отображение $(C_\bullet, \partial) \xrightarrow{f} (D_\bullet, \delta)$ индуцирует отображение $H_k(C_\bullet) \rightarrow H_k(D_\bullet)$, и кроме того,

$$(C_\bullet, \partial) \xrightarrow{f} (D_\bullet, \delta) \xrightarrow{g} (E_\bullet, d) \Rightarrow H_k(f \circ g) = H_k(f) \circ H_k(g).$$

Заметим, что так как $f \in \text{Hom}(C_\bullet, D_\bullet)$, $f_q(\text{Ker } \partial_q) \subset \text{Ker } \delta_q$. Действительно, если $\partial_q(x) = 0$, то $0 = f_{q-1}(\partial_q(x)) = \delta_q(f_q(x)) \Rightarrow f_q(x) \in \text{Ker } \delta_q$. Аналогично $f_{q-1}(\text{Im } \partial_q) \subset \text{Im } \delta_q$. Действительно, если $x = \partial_q(y)$, то

$$f_{q-1}(x) = f_{q-1} \circ \partial_q(y) = \delta_q(f_q(y)) \in \text{Im } \delta_q.$$

Тогда нужная нам стрелка получается просто из универсального свойства факторгруппы:

$$\begin{array}{ccccc}
 \text{Ker } \partial_q & \xrightarrow{f_q} & \text{Ker } \delta_q & \xrightarrow{\pi} & H_q(D_\bullet) \\
 & \searrow \rho & & \nearrow f_* & \\
 & & H_q(C_\bullet) & &
 \end{array}$$

Действительно, чтоб она существовала, нам нужно, чтоб $\text{Im } \partial_{q+1} \subset \text{Ker}(\pi \circ f_q)$. Возьмем $x \in \text{Im } \partial_{q+1}$, тогда $f_q(x) \in \text{Im } \delta_{q+1} \Rightarrow f_q(x) \in \text{Ker } \pi$, то есть $x \in \text{Ker}(\pi \circ f_q)$.

Проверка того, что композиция переходит в композицию тривиальна. \square

Замечание. Пусть $X, Y \in \mathfrak{Top}$, $f: X \rightarrow Y$ — непрерывное отображение. Тогда оно индуцирует морфизм цепных комплексов $f: C_\bullet(X) \rightarrow C_\bullet(Y)$. Действительно, пусть $g \in C_k(X)$, тогда g — это непрерывное отображение $T_k \rightarrow X$ и тогда $f \circ g$ — непрерывное отображение $T_k \rightarrow Y$, то есть элемент $C_k(Y)$. Остается проверить, что полученное отображение будет коммутировать с дифференциалом.

$$\partial g = \sum_{i=0}^k (-1)^i \Gamma_i g.$$

Тогда остается заметить, что взятие грани коммутирует с применением отображения:

$$f(\partial g) = \sum_{i=0}^k (-1)^i \Gamma_i f(g) = \partial(fg).$$

Значит, если у нас есть непрерывное отображение $f: X \rightarrow Y$, то есть и индуцированный морфизм гомологий $f_*: H_\bullet(X) \rightarrow H_\bullet(Y)$.

Предложение 34. Если $f: X \rightarrow Y$ — гомеоморфизм, то $f_*: H_k(X) \rightarrow H_k(Y)$ — изоморфизм (для всех k).

Доказательство. Действительно, если f — гомеоморфизм, то все индуцированные отображения между цепями — изоморфизмы, а значит и все индуцированные отображения в гомологиях будут изоморфизмами. \square

Замечание. Это утверждение говорит нам о том, что сингулярные гомологии определены для топологических пространств без всякой дополнительной структуры.

Определение 49. Пусть X — топологическое пространство. Тогда, если группа $H_k(X)$ конечнопорождена, то

$$H_k(X) \cong \mathbb{Z}^n \oplus \text{Tor}(H^k(X)).$$

Тогда число n (то есть, ранг свободной части) называют k -м числом Бетти b_n . Иными словами, $b_k(X) = \text{rank}(H_k(X))$.

3.4 Гомотопическая инвариантность гомологий

Определение 50. Пусть $(C_\bullet, \partial), (D_\bullet, \delta) \in \mathfrak{Ch}$ — два цепных комплекса. Их морфизмы $f, g \in \text{Hom}_{\mathfrak{Ch}}((C_\bullet, \partial), (D_\bullet, \delta))$ называются *гомотопными* ($f \sim g$), если существует диагональный морфизм $h: C_\bullet \rightarrow D_{\bullet+1}$ такой, что

$$h_{q-1} \partial_q + \delta_{q+1} h_q = f_q - g_q.$$

$$\begin{array}{ccccccc}
 \cdots & \xrightarrow{\partial_{q+2}} & C_{q+1} & \xrightarrow{\partial_{q+1}} & C_q & \xrightarrow{\partial_q} & C_{q-1} & \xrightarrow{\partial_{q-1}} & \cdots \\
 & \searrow h_{q+1} & \downarrow g_{q+1} & \searrow h_q & \downarrow g_q & \searrow h_{q-1} & \downarrow g_{q-1} & \searrow h_{q-2} & \\
 \cdots & \xrightarrow{\delta_{q+2}} & D_{q+1} & \xrightarrow{\delta_{q+1}} & D_q & \xrightarrow{\delta_q} & D_{q-1} & \xrightarrow{\delta_{q-1}} & \cdots
 \end{array}$$

Кратко это обычно записывают, как $h\partial + \delta h = f - g$.

Если в категории цепных комплексов $\mathfrak{Ch}(\mathfrak{Ab})$ отождествить гомотопные морфизмы, получится гомотопическая категория комплексов, которую обычно обозначают $\mathfrak{K}(\mathfrak{Ab})$ (или просто \mathfrak{K}).

Теорема 45. Если морфизмы цепных комплексов гомотопны, то есть $f \sim g$, то индуцированные гомоморфизмы когомологий $f_* = g_*$. Тем самым, функторы гомологий H_k пропускаются через гомотопическую категорию.

Доказательство. Если $x \in \text{Ker } \partial_q$, то

$$f_q(x) - g_q(x) = \delta_{q+1}h_q(x) + \underbrace{h_{q-1}\partial_q(x)}_{=0} \in \text{Im } \delta_{q+1},$$

а значит в $H_q(X)$ эти элементы равны. \square

Замечание. Гомотопность морфизмов f и g можно определять, как $\delta h \pm h\partial = f - g$, так как при переходе к гомологиям второе слагаемое всё равно обнуляется.

Теорема 46. Пусть $f, g: X \rightarrow Y$, $f \sim g$. Тогда $f_* = g_*$.

Доказательство. У нас есть цепные комплексы сингулярных цепей $(C_\bullet(X), \partial)$ и $(C_\bullet(Y), \partial)$. Так как $f \sim g$, существует непрерывное отображение $H: X \times I \rightarrow Y$, а тогда $\forall p: T_q \rightarrow X$ определено непрерывное отображение $H(p(_), _): T_q \times I \rightarrow Y$, причем $H(p, 0) = f(p)$ и $H(p, 1) = g(p)$. Положим

$$h(p) = \text{сумма симплексов в разбиении призмы } T_q \times I \in C_{q+1}(Y).$$

Взглянув на картинку теперь нетрудно заметить, что

$$f(p) - h(p) = \text{граница всей призмы} - \text{боковые стенки} = \partial h(p) - h\partial(p)$$

Таким образом, мы получили, что индуцированные морфизмы цепных комплексов гомотопны, а значит, по теореме 45, индуцированные гомоморфизмы в гомологиях совпадают. \square

Упражнение. Разбить $T_q \times I$ на $q+1$ -мерные симплексы формально. А именно, пусть $T_q \times \{0\} = a_0 \dots a_q$. Пусть вершины $T_q \times \{1\}$ — это a'_0, \dots, a'_q . Тогда предлагается брать вершины $a_0 \dots a_k a'_k \dots a'_q$.

Следствие 15. Пусть X — стягиваемое. Тогда $\tilde{H}_\bullet(X, \mathbb{Z}) = 0$, или, иными словами, $\forall k > 0$ $H_k(X, \mathbb{Z}) = 0$, $H_0(X, \mathbb{Z}) = \mathbb{Z}$.

Упражнение. Придумайте пример нестягиваемого X с нулевыми приведёнными гомологиями.

Лемма 37. Если X — линейно связно, то $H_0(X) = \mathbb{Z}$.

Доказательство. Выберем в нашем пространстве некоторую фиксированную точку a , тогда

$$\left(\sum k_i f_i\right) = \left(\sum k_i\right)a \pmod{\text{Im } \partial_1}, \text{ (то есть, в } H_0(X))$$

так как все f_i можно соединить путями (а это отображения $T^1 = [0, 1] \rightarrow X$) с a и значит $\text{Im } \partial_1$ будет содержать все разности $f_i - a$. Значит, $H_0(X) \cong \mathbb{Z}$. \square

Следствие 16. Пусть у топологического пространства X n компонент линейной связности. Тогда

$$H_0(X) \cong \mathbb{Z}^n.$$

Упражнение. Држайте, что непрерывное отображение между линейно связными пространствами индуцирует изоморфизм нулевых гомологий.

3.5 Относительные гомологии и гомологически точная последовательность пары

Пусть X — топологическое пространство, $A \subset X$, тогда $\forall q \ C_q(A) \subset C_q(X)$ (вложение индуцирует мономорфизм цепей) и мы имеем морфизм цепных комплексов $(C_\bullet(X), \partial)$ и $(C_\bullet(A), \partial)$, то есть коммутативна следующая диаграмма:

$$\begin{array}{ccccccc} \dots & \longrightarrow & C_q(A) & \xrightarrow{\partial_q} & C_{q-1}(A) & \longrightarrow & \dots \\ \downarrow & & \downarrow \text{in} & & \downarrow \text{in} & & \downarrow \\ \dots & \longrightarrow & C_q(X) & \xrightarrow{\partial_q} & C_{q-1}(X) & \longrightarrow & \dots \end{array}$$

Это так просто потому, что если у нас был симплекс $f: T^q \rightarrow A$, то его граница тоже целиком лежит в A , то есть $\partial f: T^{q-1} \rightarrow A \in C_{q-1}(A)$.

Глядя на это, возникает естественная идея дополнить до короткой точной последовательности

$$0 \rightarrow C_q(A) \rightarrow C_q(X) \rightarrow C_q(X)/C_q(A) \rightarrow 0$$

в каждом столбце.

Определение 51. Факторгруппу $C_q(X, A) \stackrel{\text{def}}{=} C_q(X)/C_q(A)$ называют *относительными цепями*.

Построим цепной комплекс для относительных цепей, для этого надо определить дифференциалы. Это делается стандартно, возьмем $x \in C_q(A)$, тогда $\partial_q(x) \in C_{q-1}(A)$, а значит композиция дифференциала и проекции пропустится через фактор:

$$\begin{array}{ccccc} C_q(X) & \xrightarrow{\partial_q} & C_{q-1}(X) & \xrightarrow{\pi_{q-1}} & C_{q-1}(X)/C_{q-1}(A) \\ & \searrow \pi_q & & \swarrow \exists! \delta_q & \\ & & C_q(X)/C_q(A) & & \end{array}$$

Проверим теперь, что $\delta^2 = 0$. Действительно, из коммутативной диаграммы выше мы понимаем, что

$$\delta_q(\bar{x}) = \delta_q(\pi_q(x)) = \pi_{q-1}(\partial_q(x)) \Rightarrow \delta_{q-1}(\delta_q(\bar{x})) = \delta_{q-1}(\pi_{q-1}(\partial_q(x))) = \pi_{q-2}(\partial_{q-1}(\partial_q(x))) = 0.$$

Теперь мы построили цепной комплекс и можем определить относительные гомологии.

Определение 52. Пусть $X \subset A$, тогда относительными гомологиями мы будем называть гомологии комплекса относительных цепей, то есть

$$H_q(X, A) \stackrel{\text{def}}{=} \ker \delta_q / \text{Im } \delta_{q+1}.$$

Теперь, попробуем получить для гомологий аппарат, идеологически похожий на теорему Зейферта-Ван-Кампена.

Итак, мы имеем короткую точную последовательность комплексов

$$0 \rightarrow C_\bullet(A) \rightarrow C_\bullet(X) \rightarrow C_\bullet(X, A) \rightarrow 0$$

В развёрнутом виде она представляет собой коммутативную диаграмму

$$\begin{array}{ccccccc}
& \cdots & & \cdots & & \cdots & \\
& \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & \\
0 & \longrightarrow & C_{q+1}(A) & \longrightarrow & C_{q+1}(X) & \longrightarrow & C_{q+1}(X, A) \longrightarrow 0 \\
& \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & \\
0 & \longrightarrow & C_q(A) & \longrightarrow & C_q(X) & \longrightarrow & C_q(X, A) \longrightarrow 0 \\
& \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & \\
0 & \longrightarrow & C_{q-1}(A) & \longrightarrow & C_{q-1}(X) & \longrightarrow & C_{q-1}(X, A) \longrightarrow 0 \\
& \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & \\
& \cdots & & \cdots & & \cdots &
\end{array}$$

в которой строки точны, а столбцы — наши комплексы.

Теорема 47 (Точная последовательность пары). *Существует связывающий гомоморфизм $\varphi: H_q(X, A) \rightarrow H_{q-1}(A)$, и соответственно, имеет место следующая длинная точная последовательность групп гомологий:*

$$\dots \rightarrow H_q(A) \rightarrow H_q(X) \rightarrow H_q(X, A) \xrightarrow{\varphi} H_{q-1}(A) \rightarrow H_{q-1}(X) \rightarrow \dots$$

Доказательство. На самом деле, это утверждение верно для любой точной последовательности комплексов. А именно, если последовательность цепных комплексов

$$0 \rightarrow A_\bullet \rightarrow B_\bullet \rightarrow C_\bullet \rightarrow 0$$

точна, то имеет место следующая длинная точность последовательность гомологий:

$$\dots \rightarrow H_q(A) \rightarrow H_q(B) \rightarrow H_q(C) \rightarrow H_{q-1}(A) \rightarrow H_{q-1}(B) \rightarrow \dots$$

Это можно без труда вывести из леммы о змее, проверив точность строк¹⁷

□

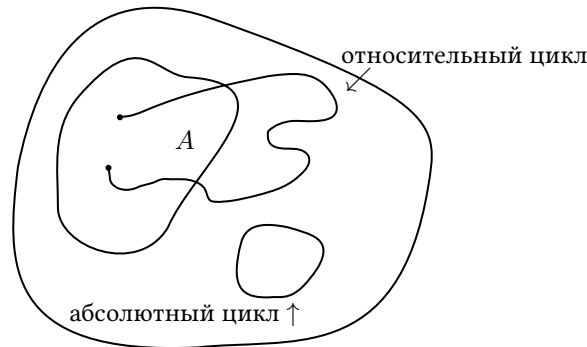
Упражнение. Докажите, что для $X \supset A \supset B$ имеет место следующая длинная точная последовательность групп гомологий

$$\dots \rightarrow H_q(A, B) \rightarrow H_q(X, B) \rightarrow H_q(X, A) \rightarrow H_{q-1}(A, B) \rightarrow \dots$$

Посмотрим, что всё это означает геометрически. Относительные циклы — это элементы

$$\text{Ker}(C_q(X)/C_q(A) \rightarrow C_{q-1}(X)/C_{q-1}(A)).$$

Мы взяли представителя в $C_q(X)$, взяли границу и после факторизации по $C_{q-1}(A)$ получили 0, а значит граница нашего цикла полностью лежит в $C_{q-1}(A)$, то есть картинка имеет вид:



С другой стороны, ясно, что $x \in C_q(X)/C_q(A)$ — относительная граница, если $x + a = \partial(\dots)$.

¹⁷ а так как это делается в абсолютно любом курсе гомологической алгебры, мне лень это сюда писать.

Замечание. У связывающего гомоморфизма $H_q(X, A) \rightarrow H_{q-1}(A)$ есть очень естественная интерпретация.

