

# ЧТО ТОМАС ДАНЛИ УСЛЫШАЛ В КАМЕРЕ ЦАРЯ ПИРАМИДЫ ХУФУ

## Интродукция

Техническое предисловие обязательно в данном случае должно предварять изучаемый текст, иначе ни сам текст, ни комментарии к нему не окажутся понятными.

Переписывать сюда учебники по акустике я не стану и попытаюсь некоторые штуки объяснить на пальцах. Получится правильно, но поверхностно, неполно.

Если кому-то действительно всё это важно и интересно – роите книги и интернет, спрашивайте в форуме или по электронной почте. Разыскать можно всё. Главное, при поиске не доверять любителям «неизвестной энергии» с патологическим мышлением и стремлением всё объяснить, ничего не узнавая.

В общем (и более чем кратко) – так:

## 1. О резонансах

**Звук** – колебательное движение частиц упругой среды, распространяющееся в виде волн в газообразной, жидкой или твердой средах.

**Звуковая волна** – распространяющаяся от источника звука зона чередования областей среды и пониженным и повышенным давлением. Характеризуется амплитудой изменения давления, частотой, периодом, длиной и скоростью распространения.

Имеем параллелепипедное помещение с совершенно жёсткими и практически идеально отражающими стенами (Камера Царя в Пирамиде Хуфу), заполненное средой, проводящей звук, воздухом.

Воздух, заполняющий это помещение – система. Да, в данном случае, система - только «кусок» воздуха, ограниченный с шести сторон незыблемыми границами, отражающими плоскостями.

Любая система должна обладать **собственными частотами**. В спокойном, равновесном состоянии системы они никак не проявлены. Но, стоит систему вывести из равновесия, в нашем случае – издать (возбудить) внутри помещения звук, как система обязательно проявит свои собственные частоты (их – бесконечное множество), самая низкая из которых называется главной. Амплитуда, т.е., громкость звука на собственных частотах помещения возрастёт.

Физика существования собственных частот у «куска» воздуха, находящегося в помещении с жёсткими стенами, – образование **стоячих волн** звука: отражённая от стены волна, возвращаясь **в фазе** к посланной волне, суммируется с ней, подпитывая её своей энергией и увеличивает результирующую амплитуду, т.е., громкость. Явление возрастания амплитуды звука при приближении частоты возбуждающего сигнала к собственной частоте системы называется **резонансом**.

Расстояние от максимума до следующего максимума волны в пространстве называется **длиной волны**. Длина волны связана со **скоростью** её **распространения** и частотой так:

$$f = c / L, \text{ где } c - \text{ скорость звука, } f - \text{ частота, } L - \text{ длина волны.}$$

Если в характерном габарите помещения (например, в его длине) точно укладывается некое (одна и более) количество **ПОЛОВИН** длин звуковых волн, то соответствующие этим длинам частоты и являются собственными частотами помещения. Резонансные частоты помещения называют ещё **модами** (не только помещения, это понятие шире, но мы говорим о помещении) .

Если в одном из габаритов помещения, например, уложится ровно одна полная длина волны, а в другом габарите – полторы длины волны той же частоты, то это – две разные моды, имеющие одну и ту же частоту.

У нашего помещения – три габаритных размера. Траектории распространения и переотражения звуковых волн, строго говоря, – любые, но стоячие волны возникают только на осевых (параллельные рёбрам параллелепипеда), касательных (параллельные граням) и косых лучах.

Осевые моды помещения (особенно, конечно же, первые из них) при резонансах дают наибольшие амплитуды.

Самая низкая из них – главная резонансная частота помещения.

## 2. Не о резонансах

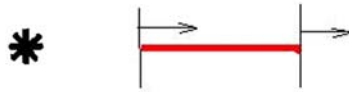
Точнее - так: **о не-резонансах**.

В помещении со слабым звукопоглощением стен наблюдается явление послезвучия: после прекращения действия источника звук исчезает не мгновенно, а постепенно замирая.

