

Введение в технику физического эксперимента

Лектор – проф. Пальчиков Евгений Иванович

ВТФЭ-2016

Методы и приборы для получения высоких и низких температур

Методы и приборы для измерения высоких и низких температур

Пальчиков Евгений Иванович
д.т.н., проф. НГУ, в.н.с. ИГиЛ

***Новосибирский Государственный университет
Сибирское Отделение Российской академии Наук***

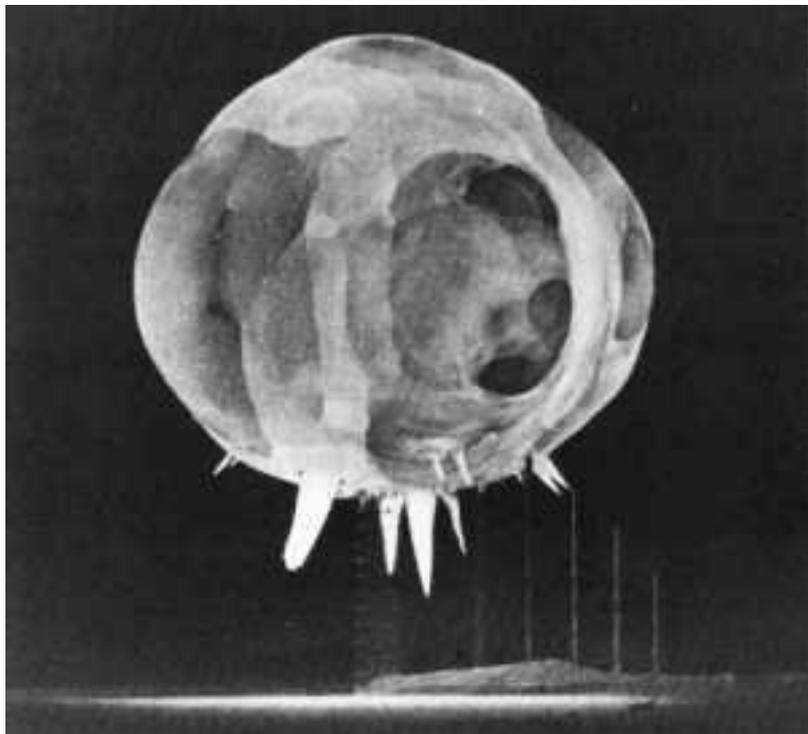
Необходимость получения и измерения высоких и низких температур

- После давления температура является важнейшим параметром, который необходимо создавать и поддерживать в экспериментальных установках.
- Существуют несколько определений температуры.
 - Термодинамическое – как параметра идеальной обратимой тепловой машины, не зависящего от рабочего вещества, или как параметра одинакового для контактирующих тел при термодинамическом равновесии.
 - Молекулярно-кинетическое – как мера кинетической энергии атомов и молекул, усредненная по огромному числу беспорядочно движущихся частиц,
 - как скалярная физическая величина, характеризующая приходящуюся на одну степень свободы среднюю кинетическую энергию частиц макроскопической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия.
- Большинство практических приборов для измерения температуры фактически измеряют другие свойства веществ, меняющиеся от этого параметра, такие как давление, объем, электрическое сопротивление и т.д. Затем их показания автоматически или вручную пересчитываются в единицы температуры.

Методы получения высоких температур

- Электрические нагреватели ~ 3000 ° K
- Химические нагреватели и реакторы ~ 3000 ° K
- Дуговой разряд $\sim 7000 \div 10000$ ° K
- Лазерный пробой в газе и на поверхности конденсированной среды $\sim 10^6$ ° K
- Плазменные установки $\sim 10^8$ ° K
- Термоядерный взрыв $\sim 10^8$ ° K

Термоядерный взрыв



Лабораторный эксперимент



«Эскимос» NGS 2393

Взрывы

- **Химический** $R \sim 5 \text{ см}$, $t \sim 10^{-5} \text{ с}$, $P \sim 10^5 \div 10^6 \text{ атм}$, $1 \text{ кг} \Leftrightarrow 5 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 5 \cdot 10^{13} \text{ Эрг}$, $T^\circ \sim 10^3 \text{ }^\circ\text{К}$
- **Электрический** взрыв проволок $T^\circ \geq 10^4 \text{ }^\circ\text{К}$
- **Электрический** взрыв. Накопители. $CU^2/2$, $LI^2/2$. 200 кВ/см (электрическая прочность диэлектрика), 50 Тесла (механическая прочность проводников). Энергия – на нагрузке $T^\circ \geq 10^4 \text{ }^\circ\text{К}$
- **Кинетический** $mV^2/2$, 3 км/с \Leftrightarrow 1 кг химического ВВ, $T^\circ \geq 10^3 \text{ }^\circ\text{К}$
- **Оптический пробой** воздуха гигантским лазерным импульсом $E > 1 \text{ Дж}$, $t \sim 10^{-8} \text{ с}$, $T^\circ \sim 10^6 \text{ }^\circ\text{К}$
- **Ядерный** ^{235}U , $M_{\text{кр}} = 50 \text{ кг}$, $R_{\text{кр}} \sim 5 \text{ см}$, $t \sim 10^{-7} \div 10^{-8} \text{ с}$, $P \sim 10^9 \text{ атм}$, $T^\circ \sim 10^7 \text{ }^\circ\text{К}$, $1 \text{ кг} \Leftrightarrow 20 \text{ кТ} \Leftrightarrow 5 \cdot 10^{14} \text{ Дж} = 10^{21} \text{ Эрг}$
- **Термоядерный** $P \sim 10^{12} \text{ атм}$, $T^\circ \sim 10^8 \text{ }^\circ\text{К}$
- Критерий Лоусона $n\tau > 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$

Методы получения низких температур

- Тепловые машины на фазовых переходах (жидкость-газ)
- Тепловые машины на эффекте Пельтье
- Сжиженные газы – получение и применение
Эффект Джоуля-Томпсона, турбодетандер
- Тепловые машины на двигателе Стирлинга
- Тепловые машины на импульсных трубках
- Электронное спиновое и ядерное спиновое парамагнитное охлаждение
- Охлаждение одиночных атомов и ионов лазерными пучками. Фонтаны молекул.

Фазовые переходы

Вещество	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	Вещество	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$
Водород	-259,1	Нитробензол	5,8
Кислород	-218,7	Уксусная кислота	16,7
Азот	-210	Глицерин	17,9
Аргон	-189,3	Цезий	28,4
Этиловый спирт	-114	Нафталин	80,3
Хлор	-101	Натрий	97,8
Метиловый спирт	-97,9	Иод	113,6
Ацетон	-95,35	α -Камфора	178,5
Ртуть	-38,86	Цинк	419,5
Этиленгликоль	-12,3	Алюминий	660,4
		Медь	1084,5
		Железо	1539
		Вольфрам	3420

P=760
мм. рт. ст.

Фазовые переходы

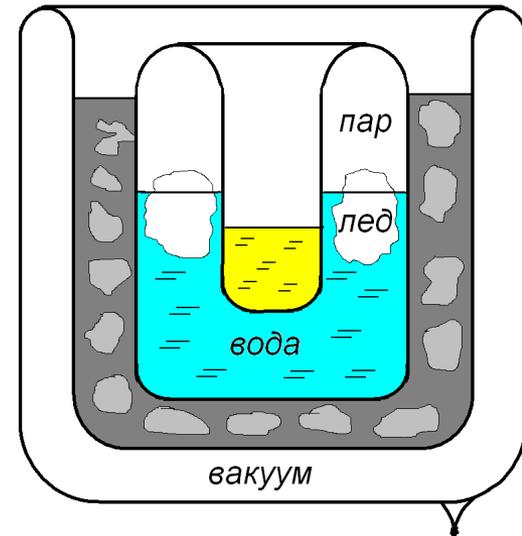
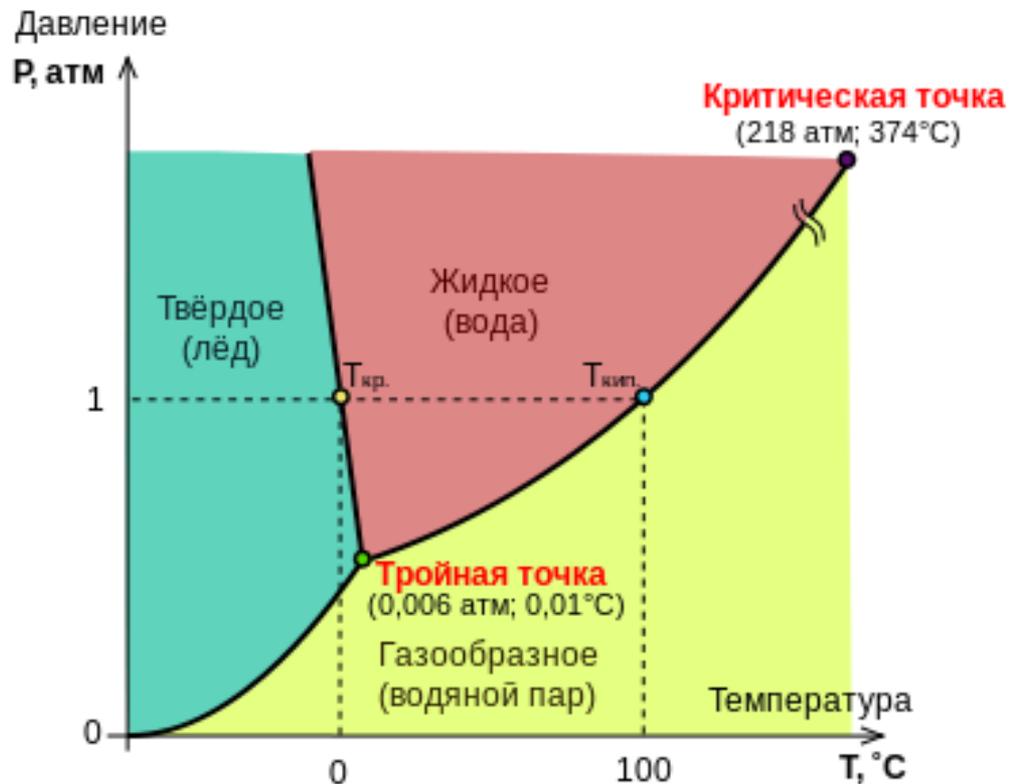
Вещество	$T_{\text{кип}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	Вещество	$T_{\text{кип}}, \text{ } ^\circ\text{C}$
Водород	-252,6	Иод	184,35
Азот	-195,8	Глицерин	290,0
Аргон	-185,7	Серная кислота	ок. 300
Кислород	-182,98	Натрий	882,9
Хлор	-34,1	Цинк	906
Ацетон	56,24	Алюминий	2500
Метиловый спирт	64,5	Медь	2540
Этиловый спирт	78,4	Железо	2750
Азотная кислота	82,6	Осмий	ок. 5000
		Тантал	ок. 5500

**P=760
мм. рт. ст.**

Реперные точки. Эталоны.

- 1 – точка кипения воды в закрытом кипятильнике $T=373,15^{\circ}\text{ K} = 100^{\circ}\text{ C}$, $p=760\text{ torr}$
- 2 – точка таяния льда $T=273,15^{\circ}\text{ K} = 0^{\circ}\text{ C}$
- 3 – тройная точка воды $T=273,16^{\circ}\text{ K} = 0,01^{\circ}\text{ C}$
 $p=4,68\text{ torr}$
- 4 – точка кипения серы $T=717,824^{\circ}\text{ K}$
- 5 – точка кипения кислорода $T=90,188^{\circ}\text{ K} = -182,962^{\circ}\text{ C}$
- 6 – точка затвердевания серебра (золота)
 $T=1235,08^{\circ}\text{ K}$ ($T=1337,58^{\circ}\text{ K} = 1064,43^{\circ}\text{ C}$)

Тройная точка воды



$$T=273,16^{\circ} \text{ K} = 0,01^{\circ} \text{ C}$$

$$p=4,68 \text{ torr}$$

ТЕПЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

- Принцип действия основан на использовании тепловых процессов (нагрева, охлаждения, теплообмена), входной величиной которых является температура.
- Температура как параметр не поддается непосредственному измерению, но она непосредственно связана с внутренней энергией тел, и через нее с физическими свойствами.
- Физические явления:
 - 1. Тепловое расширение газов (водород, гелий, азот, воздух); жидкостей (спирт, керосин, ртуть); твердых тел.
 - 2. Термо - ЭДС.
 - 3. Зависимость шумового напряжения $U_{\text{ш}}$ на резисторе от температуры ($\Delta T = 4 \div 1800 \text{K}$).
 - 4. Изменение модуля упругости пьезоэлектриков от температуры ($\Delta T = 10 \div 500 \text{K}$).
 - 5. Зависимость сопротивления от температуры.

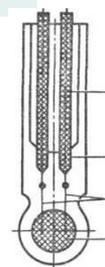
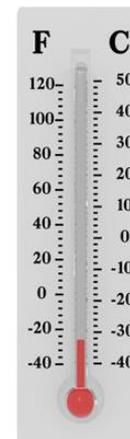
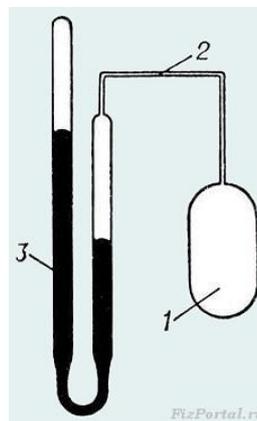
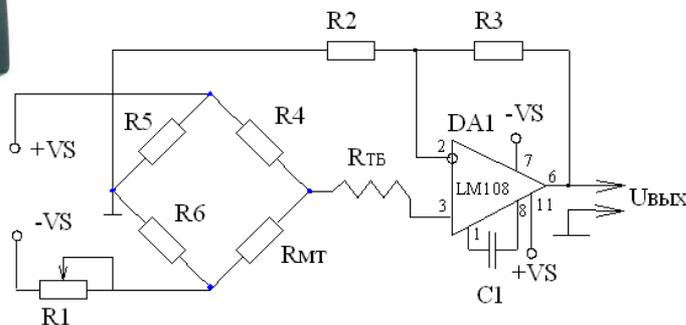
Термоэлектродные эффекты

1. Явление Томпсона - электроны диффундируют от горячего конца к холодному, следовательно на концах возникает разность потенциалов обусловленная различной концентрацией носителей зарядов.
2. Явление Зебека - в месте контакта разнородных проводников - контактная разность потенциалов, связанная с различием энергии Ферми у различных проводников.