Элементы $H_q(X, A)$ — относительные циклы с точностью до относительных границ. Так как это относительные q -мерные циклы, их граница лежит в A , а значит, при взятии границы, мы получим как раз элемент $H_{q-1}(A)$. То есть, связывающий гомоморфизм $H_q(X, A) \rightarrow H_{q-1}(A)$ — взятие границы.

Рассмотрим также еще несколько важных следствий длинной точной последовательности пары.

Следствие 17. Для любого топологического пространства X и любой его точки $x_0 \in X$ мы имеем

$$H_n(X, x_0) = \tilde{H}_n(X) \quad \forall n.$$

Доказательство. Запишем длинную точную последовательность приведенных гомологий пары (X, x_0)

$$\dots \rightarrow \tilde{H}_q(x_0) \rightarrow \tilde{H}_q(X) \rightarrow \tilde{H}_q(X, x_0) \rightarrow \tilde{H}_{q-1}(x_0) \rightarrow \dots$$

Действительно, так как $\tilde{H}_n(x_0) = 0 \quad \forall n$, мы на самом деле имеем

$$\dots \rightarrow 0 \rightarrow \tilde{H}_q(X) \rightarrow \tilde{H}_q(X, x_0) \rightarrow 0 \rightarrow \dots,$$

и из точности следует $\tilde{H}_q(X) \cong \tilde{H}_q(X, x_0) = H_q(X, x_0)$. □

Следствие 18. Группы $H_q(X, A)$ измеряют различие между $H_q(X)$ и $H_q(A)$, а именно,

$$H_q(X, A) = 0 \quad \forall q \Rightarrow H_q(A) = H_q(X) \quad \forall q.$$

Доказательство. Запишем длинную точную последовательность пары (X, A) :

$$\dots \rightarrow H_q(A) \rightarrow H_q(X) \rightarrow H_q(X, A) \rightarrow H_{q-1}(A) \rightarrow \dots$$

В нашем случае она имеет вид:

$$\dots \rightarrow H_q(A) \rightarrow H_q(X) \rightarrow H_q(X, A) \rightarrow H_{q-1}(A) \rightarrow \dots$$

и из точности следует, что $H_q(A) \cong H_q(X)$. □

Упражнение. Убедитесь, что верно и обратное утверждение.

3.6 Пары Боруска

Определение 53. Пусть X — топологическое пространство, а $A \subset X$ с индуцированной топологией. Тогда говорят, что (X, A) — пара Борсука (или, корасслоение)¹⁸, если $\forall f: X \rightarrow Y, \forall F: A \times I \rightarrow Y$ такой, что $F|_{A \times 0} = f|_A$ существует $G: X \times I \rightarrow Y$, причем такое, что $G|_{X \times 0} = f, G|_{A \times I} = F$.

Определение 54. Пара (X, A) называется клеточной парой, если X — клеточное пространство, A — клеточное подпространство X .

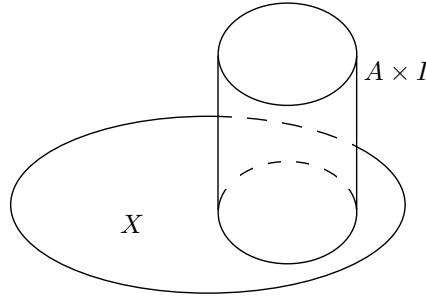
Замечание. Так как очевидно, что $(D^n, \partial D^n)$ — пара Борсука, клеточная пара является парой Борсука.

Нам от пар Борсука понадобится несколько базовых утверждений.

Теорема 48 (Характеризация пар Борсука). Если (X, A) — пара Борсука, то деформационная ретракция $X \times I$ на $X \cup (A \times I)$. Кроме того, если A — замкнуто, то верно и обратное.

Доказательство. На картинке это выглядит следующим образом:

¹⁸Еще говорят «обладает свойством продолжения гомотопии», но это совсем уж длинно.



Положим $Y = X \cup (A \times I)$, $f: X \rightarrow Y$ — вложение. Рассмотрим теперь гомотопию $F_t(A) = A \times t$. Так как (X, A) — пара Борсука, существует $G: X \times I \rightarrow Y: G|_{A \times I} = F$.

Докажем теперь в другую сторону: пусть для $f: X \rightarrow Y$ есть гомотопия $F_t: A \rightarrow Y$, то есть отображение $F: X \cup (A \times I) \rightarrow Y$. Тогда искомое продолжение гомотопии — композиция F и деформационной ретракции $X \times I \rightarrow X \cup (A \times I)$ ¹⁹. \square

Следствие 19. Пара $(D^n, \text{Int}(D^n))$ — не пара Борсука.

Вообще говоря, эта теорема показывает, что было бы хорошо, чтоб A было замкнутым.

Замечание. В нехаусдорфовом случае бывает, что и с незамкнутым A пара (X, A) будет парой Борсука.

Упражнение. Если (X, A) — пара Борсука и X — Хаусдорфово, то A замкнуто.

Предложение 35. Пусть (X, A) — пара Борсука. Тогда

$$X \cup CA \sim (X \cup CA)/CA = X/A.$$

Доказательство. Рассмотрим вложение $X \rightarrow X \cup CA$. Прогомотопируем A в вершину конуса a . Так как (X, A) — пара Борсука, эта гомотопия продолжается до гомотопии на X . Тогда финальный элемент гомотопии отображает $X \rightarrow X \cup CA$ так, что $A \mapsto a$, значит, это отображение пропускается через фактор X/A . С другой стороны ясно, как устроено обратное отображение $X \cup CA \rightarrow X/A$ (стягиваем конус в точку). Нетрудно заметить, что два построенных отображения задают гомотопическую эквивалентность. \square

Следствие 20. Если (X, A) — пара Борсука и A — стягиваемо, то $X \sim X/A$.

Предложение 36. Пара (CX, X) — всегда пара Борсука.

3.7 Относительные гомологии как абсолютные (факторизация)

Итак, в этом параграфе нас будет интересовать следующее (весьма полезное в вычислениях утверждение):

Теорема 49. В общем случае отображение $X \rightarrow X \cup CA$ индуцирует изоморфизм

$$H_q(X, A) \rightarrow H_q(X \cup CA, CA) = H_q(X \cup CA, a) = \tilde{H}_q(X \cup CA),$$

где a — вершина конуса.

Если (X, A) — пара Борсука, то отображение проекции $p: X \rightarrow X/A$, $A \mapsto a$ индуцирует изоморфизм

$$H_q(X, A) \xrightarrow{p_*} H_q(X/A, a) = \tilde{H}_q(X/A).$$

Вообще говоря, условие на A во второй части теоремы часто опускают и говорят, что это верно для «хороших пар». Мы доказываем для пар Борсука, можно доказывать для случая, когда A — окрестностный деформационный ретракт.

Для доказательства этой теоремы нам понадобится несколько важных (в общем контексте) лемм.

Сначала посмотрим на геометрическую конструкцию **барицентрического подразбиения**, чтоб иметь геометрическую интуицию в контексте сингулярных симплексов.

Рассмотрим симплекс $[v_0, \dots, v_n]$. его точки — линейные комбинации вида

$$\sum_{i=0}^n t_i v_i, \quad \text{где } \sum_{i=0}^n t_i = 1, \quad t_i \geq 0.$$

¹⁹ вот тут мы пользуемся замкнутостью A , так как нам нужно, чтоб покрытие было фундаментальным.

Определение 55. *Барицентр (центр тяжести)* симплекса — это точка $b \in [v_0, \dots, v_n]$, у которой все барицентрические аординаты t_i равны, а именно, $t_i = \frac{1}{n+1} \forall i$.

Барицентрическое подразбиение (подразделение) симплекса $[v_0, \dots, v_n]$ — это разбиение симплекса $[v_0, \dots, v_n]$ на n -мерные симплексы $[b, w_0, \dots, w_{n-1}]$, где по индукции $[w_0, \dots, w_{n-1}]$ — $(n-1)$ -мерный симплекс барицентрического подразбиения грани $[v_0, \dots, v_i, \dots, v_n]$.

- Индукция начинается с $n = 0$, когда барицентрическое подразбиение точки $[v_0]$ определяется просто, как сама точка $[v_0]$.
- В случае $n = 1$ отрезок $[v_0v_1]$ бьется на два отрезка $[v_0b]$, $[bv_1]$, где b — середина отрезка $[v_0, v_1]$.
- В случае $n = 2$ треугольник $[v_0v_1v_2]$ бьется на 6 треугольников, образуемых его вершинами и точкой пересечения медиан b .

Из такого индуктивного определения следует, что вершины симплексов в барицентрическом подразбиении симплекса $[v_0 \dots v_n]$ — в точности барицентры всех k -мерных граней $[v_{i_0} \dots v_{i_k}]$ симплекса $[v_0 \dots v_n]$ для $0 \leq k \leq n$.

При $k = 0$ это даёт нам просто набор вершин v_i . Барицентр симплекса $[v_{i_0} \dots v_{i_k}]$ имеет барицентрические координаты $t_i = \frac{1}{k+1}$ при $i = i_0, \dots, i_k$ и $t_i = 0$ во всех остальных случаях.

Замечание. Далее нам это не потребуется, но симплексы барицентрического подразбиения задают на симплексе T структуру симплициального комплекса.

Лемма 38 (О барицентрическом подразбиении). Пусть $f: T^q \rightarrow X$ — сингулярный симплекс. Тогда его барицентрическое подразбиение — это

$$\beta: C_q(X) \rightarrow C_q(X), \quad \beta f = \sum_{\tau \in S_{q+1}} \text{sign}(\tau) f_\tau,$$

где f_τ определяется следующим образом: исходный симплекс T^q мы можем барицентрически подразбить на симплексы $T'_q = \{x \mid x_{\tau(0)} \leq x_{\tau(1)} \leq \dots \leq x_{\tau(q)}\}$, в которых вершины нумеруются согласно размерностям граней. Тогда мы полагаем $f_\tau \stackrel{\text{def}}{=} f|_{T'_q}$.

Тогда $\partial\beta = \beta\partial$ и $\beta_*([\alpha]) = [\alpha] \forall [\alpha] \in H_q(X)$. Иными словами, барицентрическое подразбиение не влияет на гомологический класс.

Доказательство. Для первого утверждения достаточно проверить, что в сумме все внутренние грани встречаются с противоположным знаком, это ясно из картинки. Первое утверждение даёт нам, что $\beta \in \text{Hom}_{\mathcal{CH}}(C_\bullet, C_\bullet)$.

Для доказательства второго утверждения мы построим цепную гомотопию $D: C_q(X) \rightarrow C_{q+1}(X)$ между β и постоянным отображением.

Пусть $f: T^q \rightarrow X$, тогда $D(f)$ определяется следующим образом: барицентрически разобьём призму $I \times T^q$ на симплексы и рассмотрим проекцию

$$p: I \times T^q \rightarrow T^q.$$

Тогда $D(f)$ — это $(q+1)$ -мерный сингулярный симплекс, являющийся суммой композиций f и проекции p , суженной на симплексы в разбиении $I \times T^q$.

можно нарисовать картинку для отрезка, в принципе.

Из того, как устроена нумерация в барицентрическом разбиении призмы, нетрудно видеть, что D — гомотопия между β и id , то есть

$$f - \beta(f) = D\partial(f) + \partial D(f).$$

Чтоб понять всё это, надо опять позалипать на эту картиночку с призмой, как в теореме 46.²⁰

□

²⁰Возможно, всё это место стоит строго формально переписать из Хатчера.

Следующая лемма говорит нам, что для вычисления сингулярных гомологий достаточно рассматривать лишь *маленькие* сингулярные симплексы. В случае симплицальных гомологий это можно было бы формулировать в терминах диаметров, а в случае сингулярных мы будем говорить об этом в терминах покрытий.

Лемма 39 (Об измельчении). Пусть $\mathcal{U} = \{U_\alpha\}$ — конечное открытое покрытие X . Пусть $C_q^{\mathcal{U}}(X)$ порождено сингулярными симплексами $f \in C_q(X)$ такими, что $\exists \alpha: f(T_q) \subset U_\alpha$.

Тогда вложение $i: C_q^{\mathcal{U}}(X) \xrightarrow{i} C_q(X)$ индуцирует изоморфизм групп гомологий $H_\bullet(X) \cong H_\bullet^{\mathcal{U}}(X)$.

Доказательство. Заметим, что для достаточно большого n по лемме Лебега $c \in C_q(X) \Rightarrow \beta^n(c) \in C_q^{\mathcal{U}}(X)$. Кроме того, по лемме 38 c и $\beta^n(c)$ гомологичны (то есть, представляют один и тот же класс гомологий). Это даёт нам, что любой гомологический класс из $H_q(C_\bullet)$ имеет представителя в $C_q^{\mathcal{U}}(X)$, то есть, что отображение $H_q^{\mathcal{U}}(X) \rightarrow H_q(X)$ сюръективно.

Кроме того, также по лемме 38, если c — цикл из $C_q^{\mathcal{U}}$, то $c - \beta^n(c)$ — граница цепи из $C_{q+1}^{\mathcal{U}}$, так как

$$c - \beta^n(c) = \underbrace{D\partial c}_{=0, \text{ так как } c - \text{цикл}} - \partial Dc = \partial(-Dc) \in B_q(C_q^{\mathcal{U}}(X)).$$

С другой стороны, так как c и $\beta^n(c)$ гомологичны, их разность — граница (элемент $B_q(C_q(X))$). Таким образом, если цепь из $C_q^{\mathcal{U}}$ лежит в $B_q(C_q(X))$, то она лежит и в $B_q(C_q^{\mathcal{U}}(X))$. Это даёт нам инъективность отображения $H_q^{\mathcal{U}}(X) \rightarrow H_q(X)$. \square

Замечание. Заметим, что построенные в доказательстве отображения переводят цепи в A в цепи в A , а значит, выдерживают факторизацию по A . Этот факт даёт нам версию леммы об измельчении для относительных гомологий, которым мы и будем пользоваться.

Обозаведемся еще одним полезным фактом: Посмотрим на такой факт из гомологической алгебры:

Лемма 40 (5-лемма). Рассмотрим диаграмму

$$\begin{array}{ccccccccc} A & \longrightarrow & B & \longrightarrow & C & \longrightarrow & D & \longrightarrow & E \\ \downarrow f_1 & & \downarrow f_2 & & \downarrow f_3 & & \downarrow f_4 & & \downarrow f_5 \\ A' & \longrightarrow & B' & \longrightarrow & C' & \longrightarrow & D' & \longrightarrow & E' \end{array}$$

в которой строки точны, f_2, f_4 — изоморфизмы, f_1 — эпиморфизм, f_5 — мономорфизм. Тогда f_3 — изоморфизм.

Доказательство. Есть в любом курсе гомологической алгебры. \square

Из неё немедленно следует следующий простой факт:

Лемма 41. Если пара (X, A) гомотопически эквивалентна паре (Y, B) , то $H_\bullet(X, A) = H_\bullet(Y, B)$.

Доказательство. Запишем длинную точную последовательность для обеих пар:

$$\begin{array}{ccccccccc} H_k(A) & \longrightarrow & H_k(X) & \longrightarrow & H_k(X, A) & \longrightarrow & H_{k-1}(A) & \longrightarrow & H_{k-1}(X) \\ \parallel & & \parallel & & \downarrow & & \parallel & & \parallel \\ H_k(B) & \longrightarrow & H_k(Y) & \longrightarrow & H_k(Y, B) & \longrightarrow & H_{k-1}(B) & \longrightarrow & H_{k-1}(Y) \end{array}$$

Тогда всё следует из 5-леммы 40 \square

Наконец, мы можем доказать интересующую нас теорему:

Теорема 50. В общем случае отображение $X \rightarrow X \cup CA$ индуцирует изоморфизм

$$H_q(X, A) \rightarrow H_q(X \cup CA, CA) = H_q(X \cup CA, a) = \tilde{H}_q(X \cup CA),$$

где a — вершина конуса.

