



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

# Актуальные проблемы физики высоких плотностей энергии в науке и в технологиях

Забабахинские научные чтения – 2025

Симоненко Вадим Александрович -- заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИТФ  
Карлыханов Николай Григорьевич – ведущий научный сотрудник  
Модестов Дмитрий Геннадьевич -- старший научный сотрудник

# Вводные замечания 1/3



РФАЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

1. Физика высоких плотностей энергии (ФВПЭ) как направление научно-прикладных исследований начала формироваться в 20-м веке и продолжает развиваться в настоящее время. Условно примем за начало целенаправленное использование сингулярных процессов и явлений механики в интересах технологического развития. Область исследований ФВПЭ определена не так чётко, как это делается в традиционных направлениях физических исследований (механике, термодинамике, гидро-газодинамике, статистической физике, квантовой механике и др.).

2. В основе такого определения лежат два понятия. Первое это *энергия* как одно из важнейших свойств, характеризующих состояние физических систем, сохранение которого в замкнутых системах, обусловлено однородностью физических зависимостей от времени. А второе – это качественная характеристика уровня «высокая плотность энергии» (ВПЭ). В качестве нижней границы примем уровень, при котором плотные в нормальных условиях вещества могут сжиматься или разрушаться. Верхнюю границу ВПЭ назначать не будем.

3. Например, нами рассматривались процессы, происходящие в «атмосфере» нейтронной звезды в двойной системе малой массы, плотность вещества которой у нижней границы атмосферы превосходила  $10^8$  г/см<sup>3</sup>. Путь к такому уровню научных исследований и технологических применений был непростым и долгим. Можно считать, что он пролегал через понимание сингулярностей физическо-математических моделей.

4. Заметим, что на бытовом уровне с доисторических времен известны процессы, которые по современным представлениям мы относим к сингулярным, например, хлопок бича пастуха, образование струи при закрытии воронки в воде.

## Вводные замечания 2/3



РФАЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

5. Первой сингулярностью, которая получила научное признание, назовём гравитационную. Она формируется в центре физических объектов большой массы – звёзд, планет, галактик. Открыта она была не сразу, масштабы и проявления её этой сингулярности не сразу были поняты и, строго говоря, в полном объёме до сих пор не осознаны. После закона Ньютона о всемирном тяготении  $F = gm_1 m_2 / r_{1,2}^2$  существенным вкладом была гипотеза Э. Канта об образовании Солнечной системы (1755 г) и её уточнения Лапласом (1796). Более подробно исторические вопросы рассматривались в [1]. Здесь мы остановимся на вопросах, более важных с позиций роли сингулярностей для ФВПЭ.

6. Возвращаясь к гравитации заметим, что нашей цивилизацией пройден большой и сложный путь, начиная с опытов Галилея, через казнь Джордано Бруно, модель Солнечной системы Коперника, законы Кеплера для орбит планет, через расчёты полёта кометы Галлея до построения современных моделей динамики космических полётов, моделей эволюции звёзд, моделей галактик и Вселенной.

7. Далее рассмотрим проявление сингулярностей в механических процессах постепенно обогащая их различными (химическими, атомными, ядерными) физическими процессами, которые включаются по мере увеличения плотности энергии.

8. Рассмотрение сингулярностей естественно начинать с механики, так как в ней появились первые такие исследования. Первой оказалась задача о сжатии полости в несжимаемой жидкости Besant в 1859 г. и Rayleigh в 1917 г. Затем Риманом в 1860 г. рассматривалась простя плоская волну в баротропной жидкости. Она указывала на образование разрывного решения по мере движения. Далее были открыты ударные волны [Гюгонио (1870 г.) Ранкин (1877 г.)]. И завершением этой логической линии явились детонационные волны с выделением энергии на фронте разрыва (Михельсону, Чепмену и Жуге, а также Зельдовичу, фон Неймана и Дёринга). Заметим, что теория детонационных процессов продолжает развиваться.

## Вводные замечания 3/3



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

9. Мощный импульс расширению исследований ФВПЭ дали ядерно-физические открытия, позволяющих использовать энергии ядерных распадов и делений тяжёлых ядер ( с открытием нейтронов).

10. При этом возникло весьма важное, но «чувствительное» для обсуждения направление разработки и применений взрывных ядерных систем. Однако методические вопросы --- уравнения состояния, исследования неустойчивостей кумулятивных течений, турбулентные течения получили хороший стимул для развития (некоторые из них обсуждаются на ЗНЧ).

11. Более подробно пример применения ядерно-физических моделей в описании задач ФВПЭ рассмотрен авторами в докладе [2]. В нём применительно к задачам (с источниками) переноса нейтральных частиц – фотонов и нейтронов – анализируются и используются возможности ядерно-физических моделей и рассматриваются решения задач не аналогового моделирования с использованием весовых множителей. Разработаны алгоритмы для описания соответствующих процессов, подготовлены прецизионные данные для расчётов, проанализированы подходы, опубликованные другими организациями и продемонстрированы достоинства расчётной технологии, созданной первым автором в [2].

12. Указанные выше теоретические результаты сопровождались ценными результатами экспериментальных исследований уравнений состояния плотных веществ, характера протекания термодинамических превращений, динамики протекания ударно-волновых и турбулентных процессов, горения и детонации. В свою очередь в совокупности эти результаты служили базисом для создания новых технологий и углублённого понимания природных (в частности, астрономических и астрофизических) процессов.

1. В.А. Симоненко. «О высокоточном физико-математическом моделировании ряда современных исследований и технологических процессов». Сб. трудов Научной сессии НИЯУ МИФИ, изд. СФТИ, 2025 г.
2. Д.Г. Модестов, В.А. Симоненко. «О высокоточном физико-математическом моделировании рассеяния нейтральных частиц методом Монте-Карло». Семинар МТЯТЦ, Снежинск 2025.

# Задача Безанта (1859) Рэля (1917)



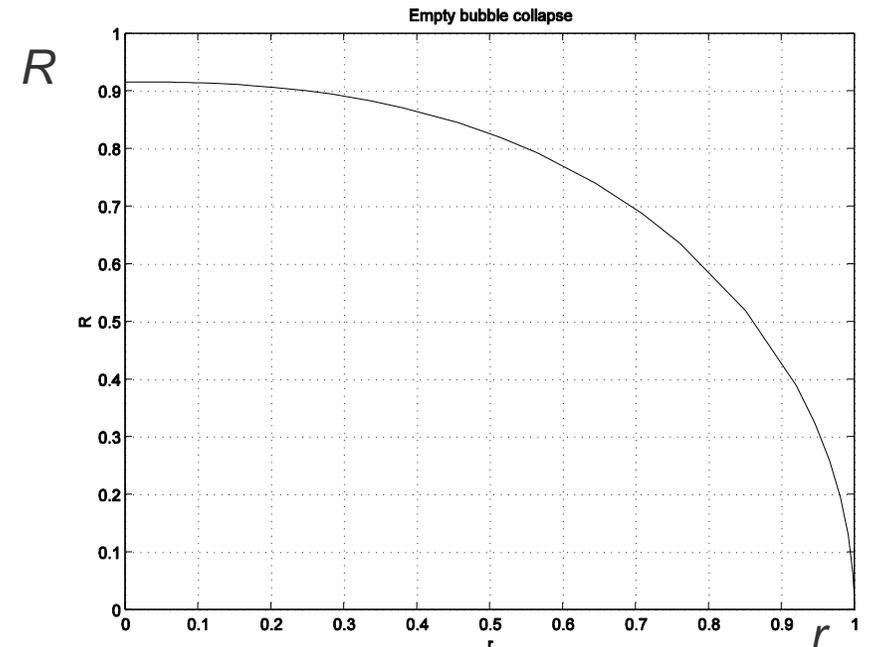
Задача о коллапсе полости в несжимаемой жидкости. Кавитация пузырей на гребном винте пароходов. Повреждение гребных винтов. Решение может быть представлено в автомодельном виде, однако во время первых авторов теория автомодельных решений не была развита.

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0, \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u) = 0; \Rightarrow r^2 u = R^2 \dot{R} - \text{интеграл движения}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\dot{F}(t)}{r^2};$$

$$\frac{\dot{F}(t)}{r^2} + u \frac{\partial u}{\partial r} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}$$

$$R : t^{2/5}, \quad \dot{R} : t^{-3/5}, \quad \ddot{R} : t^{-4/5}$$



# Автомодельный коллапс полости в несжимаемой жидкости



$R(t)$  радиус полости;  $\dot{R}(t)$  – масштаб скорости,

$\xi = r / R(t)$  – автомодельная переменная,

$u(r, t) = \dot{R} U(\xi); P(r, t) = \rho \dot{R}(t) P(\xi);$

$U$  и  $P$  – представители  $u$  и  $P$

$r^2 u = R^2 \dot{R} \Rightarrow U(\xi) = 1 / \xi^2,$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} = \ddot{R} U + \dot{R} U' \frac{\partial \xi}{\partial t} = \ddot{R} U - \frac{\dot{R}^2}{R} \xi U'' = \ddot{R} \frac{1}{\xi^2} + 2 \frac{\dot{R}^2}{R} \frac{1}{\xi^2}, \\ u \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\dot{R}}{\xi^2} \left( -2 \frac{\dot{R}}{R} \frac{1}{\xi^3} \right) = -2 \frac{\dot{R}^2}{R} \frac{1}{\xi^5}, \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\dot{R}^2}{R} P' \end{array} \right.$$

Подстановка этих выражений в уравнение Эйлера дает

$$\left( \ddot{R} + 2 \frac{\dot{R}^2}{R} \right) \frac{1}{\xi^2} - 2 \frac{\dot{R}^2}{R} \frac{1}{\xi^5} = -\frac{\dot{R}^2}{R} P', \quad *)$$

откуда

$$\frac{\ddot{R}}{\dot{R}^2} = const \Rightarrow \frac{dR}{dt} = B \cdot R^\beta \Rightarrow R = A \cdot t^\alpha,$$

$$где \alpha = (1 - \beta)^{-1}, A = [(1 - \beta) B]^\alpha.$$

Для нахождения константы  $\alpha$  используются дополнительные соображения. В нашем случае – сохранение энергии в системе (для несжимаемой жидкости – она вся кинетическая), то есть

$$E = \int_R^\infty \frac{\rho u^2}{2} 4\pi r^2 dr = 2\pi \rho R^3 \int_1^\infty \frac{1}{\xi^4} \xi^2 d\xi = 2\pi \rho R^3$$

$$R^3 = const \Rightarrow \beta = -3/2, \alpha = 2/5.$$

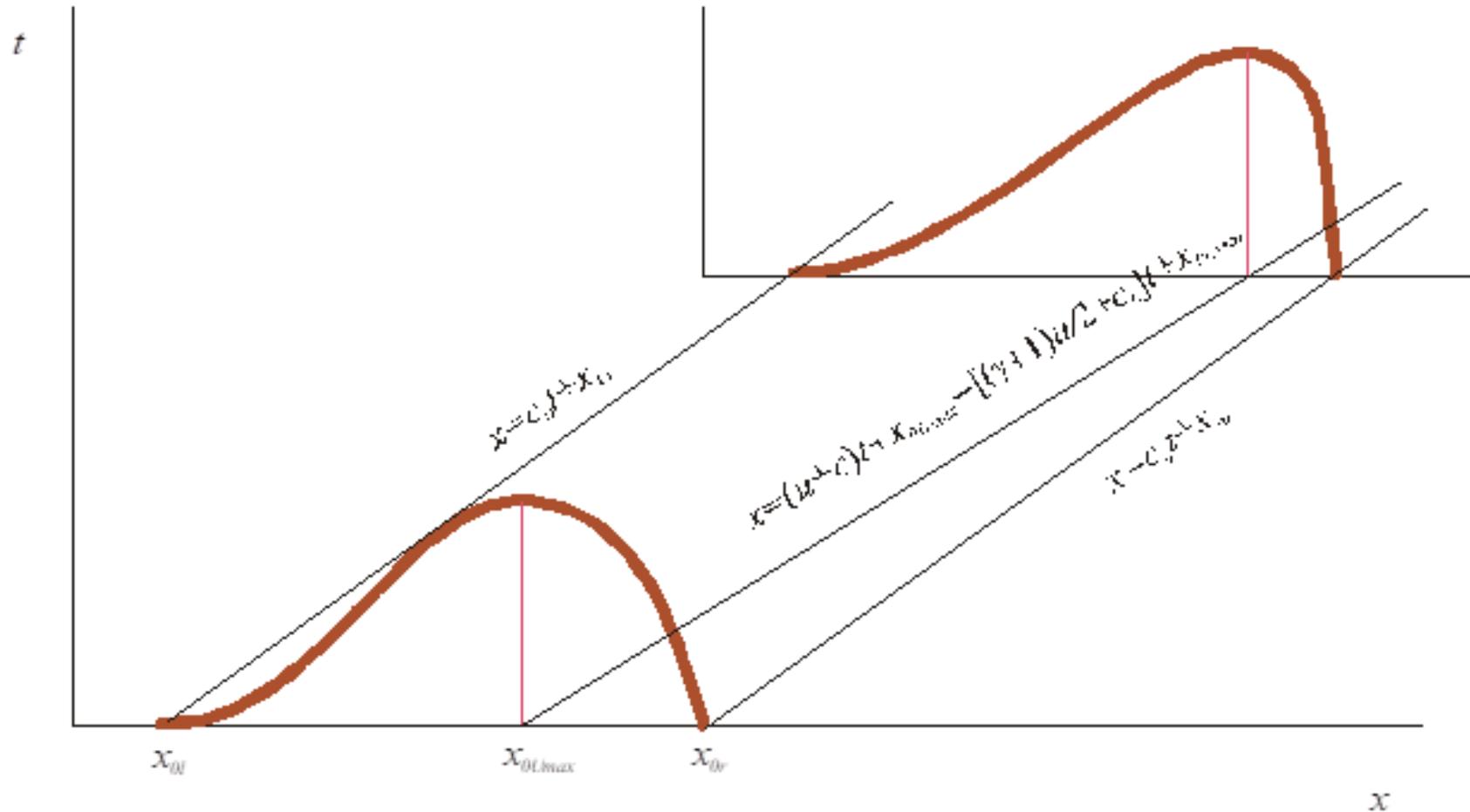
$$R = A t^{2/5}, \quad \dot{R} = \frac{2}{5} A t^{-3/5}, \quad \ddot{R} = \frac{6}{25} A t^{-8/5}, \quad \frac{\ddot{R}}{\dot{R}^2} = -\frac{3}{2}, \quad *)$$

получаем  $P' = \frac{2}{\xi^5} - \frac{1}{2\xi^2}$  или  $P(\xi) = \int_1^\xi \left( \frac{2}{\xi^5} - \frac{1}{2\xi^2} \right) d\xi = \frac{1}{2} \frac{\xi^3 - 1}{\xi^4}$

