



Ведущий научный сотрудник

Курчатовского комплекса
ядерных транспортных
энергетических технологий

AnanovSS@gmail.com

Реакторы синтеза- деления и их место в современной ядерной и термоядерной энергетике



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
"КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ"

Что такое мир будущего?))



...сохранение органических ресурсов планеты для их неэнергетического использования...

«Саммит тысячелетия» 6 - 8 сентября 2000 года, (В.В. Путин)

...природоподобные технологии, которые не наносят урон окружающему миру, а существуют с ним в гармонии...

Юбилейная сессия ООН в сентябре 2015 года, (В.В.Путин)



Энергия
защита отходов АЭС
Обеспечение АЭС топливом
также...безопасность!





*Басня И.А. Крылова
«Стрекоза и муравей»*

Попрыгунья Стрекоза
Лето красное пропела;
Оглянуться не успела,
Как зима катит в глаза.

...

Сценарии развития, потребления и производства



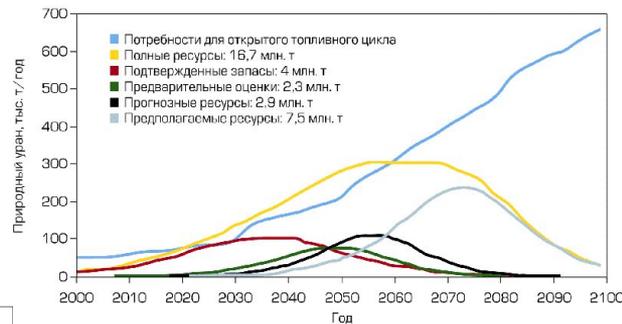
«Мир приближается к состоянию, когда ресурсов (в первую очередь энергетических) будет оказывать доминантное воздействие на все сферы жизни людей...»

*ЭНЕРГЕТИКА В ЭКОНОМИКЕ 21 ВЕКА.
Велихов Е.П., Суботин С.А., Цибульский В.Ф.*

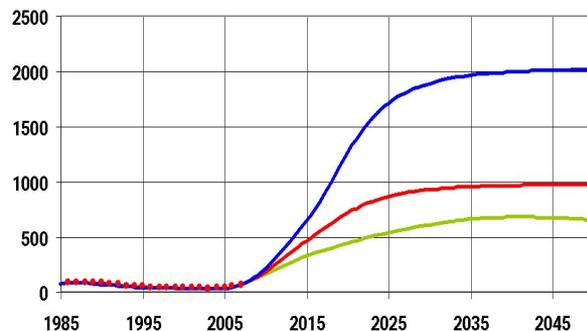
Важно!

- потребности растут
- ресурсы ограничены
- экология важна
- идеального решения пока нет!
- если оно будет — то не одно))

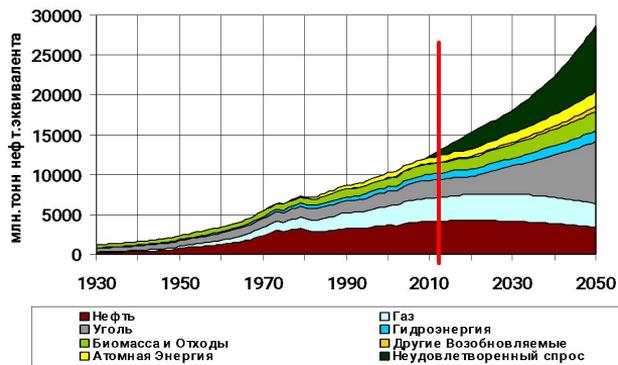
9 февраля 2022г.



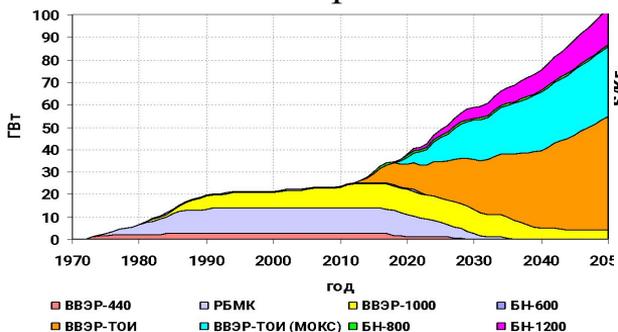
Ресурсы природного урана



Прогноз на изменения цен на природный уран



Баланс первичных энергоисточников в мире



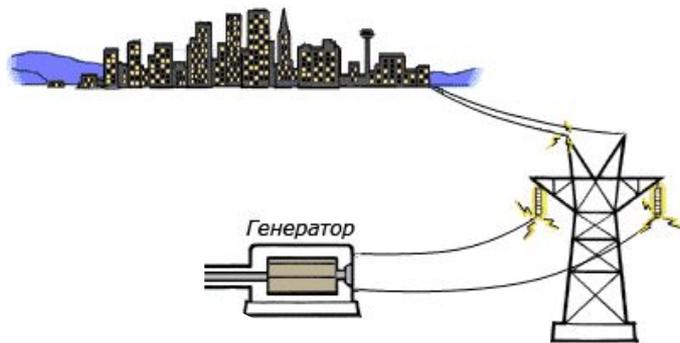
Установленные мощности

Какие способы получения энергии мы используем

Вспомним:

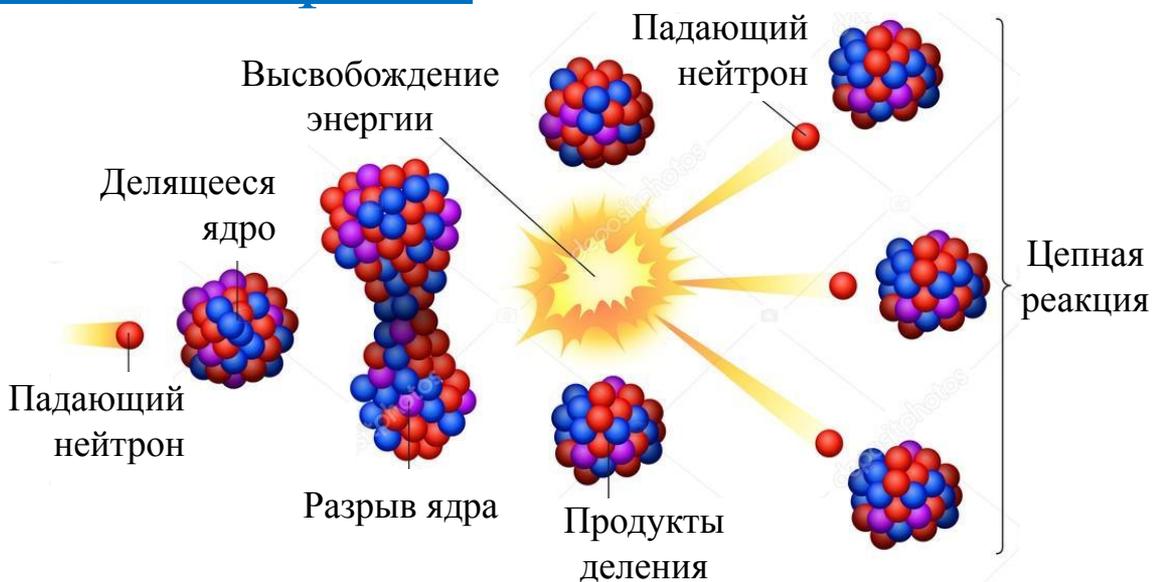
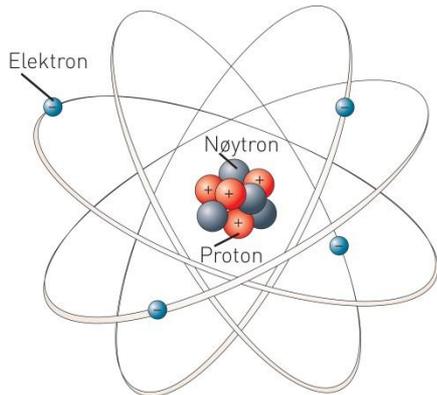
...сохранение органических ресурсов планеты для их неэнергетического использования...

...природоподобные технологии, которые не наносят урон окружающему миру, а существуют с ним в гармонии...



Атомная энергия и откуда она берется

Атомы состоят из электронной оболочки и ядра, которое состоит их протонов и нейтронов.



Ядерная энэргия (áтомная энэргия) — энергия, содержащаяся в атомных ядрах и выделяемая при ядерных реакциях и радиоактивном распаде.



Важно!

- продукты деления
- нейтроны
- реакция цепная (самоподдерживающаяся)

Страничка истории

Музеи Курчатовского института:

- Дом-музей академика И.В. Курчатова,
- Музей Курчатовского института,
- Музей первого на континенте Евразия уран-графитового реактора Ф-1.



кабре

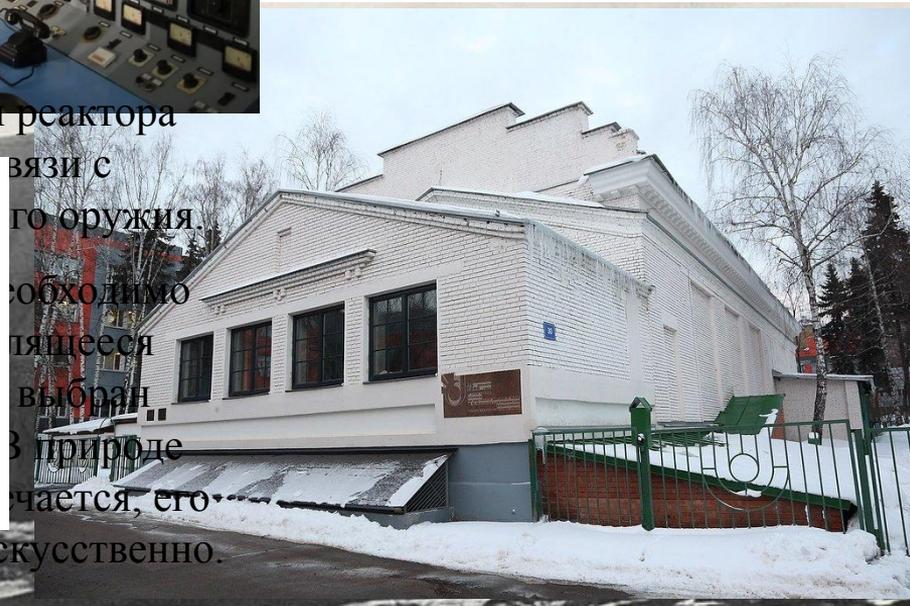


Задача создания реактора



нужно получать искусственно.

В Евразии первым ядерным реактором стала установка Ф-1, заработавшая 25 декабря 1946 года под руководством И. В. Курчатова



Страничка истории

ВЫСТАВКА 12+
ФЕНОМЕНАЛЬНО ПЕРВЫЙ.
АТОМНЫЙ
 ПРОЕКТ, КОТОРЫЙ ИЗМЕНИЛ МИР

24.12.21 –
 15.03.22 ГГ.
 ВДНХ, ПАВИЛЬОН
 «РАБОЧИЙ
 И КОЛХОЗНИЦА»

СОВ. СЕКРЕТНО
 Экз. №, !
 РАССЕКРЕЧЕНО



Выставка будет открыта до 15 марта 2022 года.
График работы: вторник–воскресенье с 11:00 до 22:00.
Вход бесплатный.



Проблемы современной энергетики

Ре́актор на тепло́вых нейтро́нах — ядерный реактор, использующий для поддержания цепной ядерной реакции нейтроны тепловой части спектра энергии — «теплого спектра».

Использование нейтронов теплового спектра выгодно потому, что сечение взаимодействия ядер ^{235}U с нейтронами, участвующими в цепной реакции, растёт по мере снижения энергии нейтронов, а ядер ^{238}U остаётся при низких энергиях постоянным.