Включаем воображение.

Источник звука поначалу молчит. Вот его включили, он начинает издавать звук. Передний «край» волны двинулся вперёд со скоростью звука. Вот источник выключили, он прекратил издавать звук, но в пространстве осталась движущаяся в прежнем направлении звуковая волна, возмущающая последовательно всё более далёкие от замолчавшего источника области пространства, заполненного воздухом.

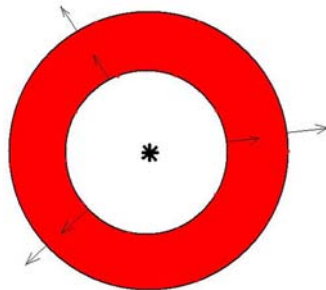
Движущийся «отрезок звука», имеющий в пространстве протяжённость (доли метров, метры, десятки, сотни, тысячи метров), имеющий переднюю и заднюю границы и имеющий протяжённость во времени (доли секунд, секунды, минуты):



Звёздочка – уже выключенный источник звука,  
стрелки – движение фронта и тыла «звукового отрезка».

Когда передний край звуковой волны достигает наблюдателя, наблюдатель начинает слышать звук, когда его минует задний край звуковой волны, звук для наблюдателя прекратится, продлившись ровно столько времени, сколько звучал источник.

Мы говорили о некоем звуковом пучке, луче, движущемся в сторону наблюдателя. В действительности, звук распространяется от источника сферической волной и «отрезок звука», о котором шла речь, в действительности – сферический слой: сферический фронт и сферический тыл, между которыми – сферический слой звука.



Звёздочка – уже выключенный источник звука,  
стрелки – движение фронта и тыла сферического «звукового слоя».

Если на пути такого сферического «звукового слоя» окажется отражающая плоскость, то ясно, что условные звуковые лучи, веером расположенные в толще «слоя» достигнут её поверхности не одновременно и отразятся не одновременно, а значит, и наблюдателя достигнут не одновременно. Когда для наблюдателя звучание луча, пришедшего первым, уже оборвётся, звук второго всё ещё будет длиться и т.д.

Если источник находится в помещении, все лучи, расположенные в слое веером, отражаясь от стен, пола и потолка, переотражаясь от стены к стене, к полу, к другой стене и т.д. создадут поле мнимых источников звуковых пучков с самыми разными временами задержки начала и окончания звучания. Некоторые из них (те, которые обладают уже известными нам свойствами) образуют стоячие волны на модах помещения с соответствующим увеличением амплитуд звучания.

Важно то, что при внезапном включении источника звука мнимые источники появляются последовательно друг за другом, а после выключения источника звука мнимые источники исчезают в той же (начальной) последовательности. Звук постепенно затихает.

Явление послезвучия называется **реверберацией**, а время, прошедшее с момента выключения источника до момента затихания – **временем реверберации**.

Люди, не отягощённые знаниями, попадая в пирамиду, в подземный переход или кафельный общественный туалет, и наблюдая там реверберационные явления, восклицают: «Какой сильный резонанс!».

Спектр собственных частот любого помещения – спектр, хоть и бесконечный, но **ДИСКРЕТНЫЙ**. А в диапазоне спектральных возможностей человеческого голоса, т.е. в диапазоне низких частот – «более чем дискретный»: моды расположены редко. Чтоб попасть точно в моду помещения, надо постараться. А восклицают - то обычно, восхищаясь тем, что «резонирует с КАЖДЫМ звуком» голоса, гитары, флейты и т.п. Гулкость и эхо – в девяноста случаях из ста - не резонанс, а РЕВЕРБЕРАЦИЯ. А реверберация в помещении «происходит» действительно с КАЖДЫМ звуком...

---

Теперь – текст Томаса Данли, проведшего акустические измерения в Камере Царя Пирамиды Хуфу.