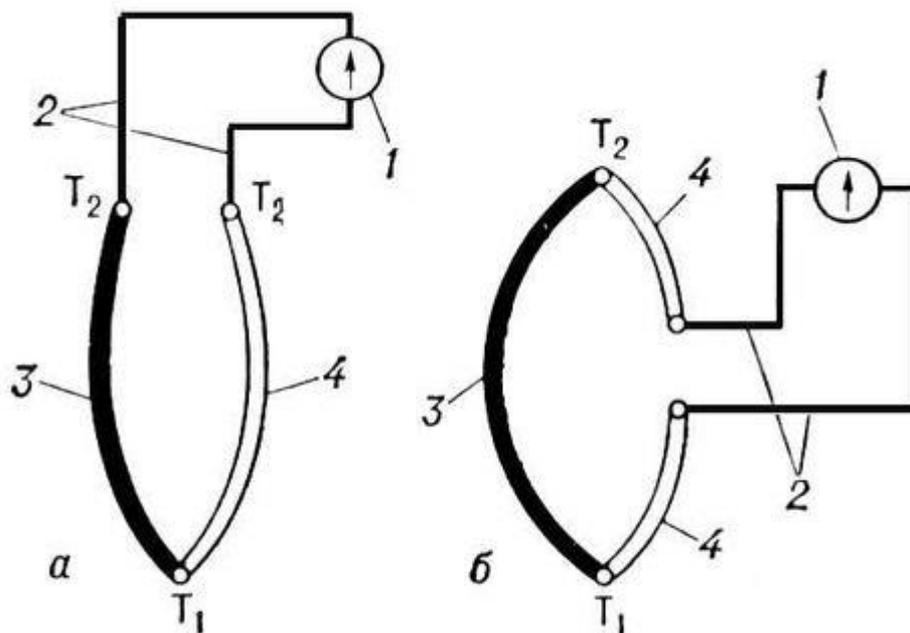
<u>Материалы:</u>	Рабочий диапазон
• вольфрам + вольфрам/рений	$\Delta T = 0 \div 2500^\circ\text{C}$
• платина + платинородий	$\Delta T = 0 \div 1800^\circ\text{C}$
• медь + константан	$\Delta T = -200 \div +400^\circ\text{C}$
• железо + медноникелевый сплав	
• хромель + медноникелевый сплав	
• хромель + алюмель	$\Delta T = -50 \div +1300^\circ\text{C}$

Приборы для измерения температуры

- Жидкостные термометры
- Термопары
- Термосопротивления R_t , C_u , п/п
- Газовый калибровочный термометр
- Пирометры
- Магнитная термометрия
- Термометрия по порогу сверхпроводимости (реперные точки)



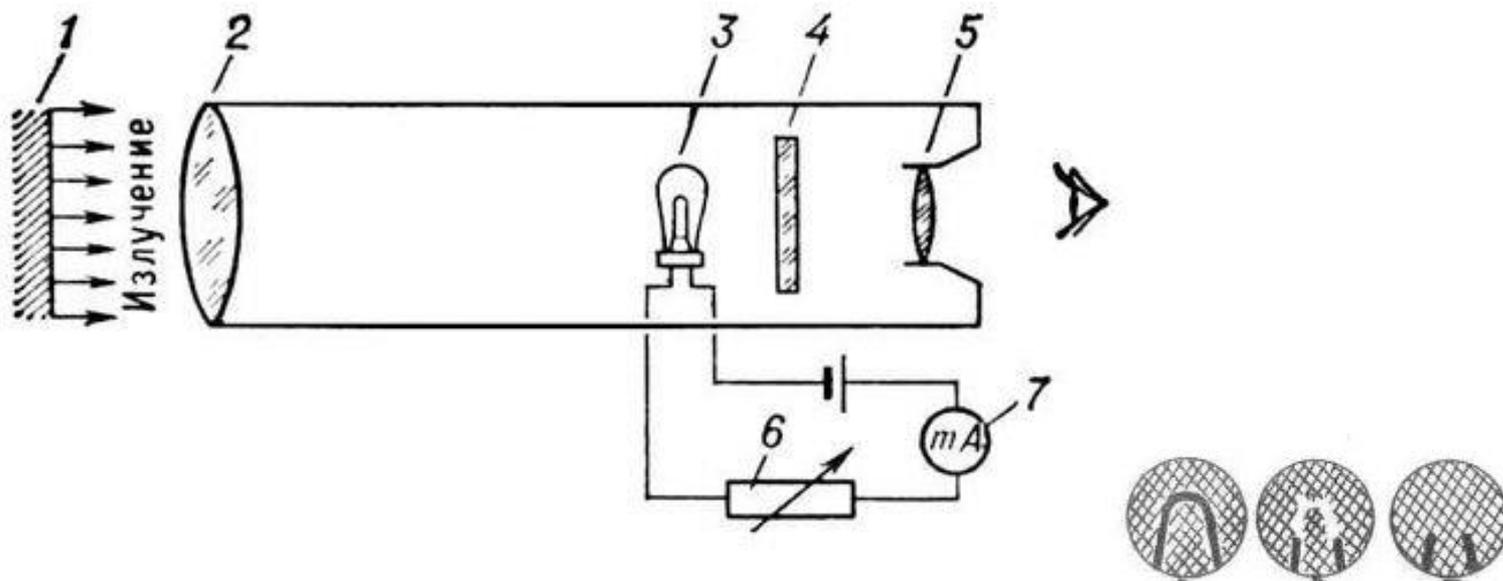
Схемы включения термопары в измерительную цепь



- а — измерительный прибор 1 подключен соединительными проводами 2 к концам термоэлектродов 3 и 4;
- б — в разрыв термоэлектрода 4; T_1 , T_2 — температура «горячего» и «холодного» контактов (спаев) термопары.

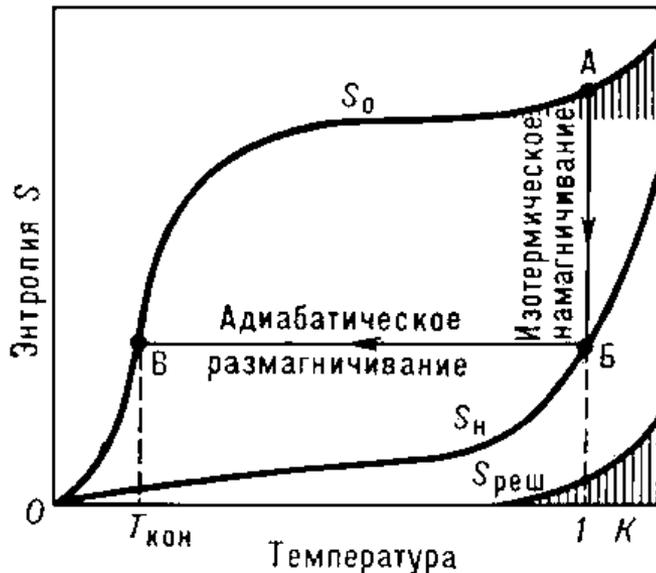
При измерении температуры один из спаев (T_2) обязательно термостатируется

Визуальный яркостный пирометр с исчезающей нитью



1 — источник излучения; 2 — оптическая система (телескоп пирометра); 3 — эталонная лампа накаливания; 4 — светофильтр; 5 — объектив; 6 — реостат, которым регулируют ток накала; 7 — измерительный прибор (миллиамперметр).

Магнитное охлаждение – магнитная термометрия



Цикл магнитного охлаждения состоит из 2 стадий:

- 1) изотермического намагничивания (линия АБ) и
- 2) адиабатического размагничивания парамагнетика (линия БВ).

Перед намагничиванием температуру парамагнетика при помощи жидкого гелия понижают до $T \approx 1$ К и поддерживают её постоянной на протяжении всей 1-й стадии магнитного охлаждения. Намагничивание сопровождается выделением теплоты и уменьшением энтропии до значения S_H . На 2-й стадии тепловое движение, разрушая упорядоченность спинов, приводит к увеличению $S_{\text{магн}}$. Однако в процессе адиабатического размагничивания энтропия парамагнетика в целом не меняется. Увеличение $S_{\text{магн}}$ компенсируется уменьшением $S_{\text{реш}}$, то есть охлаждением парамагнетика.

- Энтропийная диаграмма процесса магнитного охлаждения (S — энтропия, T — температура).
- Кривая S_0 — изменение энтропии рабочего вещества с температурой без магнитного поля;
- S_H — изменение энтропии вещества в поле напряженностью H ;
- $S_{\text{реш}}$ — энтропия кристаллической решетки ($S_{\text{реш}}$ Магнитное охлаждение ТЗ);
- $T_{\text{кон}}$ — конечная температура в цикле магнитного охлаждения.

Материалы

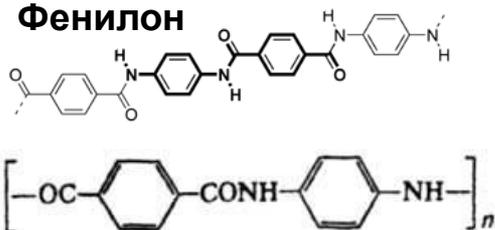
- Металлы и сплавы. W – 3400°C, Ta – 3015°C, Mo – 2620°C, Ti – 1668°C, Ni, 12X18H10T
- Керамики BeO – 2530°C, Al₂O₃ – 2050°C, ThO₂ – 3000°C, SiO₂ – 1610°C
- Карбиды, нитриды. C – 3700°C, HfC – 3890°C, TaC – 3880°C, TiN – 3205°C, TiC – 3147°C, BN – 3000°C
- Пластмассы.

Поли-*пара*-фенилентерефталамид (Кевлар) – до 500° С, Фторопласт – 260÷400° С, Лавсан (полиэтиленетерефталат, ПЭТ) – 260° С, Фенилон РЕЕК (полиэфирэфиркетон), Полиимид

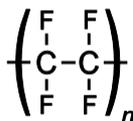
Полиимиды не плавятся (кокуются и обугливаются), нерастворимы в органических соединениях, стойки к кислотам и несколько хуже к щелочам, обладают высокой радиационной стойкостью, хорошие диэлектрики



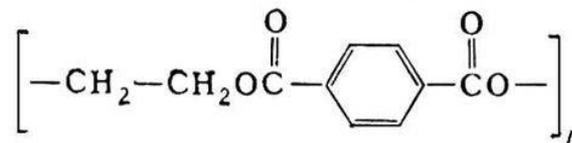
Фенилон



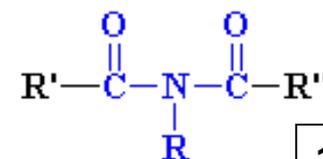
Фторопласт



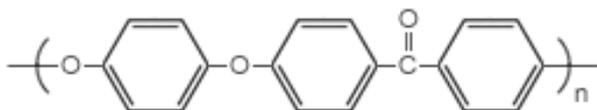
Полиэтиленетерефталат



Полиимид

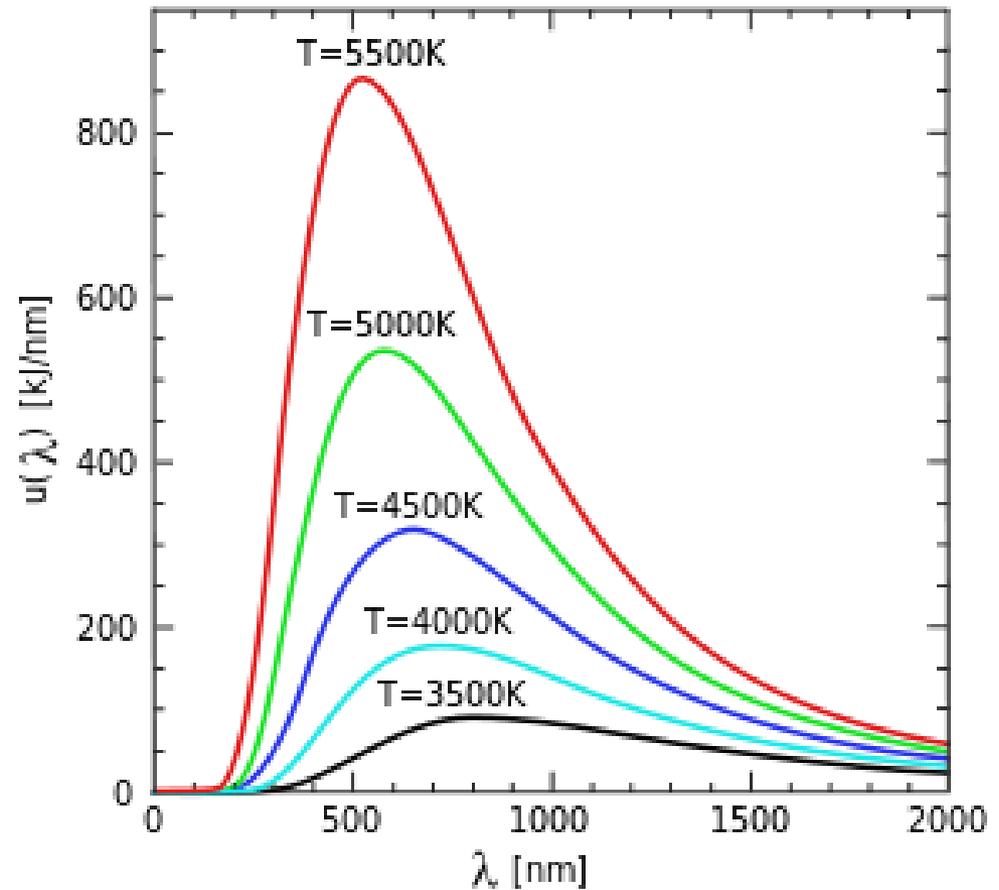
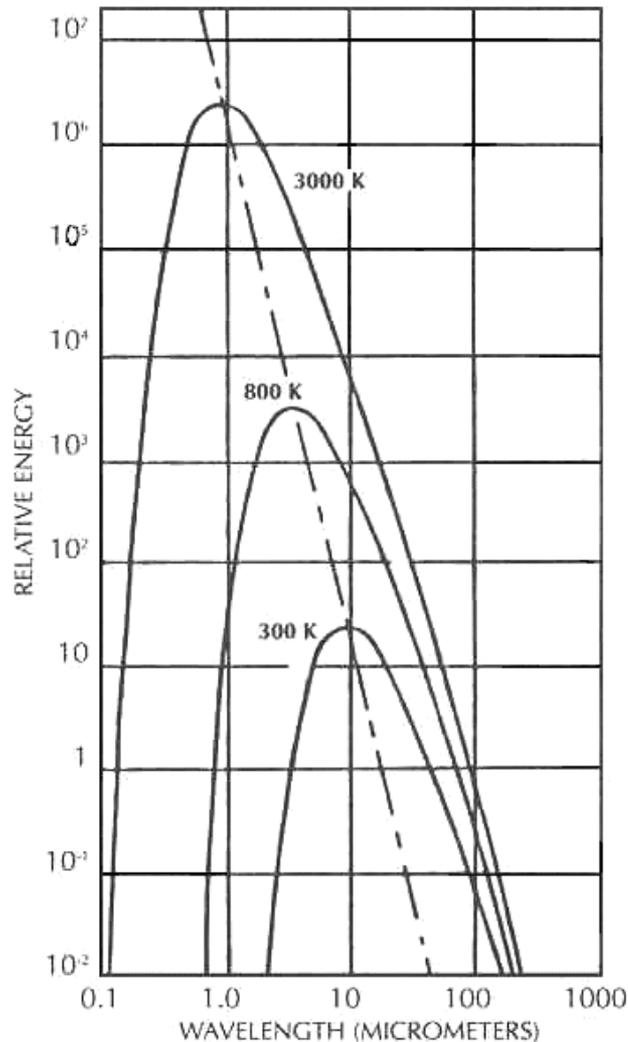


Поли-*пара*-фенилентерефталамид (Кевлар)

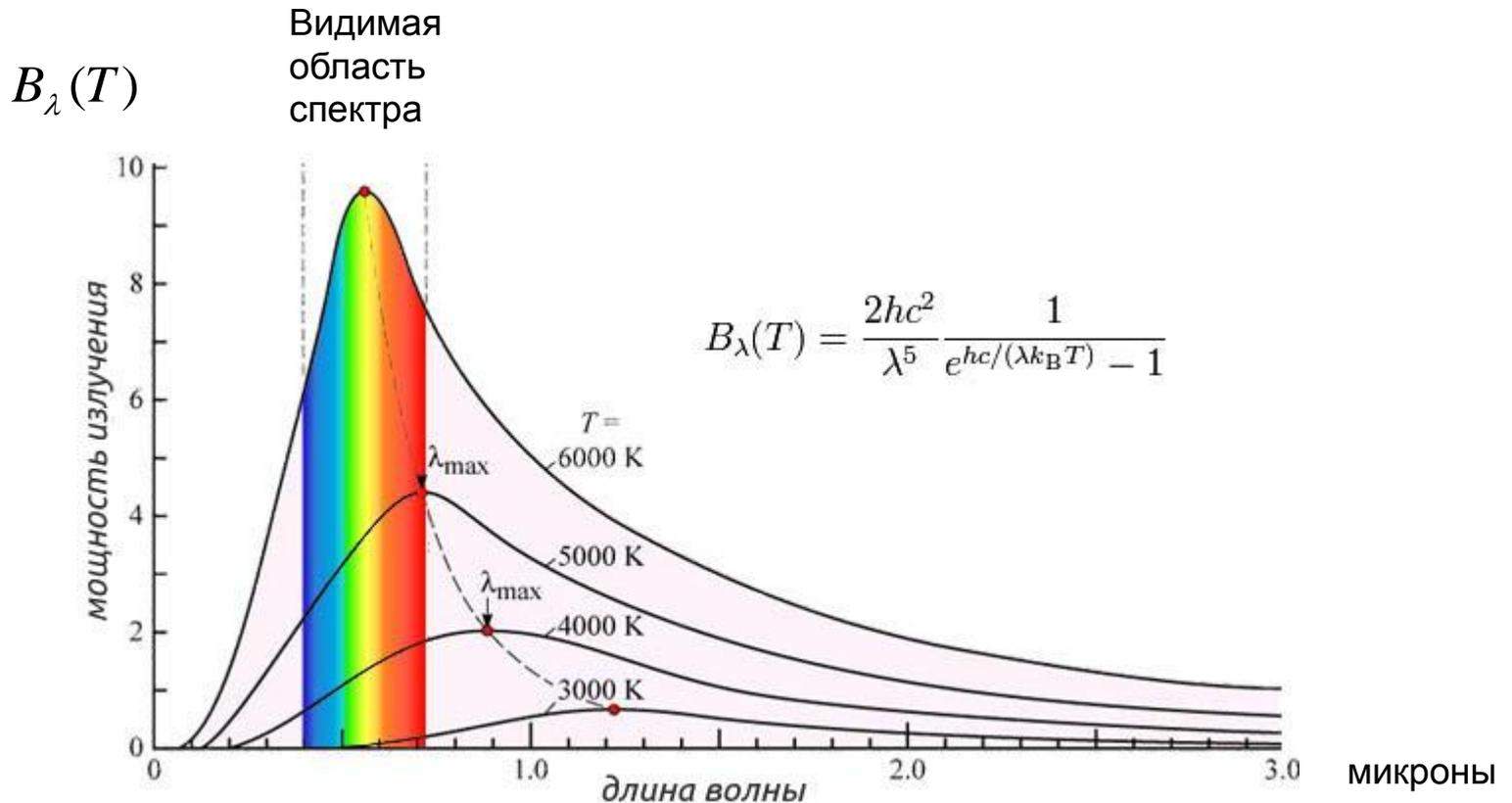


Полиэфирэфиркетон

Интенсивность излучения как функция длины волны и температуры (Закон Планка)