# Простая волна Римана (1860)



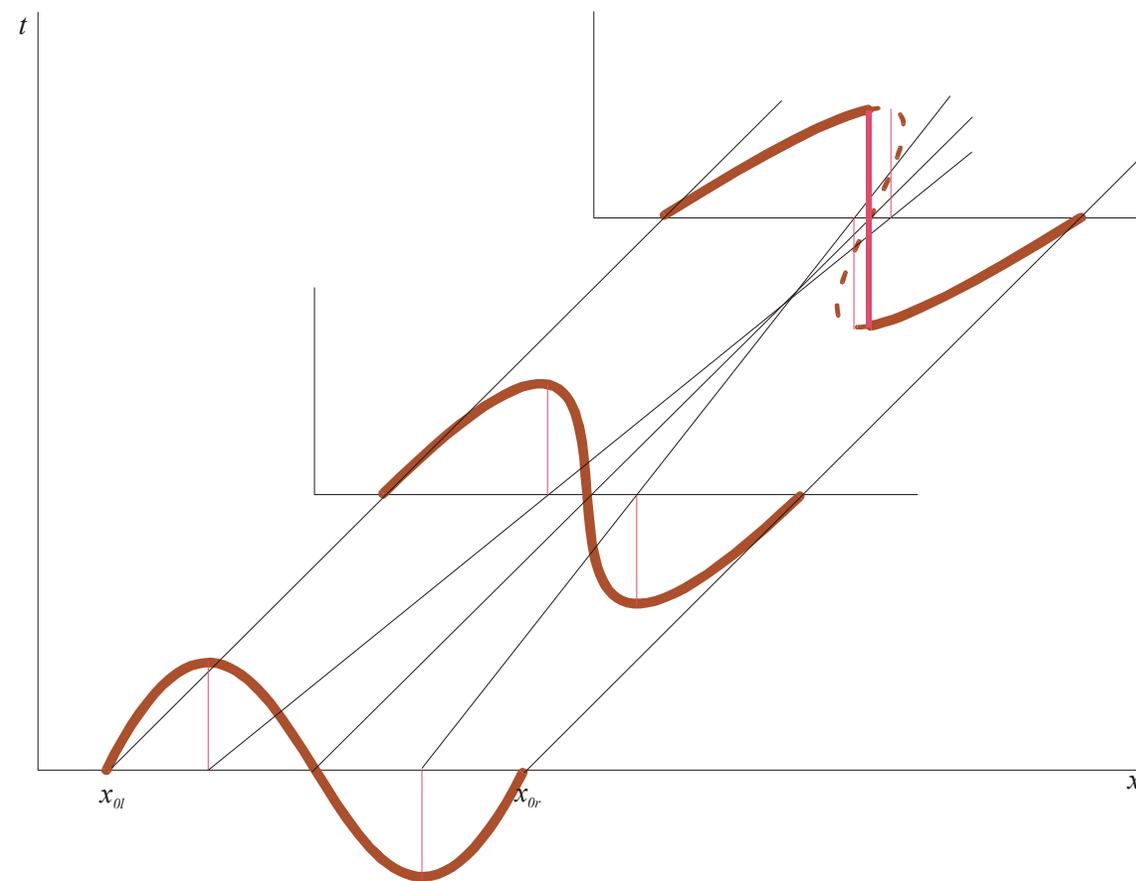
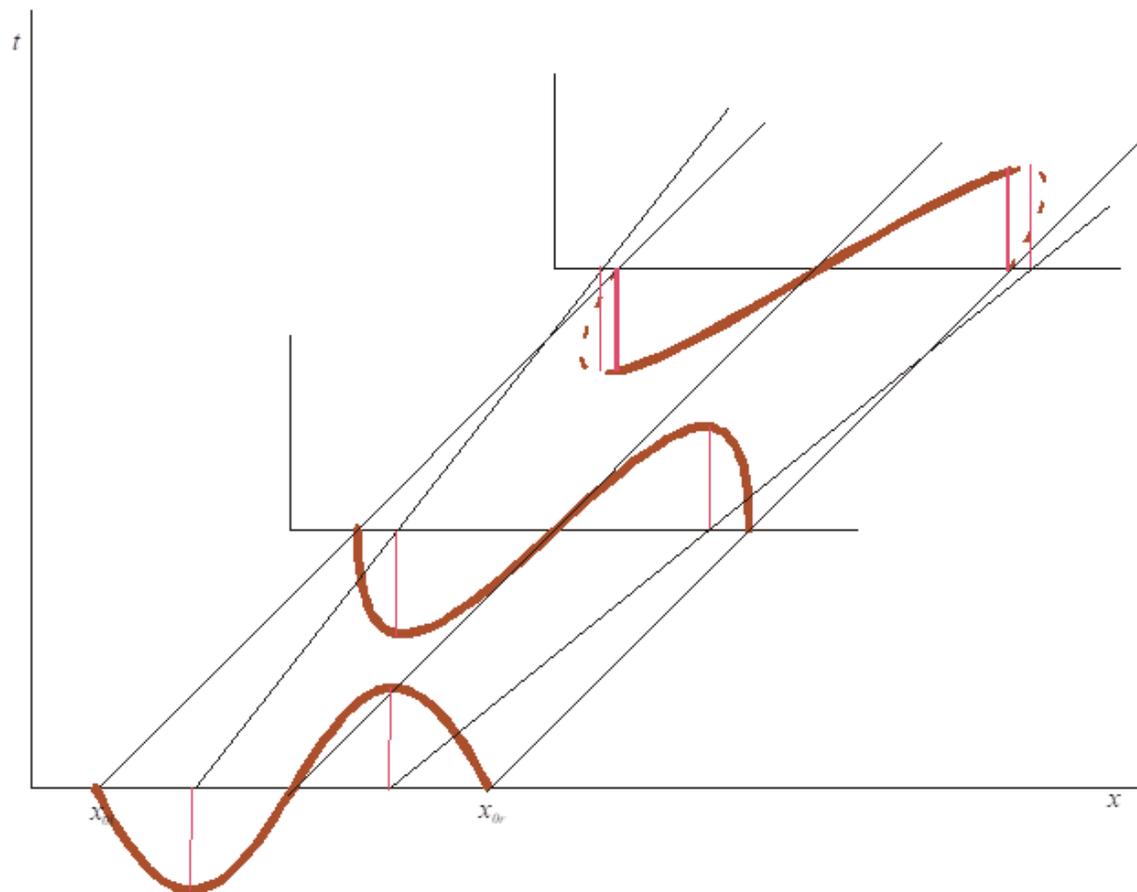
Эволюция фронта бегущей волны приводит к «опрокидыванию» его, то есть к формированию фронта ударной волны.



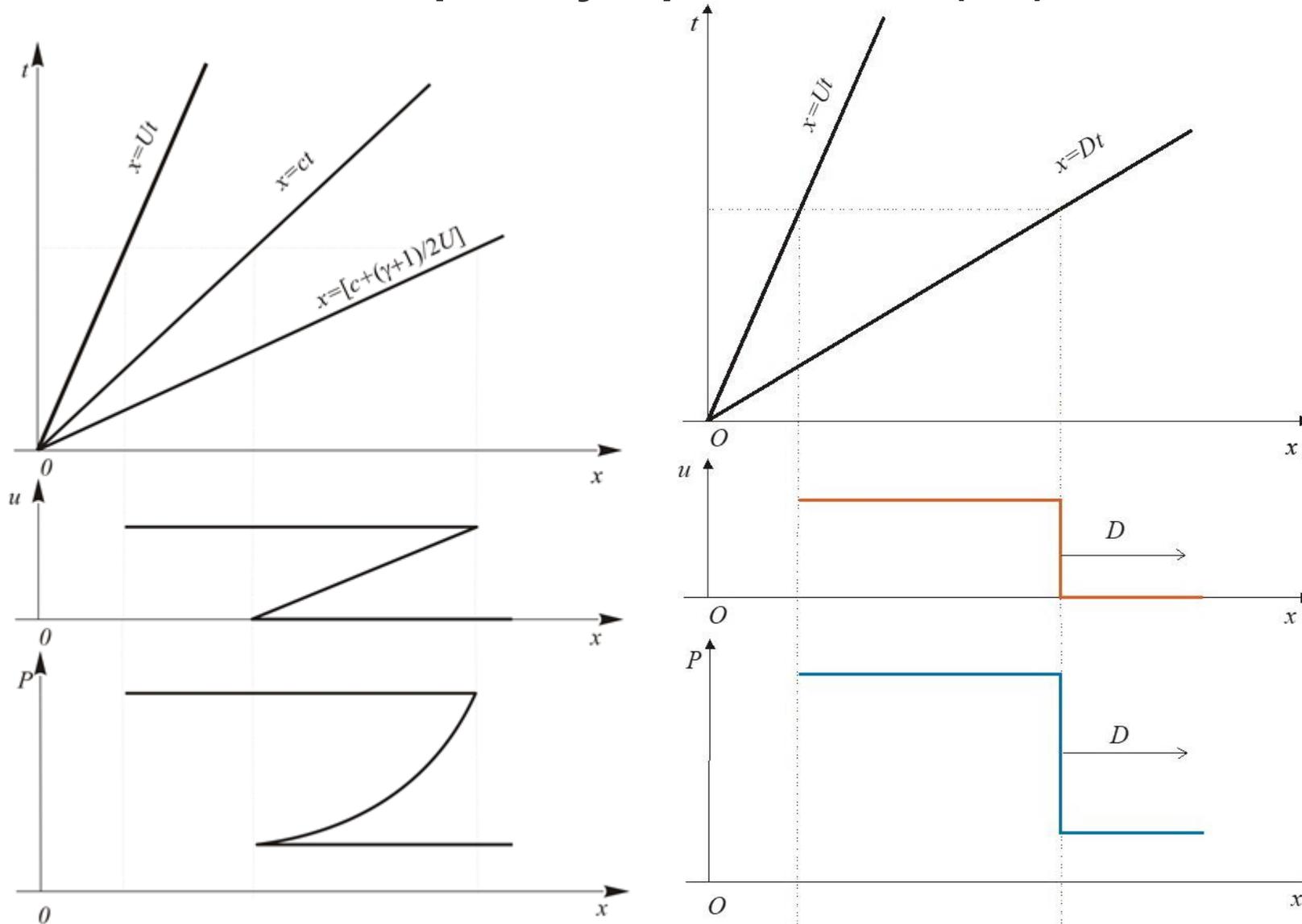
# Волны Римана. Формирование разрывных решений – фронтов ударных волн (УВ)



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



# Разрывное решение уравнений механики сплошных сред – ударная волна (УВ)



Законы сохранения массы, импульса и энергии на фронте УВ получены Гюгонио (1870 г.) и Ранкиным (1877 г.)

$$\rho_0 u_{f0} = \rho_1 u_{f1},$$

$$P_0 + \rho_0 u_{f0}^2 = P_1 + \rho_1 u_{f1}^2,$$

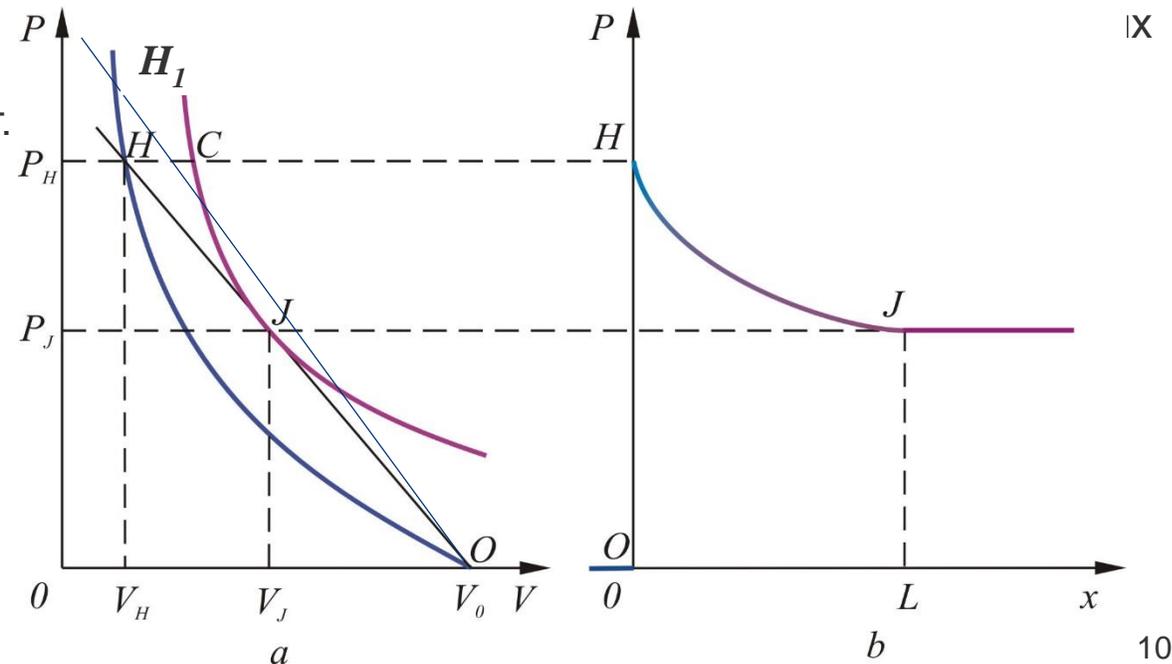
$$\varepsilon_0 + \frac{P_0}{\rho_0} + \frac{u_{f0}^2}{2} = \varepsilon_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{u_{f1}^2}{2}$$

# Горение и детонация в динамических процессах



1. Порох первоначально как лечебный состав, а затем как горючее вещество был открыт в Китае в средние века первого тысячелетия. В начале второго тысячелетия распространился на ближнем востока, в середине -- начал распространяться в Европе.
2. Важным современным применением порохов являются ракетные двигатели.
3. С развитием химических технологий появилось много горючих материалов. Особую опасность представляют газовые составы в технологических процессах.
4. Большое значение для развития и использования имели работы Альфреда Нобеля (1833-1896) по созданию и использования динамита (на основе нитроглицерина) в качестве взрывчатого вещества (ВВ) для строительных работ.
5. Эти успехи побудили поиски альтернативных более безопасных и более эффективных ВВ. В частности в 1863 г. Ю. Вильбрандом был получен тринитротолуол (тротил), а в 1891 г. началось его промышленное производство в Германии, в США и в 1909 г. в России. Ценными свойствами его является достаточно низкая чувствительность при инициировании и повышенная эффективность при выделении энергии.

- Для дальнейших применений ценным свойством оказалась возможность управлять взрывным процессом.
- В частности, недостатки таких возможностей существенно осложняли работы в Лос Аламосе в 1943-1945 г.
- Команде К.И. Щелкина, Л.В. Альтшулера в Сарове удалось справиться с такими трудностями. Более того, были разработаны возможности использовать такие процессы для получения уравнений состояния.



# Ударно-волновые и динамические исследования



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

## 1. Довоенные работы

К.И. Щёлкин, Я.Б. Зельдович, Д.А. Франк-Каменецкий и др. – эксперименты и теория.

## 2. Война и первые годы после войны

2.1. Сходящаяся автомодельная УВ – Г. Гдерлей 1942 г. [3], Л.Д. Ландау и К.П. Станюкович 1944-45 гг. (см. в [4]).

2.2. Е.И. Забабахин – диссертация Сходящаяся детонационная волна, 1944-1947 (см. в [5])

## 3. Начало ядерной программы 1943 г. и создание 1-го ядерного центра в Сарове 1947 г.

3.1. Под руководством К.И. Щёлкина -- разработка методов приближённых расчётов, экспериментальных исследований, организация регулярной работы.

3.2. Предложение Забабахина, Альтшулера, Крупникова — 1950

3.3. Расширение динамических исследований С.Б. Кормер, Р.Ф. Трунин, Ю.М. Стяжкин и др.

## 4. Создание 2-го ядерного центра и расширение исследований 1955+ г

4.1. Научный руководитель и главный конструктор – Щёлкин. С 1960 г. научный руководитель Е.И. Забабахин.

4.2 Развитие теории кумулятивных процессов (сингулярных течений), включая влияние диссипативных процессов на изменения характера течений (см. в [5-6])

4.3. Развитие экспериментальных исследований свойств сред и процессов К.К. Крупников, К.В. Волков, М.М. Горшков, Е.А. Козлов, В.И. Таржанов и др.

4.4. Крупномасштабные динамические явления – исследования процессов и использование для изучения свойств веществ (КМЭ) -- Е.И. Забабахин, Е.Н. Аврорин, В.А. Симоненко, Л.П. Волков, К.К. Крупников, Н.П. Волошин В.Н. Ногин, А.В. Петровцев, Б.К. Водолага и др.