## **Большая Пирамида: Ранние Отражения & Древние Эха**

**Том Данли**

*(Лирика опущена. Примечания в конце текста.)*

...Несколькими годами позднее тот же продюсер звонит из небытия и спрашивает, не хочу ли я «выяснить, почему внутренность Пирамиды столь странно звучит». Это будет нужно для нового фильма...

...беглое изучение Пирамиды показало, что задача существенно сложнее, чем я предполагал. В ней над Камерой Царя есть ряд помещений, несколько этажей, намекающих на то, что это – не «простая» акустическая система. Грубая прикидка (я подчёркиваю, грубая) частоты резонанса гранитных балок потолка в Камере даёт что-то около 300Hz. Несколько менее грубая оценка (Камеры) как резонатора Гельмгольца при линейной модели распространения (звука) предполагают частоты резонансов, начинающиеся от 2,5Гц, или около того...

(1) ...Я упаковал две системы громкоговорителей для воспроизведения тест-тонов; первую – для тонов выше 100Гц и вторую, гораздо крупнее, – для более низких. Обе были отправлены в запечатанных ящиках вместе с усилителем мощности, моим верным анализатором спектра TEF -12, микрофоном V&K, акселерометром и бухтой кабеля...

(2) ...Камера Царя – почти 40фт(12,2м) длиной, 20фт(6,1м) шириной и 20фт(6,1м) высотой. Стены, пол и потолок целиком сделаны из красного гранита. Гранитные блоки, формирующие стены – огромны. Тот, что над входом – около 8фт(2,4м) высотой, 14фт(4,3м) длиной и 5фт(1,5м) толщиной. Более того, все блоки установлены так плотно, что между ними не вставишь и кредитную карточку. Они поразительно высококачественно отшлифованы...

(3) ...на счёт «акустики» в Камере Царя. Вообразите "livist room" (эхо-камеру), в которой вы когда-либо вели измерения, а затем удвойте воображённое. Камера акустически "твёрда как скала": здесь - минимум 200ft(61m) камня за любой из стенок...

...Большая Пирамида оказывалась в нашем распоряжении каждый вечер после 20:00, когда уезжал последний из туристов, и оставалась только охрана...

(4) ...Когда осветитель проложил сетевой кабель (240В, 50Гц) и установил трансформатор, настал наш черёд. Я выбрал места у стен Камеры Царя, чтобы устанавливать своё оборудование. Установив источник у одной стены, а микрофон у противоположной, я был готов приступить.

(5) Я настроил параметры «закрытого ящика» НЧ громкоговорителя (чья АЧХ должна быть приблизительно согласована с «АЧХ» Камеры), что должно было позволить вести эффективные измерения на ультранизких частотах (LF).

Продюсер желал получить для фильма чистый звук, и он попросил, чтоб я на практике отстроил уровень громкости. Я включил первый тон удобного (для кино) уровня, медленно (1,1Гц/сек) скользящий вниз от 200 до 10Гц. Около 90Гц я отметил сильную моду помещения, звучание действительно стало энергичнее.

Но что действительно заставило всех броситься к выходу, так это резонанс около 30Гц. (6) Тут я прервал эксперимент. Это был хороший резонанс, чёткий и сильный, насмерть перепугавший нескольких членов команды.

Честно говоря, меня он тоже зацепил. Высокодобротные резонансы на низких частотах очень впечатляют! Конечно, шансов, что произойдёт что-то нехорошее - немного, но если произойдёт – мало не покажется! Из-за нежелания прославиться в качестве первого современного человека, похороненного в Пирамиде, я переместил TEF и переместился сам из Камеры Царя во входной холл.

В измерениях я провёл там нескольких ночей и без происшествий был снят для фильма. (6.1) Я тщательно зарегистрировал распределение мод комнаты и примечательно, что Саркофаг из красного гранита проявил несколько резонансных мод, который непосредственно соответствовали модам Камеры. (6.2)

Лежа в саркофаге, вы обнаружите, что почти бесполезно «мычать» любые ноты кроме тех, что имеют отношение к его основным резонансам. Но когда вы, лёжа там, «мычите» около «правильной» частоты, легко добиться чтоб она показалась очень громкой. Однако для любого, стоящего около вас, это совсем не громко. Кроме того, когда вы лежите, (7) внешние звуки, собирающиеся отовсюду, окрашивает голоса других людей, делая их совсем как у Дарта Вейдера...