Закон Планка



В спектре имеется единственный **максимум, положение** которого определяется **законом Вина.**

Площадь под кривой соответствует суммарной мощности излучения по **закону Стефана-Больцмана.**

Законы излучения нагретого тела

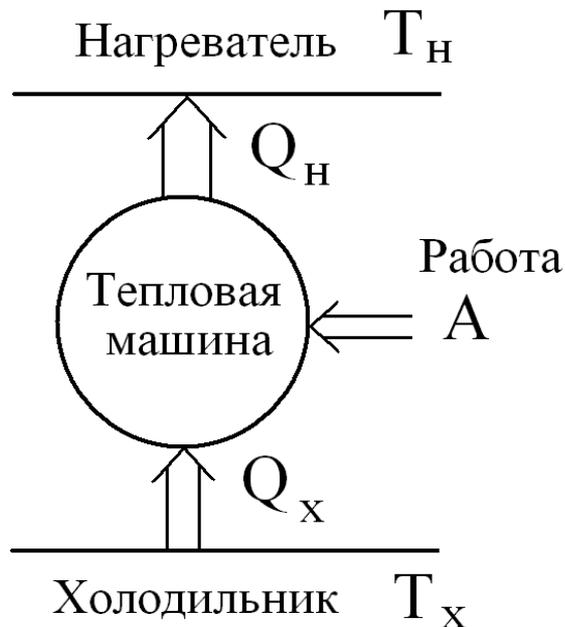
- Стефана-Больцмана $w = \sigma \cdot T^4$

- Вина $\lambda \cdot T^\circ = \text{const}$

- Закон для разреженной плазмы $w \sim \sqrt{T^\circ}$

Проблемы получения предельно высоких и предельно низких температур

- Потери на излучение
- Нагрев и перенос энтропии излучением
- Почему холод стоит дорого (расчёт тепловой машины вблизи 0°K)



$$\frac{Q_H}{T_H} \geq \frac{Q_X}{T_X}$$

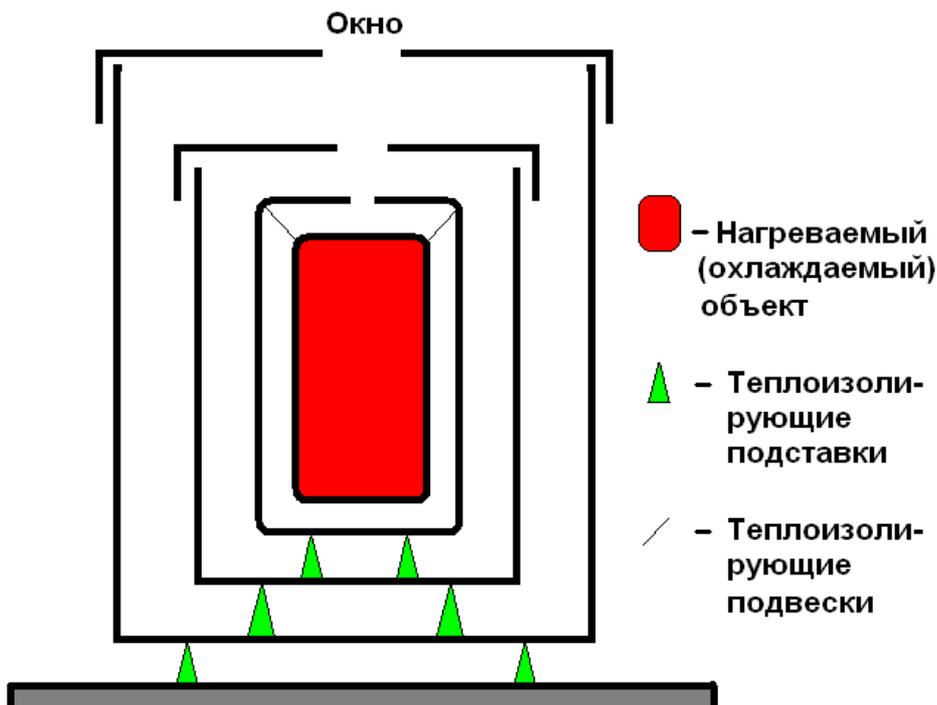
$$Q_H - Q_X \approx A$$

$$\frac{Q_X + A}{T_H} \approx \frac{Q_X}{T_X} \Rightarrow A \approx Q_X \cdot \frac{T_H}{T_X} - Q_X = Q_X \left(\frac{T_H}{T_X} - 1 \right)$$

Видно, что при $T_X \rightarrow 0$, $Q_X \rightarrow \text{Const}$
 $A \rightarrow \infty$

Конструкции установок

- Сосуды Дьюара
- Тепловые экраны



No. 872,795.

PATENTED DEC. 3, 1907.

R. BURGER.

DOUBLE WALLED VESSEL WITH A SPACE FOR A VACUUM BETWEEN THE WALLS.

APPLICATION FILED OCT. 23, 1906.

2 SHEETS-SHEET 2.

Fig. 9

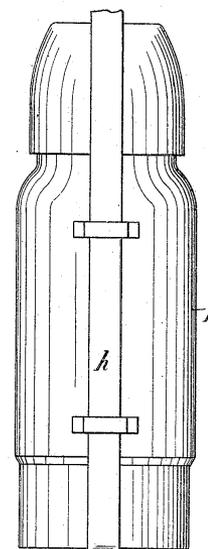


Fig. 10

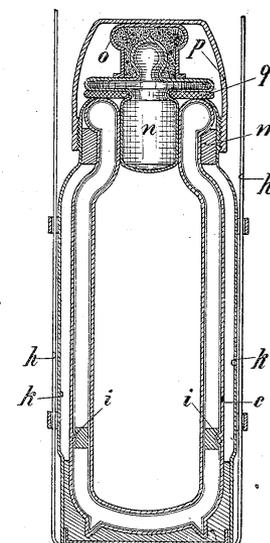
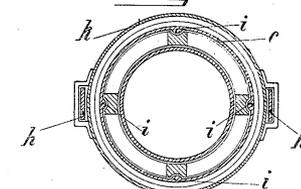


Fig. 11



WITNESSES:

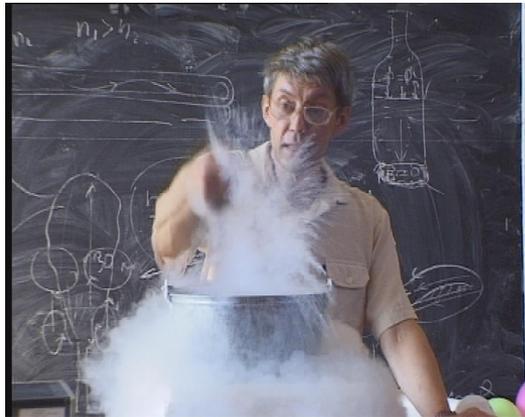
Wm. H. Derrigan
Georgel. Schenck

INVENTOR,
REINHOLD BURGER,
BY *Frank Derrigan*
Attorney.

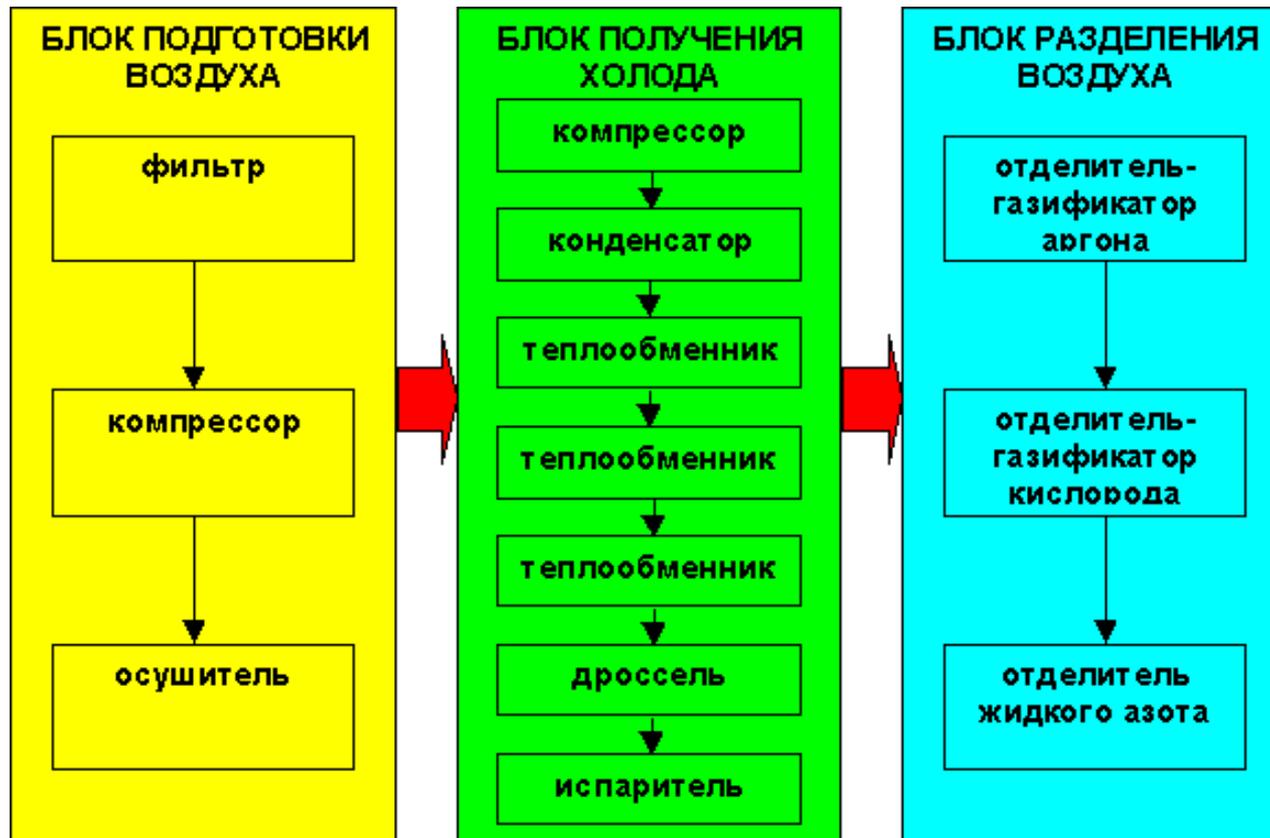
Ужасный Фильм



Менее ужасный Фильм



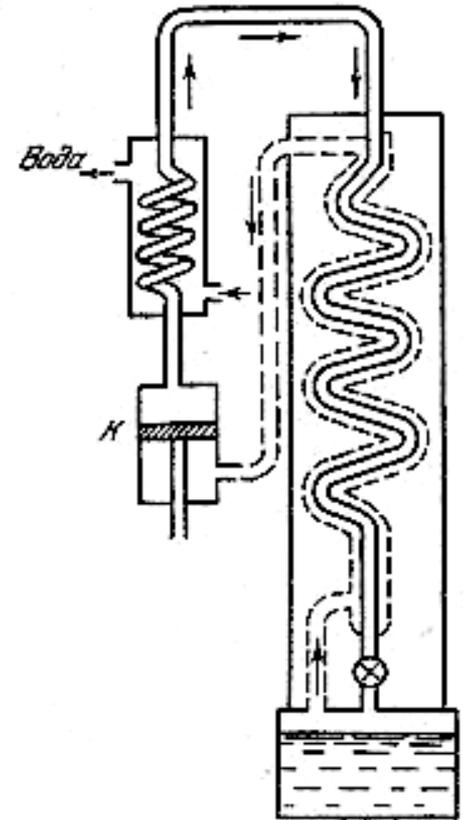
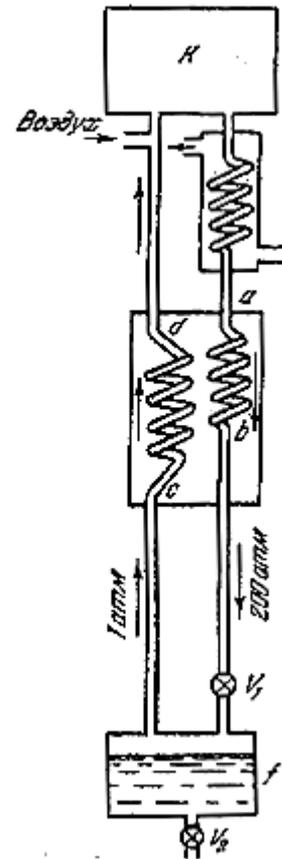
Стадии получения жидкого азота из воздуха



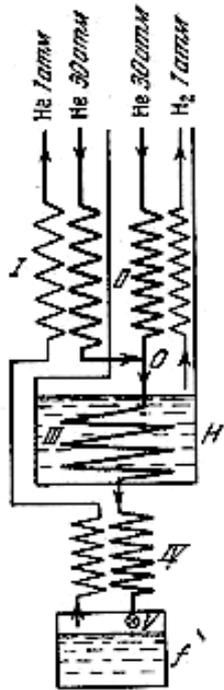
Ожижение воздуха

В первой машине для сжижения воздуха в технических масштабах (Линде и Гэмпсон, 1895 г.) для охлаждения газов ниже критической температуры и последующего сжижения использовался метод дросселирования.

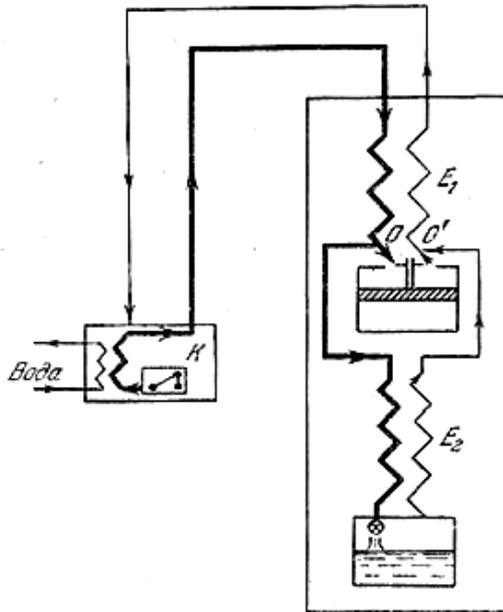
В машине Линде, наряду с использованием эффекта Джоуля – Томсона был применен важный конструктивный принцип *противоточного теплообмена*, в той или иной форме и теперь применяемый во всех ожижительных машинах.



