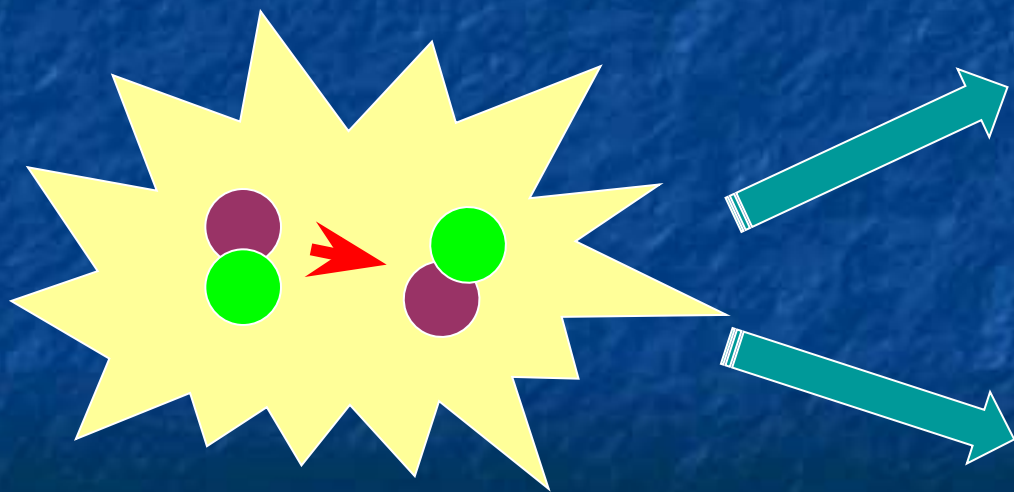


*Evidence for Nuclear Emissions  
During Acoustic Cavitation*  
R. P. Taleyarkhan et al. Science 295, 1868 (2002)

# Акустический термояд?

Энергия налетающей  
частицы 1 MeV

Энерговыделение  
3.3 MeV



2 MeV

4 MeV



## НЕКОТОРЫЕ ФАКТЫ

- Управляемый термоядерный синтез использует ядерную энергию, выделяющуюся при слиянии легких ядер - водорода или его изотопов дейтерия и трития. Реакции синтеза распространены в природе, будучи источником энергии звезд (в частности, Солнца).
- Необходимое условие для того, чтобы реакция пошла - это достижение высокой температуры (**сто миллионов градусов**). Только в этом случае частицы могут преодолеть электростатическое отталкивание и при столкновении (хотя бы на короткое время) приблизиться друг к другу на расстояние, при котором возможна реакция.
- Кроме высокой температуры, для положительного выхода энергии нужно, чтобы время жизни плазмы,  $t$ , помноженное на плотность реагирующих ионов,  $n$ , было достаточно велико:  **$n t > 5 \times 10^{14} \text{ с/см}^3$** . Последнее условие называется **критерием Лоусона**.
- Существуют огромные запасы топлива для термоядерной энергетики. Дейтерий - это широко распространенный в природе изотоп, который может добываться из морской воды. Тритий будет производиться в самом реакторе из лития. Запасы дейтерия и лития достаточны для производства энергии в течении многих тысяч лет
- Теоретически один литр обычной воды может дать столько же энергии, сколько 300 литров бензина.

## НЕКОТОРЫЕ ФАКТЫ (продолжение)

- Ядерный синтез уже освоен человеком в земных условиях, но пока не для производства мирной энергии, а для производства оружия он используется в водородных бомбах.
- Начиная с 1950 годов, в нашей стране и параллельно во многих других странах проводятся исследования по созданию управляемого термоядерного реактора. С самого начала стало ясно, что управляемый термоядерный синтез не имеет военного применения. В 1956 г. исследования были рассекречены и с тех пор проводятся в рамках широкого международного сотрудничества.

## ЦИТАТЫ

**Л.А. Арцимович:** « ...первый термоядерный реактор будет построен тогда, когда это будет нужно человечеству».

**П.Л. Капица:** Нобелевская лекция была посвящена управляемому термоядерному синтезу, а не проблеме сверхтекучести

**В.Л. Гинзбург** ("Наука и жизнь", 2000) Список "особенно важных и интересных проблем" 1999 г. : 1) Управляемый ядерный синтез; 2) ...

# ТОКАМАК

## Тороидальная камера с магнитными катушками

В Советском Союзе были построены токамак-7 (Т-7), токамак-10 (Т-10), токамак-15(Т-15). В США был введен в действие испытательный реактор-токамак "TFTR" (на нем была достигнута рекордная температура плазмы - 200 миллионов градусов).

**Е. Велихов (2000 г.):** В 2011-м будет зажжена первая плазма - сначала мы будем работать с водородом, потом с дейтерием, потом с тритием, потом, в 2020-2022 годах, начнется его эксплуатация с выяснением всех деталей, изучением устойчивости работы и т.д. Если все пойдет как намечено, то к 2030 году можно будет построить первую демонстрационную электростанцию.



## ЛАЗЕРНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ



**В.Л.Гинзбург** : Суть лазерного термояда в следующем. Стеклянную ампулу с небольшим количеством смеси дейтерия с тритием со всех сторон облучают мощными лазерными импульсами. Ампула испаряется, а световое давление сжимает ее содержимое настолько, что в смеси "зажигается" термоядерная реакция. Обычно она проходит со взрывом, эквивалентным порядка 100 кг тротила. **Строятся гигантские установки, но о них мало известно в силу засекреченности: на них, видимо, надеются имитировать термоядерные взрывы.**

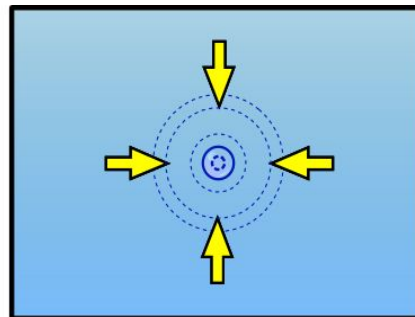
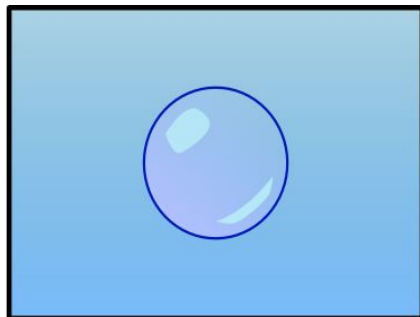
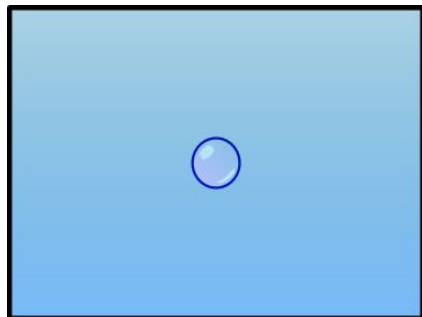
17.4.2001

В США проведен эксперимент по имплозии (направленный внутрь взрыв) шарика из сжиженной смеси дейтерия и трития с помощью самого мощного лазера в мире - Omega, имеющего размеры с футбольное поле и находящегося в Ливерморской национальной лаборатории (Livermore National Laboratory).

Идеально круглый шарик диаметром 1 мм, в пластиковой оболочке и охлажденный до температуры - 253 °С облучался **с 60 направлений лазерными пучками** продолжительностью меньше одной миллиардной доли секунды. За это время его температура поднималась примерно до **28 млн. градусов**, т.е. в два раза выше, чем в центре Солнца. При этой температуре происходило слияние ядер дейтерия и трития с выделением энергии - термоядерная реакция. **Длительности импульса, однако, было недостаточно, чтобы баланс энергий был положительным.**

# СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ: Некоторые факты

**1934 год: Обнаружено явление сонолюминесценции: излучение света при схлопывании пузырьков воздуха в воде под действием звука. Обычно в воде есть множество пузырьков, которые схлопываются не по одному, а объединившись в группы. В спектре излучения при многопузырьковой сонолюминесценции наблюдается эмиссионная линия ОН.**

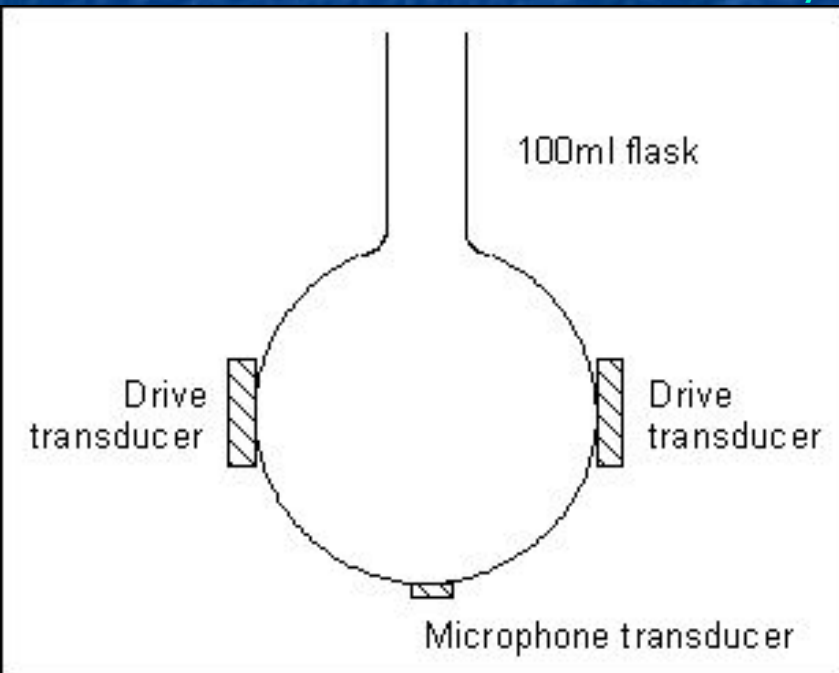


# Сонолюминесценция одиночного пузырька

**1998 год (Гэтан и Крам):** Наблюдалось схлопывание одиночных пузырьков, созданных с помощью сфокусированной звуковой волны, однако линия ОН при этом не возникала, что могло свидетельствовать о различии в механизме излучения по сравнению со случаем многопузырьковой сонолюминесценции.