5. Совместного советско-американский эксперимент на Невадском и Семипалатинском полигонах Е.Н. Аврорин, В.З. Нечай, В.Н. Михайлов, В.А. Симоненко, В.Н. Ногин, О.Н. Шубин, В.В. Легоньков. и др.

6. Исследования опасных процессов при столкновениях космических объектов с Землёй и их предотвращения В.А. Симоненко, В.Н. Ногин, О.Н. Шубин, Д.В. Петров и др. [7-8]

3. G. Guderley, Luftfahrtforschung, 19, №9, 302-312, 1942.

4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Гидромеханика, М., Наука, 1986.

5. Е.И. Забабахин «Некоторые вопросы газодинамики взрыва» Изд. РФЯЦ-ВНИИТФ, РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997.

6. Е.И. Забабахин «Кумуляция и неустойчивость» сб. работ с сотрудниками, составленный Б.П. Мордвиновым, РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998.

7. Hazards due to comets and Asteroids, Tom Gehrels Editor, 929-953, 1994, UAR.

8. Д.В. Петров, О.Н. Шубин, В.Н. Ногин, В.А. Симоненко «Астероидная опасность с точки зрения физиков-оружейников» Изд. РФЯЦ-ВНИИТФ, 2023 г.

# Сингулярные задачи механики сплошных сред и кумулятивные процессы



РФАЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

1. Мы уже вспомнили простейшие сингулярные течения – *схождение* (схлопывание) *пузырька* в (несжимаемой) жидкости и формирование *ударно-волнового фронта* при «опрокидывании» профиля волны Римана. Но Е.И. Забабахин предпочитал термин кумулятивные процессы. Я, кажется, ни разу не слышал от него выражения сингулярные процессы. Его любимым примером была упрощённая теория образования плоской кумулятивной струи, авторами которой он называл М.А. Лаврентьева (1900-1980 гг.) и Г.И. Покровский (1901-1979 гг.). Ссылок на публикации Лаврентьева на эту тему много, а Покровского мне так и не удалось увидеть. [3].

2. Для создания кумулятивной струи технологически удобнее применять коническую металлическую облицовку.

3. Цитированная ранее работа К.Г. Гудерлея стимулировала работу Е.И. о сходимости к центру детонационной волны. А также большое количество работ о фокусировке сходящейся УВ. волне [4]. Уже этот факт был ценным событием.

9. Седов Л.И. О неустановившихся движениях сжимаемой жидкости // Доклады Академии наук СССР. 1945. Т. 47, № 2. С. 94–96.

5. В 1944 Е.И. Забабахин, окончив учёбу в ак. им. Жуковского, попросил зав. Кафедры Д.А. Вентцеля быть руководителем по теме «Сходящаяся детонационная волна». В 1947 г. диссертация была защищена.

Оппонентом был К.П. Станюкович, который рекомендовал Я.Б. Зельдовичу привлечь капитана к работам, выполняемым в Сарове. Во всех отношениях это было очень сильным решением. Рдс-1 был лучше «Тринити».

6. Американцы перетащили Гудерлея к себе, а наши -- расширили автомоделные исследования: сходящаяся УВ, сходящаяся полость ([5 работы и обзор [5] , центрированные волны сжатия [6] и др.

10. Брушлинский К.В., Каждан Я.М. Об автомоделных решениях некоторых задач газовой динамики // Успехи математических наук. 1963. Т. 18. Вып. 2. С. 3-23.

11. Е.И. Забабахин, В.А. Симоненко. Сходящаяся УВ в теплопроводном газе, ПММ, т.29, вып. 2, 1965.

12. Забабахин И.Е., Симоненко В.А. Сферическая центрированная волна сжатия // Прикладная математика и механика. 1978. Т.42. № 3. С.573.

# Исследование свойств веществ и высокоинтенсивных процессов при высоких плотностях энергии



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

1. Появление мощных взрывных устройств существенно повысило энергию взрывов по сравнению с химическими зарядами. Если химическими ВВ мощные заряды имели массы зарядов около тонны ВВ, то в случае ЯЗ стали энергия взрывов измеряться в килотоннах и мегатоннах при существенно меньших размерах области выделения энергии. В предположении об адиабатичности движение и мгновенного выделения всей энергии взрыва в точке были получены автомодельные решения переноса энергии взрыва Дж. Тейлором в Англии и Дж. Фон Нейманом в США в 1941 г., в СССР Л.И. Седовым в 1946 г.

2. Однако при реальном взрыве в силу высокой плотности энергии на начальной стадии существенно проявлялся перенос энергии излучением на ранней стадии в неравновесном режиме, затем тепловой волной, и уж потом после  $6 \text{ м/кт}^{1/3}$  – в режиме газодинамического адиабатического течения за ударным фронтом.

3. Появились возможности получить экспериментальные данные по «прозрачности» плотных веществ в кэВ-ной области температур. Такой эксперимент был осуществлён в 1957г. под руководством Е.Н. Аврориным. Не всё в нем получилось в ожидаемом режиме, но полезная информация была получена.

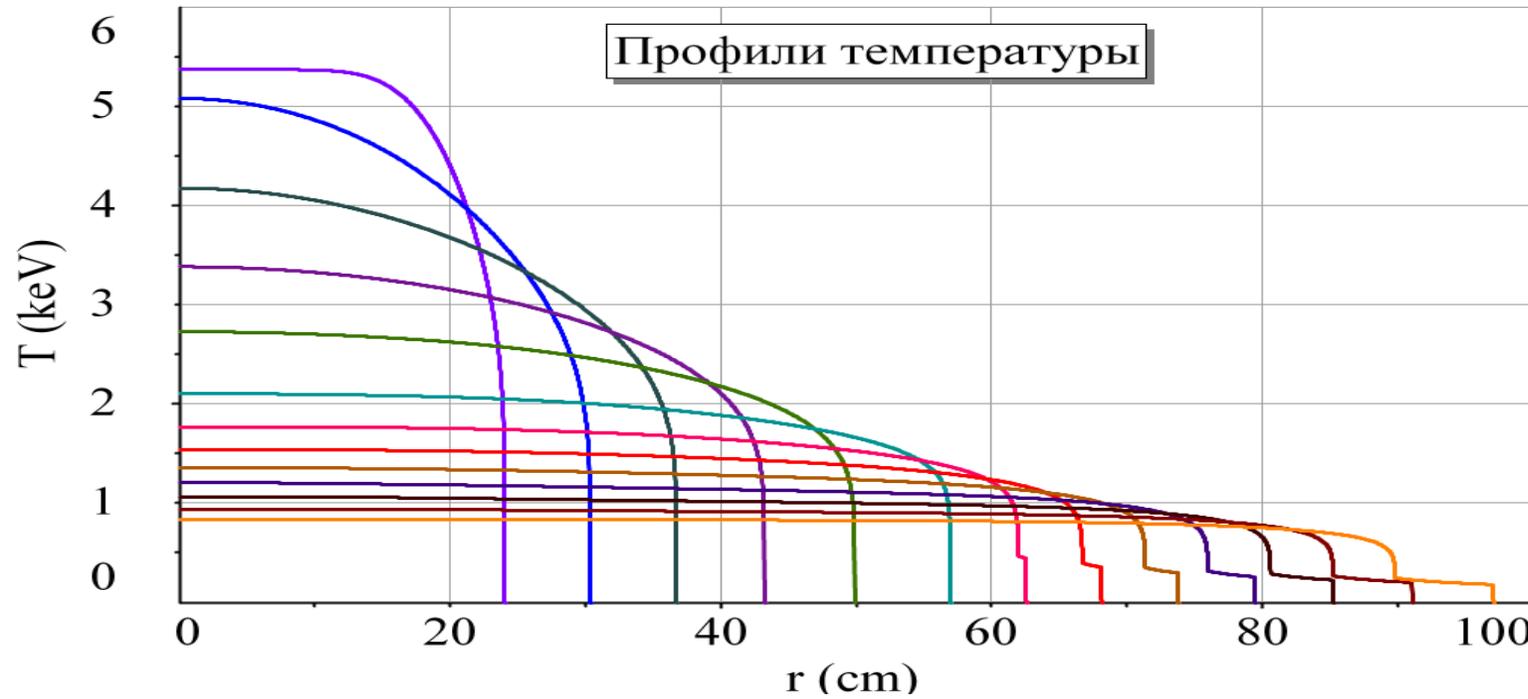
4. С другой стороны, открылись хорошие возможности для исследований уравнений состояния плотных веществ при давлениях существенно выше, чем с химическими ВВ.

5. Параллельно стали рассматриваться возможности использования сильных взрывов для народно-хозяйственных целей. Прежде всего этому способствовали аварии на нефте- и газодобывающих скважинах. Приходилось глушить нефтедобывающие скважины и гасить газодобывающие скважины.

6. Представляли также интерес создание искусственных водоёмов в засушливых местах, подземных полостей для изоляции опасных отходов химических производств, для хранения нефтепродуктов и др.

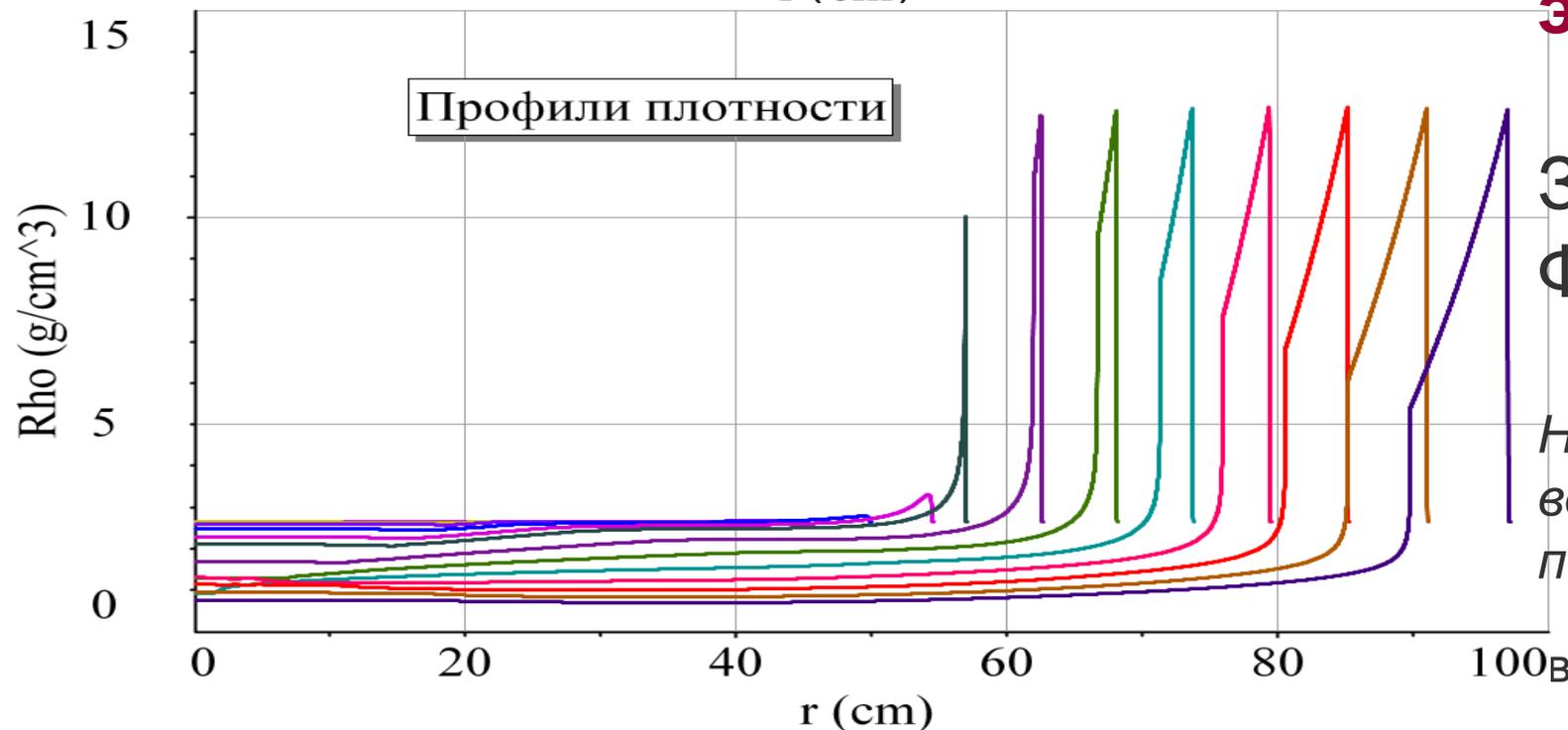
7. Была осуществлена большая программа глубинного сейсмического зондирования земли с целью прогнозирования поиска полезных ископаемых.

8. Однако и сами ядерные процессы представляли большой интерес. Вчера уже прозвучало два доклада: Г.Н. Рыкованова о ядерной энергетике и С.А. Андреева о прецизионных измерениях ядерных процессов (вернёмся к таким вопросам позже)..



**Сильный (точечный)  
взрыв в атмосфере**

**Смена режима переноса  
энергии ТВ→УВ**



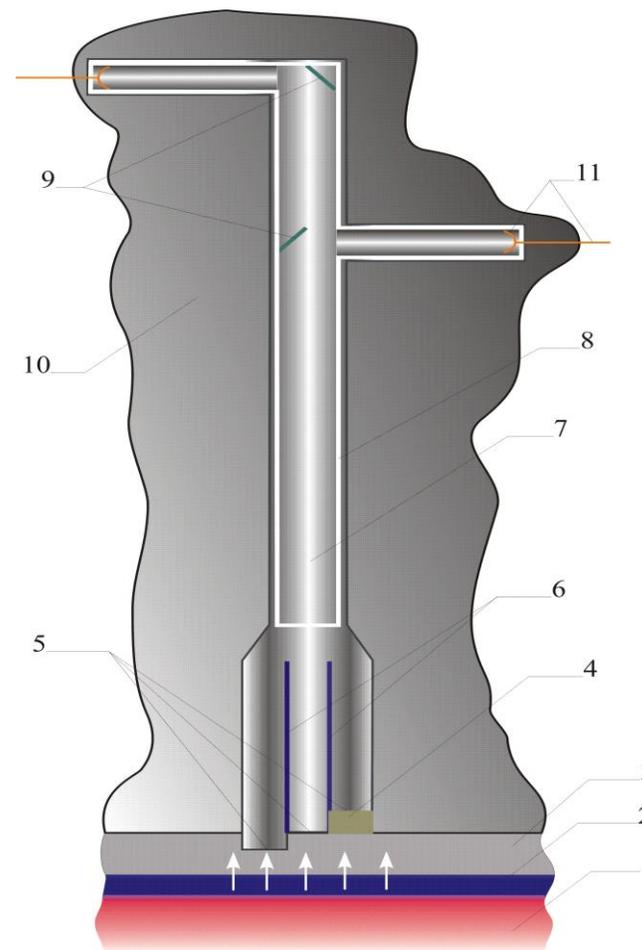
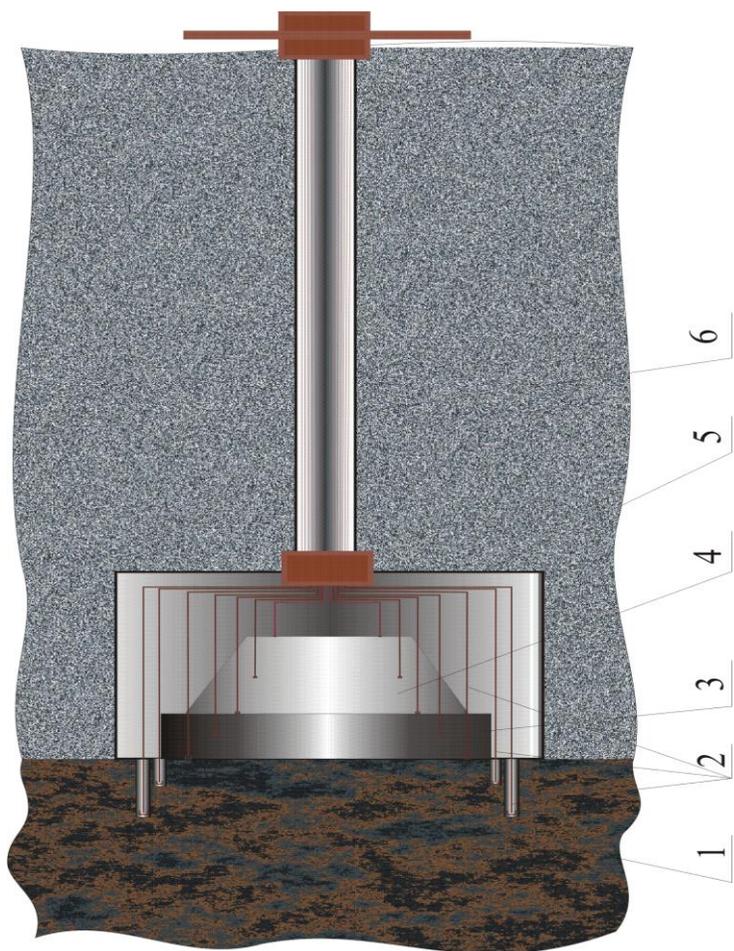
**Затухание тепловой волны  
Формирование ударной**

