

Кто я? И почему я здесь?



Alexey Nasretdinov

- Физик (МФТИ), музыкант, психоакустик, нейрофизиолог
- Лектор в Московской консерватории, Политехническом музее и других местах
- Автор книг «Физика и анатомия музыки», «Музыкальная математика древних. Поиск гармонии», других книг и статей, научных и научно-популярных
- Сфера интересов: музыка, история, философия, религия, физика, биология, психоакустика, нейрофизиология, концептуальное мышление
- Почему я здесь? Люблю Физтех



Упрощать сложно.
Усложнять легко.

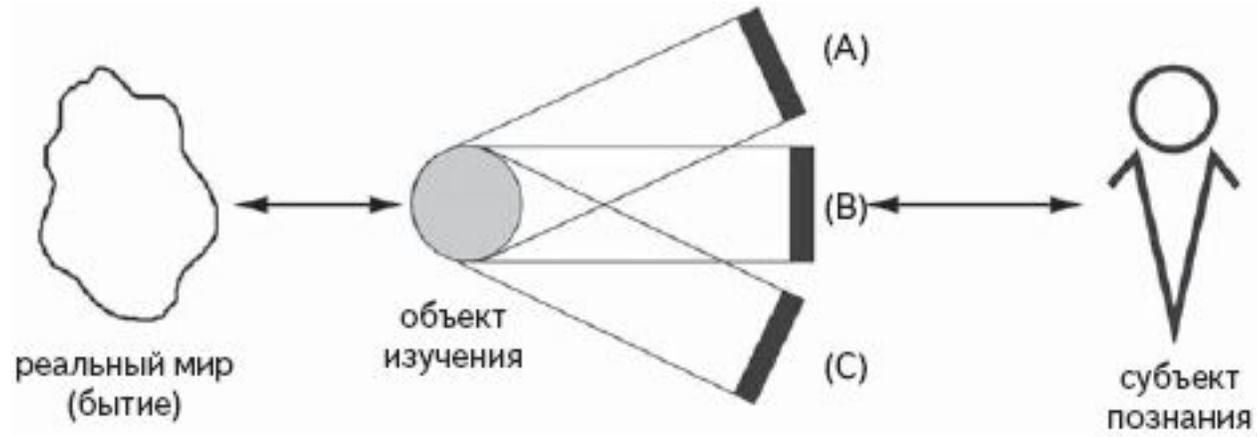
Лао Цзы



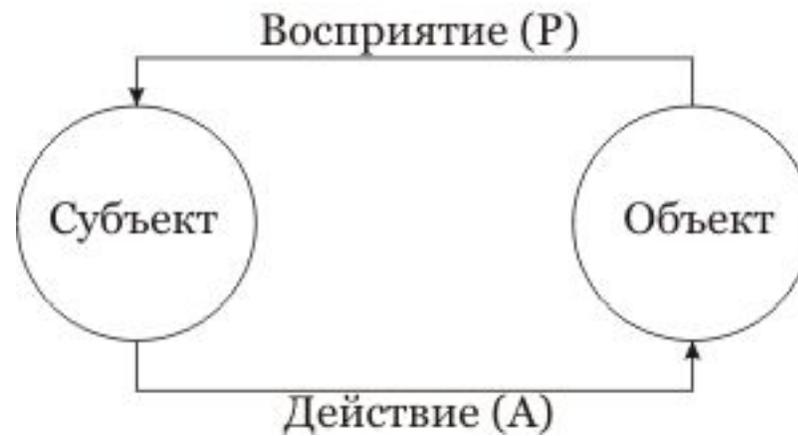
МУЗЫКА:

Целостная совокупность звуков,
организованная во времени,
созданная для изменения
состояния человека

Объекты и субъекты



(A), (B), (C) – предметы знания



Научный подход

Научный метод — система категорий, ценностей, регулятивных принципов, методов обоснования, образцов и т.д., которыми руководствуется в своей деятельности научное сообщество.

(метод)

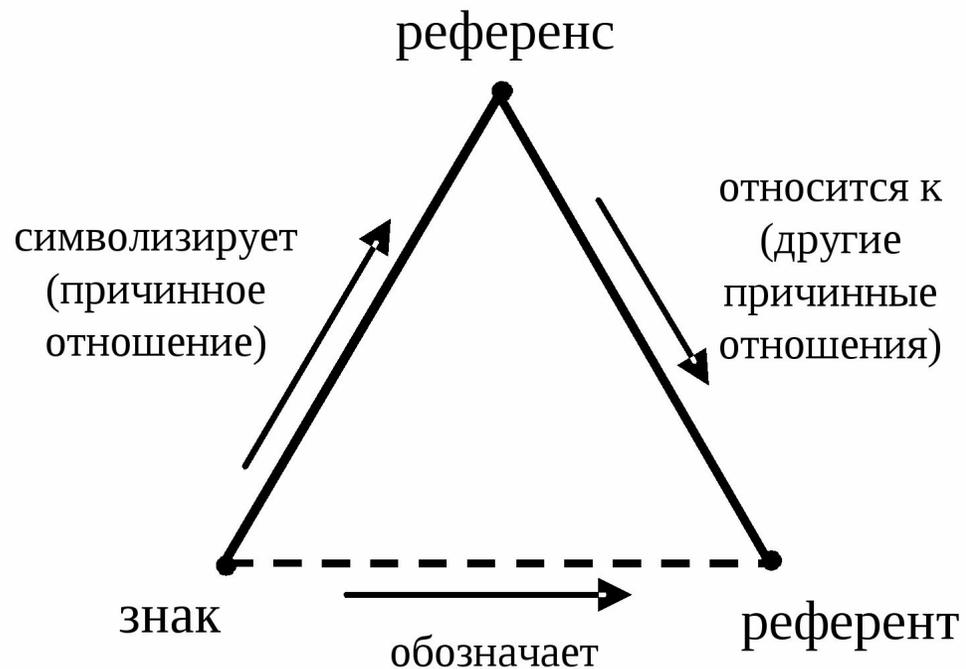
Метод включает в себя способы исследования феноменов, систематизацию, корректировку новых и полученных ранее знаний. Умозаключения и выводы делаются с помощью правил и принципов рассуждения на основе эмпирических (наблюдаемых и измеряемых) данных об объекте. Базой получения данных являются наблюдения и эксперименты. Для объяснения наблюдаемых фактов выдвигаются гипотезы и строятся теории, на основании которых в свою очередь строится модель изучаемого объекта. Важной стороной научного метода, его неотъемлемой частью для любой науки, является требование объективности, исключающее субъективное толкование результатов. Воспроизведение экспериментов, критическая оценка степени адекватности (валидности) экспериментов и результатов по отношению к проверяемой теории.

Подход искусства

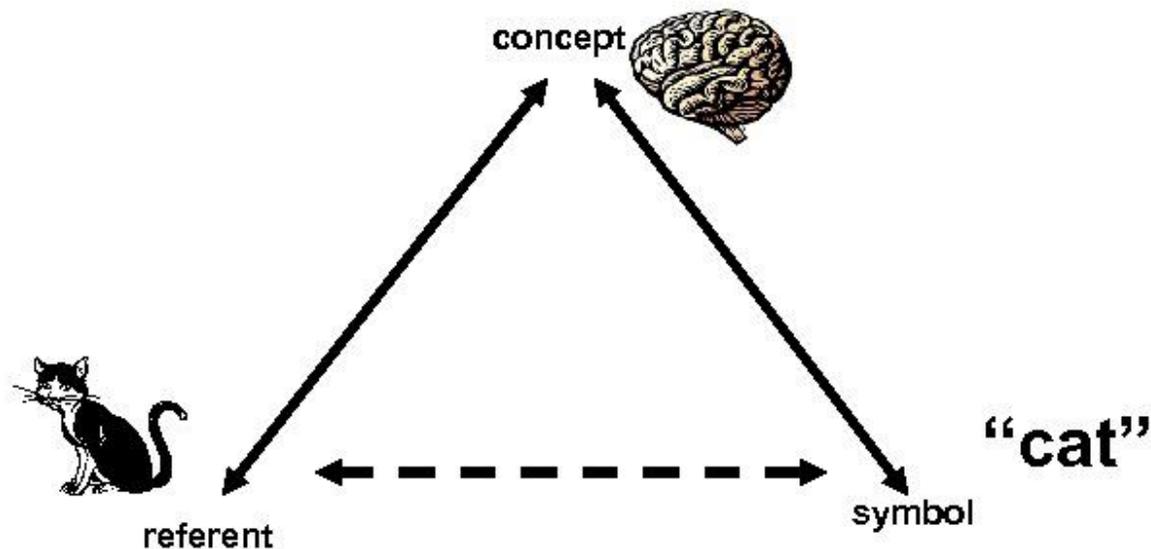
«... искусство должно обладать множеством смыслов и иметь самозащиту от превалирования одного смысла над другим. Чем более один смысл доминирует в произведении, тем менее это произведение искусства. Если произведение имеет один и только один смысл – независимо от того, насколько интересным или важным этот смысл является, - это уже больше не произведение искусства» Борис Раушенбах.



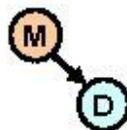
Семантический треугольник (Фреге)