Согласно расчетам, температура плазмы в пузырьках не менее 25000К.

Схема установки



Фотография установки



# ОДНОПУЗЫРЬКОВАЯ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

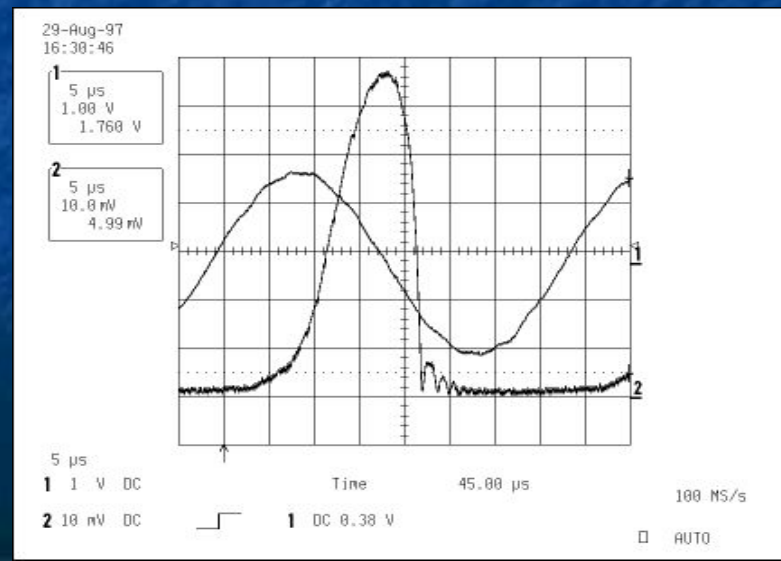
По некоторым предположениям, температура может достигать величины  $15 \cdot 10^6 \text{K}$  - температуры, при которой начинаются термоядерные реакции. Однако эксп проверка этой гипотезы трудна, потому что схлопывание пузырька занимает всего 100 пикосекунд, что меньше быстродействия скоростных фотокамер.

Существенное продвижение удалось совершить группам J.Putterman и R.Pesha из Штутгартского университета (Германия). Используя телекамеру с разрешением 400 пс, они исследовали процесс распространения вокруг места схлопывания ударной волны. Оказалось, что расходящаяся ударная волна движется со скоростью, в 4 раза большей скорости звука. Хотя этот результат и не дает новых данных о температуре плазмы, он отвергает теории, в которых процесс схлопывания пузырька происходит с дозвуковой скоростью.