В результате, самоподдерживающаяся реакция при использовании природного урана, в котором делящегося изотопа ^{235}U всего 0,7%, невозможна на быстрых нейтронах (спектра деления) и возможна на медленных (тепловых).

Реактор на быстрых нейтронах — ядерный реактор, в активной зоне которого нет замедлителей нейтронов и спектр нейтронов близок к энергии нейтронов деления ($\sim 10^5$ эВ). Нейтроны этих энергий называют быстрыми, отсюда и название этого типа реакторов.



Проблемы современной энергетики



МОЖНО ЛИ ОАТ НА МАССИВНОМ (MASSIVE OXIDE FUEL) ПРЕДПРИЯТИИ ВОЩЕСТВЛЯЕТСЯ ПЕРЕРАБОТКА СОДЕРЖАНИЕ НЕ СЖЕДЕРКО ВИДОВ УРАНА (ОЯТ) ДЕЛЕНИЯ ВОЗВРАЩАЮЩИЙ ЦИКЛ

Эволюция развития направления быстрых реакторов показала, что

Высокоскоростная структура ирригация ионизирующего излучения, а также изотопов плутония, воспроизводства топлива в быстрых реакторах недостаточно.

при разработке урана при работе реактора выделяются ценные потребности тепловых реакторов

поскольку для урана и плутония выделяются ценные потребности тепловых реакторов

эффактивность использования топлива в реакторах на быстрых нейтронах

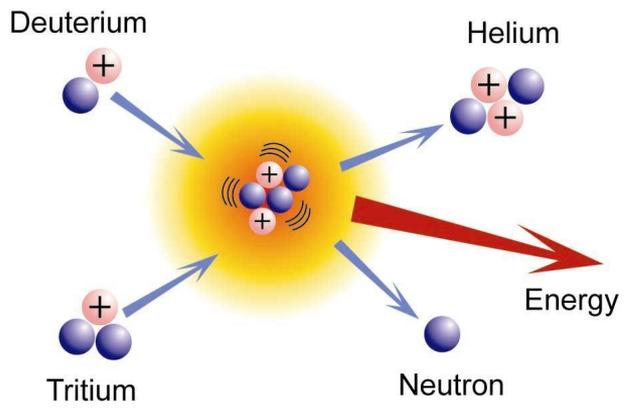
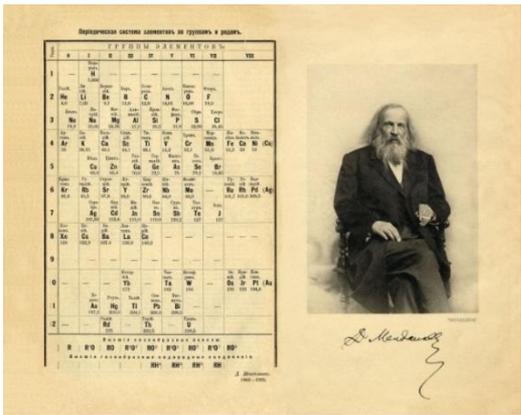
минимизируется.



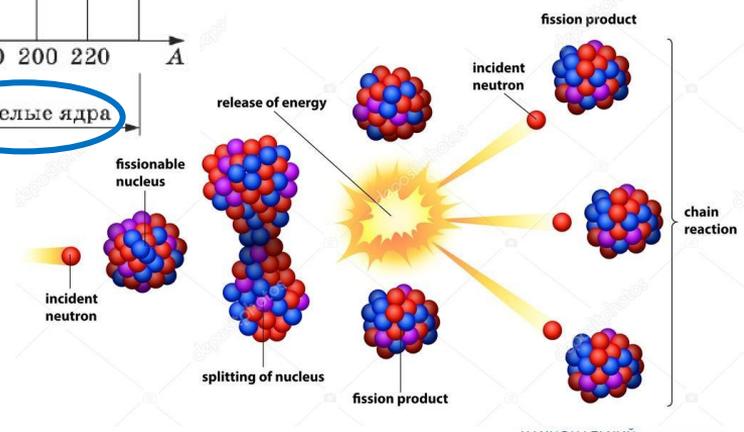
Говорили в детстве дяди ... о каком-то термояде))



Синтез и деление

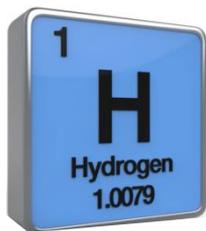


$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

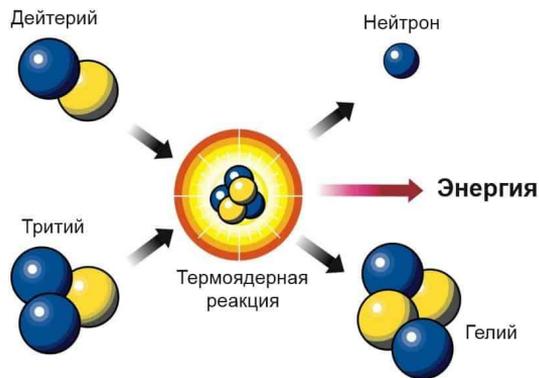
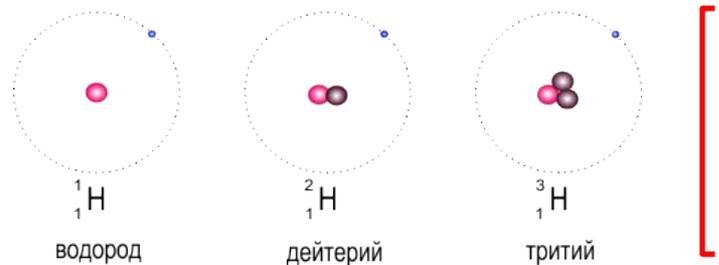
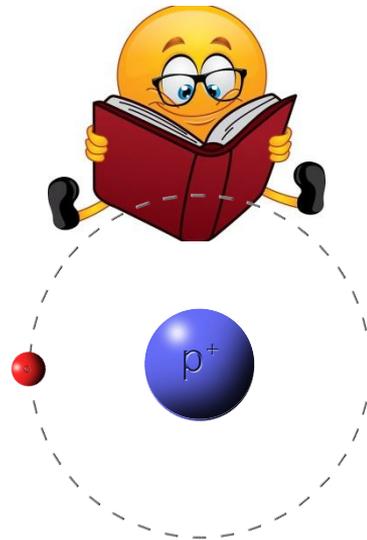


Термоядерный синтез

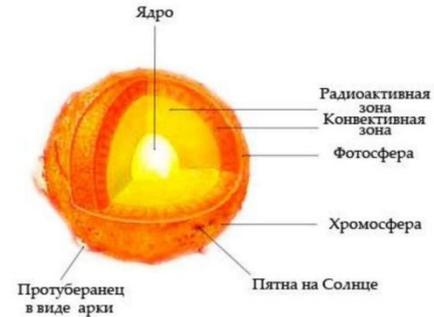
Синтез (термоядерная реакция) — разновидность ядерной реакции, при которой лёгкие атомные ядра объединяются в более тяжёлые за счёт кинетической энергии их теплового движения.



Водород — первый элемент периодической системы элементов; обозначается символом H. Название представляет собой кальку с латинского: лат. Hydrogenium (от др.-греч. ὕδωρ — «вода» и γεννάω — «рождаю») — «порождающий воду»!



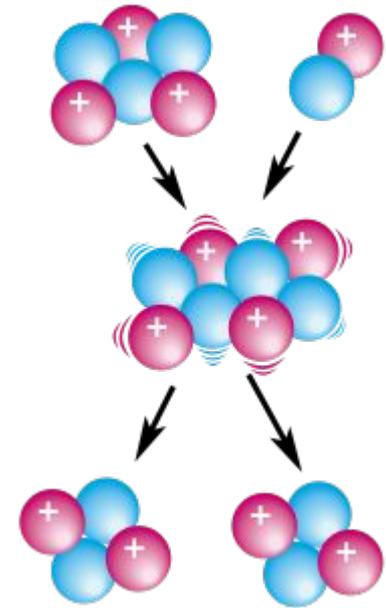
Естественным термоядерным реактором является звезда. В ней плазма удерживается под действием гравитации, а излучение поглощается — таким образом, ядро не остывает.



...термоядерный синтез возможен **при одновременном выполнении условий:**

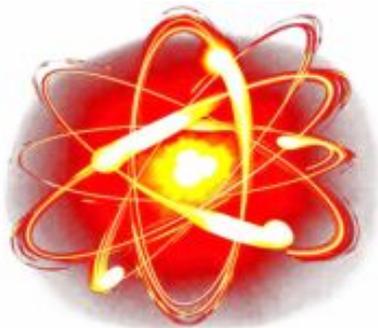
- Скорость соударения ядер (соответствует температуре) $T > 10^8$ К
- Соблюдение **критерия Лоусона**: $n\tau > 10^{14}$ см⁻³·с (для реакции D-T), где n — плотность высокотемпературной плазмы, τ — время удержания плазмы в системе.

...этот критерий позволяет оценить баланс тепла в плазме во время реакции: Если количество энергии, выделившейся в результате термоядерной реакции, превысит количество затраченной энергии на ее поджиг и удержание — баланс тепла будет положительным.



Чем интересен термояд?

- Неограниченные запасы топлива
- Невозможность «разгона»
(НЕ цепная реакция)
- Научоемкость
- Экологичность



1 г



Стакан воды



Бочка бензина



5 литров

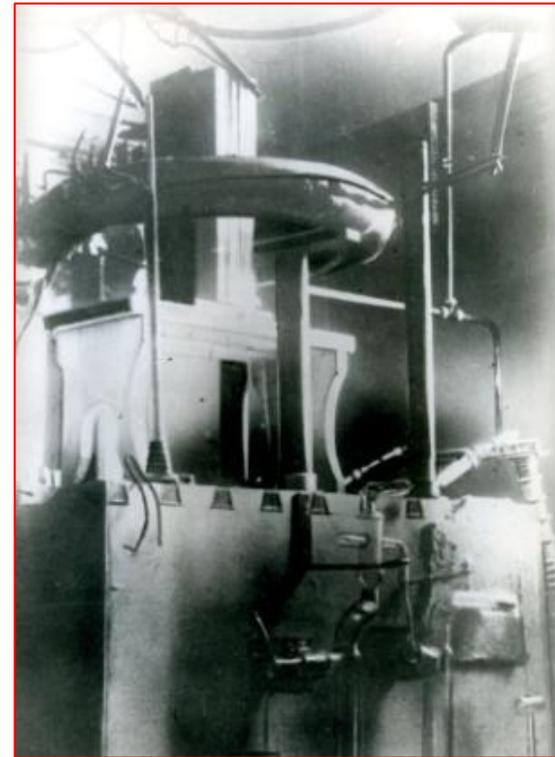
Квазистационарные системы - магнитные

Предложение об использовании управляемого термоядерного синтеза и конкретная схема с использованием термоизоляции плазмы **электрическим** полем были впервые сформулированы советским физиком О.А. Лаврентьевым в середине 1950 года.

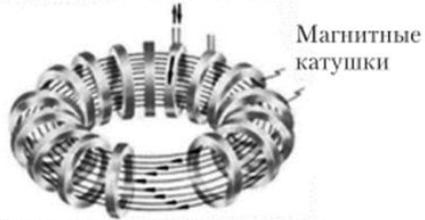
1951 год – первая попытка зажигания тороидального разряда без магнитного поля (с кварцевым тором) 

А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм в 1951 году предложили **модифицировать** схему, предложив теоретическую основу термоядерного реактора, где **плазма имела бы форму тора и удерживалась магнитным полем.**

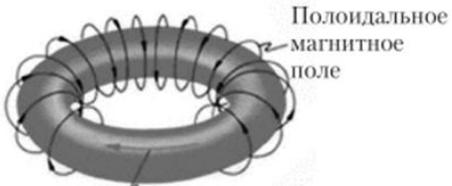
Термин **«токамак»** был придуман позже Игорем Николаевичем Головиным, учеником академика Курчатова.