Если (X, A) — пара Борсука, то отображение проекции $p: X \rightarrow X/A$, $A \mapsto a$ индуцирует изоморфизм

$$H_q(X, A) \xrightarrow{p^*} H_q(X/A, a) = \tilde{H}_q(X/A).$$

Доказательство. Рассмотрим открытое покрытие $X \cup CA$ вида:

$$X \cup CA \subset ((X \cup CA) \setminus X) \cup (X \cup \overline{CA}), \quad \text{и} \stackrel{\text{def}}{=} \{(X \cup CA) \setminus X, (X \cup \overline{CA})\}$$

где \overline{CA} — нижняя открытая половина конуса CA .

По лемме 39 об измельчении мы вместо $H_q(X \cup CA, CA)$ можем рассматривать $H_q^{\mathcal{U}}(X \cup CA, CA)$.

А теперь, заметим, что по тому, как мы взяли покрытие,

$$C_q^{\mathcal{U}}(X \cup CA, CA) = C_q^{\mathcal{U}}(X \cup CA)/C_q^{\mathcal{U}}(CA) = C_q(X \cup \overline{CA})/C_q(\overline{CA}) = C_q(X \cup \overline{CA}, \overline{CA}).$$

А значит, из гомотопической эквивалентности и леммы 41 мы имеем

$$H_q(X \cup CA, CA) = H_q(X \cup \overline{CA}, \overline{CA}) = H_q(X, A).$$

Вторая часть первого равенства из условия теоремы следует из следствия 17.

Пусть теперь (X, A) — пара Борсука. Тогда по утверждению 35 $X \cup CA \sim X/A$, а значит, $H_q(X, A) \cong \tilde{H}_q(X/A)$. \square

3.8 Вырезание

Рассмотрим тройку $B \subset A \subset X$. Тогда вложение индуцирует отображение

$$H_k(X - B, A - B) \rightarrow H_k(X, A).$$

Вообще говоря, вырезание даёт хорошую технику вычисления относительных гомологий:

Теорема 51 (О вырезании). Пусть даны пространства $Z \subset A \subset X$, причем $\text{Cl}(Z) \subset \text{Int}(A)$. Тогда вложение $(X - Z, A - Z) \hookrightarrow (X, A)$ индуцирует изоморфизмы

$$H_n(X - Z, A - Z) \cong H_n(X, A)$$

для всех n . Или, что эквивалентно: для подпространств $A, B \subset X$, внутренности которых покрывают X , включение $(B, A \cap B) \hookrightarrow (X, A)$ индуцирует изоморфизмы

$$H_n(B, A \cap B) \cong H_n(X, A) \quad \forall n.$$

Доказательство. Докажем сначала эквивалентность формулировок. Положим $B = X - Z$, $Z = X - B$. Тогда $A \cap B = A - Z$, а условие $\text{Cl}(Z) \subset \text{Int}(A)$ эквивалентно тому, что $X = \text{Int}(A) \cup \text{Int}(B)$, так как $X - \text{Int}(B) = \text{Cl}(Z)$. Теперь докажем вторую формулировку.

Пусть $X = A \cup B$, обозначим соответствующее покрытие $\mathcal{U} = \{A, B\}$. Для краткости будем обозначать группы $C_n^{\mathcal{U}}(X)$, как $C_n(A + B)$ ²¹.

Тогда, как мы помним из леммы об измельчении 39 включение

$$C_n(A + B)/C_n(A) \hookrightarrow C_n(X)/C_n(A)$$

индуцирует изоморфизм групп гомологий $H_n(A + B, A) \cong H_n(X, A)$.

Теперь рассмотрим включение

$$C_n(B)/C_n(A \cap B) \hookrightarrow C_n(A + B, A).$$

Оно очевидно индуцирует изоморфизм гомологий, так как обе факторгруппы свободные, а их базис — n -мерные сингулярные симплексы в B , не лежащие в A . Значит, мы получили требуемый изоморфизм

$$H_n(B, A \cap B) \cong H_n(A + B, A) \cong H_n(X, A).$$

\square

²¹что на самом деле логично, так как цепи оттуда состоят из суммы цепей из A и цепей из B

3.9 Точная последовательность Майера-Вьеториса

Кроме длинной точной последовательности пары (теорема 47) для вычисления гомологий пары (X, A) есть и другая мощная техника для вычисления гомологий пространства X , тоже представляющая собой длинную точную последовательность.

Теорема 52 (Точная последовательность Майера-Вьеториса, простая версия). Пусть $X = A \cup B$, где A, B — открытые и $A \cap B = C \neq \emptyset$. Тогда имеет место следующая точная последовательность:

$$\dots H_q(A \cap B) \rightarrow H_q(A) \oplus H_q(B) \rightarrow H_q(X) \rightarrow H_{q-1}(A \cap B) \rightarrow H_{q-1}(A) \oplus H_{q-1}(B) \rightarrow \dots$$

Доказательство. Рассмотрим короткую точную последовательность комплексов:

$$0 \rightarrow C_\bullet(A \cap B) \xrightarrow[\varphi]{c \rightarrow (c, -c)} C_\bullet(A) \oplus C_\bullet(B) \xrightarrow[\psi]{(a, b) \rightarrow a + b} C_\bullet(A + B) \rightarrow 0$$

Во-первых, заметим, что $\text{Ker } \varphi = 0$, так как цепь в $A \cap B$, которая является нулевой в A (или в B) должна быть нулевой цепью. Во-вторых, очевидно, что $\psi\varphi = 0 \Rightarrow \text{Im } \varphi \subset \text{Ker } \psi$. Заметим, что для $(x, y) \in C_n(A) \oplus C_n(B)$ имеем $x + y = 0 \Rightarrow y = -x$, а значит $x \in C_n(A \cap B)$ и $(x, y) \in \text{Im } \varphi$. Это означает, что $\text{Ker } \psi \subset \text{Im } \varphi$. Точность в последнем члене следует просто из определения $C_n(A + B)$.

Тогда эта короткая точная последовательность комплексов даёт нам точную последовательность гомологий. Остается лишь заметить, что также, как и в теореме о вырезании, $H_\bullet(A + B) = H_\bullet(A \cup B)$. \square

Замечание. Эта не самая хорошая версия точной последовательности Майера-Вьеториса, так как условие на открытое покрытие seriously мешает.

3.10 Гомологии сфер

Теорема 53. Для $n \neq 0$ гомологии сферы устроены следующим образом:

$$H_i(S^n) \cong \begin{cases} \mathbb{Z}, & i = n \text{ или } i = 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Или, иными словами,

$$\tilde{H}_i(S^n) \cong \begin{cases} \mathbb{Z}, & i = n \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Доказательство. Рассмотрим пару $(X, A) = (D^n, S^{n-1})$, тогда $X/A \cong S^n$. Запишем для этой пары точную последовательность приведенных гомологий:

$$\dots \rightarrow \tilde{H}_q(D^n) \rightarrow \tilde{H}_q(D^n, S^{n-1}) \rightarrow \tilde{H}_{q-1}(S^{n-1}) \rightarrow \tilde{H}_{q-1}(D^n) \rightarrow \dots$$

Так как D^n стягиваем, $\tilde{H}_q(D^n) = 0$, а значит, $\tilde{H}_q(D^n, S^{n-1}) \cong \tilde{H}_{q-1}(S^{n-1})$. С другой стороны, так как $(D^n, \partial D^n) = (D^n, S^{n-1})$ — пара Борсука, по теореме о факторизации 50

$$H_q(D^n, S^{n-1}) \cong \tilde{H}_q(D^n/S^{n-1}) \cong \tilde{H}_q(S^n).$$

Остается заметить, что мы знаем, что утверждение верно для S^0 . Таким образом, мы доказали утверждение по индукции. \square

Следствие 21. Сферы разных размерностей негомеоморфны.

3.11 Гомологии букета и надстройки

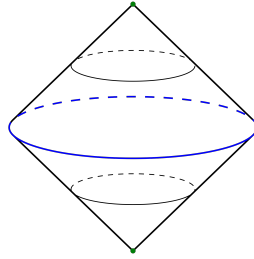
Из стягиваемости конуса сразу следует, что $H_q(CX, X) \cong \tilde{H}_q(X)$ (достаточно написать точную последовательность для приведенных гомологий).

Определение 56. Пусть X — топологическое пространство. Тогда *надстройкой* над X называется пространство ΣX , определённое, как

$$\Sigma X \cong X \times I / \sim, \text{ где } (x, 0) \sim (y, 0) \forall x, y \in X \text{ и } (x, 1) \sim (y, 1) \forall x, y \in X.$$

Иными словами, мы взяли $X \times I$ и стянули $X \times 1$ и $X \times 0$ в точку.

Пример 23. Надстройка над окружностью выглядит следующим образом:



Так как надстройка получается факторизацией конуса по нижнему основанию, из теоремы о факторизации 50 следует, что $H_{q+1}(CX, X) \cong \tilde{H}_{q+1}(\Sigma X)$. Таким образом, мы получили такое утверждение:

Теорема 54 (Гомологии надстройки). *Справедливо следующее равенство групп гомологий:*

$$\tilde{H}_q(X) \cong \tilde{H}_{q+1}(\Sigma X)$$

Замечание. Так как $\Sigma S^n = S^{n+1}$, мы таким образом получили другое доказательство теоремы 53.

Теорема 55 (Гомологии букета). *Для букета пространств $\bigvee_{\alpha} X_{\alpha}$ включения $i_{\alpha}: X_{\alpha} \hookrightarrow \bigvee_{\alpha} X_{\alpha}$ индуцируют изоморфизм гомологий*

$$\bigoplus_{\alpha} \tilde{H}_q \cong \tilde{H}_q \left(\bigvee_{\alpha} X_{\alpha} \right).$$

при условии, что если в букете отождествляются точки $\{x_{\alpha}\}$, то пары (X_{α}, x_{α}) — пары Борсука.

Доказательство. Достаточно рассмотреть пару

$$(X, A) = \left(\bigsqcup_{\alpha} X_{\alpha}, \bigsqcup_{\alpha} x_{\alpha} \right),$$

тогда по тривиальным причинам

$$H_n(X, A) \cong \bigoplus_{\alpha} \tilde{H}_n(X_{\alpha})$$

и по теореме о факторизации

$$H_n(X, A) \cong \tilde{H}_n \left(\bigvee_{\alpha} X_{\alpha} \right).$$

□

3.12 Гомологии с коэффициентами

У рассматриваемой нами до сих пор теории гомологий есть простое обобщение, которое иногда даёт техническое преимущество.

Обобщение состоит в рассмотрении цепей $\sum n_i f_i$, где f_i — сингулярные симплексы, а коэффициенты n_i берутся в фиксированной абелевой группе G . Такие n -мерные цепи образуют абелеву группу $C_n(X; G)$ и у неё также есть относительная версия $C_n(X, A; G) \stackrel{\text{def}}{=} C_n(X; G)/C_n(A; G)$.

Дифференциал ∂ строится также, как и раньше:

$$\partial \left(\sum_i n_i f_i \right) = \sum_{i,j} (-1)^j n_i \Gamma_j f_i.$$

Соответственно, группы $C_n(X; G)$ и $C_n(X, A; G)$ образуют цепные комплексы и их гомологии обозначают $H_n(X; G)$ и $H_n(X, A; G)$ и называют *гомологиями с коэффициентами в группе G* .

Приведённые группы гомологий $\tilde{H}(X; G)$ определяются аналогично, аугументация задаётся, как

$$\dots \rightarrow C_0(X; G) \xrightarrow{\varepsilon} G \rightarrow 0, \quad \varepsilon \left(\sum_i n_i f_i \right) = \sum_i n_i.$$

Замечание. Часто полезно рассматривать гоомологии с коэффициентами в $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$, так как нужно считать суммы сингулярных симплексов с коэффициентами 0 и 1, поэтому, отбрасывая члены с коэффициентами 0, можно представлять себе цепи, как конечные «объединения» сингулярных симплексов.

Кроме того, можно больше не заботиться о знаках в формуле для границы, а так как знаки являются алгебраическим выражением ориентации, мы можем игнорировать и ориентации. Это означает, что гомологии с коэффициентами в $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ — наиболее естественный инструмент для вычислений в неориентируемом случае.

Отметим, что вся доказанная выше теория переносится на гомологии с коэффициентами в G без проблем и различия между $H_n(X; G)$ и $H_n(X)$ появляются только, когда начинаются вычисления.

Пример 24. Если $X = *$ — точка, то нетрудно заметить, что

$$H_n(*; G) \cong \begin{cases} G, & n = 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Аналогично и в случае сфер S^k мы имеем

$$\tilde{H}_n(S^k; G) \cong \begin{cases} G, & n = k \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

3.13 Приложения теории гомологий

Теорема 56 (Борсук). *Не существует ретракции диска на граничную сферу.*

Доказательство. Предположим, что ретракция $f: D^n \rightarrow S^{n-1}$: f — непрерывное и $f|_{S^{n-1}} = \text{id}$ существует. Рассмотрим отображение $i: S^{n-1} \hookrightarrow D^n$, тогда в гомологиях у нас есть отображение

$$H_{n-1}(S^{n-1}) \xrightarrow{i_*} H_{n-1}(D^n) \xrightarrow{f_*} H_{n-1}(S^{n-1})$$

или, подставляя известные нам результаты:

$$\mathbb{Z} \xrightarrow{i_*} 0 \xrightarrow{f_*} \mathbb{Z}.$$

Так как $f \circ i = \text{id}$, $f_* \circ i_* = \text{id}_* = \text{id}$ и мы приходим к противоречию. □

Теорема 57 (Брауэр, о неподвижной точке). Пусть $f: D^n \rightarrow D^n$ — непрерывное отображение. Тогда у него существует неподвижная точка.

Доказательство. Предположим противное, пусть существует непрерывное $f: D^n \rightarrow D^n$, не имеющее неподвижных точек. Рассмотрим отображение g , которое переводит $x \in D^n$ в точку пересечения $[f(x), x]$ и ∂D^n . То есть, $g: D^n \rightarrow \partial D^n$ и $g|_{\partial D^n} = \text{id}$. Тогда g — ретракция D^n на граничную сферу, а этого не бывает по теореме 56. \square

Теорема 58 (Брауэр, инвариантность размерности). Если непустые открытые $U \subset \mathbb{R}^m$, $V \subset \mathbb{R}^n$ открытые и они гомеоморфны, то $m = n$.

Доказательство. Пусть h — гомеоморфизм $U \rightarrow V$, тогда

$$H_k(U, U - x) \cong H_k(V, V - h(x)).$$

По теореме о вырезании 51 для $(X, A) = (\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m - x)$ и $Z = \mathbb{R}^m - U$:

$$H_k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m - x) \cong H_k(U, U - x).$$

Тогда мы имеем, что

$$H_k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m - x) \cong H_k(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n - h(x)).$$

Из точной последовательности пары для $(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m - x)$ мы имеем:

$$\dots \rightarrow H_k(\mathbb{R}^m) \rightarrow H^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m - x) \rightarrow H_{k-1}(\mathbb{R}^m - x) \rightarrow H_{k-1}(\mathbb{R}^m) \rightarrow \dots$$

$$\dots 0 \rightarrow H^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m - x) \rightarrow H_{k-1}(\mathbb{R}^m - x) \rightarrow 0 \rightarrow \dots,$$

а значит, $H_k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m - x) \cong H_{k-1}(\mathbb{R}^m - x) \cong H_{k-1}(S^{m-1})$, так как $\mathbb{R}^m - x$ деформационно ретрагируется на S^{m-1} . Значит, мы получили

$$H_{k-1}(S^{m-1}) \cong H_{k-1}(S^{n-1}),$$

откуда ясно, что $m = n$. \square

3.14 Симплициальные комплексы

Этот параграф надо написать из Хатчера.