Светящийся пузырек

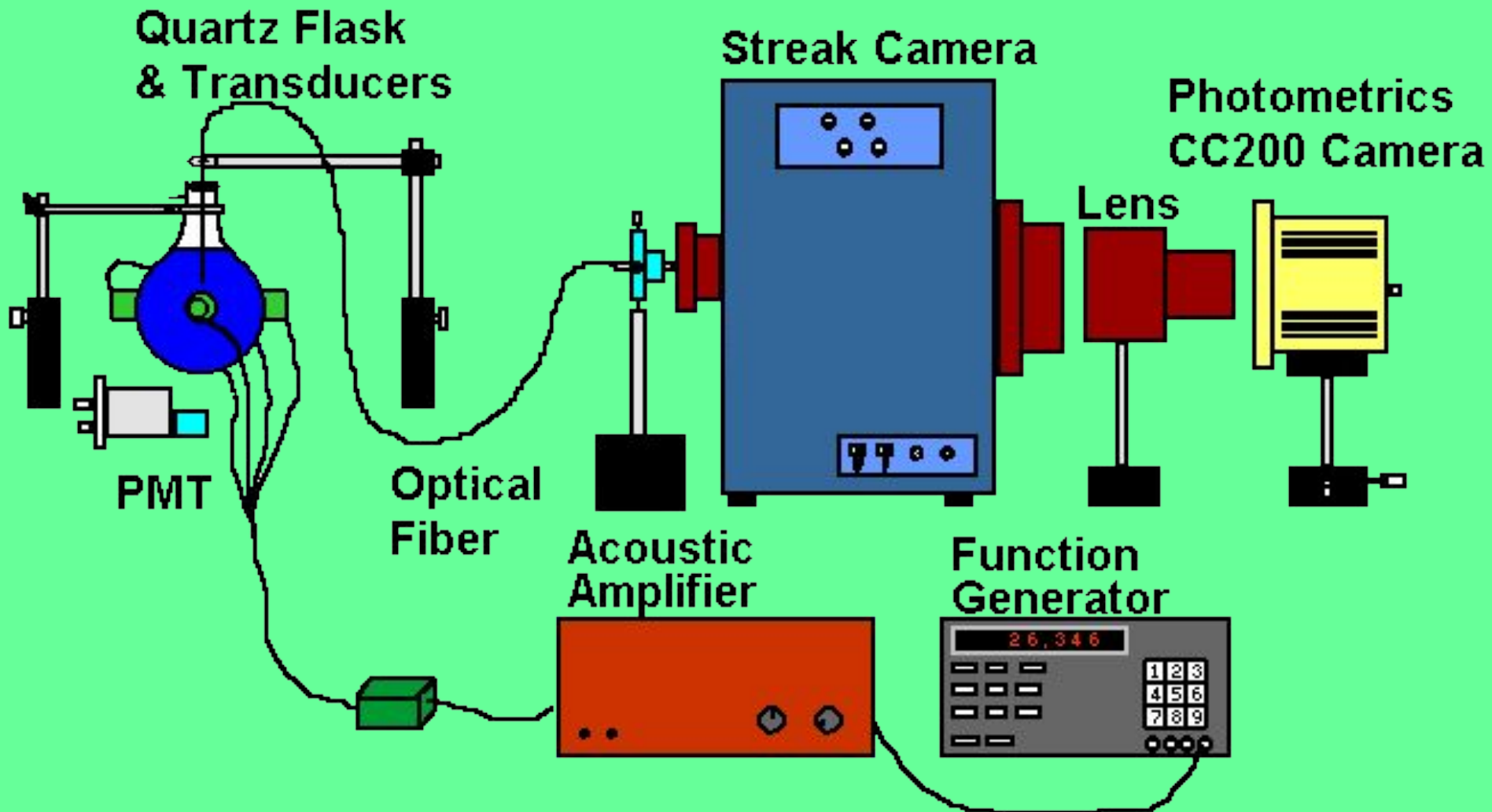


Акустическое давление и радиус пузырька в зависимости от времени





*Schematic layout of streak camera measurement. The SL emission is collected by a 600-micron optical fiber and injected at the input slit of the camera. A combination of optical and electrical signals trigger the streak camera.*