Semantic Triangle



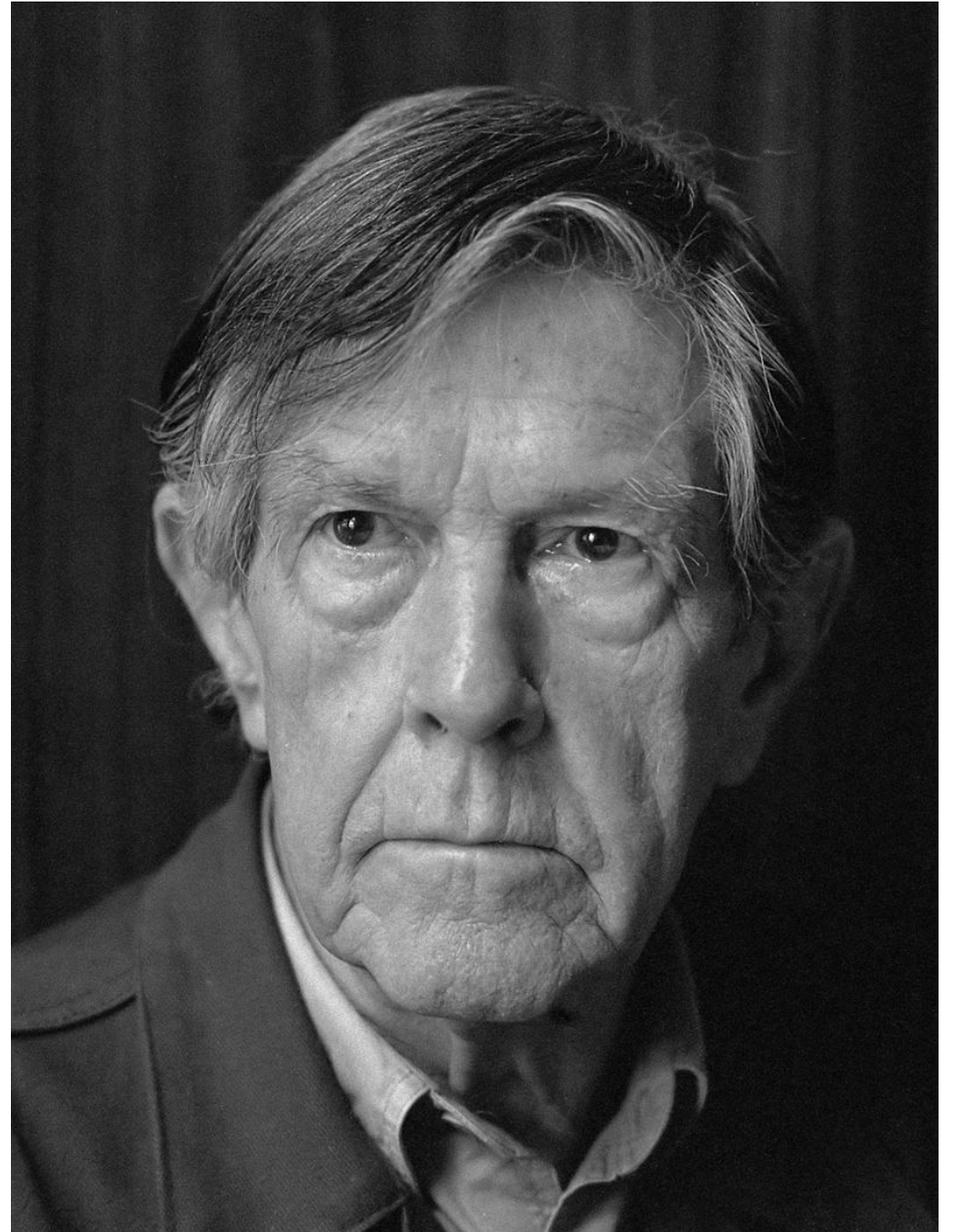
- Symbols can only link to referents through concepts
- You can not link directly from a symbol to a referent



Wikipedia: Semiotic triangle

Пьеса «4'33"» («**Четыре тридцать три**», иначе — «**Четыре минуты тридцать три секунды**») — трёхчастное сочинение американского композитора Джона Кейджа. Впервые пьеса была представлена пианистом Дэвидом Тюдором на Благотворительном концерте, организованном в поддержку творчества в области современного искусства, в Вудстоке 29 августа 1952 года

Джон Милтон Кейдж (англ. *John Milton Cage Jr.*; 5 сентября 1912 — 12 августа 1992) — американский композитор, философ, поэт, музыковед, художник. Пионер в области алеаторики, электронной музыки и нестандартного использования музыкальных инструментов, Кейдж был одной из ведущих фигур послевоенного авангарда. Критики называли его одним из самых влиятельных американских композиторов XX-го столетия.



МУЗЫКА:

Целостная

совокупность звуков,

организованная во

времени, созданная

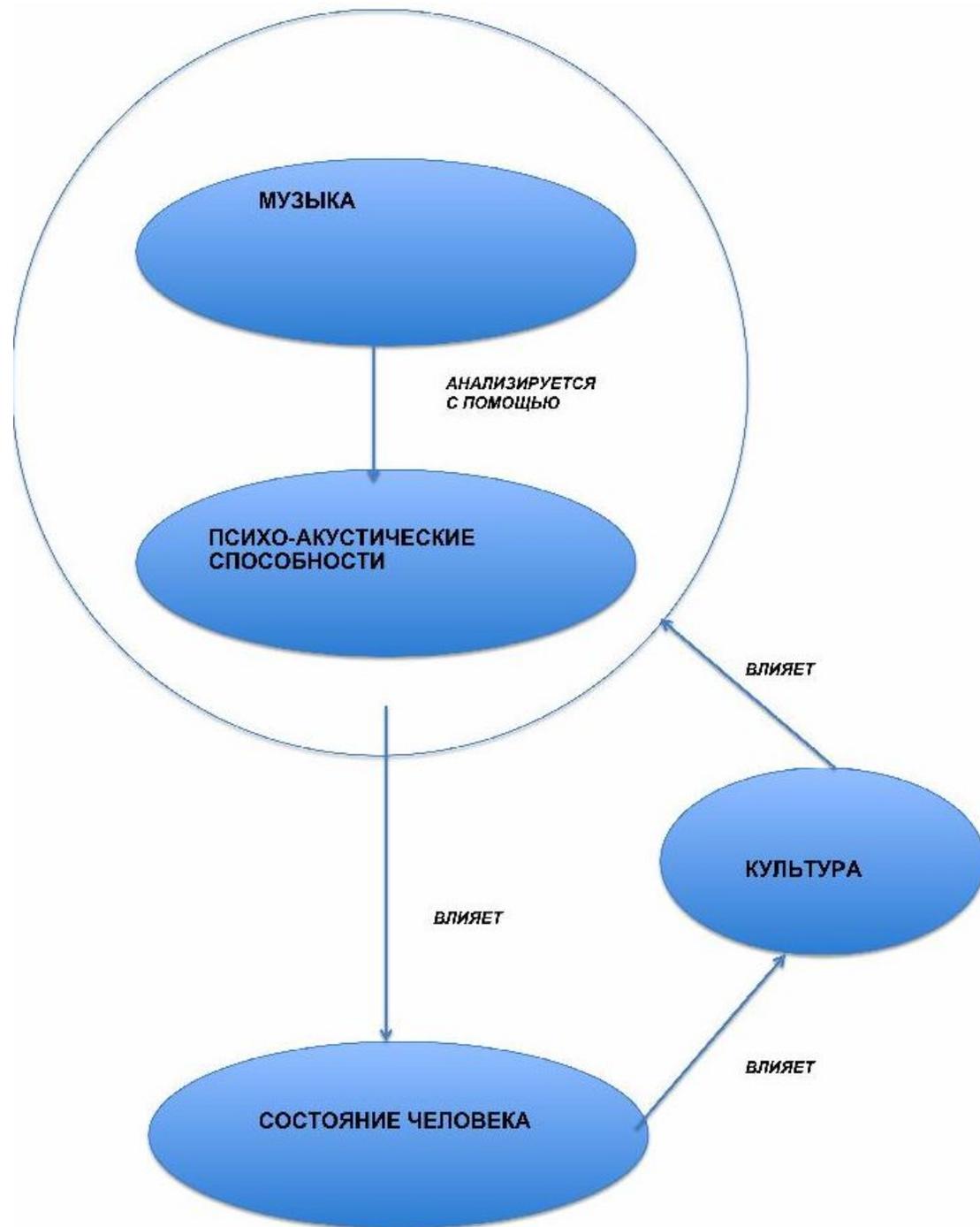
для изменения

состояния человека



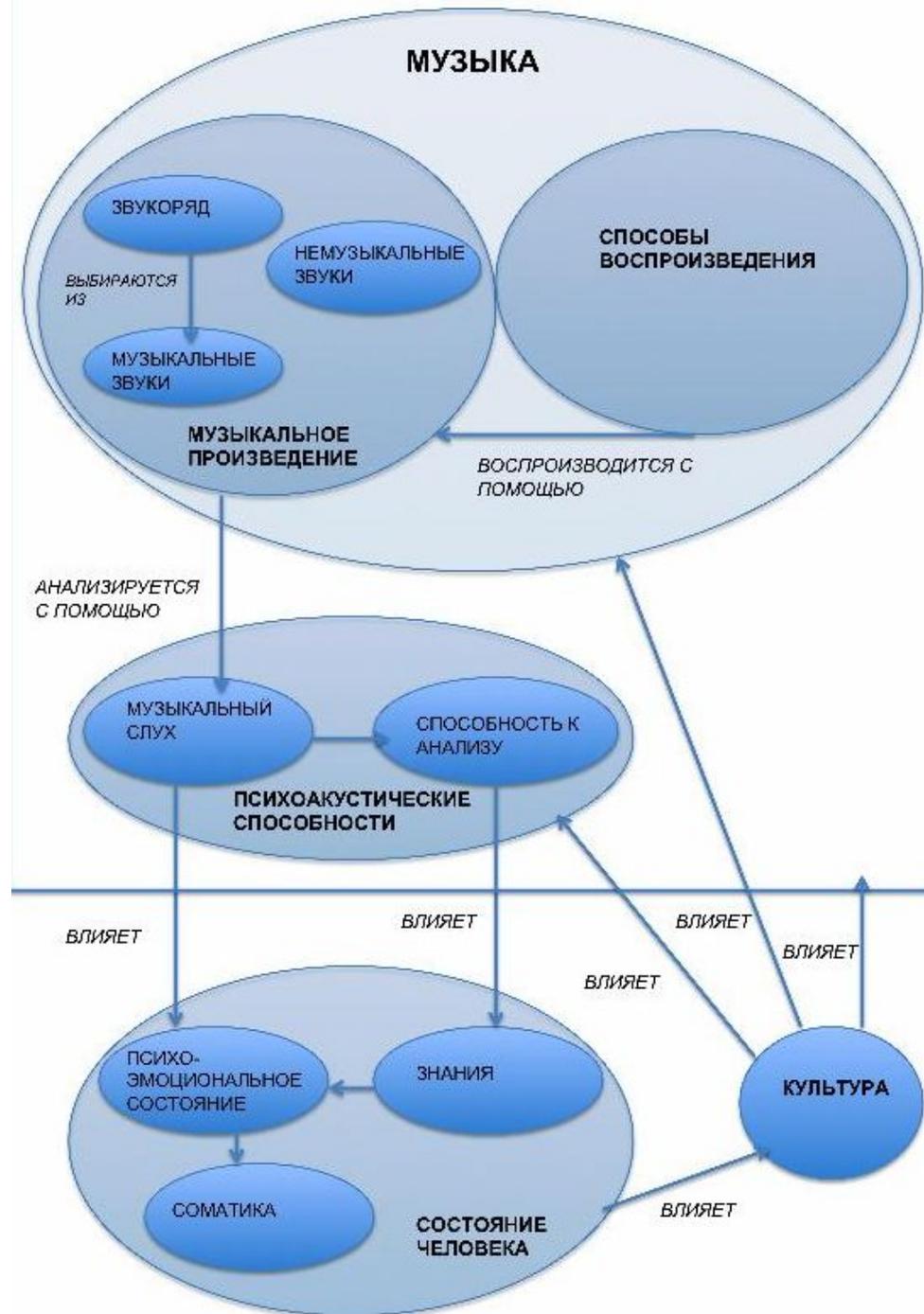
МУЗЫКА:

Целостная совокупность звуков, организованная во времени, созданная для изменения состояния человека



МУЗЫКА:

Целостная совокупность звуков, организованная во времени, созданная для изменения состояния человека



ЗВУКИ



МУЗЫКАЛЬНЫЕ

*Выбираются из звукоряда
(музыкального строя)*

Музыкальные строи:

- ✓ Пифагорейский
- ✓ Арабский
- ✓ Индийский
- ✓ Китайский
- ✓ «Чистый»
- ✓ Натуральный
- ✓ Равномерно-темперированный (РТС 12)
- ✓ ...

