

# Исследование сечений тессеракта гиперплоскостью используя методы компьютерного моделирования.

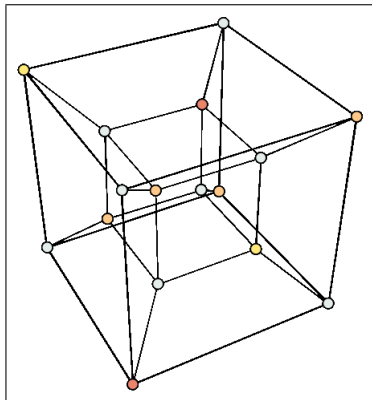
**Максимов Григорий, Нугманов Артур, Мустафин Ильгиз**

Научный руководитель - Давлетбаев Марсель Фанилевич

МАОУ "Лицей-интернат №2"  
Московского района города Казани

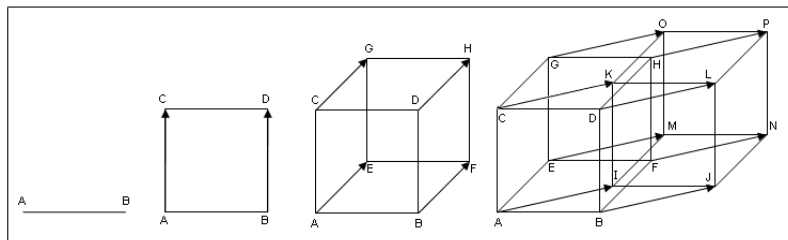
Конференция имени Лобачевского 2015

# Тессеракт. Общее определение



- Рассматриваемая нами модель имеет координаты  $(x_1, x_2, x_3, x_4) \in \mathbb{R}^4$ , такие, что  $x_i \in [-1, 1]$ .
- Ограничивается 8 гиперплоскостями
- Имеет 8 трехмерных граней, 24 двумерных, 32 ребра и 16 вершин.

# Наглядный процесс формирования отображения тессеракта на трехмерную плоскость

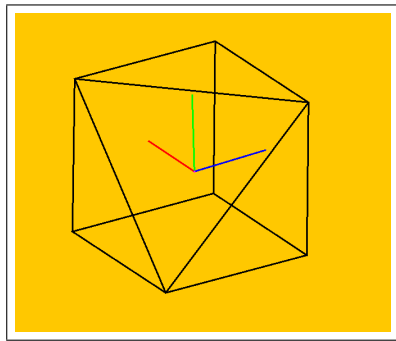
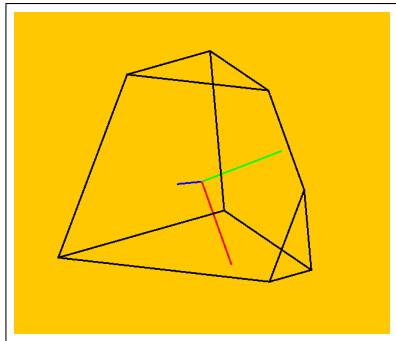


Наглядный процесс как точка  $A$  переходит постепенно в гиперкуб, приобретая новые размерности

# Лемма о размерности сечений

## Лемма 1

Сечением любого 4-мерного геометрического объекта 3 мерной гиперплоскостью является геометрическое тело, имеющее размерность не более 3.



# Лемма о выпуклости

## Утверждение

Тессеракт - выпуклое четырехмерное тело.

## Лемма 2

Сечением тессеракта гиперплоскостью является выпуклое геометрическое тело.

# Метод построения сечений тессеракта гиперплоскостью

- Задание гиперплоскости сечения
- Нахождение точек пересечения гиперплоскости и тессеракта
- Поворот получившегося сечения до вложимости его в трехмерное пространство
- Анализ полученного сечения

```
rex@comp:~/work/CutTesseract$ java -jar CutTesseract_v0.0-w-rotations.jar
Enter input mode
2 for point and normal vector
4 for 4 points4d
0 for no cut, only cube
4
We need 4 4d points
-1 1 -1 1 -1 1 1 0 -1 -1 0 -1 0 -1 -1 -1
=====CUT POINTS=====
(-1.0, -1.0, -1.0, -0.5)
(-1.0, -1.0, 0.0, -1.0)
(-1.0, -0.3333333333333333, 1.0, -1.0)
(-1.0, 1.0, -1.0, 1.0)
(-1.0, 1.0, 1.0, 0.0)
(0.0, -1.0, -1.0, -1.0)
(1.0, -0.3333333333333333, -1.0, -1.0)
(1.0, 1.0, -1.0, 0.0)
(1.0, 1.0, 1.0, -1.0)
=====
(0.3481553119113957, -0.5222329678670935, 0.3481553119113957, 0.6963106238227914)
```