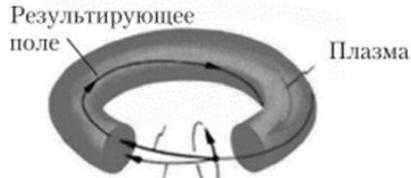
Постоянный электрический ток



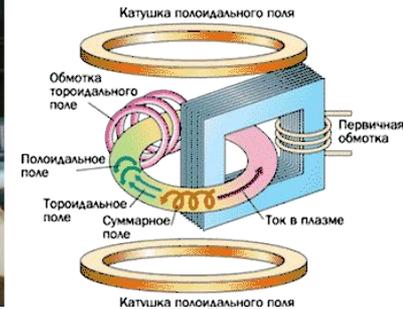
Тороидальное магнитное поле



Электрический ток плазмы



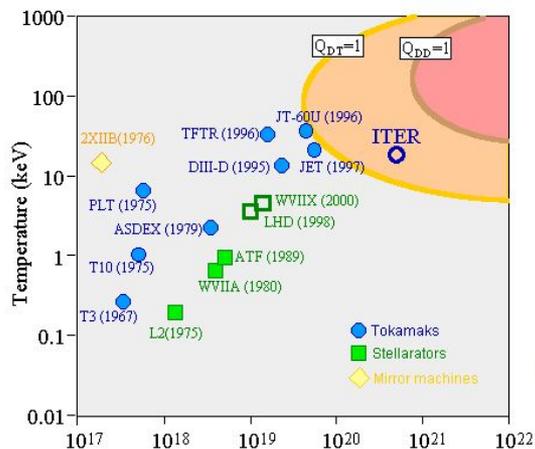
Токама́к
(**т**ороидальная
камера с
магнитными
катушками)



Термоядерные исследования: немного истории

Научный и технологический базис следующего шага

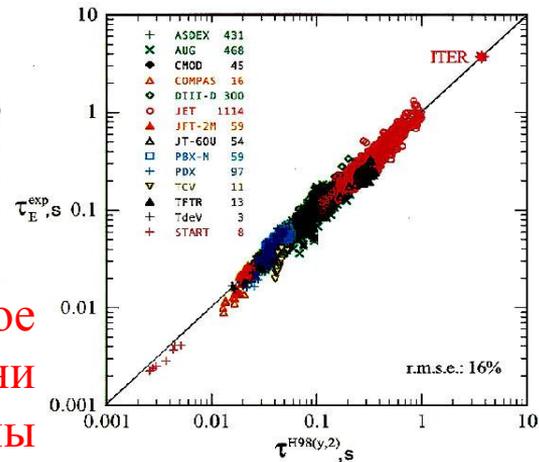
Начиная с начала 1970-х годов, когда токамаки, после головокружительных успехов, стали доминирующим направлением в достижении условий зажигания термоядерной реакции синтеза, исследования на более чем 100 токамаках в различных странах мира подготовили необходимый научный и технологический задел для перехода к сооружению первого экспериментального термоядерного реактора.



Достигнутые значения по плотности и температуре плазмы

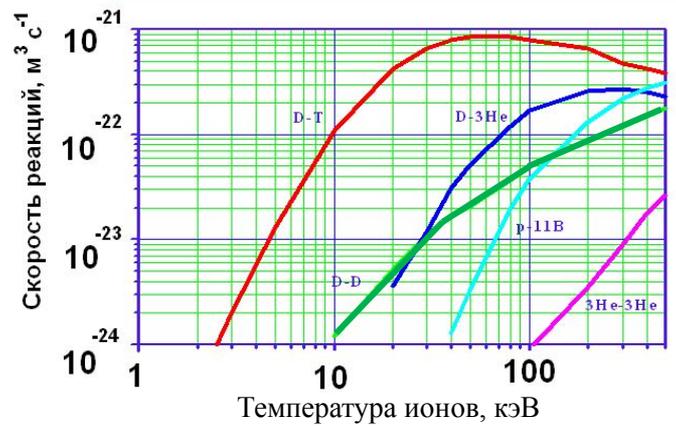
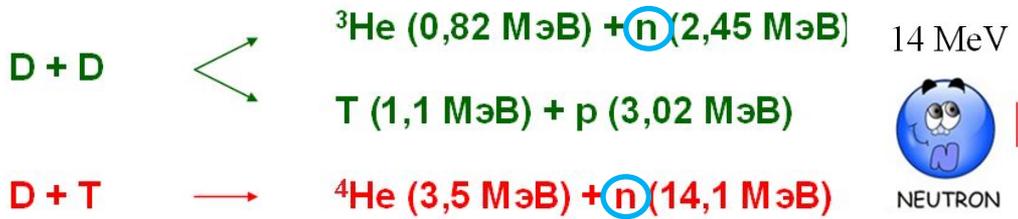


Энергетическое время жизни плазмы



Дорожная карта ИТЭР (DT-кампания)

2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22					



Температура, эквивалентная **100 кэВ**, приблизительно равна **10^9 К** или миллиард **$1\,000\,000\,000 \text{ }^\circ\text{C} !!!$**

Third Plasma
 Pre-Nuclear Shutdown (Assembly)
 Integrated Commissioning
 Permit For Tritium in Tokamak
 DD/DT Plasmas
 Full DT

DS, SDS, ISS, WDS, ANS & TB
 Line Commissioning
 Integration Commissioning (non-active)
 Permit To Receive Tritium
 Basic Tritium Infrastructure
 Basic Tritium Processing
 Basic Isotope Separation
 Water distribution and continuous "loop" operations
 Inventory building and process tuning

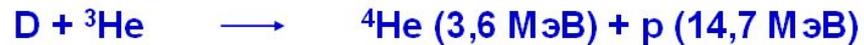
Токамак-реактор...что дальше?



Миссия проекта:

получение D-T термоядерной реакции в установке со сверхпроводящей магнитной

Безнейтронные реакции синтеза



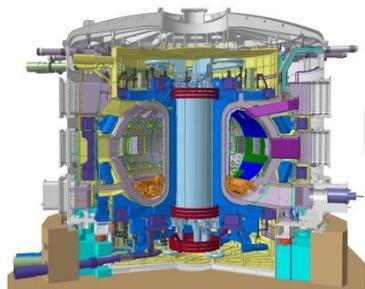
14 MeV



NEUTRON



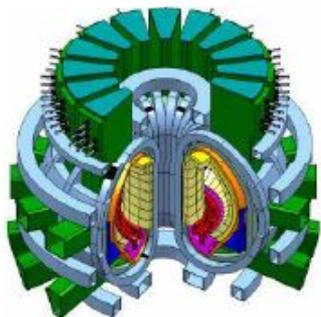
ИТЭР



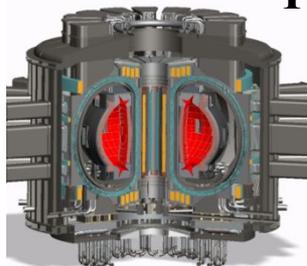
ИТЭР – ДЕМО – ТЯЭС
Национальные проекты



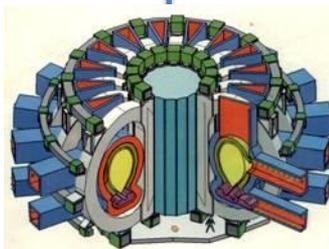
ТЯЭС



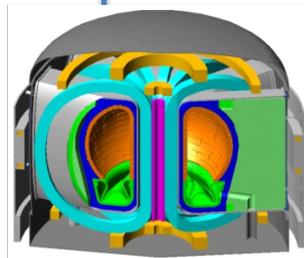
EU-DEMO



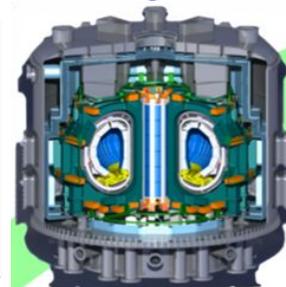
K-DEMO



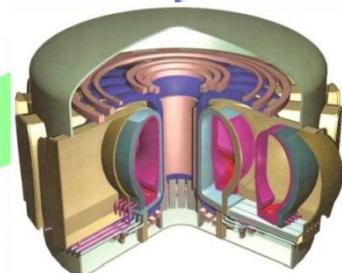
RF-DEMO-C



**Slim CS →
DEMO-JA**



CFETR

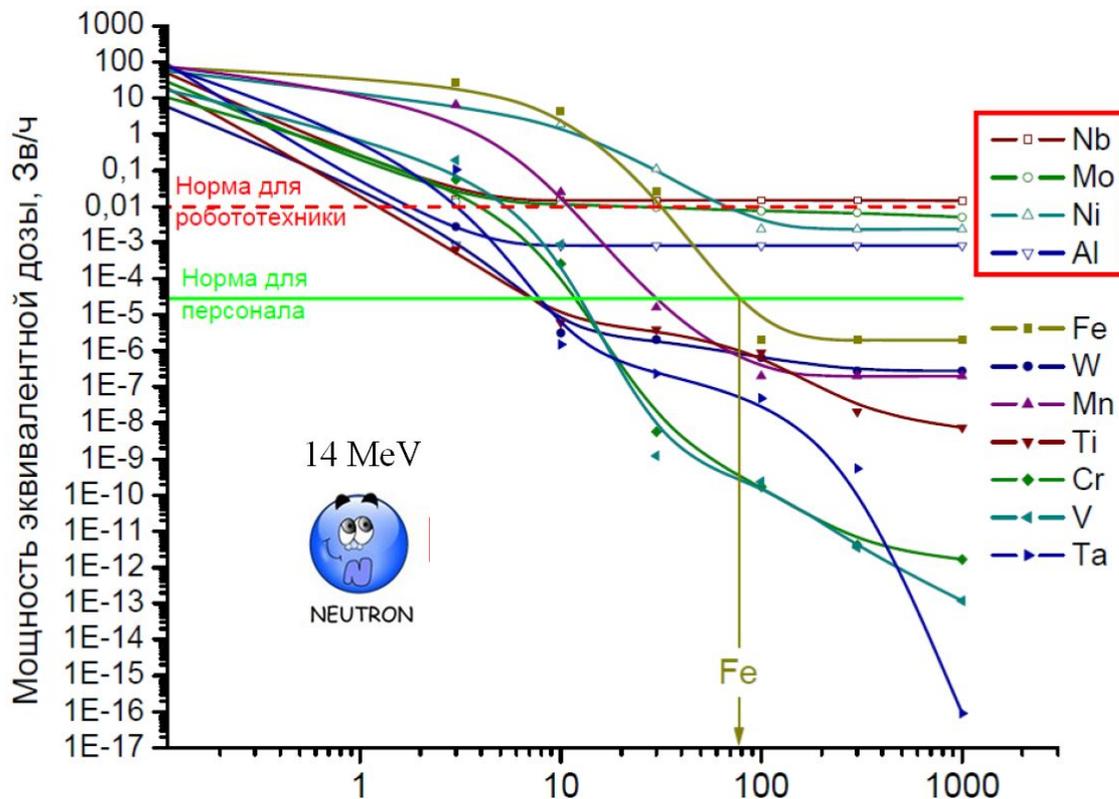


**USA ARIES-AT
→ FNST, ARC**

Токамак-реактор...что дальше?