НЕМУЗЫКАЛЬНЫЕ





Консонанс и диссонанс в музыке

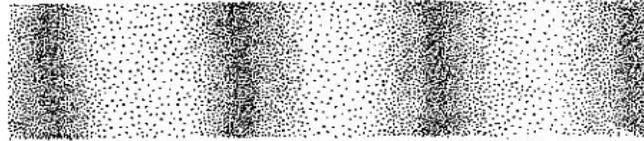
Консонанс и диссонанс:

термины, обозначающие качество слуховых ощущений при восприятии музыкальных созвучий. Более гладкое, слитное звучание определяется как «консонанс». Более шероховатое определяется как «диссонанс»

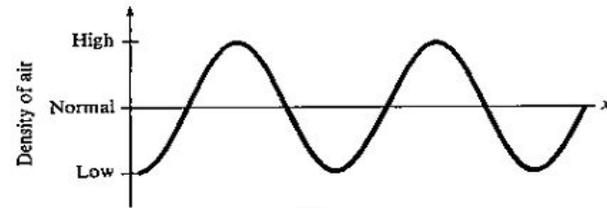
МУЗЫКА:

целостная совокупность звуков, организованная во времени, созданная для изменения состояния человека

Физические характеристики звуковой волны



(a)



(b)

A – амплитуда волны

F – частота волны

$$X(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t)$$

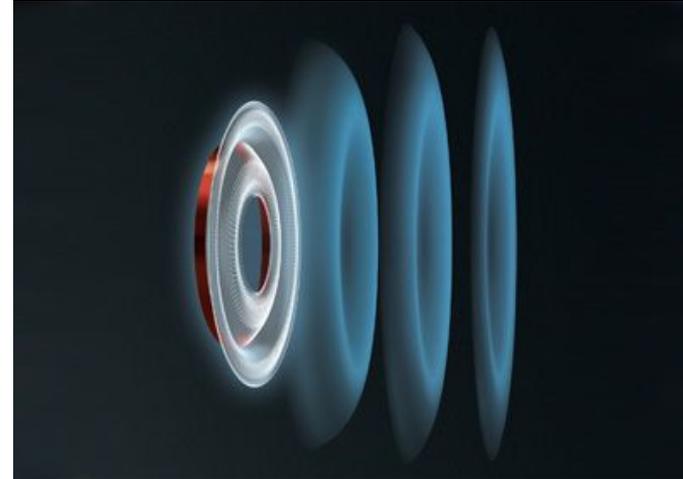
L – длина волны

V – скорость звука

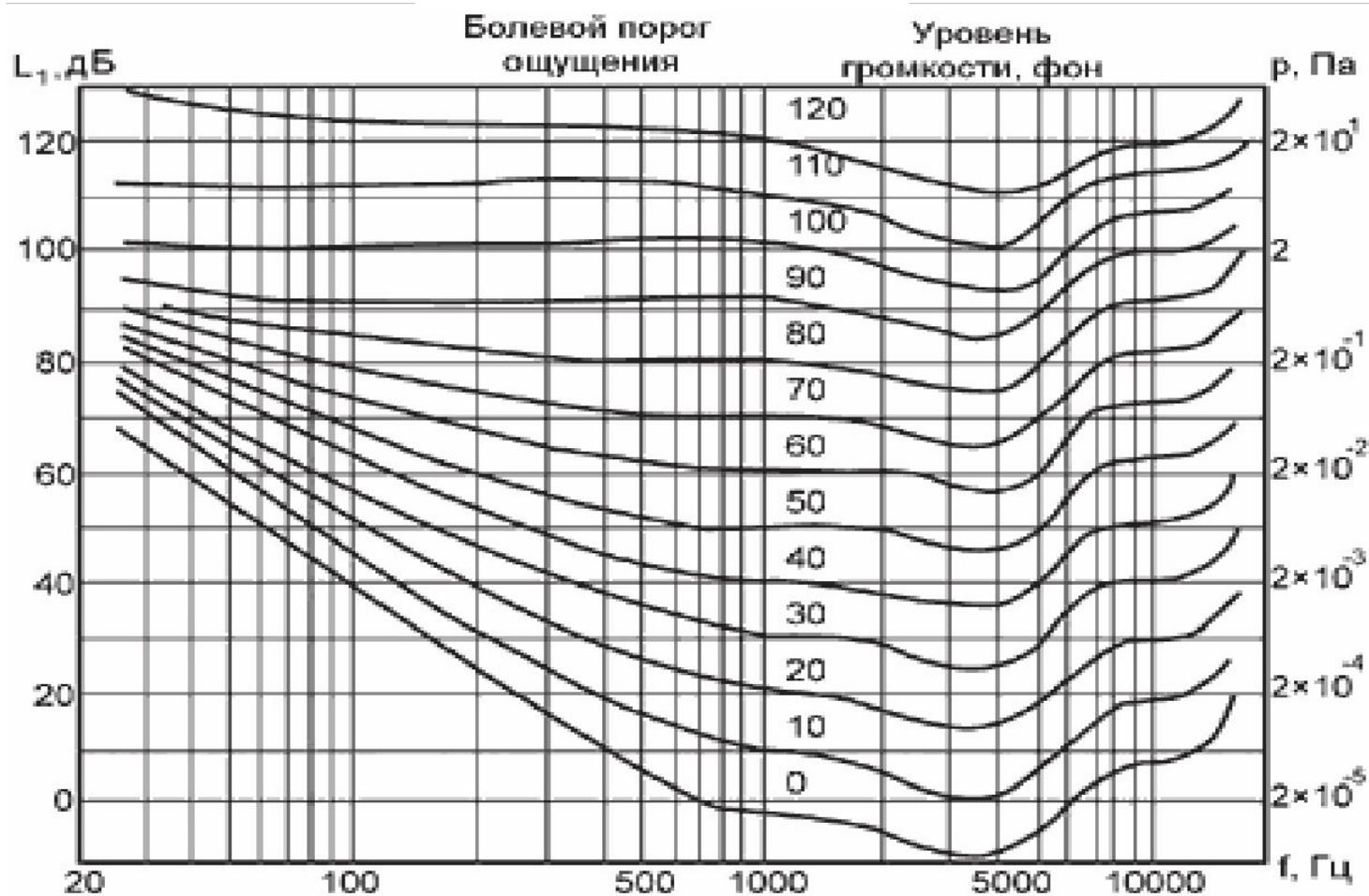
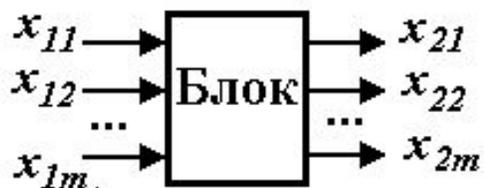
$$L = V / F$$

I – интенсивность звука (поток звуковой энергии), пропорциональна **A**²

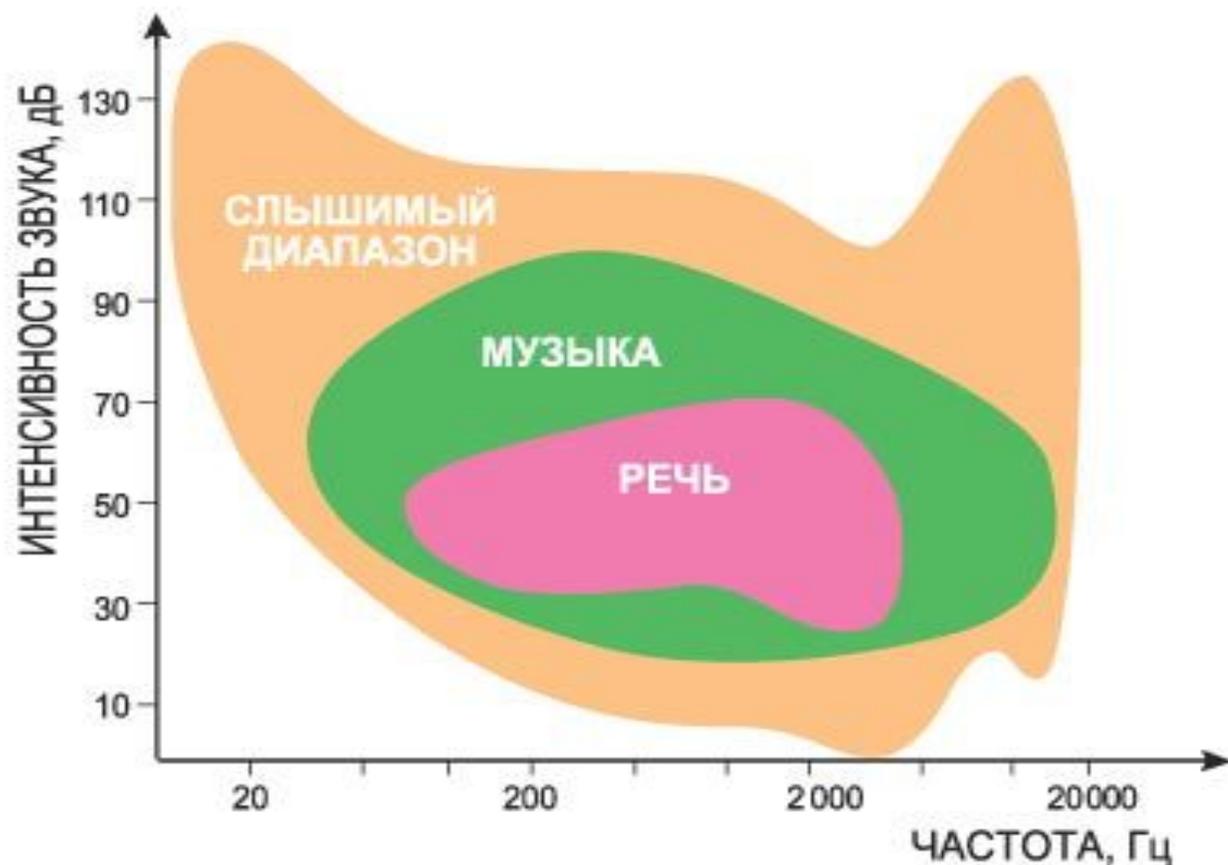
Интенсивность звука в децибелах (дБ) определяется по формуле $K = 10 \cdot \lg I_1 / I_2$



Связь объективных и субъективных характеристик звука. Интенсивность-громкость, частота-высота.