*Накопление радиоактивных  
веществ в атмосфере привело к  
подземным испытаниям.*

# Блоки для контактных и световых измерений



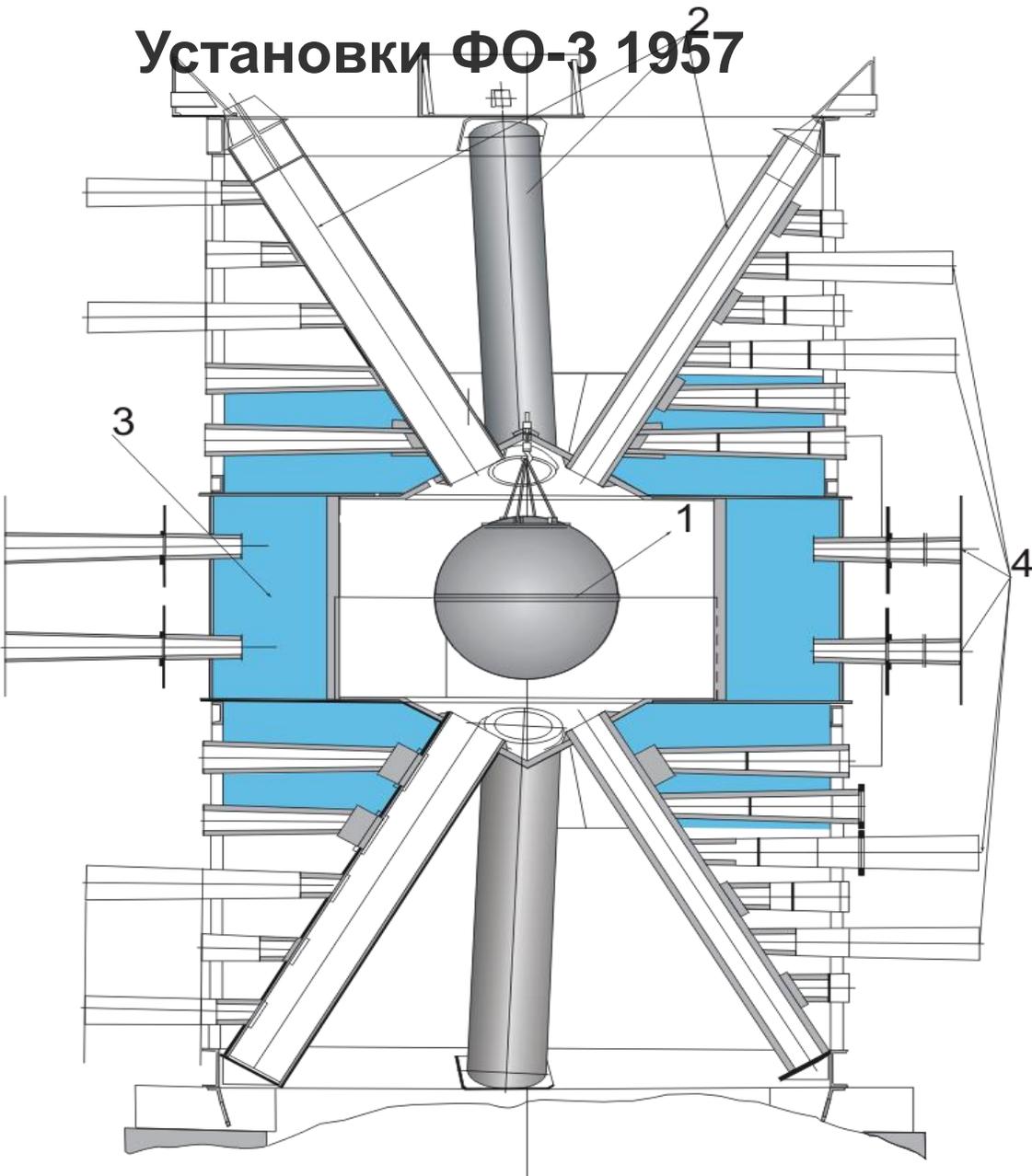
РФАЦ-ВНИИФ  
РОСАТОМ



# Установки ФО-3 1957



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



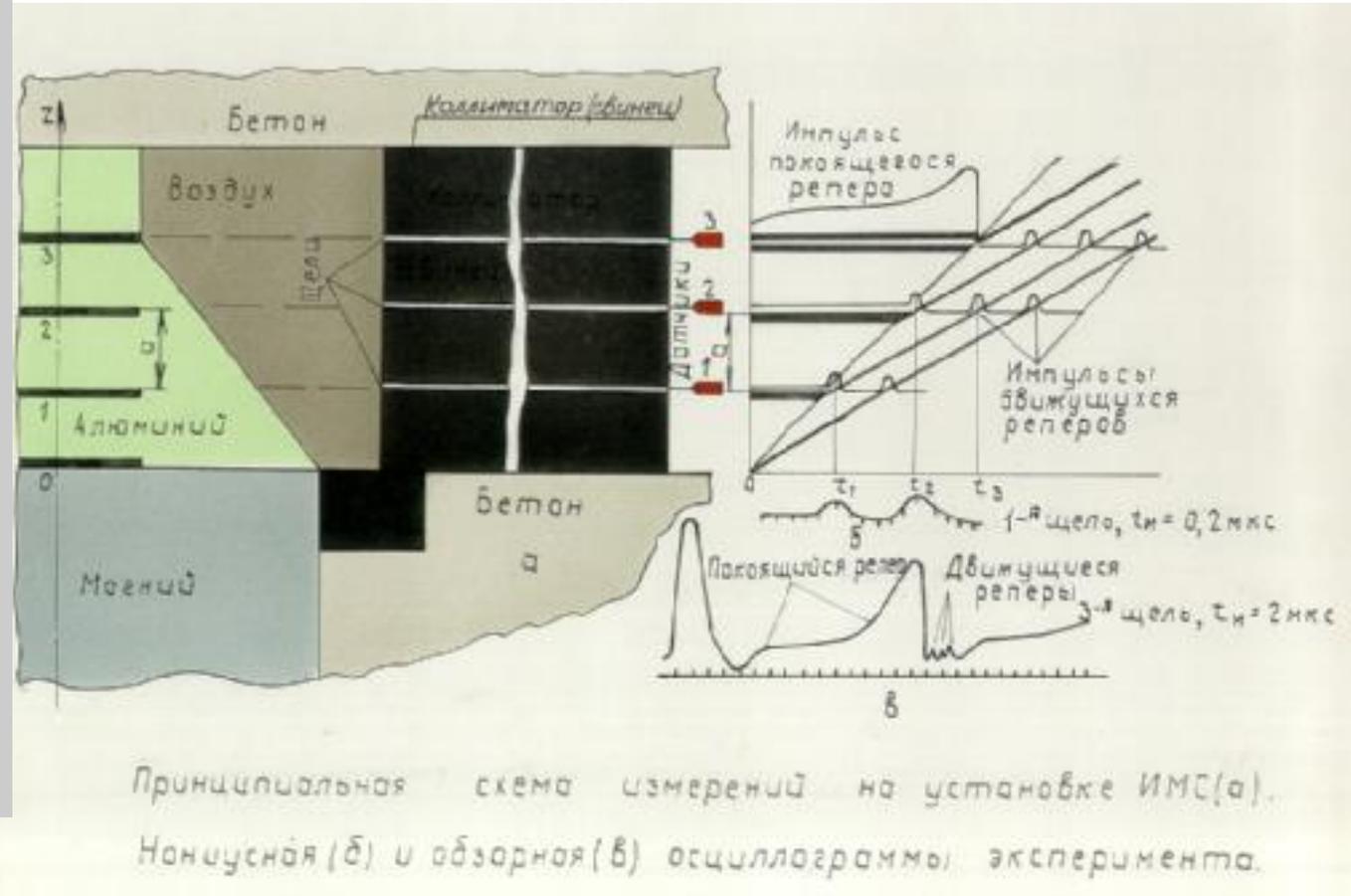
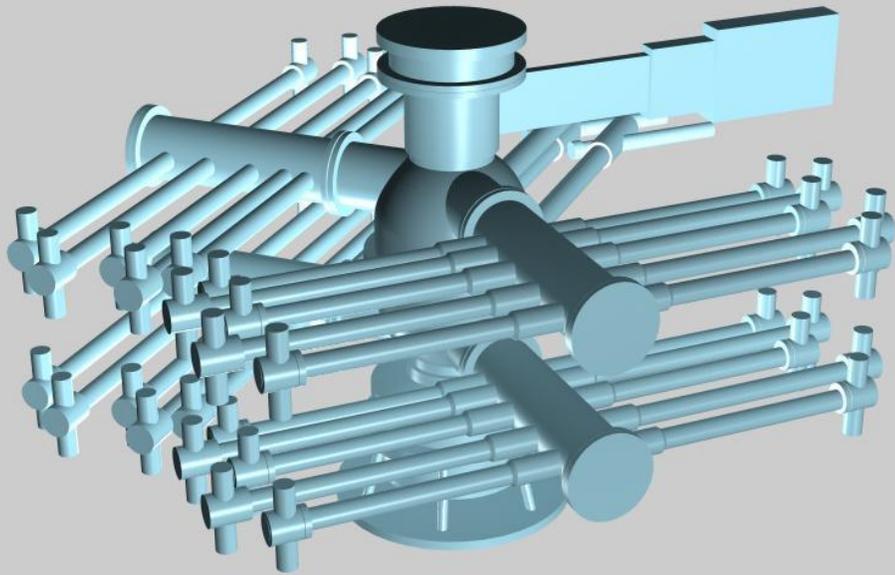
- 1 – взрывное устройство
- 2 – трубы для вывода излучения
- 3 – бак с водой
- 4 – световые каналы для регистрации времени прохождения волны через исследуемые образцы

Высота установки  
около 5 м, поперечный  
размер около 2м.

# Некоторые постановки экспериментов

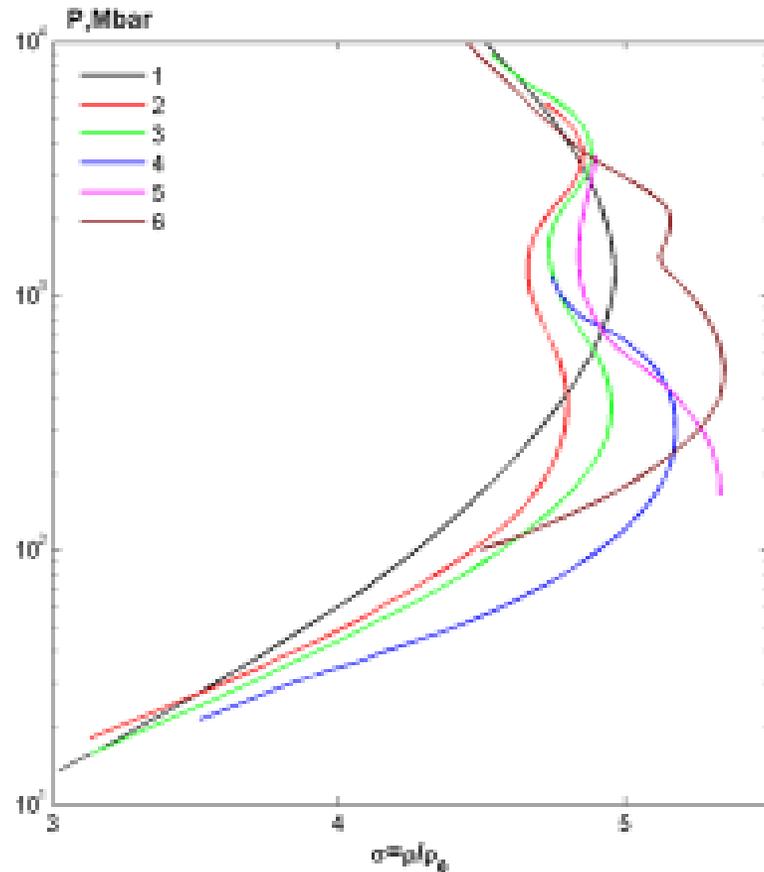


РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

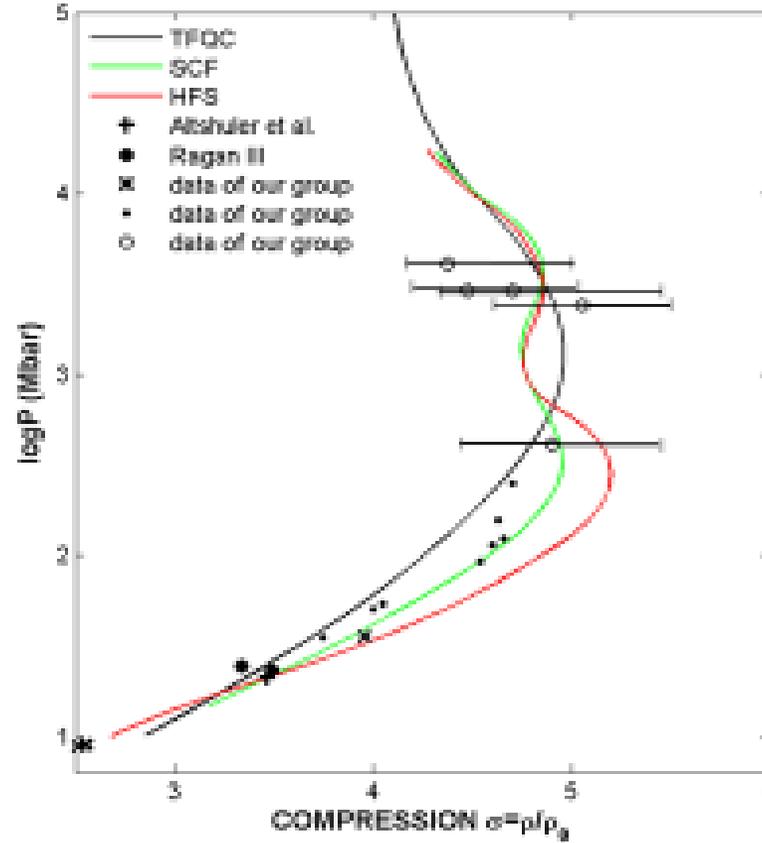




# Нормальная ударная адиабата Al



Сравнение теоретических моделей  
1 – ТФПК, 2 – КУРС, 3 – ССП,  
4 – МХФС, 5 – АСТЕХ, 6 – INFERNO.



Сводные экспериментальные данные  
и теоретические ударные адиабаты.  
Experimental data summery and principal  
theoretical Hugoniot.