3.15 Эквивалентность симплициальных и сингулярных гомологий

Образующая $H_n(S^n)$:

В этом параграфе будем обозначать n -мерный симплекс, как Δ^n . Заметим, что так как $\Delta^n / \partial \Delta^n \cong S^n$, по теореме о факторизации 50 мы имеем изоморфизм

$$H_n(S^n) \cong H_n(\Delta^n, \partial \Delta^n).$$

Покажем, что образующая $H^n(S^n)$ — это отображение $\Delta^n \xrightarrow{\text{id}} \Delta^n$. Нетрудно заметить, что $\text{Im}(\partial f) \subset \partial \Delta^n$, что дает нам, что id вообще представляет какой-то гомологический класс в $H_n(\Delta^n, \partial \Delta^n)$.

Рассмотрим тройку $(\Delta^n, \partial \Delta^n, \Lambda)$, где Λ — это $\partial \Delta^n$ без одной из граней (например, запоолненный треугольник, граница треугольника и граница треугольника без стороны). Напишем точную последовательность тройки:

$$\dots \rightarrow H_n(\partial \Delta^n, \Lambda) \rightarrow H_n(\Delta^n, \Lambda) \rightarrow H_n(\Delta^n, \partial \Delta^n) \rightarrow H_{n-1}(\partial \Delta^n, \Lambda) \rightarrow H_{n-1}(\Delta^n, \Lambda) \rightarrow \dots$$

Заметим, что так как Δ^n деформационно ретрагируется на Λ , $H_n(\Delta^n, \Lambda) \cong H_n(\Lambda, \Lambda) = 0$ и то же самое справедливо для $(n-1)$ -х гомологий. То есть, наша последовательность на самом деле имеет вид

$$\dots \rightarrow 0 \rightarrow H_n(\Delta^n, \partial \Delta^n) \rightarrow H_{n-1}(\partial \Delta^n, \Lambda) \rightarrow 0 \rightarrow \dots$$

Теперь заметим, что если грань, которую мы выкинули, мы обозначим за Δ' , то $H_{n-1}(\partial\Delta^n, \Lambda) \cong H_{n-1}(\Delta', \partial\Delta')$.

Это ценно, так как далее мы можем рассуждать по индукции, ведь если образующая $H_{n-1}(\Delta', \partial\Delta')$ — вложение выкинутой нижней грани Δ' , то её прообраз в $H_n(\Delta^n, \partial\Delta^n)$ — нужное нам тождественное отображение (мы тут пользуемся тем, что мы знаем, что связывающий гомоморфизм в длинной точной последовательности пары/тройки — это просто взятие границы). А для S^0 это утверждение очевидно.

Обозначим симплициальные гомологии пространства X за $H_k^\Delta(X)$.

Теорема 59. Пусть X — конечный симплициальный комплекс. Тогда

$$H_k^{\text{sing}}(X) \cong H_k^\Delta(X).$$

Доказательство. Пусть X^k — объединение всех симплексов в симплициальном комплексе до размерности k (обозначение аналогично обозначению для CW-комплексов). Напишем точную последовательность пары:

$$\dots \rightarrow H_{n+1}^\Delta(X^k, X^{k-1}) \rightarrow H_n^\Delta(X^k) \rightarrow H_n^\Delta(X^k) \rightarrow H_n^\Delta(X^k, X^{k-1}) \rightarrow \dots$$

и заметим, что $H_{n+1}^\Delta(X^k, X^{k-1}) \cong H_{n+1}(X^k, X^{k-1}) \cong H_{n+1}(\bigvee_\alpha S^k)$. Действительно, ясно, что

$$H_{n+1}(X^k, X^{k-1}) \cong H_{n+1}\left(\bigvee_\alpha S^k\right),$$

где α пробегает k -мерные симплексы в X . Далее,

$$H_{n+1}\left(\bigvee_\alpha S^k\right) \cong \begin{cases} 0, & \text{если } n+1 \neq k \\ \bigoplus_\alpha \mathbb{Z}, & n+1 = k \end{cases}$$

С другой стороны, из определения симплициальных гомологий ясно, что при $n+1 \neq k$ мы имеем $H_{n+1}^\Delta(X^k, X^{k-1}) \cong 0$, а при $n+1 = k$ эта группа — свободная абелева группа, порожденная всеми k -мерными симплексами в X , то есть, как и в предыдущем случае

$$H_k^\Delta(X^k, X^{k-1}) \cong \bigoplus_\alpha \mathbb{Z}.$$

Остается заметить, что по доказанному в начале параграфа, мы знаем, что у $H_k(\bigvee_\alpha S^k)$ такой же набор порождающих.

Теперь будем вести индукцию по размерности симплициального комплекса. По индукционному предположению мы имеем $H_n^\Delta(X^{k-1}) \cong H_n(X^{k-1})$ и тогда мы получаем диаграмму из 5-леммы:

$$\begin{array}{ccccccc} H_{n+1}^\Delta(X^k, X^{k-1}) & \longrightarrow & H_n^\Delta(X^{k-1}) & \longrightarrow & H_n^\Delta(X^k) & \longrightarrow & H_n(X^k, X^{k-1}) \\ \parallel & & \parallel & & \downarrow & & \parallel \\ H_{n+1}(X^k, X^{k-1}) & \longrightarrow & H_n(X^{k-1}) & \longrightarrow & H_n(X^k) & \longrightarrow & H_n(X^k, X^{k-1}) \end{array}$$

□

3.16 Степень отображения

Определение 57. Пусть $f: S^n \rightarrow S^n$ — непрерывное отображение. Тогда оно индуцирует морфизм в гомологиях:

$$f_*: H_n(S^n) \rightarrow H_n(S^n).$$

Так как f_* — гомоморфизм бесконечной циклической группы в себя, он должен иметь вид

$$f_*(\alpha) = d \cdot \alpha$$

для некоторого фиксированного $d \in \mathbb{Z}$, зависящего только от f . Это число называют *степенью отображения* f и обозначают $\deg f$.

Базовые свойства степени.

1. $\deg \text{id}_{S^n} = 1$.
2. Если f — не сюръекция, то $\deg f = 0$, так как мы можем выбрать $x \in S^n \setminus f(S^n)$ и представить f в виде композиции

$$S^n \rightarrow S^n \setminus \{x\} \hookrightarrow S^n,$$

а пространство $S^n \setminus \{x\}$ — стягиваемо, значит $H_n(S^n \setminus \{x\}) = 0$, а значит и $f_* = 0$.

3. Если $f \sim g$, то $\deg f = \deg g$.
4. $\deg f \circ g = \deg f \cdot \deg g$.
5. Если f — гомотопическая эквивалентность, то существует g такое, что $f \circ g \sim \text{id} \Rightarrow \deg f \deg g = 1 \Rightarrow \deg f = \pm 1$.
6. Рассмотрим f , которое тождественно действует на первых n координатах и отправляет x_{n+1} в $-x_{n+1}$. Тогда $\deg f = -1$. Действительно, мы можем реализовать сферу, как склейку двух симплексов Δ_1^n и Δ_2^n по границе. Тогда n -мерная цепь $\Delta_1^n - \Delta_2^n$ являются образующей n -мерных гомологий, а отображение f переставляет местами Δ_1^n и Δ_2^n , то есть действует на образующую умножением на -1 .
7. Степень антиподального отображения: $\deg(x \mapsto -x) = (-1)^{n+1}$.
8. Если $f: S^n \rightarrow S^n$ не имеет неподвижных точек, то $f \sim (x \mapsto -x)$ и соответственно $\deg f = (-1)^{n+1}$. Действительно, если $f(x) \neq x$, то отрезок с концами $f(x)$ и $-x$, который задаётся, как

$$t \mapsto (1-t)f(x) - tx, \quad 0 \leq t \leq 1,$$

не проходит через начало координат и формула

$$H(t, x) = \frac{(1-t)f(x) - tx}{\|(1-t)f(x) - tx\|}$$

определяет гомотопию $f(x)$ в постоянное отображение.

Теорема 60 (О причёсывании ежа). S^n допускает непрерывное ненулевое (касательное) векторное поле тогда и только тогда, когда n — нечетно.

Доказательство. Предположим, что $x \mapsto V(x)$ — непрерывное поле касательных векторов к сфере. Тогда, если рассматривать вектор $V(x)$, как вектор в начале координат, а не в точке касания, то условие касания означает просто, что $x \perp V(x)$. Если $V(x) \neq 0$, то мы можем нормализовать векторное поле так, что $\|V(x)\| = 1 \forall x$, тогда векторы

$$(\cos t)x + (\sin t)V(x)$$

лежат на единичной окружности в $\text{span}(x, V(x))$. Соответственно, при $t \in [0, \pi]$ мы получаем гомотопию тождественного отображения id_{S^n} в антиподальное отображение:

$$H(t, x) = (\cos t)x + (\sin t)V(x).$$

Отсюда следует, что $(-1)^{n+1} = 1$, а значит, n должно быть нечетно. С другой стороны, когда $n = 2k - 1$, мы можем положить

$$V(x_1, x_2, \dots, x_{2k-1}, x_{2k}) = (-x_2, x_1, \dots, -x_{2k}, x_{2k+1})$$

и это даст нам искомое векторное поле. □

Опишем теперь метод вычисления, который чаще всего применим на практике. Пусть $f: S^n \rightarrow S^n$ и существует $y \in S^n$ такое, что $f^{-1}(y) = \{x_1, \dots, x_k\}$, U_1, \dots, U_k — непересекающиеся окрестности этих точек, которые f переводит в окрестность V точки y . Тогда $f(U_i \setminus x_i) \subset V \setminus y$ и мы имеем коммутативную диаграмму:

$$\begin{array}{ccccc}
H_n(U_i, U_i \setminus \{x_i\}) & \xrightarrow{f_*} & H_n(V, V \setminus \{y\}) \\
\parallel & \downarrow k_i & \parallel \\
H_n(S^n, S^n \setminus \{x_i\}) & \xleftarrow{p_i} H_n(S^n, S^n \setminus f^{-1}(y)) \xrightarrow{f_*} & H_n(S^n, S^n \setminus \{y\}) \\
\parallel & \uparrow j & \parallel \\
H_n(S^n) & \xrightarrow{f_*} & H_n(S^n)
\end{array}$$

Все отображения на ней индуцируются включениями. Два изоморфизма в верхней части диаграммы получаются из теоремы о вырезании 51, а два в нижней — из точной последовательности пары 47.

Посредством этих четырех гомоморфизмов две верхние группы можно отождествить с \mathbb{Z} , тогда верхний гомоморфизм f_* становится умножением на число и это число мы будем называть *локальной степенью* отображения f и обозначать $\deg f|_{x_i}$.

Теорема 61 (Локальность степени). Пусть $f: S^n \rightarrow S^n$ и $y \in S^n$ таково, что $f^{-1}(y) = \{x_1, \dots, x_k\}$. Тогда

$$\deg f = \sum_i \deg f|_{x_i}.$$

Доказательство. По теореме о выражении 51, группа $H_n(S^n, S^n \setminus f^{-1}(y))$ — прямая сумма групп $H_n(U_i, U_i \setminus \{x_i\})$, причем k_i — отображение включения i -го слагаемого, а p_i — проекция на i -е слагаемое. Из коммутативности нижнего треугольника мы получаем, что

$$p_i \circ j(1) = 1,$$

а значит, $j(1) = (1, \dots, 1) = \sum_i k_i(1)$. Коммутативность верхнего квадрата говорит, что f_* отображает $k_i(1)$ в $\deg f|_{x_i}$, а коммутативность нижнего квадрата уже дает нам формулу

$$\deg f = \sum_i \deg f|_{x_i}.$$

□

3.17 Клеточные гомологии

Лемма 42. Пусть X — конечный CW-комплекс. Тогда:

- а) $H_k(X^n, X^{n-1}) = 0$, если $k \neq n$ и изоморфно свободной абелевой группе, если $k = n$. Образующие этой группы — клетки размерности n .
- б) $H_k(X^n) = 0$, если $k > n$. В частности, если комплекс конечномерен, то $H_k(X) = 0 \forall k > \dim X$.
- в) Вложение $i: X^n \hookrightarrow X$ индуцирует изоморфизм $i_*: H_k(X^n) \rightarrow H_k(X)$ при $k < n$ и эпиморфизм при $k = n$.

Доказательство. Во-первых, мы знаем, что (X^n, X^{n-1}) — пара Борсука. Кроме того, $X^n/X^{n-1} \cong \bigvee_\alpha S^n$, где α пробегает все n -мерные клетки. Тогда факт а) следует из теоремы о факторизации 50 и теоремы 55.

Теперь рассмотрим длинную точную последовательность пары

$$\dots \rightarrow H_{k+1}(X^n, X^{n-1}) \rightarrow H_k(X^{n-1}) \rightarrow H_k(X^n) \rightarrow H_k(X^n, X^{n-1}) \rightarrow \dots$$

Если $k \neq n$ или $n - 1$, то обе внешние группы равны нулю, как группы гомологий букета n -мерных сфер, поэтому мы получаем изоморфизм

$$H_k(X^{n-1}) \cong H_k(X^n), \quad k \neq n, n - 1.$$

Тогда, если $k > n$, то

$$H_k(X^n) \cong H_k(X^{n-1}) \cong \dots \cong H_k(X^0) = 0,$$

что доказывает пункт б). Если же $k < n$, то тогда

$$H_k(X^n) \cong H_k(X^{n+1}) \cong \dots \cong H_k(X^{n+m}) \forall m \geq 0,$$

что доказывает в) в случае конечномерного комплекса.

□

Замечание. Утверждение с) верно и для бесконечномерных CW-комплексов (идея состоит в том, что каждая сингулярная цепь имеет компактный образ, а значит пересекается лишь с конечным числом клеток). (Доказательство можно посмотреть в Хатчере).

Теперь мы определим клеточные гомологи — более продвинутый способ вычислять гомологии клеточных пространств. Начнем с такой коммутативной диаграммы:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & & & & 0 \\
 & & & & & \nearrow & \\
 0 & & & & & H_n(X^{n+1}) \cong H_n(X) & \\
 & \searrow & & & \nearrow & & \\
 & & H_n(X^n) & & & & \\
 & \nearrow \partial_{n+1} & \downarrow j_n & & & & \\
 \dots \longrightarrow H_{n+1}(X^{n+1}, X^n) & \xrightarrow{d_{n+1}} & H_n(X^n, X^{n-1}) & \xrightarrow{d_n} & H_{n-1}(X^{n-1}, X^{n-2}) & \longrightarrow \dots \\
 & & \downarrow \partial_n & \nearrow j_{n-1} & & & \\
 & & H_{n-1}(X^{n-1}) & & & & \\
 & \nearrow & & & & & \\
 0 & & & & & &
 \end{array}$$

Её мы получили из точных последовательностей для пар (X^{n+1}, X^n) , (X^n, X^{n-1}) , (X^{n-1}, X^{n-2}) . Морфизмы в нижней строчке определяются, как $d_{n+1} \stackrel{\text{def}}{=} j_n \circ \partial_{n+1}$. Нетрудно заметить, что из точности мы получаем $d_n \circ d_{n+1} = 0$. Таким образом, средняя строчка диаграммы является цепным комплексом (его называют *клеточным цепным комплексом для X*). Как мы уже замечали в доказательстве леммы выше, группа $H_n(X^n, X^{n-1})$ — свободная абелева группа с базисом из n -мерных клеток в X .

Определение 58. Рассмотрим построенный выше цепной комплекс с группой k -мерных цепей $C_k^{\text{CW}}(X) \stackrel{\text{def}}{=} H_k(X^k, X^{k-1})$. Гомологии этого комплекса называют *клеточными гомологиями пространства X* и обозначают $H_n^{\text{CW}}(X)$.

Замечание. В самом деле, всё происходящее вполне логично — в случае симплициальных гомологий мы рассматриваем свободные абелевы группы, порожденные симплексами всех размерностей, а тут — клетками всех размерностей.

Теорема 62. Пусть X — CW-комплекс. Тогда имеет место изоморфизм $H_n^{\text{CW}}(X) \cong H_n(X)$.