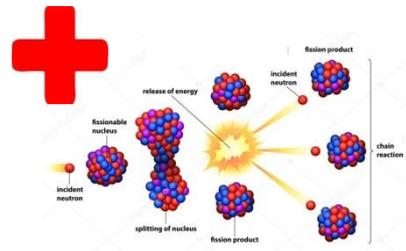
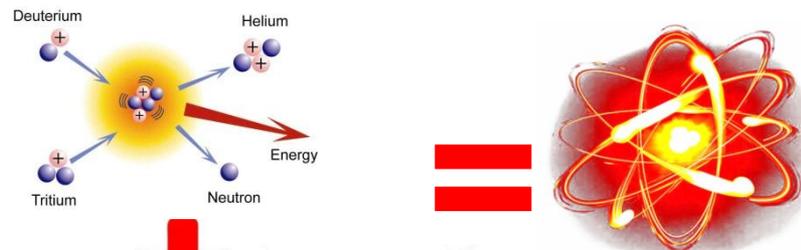
Нейтронные повреждения конструкционных материалов и активация...

Кинетика спада мощности
дозы для ряда основных
химических элементов
металлических
конструкционных
материалов, облученных
нейтронном спектре
ДЕМО-RF,
(флюенс $1 \cdot 10^{23}$ нейтр./см²)



...но где же:

- Электроэнергия
- Утилизация отходов АЭ
- Обеспечение АЭ топливом а также...их безопасность!



!!!

Что же такое

«гибридные реакторы



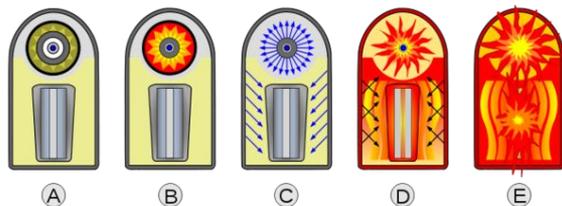
и как же сделать шаг



129

Системы Синтез-Деление. Новое или старое?

Гибридные системы очень быстро (менее чем за 10 лет) вышли на лидирующие позиции и эффективно решили проблемы в области ядерного оружия.



«Кузькина мать»



Задачи мирного использования (в энергетическом секторе), которые также искали создатели ядерного оружия, оказались гораздо сложнее! (65 лет с момента первых испытаний водородной бомбы - оказалось недостаточно)...

Системы Синтез-Деление. Какими им быть?

Выход нейтронов:

10^{18} n/s - позволяет проводить испытания материалов и компонентов

10^{19} n/s - контроль подкритических активных сборок промышленной мощности и трансмутация

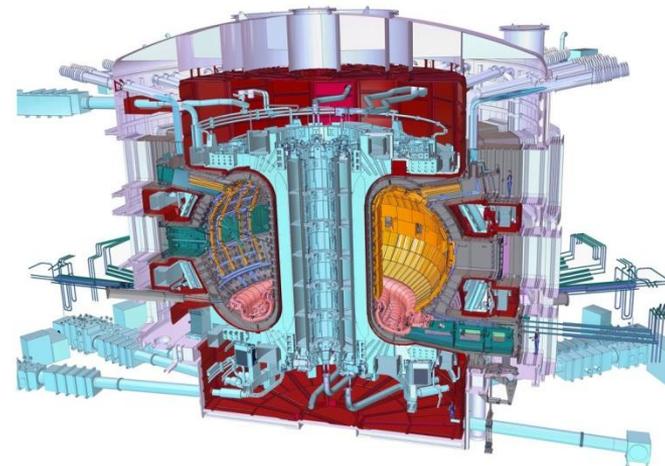
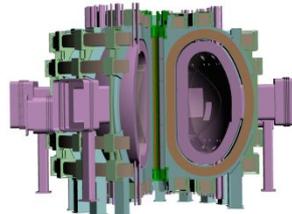
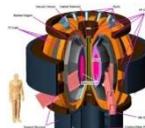
10^{20} n/s – наработка ядерного топлива для тепловых и быстрых реакторов



**термоядерный
источник
нейтронов
(ТИН)**

Основные этапы развития: уровни мощности синтеза DT

3 МВт (СТ),
40 МВт (ДЕМО-ТИН),
500 МВт (ИТЭР)



**источник термоядерных
нейтронов**

Модель замкнутого топливного цикла (для РФ)

Драйверы для разработки мирных систем:

Высокая эффективность образования нейтронов в реакциях синтеза

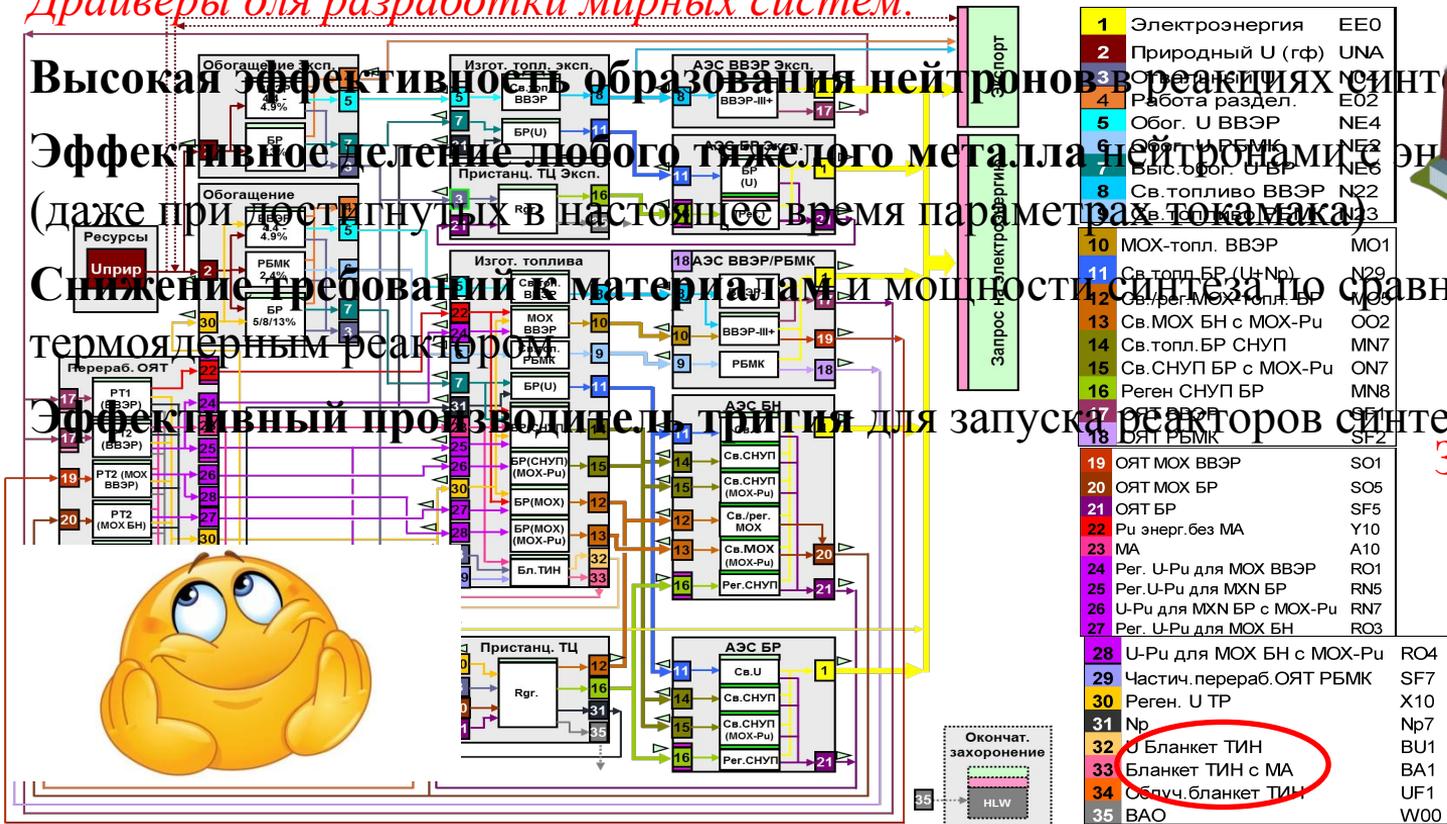
Эффективное деление любого тяжелого металла нейтронами с энергией 14 МэВ

(даже при достигнутых в настоящее время параметрах токамака)

Снижение требований к материалам и мощности синтеза по сравнению с чистым

термоядерным реактором

Эффективный производитель трития для запуска реакторов синтеза



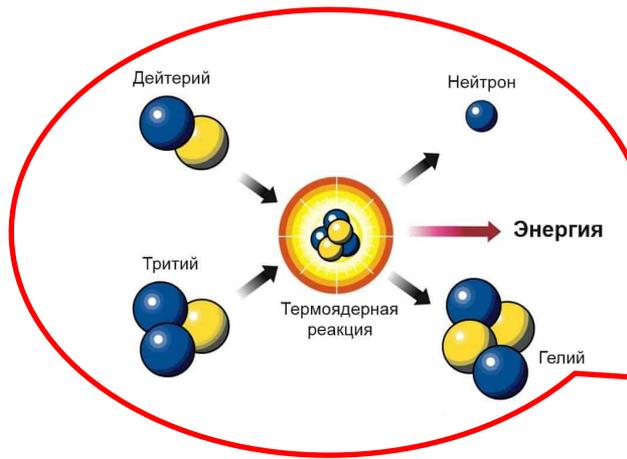
1	Электроэнергия	EE0
2	Природный U (гф)	UNA
3	Средств. изотопы	MS
4	Работа раздел.	E02
5	Обог. U ВВЭР	NE4
6	Обог. U РБМК	NE2
7	Выс. обог. U ВВЭР	NE6
8	Св. топливо ВВЭР	N22
9	Св. топливо РБМК	N23
10	МОХ-топл. ВВЭР	MO1
11	Св. топл. БР (U+Pu)	N29
12	Св. рег. МОХ-топл. БР	MO3
13	Св. МОХ БН с МОХ-Pu	OO2
14	Св. топл. БР ЧНУП	MN7
15	Св. ЧНУП БР с МОХ-Pu	ON7
16	Реген. ЧНУП БР	MN8
17	ОЯТ ВВЭР	SO1
18	ОЯТ РБМК	SF2
19	ОЯТ МОХ ВВЭР	SO1
20	ОЯТ МОХ БР	SO5
21	ОЯТ БР	SF5
22	Pu энерг. без MA	Y10
23	MA	A10
24	Per. U-Pu для МОХ ВВЭР	RO1
25	Per. U-Pu для MXN БР	RN5
26	U-Pu для MXN БР с МОХ-Pu	RN7
27	Per. U-Pu для МОХ БН	RO3
28	U-Pu для МОХ БН с МОХ-Pu	RO4
29	Частич. перераб. ОЯТ РБМК	SF7
30	Реген. U TP	X10
31	Np	Np7
32	U Бланкет ТИН	BU1
33	Бланкет ТИН с MA	BA1
34	Облуч. бланкет ТИН	UF1
35	BAO	W00



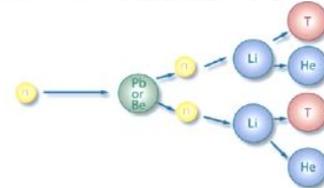
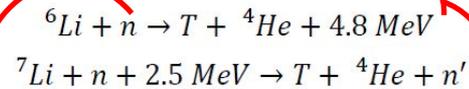
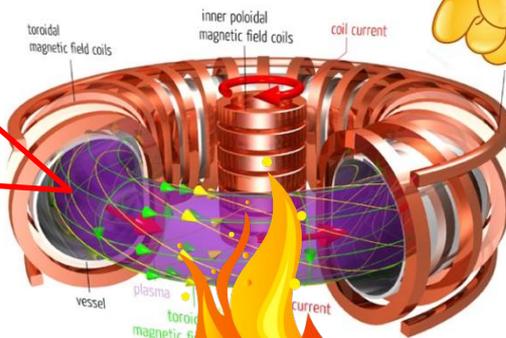
Замыкание ядерного топливного цикла



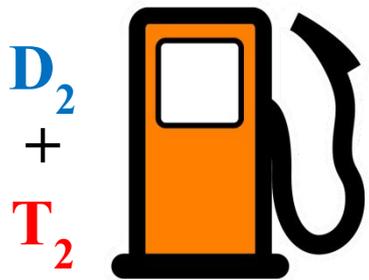
как это работает?