Сжижение гелия

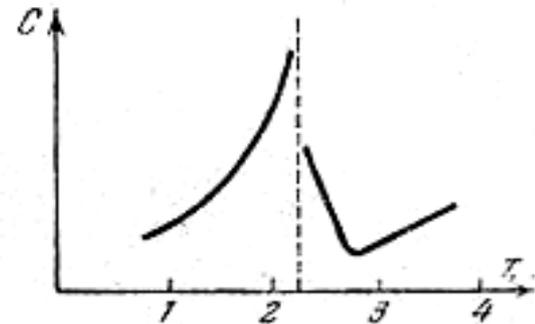


Машина Линде для гелия, охлаждаемая водородом.



Сжижение гелия методом адиабатного расширения в детандере (метод Клода). Не требует охлаждения водородом.

Машины типа Линде для сжижения воздуха в настоящее время применяются редко. Однако для сжижения водорода и гелия машины этого типа, действие которых основано на использовании эффекта Джоуля – Томсона, применяются до сих пор.



Теплоемкость гелия в зависимости от температуры

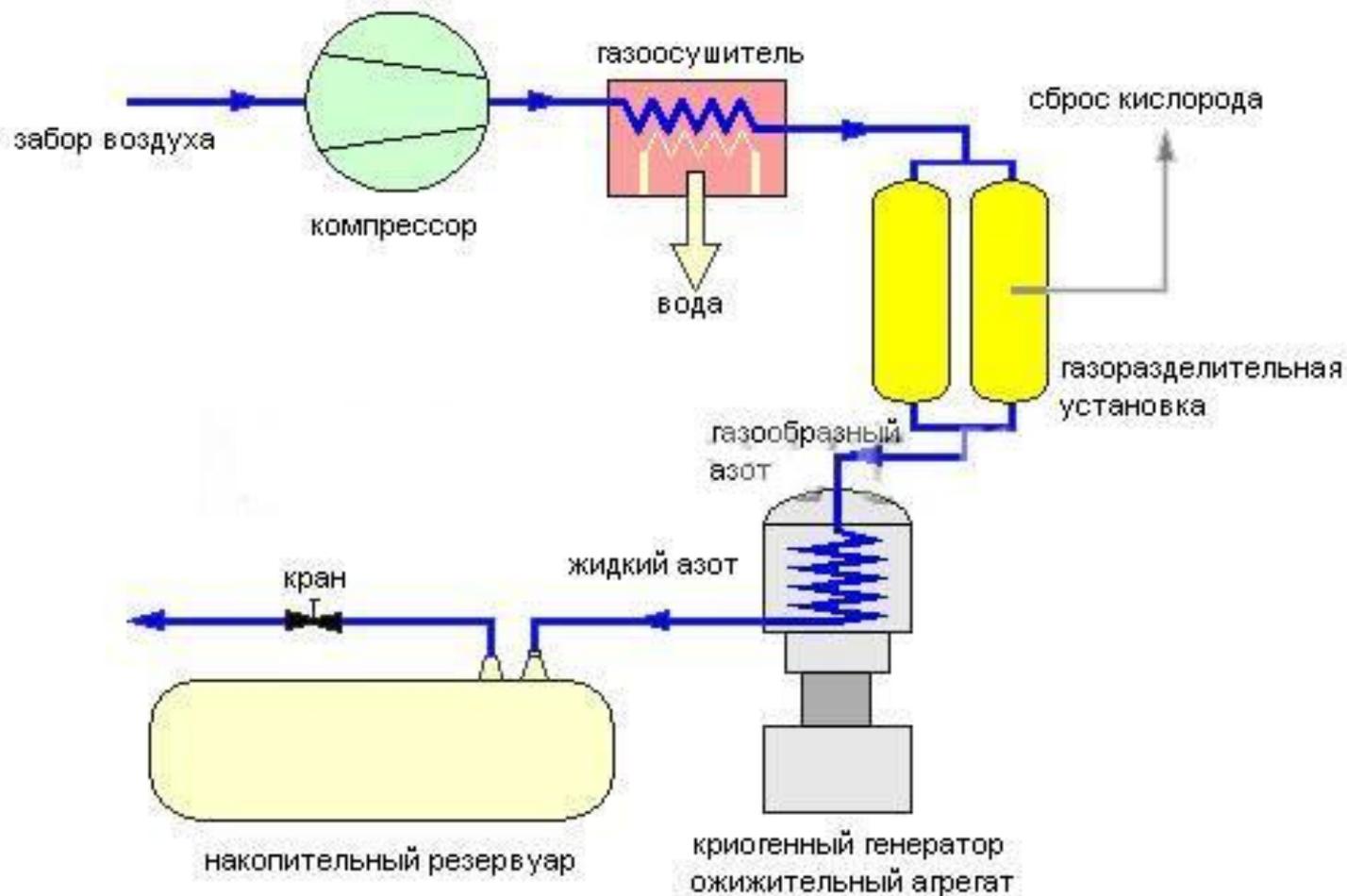
- Наиболее важной особенностью жидкого гелия является существование двух его модификаций, переходящих одна в другую при **2,186 °K** (при этой температуре переход происходит при давлении паров в одну атмосферу; под повышенным давлением температура перехода более низкая).
- Эти две модификации называются He I и He II. Для He II наблюдается **сверхтекучесть**.
- Точка перехода He I – He II обычно **называется л-точкой**. Название это принято из-за вида кривой температурной зависимости теплоемкости жидкого гелия, напоминающей букву л

Сжиженные и твердые газы – хладагенты

Необходимым условием для сжижения газа является предварительное охлаждение газа до температуры ниже критической.

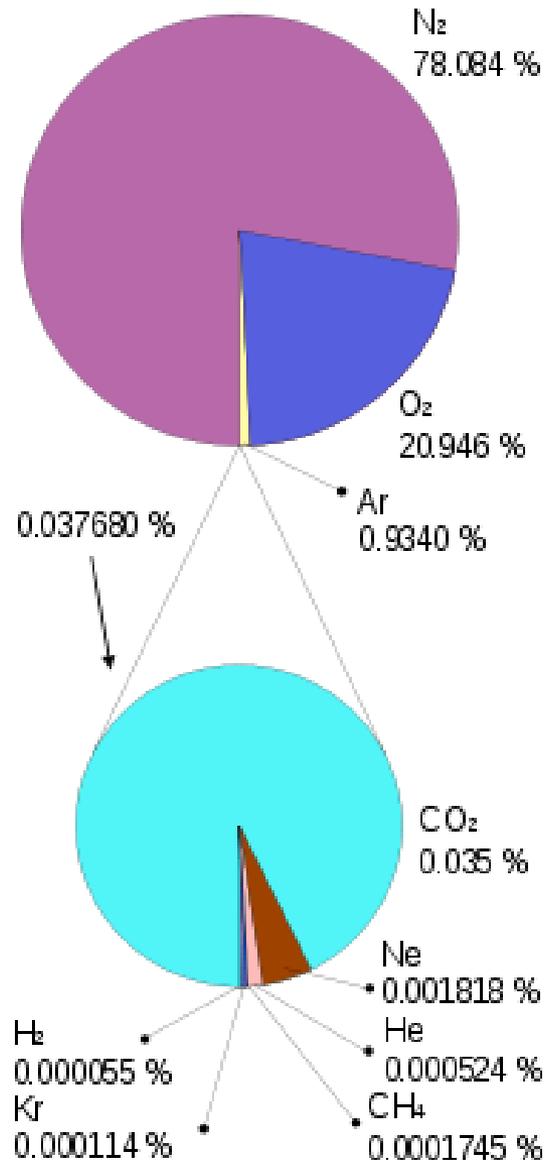
	N ₂	O ₂	H ₂	He ⁴
Температура кипения под давлением 1атм, °К	77,32	90,12	20,39	4,21
Температура отвердения, °К	63,14	54,36	14,04	He твердеет
Упругость пара при температуре отвердения, мбар	129	1,50	75,8	-
Плотность при температуре кипения при 1 атм, кг/м ³	800	1150	71	125
Теплота испарения при температуре кипения при 1 атм, кДж/кг	200	212,8	456,2	23
Плотность в твердом состоянии, кг/м ³	1026	1425	80	-

Структурная схема адсорбционной воздухоразделительной установки



- Основной принцип работы адсорбционной воздухоразделительной установки – селективное поглощение N_2 или O_2 воздуха молекулярно-ситовыми адсорбентами
- Обозначения: PSA (Pressure Swing Adsorption) или КБА (короткоцикловая безнагревательная адсорбция)

Распространенность в природе



Состав атмосферы Земли

- Азот - один из самых распространенных элементов на Земле, причем основная его масса (около $4 \cdot 10^{15}$ т) сосредоточена в свободном состоянии в атмосфере.
- В воздухе свободный Азот (в виде молекул N₂) составляет 78,09% по объему (или 75,6% по массе), не считая незначительных примесей его в виде аммиака и оксидов.
- Среднее содержание Азота в литосфере $1,9 \cdot 10^{-3}\%$ по массе.
- Природные соединения Азота - хлористый аммоний NH₄Cl и различные нитраты. Крупные скопления селитры характерны для сухого пустынного климата (Чили, Средняя Азия).
- Азот - четвертый по распространенности элемент Солнечной системы (после водорода, гелия и кислорода)

Жидкий азот

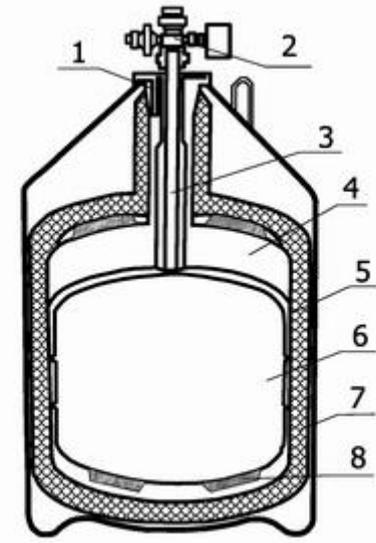
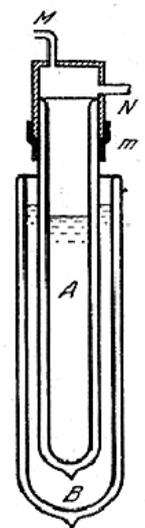
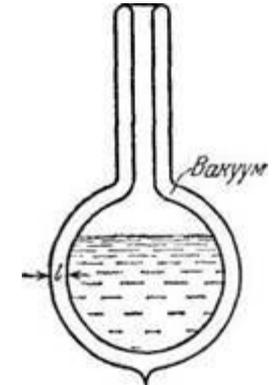
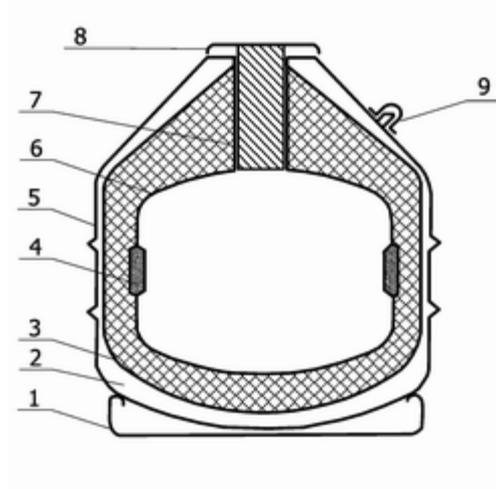
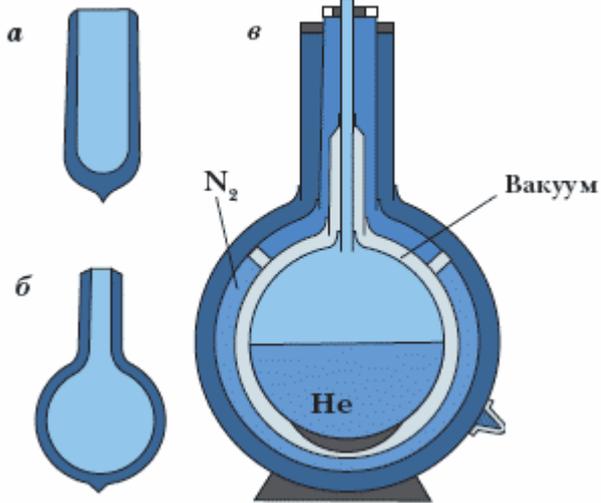
Термодинамические свойства азота

Плотность (при н. у.)	0,808 г/см ³ (-195,8 °С); при н.у. 0,001251 г/см ³	
Температура плавления	63,2 °К (-210 °С)	
Температура кипения	77,34 °К	-195,8 °С
Теплота плавления	25,5 кДж/кг	
Теплота испарения	199,3 кДж / кг	

Температура кипения O₂ **90,2 °К (-183 °С)**

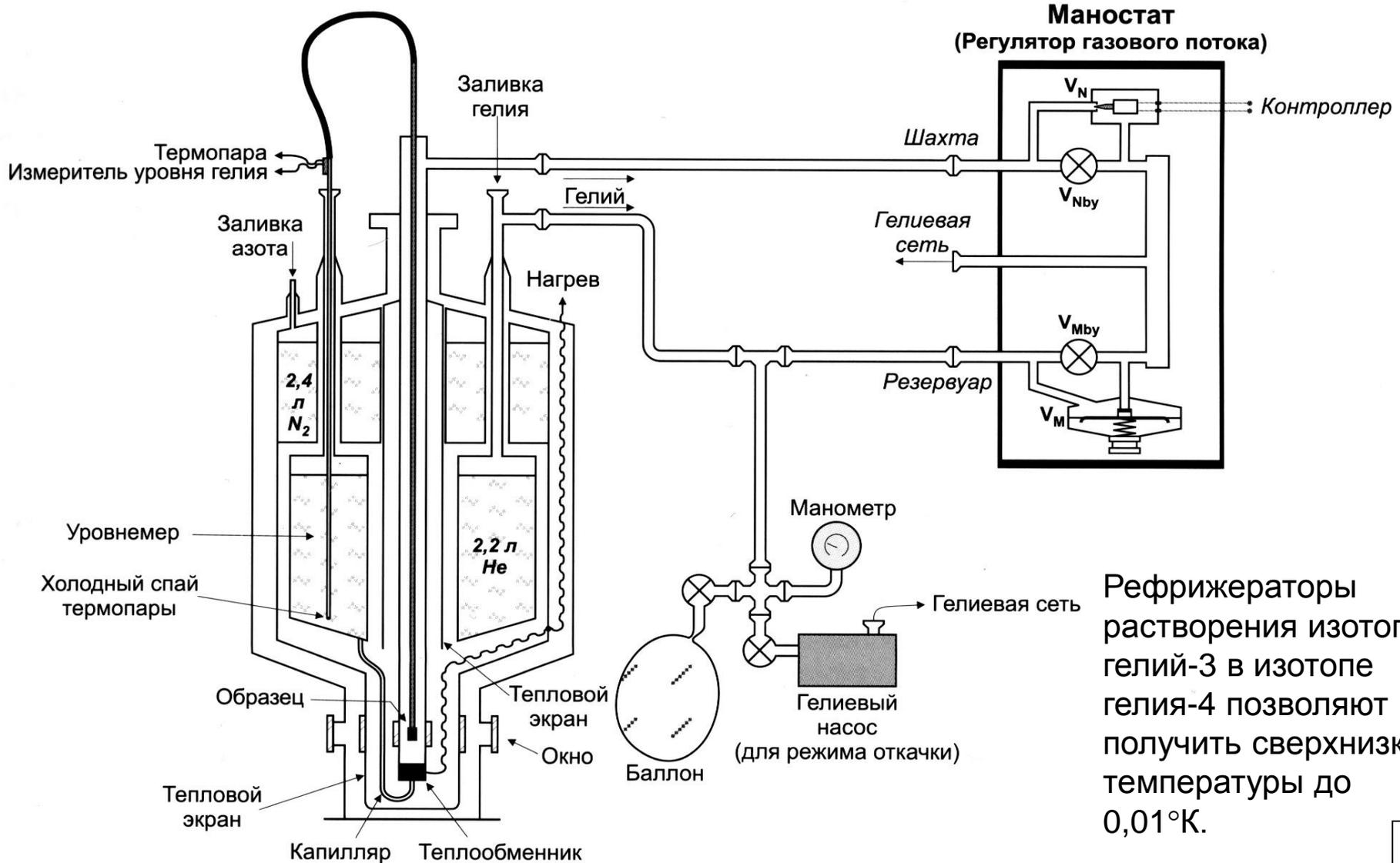
Вещество	Удельная теплота испарения (кДж / кг)
Вода	2260
Водород	448
Азот	199
Этиловый спирт	905
Ртуть	282

Сосуды дьюара



Гелиевый криостат

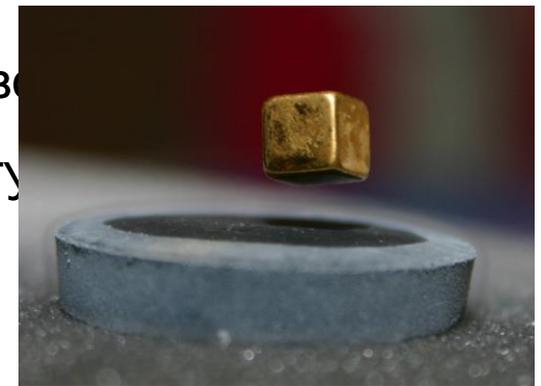
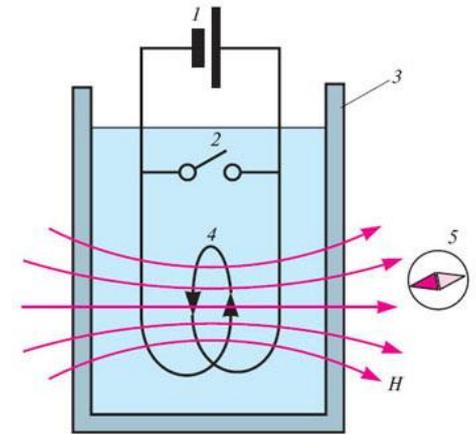
Схема работы криостата optCRYO105



Рефрижераторы растворения изотопа гелий-3 в изотопе гелия-4 позволяют получить сверхнизкие температуры до 0,01°K.