# Задание гиперплоскости сечения с помощью точек

Гиперплоскость сечения. Уравнение.

$$ax + by + cz + dw + e = 0$$

$(a, b, c, d, e)$  - коэффициенты

$$M_1 = (x_1, y_1, z_1, w_1)$$

$$M_2 = (x_2, y_2, z_2, w_2)$$

$$M_3 = (x_3, y_3, z_3, w_3)$$

$$M_4 = (x_4, y_4, z_4, w_4)$$

Задается по четырем точкам  $(M_1, M_2, M_3, M_4)$  с помощью матрицы:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 & w - w_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 & w_2 - w_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 & w_3 - w_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 & w_4 - w_1 \end{vmatrix} = 0$$

# Задание гиперплоскости с помощью точки и вектора

Способ аналогичен объявлению обыкновенной двумерной плоскости при помощи нормали к ней и точки, принадлежащей данной плоскости.

$A(x_1, y_1, z_1, w_1)$  - произвольная точка

$\vec{N}(x_2, y_2, z_2, w_2)$  - нормаль к искомой гиперплоскости

$P(ax+by+cz+dw+e=0)$

Свободный член  $e$  можно выразить через следующую формулу

$e=-(x_2x_1 + y_2y_1 + z_2z_1 + w_2w_1)$

Таким образом, мы объявили гиперплоскость сечения.



# Нахождение точек пересечения гиперплоскости и тессеракта

Пусть  $A$  - вершина гиперкуба,  $P$  - наша гиперплоскость.

Произведем проверку взаимного расположения вершины тессеракта и гиперплоскости.

$$A := (x_1, y_1, z_1, w_1)$$

$$P := (ax + by + cz + dw + e = 0)$$

$ax_1 + by_1 + cz_1 + dw_1 + e = 0$	Вершина принадлежит сечению
$ax_1 + by_1 + cz_1 + dw_1 + e > 0$	Вершина "выше" плоскости сечения
$ax_1 + by_1 + cz_1 + dw_1 + e < 0$	Вершина "ниже" плоскости сечения

В случае, если две вершины находятся в разных полуплоскостях находим точку пересечения при помощи параметрического уравнения.

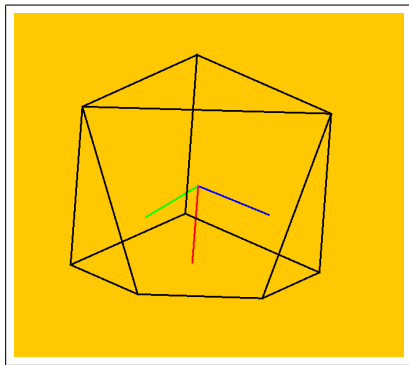
# Поворот сечения

Матрицы поворота в  
четырёхмерном пространстве.

$$M_{xy}(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{yz}(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{zw}(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$



# Теорема о параллельности граней противоположных сечений

## Теорема 1

Грани сечения, полученные пересечением противоположных ячеек тессеракта гиперплоскостью, параллельны.

# Лемма о четности суммы степеней вершин сечения

## Лемма 3

Не существует сечений, сумма степеней вершин которых нечетна.

# Лемма о степени вершин

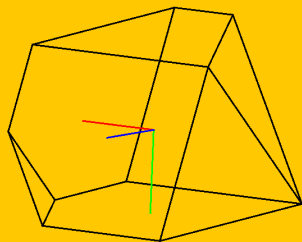
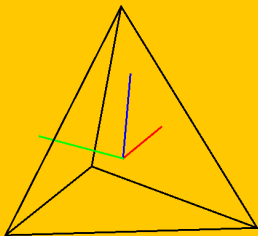
## Лемма 4

Трехмерные сечения тессеракта состоят из вершин только со степенями 3 и 4.

# Теорема о количестве вершин

## Теорема 2

Трехмерные сечения тессеракта имеют не менее 4 и не более 12 вершин, но не 5.



# Гипотеза о количестве разных сечений

## Гипотеза

Количество топологически различных сечений равно 30.

# Заключение

Мы на Github

<https://github.com/imustafin/CutTesseract>

Сайт проекта

<http://imustafin.github.io/CutTesseract/>





# Размерность сечения

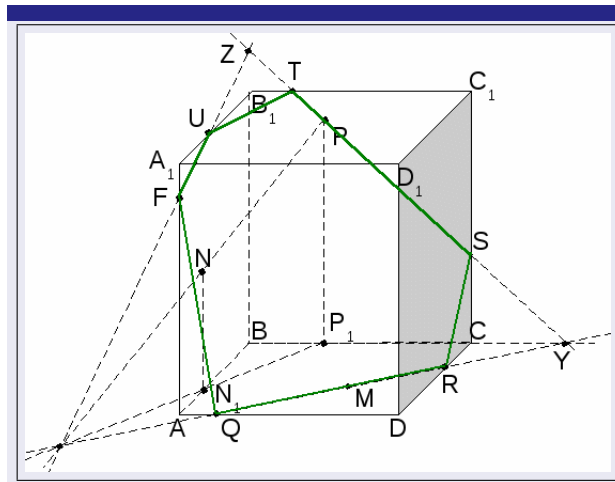
## Сечение

Сечение - это множество точек, принадлежащих, как тессеракту, так и гиперплоскости сечения.