# Исследования опасности космических столкновений и возможностей их предотвращения



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

1. Начало 1990-х ознаменовалось запрещением любых ядерных взрывов. Однако у нас было ясное понимание, что существуют реальные угрозы существованию человечеству при столкновении достаточно крупных космических объектов с Землёй. В таких случаях единственным инструментом спасения может быть ядерный взрыв. Мы решили в этом разобраться глубже. Первые сообщения по темам опасности столкновений с космическими объектами и возможностями защиты были сделаны на ЗНЧ-1992. В них участвовали сотрудники американских лабораторий. Они предложили нам на симпозиуме в Туссоне, посвящённом этим вопросам.
2. Симпозиум в Туссоне (проф. Т. Гёрлз, 1993 г.) подсказал идею: организовать смотр аналогичных сил в России. Мы могли это сделать только в Снежинске
3. Пригласили отечественных учёных (бывшего СССР), американских из ядерных лабораторий, НАСА и Т. Гёрлза из Аризонского университета
3. Персонально пригласили Э. Тэллера. Первый ответ был отрицательным. Но когда обратили его внимание, что это по-видимому у него будет единственная возможность познакомиться с институтом и городом, на образование которых он оказал существенное влияние – быстро пришёл положительный ответ.
4. Из далёкого зарубежья были только американские учёные. Много – из ближнего зарубежья.
5. Природа “благословила” её: за полтора месяца до начала произошли падения фрагментов кометы Шумейкеров-Леви на Юпитер – убедительная демонстрация опасности.
6. Обсуждались вопросы опасности и защиты. Научная программа превзошла все ожидания.
7. Были многочисленные встречи участников конференции со школьниками, жителями города, сотрудниками института.



В зале



Выступление Э. Тэллера



На перерывах

# Дальнейшие работы по опасности космических столкновений (ОКО) и по космической защите Земли (КЗЗ)

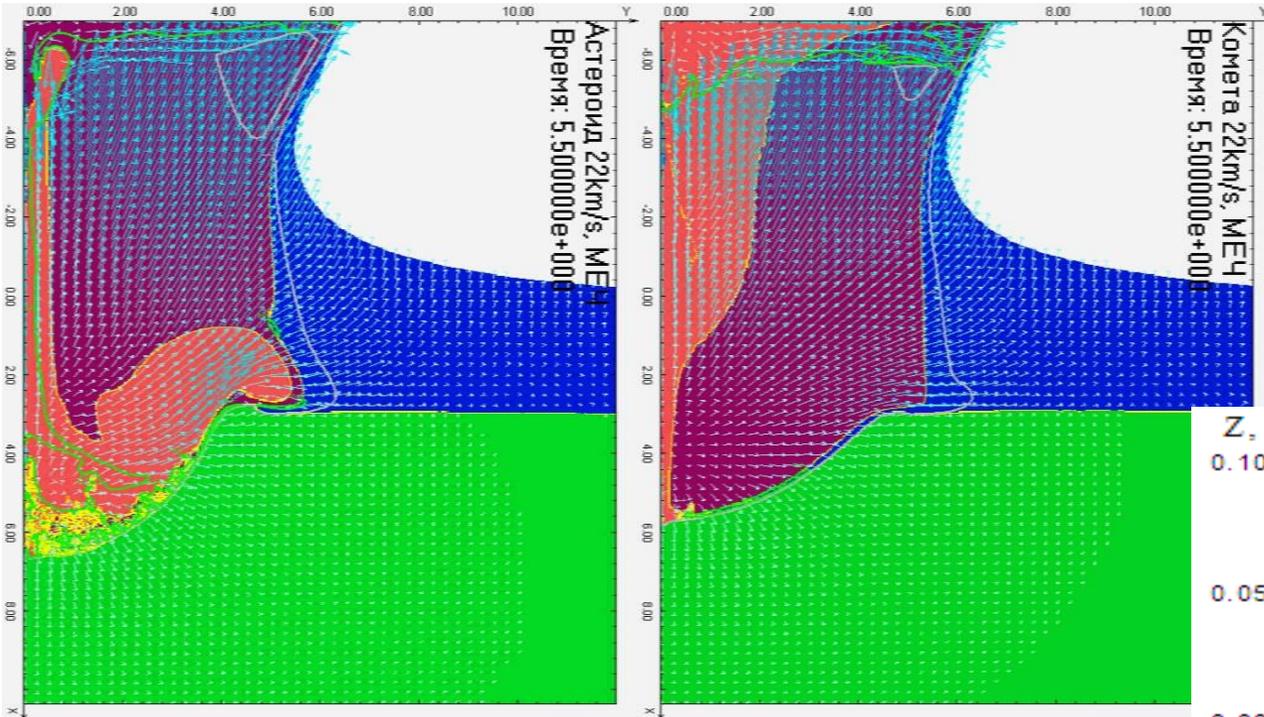


1. КЗЗ-1994, РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина, Снежинск, совместно РКЦ им. Макеева
2. 1995 г. Space Protection of the Earth совместно РКЦ им. Макеева и СПб институтом прикладной астрономии
3. КЗЗ-1996, РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина, Снежинск, совместно РКЦ им. Макеева и СПб Институт теоретической и прикладной астрономии
4. Конференция ООН, Нью Йорк, 1998 г.
5. КЗЗ-2000, Евпатория, Крым, совместно с Крымской астрономической обсерваторией
6. 2004 г Конференция НАСА в Лос Анжелесе
7. С 2007 г. Принято решение вопросы КЗЗ обсуждать на секции 1 Забабахинских научных чтений. За годы работы с 1994 г. были накоплены уникальные научные результаты, часть из которых вошла в коллективную монографию. Покажем некоторые из них.

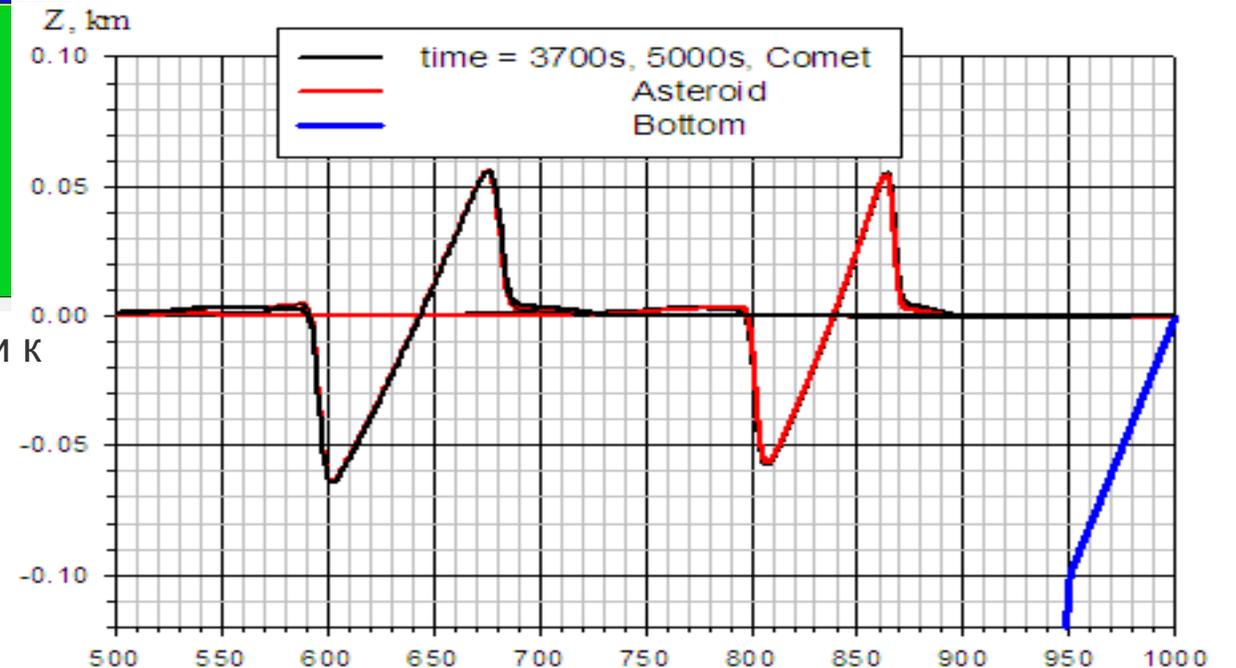
# Падения астероида и кометы в океан



- Вертикальное падение в океан глубиной 3 км каменного астероида и ледяной кометы одинаковой массы. Скорость -- 22 км/сек. Породы дна океана аналогичны граниту. Диаметр астероида 1 км. Характерное время процессов в окрестности удара составляет ~ 1с, а время движения цунами в океане – тысячи секунд.



Два момента времени: приход волны к началу шельфа и к точке излома профиля шельфа. Высота волны 54 м. Профили волн практически неразличимы.



# Шевронные дюны



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

При выходе волн мегацунами, возникающих при столкновении малых космических тел с Землёй возникают дюны, образованные выносом породы, смытой с поверхности шельфа. На Мадагаскаре они достигают высоты 180 м.)

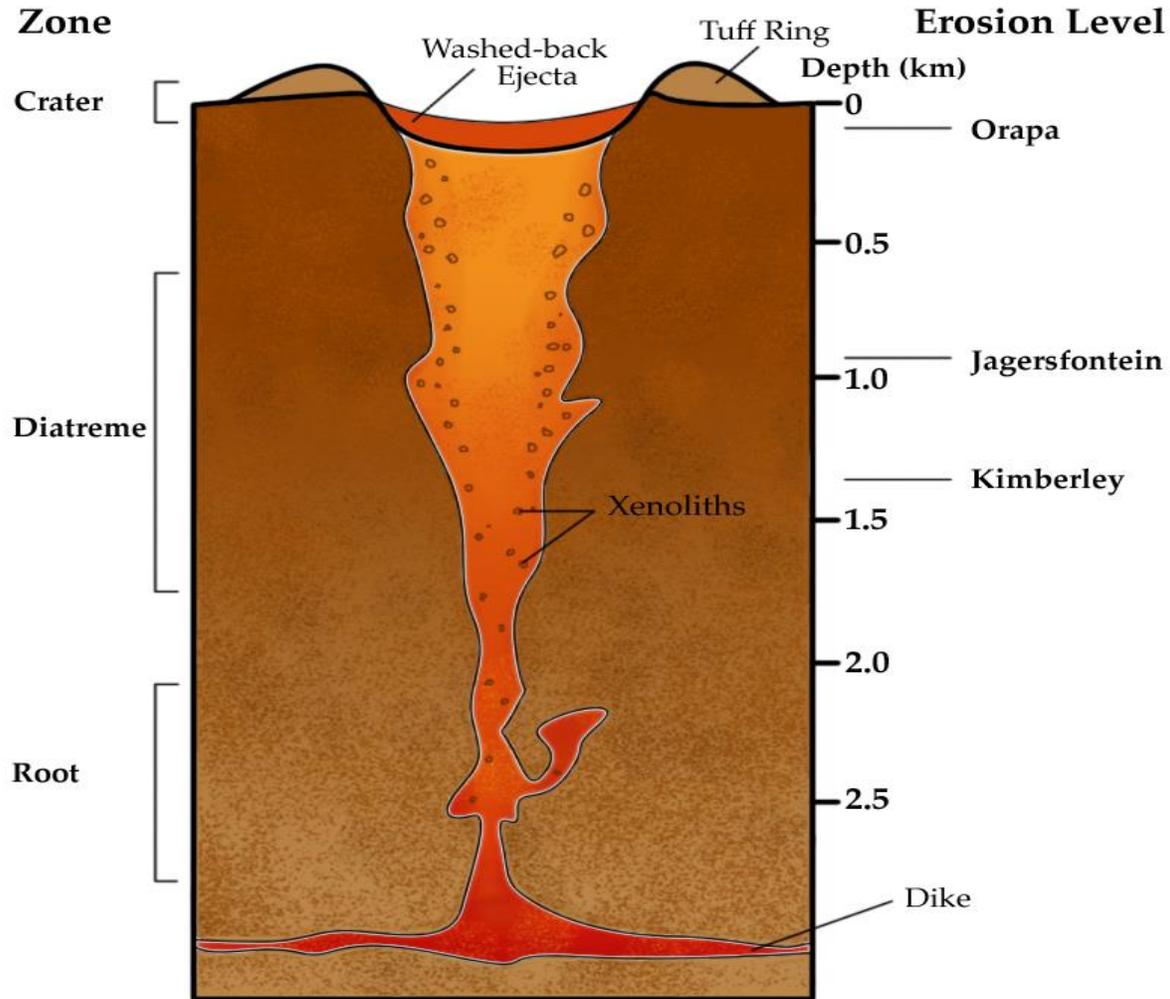


Шевронные дюны на восточном побережье острова Грут и GPS трек полевого маршрута, Австралия, залив Капепнтария.



Шевроны на Мадагаскаре, предположительно обусловлены падением астероида в Индийский океан (кратер Бёркле на дне океана)

# Фокусировка волны Рэлея

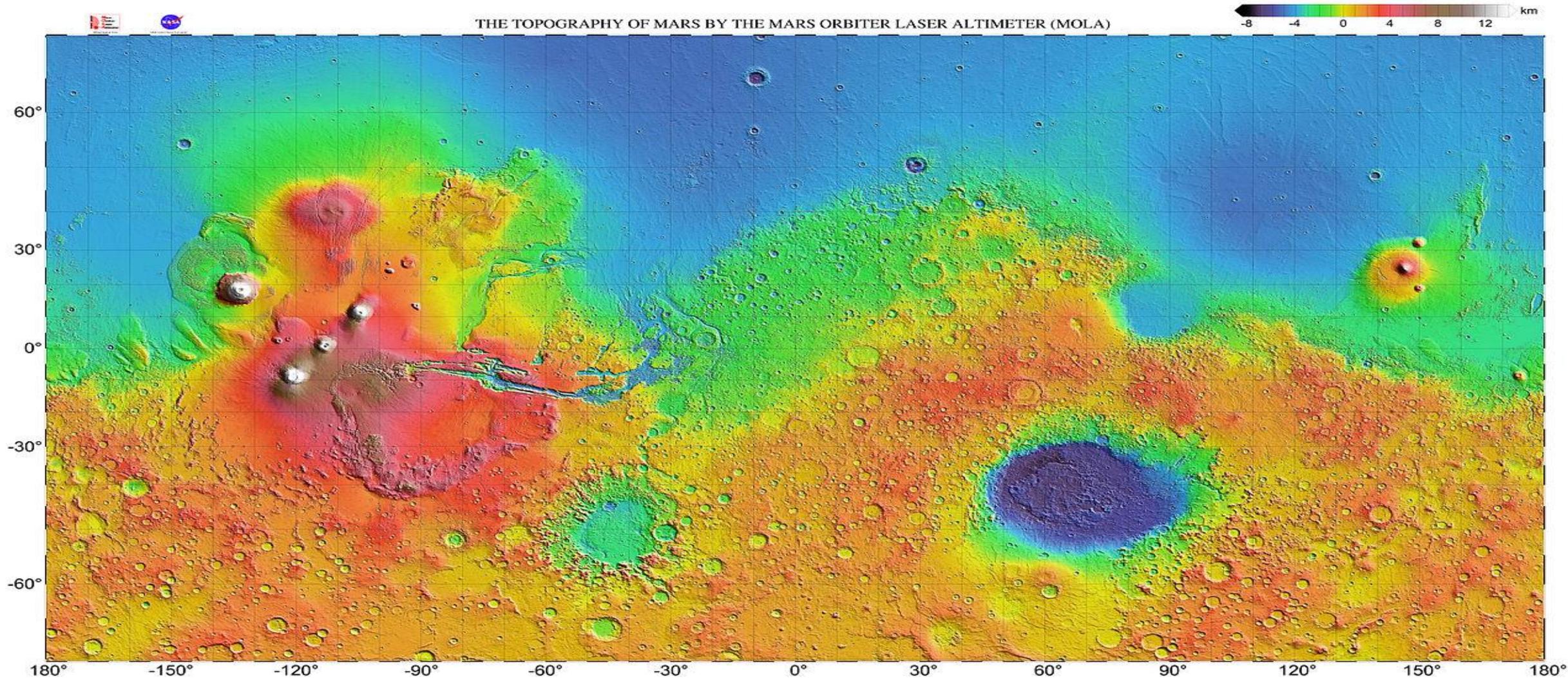


- Удар крупного космического тела
- Формирование и распространение волны Рэлея
- Изменение направления движения частиц при пересечении максимальной «окружности»
- Фокусировка волны Рэлея
- Образование полей диатрем -- трубок взрыва.
- Кимберлитовые трубки