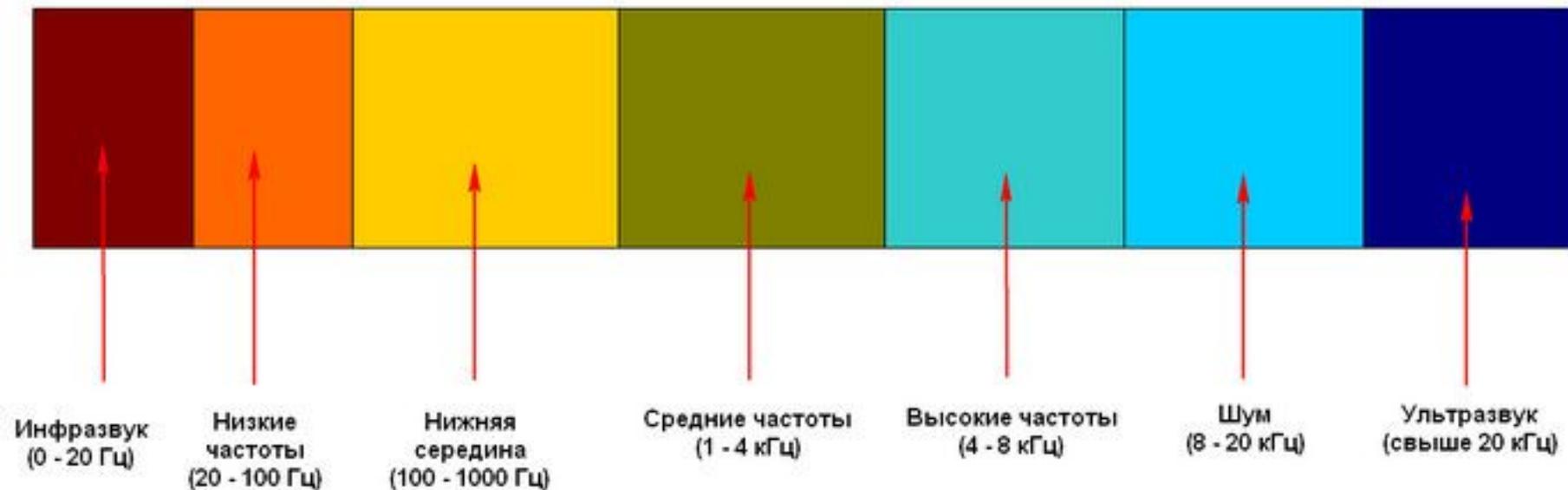


Связь объективных и субъективных характеристик звука.



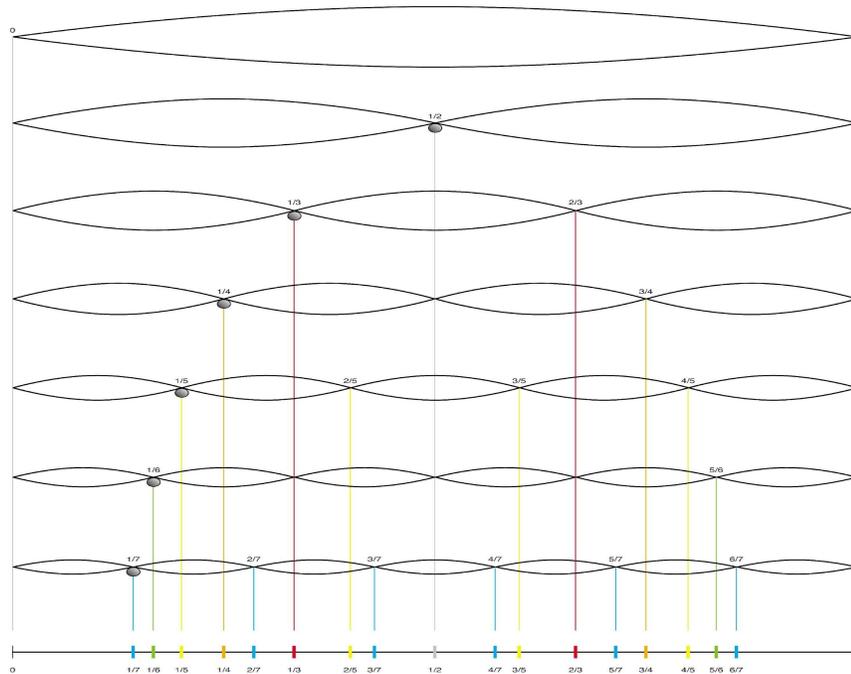
- ухо человека улавливает звук, интенсивность которого $10-12 \text{ вт/м}^2$, т.е. 0 дБ (звуковое давление $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$), с другой стороны оно ощущает как звук уровень давления 140 дБ - это соответствует отношению давлений 107 степени. Самый громкий звук в 10 миллионов раз больше по звуковому давлению самого слабого;
- по частоте человек улавливает и очень низкие звуки, от 20 Гц и очень высокие, до 20 кГц (хотя музыкальные звуки в основном в диапазоне до 5000 Гц).

Связь объективных и субъективных характеристик звука.

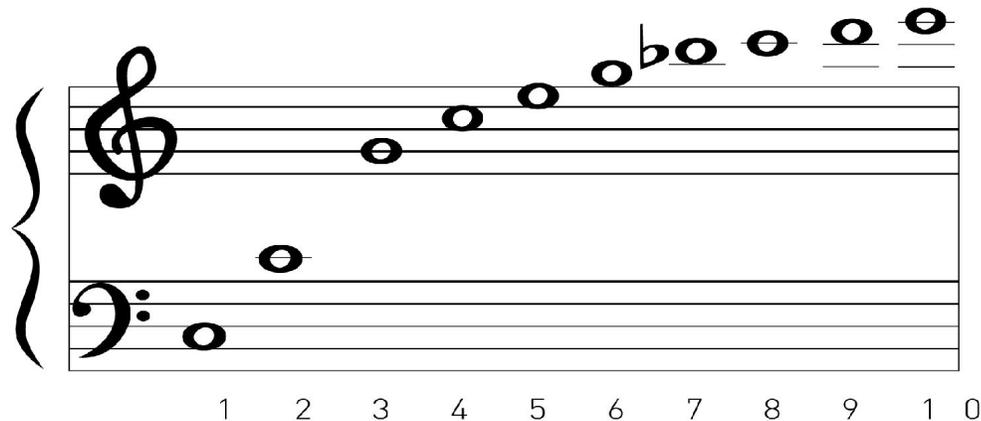
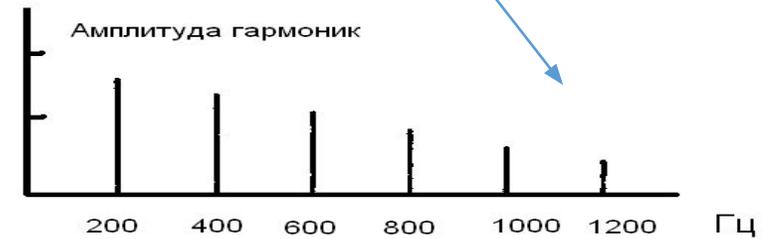


- ухо человека улавливает звук, интенсивность которого $10-12 \text{ вт/м}^2$, т.е. 0 дБ (звуковое давление $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$), с другой стороны оно ощущает как звук уровень давления 140 дБ - это соответствует отношению давлений 107 степени. Самый громкий звук в 10 миллионов раз больше по звуковому давлению самого слабого;
- по частоте человек улавливает и очень низкие звуки, от 20 Гц и очень высокие, до 20 кГц (хотя музыкальные звуки в основном в диапазоне до 5000 Гц).

Гармонические ряды. Сложный и простой тон. Фурье преобразование.

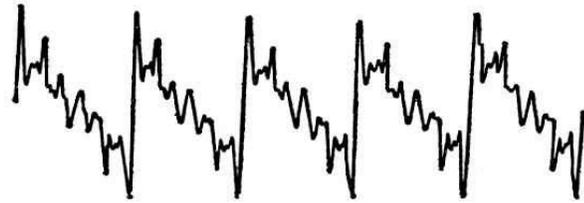


Частота **первой гармонике** как правило определяет высоту звука. Соотношение амплитуд высших гармоник – тембр звука. **АЧХ. Фурье преобразование.**

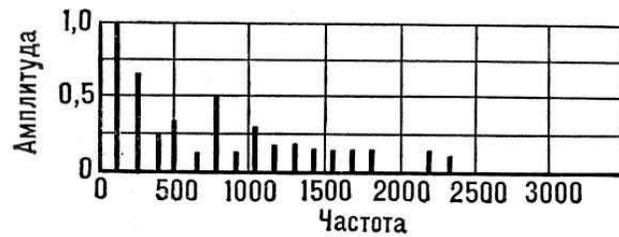


Нотный стан – логарифмическое представление высоты звуков

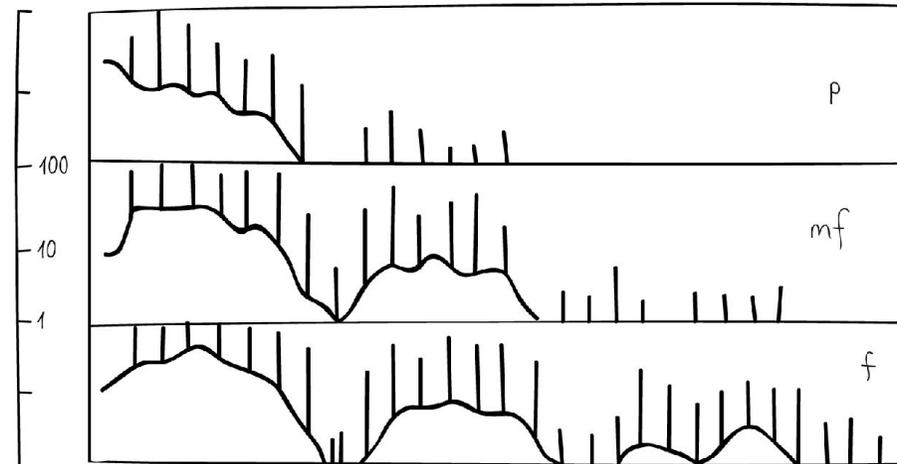
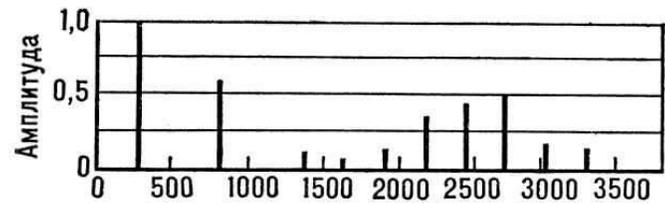
Гармоники и обертоны. Тембр.