Сверхпроводимость

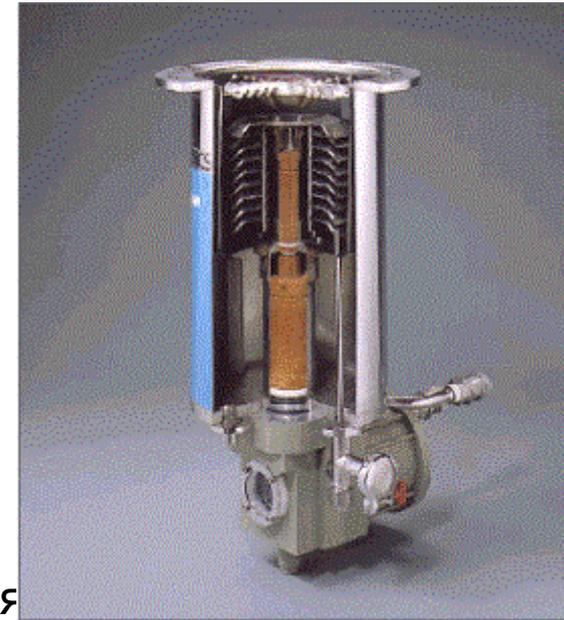
- Наиболее удобным для сверхпроводящих магнитов является сверхпроводник II рода Nb_3Sn с критической температурой $18\text{ }^\circ\text{K}$ и критическим магнитным полем $>25\text{ Тл}$ (250000 Эрстед).
- Первое из открытых веществ с критической температурой $93\text{ }^\circ\text{K}$, то есть выше точки кипения жидкого азота, было $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, открытое в 1987 г. Чу и др.
- В настоящее время рекордным значением критической температуры $T_c = 135\text{ }^\circ\text{K}$ (под давлением $T_c = 165\text{ }^\circ\text{K}$, $-109\text{ }^\circ\text{C}$) обладает вещество $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$, открытое в 1993 г. С. Н. Путилиным и Е. В. Антиповым из МГУ.
- В 2000 г. – фторирование $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$ приводит к $T_c = 168\text{ }^\circ\text{K}$
- Эффект Мейснера – выталкивание сверхпроводником магнитного потока



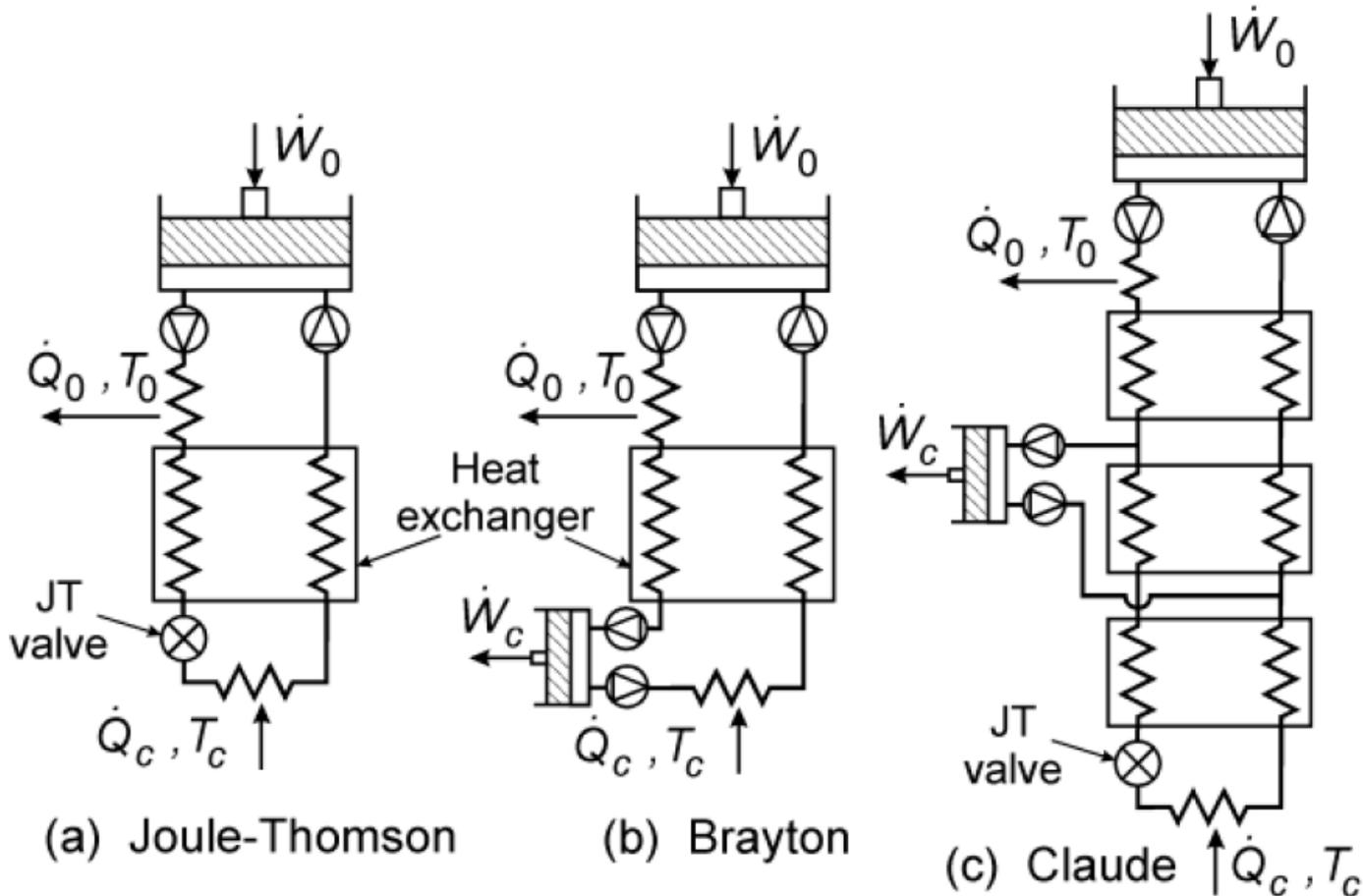
«Гроб Магомета»

Крионасос с замкнутым циклом

- Для охлаждения специальных встроенных криопанелей до 15К и 80К, на которых происходит осаждение молекул газа, в крионасосе используется система охлаждения замкнутого цикла с гелием в качестве рабочего газа.
- Гелий, при комнатной температуре и высоком давлении, нагнетается удаленным компрессором в крионасос на охлажденную головку поршня, которая термически связана с двумя рядами конденсационных решеток.
- Поступающий на головку поршня под давлением гелий расширяется и охлаждает решетки.
- Внешний ряд решеток охлаждается до 80К и используется для конденсации паров воды.
- Внутренний ряд конденсационных решеток охлаждается до температуры 15К и предназначен для основной части оставшихся газов.
- Все конденсирующиеся газы переходят в твердое состояние с давлением паров менее 10^{-12} Торр.
- Неконденсируемые газы, такие как гелий, водород и неон адсорбируются слоем из капсулированного древесного угля, охлажденного до 15 К.



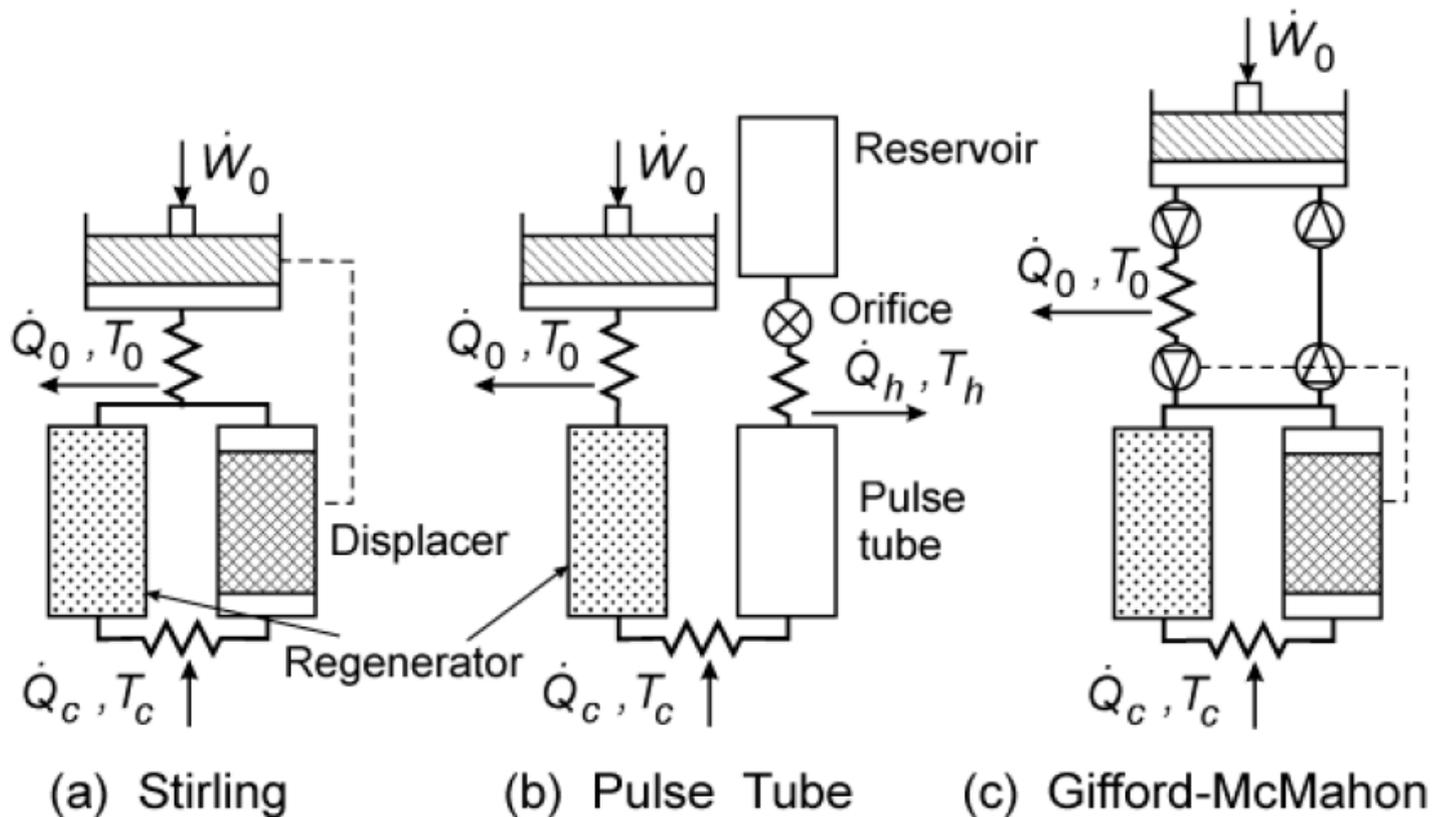
Схемы рекуперативных охладителей



$$K_{\text{качества}} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_0} = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

Используют только рекуперативный теплообменник и работают с непрерывным потоком хладагента через систему

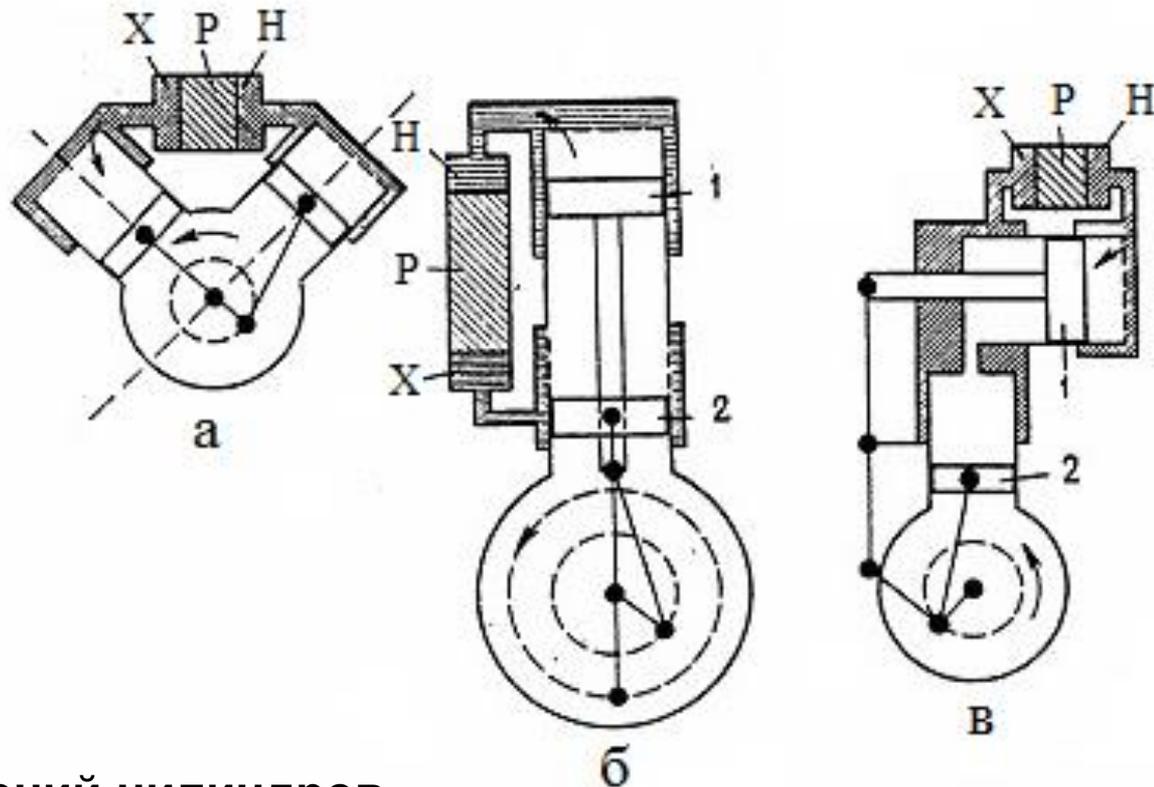
Схемы регенеративных охладителей



$$K_{\text{качества}} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_0} = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

Имеют хотя бы один регенеративный теплообменник или регенератор и работают с пульсирующими потоками и давлениями

Схемы двигателей Стирлинга



Типы соединений цилиндров

а – альфа (с двумя поршнями)