Из этого следует вывод о том, что сечение не может иметь размерность более 3, так как размерность секущей гиперплоскости - 3.

*[1] Назад*

# Доказательство выпуклости сечения



[\[1\] Назад](#)

# Доказательство теоремы 1

$$\begin{aligned} P_1 & \begin{cases} ax + by + cz + dw + e = 0 \\ w = 1 \end{cases} \\ P_2 & \begin{cases} ax + by + cz + dw + e = 0 \\ w = -1 \end{cases} \\ a^2 + b^2 + c^2 & \neq 0 \end{aligned}$$

*[1] Назад*

# Доказательство четности суммы степеней вершин сечения

## Лемма о рукопожатиях

Любой конечный неориентированный граф имеет чётное число вершин нечётных степеней.

*[1] Назад*

## Доказательство Леммы о степени вершин

Данная лемма является следствием Теоремы 1 о параллельности. Так как тессеракт состоит из 8 ячеек, пары которых параллельны, то при сечении данного тессеракта гиперплоскостью образуются 4 пары параллельных двумерных плоскостей.

Как следствие, одновременно пересекаться в одной точке могут лишь 4 из них. То есть максимальная степень вершины сечения тессеракта - 4.

Как известно, для получения точки требуется пересечь как минимум три плоскости. Как следствие, минимальная степень вершины сечения будет 3.

*[1] Назад*

# Доказательство Теоремы 2 о количестве вершин

Как известно, для получения трехмерного геометрического тела требуется минимум 4 вершины.

По теореме Эйлера для многогранников:

$$\left\{ \begin{array}{l} V - \text{ количество вершин, } E - \text{ ребер, } F - \text{ граней.} \\ V - E + F = 2 \\ F \leq 8 \\ \text{Пусть } V = x + y \\ x - \text{ количество вершин со степенью 3} \\ y - \text{ количество вершин со степенью 4} \\ E = \frac{3x+4y}{2}, \text{ по лемме о рукопожатиях и лемме о степени вершин} \end{array} \right.$$

## Доказательство Теоремы 2 о количестве вершин

$V$  - количество вершин,  $E$  - ребер,  $F$  - граней.

$$F = 2 - E + V$$

$$2 - V + E \leq 8$$

$$E - V \leq 6$$

$$\frac{3x+4y}{2} - x - y \leq 6$$

$$x + 2y \leq 12$$

$$V = x + y \leq x + 2y \leq 12$$

Таким образом мы нашли верхний предел степени вершины сечения



## Доказательство Теоремы 2 о количестве вершин

Рассмотрим все графы с 5 вершинами, имеющие степень 3 и 4.

33333 - не может быть по Лемме о четности

33334 - может быть

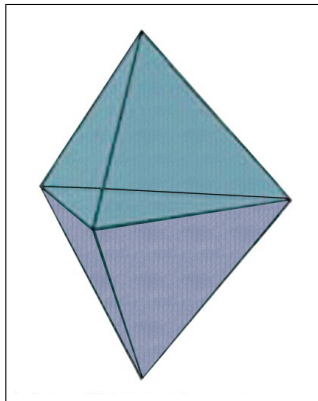
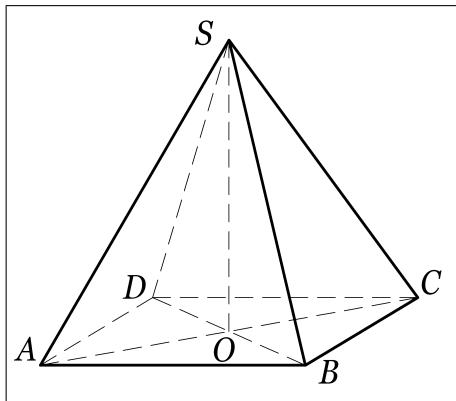
33344 - не может быть по Лемме о четности

33444 - может быть

34444 - не может быть по Лемме о четности

44444 - не планарный граф

Таким образом остаются два графа, потенциально нам подходящие.



33334

Они не являются сечениями гиперкуба, так как у них более 4 граней и нет ни одной пары параллельных.

33444

[\[1\] Назад](#)