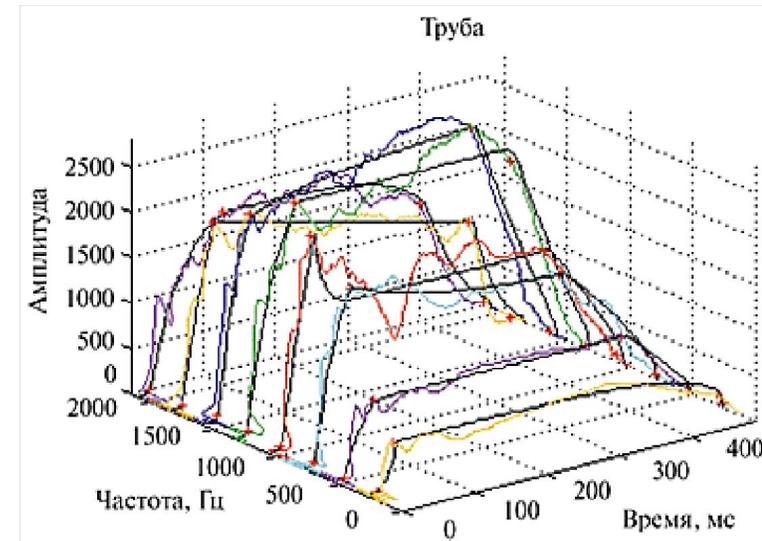
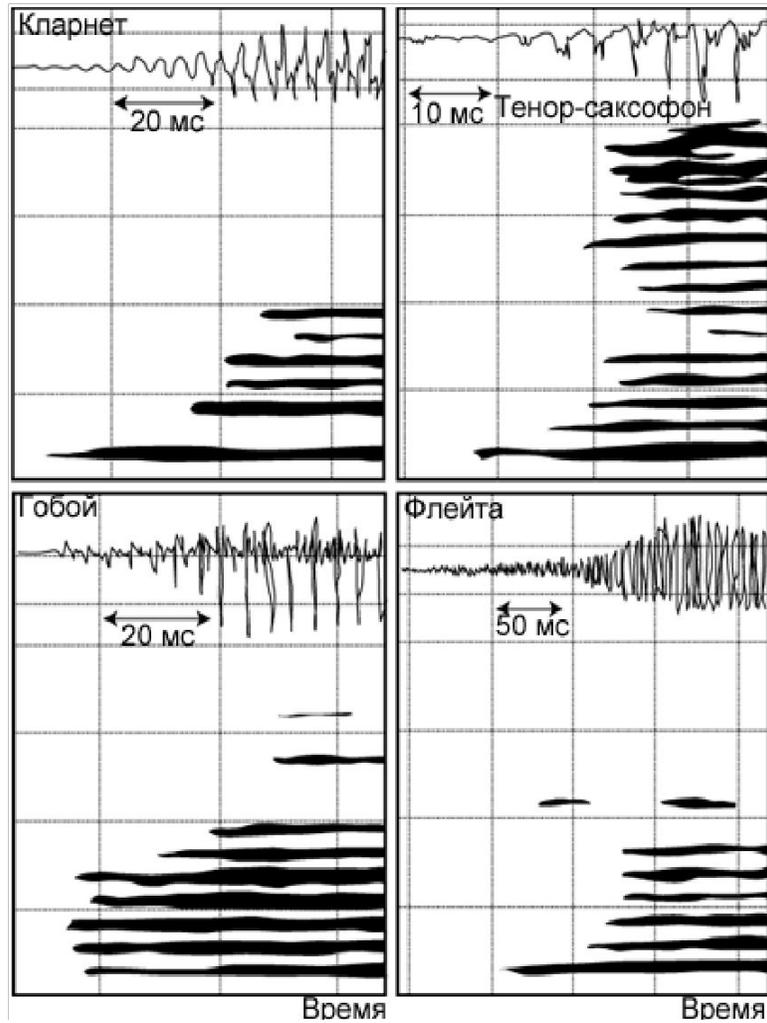
Рояль



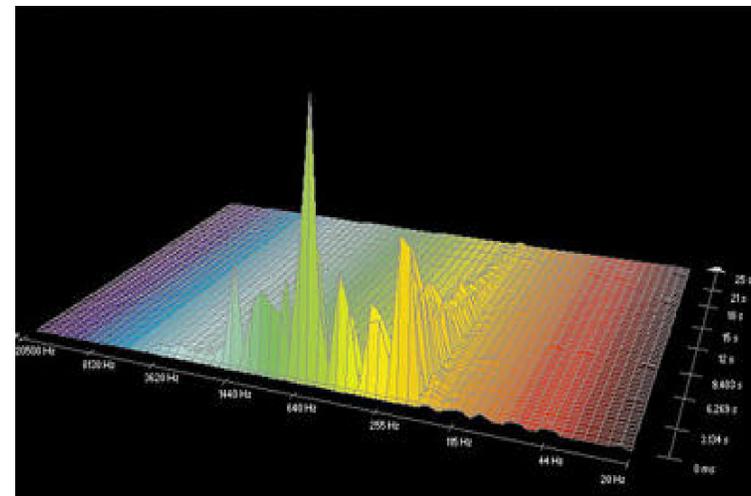
Кларнет



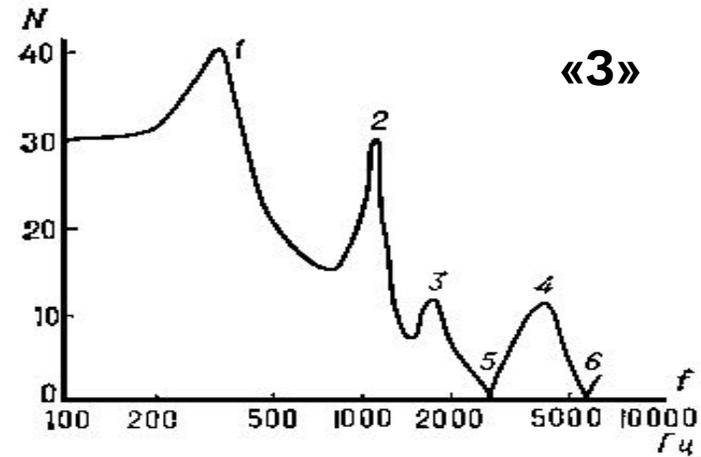
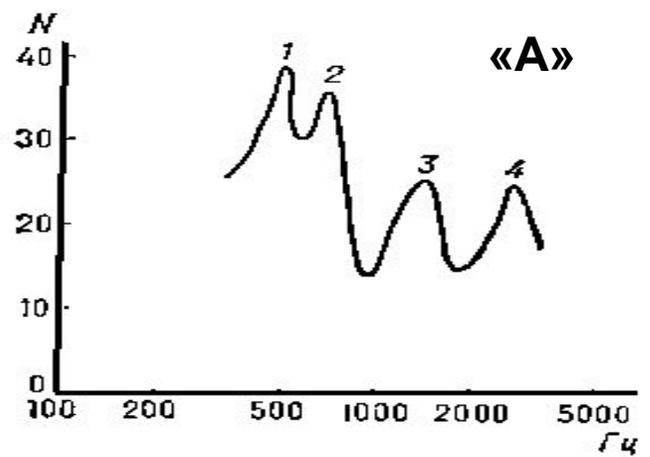
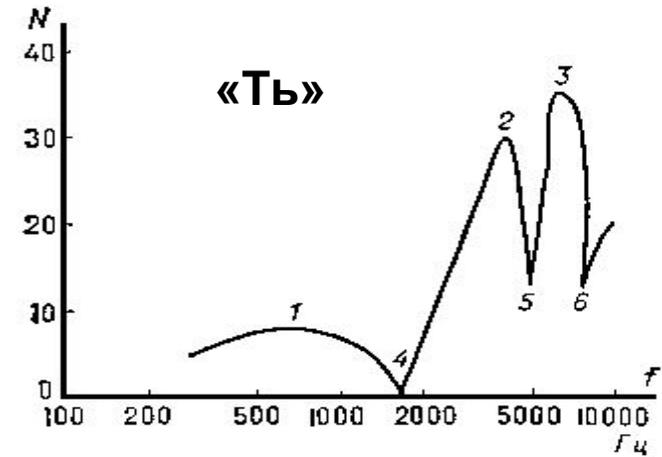
Нелинейные фазы звука, динамические матрицы, тембр