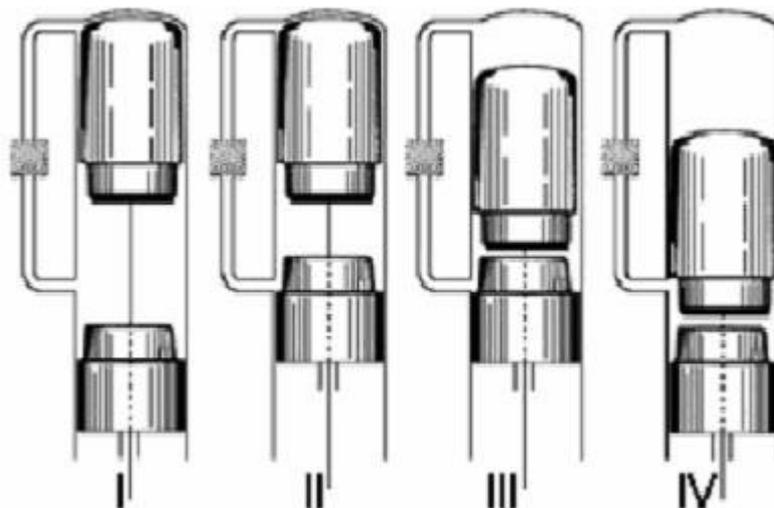
б – бета (с рабочим и вытеснительным поршнями)

в – гамма (с рабочим и вытеснительным поршнями)

1- вытеснитель, 2 – рабочий поршень,

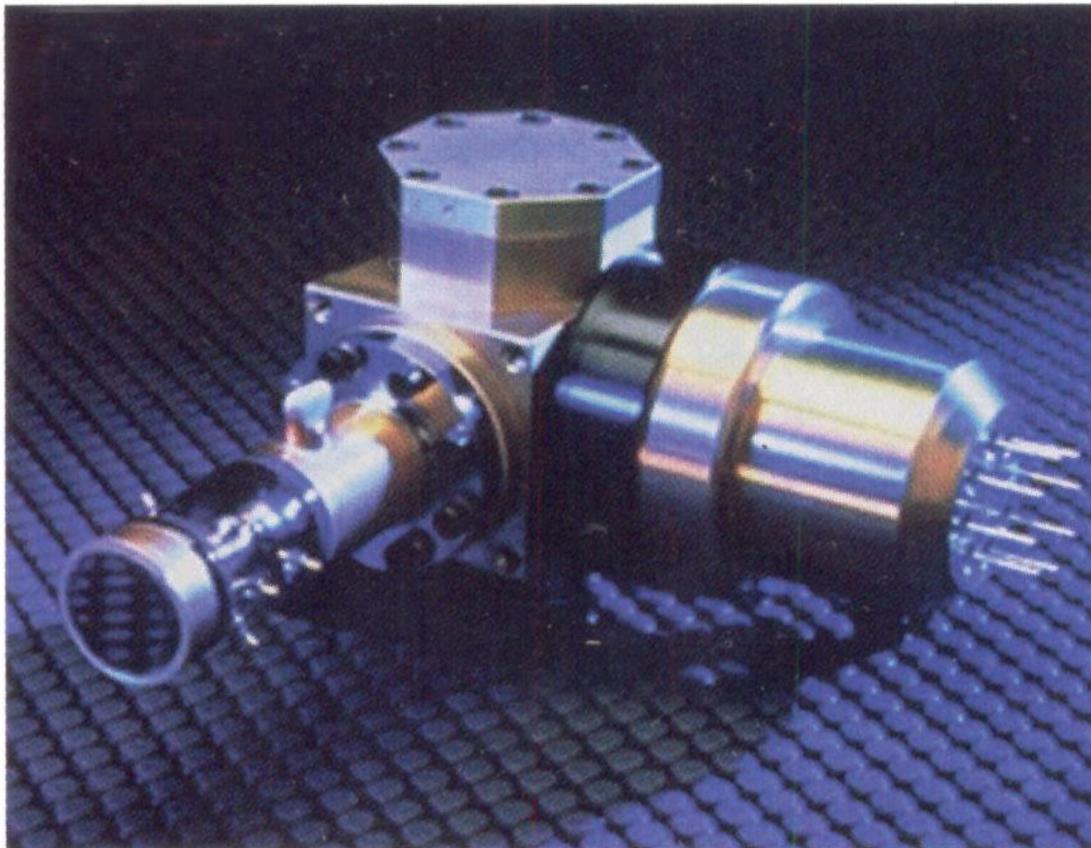
Н – нагреватель, Р – регенератор, Х - холодильник

Принцип действия



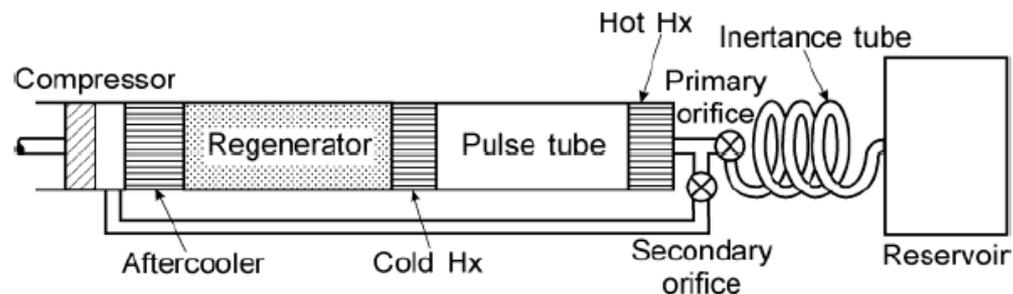
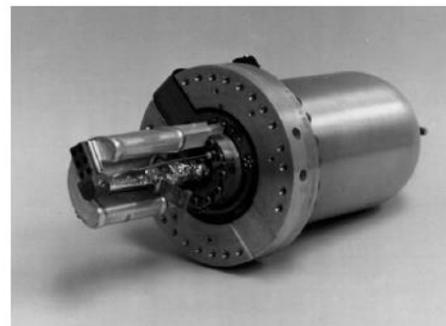
- I - Поршень находится в крайнем нижнем положении, а вытеснитель - в крайнем верхнем. Весь газ - в холодной полости;
- II - Вытеснитель остается в верхнем положении. Поршень сжимает газ при низкой температуре;
- III - Поршень остается в крайнем верхнем положении. Вытеснитель переталкивает газ из холодной полости в горячую;
- IV - Нагретый газ расширился. Поршень и вытеснитель находятся в своих крайних нижних положениях. В то время как поршень остается на месте, вытеснитель переталкивает газ в холодную полость. Потом цикл повторяется.

Двигатель Стирлинга



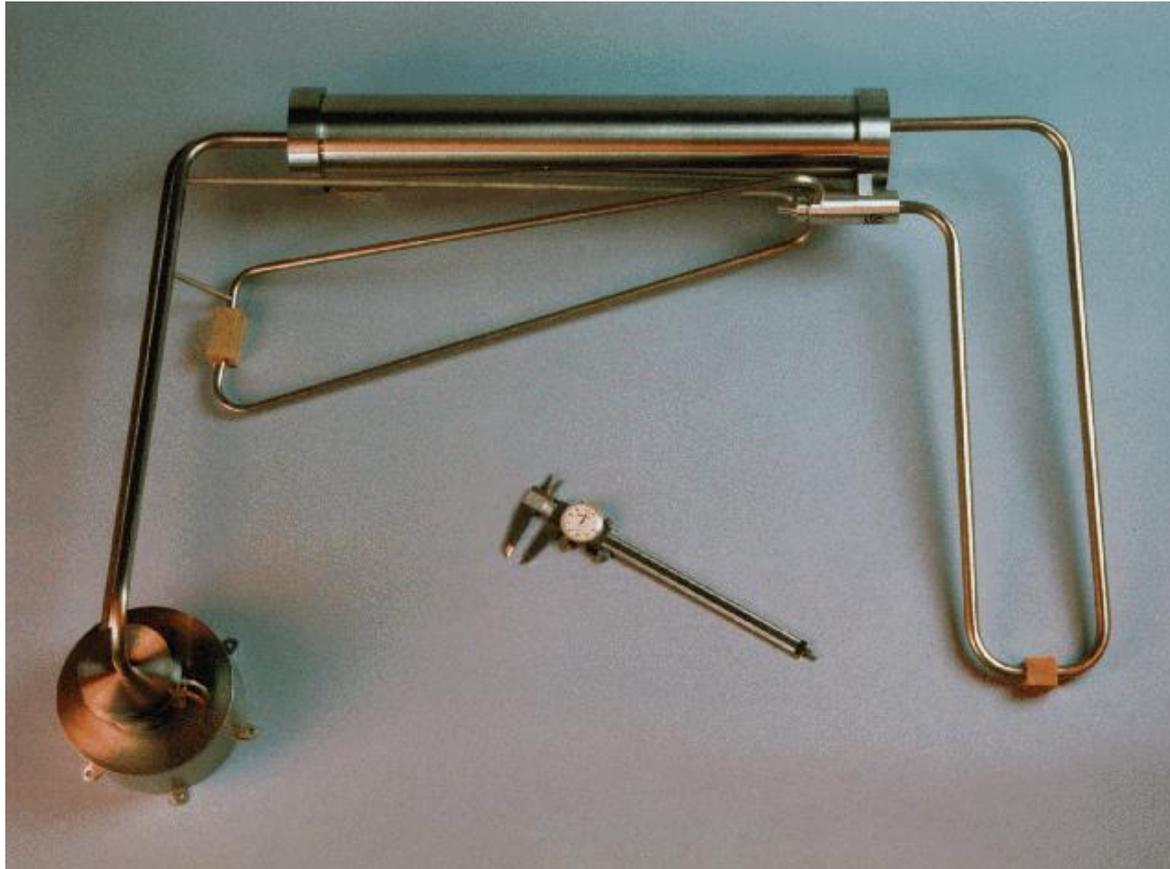
- Охлаждение детектора 77°K
- Масса – менее 450 г
- Энергопотребление – менее 5 Вт
- Режим – непрерывный, 24 ч/сут

Импульсные трубчатые охладители Термоакустические охладители



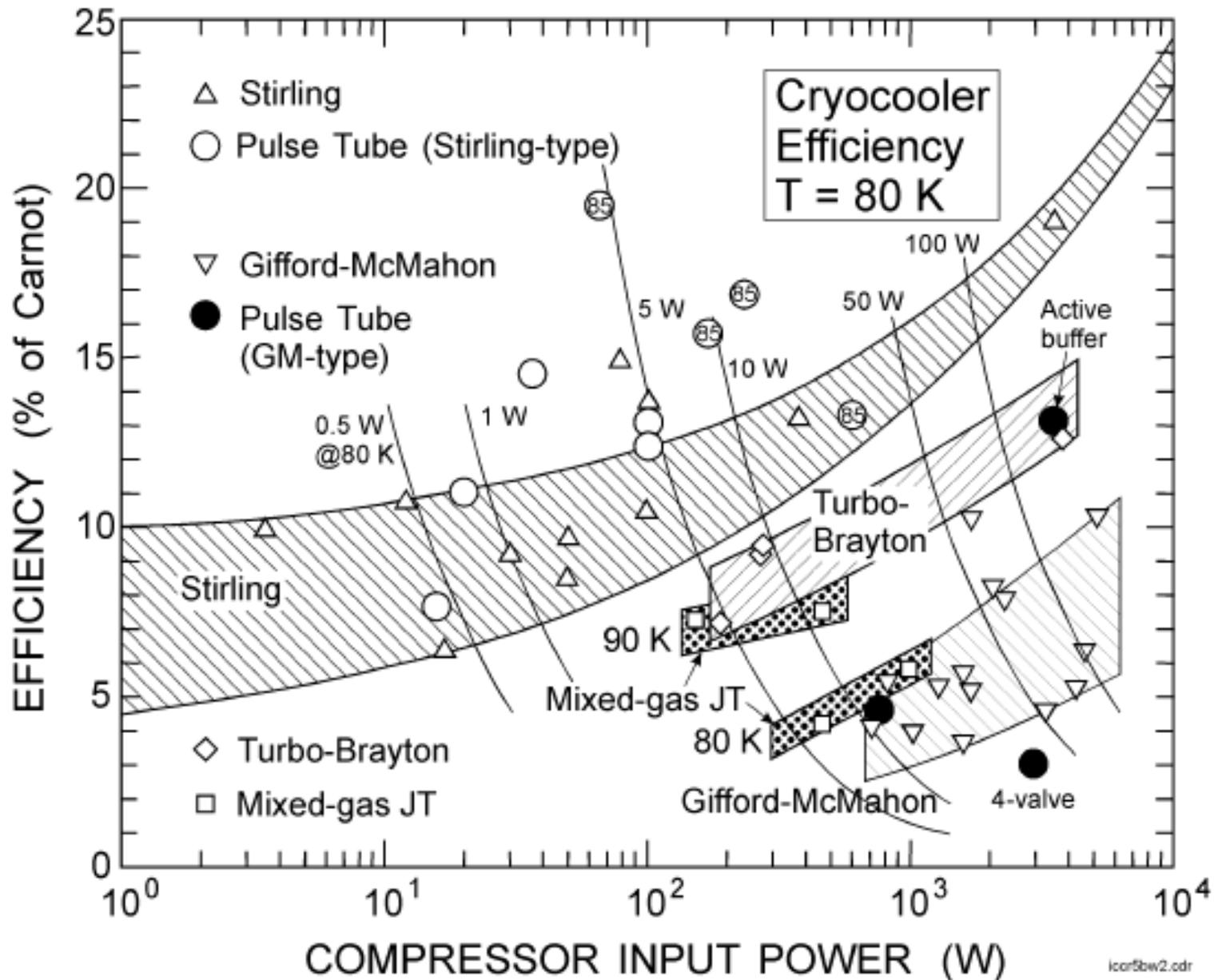
- Перенос тепла за счет резонансных колебаний в трубе, заполненной газом (гелием)
- Температуры $4^{\circ}\text{K} \div 80^{\circ}\text{K}$ (2-х и одноступенчатые системы)
- Тепловой поток $1 \div 40$ Вт
- Размер –дециметры

5 Watt, 65 Kelvin Turbo-Brayton cooler



- Ключевые особенности
- Миниатюрные турбины на газовых подшипниках
- Турбины, сбалансированные до скоростей вращения 80000 оборотов в минуту, практически без вибрации
- Полностью реверсивный цикл, высоко эффективный при низких температурах
- Применение – Космическая техника

Сравнение эффективности систем охлаждения



Турбодетандер П.Л. Капицы

1936-1939 гг.