Доказательство. Из точности и теоремы о гомоморфизме мы имеем изоморфизм

$$H_n(X) \cong H_n(X^n) / \text{Im } \partial_{n+1}.$$

Так как j_n — инъекция, $\text{Im } \partial_{n+1} \cong \text{Im } j_n \circ \partial_{n+1} = \text{Im } d_{n+1}$. С другой стороны, $\text{Im } j_n \cong \text{Ker } \partial_n$. Из инъективности j_{n-1} мы имеем $\text{Ker } \partial_n \cong \text{Ker } d_n$. Значит, j_n индуцирует изоморфизм факторгруппы:

$$H_n(X) \cong H_n(X^n) / \text{Im } \partial_{n+1} \cong \text{Ker } d_n / \text{Im } d_{n+1}.$$

□

Следствие 22. Пусть X — CW-комплекс, тогда:

1. $H_n(X) \cong 0$, если в X нет n -мерных клеток.
2. Если X — CW-комплекс с k клетками размерности n , то группа $H_n(X)$ порождена не более чем k элементами. В самом деле, так как $H_n(X^n, X^{n-1})$ — группа с k образующими, у подгруппы $\text{Ker } d_n$ никак не может быть больше образующих, а значит и в факторгруппе $\text{Ker } d_n / \text{Im } d_{n+1}$ тоже.

3. Если X — CW-комплекс, у которого нет пар клеток в соседних размерностях, то $H_n(X)$ — свободная абелева группа с базисом из n -мерных клеток.

Пример 25. Последний пункт следствия 22 применим, например, к $\mathbb{C}P^n$, так как клеточная структура для $\mathbb{C}P^n$ имеет по одной клетке каждой четной размерности до $2n$ (действительно, это заметно из того, что $\mathbb{C}P^n = \mathbb{C}^n \cup \mathbb{C}P^{n-1}$). Значит, клеточный цепной комплекс для $\mathbb{C}P^n$ имеет вид:

$$\mathbb{Z} \rightarrow 0 \rightarrow \mathbb{Z} \rightarrow 0 \rightarrow \dots \rightarrow 0 \rightarrow \mathbb{Z} \rightarrow 0$$

Также при помощи этого же факта можно посчитать гомологии $S^n \times S^n$.

Рассмотрим теперь подробнее клеточный оператор границы d_n . При $n = 1$ это легко, так как

$$d_1: H_1(X^1, X^0) \rightarrow H_0(X^0)$$

и это просто обычное граничное отображение.

В случае, когда комплекс X связан и имеет лишь одну нульмерную клетку, $d_1 = 0$, так как иначе $H_0(X) \neq \mathbb{Z}$. В общем случае формула для клеточного оператора границы имеет следующий вид:

Предложение 37. Имеет место равенство:

$$d_n(e_\alpha^n) = \sum_{\beta} d_{\alpha\beta} e_\beta^{n-1},$$

где $d_{\alpha\beta}$ — степень отображения $S_\alpha^{n-1} \rightarrow X^{n-1} \rightarrow S_\beta^{n-1}$, которое является композицией отображения приклеивания клетки e_α^n по границе и отображения факторизации, стягивающего $X^{n-1} \setminus e_\beta^{n-1}$ в точку.

Доказательство. Для получения этой формулы рассмотрим такую коммутативную диаграмму:

$$\begin{array}{ccccc} H_n(D_\alpha^n, \partial D_\alpha^n) & \xrightarrow{\partial} & \tilde{H}_{n-1}(\partial D_\alpha^n) & \xrightarrow{\Delta_{\alpha\beta}} & \tilde{H}_{n-1}(S_\beta^{n-1}) \\ \downarrow \Phi_{\alpha*} & & \downarrow \varphi_{\alpha*} & & \downarrow q_{\beta*} \\ H_n(X^n, X^{n-1}) & \xrightarrow{\partial_n} & \tilde{H}_{n-1}(X^{n-1}) & \xrightarrow{q_*} & \tilde{H}_{n-1}(X^{n-1}/X^{n-2}) \\ & \searrow d_n & \downarrow j_{n-1} & & \downarrow \cong \\ & & H_{n-1}(X^{n-1}, X^{n-2}) & \xrightarrow{\cong} & H_{n-1}(X^{n-2}/X^{n-2}, X^{n-2}/X^{n-2}) \end{array}$$

Проясним, что за стрелки на ней:

- Φ_α — характеристическое отображение клетки e_α^n , φ_α — её отображение приклеивания.
- $q: X^{n-1} \rightarrow X^{n-1}/X^{n-2}$ — отображение факторизации.
- $q_\beta: X^{n-1}/X^{n-2} \rightarrow S_\beta^{n-1}$ — стягивание дополнения клетки e_β^{n-1} в точку и отождествление полученной сферы с $S_\beta^{n-1} = D_\beta^{n-1}/\partial D_\beta^{n-1}$.
- $\Delta_{\alpha\beta} = q_\beta q \varphi_\alpha$.

Отображение $\Phi_{\alpha*}$ переводит образующую $[D_\alpha^n] \in H_n(D_\alpha^n, \partial D_\alpha^n)$ в образующую слагаемого \mathbb{Z} группы $H_n(X^n, X^{n-1})$, соответствующего клетке e_α^n (действительно, такие клетки образуют базис $H_n(X^n, X^{n-1})$). Коммутативность левой половины диаграммы даёт нам, что

$$d_n(e_\alpha^n) = j_{n-1} \varphi_{\alpha*} \partial[D_\alpha^n].$$

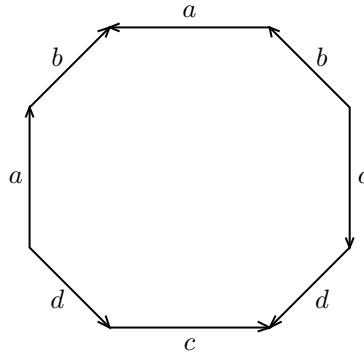
Базис группы $H_{n-1}(X^{n-1}, X^{n-2})$ состоит из $(n-1)$ -мерных клеток, а отображение $q_{\beta*}$ — это проекция группы $\tilde{H}_{n-1}(X^{n-1}/X^{n-2})$ (которая, как группа гомологий букета окружностей суть прямая сумма \mathbb{Z} , где каждое слагаемое соответствует $(n-1)$ -мерной клетке) на её слагаемое \mathbb{Z} , соответствующее e_β^{n-1} .

Теперь формула следует непосредственно из коммутативности правой верхней части диаграммы \square

3.18 Гомологии поверхностей

В данном параграфе, пользуясь клеточными гомологиями, мы вычислим гомологии поверхностей.

Пусть M_g — компактная ориентируемая поверхность с g ручками. Реализуем её, как склейку $4g$ -угольника:



Тогда в её клеточном разбиении:

- 1 двумерная клетка, приклеенная по произведению коммутаторов $[a_1, b_1] \dots [a_g, b_g]$.
- $2g$ одномерных клеток.
- 1 нульмерная клетка.

Значит, цепной клеточный комплекс для M_g будет иметь вид:

$$0 \rightarrow \mathbb{Z} \xrightarrow{d_2} \mathbb{Z}^{2g} \xrightarrow{d_1} \mathbb{Z} \rightarrow 0$$

Так как комплекс связан и имеет лишь одну нульмерную клетку, $d_1 = 0$. Кроме того, каждое ребро $[a_1, a_2]$, $[a_g, b_g]$ появляется в произведении коммутаторов вместе со своим обратным, а значит, $\Delta_{\alpha\beta}$ гомотопны постоянным отображениям, из чего следует, что $d_2 = 0$.

Таким образом, мы имеем

$$H_k(M_g) = \begin{cases} \mathbb{Z}, & k = 0 \text{ или } k = 2, \\ \mathbb{Z}^{2g}, & k = 1 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Теперь вычислим гомологии неориентируемой замкнутой поверхности рода g . Она имеет такую клеточную структуру:

- Одна нульмерная клетка.
- g одномерных клеток.
- Одна двумерная клетка, приклеенная по слову $a_1^2 \dots a_g^2$.

Тогда клеточный цепной комплекс имеет вид:

$$0 \rightarrow \mathbb{Z} \xrightarrow{d_2} \mathbb{Z}^g \xrightarrow{d_1} \mathbb{Z} \rightarrow 0$$

Аналогично предыдущему разу, $d_1 = 0$, а вот d_2 задаётся уравнением

$$d_2(1) = (2, \dots, 2),$$

так как каждое ребро a_i появляется в слове приклеивания двумерной клетки со степенью 2, а это значит, что каждое отображение $\Delta_{\alpha\beta}$ гомотопно отображению степени 2. Значит, d_2 инъективно и

$$H_2(N_g) = 0.$$

Выберем в \mathbb{Z}^g такой базис: $(1, 0, \dots, 0), (0, 1, 0, \dots, 0), \dots, (0, \dots, 1, 0), (1, 1, \dots, 1)$. Тогда нетрудно заметить, что

$$H_1(N_g) \cong \mathbb{Z}^{g-1} \oplus \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}.$$

3.19 Пространства Мура

Допишу позже вместе с пространствами Эйленберга-Маклейна.

3.20 Теорема о вложении дисков и сфер

Напомним, что топологическое вложение — гомеоморфизм на образ.

Теорема 63. Пусть $h: D^k \rightarrow S^n$ — вложение. Тогда

$$\tilde{H}_i(S^n \setminus h(D^k)) = 0 \quad \forall i.$$

Кроме того, если $h: S^k \rightarrow S^n$ — вложение (и $k < n$), то

$$\tilde{H}_i(S^n \setminus h(S^k)) = \mathbb{Z}, \quad i = n - k - 1 \text{ и } 0 \text{ иначе.}$$

Доказательство. Проведём индукцию по k . Случай $k = 0$ тривиален:

$$S^n \setminus h(D^0) = \mathbb{R}^n.$$

Теперь докажем индукционный переход от противного. Рассмотрим покрытие нашего пространства двумя множествами:

$$A = S^n \setminus h\left(I^k \times \left[0, \frac{1}{2}\right]\right), \quad B = S^n \setminus h\left(I^k \times \left[\frac{1}{2}, 1\right]\right).$$

Заметим, что $A \cup B = S^n \setminus (h(I^k \times [0, \frac{1}{2}]) \cap h(I^k \times [\frac{1}{2}, 1])) = S^n \setminus h(I^k \times \frac{1}{2})$ и

$$\tilde{H}_i(A \cup B) \cong \tilde{H}_i\left(S^n \setminus h\left(I^k \times \frac{1}{2}\right)\right) = 0,$$

по индукционному предположению. Напишем теперь точную последовательность Майера-Вьеториса (52):

$$\dots \rightarrow H_n(A \cap B) \rightarrow H_n(A) \oplus H_n(B) \rightarrow H_n(X) \rightarrow H_{n-1}(A \cap B) \rightarrow \dots$$

$$\dots \rightarrow H_n\left(S^n \setminus h\left(I^{k+1}\right)\right) \rightarrow H_n(A) \oplus H_n(B) \rightarrow \underbrace{H_n\left(S^n \setminus h\left(I^k \times \frac{1}{2}\right)\right)}_{\cong 0} \rightarrow H_{n-1}\left(S^n \setminus h\left(I^{k+1}\right)\right) \rightarrow \dots$$

значит если в $\tilde{H}_i(A \cap B) = \tilde{H}_i(S^n \setminus (I^k \times I))$ есть ненулевой класс a , его образ $(a, -a)$ в $\tilde{H}_n(A) \oplus \tilde{H}_n(B)$ будет ненулевым, а значит, в $\tilde{H}_i(A)$ или $\tilde{H}_i(B)$ тоже будет ненулевым. Далее мы можем также разбить на две части интервал в A или в B (в зависимости от того, где не ноль) и проделать всё полностью аналогично. Таким образом мы получим последовательность вложенных интервалов I_n таких, что

$$\tilde{H}_i(S^n \setminus h(I^k \times I_n)) \neq 0, \quad a \in \tilde{H}_i(S^n \setminus h(I^k \times I_n)).$$

Тогда, если $p = \bigcap I_n$, то по индукционному предположению

$$\tilde{H}_i(S^n \setminus h(I^k \times p)),$$

то есть a представляет ноль в этих гомологиях. Но это означает, что он является чьей-то границей, но тогда он является границей и в допредельном случае, что даёт нам противоречие.

Докажем теперь второй пункт. Представим сферу в виде объединения двух дисков (полусфер):

$$S^k = D_+^k \cup D_-^k, \quad D_-^k \cap D_+^k = S^{k-1}.$$

тогда $S^n \setminus h(S^k) = S^n \setminus h(D_+^k \cup D_-^k) = S^n \setminus h(D_-^k) \cap S^n \setminus h(D_+^k)$. Запишем опять точную последовательность Майера-Вьеториса 52, полагая

$$A = S^n \setminus h(D_+^k), \quad B = S^n \setminus h(D_-^k).$$

$$\dots \rightarrow H_i(S^n \setminus h(S^k)) \rightarrow \underbrace{H_i(S^n \setminus h(D_-^k))}_{=0} \oplus \underbrace{H_i(S^n \setminus h(D_+^k))}_{=0} \rightarrow H_i(S^n \setminus h(S^{k-1})) \rightarrow \dots$$

Нулевые элементы в точной последовательности у нас их первого утверждения теоремы. Теперь видно, что мы можем вести индукцию по k . \square

3.21 Когомологии

Итак, рассмотрим цепной комплекс абелевых групп (C_\bullet, ∂)

$$\dots \rightarrow C_k \rightarrow C_{k-1} \rightarrow C_{k-2} \rightarrow \dots$$

Тогда мы можем рассмотреть группы $C^k \stackrel{\text{def}}{=} \text{Hom}(C_k, G)$, где G — фиксированная абелева группа.²² Тогда мы получаем цепной комплекс

$$\dots \leftarrow C^{k+1} \xleftarrow{\delta} C^k \xleftarrow{\delta} C^{k-1} \xleftarrow{\delta} \dots$$

Естественно, стрелки развернулись, так как мы действовали на комплекс контравариантным функтором $\text{Hom}(_, G)$. Действие оператора δ определяется естественным образом:

$$\varphi \in C^k, \quad \delta\varphi: C_{k+1} \xrightarrow{\partial} C_k \xrightarrow{\varphi} G, \quad \delta\varphi = \varphi \circ \partial.$$

Замечание. Сразу же нетрудно заметить, что $\delta^2 = 0$, то есть построенный комплекс действительно будет комплексом. Действительно,

$$\delta_k \circ \delta_{k-1}(\varphi(c)) = \delta_k(\varphi(\partial_{k-1}c)) = \varphi(\partial_k \partial_{k-1}c) = 0.$$

Определение 59. Группы гомологий коцепного комплекса $(C^\bullet, \delta) = (\text{Hom}(C_\bullet, G), \delta)$ называют *группами когомологий* комплекса (C_\bullet, ∂) с коэффициентами в группе G и обозначаются $H^k(C_\bullet; G)$. Как и в случае с гомологиями, $\text{Im } \delta_k$ называют k -мерными кограницами, $\text{Ker } \delta_k$ — k -мерными коциклами, а C^k — k -мерными коцепями.

Таким образом, мы определили и *сингулярные когомологии* пространства X (так как они строятся по сингулярным гомологиям). Заметим, что так как функтор Hom контравариантен, логично ожидать, что и когомологии будут контравариантным функтором. Действительно, если $f: X \rightarrow Y$ — непрерывное отображение, то у нас есть индуцированный морфизм

$$f_*: C_k(X) \rightarrow C_k(Y)$$

и действием функтора Hom мы получаем индуцированный морфизм $f^*: C^k(Y) \rightarrow C^k(X)$:

$$\varphi \in C^k(Y), \quad \varphi: C^k(Y) \rightarrow G, \quad f^*(\varphi) \stackrel{\text{def}}{=} \varphi \circ f: C^k(X) \rightarrow G, \quad f^*(\varphi) \in C^k(X).$$

Покажем теперь, что у нас будет и индуцированный морфизм в когомологиях:

$$f^*: H^k(Y) \rightarrow H^k(X)$$

Для этого надо проверить, что отображение уважает добавление кограницы, то есть, если мы выберем другого представителя того же когомологического класса, мы получим тот же образ, что и до этого. Действительно,

$$f^*(c_k + \delta c_{k-1}) = f^*(c_k) + \delta f^*(c_{k-1})$$

Замечание. Формально, как и в гомологиях, нам надо проверить, что $f^*\delta = \delta f^*$. Действительно, пусть $\varphi \in C^k(X)$, тогда

$$f^*(\delta\varphi) = f^*(\varphi\partial) = \varphi\partial f = \varphi f\partial = \delta f^*(\varphi).$$

В третьем равенстве мы пользуемся тем, что в начале курса мы уже проверяли, что граничный оператор коммутирует с непрерывными отображениями.