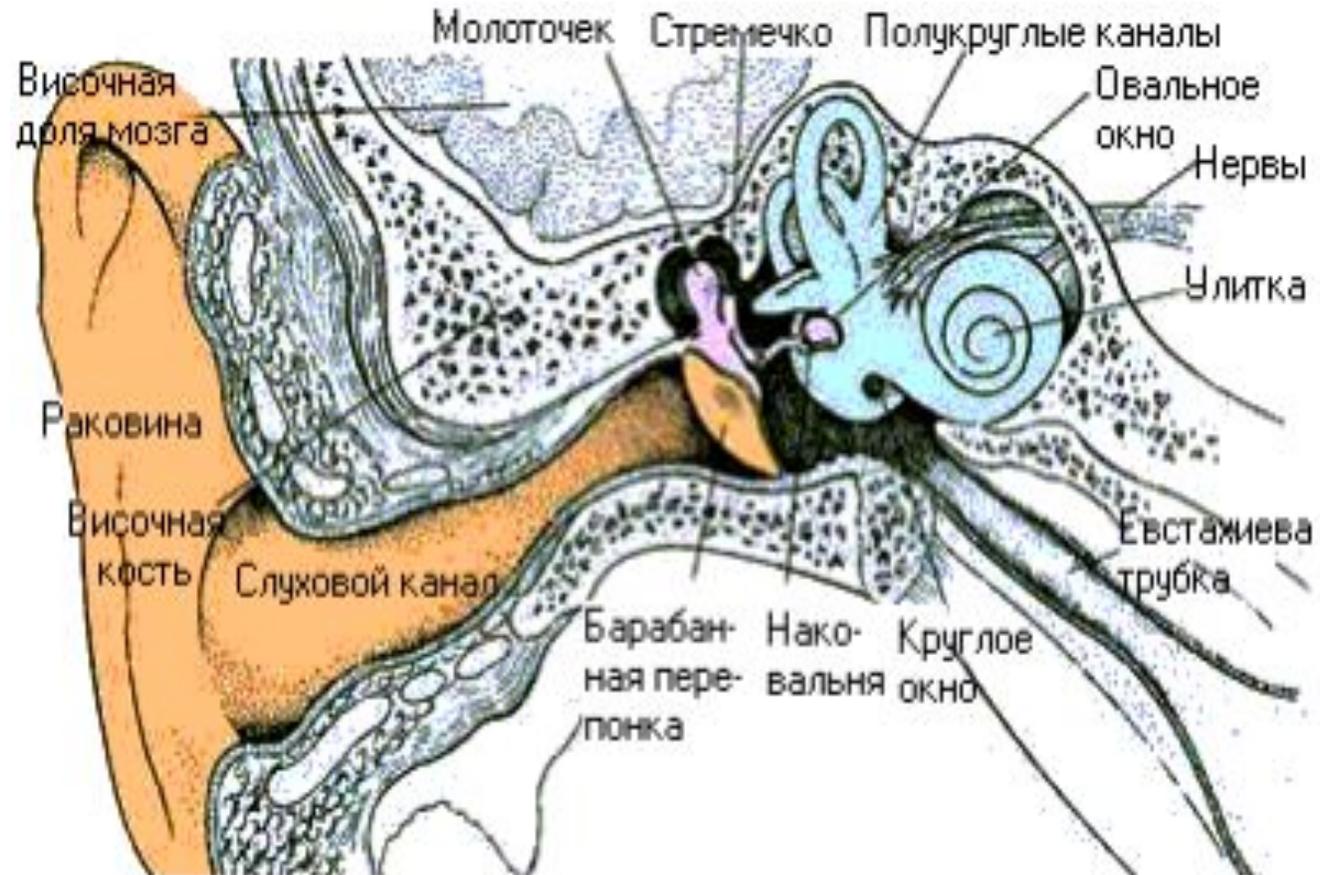
Колокол



Фонемы

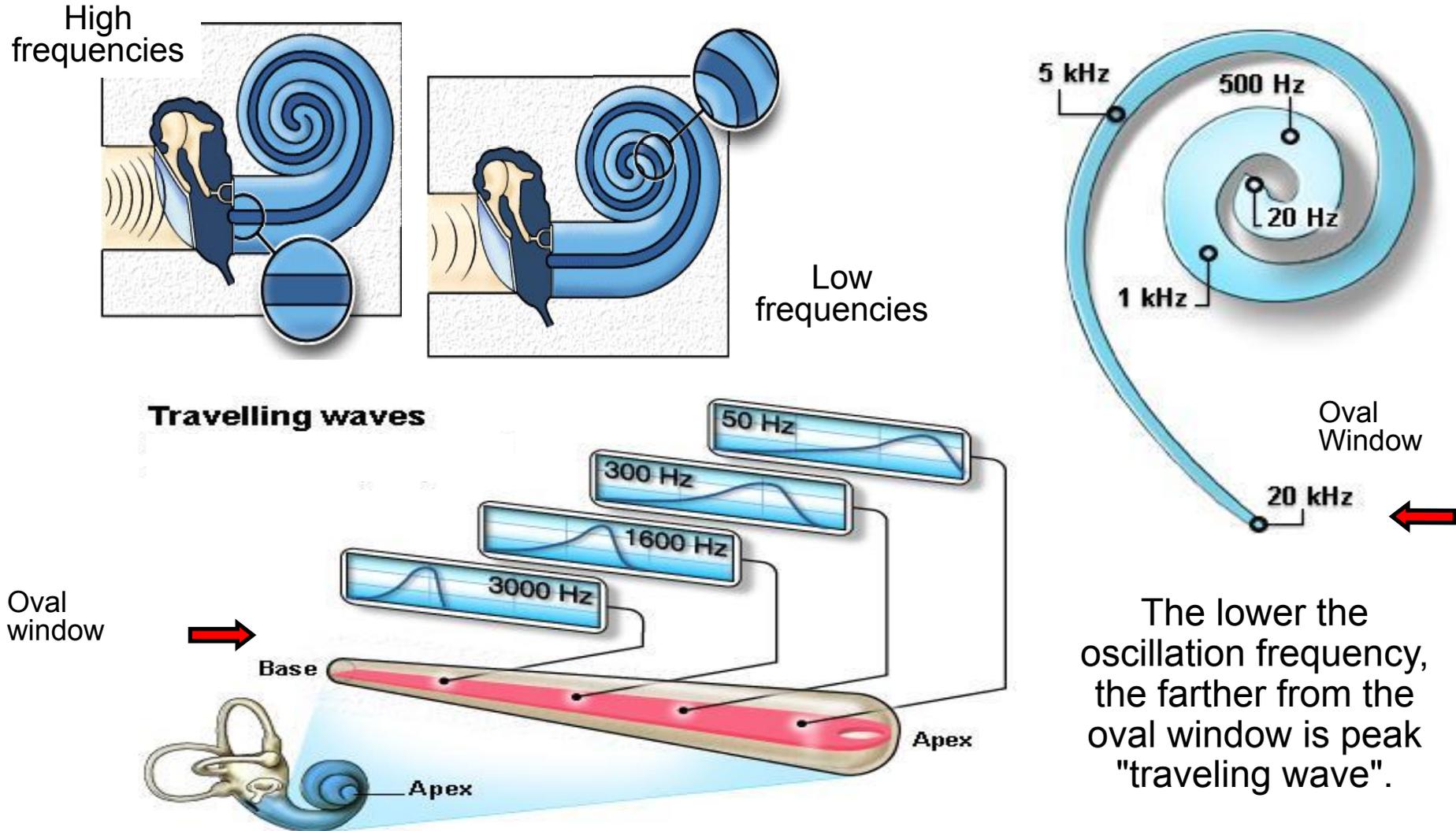


Слуховая система человека. Внешнее, среднее и внутреннее ухо. Улитка.



Snail:

different parts of the basilar membrane respond to different frequencies (20 to 20,000 Hz)



The lower the oscillation frequency, the farther from the oval window is peak "traveling wave".

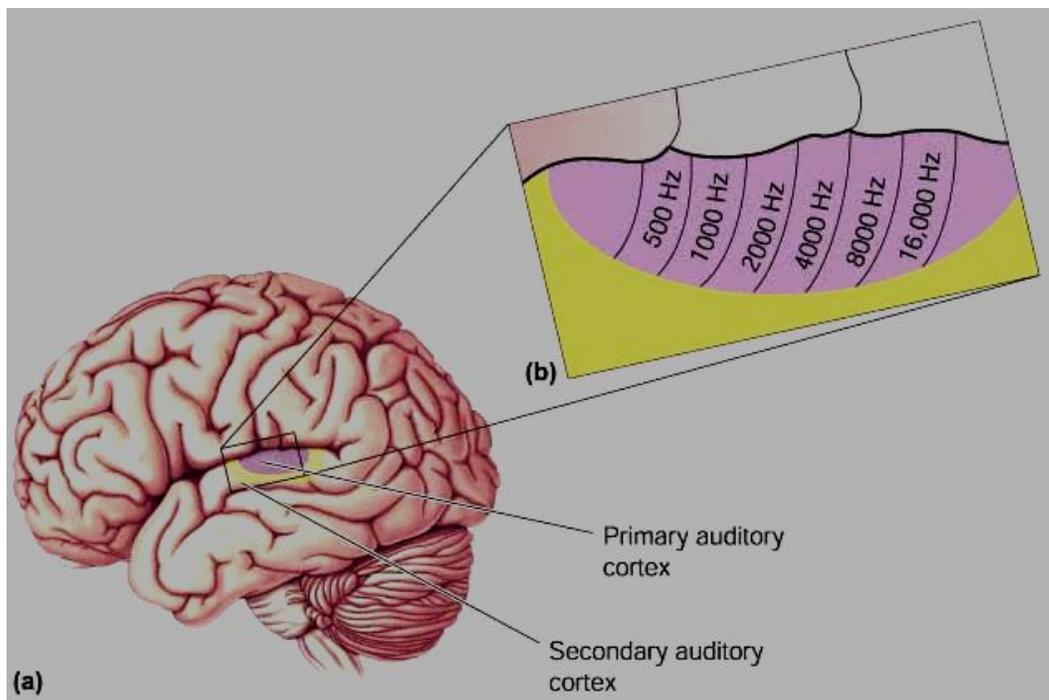
At the inner hair cells low frequency selectivity (improved by the ext. hair cells).

Слуховая кора

Ниже расположена **вторичная** слуховая кора – опознавание звуковых образов как совокупности частот (шумы, «звуки природы» и т.п.).

Как правило, свойства нейронов этой области – **результат обучения**.

Невербальная коммуникация (плач, смех и т.п.) опознается **врожденно**.

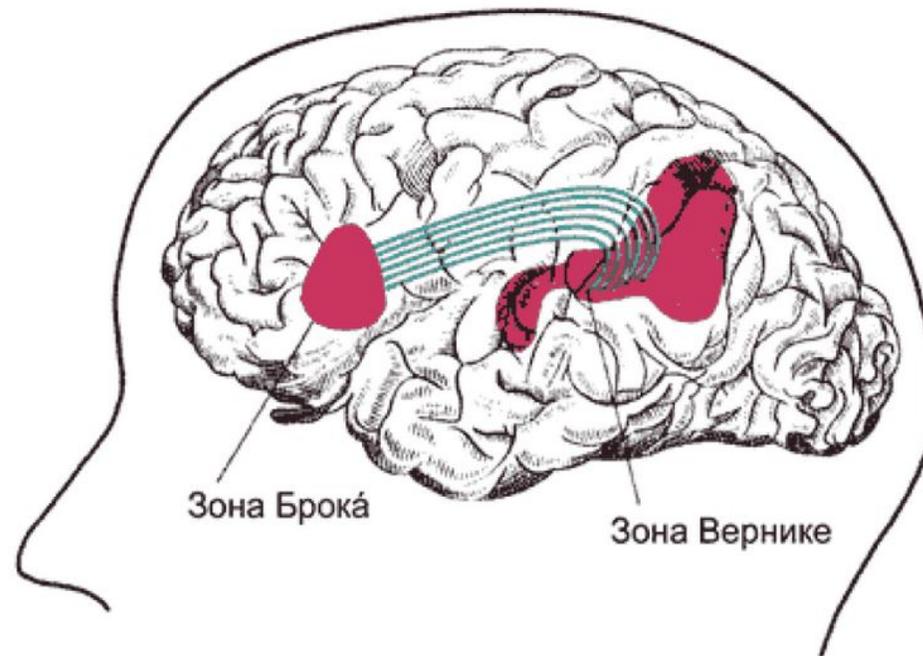


Первичная – височная доля, по границе боковой борозды.

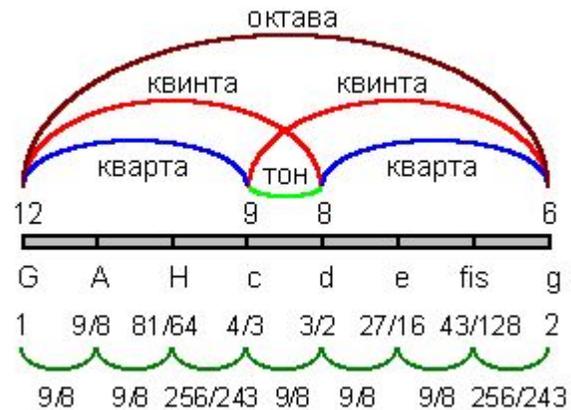
Завершение частотно-амплитудного анализа, наиболее точная тонотопическая карта.

В передних зонах – низкие частоты; особенно детально анализируется речевой диапазон – 50-500Гц; точность – до 1 Гц.

Способность к различению частот в значительной степени задана врожденно («абсолютный музыкальный слух»).



Консонансы. Пифагор. VI век до н.э. Лира Орфея.



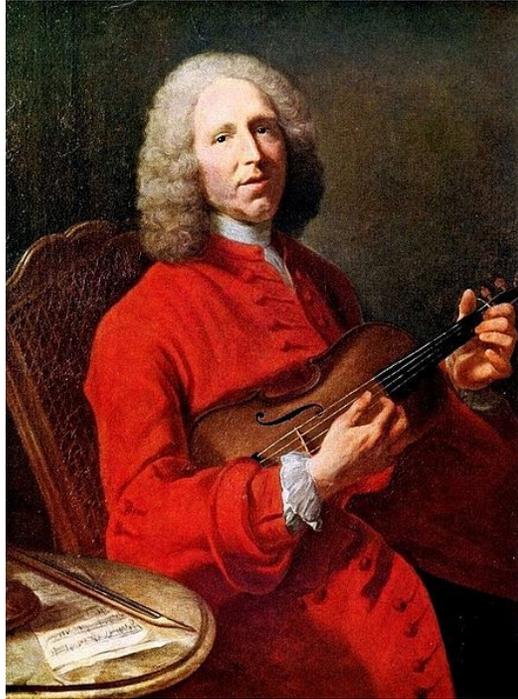
Базовый тетраксис Пифагора

6:8:9:12

8 и 9 – среднее арифметическое
и среднее гармоническое между
6 и 12 (октава)

Что соответствует интервалам
Квинта и кварта

Консонансы и диссонансы. Жан-Филипп Рамо. XVII век. Основной бас.