тороидальная магнитная ловушка



$$TBR = \frac{\text{regenerated tritium}}{\text{burned tritium}} > 1.1$$



- удержание плазмы
- нагрев
- заправка
- бридинг топлива

В чём «гибридность» установки ТИН



- производство электроэнергии
- замыкание топливного цикла
- производство топлива

He



"Мысль, переставшая быть спорной, становится уже неинтересной.."

И.Н. Головин

RF FNS roadmap

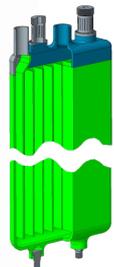
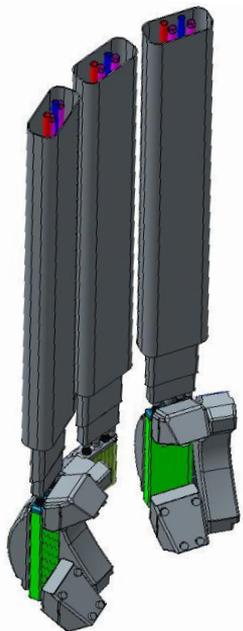


Program activity on FNS & FFHs

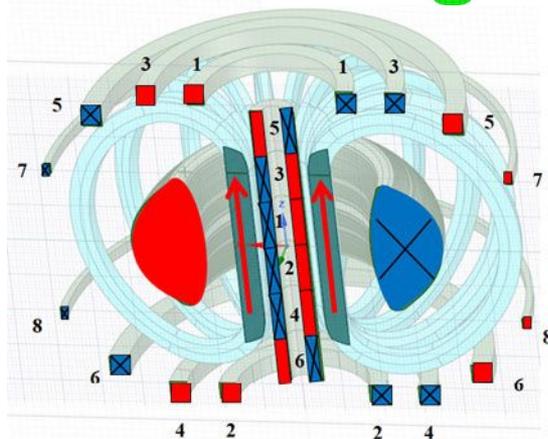
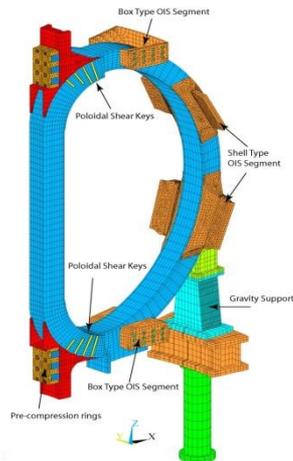
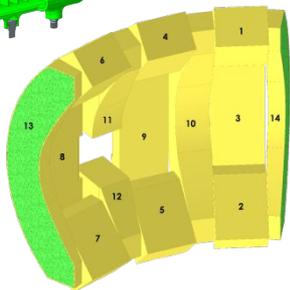
	FFHs	FNS
EU	+ more ADS and OS	EAST, CFETR
IN	+ reasonable	FNSF, Kulchinski-FNS
RF	+ high DEMO-FNS	FNS-ST
EU	+ high ENEA	JET, DTT, ST-40
JP	- interests in transmutation	LHD (DD)
IN	- low	interest in FNS-ST
KOREA	- interest	KSTAR, DEMO

Из чего состоит? Вакуумная камера, бланкет, МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

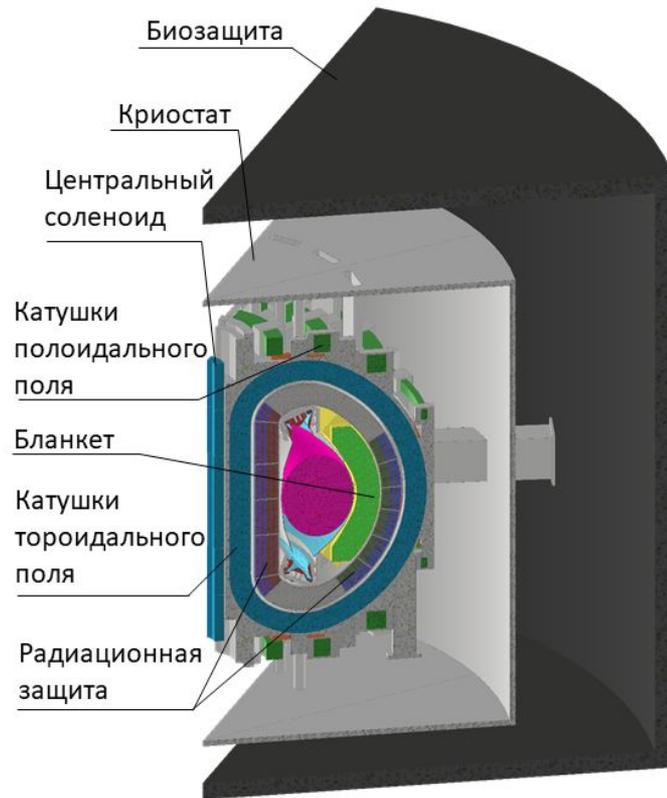
Шахты
перезагрузки
активной зоны
(деления/
трансмутации)



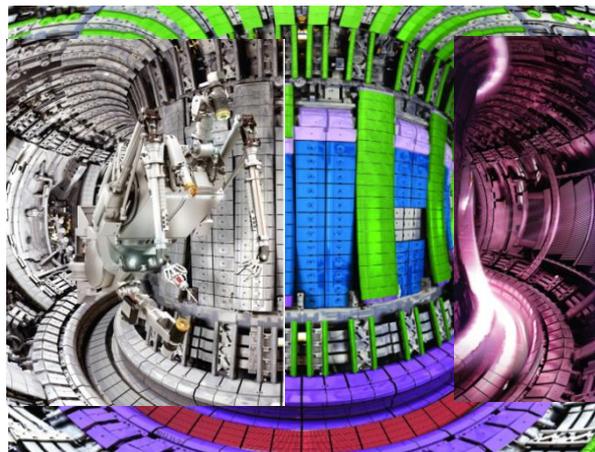
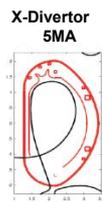
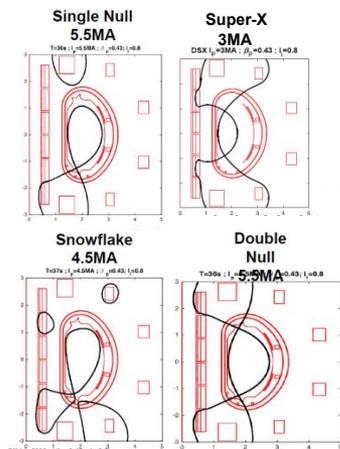
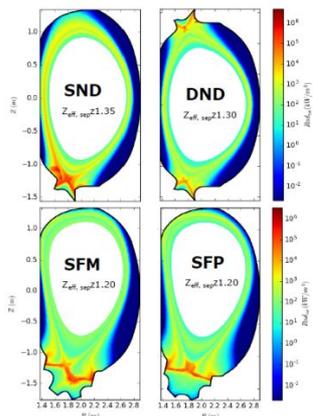
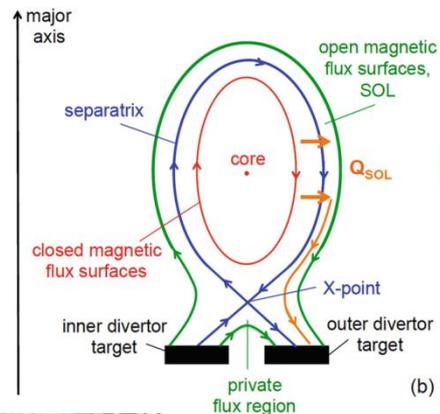
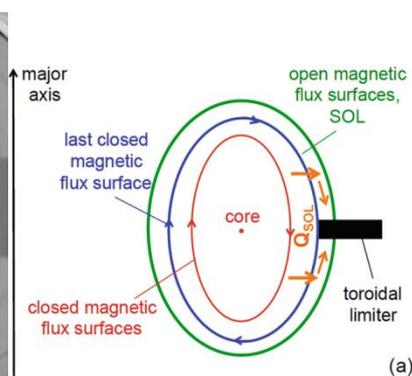
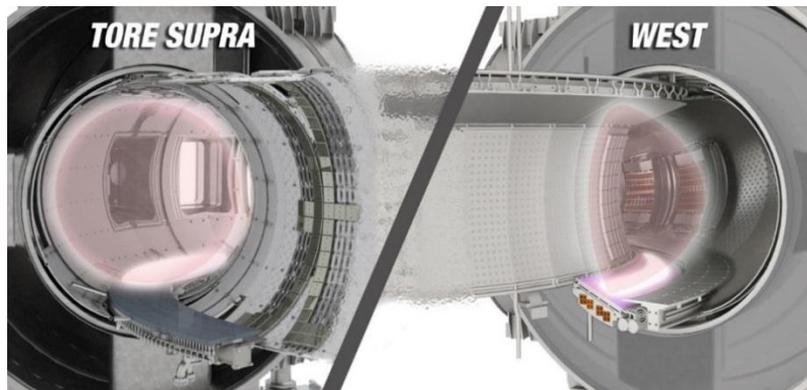
Зона деления/
трансмутации
Зона
воспроизводства