(8) ...Ещё выяснилось, что любое дуновение ветра над внутренними вентиляционными шахтами Пирамиды, особенно когда Пирамида была новой и гладкой, было подобно дутью над горлышком бутылки из-под Кока-Колы. Давление ветра создавало гармонический инфразвук в Камере ровно на частоте в 16 Гц.

(9) Будучи музыкантом, я был живо заинтересован обнаружить музыкальную комбинацию резонансов, которая формировала бы аккорд F-sharp (Фа#-мажор). Древние тексты египтян указывают, что аккорд Фа-диез был резонансным гармоническим центром планеты Земля. Аккорд Фа-диез, кроме того (случайное совпадение?), - образец настройки для священных флейт многих туземных американских шаманов.

Продюсер и его команда жаждали запечатлеть меня, устанавливающего акселерометр на огромных балках из красного гранита, составляющих крышу Камеры Царя. Их вес доходит до 90 тонн (91.444кГ)...

Насколько акселерометр был фотогеничен и хорош для фильма, настолько измерения им оказались неинформативными. Сигнал полностью утонул в 50-ти герцовом фоне и других электрических помехах.

Под рукой у меня был DAT магнитофон, которым я записывал тестовый и микрофонный сигналы (в Камере Царя) для последующего анализа.

Позже, дома, в течение нескольких месяцев попыток с помощью программы Nuresertion понять, что ещё можно выудить из ленты DAT, я обнаружил некоторые вещи, которые на месте не удавалось увидеть на анализаторе TEF. (Теперь) TEF показывал большой ряд мод Камеры Царя немного ниже 20 Гц.

Во время спектрального анализа пауз между скольженьями тона, или просто в тихих моментах записи, я обнаружил звук очень низких частот, резонансы в диапазоне от нескольких до 15-20Гц, или около того. По крайней мере, некоторые из них были те же, что я получал, работая со скольжением тона, но не все. Эти звуки присутствовали, даже в тишине. (9.1)

(9.2) Я поиграл результатами измерений, и передал их музыковеду, который был частью команды. Как я и предполагал, он идентифицировал реализации частот, грубо формирующие аккорд Фа-диез.

Не все резонансы попадали на нужные места, но многие, а некоторые повторялись во многих октавах. Другими словами, существовал приблизительный «много октавный» Фа-диез аккорд.

## Примечания

(1) ...анализатором спектра TEF -12, микрофоном B&K , акселерометром...

К сожалению, г-н Данли не сообщает полосы пропускания анализатора спектра (похоже, узкополосный, если о результатах он судит «узкополосно»). В одних случаях он пишет «около 90Гц», или «около 30Гц», в других – смело «ровно 16Гц». Нехорошо... Некрасиво, некорректно специалисту делать такие отписки.

Микрофоны датской фирмы Брюль&Кьер – прекрасные широкополосные конденсаторные измерительные микрофоны (не электретные, по большей части) с изумительными, идеально плоскими частотными характеристиками.

Акселерометр – виброакустический датчик, предназначенный для измерения вибрационных ускорений.

(2) ...Камера Царя – почти 40фт(12,2м) длиной, 20фт(6,1м) шириной и 20фт(6,1м) высотой.

В действительности Камера Царя имеет иные габариты: 10,4м x 5,2м x 5,8м.

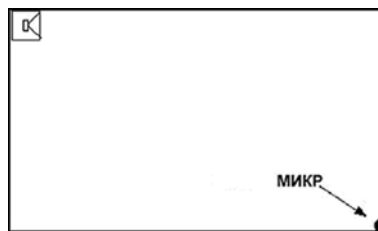
### (3) Камера акустически "тверда как скала."