²²В нашем, топологическом контексте, это группа коэффициентов.

3.22 Формула универсальных коэффициентов для когомологий

Пример 26. Рассмотрим следующий комплекс:

$$0 \rightarrow \underbrace{\mathbb{Z}}_{C_3} \xrightarrow{\cdot 0} \underbrace{\mathbb{Z}}_{C_2} \xrightarrow{\cdot 2} \underbrace{\mathbb{Z}}_{C_1} \xrightarrow{\cdot 0} \underbrace{\mathbb{Z}}_{C_0} \rightarrow 0$$

После применения функтора $\text{Hom}(_, \mathbb{Z})$ мы получим такой комплекс:

$$0 \leftarrow \underbrace{\mathbb{Z}}_{C^3} \leftarrow \underbrace{\mathbb{Z}}_{C^2} \leftarrow \underbrace{\mathbb{Z}}_{C^1} \leftarrow \underbrace{\mathbb{Z}}_{C^0} \leftarrow 0$$

Посмотрим, какие в новом комплексе отображения. Действительно, пусть $\varphi: C_1 \rightarrow \mathbb{Z}$, $\psi: C_2 \rightarrow C_1$, $\psi(x) = 2x$, тогда $\varphi\psi: C_2 \rightarrow \mathbb{Z} \in C^2$. Нетрудно заметить, что $\varphi(\psi(x)) = \varphi(2x) = 2\varphi(x)$. Значит, мы получили вот такой комплекс:

$$0 \leftarrow \underbrace{\mathbb{Z}}_{C^3} \xleftarrow{\cdot 0} \underbrace{\mathbb{Z}}_{C^2} \xleftarrow{\cdot 2} \underbrace{\mathbb{Z}}_{C^1} \xleftarrow{\cdot 0} \underbrace{\mathbb{Z}}_{C^0} \leftarrow 0$$

Вычислим сначала гомологии:

$$H_0(C_\bullet) = \mathbb{Z}, H_1(C_\bullet) = \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, H_2(C_\bullet) = 0, H_3(C_\bullet) = \mathbb{Z}.$$

Теперь вычислим когомологии:

$$H^0(C_\bullet) = \mathbb{Z}, H^1(C_\bullet) = 0, H^2(C_\bullet) = \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, H^3(C_\bullet) = \mathbb{Z}.$$

То есть, сами группы не изменились, но изменилась градуировка.

Это вполне естественно, так как, на самом деле, любой цепной комплекс конечно-порожденных свободных абелевых групп является прямой суммой комплексов

$$0 \rightarrow \mathbb{Z} \rightarrow 0 \text{ и } 0 \rightarrow \mathbb{Z} \xrightarrow{\cdot m} \mathbb{Z} \rightarrow 0$$

и в силу того, что функтор Hom аддитивен на конечных копроизведениях, применяя $\text{Hom}(_, \mathbb{Z})$ к исходному комплексу, мы получаем прямую сумму комплексов

$$0 \leftarrow \mathbb{Z} \leftarrow 0 \text{ и } 0 \leftarrow \mathbb{Z} \xleftarrow{\cdot m} \mathbb{Z} \leftarrow 0$$

Таким образом, мораль всего этого дела в том, что группы когомологий — тоже самое, что группы гомологий, за исключением того, что кручение смещается на одну размерность.

Предложение 38. Пусть (C_\bullet, ∂) — цепной комплекс. Тогда существует гомоморфизм

$$h: H^n(C; G) \rightarrow \text{Hom}(H_n(C), G).$$

Доказательство. Рассмотрим когомологический класс $[\varphi] \in H^n(C_\bullet; G)$, $\varphi: C_n \rightarrow G$, $\delta\varphi = 0$.

$$\delta\varphi = \varphi\partial \Leftrightarrow \varphi|_{\text{Im } \partial_{n+1}} = 0$$

Ограничение $\varphi_0 = \varphi|_{\text{Ker } \partial_n}: \text{Ker } \partial_n \rightarrow G$ индуцирует гомоморфизм факторизации

$$\overline{\varphi}_0: \text{Ker } \partial_n / \text{Im } \partial_{n+1} \rightarrow G, \quad \overline{\varphi}_0 \in \text{Hom}(H_n(C_\bullet), G).$$

Таким образом, полагая $h(\varphi) = \overline{\varphi}_0$, мы получаем нужное. □

Упражнение. h — эпиморфизм.

Рассмотрим теперь короткую точную последовательность

$$0 \rightarrow Z_{n+1} \rightarrow C_{n+1} \xrightarrow{\partial} B_n \rightarrow 0$$

Применяя функтор $\text{Hom}(-, G)$ мы получаем точную последовательность

$$0 \leftarrow Z^{n+1} \leftarrow C^{n+1} \leftarrow B^{n+1} \leftarrow 0$$

На самом деле, мы имеем коммутативную диаграмму

$$\begin{array}{ccccccc}
0 & \longleftarrow & Z^{n+1} & \longleftarrow & C^{n+1} & \longleftarrow & B^n \longleftarrow 0 \\
& & \uparrow 0 & & \uparrow \delta & & \uparrow 0 \\
0 & \longleftarrow & Z^n & \longleftarrow & C^n & \longleftarrow & B^{n-1} \longleftarrow 0
\end{array}$$

Видно, что эта диаграмма — часть короткой точной последовательности комплексов. Она даёт нам длинную точную последовательность:

$$\dots \leftarrow B^n \leftarrow Z^n \leftarrow H^n(C_\bullet, G) \leftarrow B^{n-1} \leftarrow Z^{n-1} \leftarrow \dots$$

Разбивая длинную точную последовательность на короткие точные последовательности мы получаем:

$$0 \leftarrow \text{Ker}(Z^n \rightarrow B^n) \xleftarrow{h} H^n(C_\bullet; G) \leftarrow \text{Coker}(Z^{n-1} \rightarrow B^{n-1}) \leftarrow 0$$

А теперь заметим, что $\text{Ker}(Z^n \rightarrow B^n) = \text{Hom}(H_n(C_\bullet), G)$. Таким образом, мы получаем расщепимую точную последовательность:

$$0 \rightarrow \text{Coker}(Z^{n-1} \rightarrow B^{n-1}) \rightarrow H^n(C_\bullet; G) \rightarrow \text{Hom}(H_n(C_\bullet), G) \rightarrow 0.$$

Определение 60. Пусть H — абелева группа. Тогда её *свободная резольвента* — это точная последовательность

$$\dots \rightarrow F_2 \xrightarrow{f_2} F_1 \xrightarrow{f_1} F_0 \xrightarrow{f_0} H \rightarrow 0,$$

в которой каждая группа F_n свободная.

Применяя к этой точной последовательности функтор $\text{Hom}(-, G)$ мы можем потерять точность, но во всяком случае, получим цепной комплекс:

$$\leftarrow F_2^* \xleftarrow{f_2^*} F_1^* \xleftarrow{f_1^*} F_0^* \xleftarrow{f_0^*} H^* \leftarrow 0$$

Будем обозначать группы когомологий свободной резольвенты, как $H^n(F, G)$. Нам понадобится следующее утверждение из гомологической алгебры:

Лемма 43. Пусть даны свободные резольвенты F и F' абелевых групп H и H' . Тогда любой гомоморфизм $\alpha: H \rightarrow H'$ можно продолжить до цепного отображения $F \rightarrow F'$. Кроме того, любые два таких цепных отображения, продолжающие гомоморфизм α , цепно гомотопны.

Для любых двух свободных резольвент F и F' группы H существуют канонические изоморфизмы

$$H^n(F; G) \cong H^n(F'; G).$$

У любой абелевой группы H есть свободная резольвента вида

$$0 \rightarrow F_1 \rightarrow F_0 \rightarrow H \rightarrow 0$$

с $F_i = 0$ при $i > 1$, которую мы сейчас построим.

Выберем в H набор образующих и пусть F_0 — группа, свободно порожденная этими образующими. Тогда у нас есть сюръективный гомоморфизм $f_0: F_0 \rightarrow H$, переводящий элементы базиса в образующие H . Его ядро будет свободно, как подгруппа свободной группы, поэтому мы можем положить $F_1 = \text{Ker } f_0$, а в качестве f_1 взять включение $\text{Ker } f_0 \hookrightarrow F_0$.

Для этой свободной резольвенты мы имеем $H^n(F; G) = 0 \ \forall n > 1$, поэтому, из леммы 43 мы получаем, что это должно быть верно для всех свободных резольвент.

Таким образом, единственная интересная группа из $H^n(F; G)$ — это $H^1(F; G)$. Эта группа зависит лишь от H и G , поэтому обычно её обозначают $\text{Ext}(H, G)$ ²³.

²³Вообще говоря, в гомологической алгебре функтор Ext обычно интерпретируют, как множество классов эквивалентности расширений G посредством H , но в алгебраической топологии такая интерпретация редко нужна.

Так вот, из построения свободной резольвенты для группы H и определения когомологий мы теперь наконец можем заметить, что

$$\text{Coker}(Z^{n-1} \rightarrow B^{n-1}) = \text{Ext}(H_{n-1}(C_\bullet), G).$$

Теперь мы наконец можем заключить, что мы доказали формулу универсальных коэффициентов для когомологий:

Теорема 64 (Об универсальных коэффициентах для когомологий). Пусть C_\bullet — цепной комплекс. Тогда его группы когомологий определяются расщепимыми короткими точными последовательностями

$$0 \rightarrow \text{Ext}(H_{n-1}(C_\bullet), G) \rightarrow H^n(C; G) \rightarrow \text{Hom}(H_n(C), G) \rightarrow 0$$

Вообще говоря, это утверждение достаточно полезно, потому что на конечнопорожденных абелевых группах функтор Ext несложно посчитать:

- $\text{Ext}(H \oplus H', G) \cong \text{Ext}(H, G) \oplus \text{Ext}(H', G)$.
- $\text{Ext}(H, G) = 0$, если H — свободна.
- $\text{Ext}(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, G) \cong G/nG$.
- Если H конечно порождена, то имеет место изоморфизм

$$\text{Ext}(H, \mathbb{Z}) \cong \text{Tor}(H).$$

Кроме того, теорема об универсальных коэффициентах позволяет вычислять когомологии, зная только гомологии.

Следствие 23. Если группы гомологий $H_n(C)$ и $H_{n-1}(C)$ комплекса C , состоящего из свободных абелевых групп, конечно порождены и $T_n \subset H_n$ и $T_{n-1} \subset H_{n-1}$ — подгруппы кручения, то

$$H^n(C; \mathbb{Z}) \cong (H_{n-1}(C)/T_n) \oplus T_{n-1}.$$

Это следствие даёт нам обобщение и формализацию примера 26.

Кроме того, из всего этого дела есть еще одно замечательное следствие:

Следствие 24. Если $f: C_\bullet \rightarrow C'_\bullet$ индуцирует изоморфизм всех групп гомологий $H_k(C_\bullet) \cong H_k(C'_\bullet)$. Тогда отображения $f^*: H^k(C_\bullet; G) \cong H^k(C'_\bullet; G)$.

Доказательство. Действительно, достаточно заметить, что из свойств свободной резольвенты мы знаем, что отображение цепных комплексов индуцирует такую вот диаграмму:

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & \text{Ext}(H_{n-1}(C), G) & \longrightarrow & H^n(C; G) & \xrightarrow{h} & \text{Hom}(H_{n-1}(C), G) \longrightarrow 0 \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ 0 & \longrightarrow & \text{Ext}(H_{n-1}(C'), G) & \longrightarrow & H^n(C'; G) & \xrightarrow{h} & \text{Hom}(H_{n-1}(C'), G) \longrightarrow 0 \end{array}$$

Применяя 5-лемму и индукцию, мы получаем нужное. □

3.23 Умножение в когомологиях

Пусть R — коммутативное и ассоциативное кольцо.

Пусть $\varphi \in C^k(X; R)$, $\psi \in C^\ell(X; R)$. Тогда их произведением определяется таким образом:

$$\varphi \smile \psi \in C^{k+\ell}, \quad (\varphi \smile \psi)(\sigma) = \varphi(\sigma|_{[v_0 \dots v_k]}) \cdot \psi(\sigma|_{[v_{k+\ell} \dots v_{k+\ell}]}),$$

где $\sigma: \Delta^{k+\ell} \rightarrow X$ — сингулярный симплекс.

Лемма 44. Для кограницы \smile -произведения справедлива следующая формула:

$$\delta(\varphi \smile \psi) = \delta\varphi \smile \psi + (-1)^k \varphi \smile \delta\psi.$$

Доказательство. Пусть $\sigma: \Delta^{k+\ell} \rightarrow X$ — сингулярный симплекс. Тогда

$$(\delta\varphi \smile \psi)(\sigma) = \sum_{i=0}^{k+1} (-1)^i \varphi(\sigma|_{[v_0, \dots, \hat{v}_i, \dots, v_{k+1}]}) \psi(\sigma|_{[v_{k+1}, \dots, v_{k+\ell+1}]}).$$

Распишем теперь второй кусок:

$$(-1)^k (\varphi \smile \delta\psi) = \sum_{i=k}^{k+\ell+1} (-1)^i \varphi(\sigma|_{[v_0, \dots, v_k]}) \psi(\sigma|_{[v_k, \dots, \hat{v}_i, \dots, v_{k+\ell+1}]}).$$

Когда мы сложим эти две суммы, последнее слагаемое первой суммы сократится с первым слагаемым второй, а всё, что останется — как раз $\delta(\varphi \smile \psi)(\sigma) = (\varphi \smile \psi)(\partial\sigma)$. \square

Замечание. Таким образом, $\delta(\varphi \smile \psi) = \delta\varphi \smile \psi \pm \delta\psi \smile \varphi$. Из этого следует, что произведение коциклов — коцикл. Также это сразу даёт нам, что произведение коцикла и кограницы (в любом порядке) — кограница:

$$\varphi \smile \delta\psi = \pm \delta(\varphi \smile \psi)$$

Это даёт нам ассоциативное дистрибутивное умножение

$$\smile: H^k(X; R) \times H^\ell \rightarrow H^{k+\ell}(X; R).$$

Таким образом, при помощи \smile -произведения, мы наделили

$$H^*(X; R) = \bigoplus_{n=0}^{\infty} H^n(X; R)$$

структурой кольца (а на самом деле, градуированной алгебры).

Если в кольце R есть единица, то единицей относительно \smile -произведения будет нульмерный коцикл $1 \in H^0(X; R)$, принимающий значение 1 на любом нульмерном сингулярном симплексе.

Замечание. Это показывает нам отдельную пользу когомологий: например, у \mathbb{CP}^2 и $S^4 \vee S^2$ все группы гомологий и группы когомлогий совпадают, а кольца когомологий отличаются.

4. Комплексная алгебраическая геометрия

4.1 Комплексные многообразия

Определение 61. Комплексным многообразием M называется гладкое многообразие, допускающее такое открытое покрытие $\{U_\alpha\}_{\alpha \in I}$ и такие координатные отображения $\varphi_\alpha: U_\alpha \rightarrow \mathbb{C}^n$, что все функции перехода $\varphi_\alpha \circ \varphi_\beta^{-1}$ голоморфны на $\varphi_\beta(U_\alpha \cap U_\beta)$.

Функция f на открытом подмножестве $U \subset M$ называется *голоморфной*, если $\forall \alpha \in I$ функция $f \circ \varphi_\alpha^{-1}$ голоморфна в $\varphi_\alpha(U_\alpha \cap U)$.