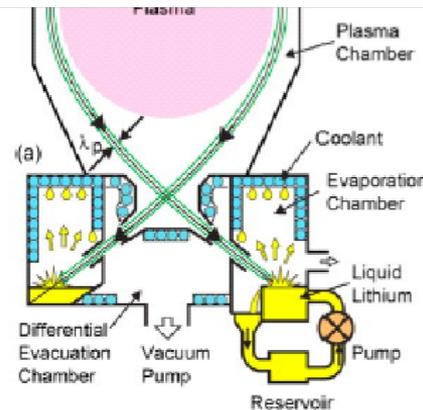
МАГНИТНАЯ СИСТЕМА



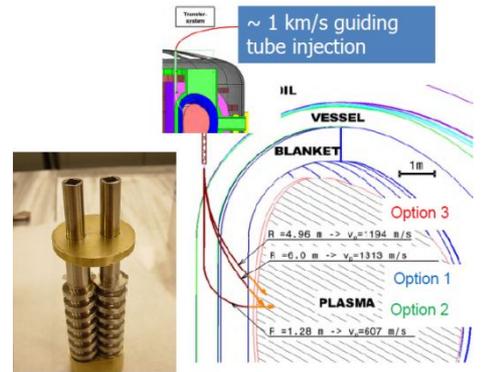
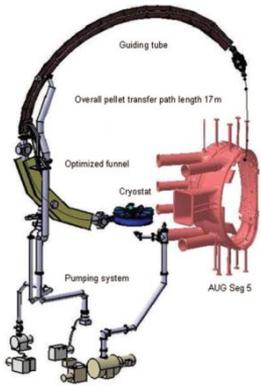
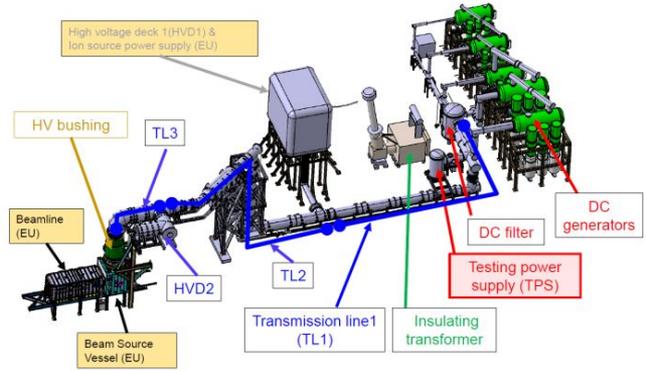
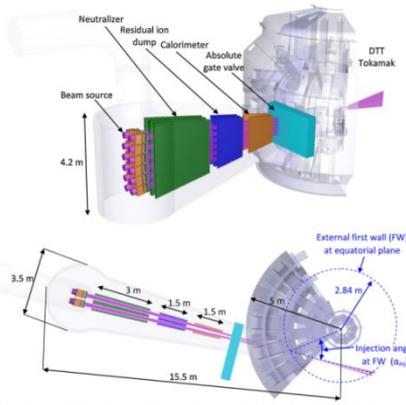
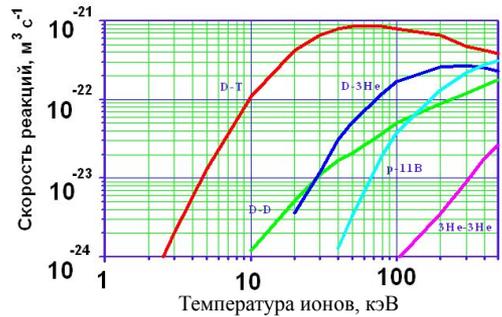
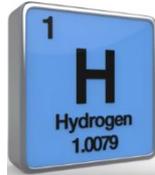
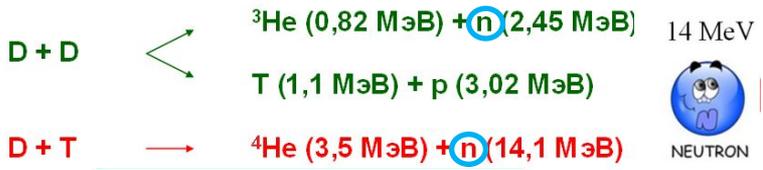
Из чего состоит? Первая стенка и дивертор



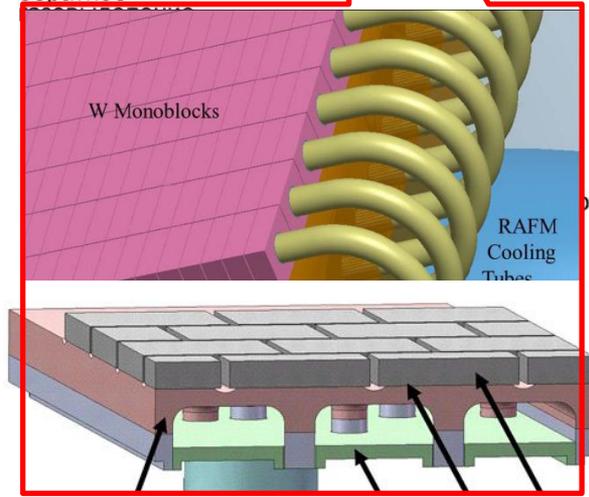
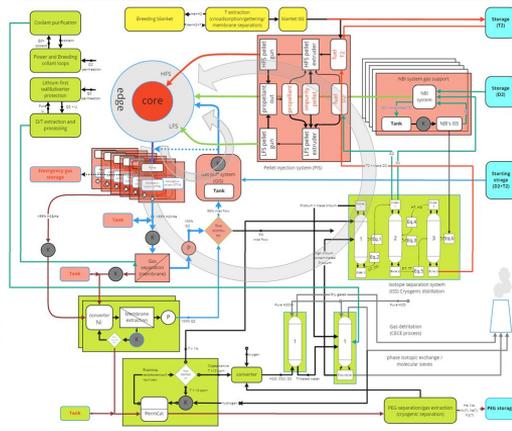
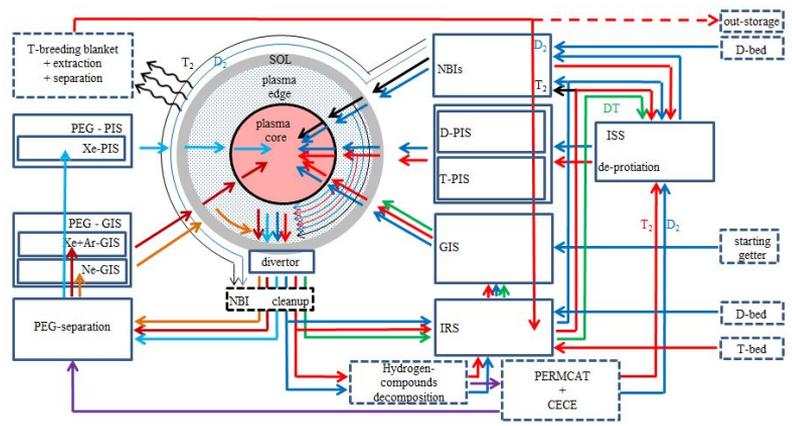
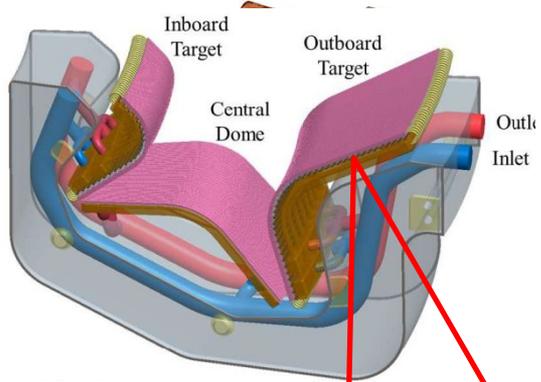
■ Beryllium
 ■ CFC tungsten coated
 ■ Inconel tungsten coated
■ Tungsten
 ■ Inconel beryllium coated



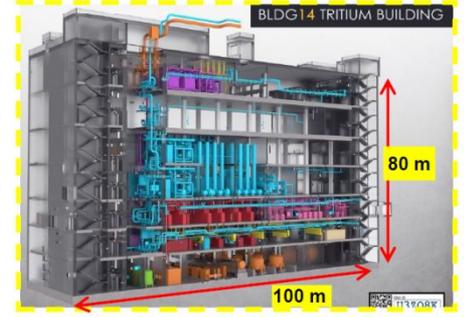
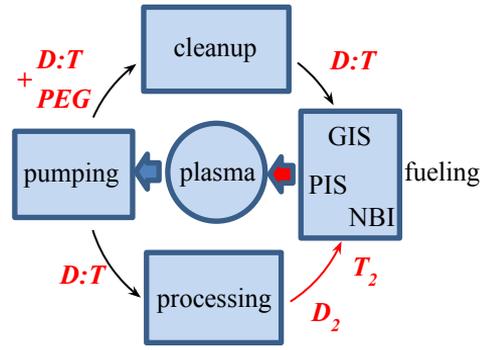
Необходимое условие работы - топливная инжекция



Сердце ТЯР/ГССД – топливный цикл (ТЦ)

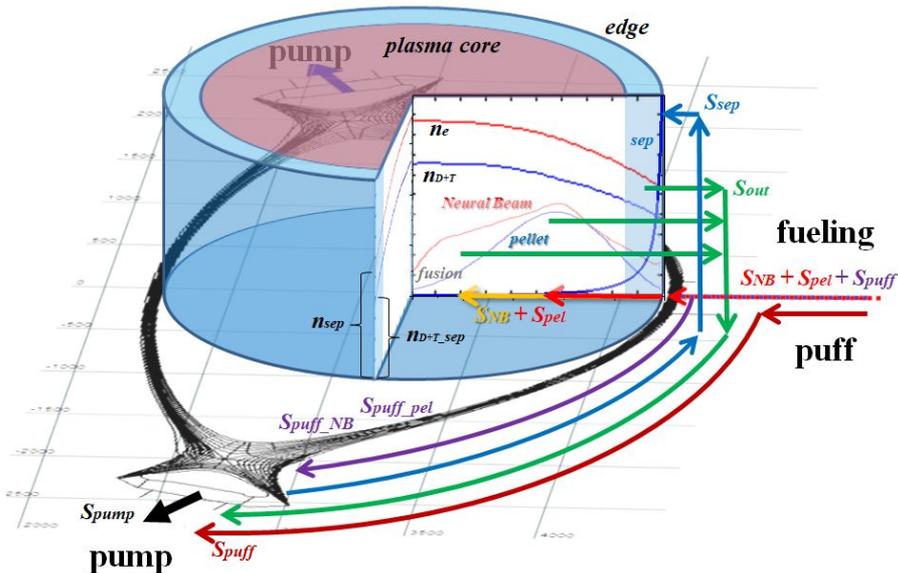


ование



- Key tritium parameters**
- Plasma tritium throughput: ~1 kg/hr
 - **Tritium site inventory: <4 kg**
 - Plasma tritium inventory: ~0.2 gm

Моделирование потоков изотопов водорода



Потеря частиц из плазмы:

$$S_{NB}^{T+D} + S_{pel}^{T+D} + S_{sep}^{T+D} - S_{fus}^{T+D} = S_{out}^{T+D}$$

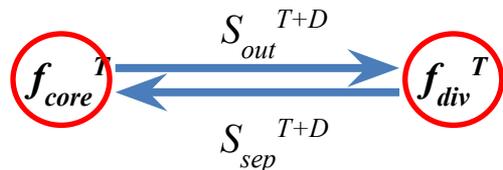
fueling neutral flux fusion
from divertor

pump $p_n c_p = S_{puff}^{T+D} - S_{sep}^{T+D} + S_{out}^{T+D}$

puff $S_{puff}^{T+D} = S_{GIS}^{T+D} + S_{puff(NB/pel)}^{T+D}$

Поскольку профили источников изотопов водорода из-за разных источников не совпадают, частицы из этих источников имеют разное время удерживания.

Важно контролировать изменение изотопного состава основной плазмы (f_{core}^T)!