Это – грустная правда. Специалист-акустик даже и мечтать не может о столь идеальной эхо-камере для постановки экспериментов с модами и реверберацией. Нет в мире акустических лабораторий, имеющих эхо-камеры подобных габаритов и с подобными параметрами отражения и жёсткости стен. Посмотрите таблицу в справочном разделе. Гранитные стены камеры имеют практически идеальную отражающую способность для колебаний воздуха в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот. Поглощение и рассеяние звуковой энергии стенами практически отсутствуют. Мечта!

(Истины ради, стоит добавить, что в абсолютном большинстве случаев акустикам гораздо больше пользы приносит заглушённые камеры со стенами с максимальным коэффициентом поглощения, но это – совсем другая история...)

### (4) ... Установив источник у одной стены, а микрофон у противоположной, я был готов приступить.

Не самое изящное, пожалуй, размещение источника и приёмника звука. Г-н Данли (м.б., в услугу кинематографии) заведомо пошел на огрубление точности измерений. Такое расположение источника звука и микрофона не даёт однородного акустического сопряжения с комнатными модами. В результате источник не поставляют энергию однородно всем существующим модам, а приёмник размещён не в том месте, где он мог бы «услышать» эффекты даже от тех мод, что возбуждены.



Размещение источника на полу в самом углу Камеры обеспечило бы возбуждение всех мод низких порядков (в любой точке пересечения трех плоскостей комнаты – пол, стена, потолок – все моды имеют зону высокого давления). Размещение микрофона в противоположном углу у пола или потолка обеспечило бы детектирование всех этих мод.

Выдвижение источника из угла сразу же меняет характер возбуждения мод, а перенос микрофона в другое место «меняет» моды, на которые он реагирует.

(5) Я настроил параметры «закрытого ящика» НЧ громкоговорителя (чья АЧХ должна быть приблизительно согласована с «АЧХ» Камеры) Речь – о коррекции частот срезов и углов наклонов амплитудно-частотных характеристик фильтров в «закрытом ящике НЧ громкоговорителя» в соответствии с ожидаемым распределением мод помещения.

(6) Около 90Гц я отметил сильную моду помещения. ... Но что действительно заставило всех броситься к выходу, так это резонанс около 30Гц.

90Гц – пятая осевая мода Камеры Царя на её самом «длинном» габарите, 10,4 метра, «около 30Гц» – первая осевая мода «на ширине» Камеры Царя. Понятно, что такое ПЕРВАЯ ОСЕВАЯ мода?

### (6.1) Я тщательно зарегистрировал распределение мод комнаты

Неплохо бы посмотреть табличку. Данная публикация г-на Данли, к сожалению, оной не содержит... К тому же Данли ничего не говорит о температуре воздуха в Пирамиде, при которой производились измерения. При разных температурах результаты бы прилично различались. Длина волны для сигнала некой данной частоты напрямую зависит от скорости распространения звука в среде.

(6.2) ... Саркофаг из красного гранита проявил несколько резонансных мод, который непосредственно соответствовали модам Камеры. Данли, думается, не накрывал саркофаг гранитной крышкой, когда смотрел распределение его мод. Значит его вывод о «непосредственном соответствии мод Камеры модам Саркофага» - ммммм, как бы сказать... – лукавство... Источник звука, помещённый в Саркофаг, безусловно возбуждал и непосредственно моды Камеры, а приёмник, помещённый, как я понимаю, туда же, фиксировал всё, что в него попадает, в том числе и моды Камеры.

Но, в любом случае утверждение Данли о «соответствии» никак не может противоречить истине, поскольку спектры собственных частот Саркофага и Камеры – бесконечны и не могут не иметь близких собственных частот по определению!

(7) внешние звуки, собирающиеся отовсюду, окрашивает голоса других людей, делая их совсем как у Дарта Вейдера...

*Цитата:* «Реверберация существенно влияет на качество и речевого, и музыкального звучания. Чрезмерная длительность реверберации приводит к тому, что новые слоги речи звучат на фоне предыдущих затухающих слогов.