Набор $z = (z_1, \dots, z_n)$ функций на $U \subset M$ называется *голоморфной системой координат*, если $\varphi_\alpha \circ z^{-1}$ и $z \circ \varphi_\alpha^{-1}$ голоморфны на $z(U \cap U_\alpha)$ и $\varphi_\alpha(U \cap U_\alpha)$ для всех α .

Отображение $f: M \rightarrow N$, где M и N — комплексные многообразия, называется *голоморфным*, если в голоморфных локальных координатах оно задаётся голоморфными функциями.

Пример 27 (Примеры комплексных многообразий). Приведём какие-нибудь примеры комплексных многообразий:

1. Одномерное комплексное многообразие называют **римановой поверхностью**.
2. $P\mathbb{C}^n = (\mathbb{C}^{n+1} \setminus \{0\})/\{z \sim \lambda z\} = \mathbb{P}^n$ — комплексное проективное пространство. Это пространство компактно, так как есть непрерывное сюръективное отображение $S^n \subset \mathbb{C}^{n+1} \rightarrow \mathbb{P}^n$.
3. Пусть $\Lambda = \mathbb{Z}^k \subset \mathbb{C}^n$ — дискретная решётка. Факторгруппа \mathbb{C}^n/Λ обладает структурой комплексного многообразия, которую индуцирует проекция $\pi: \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^n/\Lambda$. Это многообразие компактно тогда и только тогда, когда $k = 2n$ и в этом случае \mathbb{C}^n/Λ называется **комплексным тором**.
4. Тут был еще пример, что при неразветвлённом накрытии структура комплексного многообразия наследуется, но я хз, что такое разветвлённое накрытие.

Касательное пространство к комплексному многообразию.

Пусть M — комплексное многообразие, $p \in M$, а $z = (z_1, \dots, z_n)$ — система голоморфных координат в окрестности p . В случае комплексного многообразия имеются три различных понятия *касательного пространства* к M в точке $p \in M$.

1. Рассмотрим M , как вещественное $2n$ -многообразие. Тогда $T_{\mathbb{R},p}M$ — пространство \mathbb{R} -линейных дифференцирований кольца $C^\infty(M, \mathbb{R})$ (с носителем в окрестности p). Если мы представим голоморфные координаты в виде $z_j = x_j + iy_j$, то $T_{\mathbb{R},p}M$ будет иметь базис $\{\frac{\partial}{\partial x_j}, \frac{\partial}{\partial y_j}\}$, как векторное пространство над \mathbb{R} .
2. Пространство $T_{\mathbb{R},p}M$ можно комплексифицировать при помощи расширения скаляров, то есть рассмотреть

$$T_{\mathbb{C},p}M \stackrel{\text{def}}{=} T_{\mathbb{R},p}M \otimes_{\mathbb{R}} \mathbb{C}.$$

$T_{\mathbb{C},p}M$ называют *комплексифицированным касательным пространством* к M в точке p . Его можно реализовать, как пространство \mathbb{C} -линейных дифференцирований кольца $C^\infty(M, \mathbb{C})$ (опять же, функции с носителем в окрестности p). Соответственно, там можно выбрать базис $\{\frac{\partial}{\partial x_j}, \frac{\partial}{\partial y_j}\}$, а при замене базиса на комплексные обозначения

$$\frac{\partial}{\partial z_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_j} - i \frac{\partial}{\partial y_j} \right), \quad \frac{\partial}{\partial \bar{z}_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_j} + i \frac{\partial}{\partial y_j} \right).$$

«более стандартный» базис $\{\frac{\partial}{\partial z_j}, \frac{\partial}{\partial \bar{z}_j}\}$.

3. Подпространство $T'_pM = \text{span}\{\frac{\partial}{\partial z_j}\} \leq T_{\mathbb{C},p}M$ называется *голоморфным касательным пространством* к M в точке p . Оно может быть реализовано, как подпространство в $T_{\mathbb{C},p}M$, состоящее из дифференцирований, обращающихся в ноль на антиголоморфных функциях (таких f , что \bar{f} — голоморфна). Соответственно, подпространство $T''_pM = \text{span}\{\frac{\partial}{\partial \bar{z}_j}\}$ называется *антиголоморфным касательным пространством* к M в точке p . Ясно, что

$$T_{\mathbb{C},p}M = T'_pM \oplus T''_pM.$$

Заметим, что для комплексных многообразий M, N любое $f \in C^\infty(M, N)$ индуцирует линейное отображение

$$f_*: T_{\mathbb{R},p}M \rightarrow T_{\mathbb{R},f(p)}N$$

а значит и линейное отображение

$$f_*: T_{\mathbb{C},p}M \rightarrow T_{\mathbb{C},f(p)}N,$$

но не отображение $T'_pM \rightarrow T'_{f(p)}N$ для всех $p \in M$.

На самом деле, отображение $f: M \rightarrow N$ голоморфно тогда и только тогда, когда

$$f_*(T'_pM) \subset T'_{f(p)}N \quad \forall p \in M.$$

То есть, когда голоморфное касательное пространство отображается в голоморфное.

Заметим, что также, поскольку $T_{\mathbb{C},p}M = T_{\mathbb{R},p}M \otimes \mathbb{C}$, операция сопряжения, переводящая

$$\frac{\partial}{\partial z_j} \mapsto \frac{\partial}{\partial \bar{z}_j}$$

корректно определена на $T_{\mathbb{C},p}M$ и, как нетрудно заметить, $T''_pM = \overline{T'_pM}$. Отсюда следует, что проекция

$$T_{\mathbb{R},p}M \rightarrow T_{\mathbb{C},p}M \rightarrow T'_pM$$

есть \mathbb{R} -линейный изоморфизм.

Это обстоятельство позволяет заниматься геометрией исключительно в голоморфном касательном пространстве.

Пример 28. Пусть $z(t): [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ — гладкая кривая. Тогда $z(t) = x(t) + iy(t)$ и в качестве касательной мы можем взять

$$x'(t)\frac{\partial}{\partial x} + y'(t)\frac{\partial}{\partial y} \text{ в } T_{\mathbb{R}}\mathbb{C}, \text{ либо } z'(t)\frac{\partial}{\partial z} \text{ в } T'\mathbb{C}.$$

Определение 62. Пусть теперь M, N — комплексные многообразия, $z = (z_1, \dots, z_n)$ — голоморфные координаты в окрестности точки $p \in M$, а (w_1, \dots, w_n) — голоморфные координаты в окрестности точки $q = f(p)$, где $f: M \rightarrow N$ — голоморфное отображение. В связи с различными понятиями касательных пространств, мы имеем и различные понятия якобиана f .

1. Пусть $z_j = x_j + iy_j$, $w_k = u_k + iv_k$. Тогда в базисах $\{\frac{\partial}{\partial x_j}, \frac{\partial}{\partial y_j}\}$ и $\{\frac{\partial}{\partial u_k}, \frac{\partial}{\partial v_k}\}$ пространств $T_{\mathbb{R},p}M$ и $T_{\mathbb{R},q}N$ линейное отображение f_* задаётся $2m \times 2n$ -матрицей

$$\mathcal{J}_{\mathbb{R}}(f) = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} & \frac{\partial u_k}{\partial y_j} \\ \frac{\partial v_k}{\partial x_j} & \frac{\partial v_k}{\partial y_j} \end{pmatrix}.$$

В базисах $\{\frac{\partial}{\partial z_j}, \frac{\partial}{\partial \bar{z}_j}\}$ и $\{\frac{\partial}{\partial w_j}, \frac{\partial}{\partial \bar{w}_k}\}$ пространств $T_{\mathbb{C},p}M$ и $T_{\mathbb{C},q}N$ отображение f_* задаётся матрицей

$$\mathcal{J}_{\mathbb{C}}(f) = \begin{pmatrix} \mathcal{J}(f) & 0 \\ 0 & \overline{\mathcal{J}(f)} \end{pmatrix}, \text{ где } \mathcal{J}(f) = \left(\frac{\partial w_k}{\partial z_j} \right)_{k,j}.$$

Замечание. В частности, отметим, что $\text{rank } \mathcal{J}_{\mathbb{R}}(f) = 2 \text{rank } \mathcal{J}(f)$ и в случае $m = n$

$$\det \mathcal{J}_{\mathbb{R}}(f) = \det \mathcal{J}(f) \det \overline{\mathcal{J}(f)} = |\det \mathcal{J}(f)|^2 \geq 0,$$

то есть голоморфные отображения **сохраняют ориентацию**.

Мы будем считать, что пространство \mathbb{C}^n естественно ориентированно $2n$ -формой

$$\left(\frac{i}{2}\right)^n (dz_1 \wedge d\bar{z}_1) \wedge (dz_2 \wedge d\bar{z}_2) \wedge \dots \wedge (dz_n \wedge d\bar{z}_n) = dx_1 \wedge dy_1 \wedge \dots \wedge dx_n \wedge dy_n.$$

Ясно, что если $\varphi_\alpha: U_\alpha \rightarrow \mathbb{C}^n$ и $\varphi_\beta: U_\beta \rightarrow \mathbb{C}^n$ — голоморфные координатные отображения на комплексном многообразии M , то прообразы при φ_α и φ_β естественной ориентации на \mathbb{C}^n согласованы на $U_\alpha \cap U_\beta$.

Соответственно, любое комплексное многообразие **имеет естественную ориентацию**, которая сохраняется при голоморфных отображениях.

4.2 Векторные расслоения

Определение 63. Пусть M — гладкое многообразие. Комплексным C^∞ -расслоением на M называется семейство $\{E_x\}_{x \in M}$ комплексных векторных пространств E_x , параметризованных точками многообразия M , со структурой C^∞ многообразия на

$$E = \bigcup_{x \in M} E_x$$

такой, что выполняются следующие условия:

1. отображение проектирования $\pi: E \rightarrow M$, переводящее E_x в x принадлежит классу C^∞ .
2. $\forall x_0 \in M$ найдутся открытое множество $U \subset M: U \ni x_0$ и диффеоморфизм

$$\varphi_U: \pi^{-1}(U) \rightarrow U \times \mathbb{C}^k,$$

который отображает векторное пространство E_x изоморфно на $\{x\} \times \mathbb{C}^k$ для всех $x \in U$. Такое отображение φ_U называется *тривиализацией*.

Размерность слоёв E_x расслоения E называется *рангом* E . Расслоение ранга 1 называется *линейным*.

Замечание. Для любой пары тривиализаций φ_U, φ_V отображение перехода $g_{UV}(x) = (\varphi_U \circ \varphi_V^{-1})|_{\{x\} \times \mathbb{C}^k}: U \cap V \rightarrow \text{GL}(k)$ принадлежит классу C^∞ . Кроме того, они удовлетворяют тождествам:

$$g_{UV}(x) \cdot g_{VU}(x) = I \quad \forall x \in U \cap V$$

$$g_{UV}(x)g_{VW}(x) \cdot g_{WU}(x) = I \quad \forall x \in U \cap V \cap W$$

Обратно, если задано открытое покрытие $\mathcal{U} = \{U_\alpha\}$ многообразия M и C^∞ отображения $g_{\alpha\beta}: U_\alpha \cap U_\beta \rightarrow \text{GL}(k)$, удовлетворяющие тождествам выше, то найдётся единственное комплексное векторное расслоение $E \rightarrow M$ с такими функциями перехода.

Действительно, мы можем положить $E = \bigsqcup_\alpha (U_\alpha \times \mathbb{C}^k)$, в котором мы отождествляем точки $(x, \lambda) \in U_\beta \times \mathbb{C}^k$ и $(x, \lambda g_{\alpha\beta}(x))$, а структура многообразия на E определяется вложениями $U_\alpha \times \mathbb{C}^k \rightarrow E$.

Обычно операции над векторными пространствами переносятся и на векторные расслоения:

- Если $E \rightarrow M$ — векторное расслоение, то можно определить двойственное расслоение $E^* \rightarrow M$, взяв в качестве слоёв $E_x^* \stackrel{\text{def}}{=} (E_x)^*$. Тривиализации $\varphi_U: E_U \rightarrow U \times \mathbb{C}^k$ (где $E_U = \pi^{-1}(U)$) индуцируют отображения

$$\varphi_U^*: E_U^* \rightarrow U \times (\mathbb{C}^k)^* \cong U \times \mathbb{C}^k,$$

которые наделяют E^* структурой многообразия. Эту конструкцию проще получить при помощи функций перехода: $E^* \rightarrow M$ будет векторным расслоением с функциями перехода $j_{\alpha\beta}(x) = g_{\alpha\beta}(x)^{-1}$.

- Пусть $E \rightarrow M$ и $F \rightarrow M$ — комплексные векторные расслоения рангов k и ℓ с функциями перехода $\{g_{\alpha\beta}\}$ и $\{h_{\alpha\beta}\}$. Тогда мы можем определить $E \oplus F$, как векторное расслоение, заданное функциями перехода

$$j_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} g_{\alpha\beta}(x) & 0 \\ 0 & h_{\alpha\beta}(x) \end{pmatrix} \in \text{GL}(\mathbb{C}^k \oplus \mathbb{C}^\ell).$$

- Также мы можем определить расслоение $E \otimes F$, как расслоение, заданное функциями перехода

$$j_{\alpha\beta}(x) = g_{\alpha\beta}(x) \otimes h_{\alpha\beta}(x) \in \text{GL}(\mathbb{C}^k \otimes \mathbb{C}^\ell).$$

- Аналогично, $\Lambda^r E$ — векторное расслоение, заданное формулами

$$j_{\alpha\beta} = \Lambda^r(g_{\alpha\beta}(x)) \in \text{GL}(\Lambda^r \mathbb{C}^k).$$

В частности, $\Lambda^k E$ будет линейным расслоением с функциями перехода

$$j_{\alpha\beta}(x) = \det g_{\alpha\beta}(x) \in \text{GL}(1, \mathbb{C}) = \mathbb{C}^*.$$

Для векторных расслоений можно также определить подрасслоения и прообразы.²⁴

Определение 64. Векторные расслоения $E \rightarrow M$ и $F \rightarrow M$ *изоморфны*, если существует отображение $f: E \rightarrow F$ такое, что $f_x: E_x \rightarrow F_x$ — изоморфизмы $\forall x \in M$.

Векторное расслоение $E \rightarrow M$ называется *тривиальным*, если оно изоморфно $M \times \mathbb{C}^k$.

Сечением σ векторного расслоения $E \xrightarrow{\pi} M$ над $U \subset M$ называется C^∞ отображение

$$\sigma: U \rightarrow E: \sigma(x) \in E_x \forall x \in U.$$

Репером для E над $U \subset M$ называется набор $\sigma_1, \dots, \sigma_k$ сечений E над U таких, что $(\sigma_1(x), \dots, \sigma_k(x))$ является базисом пространства $E_x \forall x \in U$.

Репер для E над U , по существу, то же самое, что тривиализация расслоения E над U : при заданной тривиализации $\varphi_U: E_U \rightarrow U \times \mathbb{C}^k$, то сечения $\sigma_i(x) = \varphi_U^{-1}(x, e_i)$ образуют базис. И обратно, если задан репер $\sigma_1, \dots, \sigma_k$, то можно определить тривиализацию $\varphi_U(\lambda) = (x, (\lambda_1, \dots, \lambda_k))$ для $\lambda = \sum \lambda_i \sigma_i(x)$ в E_x .

Заметим, что при заданной тривиализации φ_U расслоения E над U любое его сечение σ можно единственным образом представить, как векторзначную C^∞ -функцию $f = (f_1, \dots, f_k)$, раскладывая $\sigma(x)$ по базису:

$$\sigma(x) = \sum f_i(x) \sigma_U^{-1}(x, e_i).$$

Если же φ_V — тривиализация расслоения E над V и $f' = (f'_1, \dots, f'_k)$ — соответствующие представления $\sigma|_{U \cap V}$, то

$$\sum f_i(x) \varphi_U^{-1}(x, e_i) = \sum f'_i(x) \varphi_V^{-1}(x, e_i),$$

так что

$$\sum f_i(x) e_i = \sum f'_i(x) \varphi_U \varphi_V^{-1}(x, e_i) \implies f = g_{UV} f'.$$

Таким образом, при заданных тривиализациях

$$\{\varphi_\alpha: E_{U_\alpha} \rightarrow U_\alpha \times \mathbb{C}^k\}$$

сечения расслоения E над $\bigcup U_\alpha$ в точности соответствуют наборам

$$\{f_\alpha = (f_{\alpha_1}, \dots, f_{\alpha_k})\}_\alpha$$

векторзначных C^∞ функций, удовлетворяющих $f_\alpha = g_{\alpha\beta} f_\beta$.