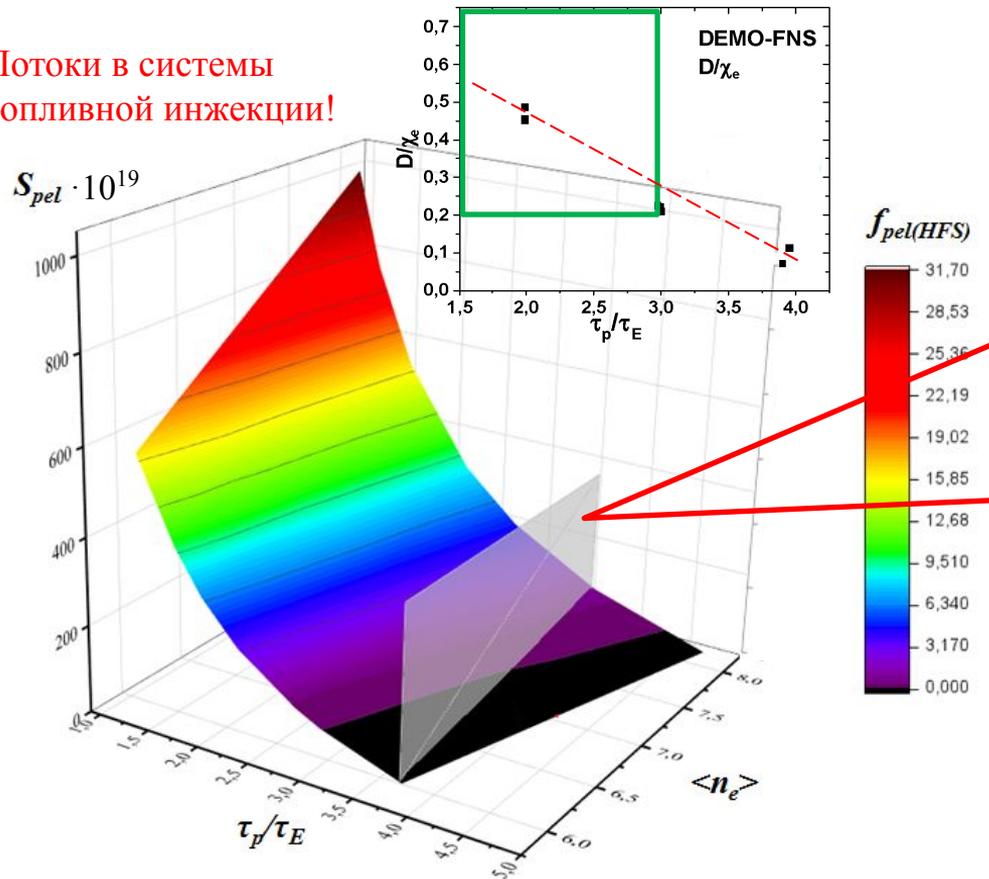


Баланс частиц в основной плазме

$$N_{core} = N_{sep} + S_{NB} \cdot \tau_{NB} + S_{pel} \cdot \tau_{pel} + S_{sep} \tau_{sep} - S_{fus} \cdot \tau_{tot}$$

$\tau_{NB}, \tau_{pel}, \tau_{sep}, \tau_{tot}$ – диффузионные времена удерживания

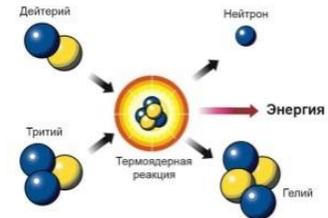
Потоки в системы топливной инжекции!



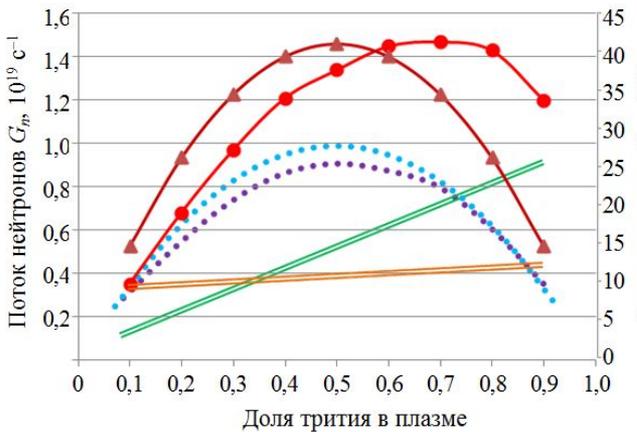
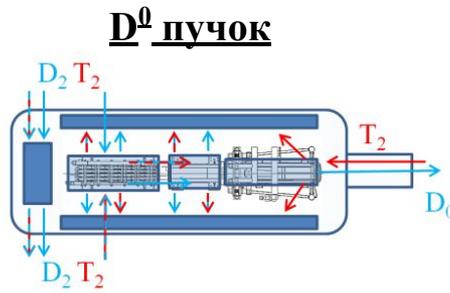
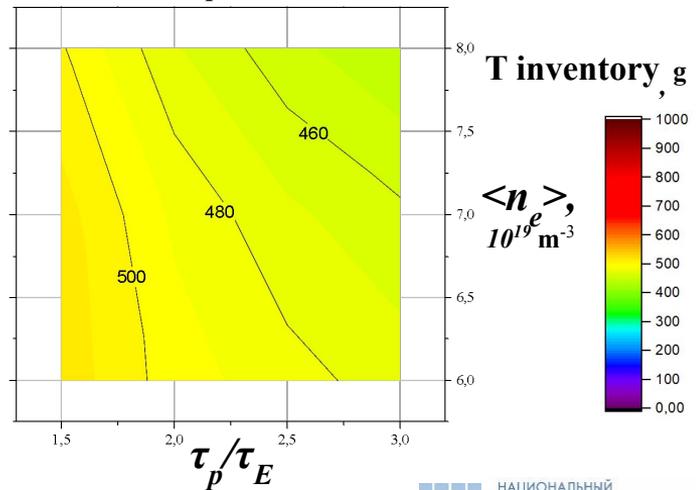
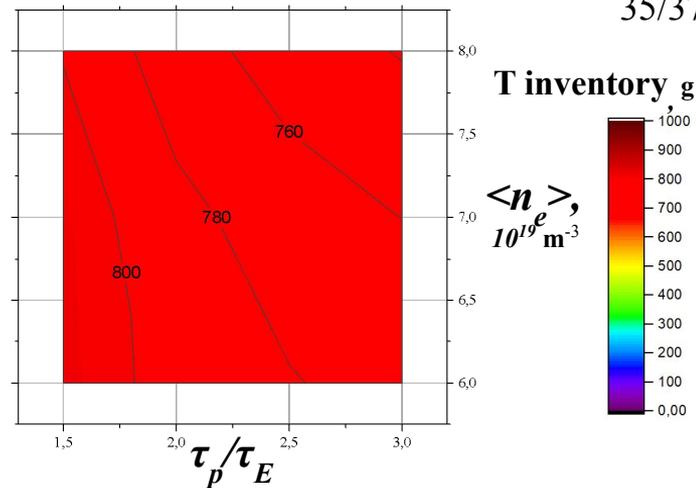
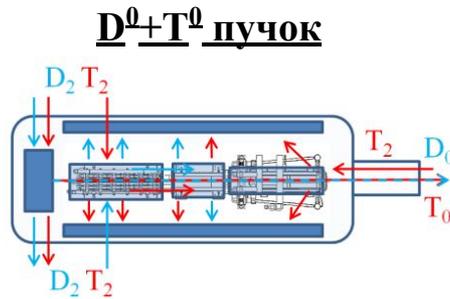
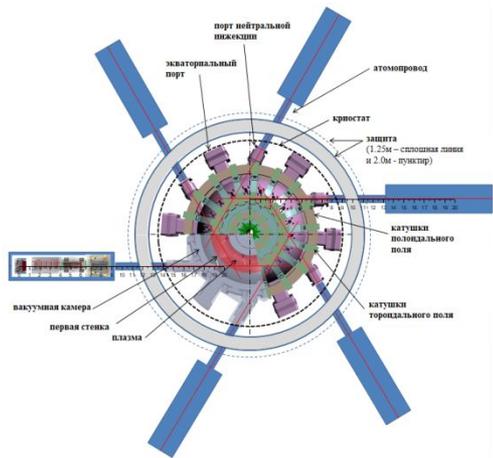
Зависимости потоков компонентов топлива в плазму от состава газа/плазмы в диверторе

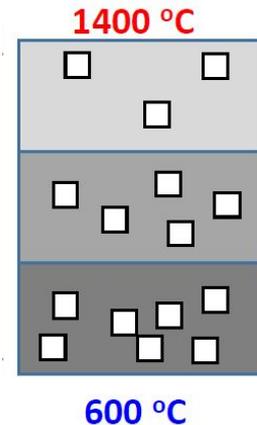
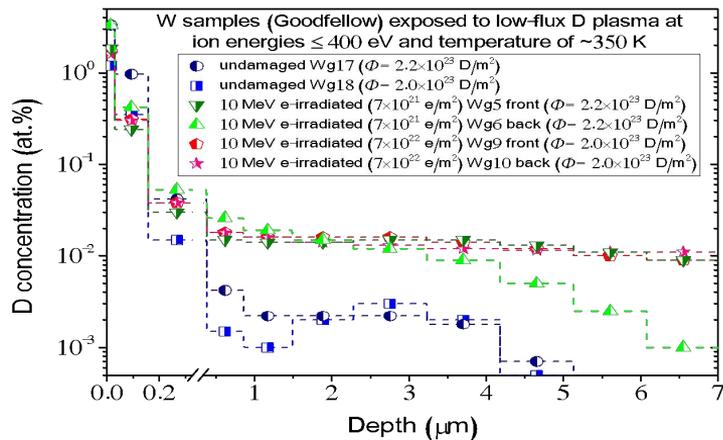
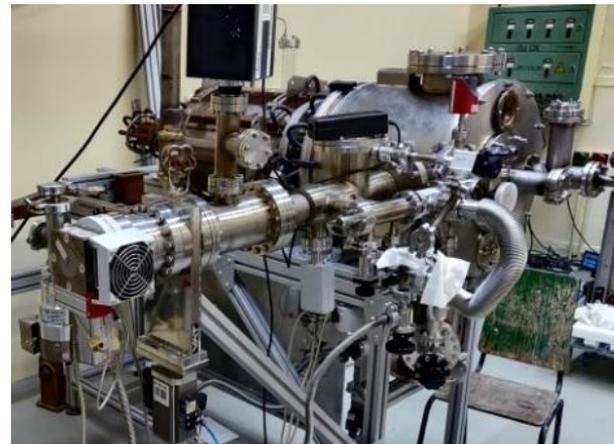
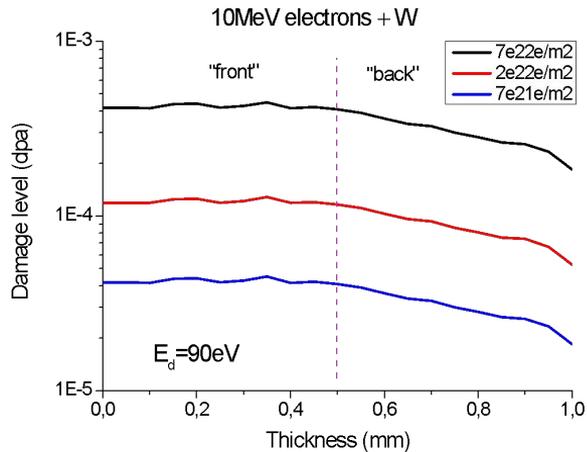
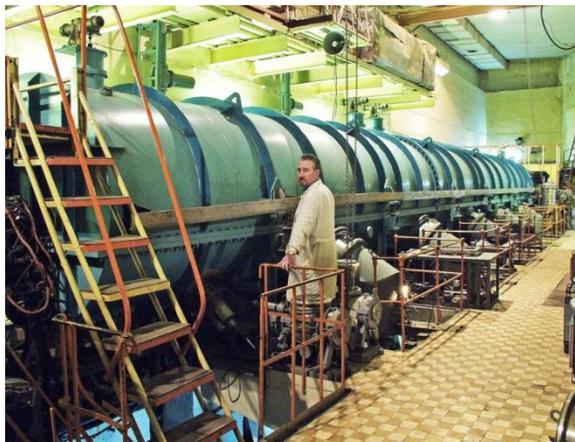