Промышленное получение кислорода

КПД 86-92%

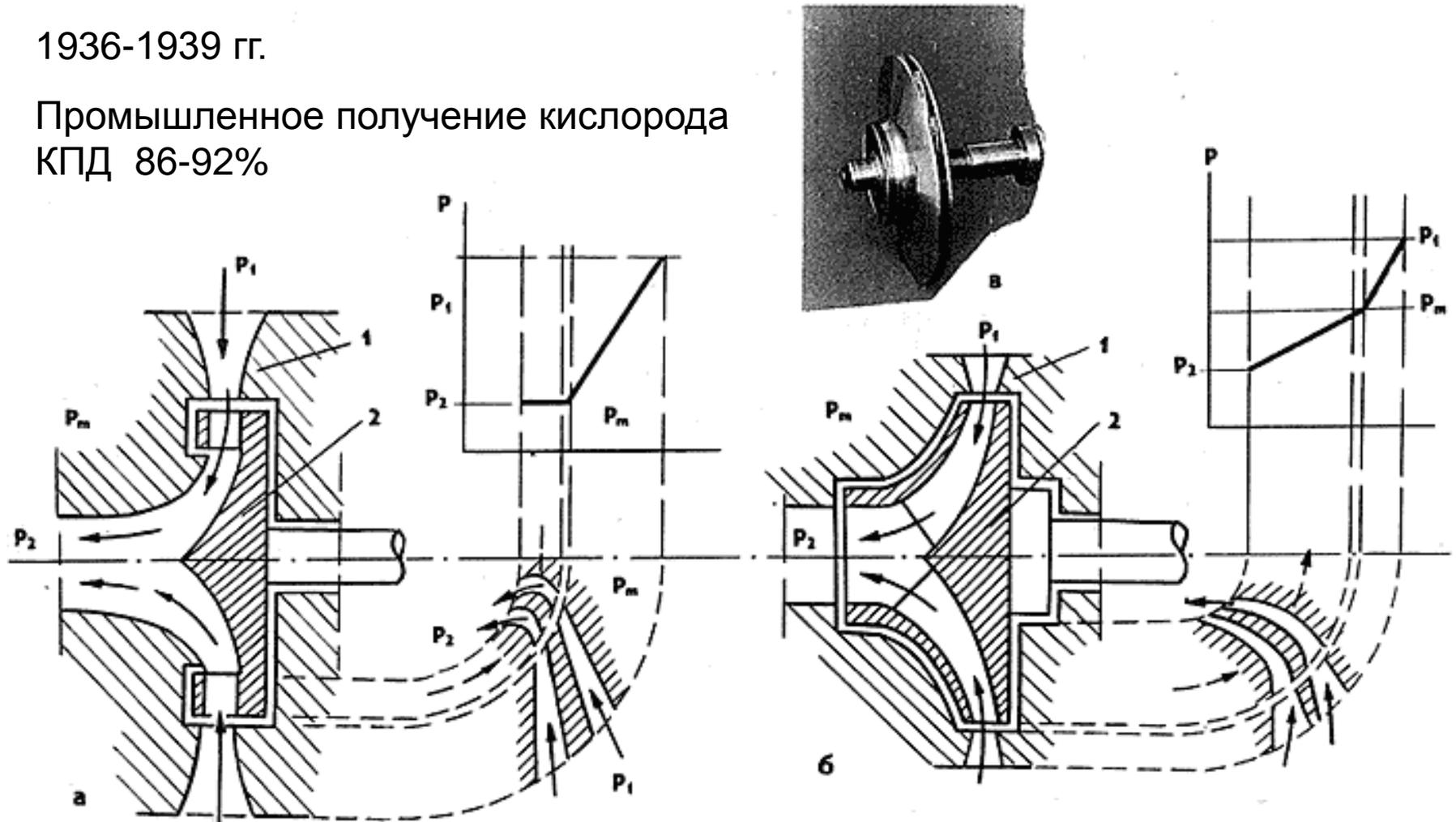


Схема движения потоков газа и распределения давления в активном (а) и активно-реактивном (б, в) турбодетандерах. 1 - направляющий аппарат; 2 - рабочее колесо.

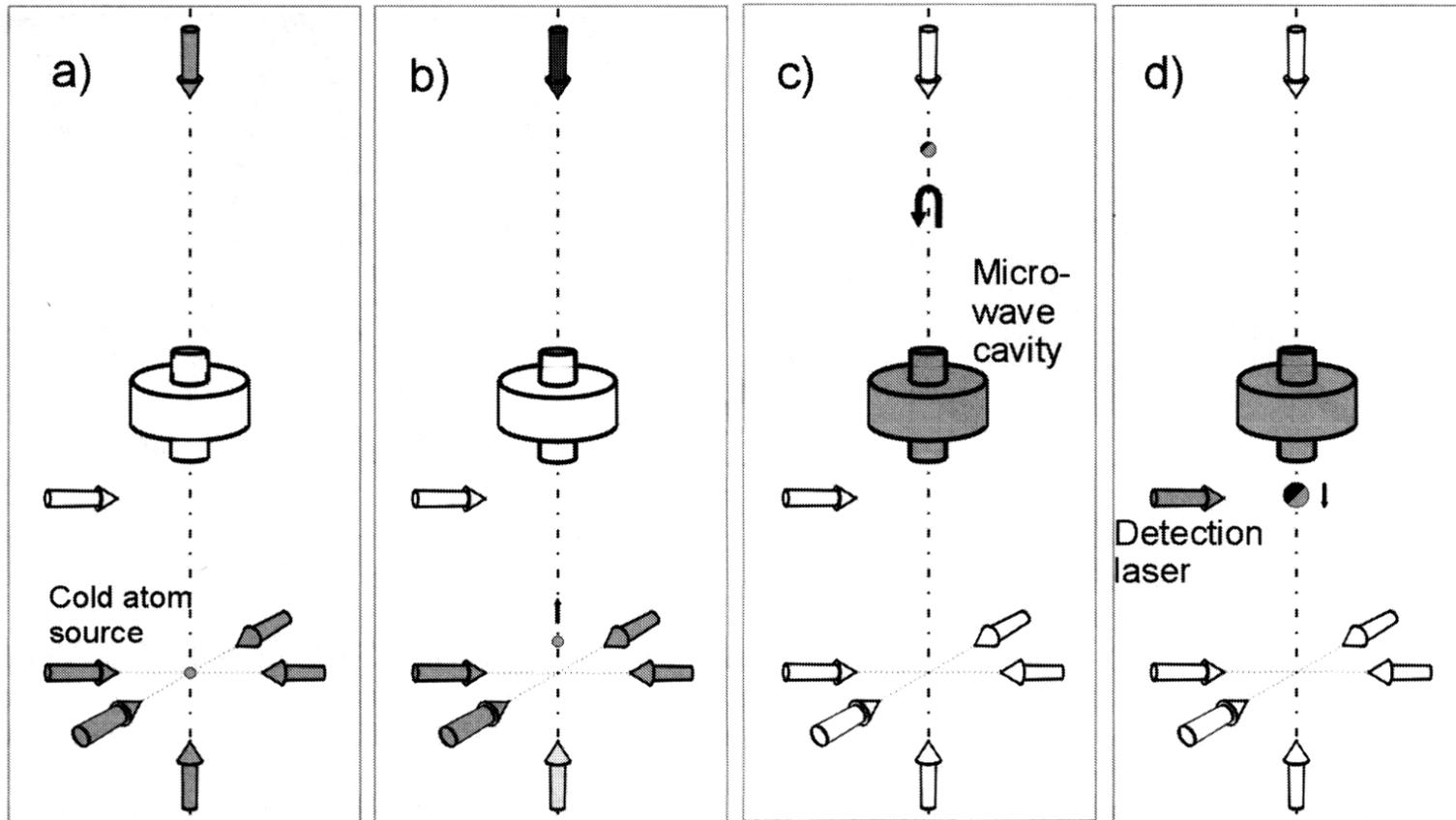
Турбодетандер П.Л. Капицы

- В турбодетандере, как и во всех центростремительных турбинах (и паровых, и водяных), имеются расположенный по периферии неподвижный направляющий аппарат и помещенное внутри него вращающееся рабочее колесо. В направляющем аппарате по окружности расположены сопла, расширяясь в которых поток рабочего тела разгоняется и приобретает определенную скорость. Попадая на лопатки колеса, рабочее тело вращает его, отдавая энергию и охлаждаясь. Отработавшее рабочее тело выпускается через патрубок, расположенный в центре колеса. В направляющем аппарате давление газа снижается с P_1 до P_m , и газ приобретает определенную скорость. Попадая на лопатки рабочего колеса, газ вращает его, отдавая энергию; при этом его давление снижается с P_m до P_2
- В активном турбодетандере практически весь перепад давлений сбрасывается в соплах направляющего аппарата, где газ разгоняется до скорости звука. Струи газа на коротких лопатках рабочего колеса меняют направление, и кинетическая энергия газа преобразуется в работу.
- В активно-реактивном турбодетандере газ разгоняется в направляющем аппарате до значительно меньшей скорости, чем в активном, а работа совершается не только в результате изменения направления потока газа, но и под действием реакции струи в длинных каналах рабочего колеса (в). Поэтому основные потери - гидравлические, связанные со скоростью газа, в активно-реактивном турбодетандере на 25-30% меньше, чем в активном.

Применение криогенных технологий

- **Военное**
 - 1. Инфракрасные датчики для наведения ракет
 - 2. Инфракрасные датчики для спутникового наблюдения
- **ЧС и Безопасность**
 - 1. Инфракрасные датчики для ночного видения и спасения
- **Окружающая среда**
 - 1. Инфракрасные датчики для изучения атмосферных озонных дыр и парникового эффекта
 - 2. Инфракрасные датчики для контроля загрязнения
- **Коммерческое**
 - 1. Крионасосы для изготовления полупроводников
 - 2. Высокотемпературные сверхпроводники для базовых станций сотовой телефонной связи
 - 3. Сверхпроводники для стандартов напряжения
 - 4. Полупроводники для высокоскоростных компьютеров
 - 5. Инфракрасные датчики для неразрушающего контроля и контроля производственных процессов
- **Медицинское**
 - 1. Охлаждение, сверхпроводящих магнитов для ЯМР систем
 - 2. СКВИД-магнетометры для изучения деятельности сердца и мозга
 - 3. Сжижение кислорода для хранения в больницах и домашнего использования
 - 4. Криогенные катетеры и криохирургия
- **Транспорт**
 - 1. Сжижение природного газа для транспортных средств
 - 2. Сверхпроводящие магниты в поездах с магнитной подвеской
- **Энергетика**
 - 1. Сжижение природного газа для пиковых котельных
 - 2. Инфракрасные датчики для измерения тепловых потерь
 - 3. Сверхпроводящие магнитные накопители энергии для устранения пиковых перегрузок
- **Сельское хозяйство и Биология**
 - 1. Хранение биологических клеток и образцов

Охлаждение атомов пучками лазерного излучения



Частота лазера чуть ниже частоты оптического перехода в атоме

При встречном движении за счет доплеровского сдвига наступает резонансное поглощение и атому передается импульс

Недостаток метода – малое количество охлаждаемого вещества

Фонтан из охлажденных атомов цезия

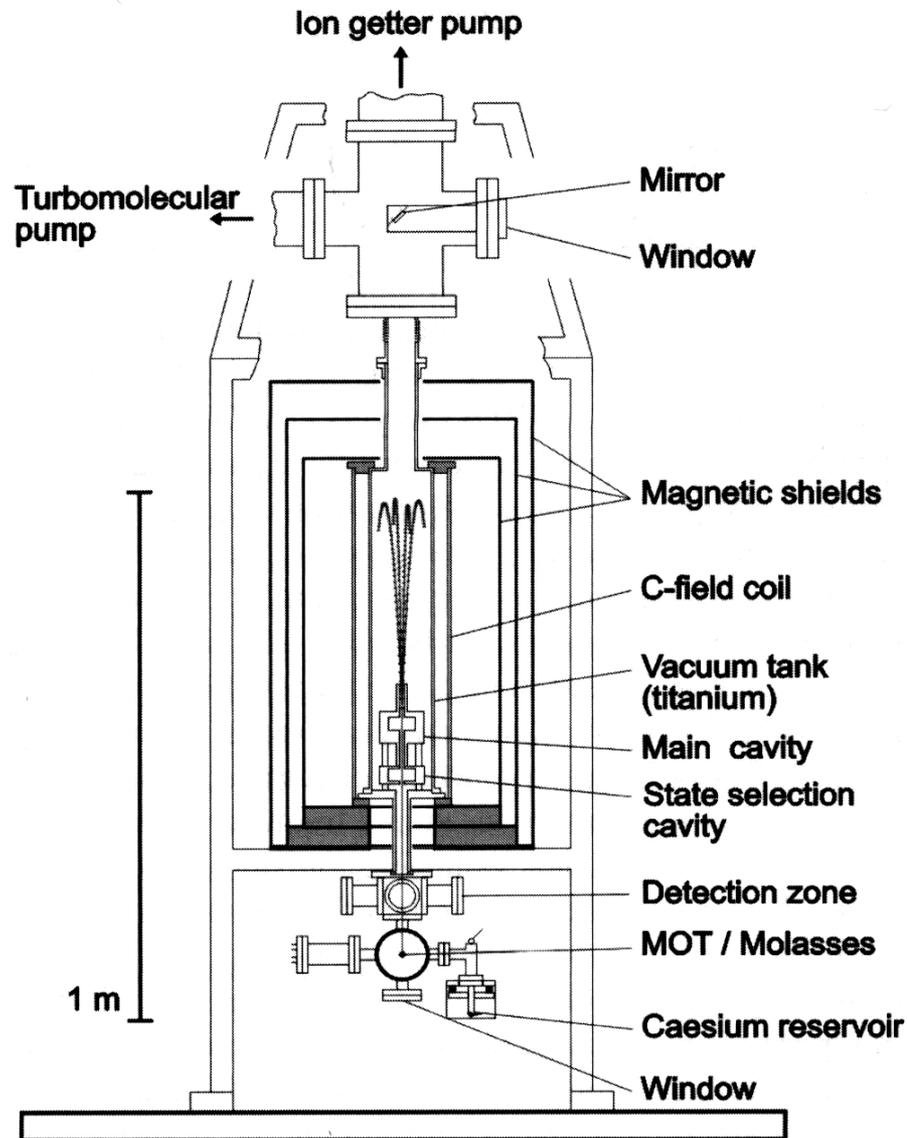


Схема установки

2003 год:

Неопределённость в определении IAT (TAI) снизилась до $2,5 \cdot 10^{-15}$

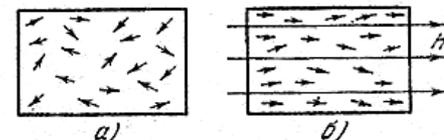
Получение низких температур откачкой паров сжиженных газов

- откачкой паров азота можно добиться температуры тройной точки ($63\text{ }^{\circ}\text{K}$),
- откачкой паров водорода (над твёрдой фазой) можно добиться температуры $10\text{ }^{\circ}\text{K}$,
- откачкой паров гелия можно добиться (при очень хороших условиях проведения эксперимента) температуры около $0,7\text{ }^{\circ}\text{K}$.

Адиабатическое размагничивание

- Метод основан на эффекте выделения теплоты из парамагнитных солей при их намагничивании и последующем поглощении теплоты при их размагничивании.
- Фактически, убирая магнитное поле, мы резко уменьшаем энтропию системы.
- Это позволяет получать температуры вплоть до 0,001 К.
- Для получения очень низких температур более всего подходят соли с малой концентрацией парамагнитных ионов, то есть соли, в которых соседние парамагнитные ионы отделены друг от друга немагнитными атомами.

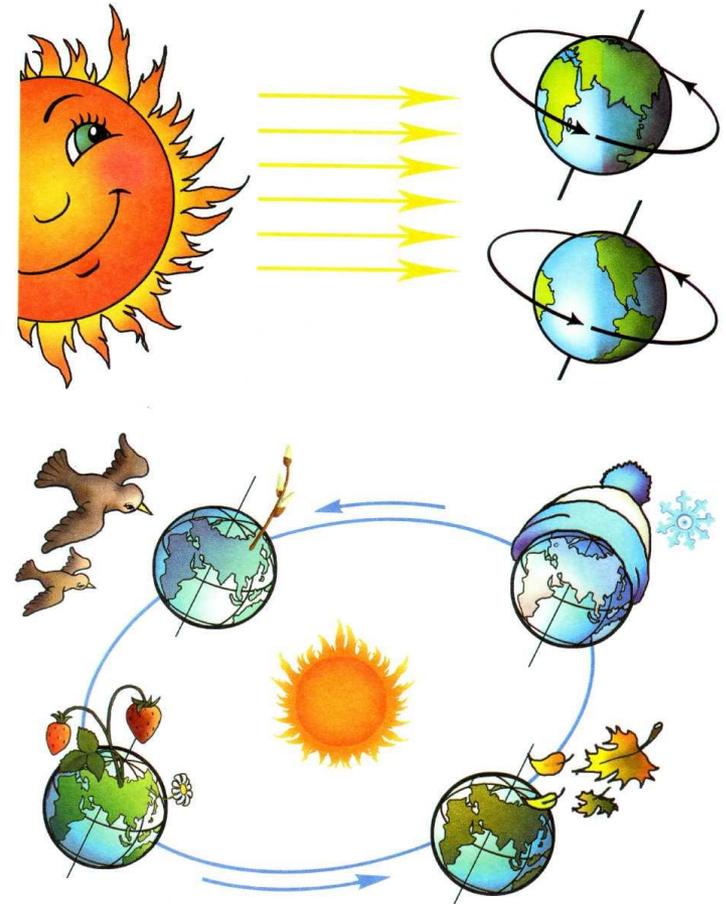
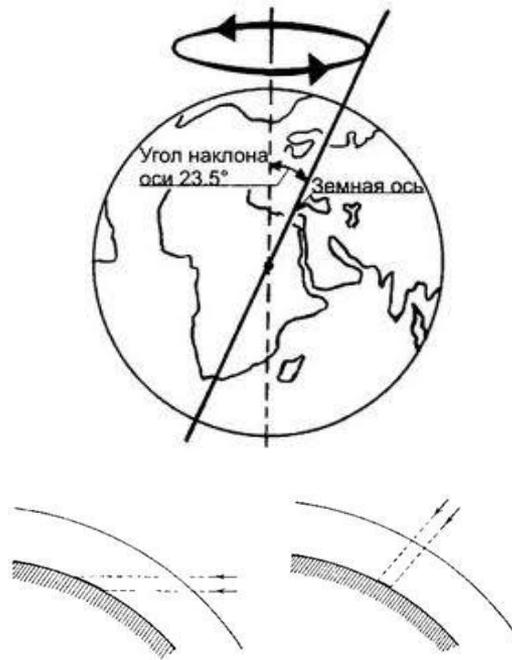
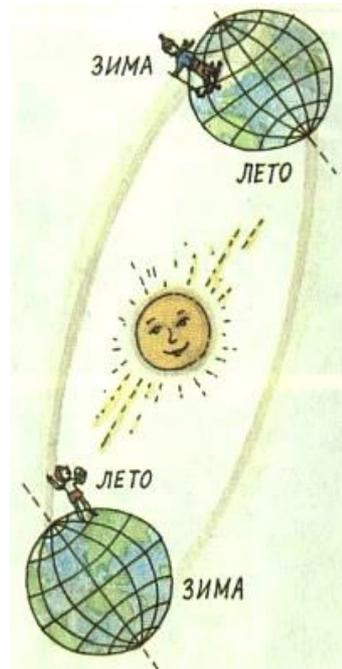
- 1) Образец из парамагнитной соли подвешивается на нити в трубке, заполненной газообразным гелием под небольшим давлением.