Разборчивость речи при этом ухудшается. При коротком отзвуке разборчивость речи вполне удовлетворительна, но своеобразная "безжизненность", "стерильность" такого звучания воспринимается так же, как недостаток...»  
<http://dom.hi-fi.ru/doc/read.php?id=1870>

(8) ...было подобно дутью над горлышком бутылки из-под Кока-Колы. Давление ветра создавало гармонический инфразвук в Камере ровно на частоте в 16Гц.

Данли, всё же не уточняет, проводил ли он такое измерение, и говорит только, что так было, когда Пирамида была новой. 16Гц, это измеренная частота, или расчётная?

«Вентиляционную шахту», в совокупности с Камерой Царя нельзя рассматривать в качестве резонатора Гельмгольца, коим действительно является «бутылка из-под Кока-Колы» (см ниже). Слишком велики длины шахт (L южной = 50,3 м, L северной = 68,6 м) относительно их сечения и размеров Камеры.

Это, скорее, трубчатый резонатор со спектром собственных частот:

$$F = \frac{C_0}{4L}(2p - 1)$$
$$p = 1, 2, 3, \dots$$

При длине резонатора около 60м его первая мода (p = 1) с наибольшей амплитудой оказывается близкой к полутора герцам (1,69Гц – южная и 1,24Гц – северная, для C=340м/с), такие колебания воздуха даже инфразвуком назвать трудно. Если Данли ТОЧНО знал, что в момент измерения был порыв ветра и ОДНОЗНАЧНО именно он вызвал генерацию звука в 16 Гц, пришедшего в Камеру ИМЕННО из шахты, то это была примерно шестая из мод в спектре собственных частот резонатора. А насчёт «ровно» 16Гц Данли немного лукавит.

Более низкие из спектра собственных частот шахт Данли просто нечем было измерить.

Микрофон, даже «брюлевский», это – только микрофон, прибор для регистрации ЗВУКА (см. в приложении частотный диапазон одного из таких прекрасных, без преувеличения, микрофонов). А анализатор спектра должен иметь огромные времена интегрирования для обработки столь низких частот в изучаемом спектре. Здесь лучше использовать микросхемы памяти, а не конденсаторное накопление. Временных параметров TEF -12 я не сумел разыскать, но в любом случае, микрофон и сам всё испортил бы на корню.

Думаю, пункт (9.1) имеет отношение к пункту (8).

(9) (9.2) Будучи музыкантом... Характерное для музыкантов гуманитарное легкомыслие (вы знакомы с музыкантами?) в этой точке исследований отодвинуло профессионализм г-на Данли в акустике на второй план. Профессионал не стал бы ожидать чистого необращённого аккорда F # (Фа-диез мажор) от помещения таких пропорций и таких габаритов. Чистые тоны (первые гармоники) аккорда F # в суб-контр-октаве (не обращенное мажорное трезвучие имеет от тоники интервалы: два тона – полтора тона):

f # 23,13Гц - a # 29,14Гц – c# 34,65Гц

Чтоб первые осевые моды оказались на названных частотах, оно должно иметь размеры 8м x 6,35м x 5,34м.

И вообще, для того, чтоб сформировать любое мажорное трезвучие (частоты тонов примерно относятся как 1:1.25:1.5) из первых осевых мод, помещение должно иметь длины сторон, соотносящиеся в обратной пропорции.

Если пытаться составлять нужное трезвучие данного (правильного, «мажорного») помещения из осевых, касательных и косых мод более высоких порядков, то амплитуды нот, составляющих трезвучия, окажутся непредсказуемо неравными и существенно меньшими, чем из трёх первых осевых. И аккорды получатся обращёнными с разбросом нот по всему ряду октав.