10	ne	10	NI	10	nDF	3	Zeff	.5	SNR	.5	Spe1	3	Pnbe	3	Pnbi	
CSL1	Z85	Ntot	SnbD	Spe1	Sw1	-->	Stot	cpun	nr2r	-->	PSOL	pn	Pfus	TAUE	Hfac	
999	.000	848	37.3	28.5	222.	222.	288.	20.0	0.24	0.25	37.4	2.00	30.4	7.37	1.30	
TauP	nfac	sne	-->	Nw	Ipl	Iour	Ibs	Icd	gpk	Neut	Psh	<DHe	<ZF	betp	-->	
2.95	4.00	7.00	7.00	28-6	4.50	.039	1.77	2.77	9.61	1.08	1.143	1.64	2.74	1.251	.280	
need	-->	fpp	nt	th/a	Te0	Ti0	ne0	-n-	Pj	Prf	Ptot	Pim	Psur	QEB	QIB	
5.37	5.39	.687	500	.782	14.1	13.8	8.65	7.70	-.028	6.00	37.4	4.07	5.82	22.4	14.7	
nGR	betN	q0	nu*	no*	wth	dldd	dndt	C1	C2	C3	Pfpp	Pf1	Pf2	Pfe	Pfi	
14.3	2.23	.780	.051	27-4	27.5	25-5	65-5	1.00	1.00	1.00	20.8	30.2	30.4	4.52	1.10	
Surf	Vol	Nflu	Nfas	tfas	wfas	Ebm1	tcen	Htan	hght	width	Pin	Pbe	Pbi	Pbo	dat	
189.	121.	.569	.148	.478	7.65	500	3.40	500	1.00	500	30.0	16.7	13.8	.029	.912	
Pcx	Btor	Up1	IF	Iadd	sh0	ELUN	TRIA	q95	li3	8.65	ZFHe	ZFHe	ZFHe	<Te>	Tep	<Ti>
.083	5.00	-.023	3.28	34-4	.120	2.00	.500	6.91	.596	1.10	1.05	2.59	7.27	2.18	7.18	1.21
Tip	Nd0	Nt0	Nf0	p0/p	I-N	bpol	NA1	ROC	Rids	rsrc	SwNe	Fout	ENNe	<DNe	DNet	<DNe
2.30	3.23	3.23	.259	2.22	.900	.872	80.0	1.46	1.37	1.37	1.90	1.92	.112	1.21	1.21	1.21
DNeB	<ZNe	SwHe	-->	SfHe	Fout	ENHe	nHe	-->	actr	DHeC	Hef	<ZHe	TaHe	Hef	nes	nesD
.116	9.98	6.15	6.15	1.08	8.12	.035	1.03	.107	.999	.218	2.00	2.74	3.72	4.67	3.43	3.43



Накопление Трития на установке





Исследование свойств материалов

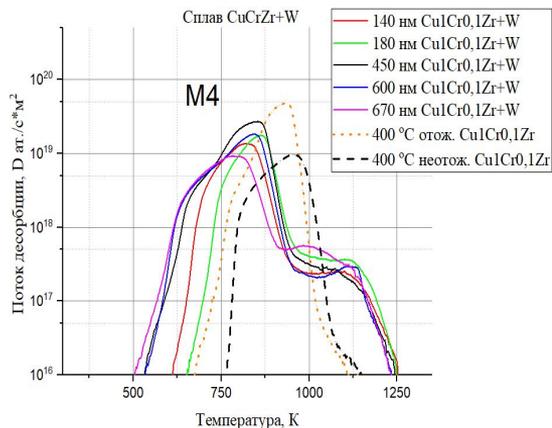
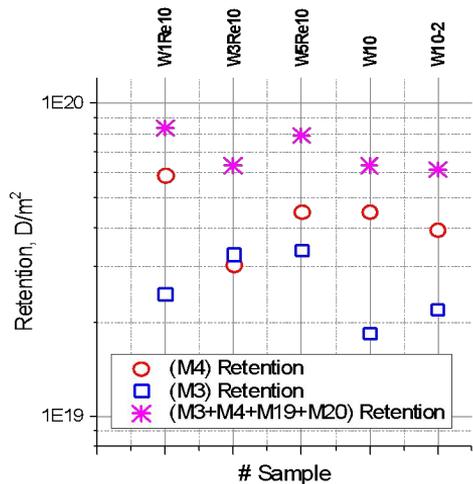
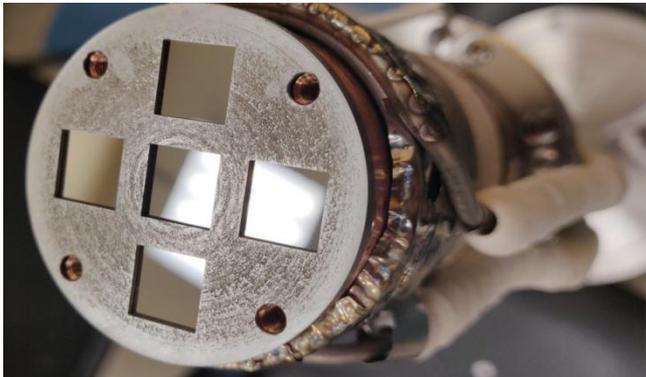
Квадрупольный масс-спектрометр Камера 2 регистрации Мишеный узел с мембраной Камера 1 взаимодействия Баллон с дейтерием

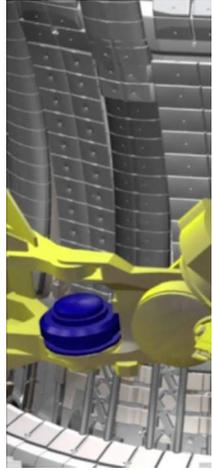


Откачной пост

Байпасная линия

Откачной пост





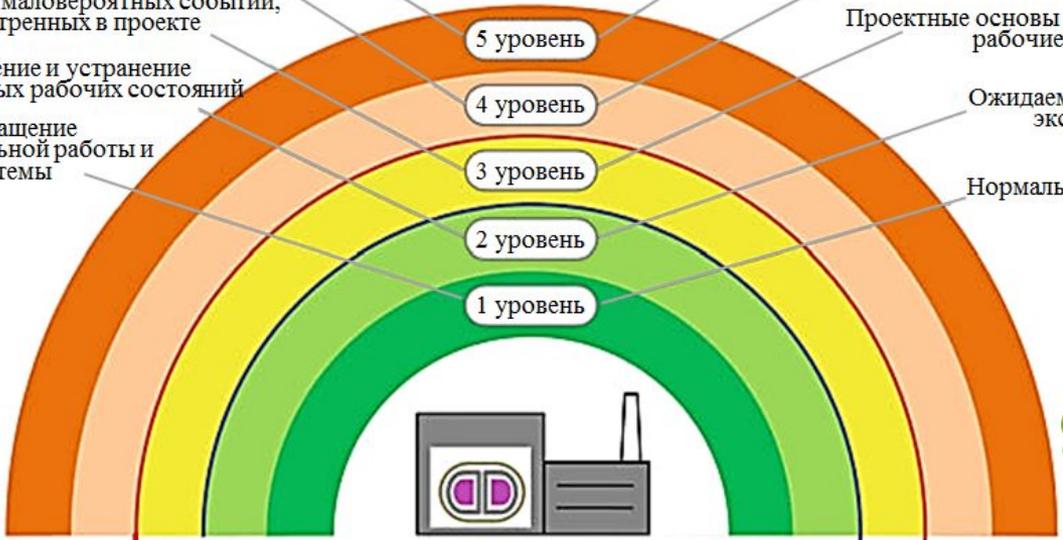
Важные особенности

- Снижение потенциальных выбросов радиоактивных материалов
- Предотвращение развития тяжелых аварий и радиоактивных выбросов
- Контроль маловероятных событий, предусмотренных в проекте
- Обнаружение и устранение аномальных рабочих состояний
- Предотвращение ненормальной работы и сбоев системы

Рабочее состояние объекта

- Ситуация после тяжелой аварии
- Тяжелая запроектная авария
- Проектные основы и сложные рабочие состояния
- Ожидаемые случаи эксплуатации
- Нормальная работа

Уровень защиты



Смягчение последствий аварии | Предотвращение несчастных случаев

Стратегия

Нормальная производственная деятельность | Управление несчастными случаями

Управление аварийными ситуациями в проектных основах



Системы Синтез-Деление могут считаться важным игроком в глобальном развитии ядерной энергетики



Выполняется Федеральная программа по развитию гибридных систем в РФ



В рамках программы будут разрабатываться технологии, в том числе стационарные, удержания, воспроизводства трития... а также правовая база ядерного регулирования, проводится обучение и подготовка квалифицированного персонала



Развитие гибридных систем Fusion и Fusion-Fission потребует проектирования и строительства новых объектов (установок), разработки технологий и материалов нового поколения.



Ядерно-физические требования к системам Fusion-Fission соответствуют промежуточному диапазону между реакторами чистого синтеза и быстрыми реакторами деления



Успешное развитие гибридов и технологий Fusion-Fission способно ускорить развитие современной энергии Fusion и Fission

Прикладные исследования...как побочный продукт

- Микроэлектроника
- Плазмохимические технологии
- Конструкционные материалы
- Лазерные технологии
- Источники излучений
- Плазменные дисплеи
- Компьютерные технологии
- Медицинские технологии
- Экологические технологии
- Переработка отходов, очистка воды и продуктов



- Мощные генераторы э/м излучения
- Плазмотроны
- Плазменные ракетные двигатели
- Ионная имплантация
- Новые материалы
- Импульсная магнитная сварка
- Плазмохимия и водородная энергетика
- и др...

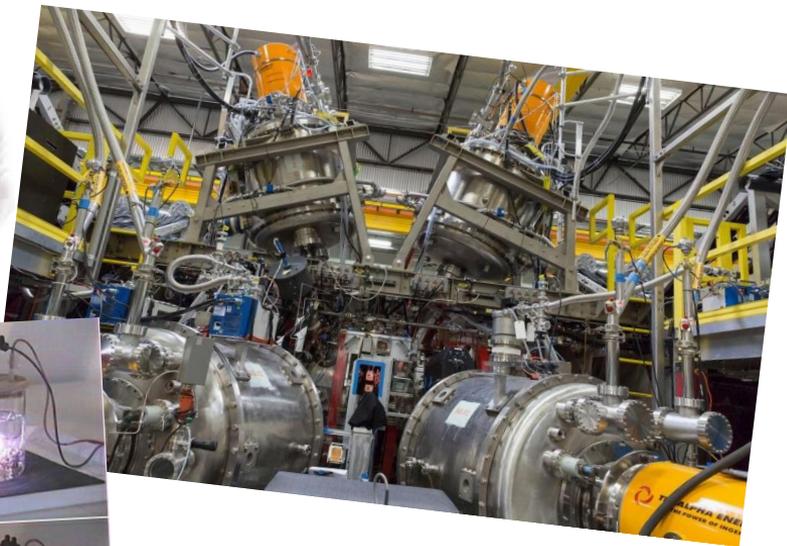
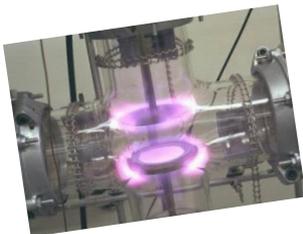


Мировое годовое производство > 300 млрд USD



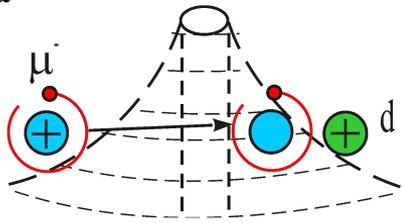
Спасибо за внимание!

Мифы и реальность...



Мюонный катализ

Мюонный катализ - процесс образования мезомолекул после образования мезомолекул $[e^- \text{ядра } D\mu, DT\mu \text{ и } T\mu]$ чрезвычайно быстро, за время τ порядка $10^{-9} - 10^{-12}$ с, **ННЫХ МЮОНОВ.**



Реакция синтеза происходит при относительно низкой температуре в отличие от классического синтеза.

Экспериментально удалось получить

Сущность процесса состоит в следующем:

значения $\chi \approx 100$, то есть один мюон способен выводить энергию в 100 раз больше, чем мюон. Энергия 14 МэВ — $1,4 \text{ ГэВ}$.

Несколько мюон примерно в 207 раз тяжелее электрона. Однако эта величина все же меньше, чем столько же раз меньше размеров молекулы. Энергетические затраты на производство самого мюона на ускорителе (5—10 ГэВ) на такое же расстояние сближаются ядра (~3 кэВ, что соответствует ~30 миллионам