Газообразный гелий обеспечивает контакт с ванной жидкого гелия, охлаждаемой испарением жидкости под пониженным давлением. Во время работы в ванне поддерживается возможно более низкое давление, обычно соответствующее температуре ~ 1 К. За счет теплопроводности газа парамагнитная соль охлаждается до температуры гелиевой ванны. Затем включается магнитное поле.

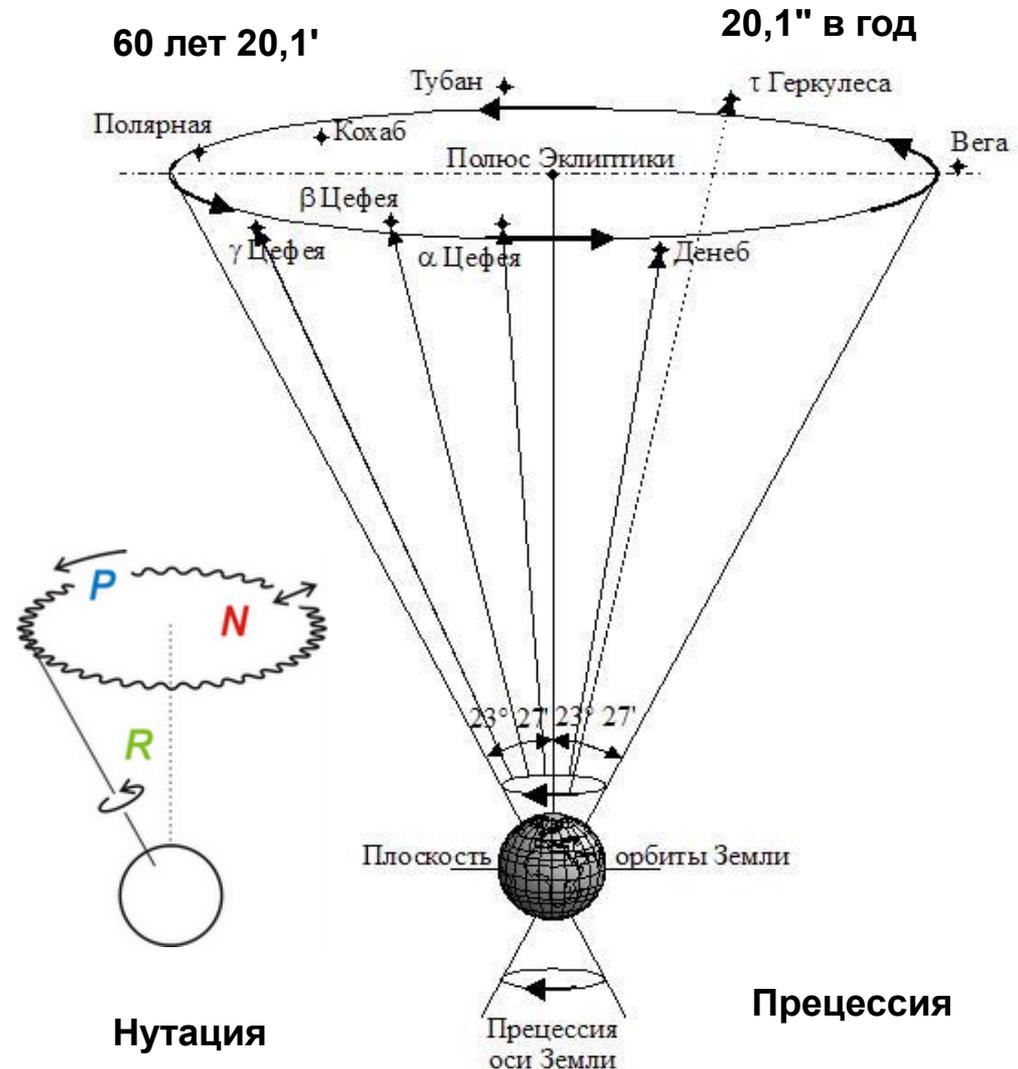
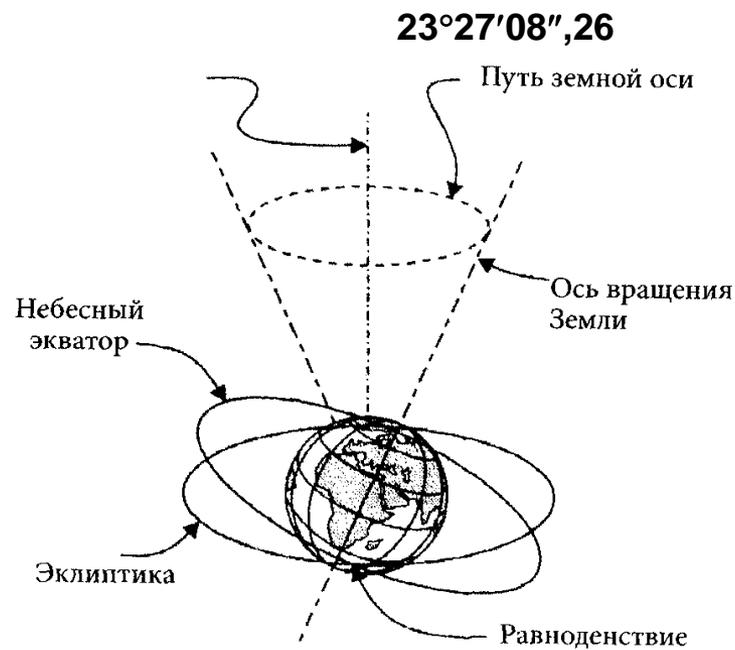
- 1) В процессе намагничивания соль нагревается. Ориентирование магнитных ионов вдоль магнитного поля уменьшает энтропию. Тепло от соли отводится в гелиевую ванну, и температура соли снова становится равной 1 К.
- 2) Далее газ, который окружает образец и находится с ним в тепловом контакте, откачивается и после этого производится выключение магнитного поля. В результате температура соли заметно понижается.

От чего бывают зима и лето



- Земля, как гироскоп сохраняет направление оси в пространстве
- Ось отклонена от перпендикуляра к плоскости орбиты Земли на $23,5^\circ$
- При падении света под углом поглощается меньше энергии

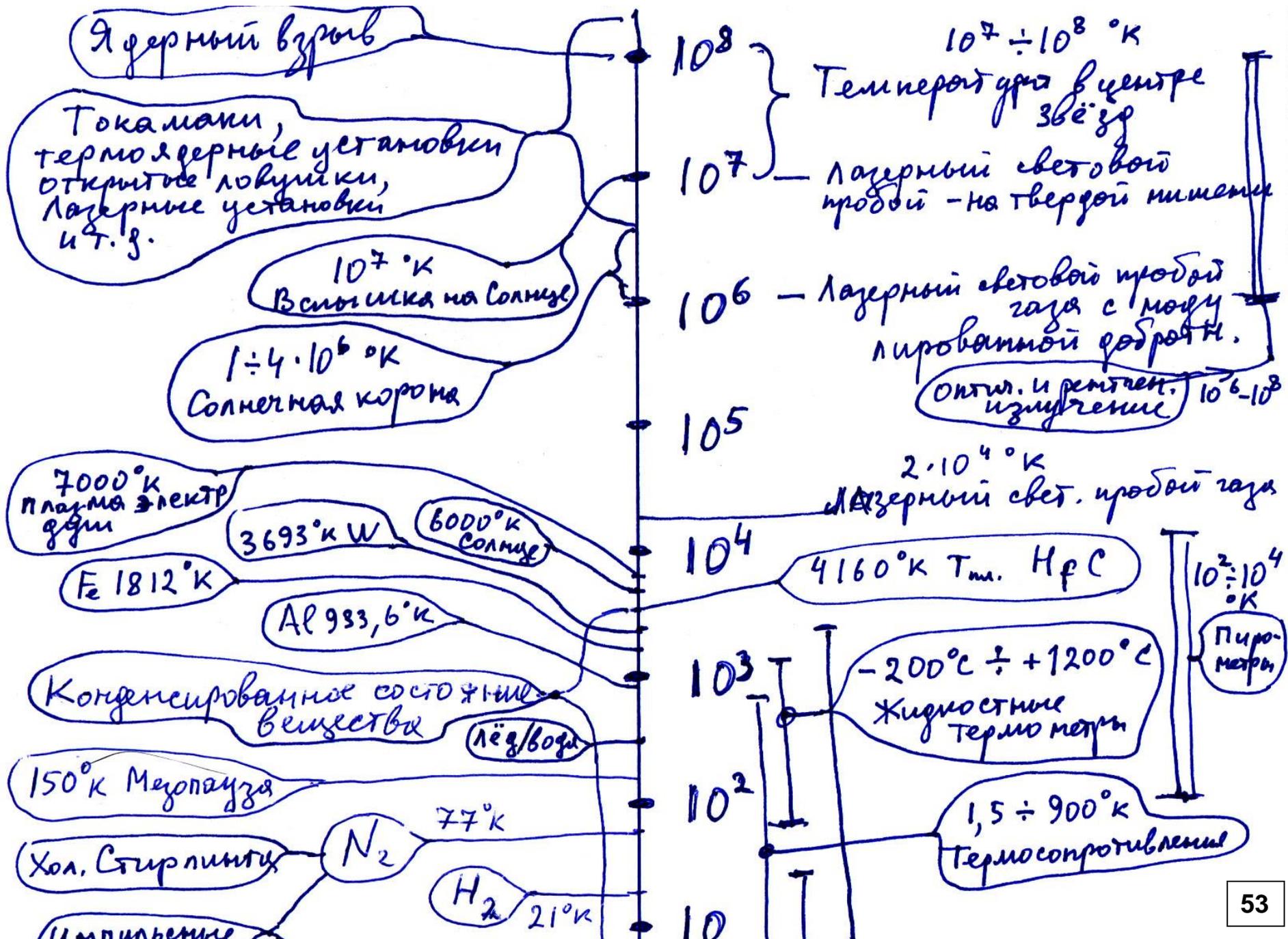
Движение оси Земли. Прецессия. Нутация

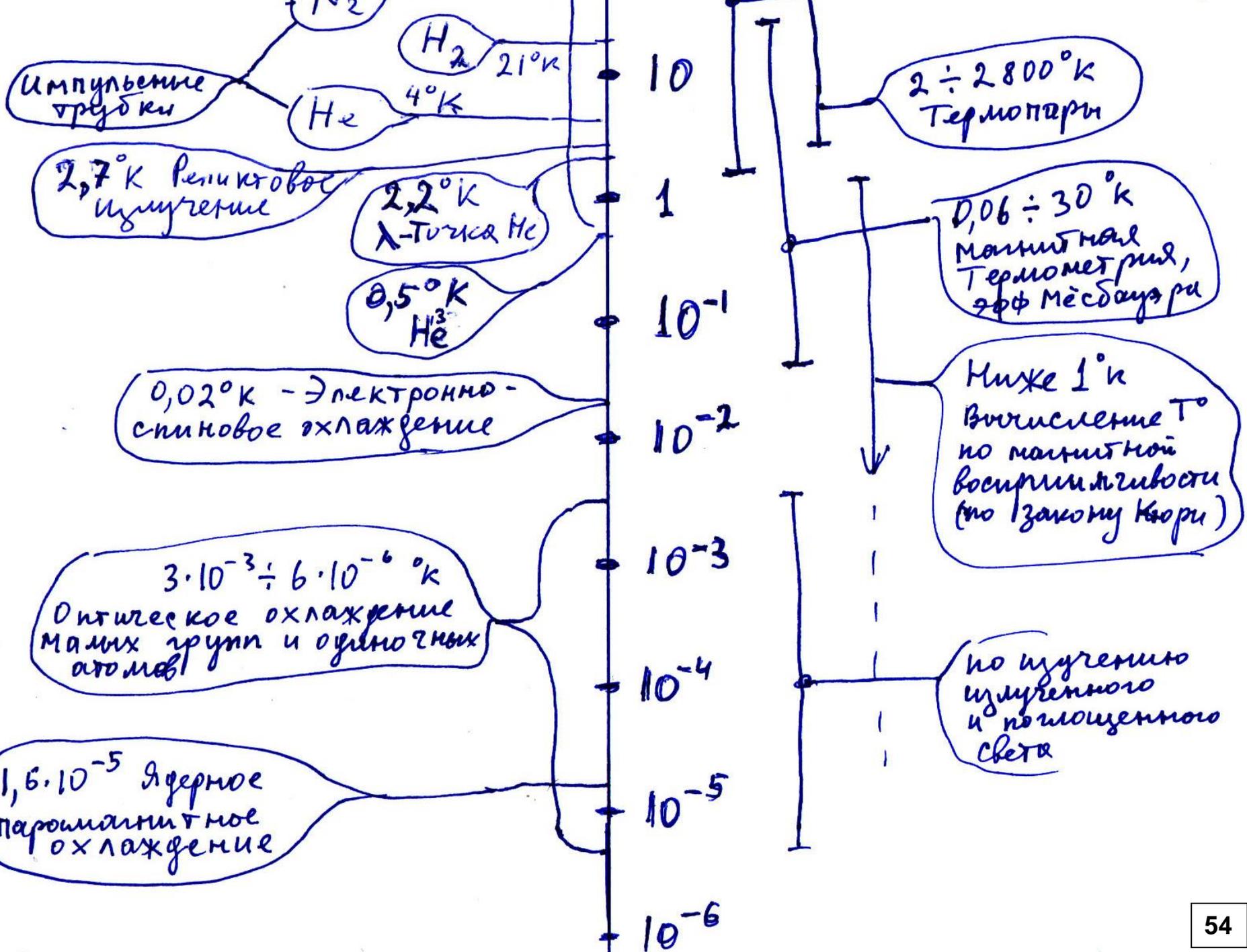


- Прецессия возникает из-за сплюснутости Земли и влияния притяжения Луны и Солнца
- Период прецессии 25 776 лет
- Главный член нутации с периодом 18,6 лет имеет амплитуду $\approx 9''$. Имеются заметные нутации с периодом полгода амплитудой $\approx 0'',5$ и полмесяца с амплитудой $\approx 0'',09$.

Шкала температур

- Температуры различных объектов во Вселенной
- Температуры, получаемые в экспериментальных установках
- Методы измерения температур





Спасибо за внимание!

Вопросы есть?