Пример 29 (Векторные расслоения). Рассмотрим некоторые базовые примеры векторных расслоений:

1. Касательные и кокасательные расслоения:

Комплексным касательным расслоением к комплексному многообразию M мы будем называть

$$TM = \bigsqcup_{z \in M} T_z M, \text{ где}$$

$T_z M$ — комплексное касательное пространство к M в точке x . В расслоении TM есть подрасслоения $T'M$ и $T''M$ определяющиеся естественным образом.

2. Дифференциальные формы:

Определение 65. Дифференциальной формой степени k называется сечение расслоения $\Lambda^k(TM)^*$. Расслоение комплексных дифференциальных форма степени k мы будем обозначать $\Omega_{\mathbb{C}}^k(M)$ или $\Omega_{\mathbb{C},M}^k$.

Пусть M — вещественное многообразие. Тогда легко видеть, что если $f \in C^{k-1}(M)$, то df — C^{k-1} -гладкое сечение расслоения $\Omega_{\mathbb{R}}^1(M)$. Кроме того, нетрудно видеть, что если x_1, \dots, x_n — локальные координаты в карте $U \subset M$, то k -формы $dx_I = dx_{i_1} \wedge \dots \wedge dx_{i_k}$, $1 \leq i_1 \leq \dots \leq i_k \leq n$ образуют базис слоя $\Omega_{\mathbb{R}}^k(X)$ в каждой точке открытого множества U . В самом деле, локальные координаты x_1, \dots, x_n задают локальную тривиализацию касательного расслоения TM : соответствующий локальный базис в слое задаётся в каждой точке дифференцированиями $\left. \frac{\partial}{\partial x_i} \right|_x$. Тогда 1-формы dx_i образуют двойственный базис в расслоении $\Omega_{\mathbb{R}}^1(X)$.

²⁴но делать этого мы пока что не будем.

4.3 Подмногообразия и аналитические подмножества

Докажем теперь несколько классических теорем для случая комплексных многообразий.

Теорема 65 (Об обратном отображении). Пусть U, V — открытые подмножества в \mathbb{C}^n , $0 \in U$ и $f: U \rightarrow V$ — такое голоморфное отображение, что матрица $\mathcal{J}(f) = (\partial f_i / \partial z_j)$ невырождена в 0.

Тогда отображение f взаимно однозначно в окрестности точки 0 и обратное отображение f^{-1} голоморфно в некоторой окрестности $f(0)$.

Доказательство. Как мы уже отмечали в 4.1, $|\det \mathcal{J}_{\mathbb{R}}(f)| = |\det \mathcal{J}(f)|^2 \neq 0$ в точке 0, а значит, по обычной теореме об обратном отображении, функция f имеет в окрестности точки 0 обратную $C^\infty(U, V)$ функцию f^{-1} . Заметим, что $f^{-1}(f(z)) = z$, так что, дифференцируя это равенство в нуле мы имеем

$$0 = \frac{\partial}{\partial \bar{z}_j} (f^{-1}(f(z)))_j = \sum_k \frac{\partial f_j^{-1}}{\partial z_k} \frac{\partial f_k}{\partial \bar{z}_j} + \sum_k \frac{\partial f_j^{-1}}{\partial \bar{z}_k} \left(\frac{\partial f_k}{\partial z_j} \right) = \sum_k \frac{\partial f_j^{-1}}{\partial \bar{z}_k} \left(\frac{\partial f_k}{\partial z_j} \right) \quad \forall j, k.$$

Так как матрица $(\partial f_k / \partial z_j)$ была невырождена, отсюда следует, что $\partial f_j^{-1} / \partial \bar{z}_k = 0 \quad \forall j, k$, что и означает голоморфность функции f . \square

Теорема 66 (О неявной функции). Пусть заданы функции $f_1, \dots, f_k \in \mathcal{O}_n$, удовлетворяющие условию

$$\det \left(\frac{\partial f_i}{\partial z_j}(0) \right)_{1 \leq i, j \leq k} \neq 0.$$

Тогда существуют такие функции $w_1, \dots, w_k \in \mathcal{O}_{n-k}$, что в окрестности точки $0 \in \mathbb{C}^n$

$$f_1(z) = \dots f_k(z) = 0 \Leftrightarrow z_i = w_i(z_{k+1}, \dots, z_n), \quad 1 \leq i \leq k.$$

Доказательство. Как обычно, по обычной теореме о неявной функции в случае C^∞ существуют функции $\omega_1, \dots, \omega_k$ с нужным свойством. Остается показать голоморфность. Это делается непосредственно вот таким стандартным вычислением:

$$0 = \frac{\partial}{\partial \bar{z}_\alpha} (f_j(\omega(z), z)) = \dots = \sum \frac{\partial \omega_\ell}{\partial \bar{z}_\alpha} \frac{\partial f_j}{\partial \omega_\ell} \Rightarrow \frac{\partial \omega_\ell}{\partial \bar{z}_\alpha} = 0 \quad \forall \alpha, \ell,$$

\square

Замечание. Видимо почти всегда, когда мы хотим показать голоморфность, мы тупо считаем в локальных производных антиголоморфную производную.

Теперь мы увидим, что комплексные многообразия в смысле их морфизмов таки имеют свою, отличную от вещественной, специфику:

Предложение 39. Если $f: U \rightarrow V$ — взаимно однозначное голоморфное отображение открытых множеств в \mathbb{C}^n , то $\det \mathcal{J}(f) \neq 0$, то есть f^{-1} голоморфно.

Замечание. Мы видели этот факт в обычном комплексном анализе (доказывали, что производная однолистной функции не обнуляется).

Определение 66. Комплексным подмногообразием S комплексного многообразия M называется подмножество $S \subset M$, которое локально задается либо как множество нулей совокупности голоморфных функций f_1, \dots, f_k с условием $\text{rank } \mathcal{J}(f) = k$, либо как образ открытого подмножества $U \subset \mathbb{C}^{n-k}$ при отображении $f: U \rightarrow M$ с условием $\text{rank } \mathcal{J}(f) = n - k$.

Эквивалентность этих определений следует из теоремы о неявной функции 66.

Определение 67. Аналитическим подмножеством V комплексного многообразия M называется подмножество, являющееся локально множеством нулей конечного набора голоморфных функций.

Точка $p \in V$ называется *гладкой*²⁵ точкой V , если V в некоторой её окрестности задаётся набором голоморфных функций f_1, \dots, f_k , причем таким, что $\text{rank } \mathcal{J}(f) = k$.

Множество гладких точек V обозначается V^* , а все точки из $V \setminus V^*$ называются *особыми*. Они формируют множество особенностей аналитического подмножества V , которое мы будем обозначать, как V_s .

В частности, если p — точка аналитической гиперповерхности $V \subset M$, задаваемой в локальных координатах z функцией f , определим *кратность* $\text{mult}_p(V)$, как порядок обращения f в нуль в точке p , то есть наибольшее такое m , что

$$\frac{\partial^k f}{\partial z_{i_1} \dots \partial z_{i_k}} = 0 \quad \forall k \leq m - 1.$$

Предложение 40. Множество V_s содержится в аналитическом подмножестве многообразия M , не совпадающем с V .

Замечание. А на самом деле, при аккуратном выборе функций, несложно показать, что V_s — аналитическое подмножество в M .

Запомним также полезный нам в будущем факт:

Предложение 41. Аналитическое множество V неприводимо тогда и только тогда, когда V^* связно.

Тут было еще что-то про касательные конусы, пока что забудем на это, лень читать.

4.4 Когомологии де Рама и Дольбо

Пусть M — гладкое многообразие. Обозначим за $A^p(M; \mathbb{R})$ пространство дифференциальных форм степени p на M , а через $Z^p(M; \mathbb{R})$ подпространство замкнутых p -форм.

Так как $d^2 = 0$, у нас есть (ко)цепной комплекс

$$A^0(M; \mathbb{R}) \rightarrow \dots \rightarrow A^p(M; \mathbb{R}) \rightarrow A^{p+1}(M; \mathbb{R}) \rightarrow \dots$$

а его группы когомологий называются группами *когомологий де Рама* многообразия M .

Иными словами, группы когомологий де Рама — это факторгруппы замкнутых форм по модулю точных

$$H_{\text{DR}}^p(M; \mathbb{R}) = Z^p(M; \mathbb{R}) / dA^{p-1}(M).$$

Совершенно также мы можем рассматривать комплекснозначные формы и давать все соответствующие определения (используя обозначения $A^p(M)$ и аналогичные, то есть без коэффициентов):

$$H_{\text{DR}}^p(M) = Z^p(M) / dA^{p-1}(M)$$

Замечание. Нетрудно заметить, что как и всегда с коэффициентами,

$$H_{\text{DR}}^p(M) = H_{\text{DR}}^p(M; \mathbb{R}) \otimes \mathbb{C}.$$

Как мы заметили в самом первом параграфе, комплексифицированное кокасательное пространство раскладывается в голоморфную и антиголоморфную часть:

$$T_{\mathbb{C}, z}^* M = T_z^{*'} M \oplus T_z^{*''} M,$$

что дает нам разложение

$$\Lambda^n T_{\mathbb{C}, z}^* M = \bigoplus_{p+q=n} \left(\Lambda^p T_z^{*'}(M) \otimes \Lambda^q T_z^{*''}(M) \right),$$

а это (по определению внешних форм) даёт нам

$$A^n(M) = \bigoplus_{p+q=n} A^{p,q}(M), \text{ где}$$

²⁵возможно, корректнее использовать слово регулярная?

$$A^{p,q}(M) = \{\varphi \in A^n(M) \mid \varphi(z) \in \Lambda^p T_z^{*'}(M) \otimes \Lambda^q T_z^{*''}(M) \forall z \in M\}.$$

Соответственно, форму $\varphi \in A^{p,q}$ называют формой типа (p, q) . Обозначим за $\pi^{(p,q)}$ проекцию

$$A^*(M) \rightarrow A^{p,q}(M),$$

так что для $\varphi \in A^*(M)$ имеем $\varphi = \sum \pi^{(p,q)} \varphi$.

Если $\varphi \in A^{p,q}(M)$, то для любого $z \in M$

$$d\varphi(z) \in \left(\Lambda^p T_z^{*'} M \otimes \Lambda^q T_z^{*''} M \right) \wedge T_{\mathbb{C},z}^* M,$$

$$d\varphi \in A^{p+1,q}(M) \oplus A^{p,q+1}(M).$$

Определим теперь для этих замечательных дифференциальных форма операторы

$$\bar{\partial}: A^{p,q}(M) \rightarrow A^{p,q+1}, \quad \partial: A^{p,q}(M) \rightarrow A^{p+1,q}(M)$$

$$\bar{\partial} = \pi^{(p,q+1)} \circ d, \quad \partial = \pi^{(p+1,q)} \circ d, \text{ то есть } d = \partial + \bar{\partial}.$$

В локальных координатах $z = (z_1, \dots, z_n)$ форма $\varphi \in A^n(M)$ имеет тип (p, q) , если она имеет представление в виде

$$\varphi(z) = \sum_{I,J} \varphi_{I,J}(z) dz_I \wedge d\bar{z}_J$$

Замечание. Короче говоря, вся эта страшная белиберда была, чтоб сказать, что бывают не только голоморфные дифференциальные формы, но и такие, где один кусок голоморфный, а другой антиголоморфный.

Дифференцировать эти формы можно вполне естественным образом:

$$\bar{\partial}\varphi(z) = \sum_{I,J,j} \frac{\partial}{\partial \bar{z}_j} \varphi_{I,J}(z) d\bar{z}_j \wedge dz_I \wedge d\bar{z}_J, \quad \partial\varphi(z) = \sum_{I,J,i} \frac{\partial \varphi}{\partial z_i} \varphi_{I,J}(z) dz_i \wedge dz_I \wedge d\bar{z}_J.$$

В частности, форма типа $(q, 0)$ называется *голоморфной*, если $\bar{\partial}\varphi = 0$. Ясно, что это имеет место тогда и только тогда, когда

$$\varphi(z) = \sum_{I: |I|=q} \varphi_I(z) dz_I, \text{ где}$$

функции $\varphi_I(z)$ голоморфны.

Отметим, что поскольку разложение $T_{\mathbb{C},z}^* = T_z^{*'} \oplus T_z^{*''}$ сохраняется при голоморфных отображениях, то же самое будет верно и для $A^\bullet = \bigoplus_{(p,q)} A^{(p,q)}$. Действительно, если $f: M \rightarrow N$ — голоморфное отображение комплексных многообразий, то $f^*(A^{p,q}(N)) \subset A^{p,q}(M)$ и $\bar{\partial} \circ f^* = f^* \circ \bar{\partial}$.

Пусть $Z_{\bar{\partial}}^{p,q}(M)$ — пространство ∂ -замкнутых форм типа (p, q) . Тогда, так как

$$\frac{\partial^2}{\partial \bar{z}_i \partial \bar{z}_j} = \frac{\partial^2}{\partial \bar{z}_j \partial \bar{z}_i}$$

мы будем иметь $\bar{\partial}^2 = 0$ на $A^{(p,q)}$, откуда мы получим

$$\bar{\partial}(A^{p,q}(M)) \subset Z_{\bar{\partial}}^{p,q+1}(M),$$

что позволяет определить *группы когомологий Дольбо* как

$$H_{\bar{\partial}}^{p,q}(M) = Z_{\bar{\partial}}^{p,q}(M) / \bar{\partial}(A^{p,q-1}(M))$$

Теорема 67 ($\bar{\partial}$ -лемма Пуанкаре). Для полидиска $\Delta = \Delta(r) \subset \mathbb{C}^n$ имеет место равенство

$$H_{\bar{\partial}}^{p,q}(\Delta) = 0, q \geq 1.$$

Доказательство. Какое-то очень уж неприятное. Лучше сначала узнать, как обычная лемма Пуанкаре про то, что в односвязной области замкнутая форма точна, доказываются. □

4.5 Пучки и когомологии

Определение 68. Пусть X — топологическое пространство. Пучок \mathcal{F} на X сопоставляет каждому открытому множеству $U \subset X$ группу (или кольцо) $\mathcal{F}(U)$ (которое мы будем называть группой сечений \mathcal{F} над U) и каждой паре $U \subset V$ открытых подмножеств X гомоморфизм $r_{VU}: \mathcal{F}(V) \rightarrow \mathcal{F}(U)$ ²⁶, называемый гомоморфизмом ограничения, причём так, что

1. Для любой тройки $U \subset V \subset W$ открытых множеств выполняется

$$r_{WU} = r_{WV} \circ r_{VU}.$$

В силу этого соотношения по аналогии с ограничениями функций принято писать $r_{WU}(\sigma) = \sigma|_U$ (в общем r_{WU} — гомоморфизм сужения с V на U).

2. $r_{UU} = \text{id}$, $\mathcal{F}(\emptyset) = 0$.
3. Для любой пары открытых множеств $U, V \subset M$ и сечений $\sigma \in \mathcal{F}(U)$, $\tau \in \mathcal{F}(V)$, таких что $\sigma|_{U \cap V} = \tau|_{U \cap V}$ найдётся такое сечение $\rho \in \mathcal{F}(U \cup V)$, что

$$\rho|_U = \sigma, \quad \rho|_V = \tau.$$

4. Если $\sigma \in \mathcal{F}(U \cup V)$ и $\sigma|_U = \sigma|_V = 0$, то $\sigma = 0$.

Очень хорошие пучки, которые мы будем часто встречать:

- 1.

²⁶тут буква r от слова *restriction*.