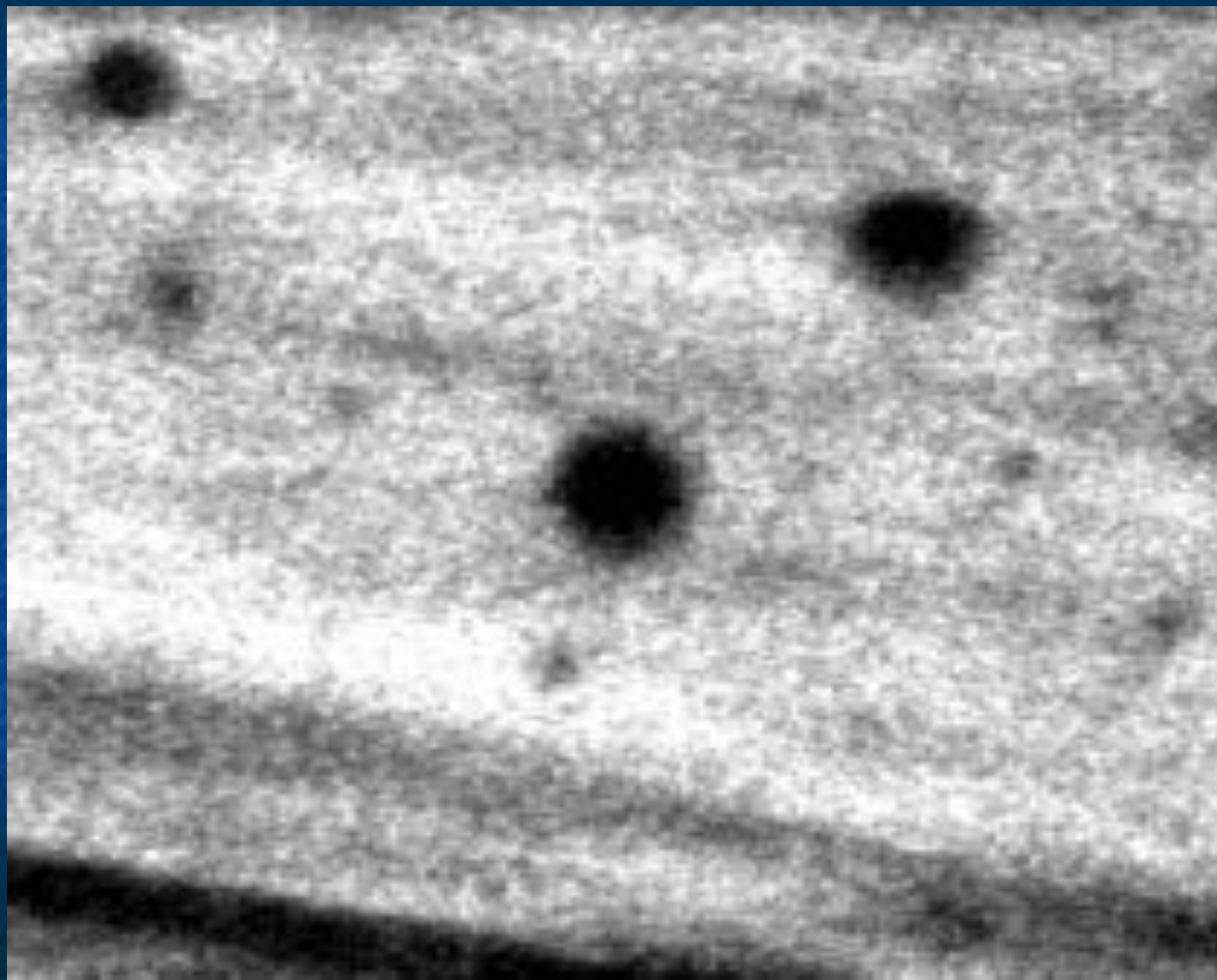


**На частоте 1 МГц наблюдают миллион вспышек за 1 с, каждая длительностью 100 пикосекунд.**

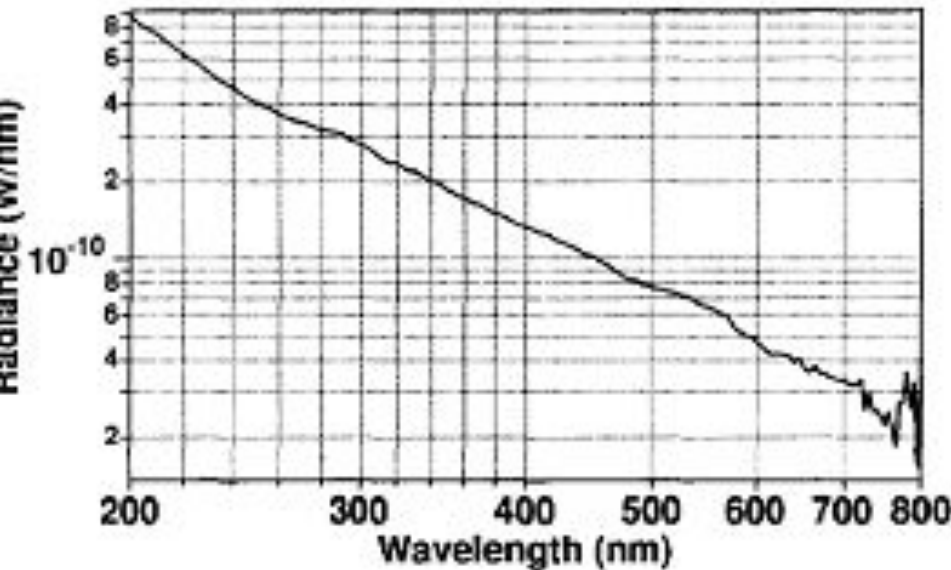
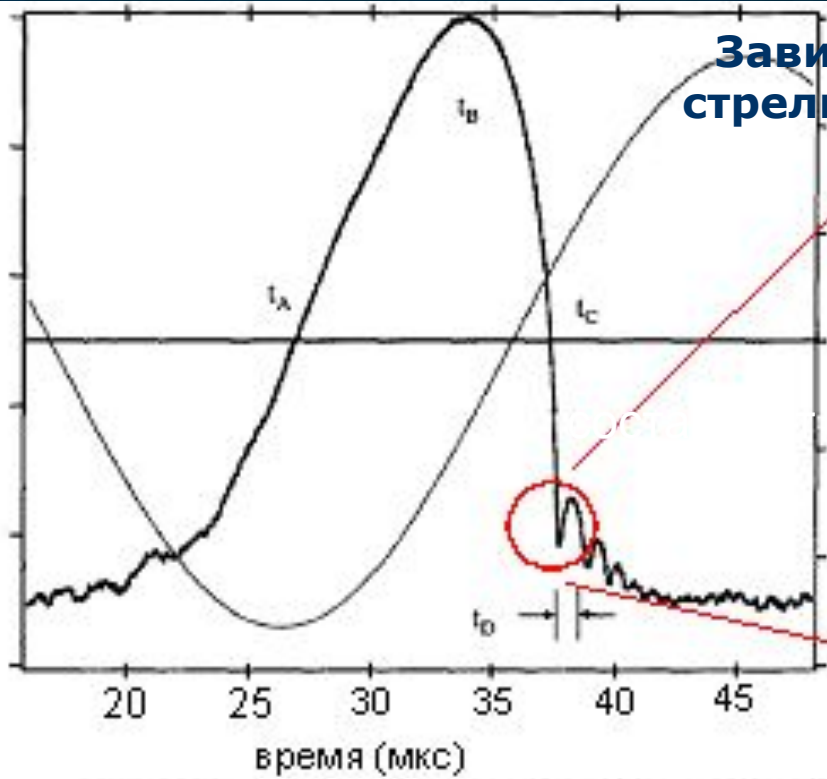
**Процесс устойчив, повторяемость вспышек света очень хорошая, форма импульсов стабильная**