# Карта Марса



РФЯЦ-ВНИИФ  
РОСАТОМ

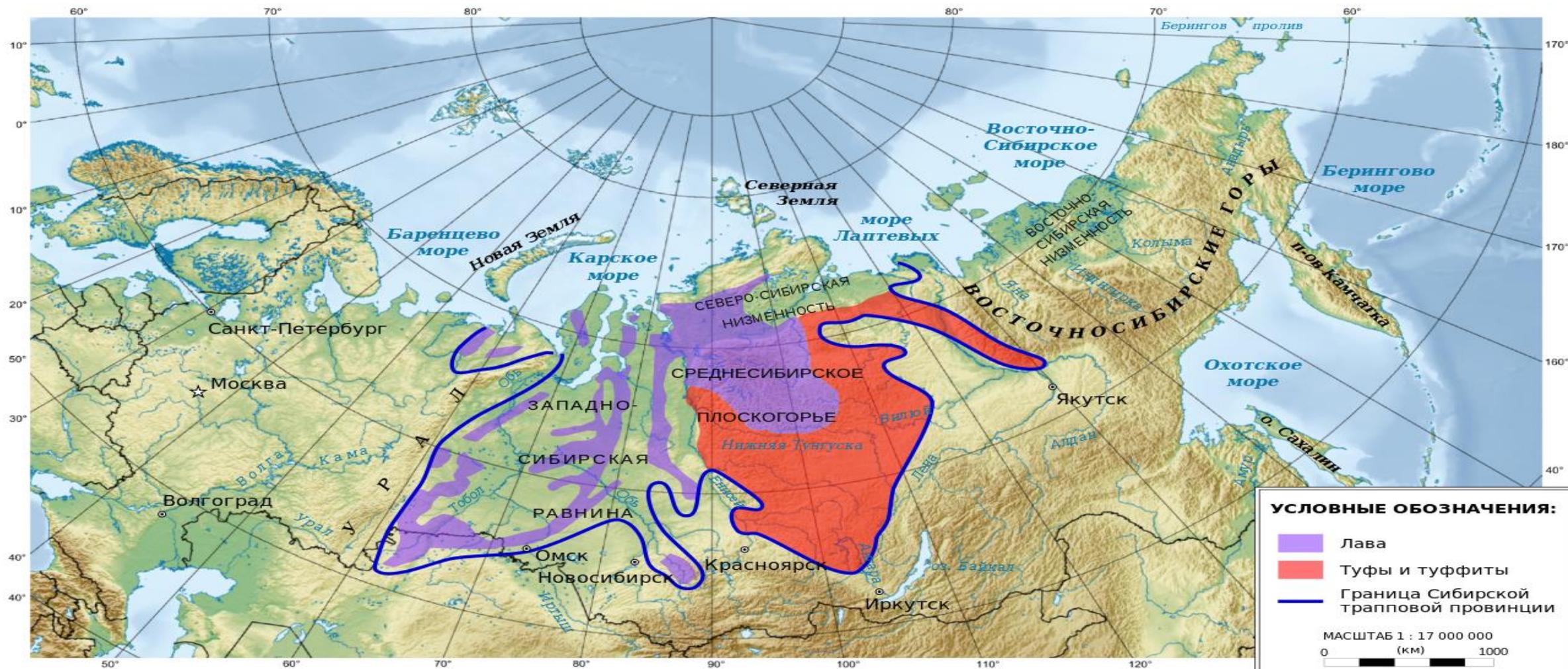


# Сибирские траппы



РФЯЦ-ВНИИГФ  
РОСАТОМ

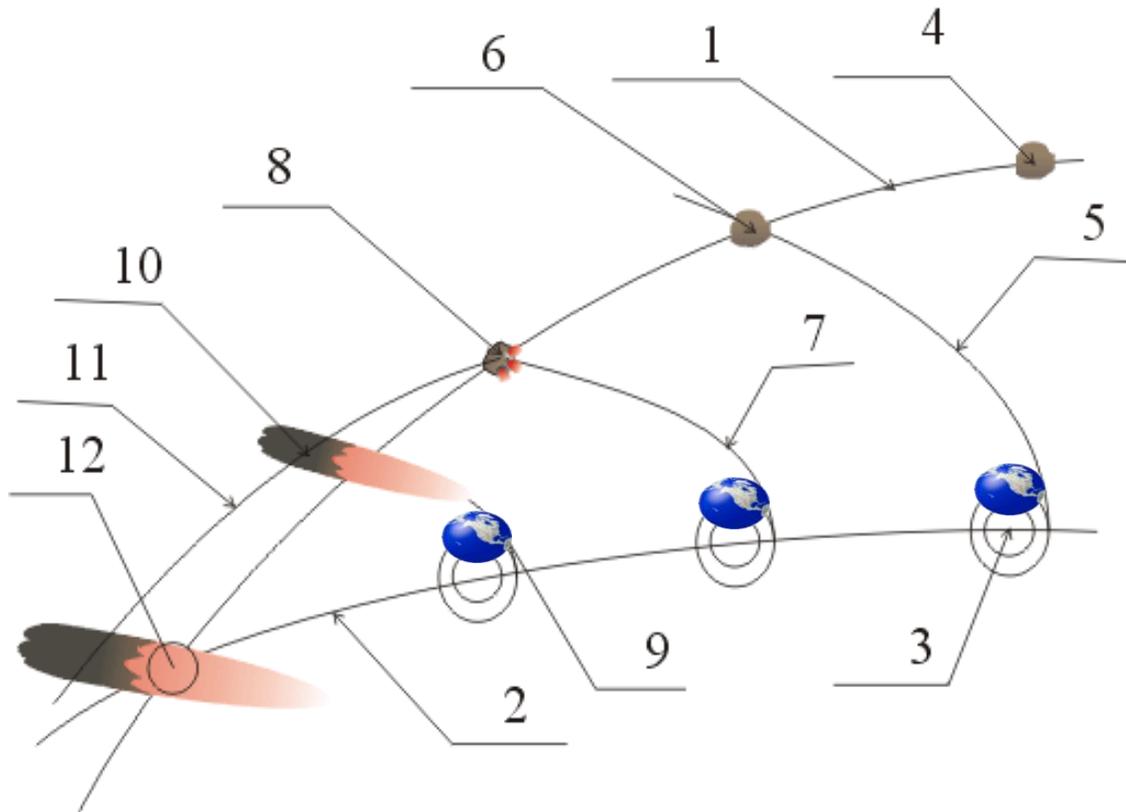
Граница эр палеозой и мезозой (периодов пермь и триасс), 252 млн



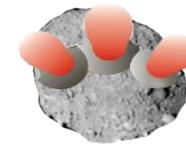
# Диспергирование и “выметание” фрагментов



*Для обеспечения лучшей направленности целесообразна группа ЯВУ*



1. Орбита астероида
2. Орбита Земли
3. Земля
4. Астероид
5. Миссия перехвата
6. Перехват



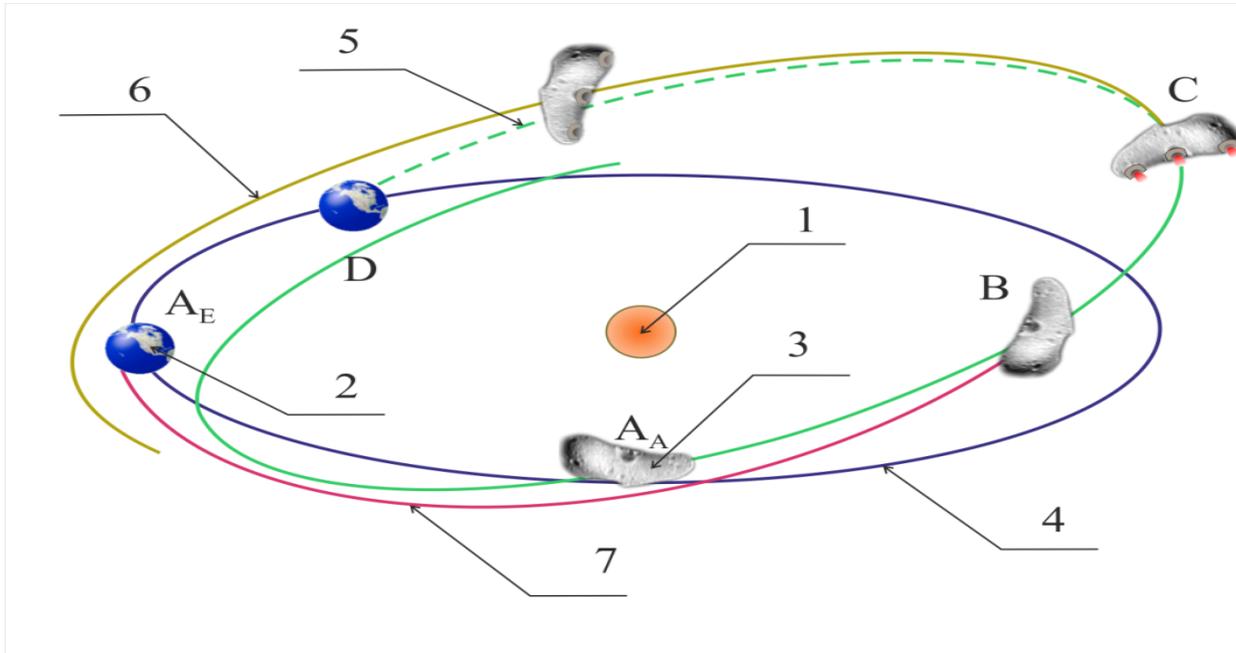
*Рекомендуется для МТ с размером более 100м.*

# Мягкая корректировка орбиты



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

*Групповой подрыв ЯВУ оптимизированных по мощности и размещению*



$A_E, A_A$  – Положения Земли и астероида на момент запуска миссии перехвата

B – Посадка на астероид

C – Взрывы

D – Ожидаемое столкновение

1. Солнце

2. Земля

3. Астероид

4. Орбита Земли

5. Орбита астероида

6. Изменённая орбита астероида

7. Траектория перехватчика

*На примере Эроса.  
Характерная скорость несколько мм/с.*

# О высокоточном моделировании ядерно-физических процессов



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

1. Взяв у природы соответствующие ресурсы и используя их для разных целей (наработки энергии, создав средства дополнительной защиты определённой социальной среды, возможные средства глобальной защиты) мы с неизбежностью нарушили веками создаваемые условия обитания. И поэтому обязаны обеспечить в дальнейшем условия, приемлемые для нашей цивилизации.

2. С другой стороны, если содержание водорода во вселенной 88,6%, гелия 11,3% и остальные элементы 0,1%. Представьте теперь, как мал приемлемый для нас мир и среда обитания.

3. Поэтому наступает время, когда мы должны прецизионно описывать не только работу ядерных, не только получение для них свежего топлива и отслеживать состояние тех пород, из которых мы уже изъяли может быть основную часть радиоактивных веществ, но вполне опасная часть ещё осталась. Она может существенно осложнить условия обитания в местах нахождения.

4. И ещё сложнее обстоит дело с тем, что образовалось к концу компании в реакторе... То есть нужны технологии обращения с отработанным ядерным топливом, извлечения и переработки наиболее опасных компонентов. Словом, мы создали среду обитания, которая требует очень осмотрительного и недешёвого обращения с ней.

5. В 2010 г. на м предложили обратить внимание на вопросы обеспечения безопасности при тяжелых (запроектных) авариях на АЭС с ВВЭР. Первоначально это были вопросы воспламенения и протекания процессов горения водорода в помещениях ЗО АЭС. Эти работы продолжаются и в настоящее время по «урезанной» программе – испытания рекомбинаторов водорода.

5. С этой целью у нас ведутся работы с 2012 г. частью отдела 333, регулярно проводится семинар Моделирование технологий ядерного топливного цикла (МТ ЯТЦ).

6. Но чем дальше в лес, тем больше дров. С 2019 г. это уже наработка водорода из  $\text{CH}_4$  с помощью тепла ВТГР

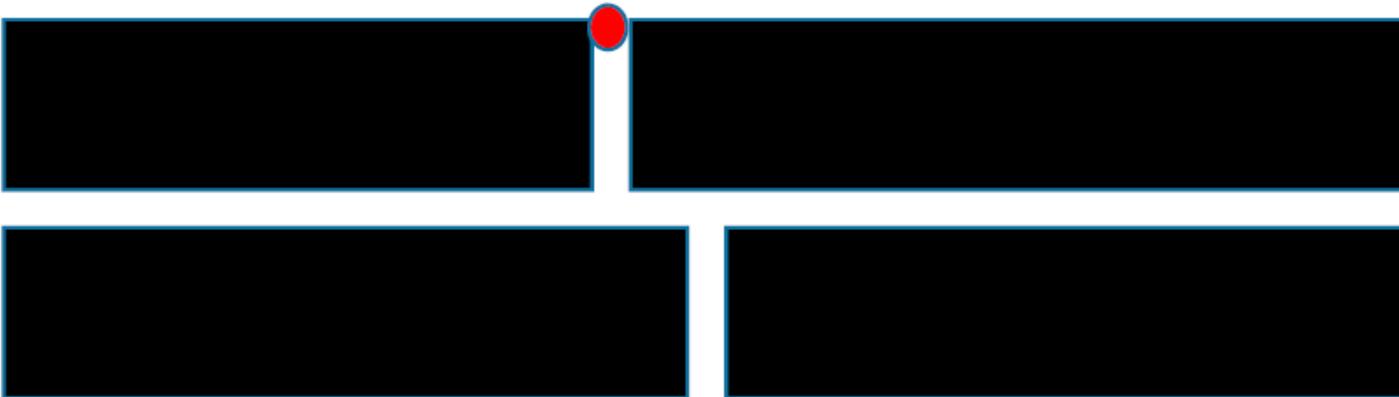
# О высокоточном моделировании ядерно-физических рассеянии нейтральных честиц



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

## Моделирование рассеяния фотонов 1/6

1. Рассматривается когерентное рассеяние фотонов не атомах. Используются данные из библиотеки ENDF<sup>1)</sup>
2. Необходима нормированная плотность параметров рассеяния, но она отсутствует. Тем не менее имеется потребность в расчётах переноса фотонов.
3. Разработана и используется теория когерентного рассеяния. Использование этой технологии уточняет также результаты для некогерентного рассеяния.