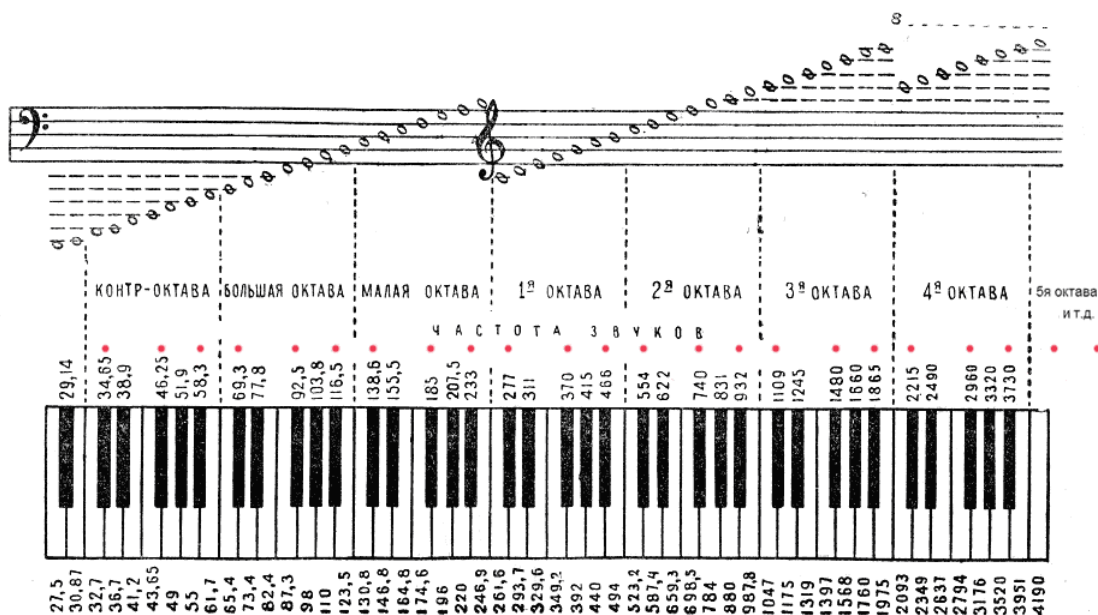
В Камере Царя, имеющей совершенно «не мажорное» соотношение габаритов совершенно исключено получение мод со схожими амплитудами на тонах чистых (не обращённых) мажорных трезвучий. Вот г-н Данли и получил то, что должен был получить:

...идентифицировал реализации частот, грубо формирующие аккорд Фа-диез. Не все резонансы попадали на нужные места, но многие, а некоторые повторялись во многих октавах. Другими словами, существовал приблизительный «много октавный» Фа-диез.

Более того, НЕ МОГ НЕ ПОЛУЧИТЬ, поскольку в дискретном спектре собственных частот Камеры Царя этих самых собственных частот содержится бесконечное множество и среди них (особенно в верхней части спектра) всегда можно отыскать тоны, «грубо» соответствующие нужному трезвучию, а в произвольном обращении – тем более.

Контр-октава f # 46,25Гц - a # 58,3Гц – с# 69,3Гц  
 Большая октава f # 92,5Гц - a # 116,6Гц – с# 138,6Гц  
 Малая октава f # 185Гц - a # 233Гц – с# 277Гц  
 Первая октава f # 370Гц - a # 466Гц – с# 554Гц  
 Вторая октава f # 740Гц - a # 933Гц – с# 1109Гц  
 Третья октава f # 1480Гц - a # 1866Гц – с# 2218Гц

Частоты из приведённого списка, произвольно в любом порядке скомбинированные в тройки f # - a # - с#, составят произвольные обращения аккорда F#.



...не хочу ли я «выяснить, почему внутренность Пирамиды столь странно звучит»...

Следует сказать, что «внутренность Пирамиды» звучит совершенно нормально. Звучит именно так, как должна звучать в соответствии с акустическими расчетами. Абсолютно ничего экстраординарного не наблюдается. Всё давно изучено, описано и широко применяется в архитектурной акустике. Ничего таинственного. Всё настолько обычно, что даже скучно...

Далее – справочный раздел.