# ОДИНОЧНЫЙ ПУЗЫРЕК В ПОЛЕ ЛИТОТРИПТЕРА



# СВЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ КОЛЛАПСЕ ОДИНОЧОГО ПУЗЫРЬКА



**Типичный спектр сонолюминесценции**  
Если это тепловое излучение, то исходя из того, что максимум спектра не виден, следует, что речь идет о температурах в десятки тысяч градусов, то есть, внутри СЛ пузырька находится плазма

**Сильная зависимость от T воды. Если эту температуру понижали с 40°C до 0°C, то яркость СЛ возрастала в сто раз !**

# Можно ли достичь 10 млн. градусов и осуществить термоядерную реакцию ?

Flynn H.G. Method of Generation of Energy by Acoustically Induced Cavitation Fusion and Reactor Therefore. United State Patent 4,333,796 (Jun.8, 1982)

## ЭКСПЕРИМЕНТ 2002 года

► **Taleyarkhan, R.P.**, West C.D., Cho J.S., Lahey Jr. R.T., **Nigmatulin R.I.**, and Block R.C. Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation. – Science, v.295, pp.1868-1873 (March 8, 2002)

**Используемые жидкости:** дейтерированный ацетон  $C_3D_6O$  и обычный ацетон  $C_3H_6O$  (для контроля)

**Температура:** 0°C

**Частота ультразвука:** 19.3 кГц

**Амплитуда волны в центре кюветы:** 15 атм

**Инициатор кавитации:** импульсный пучок 14-MeV нейтронов

**Порог кавитации при облучении нейтронами:** - 7 атм

**Детектирование трития:** с помощью счетчика сцинтилляций

# Эксперимент Талейархана, Нигматулина и др. (2002)

1. Схлопывание кавитационного пузырька в дейтерированном ацетоне сопровождалось излучением нейтронов с энергией около 2.5 МэВ, что могло быть следствием реакции  $D+D - {}^3\text{He}+n$

2. Удалось зарегистрировать повышение уровня трития – след реакции  $D+D - t+p$

Сомнения: а) для создания зародышей кавитации использовался пучок нейтронов с энергией 14 МэВ, которые после замедления в жидкости могли быть ошибочно приняты за нейтроны реакции синтеза; б) сразу же предпринятые попытки повторить эксперимент были безуспешными

После бурных дискуссий (см. Science 295, 8 марта 2002, стр.1793: D.Kennedy “To publish or not to publish”; C.Seife “Bubble fusion paper generates a tempest in a beaker”, стр.1808) эту статью опубликовали, хотя многие относились к предмету скептически. L.Crum (APL, Seattle) даже выступал в США с критикой по телевидению. Появился ряд статей, например, B.G.Levi “Skepticism greets claim of bubble fusion”, Physics Today, April 2002, p.16-184; T.D.Rossing “Sonofusion?”, Echoes, v.12, No.2, Spring 2002. Однако надо признать, что уничтожающей публичной критики не было. Как мне говорили многие известные американские специалисты, «практически значимого эффекта нет, эксперимент неправильный, но шум поднять надо, потому что можно ожидать большого финансирования под это дело».

# Реакция в России

Для оценки достоверности этих суждений на Межд симпозиуме по нел акустике (Москва, МГУ, август 2002), «по горячим следам» была организована спец секция по проблеме «сонофьюжн» (ее вел L.Crum). Присутствовали специалисты как по динамике пузырьков (Р.И.Нигматулин, В.В.Кедринский, С.А.Рыбак и др.), так и по ядерной физике (А.М.Дыхне, группа из НИИЯФ МГУ и ТРИНИТИ, ОИФЗ), а также представители ВПК. Дискуссии на сессии и вокруг нее дали были интересными, но ни «закреть»проблему, ни оценить достоверность не удалось.

На редколлегии УФН в 2002 г. при участии В.Л. Гинзбурга обсуждалась идея опубликовать обзор на эту тему. Была мысль пригласить автором Ларри Крама, и он дал свое согласие. Тем не менее, идея не прошла и обзор заказан не был.

Основания :

1. Сомнения в чистоте эксперимента, после которого был поднят шум.
2. Наличие большого числа критических публикаций и обзорных материалов в иностранной научной и популярной литературе.
3. Несвоевременность. Если бы по прошествии 2-3 лет оказалось, что эффект при сжатии пузырьков имеет какое-либо значение для энергетики и даже просто для создания источника нейтронов, поток оригинальных публикаций уже мог бы служить исходным материалом для обзора в УФН. Но эти годы прошли, а ничего нового практически не было. Новости появились только что.