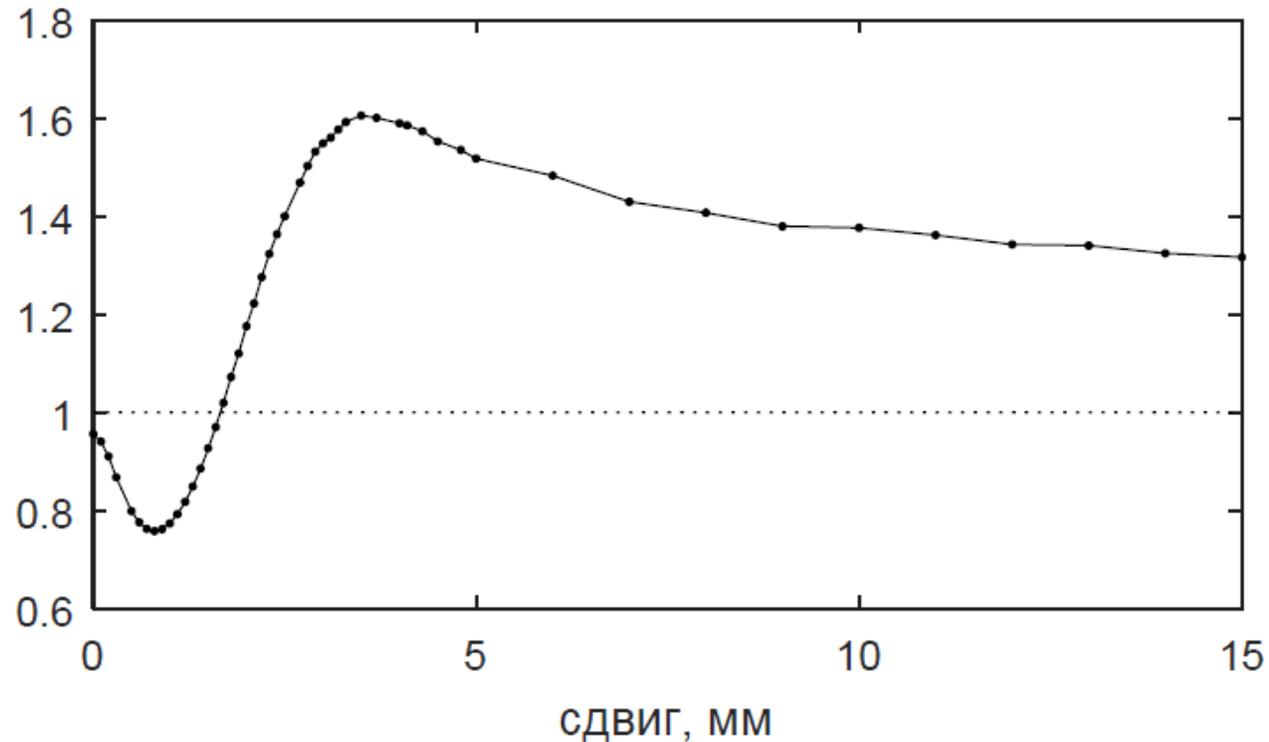


Методическая задача  
Геометрия «двери»

$$\frac{d\sigma(\mathbf{E}, \mu)}{d\mu} = \pi r_0^2 (1 + \mu^2) \left( (F(\mathbf{q}) + F_R(\mathbf{E}))^2 + F_I(\mathbf{E})^2 \right),$$

ENDF<sup>1)</sup> ENDF-102. Data Formats and Procedures for evaluated nuclear Data Files, ENDF-6/ BNL-NCS-44945-01/04 Rev..  
Informal Report, Revised April 2001, N.Y., 11973-5000.

# Моделирование рассеяния фотонов 2/6



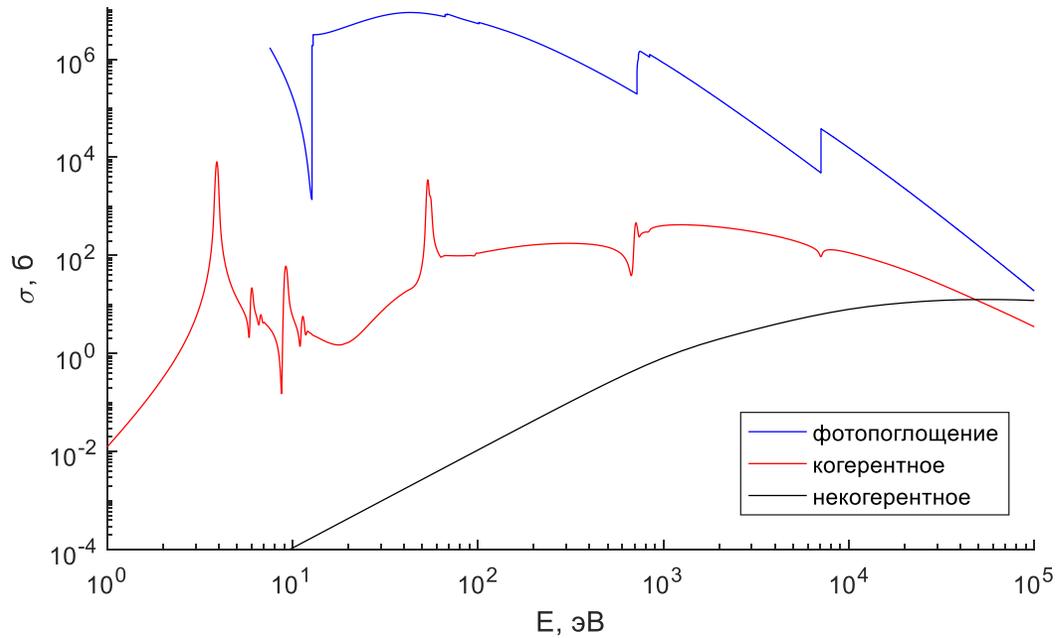
Отношение значений дозы, рассчитанной с учётом когерентного рассеяния к аналогичной величине, рассчитанной без такого учёта в зависимости от сдвига.

# Моделирование рассеяния фотонов 5/6

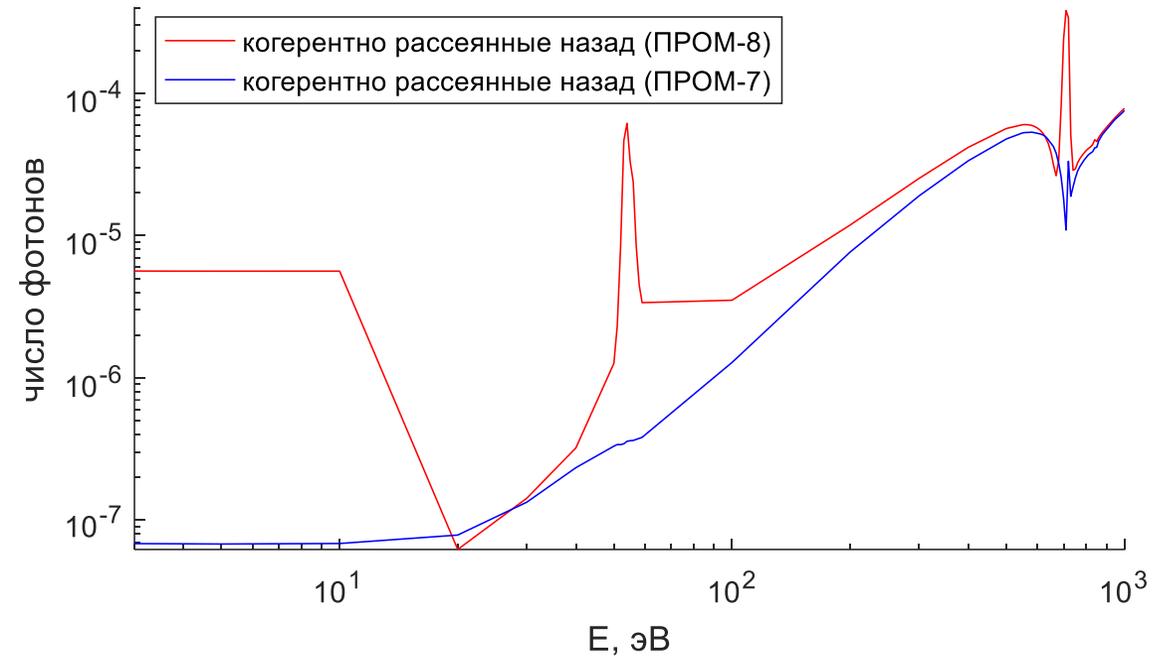
## Сечения фотопоглощения, когерентного и некогерентного рассеяния на железе



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Сечения



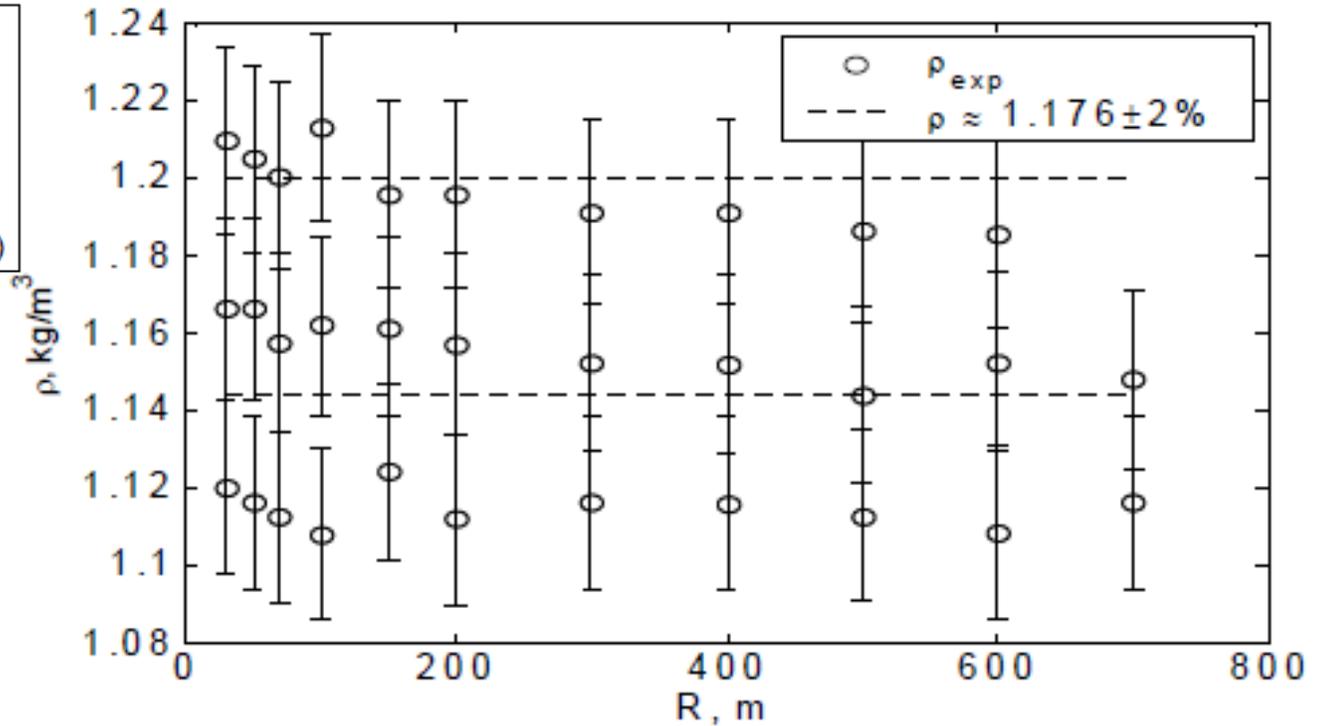
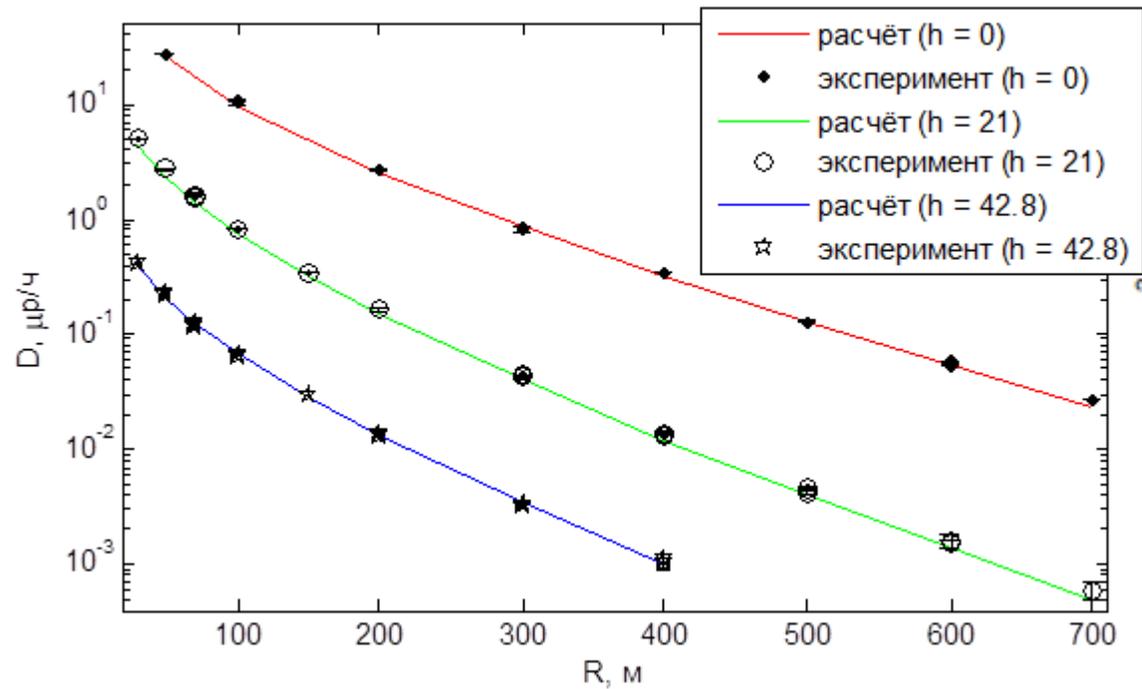
Потоки

# Моделирование рассеяния фотонов 6/6

## Эксперимент SkyShine 1987 г. Университет штата Канзас



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Сравнение экспериментальных и расчётных значений дозы в трёх сериях экспериментов с отсутствием крышки бетонной над областью источника ( $h=0$ ) и при наличии ( $h$ : 21 см, 42,8 см)

Значения плотностей воздуха, измеренных в экспериментах с бетонной плитой толщиной 21 см.

# ВВЭР: Расчёт нейтронно-физических характеристик на минимально контролируемом уровне энергии (МКУ)



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Получение информации о протекании нейтронно-физических процессах существенно сложнее в реальных системах, поэтому рассматриваются относительно простые случаи. В частности, таковым является режим МКУ. Проверка его осуществляется путем сравнения результатов, полученным с помощью двух комплексов ПРИЗМА и МСУ НИЦ КИ. значений эффективного коэффициента размножения нейтронов. Видно, что результаты расчётов по двум комплексам не противоречат друг другу.