Основной бас – воображаемый звук,
приписываемый некой комбинации звуков.
Ясно слышен – консонанс,
Неясно слышен – диссонанс.

Основа – структура гармонического ряда.
Более консонансны те, что лежат внизу
гармонического ряда.

Плюсы:

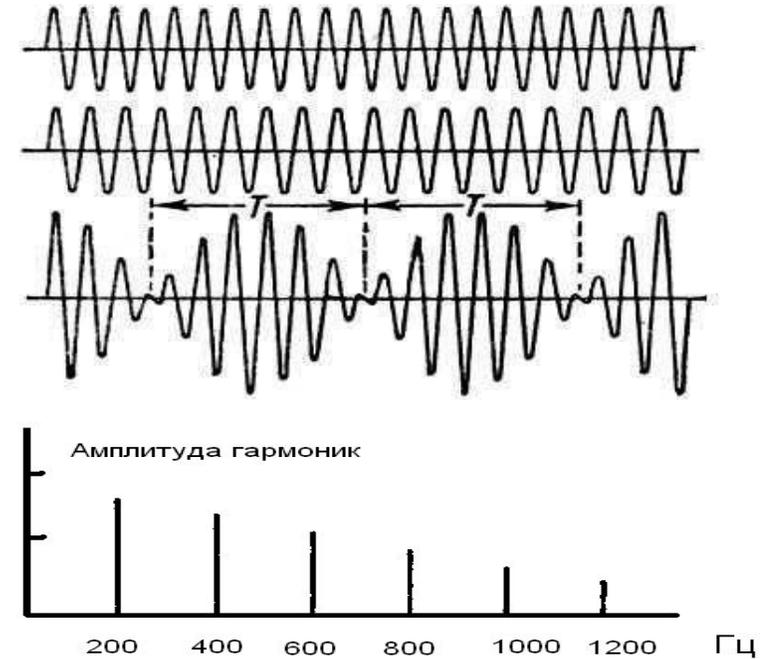
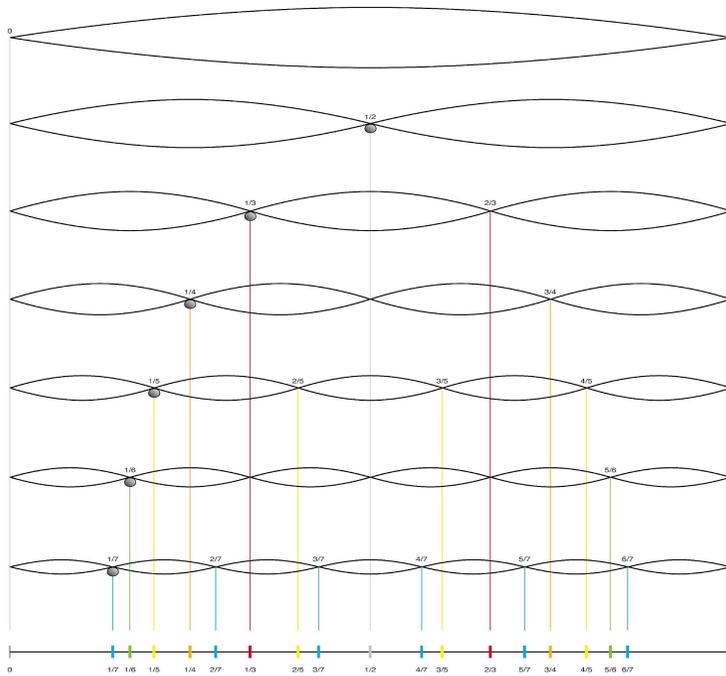
Легко объясняет консонантность октавы, квинты, кварты и пр.

Объясняет консонантность **мажорного трезвучия** с частотами **4:5:6**
(большая терция, малая терция, квинта)

Минусы:

Плохо объясняет консонантность **минорного трезвучия** **4:4,8:6**
(малая терция, большая терция, квинта)

Консонансы и диссонансы. Гельмгольц. XIX век.



Биения между основными тонами и/или между обертонами.

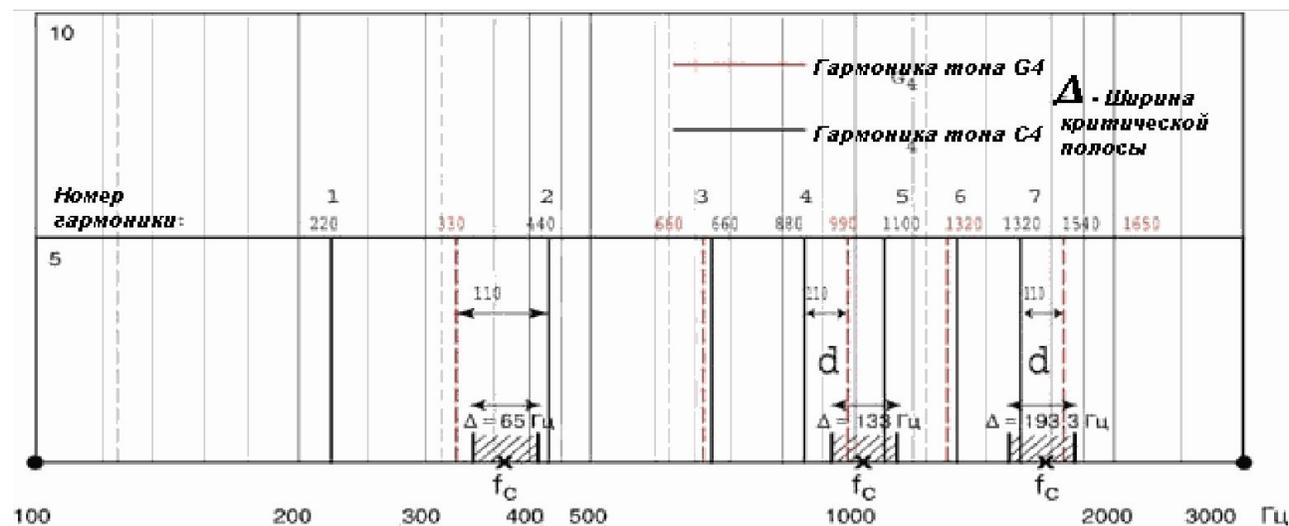
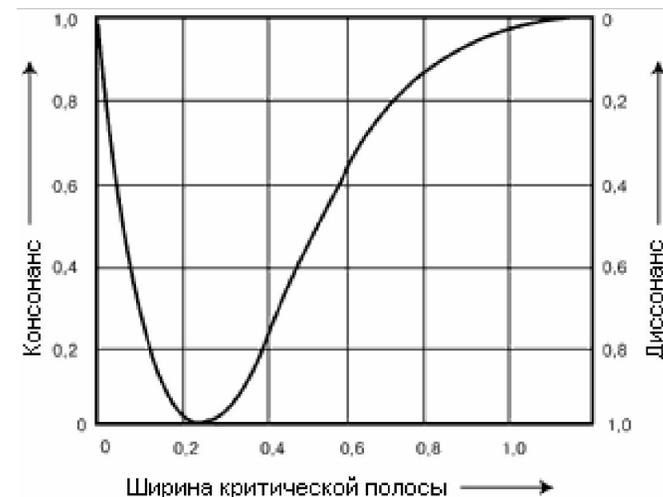
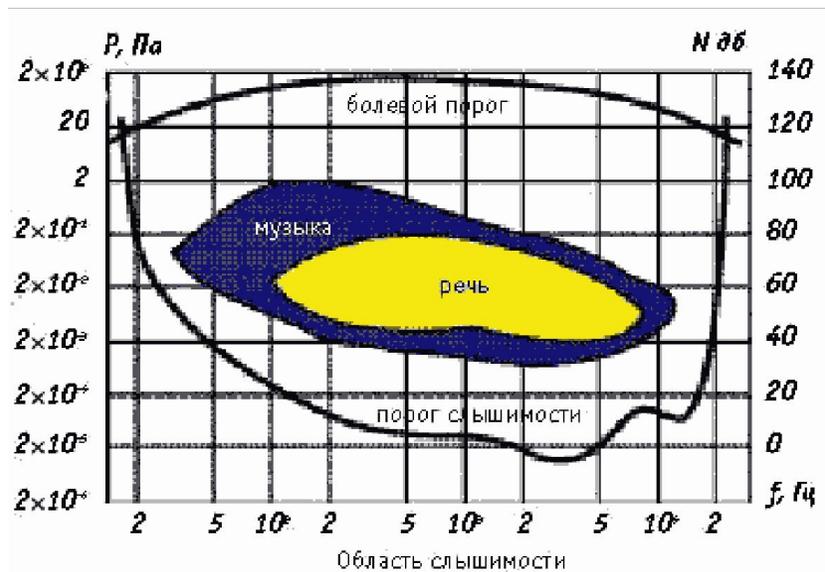
Консонансность/диссонансность зависит от тембра.

Самые противные биения – 10-30 колебаний в секунду.

Противоречия:

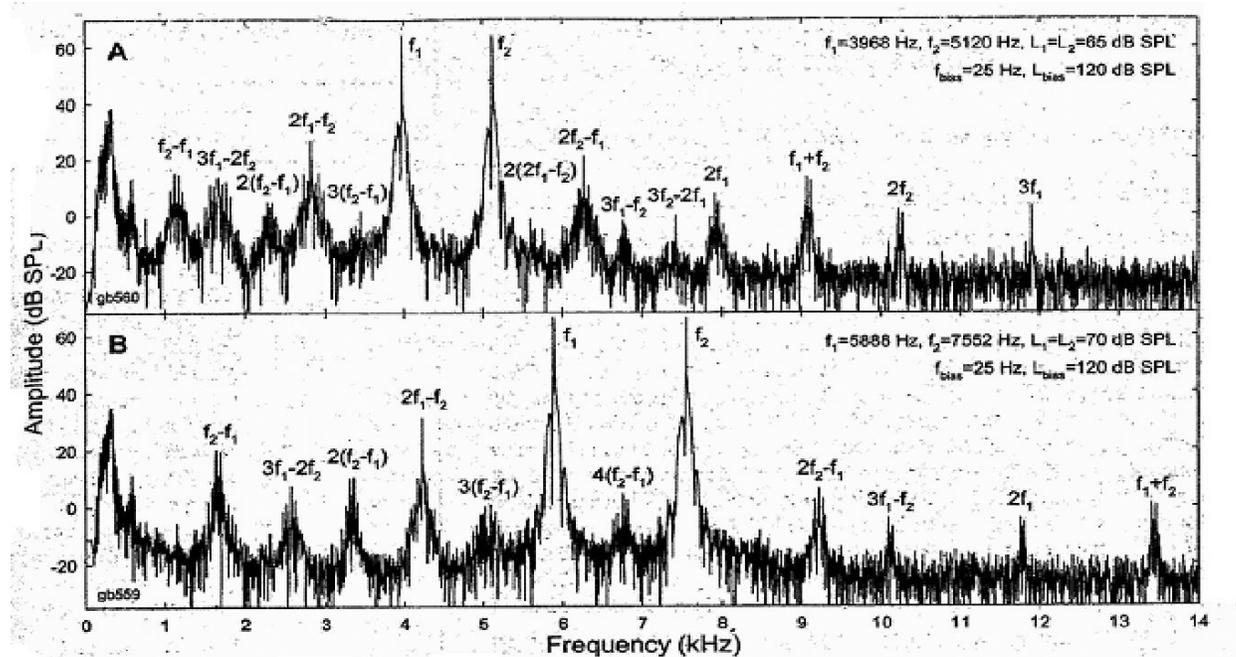
1. Почему «натуральная септима» $7/4$ – диссонанс, а сексты – консонанс?
2. Почему степень диссонансности меняется с высотой? (в нижней части рояля – большая секунда, в средней – малая секунда, в верхней – четверть тона)

Совершенные и несовершенные консонансы и диссонансы. Критические полосы. Бекеши и др. XX век.