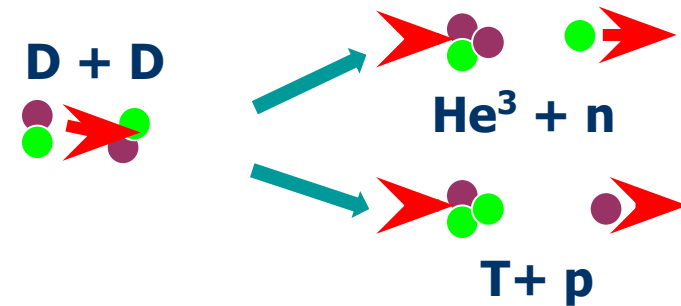
# А что делалось в России?

Станюкович К.П., Хаврошкин О.Б. Явление рентгеновского излучения кавитационной полостью. Госкомизобретений. Заявка на открытие, ОТ №8576 от 28.09.1973 г., 45 с.

Станюкович К.П., Хаврошкин О.Б. Явление возникновения импульсной термоядерной реакции в ядре схлопнувшейся кавитационной полости в обычной воде. Госкомизобретений. Заявка на открытие, ОТ №8589 от 22.10.1973 г., 6 с.

Липсон А.Г., Дерягин Б.В., Ключев В.А. и др. Инициирование ядерных реакций синтеза при кавитационном воздействии на дейтерийсодержащие среды. Журн. Техн. Физ. 1992. Т.62, вып. 12. 121-130 с.

Маргулис М.А. Способ получения ВТ плазмы и осуществления термоядерных реакций. Патент РФ №2045715, 1997



Но это – не вся история. Еще в конце 40-х годов генерал-майор Георгий Иосифович Покровский думал об использовании кавитации в качестве механизма инициирования термояда. Он высказал эту идею студенту МФТИ В.А.Белоконю в начале 50-х годов, а в 1955 г. предложил эту тему в качестве дипломной работы. Он выражал оптимизм

относительно инициирования дейтерия при отсутствии газа или пара в полости, т.е. в модели «холодного» разгона стенок внутрь, хотя отчетливо понимал проблемы, возникающие в связи с реальным присутствием газа.



## **А что делалось в России еще?**

**Возбудить кавитацию он предлагал тривиальным способом – за счет кипения тяжелой воды в контейнере со стенками, содержащими соединение серебра, эффективно реагирующее на нейтроны термоядерной реакции; многочасовое кипение дало бы возможность подтвердить факт термояда.**

**Именно Г.И.Покровский был одним из учителей акад Е.И.Забабахина, трижды Героя труда, классика советских прикладных исследований в области термояда и его инициирования за счет явлений кумуляции. У специалистов есть основания считать, что в области «Неограниченной кумуляции» (НК - термин Е.И.Забабахина) сделано и понято очень многое, однако эти результаты не опубликованы.**

**С глубокими (но, возможно, известными не в полной мере) соображениями Е.И.Забабахина можно познакомиться в его открытых публикациях:**

- 1. Явления неограниченной кумуляции. Механика в СССР за 50 лет. М., Наука, 1970**
- 2. Кумуляция энергии и ее пределы. УФН, т.85, №4, с.721-726 (1965)**
- 3. Unlimited Cumulation Phenomena (Ed. Ya.B.Zeldovich), Moscow, Nauka Publ. 1990.**

# Из обзоров Е.И.Забабахина

«Явления НК – это процессы, в которых в каком-то виде происходит концентрация энергии, и притом неограниченно сильно».

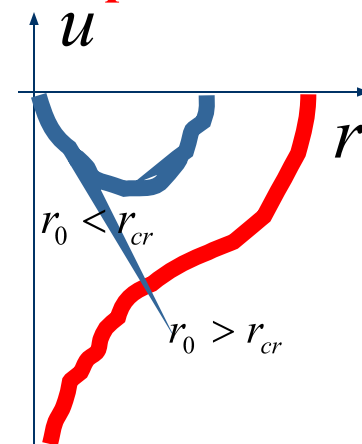
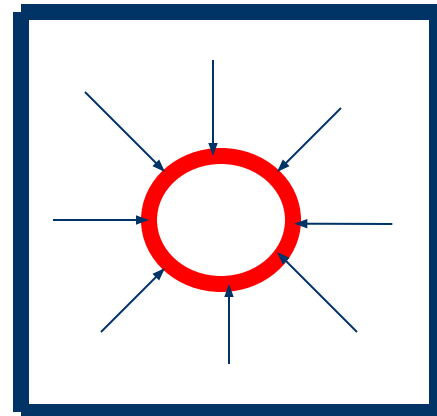
## Схлопывание сферического пузырька – нел задача с подвижной границей

### 1. Невязкая несжимаемая жидкость

(Релей). Скорость движения пов-ти неограниченно растет при приближении к фокусу:

$$u = A \cdot r^{-3/2} \rightarrow \infty \text{ при } r \rightarrow 0$$

Напр. когда радиус пузырька уменьшается с 1 см до 1 мм, давление вблизи границы возрастает с 1 атм до 150000 атм