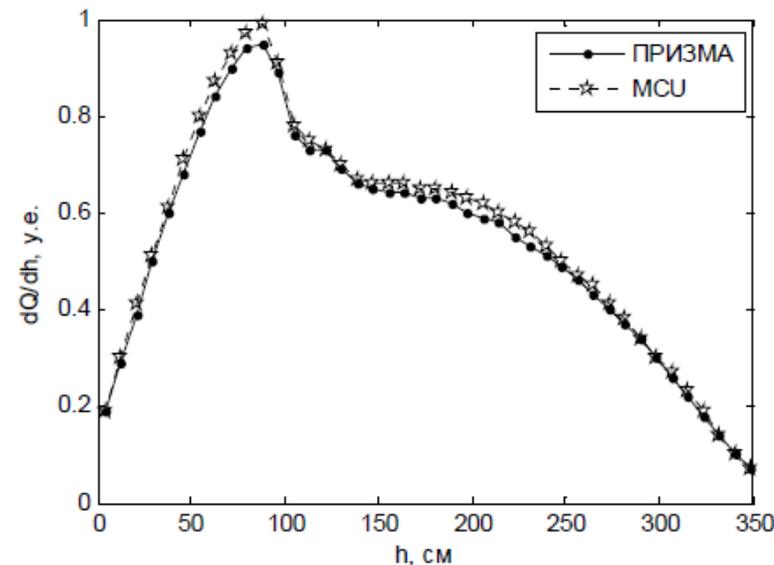
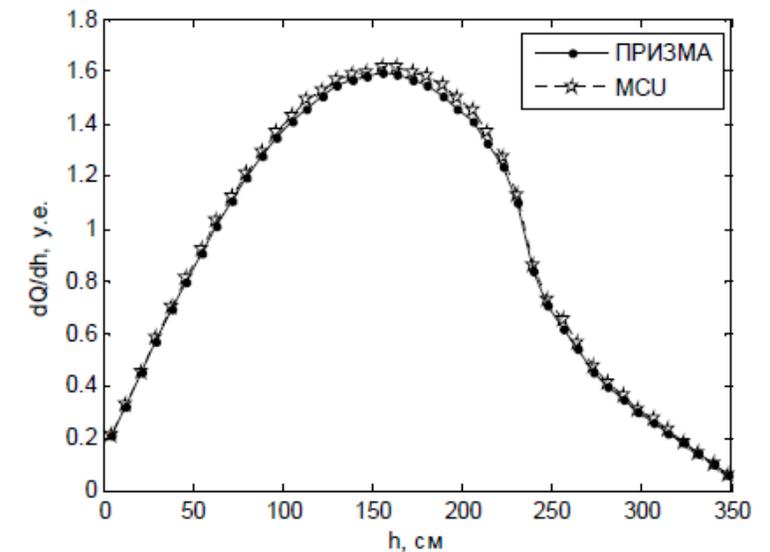
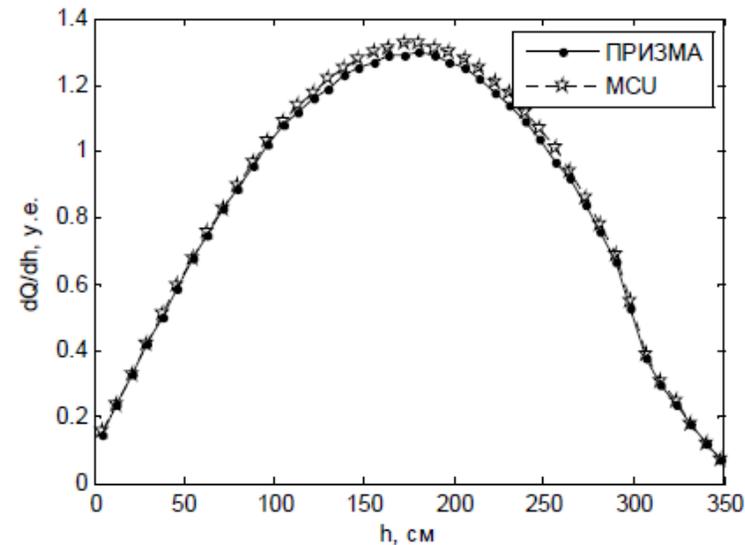


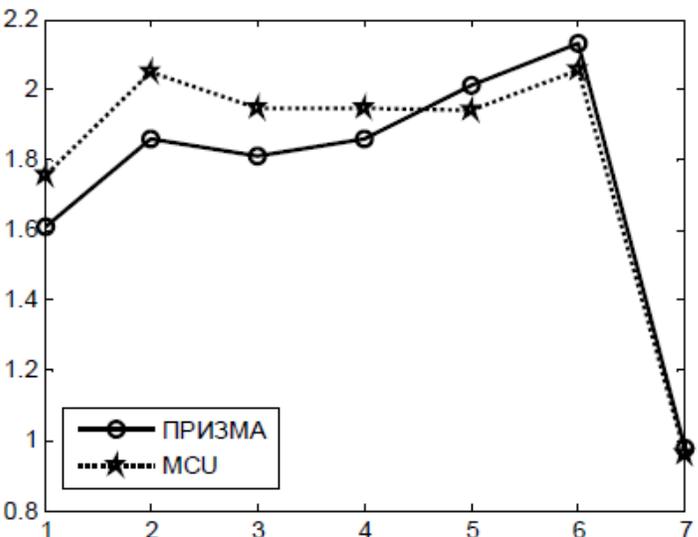
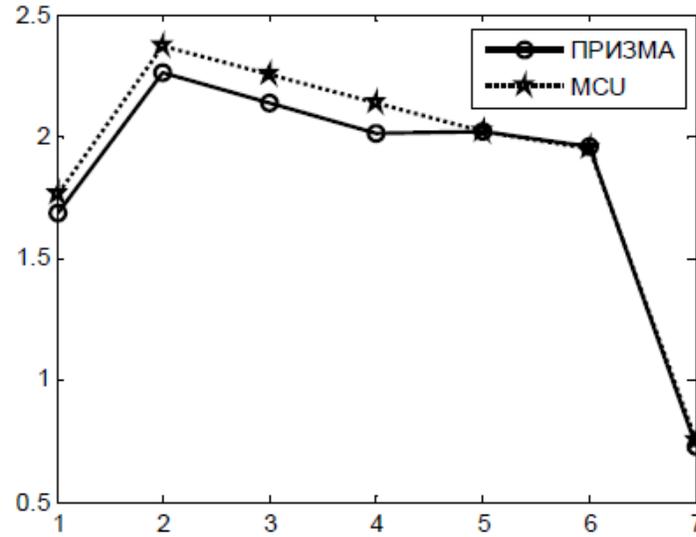
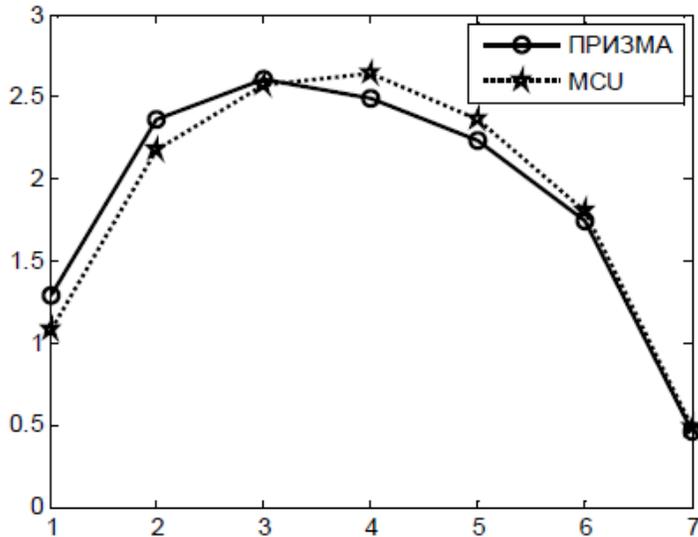
Рис. 3.1.1. Распределение энерговыделения (в условных единицах) по высоте ТВС 52. Вверху слева состояние № 2. Вверху справа состояние № 7. Внизу слева состояние № 15.

# Сравнение ПРИЗМА и МСУ (КИ) для регулярного режима работы ВВЭР.

## Расчёт датчиков внутреннего контроля



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Родиевые датчики прямой зарядки (ДПЗ)  $\beta$ -эмиссионного типа в составе системы внутри-реакторного контроля (СВРК). Распределение тока по ДПЗ (в условных единицах) для ТВС 52. Вверху слева время = 0 суток. Вверху справа время = 160 суток. Внизу слева время = 320 суток.

Датчики выполнены в форме цилиндра с наружным диаметром  $\sim 0,05$  см и длиной  $\sim 25$  см. Родиевый эмиттер окружен трубчатым кварцевым изолятором и стальной оболочкой. При радиационном захвате нейтронов ядрами  $^{103}\text{Rh}$  образуются нестабильные ядра  $^{104}\text{Rh}$ , при  $\beta$ -распаде которых часть электронов с энергией, достаточной для вылета из эмиттера, прохождения изолятора и взаимодействия с наружным электродом (коллектором), индуцирует ток во внешней цепи, соединяющей эмиттер и коллектор. Этот ток пропорционален скорости образования радиоактивных ядер и соответственно потоку нейтронов. Регистрируемое с помощью амперметра значение тока обрабатывается специальными программами и преобразуется в значение плотности тепловой мощности установки вблизи измерительного канала.

# Заключение



1. Физика высоких плотностей энергии, которая начала формироваться в 1950-х годах минувшего века в настоящее время переходит в новую стадию развития благодаря углублению ранее поставленных задач, появлению новых, и главное, благодаря новым возможностям при получении их решений.
2. Это предполагает дальнейшее развитие расчётно-теоретических работ и проведение новых экспериментальных исследований, и постановке новых масштабных задач.
3. Естественно, что при этом параллельно будут создаваться новые математические комплексы, новые экспериментальные методы исследований и новые физические установки.
4. Нас ждут новые интересные и содержательные работы!!!

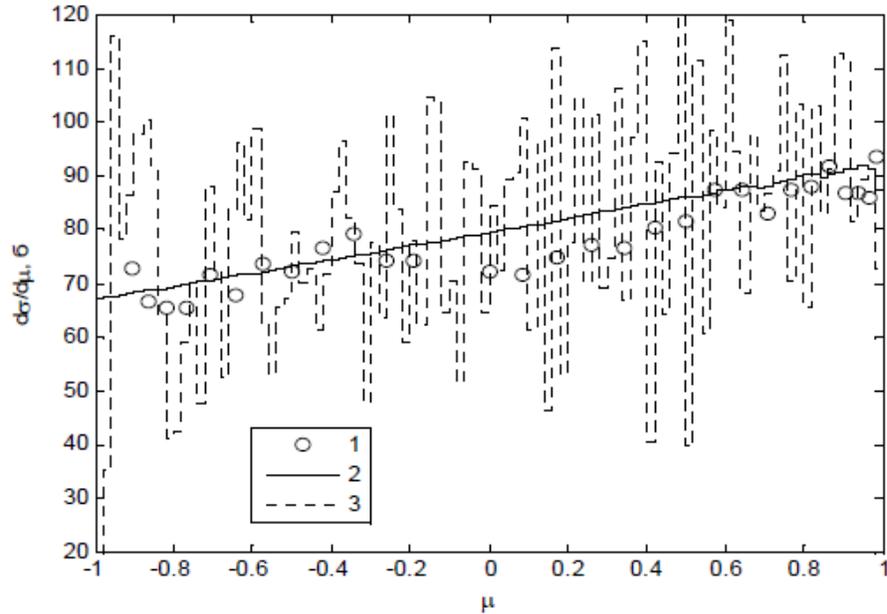
# Спасибо за внимание

V.A.Simonenko@VNIITF.ru

# Прецизионная подготовка данных. Сравнение с NJOY 2/5



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Зависимость от косинуса угла рассеяния дифференциального сечения взаимодействия нейтрона с энергией 0.0063 эВ с лёгкой водой при комнатной температуре.

1 – работа *J.R. Beyster. NEUTRON SCATTERING FROM LIGHT WATER. Nuclear Science and Engineering; Vol.31, p.254. 1968.*

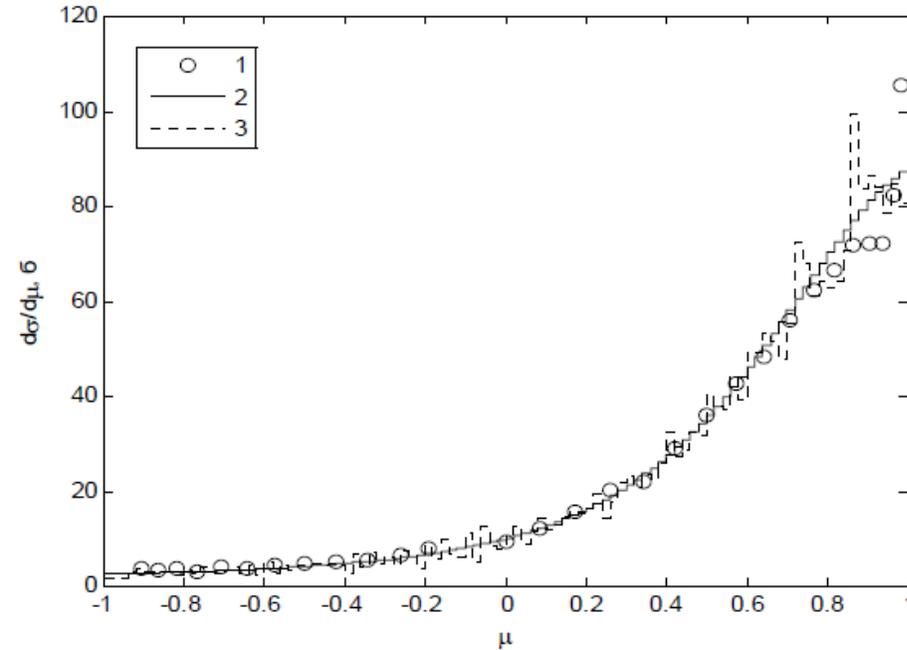
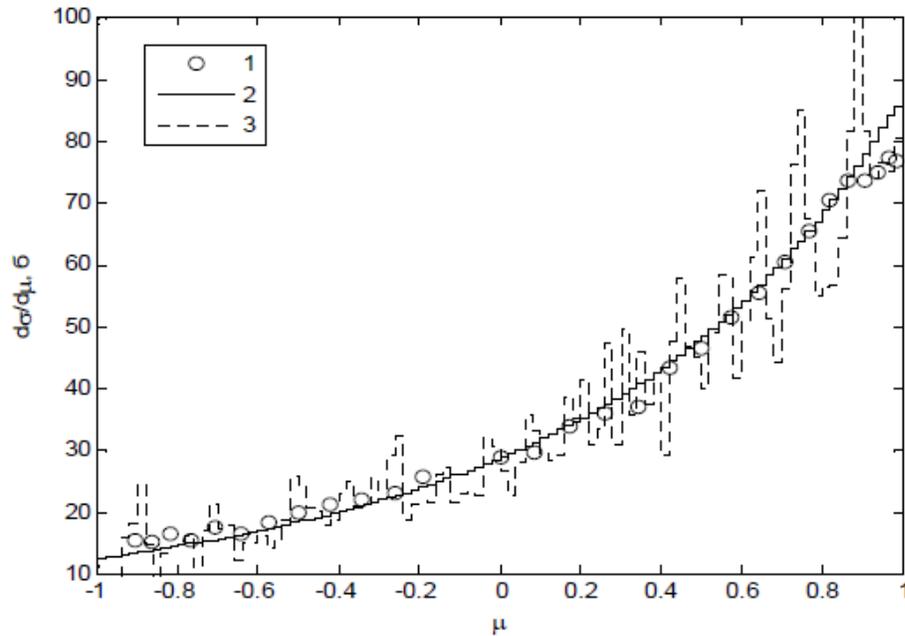
2 - расчёт по алгоритмам, приведённым в настоящей работе.

3 – расчёт по программе NJOY *MacFarlane R.E., Muir D.W. The NJOY Nuclear Data Processing System, version 9.1. Los Alamos National Laboratory, 1994.*

# Прецизионная подготовка данных. Сравнение с NJOY 3/5



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Зависимость от косинуса угла рассеяния дифференциального сечения взаимодействия нейтрона с энергиями 0.099 эВ и 2,2 эВ с лёгкой водой при комнатной температуре.

1 – работа .*J.R.Beyster. NEUTRON SCATTERING FROM LIGHT WATER. Nuclear Science and Engineering; Vol.31, p.254. 1968.*

2 - расчёт по алгоритмам, приведённым в настоящей работе.

3 – расчёт по программе NJOY. .*MacFarlane R.E., Muir D.W. The NJOY Nuclear Data Processing System, version 9.1. Los Alamos National Laboratory, 1994.*

# Моделирование астрофизических процессов



- Рентгеновские вспышки на поверхности нейтронных звезд
- Впервые обнаружены в 1974 году спутником *ANS* в двойной системе 3U 1820-30 и позднее в ряде других двойных систем с постоянным рентгеновским излучением.
- Повторяются квазипериодически через несколько часов.
- Яркость рентгеновского излучения поднимается примерно за 1 секунду и потом падает в течение 3–10 секунд.
- Энергия вспышки порядка  $10^{38}$  эрг.