Консонансы и диссонансы.

Стефанович М.А., Насретдинов А.А. XXI век. «Субъективные гармоника», комбинационные тоны.
Вызванная отоакустическая эмиссия (ВОАЭ).



Человек слушает
2 синусоидальных
тона одновременно.

Lin Bian "Spectral fine-structure of low-frequency modulated distortion product otoacoustic emissions"

Комбинационные тоны: (F_2-F_1) , (F_2-F_1) , $(2F_1-F_2)$, $(2F_2-F_1)$, (F_1+F_2) , $(3F_1-2F_2)$...

Для октавы – 2 группы частот. Для квинты – 3 группы. Для терции - 14 групп.

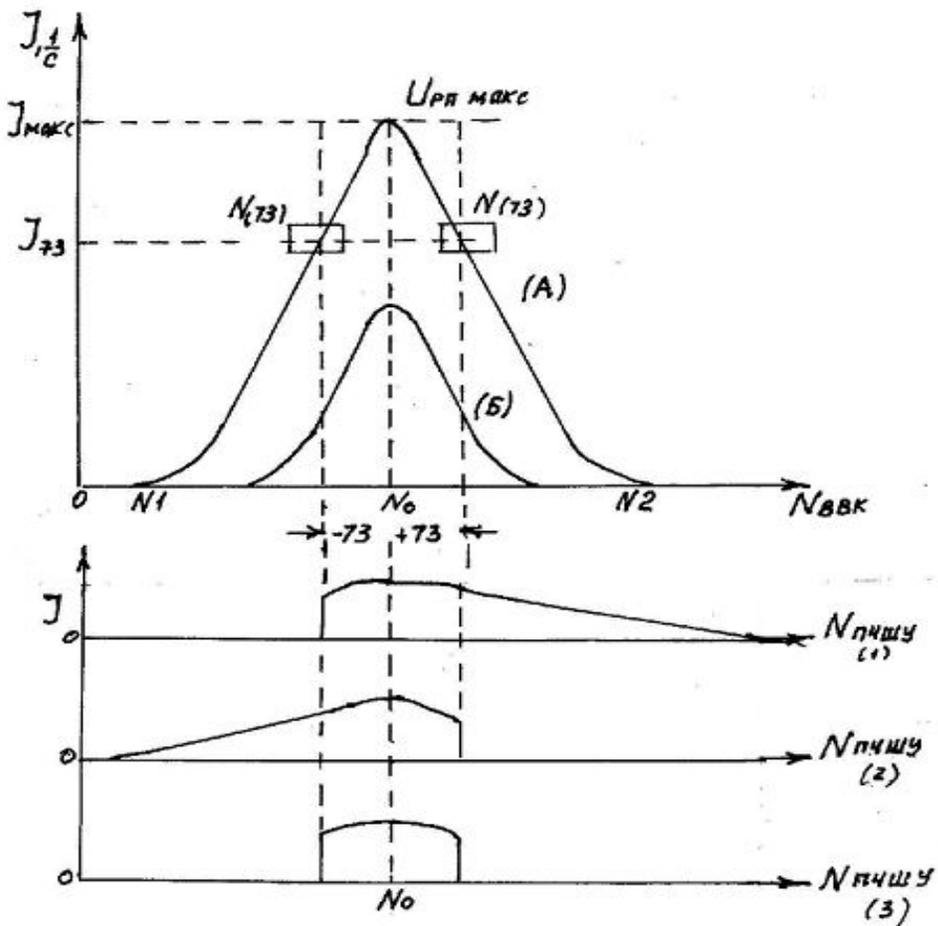
При диссонансе человек слышит одновременно много разных частот.

В том числе «октавные группы», «взаимно влияющие тоны», «отдельные тоны»

Расход биоэнергии на запоминание комплекса из многих разных частот

значительно больше. Циклы определения высоты звука в пределах одной критической полосы запускаются многократно и очень часто.

Формирование критической полосы, частотного канала (ЧК), 24 ЧК на ОМ, определение высоты звука



Выделение нейронов с порядковыми номерами (N_0-73), N_0 и (N_0+73).

Здесь: по оси абсцисс $N_{ВВК}$ – порядковые номера ВВК и слуховых нейронов $N_{сум.}$; по оси ординат – плотность импульсации в отн. единицах для нейронов $N_{сум.}$, $U_{рп}$ – рецепторный потенциал иннервируемых ВВК. ($N_1—N_2$) – группа ВВК с повышенным РП; А – огибающая группы возбужденных ВВК при восприятии тонального сигнала с громкостью 70 дБ над порогом слышимости, Б – огибающая группы суммирующих нейронов при восприятии тонального сигнала с громкостью 40 дБ. (N_0-73)—(N_0+73) – ширина ЧК.

Минимально необходимое смещение ТГВМ ($\Delta N_{ВВК}$) для возможности различения изменения частоты при восприятии тональных посылок с разной длительностью

$t, мс$	2	5	10	20	50	100	200
$\Delta N_{ВВК}$	101	51	35	20	11	8	6

Таблица 1. Спектр слышимых тонов при восприятии интервалов.

Интервал	Нота (примерно), F, Гц	Гармонические тоны, Гц	Комбинационные тоны
Октава-6т.	До - 262 До - 523	524-786-1046 1046-1569-2093	отсутствуют
Ч. квинта-3,5т.	До - 262 Соль - 392	524-786-1046 784-1176-1568	<u>130</u> -260-131-522-654-394
Ч. кварта-2,5т.	До - 262 Фа - 349	524-786-1046 698-1047-1397	<u>87</u> -174-174-436-611-88
ум.квинта-3т.	До- 262 Фа/д.- 370	524-786-1046 740-1110 -1480	<u>108</u> -216-153-478-632-46
Б. терция-2т.	До - 262 Ми - 330	524-786-1046 660-990-1318	<u>68-136</u> -193-398-592-126
М. терция-1,5т.	До - 262 Ми/б - 311.	524-786-1046 622-933-1244	<u>[49]-98</u> -193-360-573-475
септима -5,5т.	До – 262 Си - 494	524-786-1046 988-1472-1976	<u>232</u> -756-464-[30]-326-202

Примечание: Гармонические тоны: 2F-3F-4F; Комбинационные тоны:
(F2-F1)-2(F2-F1)-(2F1-F2)-(2F2-F1)-(F1+F2)-(3F1-2F2). Тоны с частотой 30 Гц и 49 Гц человек практически не слышит.

Таблица 2. Числовая характеристика для тонов слышимого спектра (Tufts et al.).

Интервал	F, Гц	Слышимые тоны, Гц	Характеристика	Кконс.
Octave K = 2,00	354 707	354,708,1062,1416,(707),(1414),2121,2828	ОГ: 2(6)	0,81
Perfect fifth, K=1,498	409 612	409,818,1227, 1636,612, (1224), 1836, 2448 203, (406), <u>1021</u> , (206), (815) Гц (203-206-406-409-818-815-1636) Гц (612-1227-1224-1836-2448); Гц	ОГ: 2 (8) ОТ: 0 ВВТ: 0	0,69
Perfect fourth K = 1,335	433 578	433, <u>866</u> ,1299,1732,578,1156,(1734),2312 145,290, <u>1011</u> ,(288), <u>723</u> ,(143) Гц (433-866-1732-1734); (143-145-288-290-578-1156-2312); 1299, 723, 1011 Гц	ОГ: 3 (7) ОТ: 1 ВВТ: 0	0,69
Major third K = 1,260	446 561	446,892,1338,1784,561,1122,1683,2244 1007,115,230,331, <u>676</u> ,216 Гц [216-230]; [892-1007-1122] Гц	ОГ: 3(8);ОТ:5 ВВТ: [216-230] [892-1007-1122]	0,53
Major second K=1,122	472 530	472,944,1416,1888,530,1060,1590,2120 58,216, <u>1002</u> ,414,588,356 Гц [356-414-472-530-588]; Гц	ОГ: 3(8);ОТ:5 ВВТ: [356-414-472!-530!-588]	0,4
Minor second K = 1,059	486 515	486,972,1458,1944,515,1030,1545,2060 <u>29</u> ,58,1001,457,544,428 Гц [428-457-486-515-544];	ОГ:2(6);ОТ: 7 ВВТ: [428-457-486!-515!-544]	0,3

Консонанс и диссонанс

Тоны с частотами, отличающимися менее чем на 15 %, попадают в один ЧК и образуют группу ВВТ – взаимно влияющие тоны. В этом случае человек слышит звуковой сигнал со средней частотой. Для любого созвучия можно составить матрицу с указанием разделения всех слышимых тонов на группы октавных тонов (ОГ), отдельные тоны (ОТ) и тоны ВВТ. При восприятии консонансного созвучия с октавным отношением частот человек слышит 6 отдельных тонов с разными частотами, или ОГ: 2(6). При восприятии диссонансного созвучия с отношением частот 1,122 человек слышит 14 тонов с разными частотами – ОГ: 3(8)+ОТ:6, из которых 10 тонов образуют 4 группы ВВТ.

При определении высоты отдельных тонов (ОТ) цикл определения высоты звука включается лишь один раз. При определении высоты взаимно влияющих тонов (ВВТ) цикл определения высоты будет включаться многократно, что приведет к существенному росту потребляемой биоэнергии при прослушивании интервалов (аккордов). Большой расход биоэнергии при сенсорном восприятии приводит к возникновению неприятных ощущений (ощущению диссонанса). Диссонанс отличается от консонанса наличием ОТ и групп взаимно влияющих тонов.

При прослушивании реальных музыкальных звуков (не чистых тонов) и сочетаний звуков необходимо учитывать также формирование групп ОТ, ВВТ за счет присутствующих в изначальном спектре звука гармоник и/или обертонов.