2. Вязкая жидкость (Забабахин): кумуляция «убивается» вязкостью только для очень маленьких пузырьков, исходный радиус которых  $< 0.8$  мкм (вода), 1 атм

3. Сжимаемая жидкость (Я.Б.Зельдович, И.М.Гельфанд, К.Хантер, ...): явление НК не устраняется сжимаемостью – изменяется лишь показатель **Следовательно, НК – это свойство явления схлопывания, а не следствие идеализации задачи.**

## Е.И.Забабахин: «Гипотеза о неустойчивости кумуляции» (1965)

«Всякая неограниченная кумуляция неустойчива; неустойчивость не только видоизменяет ее, но и устраняет вообще (из неограниченной делает ограниченной)... Это соображение интуитивно».

# Асимметричный коллапс пузырька вблизи твердой границы

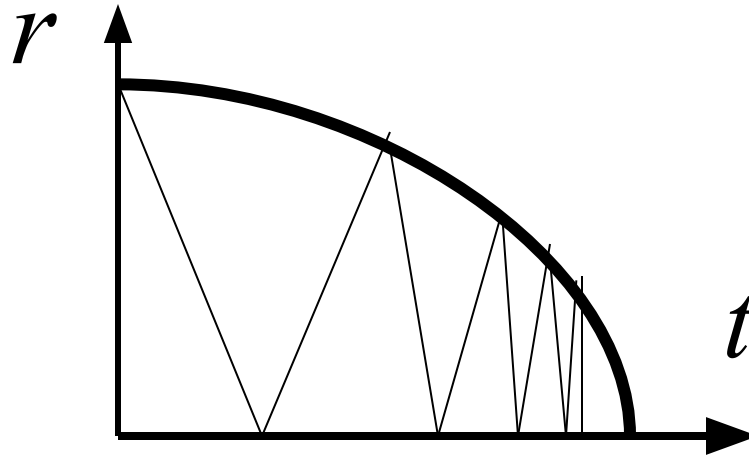
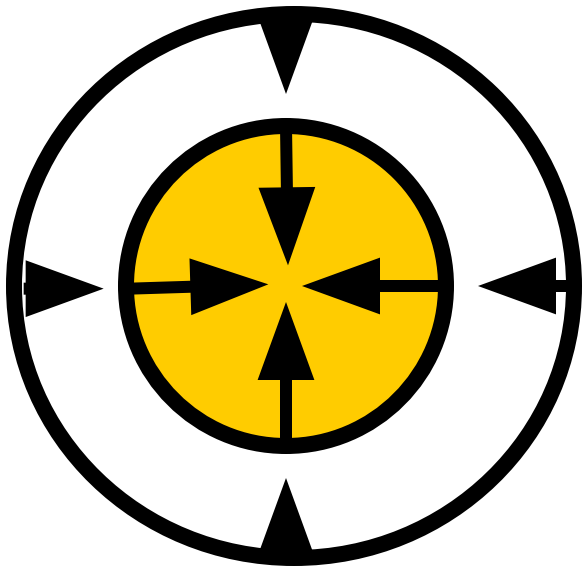


## Что могло бы устранить НК ?

1. Несферичность (асимметрия) сжатия, проявляющаяся у больших пузырьков, в которой концентрация энергии может быть максимальной
2. Несправедливость приближения сплошной среды при малых размерах перед схлопыванием, особенности в уравнении экстремального состояния пара в полости, кинетические явления

## Что могло бы помочь НК ?

1. Ударная волна, бегущая по газу перед стенкой полости и сжимающая газ
2. Многократные переотражения УВ от центра и движущейся стенки, которая усиливает УВ



**Вопрос открыт!**

# 2005-2006

**R.I.Nigmatulin, et al. Theory of Supercompression of Vapor Bubbles and Nanoscale Thermonuclear Fusion. Physics of Fluids, 17, 107106, October 2005**

Детальный численный расчет с ответами на критику идеи и первого эксперимента 2002 г. Расчет, в частности, для финальной стадии коллапса (диаметр пузырька 100 нм) дает оценку температуры 100 млн °С и плотность 10 г/куб.см

**R.P.Taleyarkhan, R.I.Nigmatulin, et al. Nuclear Emission during Self-Nucleated Acoustic Cavitation. Phys.Rev.Letters, 96, 034301, 27 Jan 2006**

В смеси: дейтерированный бензол  $C_6D_6$  + дейтерированный ацетон  $C_2D_4$  + с растворенной солью урана-238  $U^{238}$  обнаружено заметное возрастание эмиссии гамма-лучей и нейтронов (до  $10^4$  в секунду) с энергией 2.45 МэВ. Эффекты исчезали:

1. В контрольных недейтерированных жидкостях
2. При отсутствии кавитации
3. В тяжелой воде