



Факультет физики

НИУ ВШЭ

Москва
2024

Адиабатическое размагничивание

Егор Вороненко
Иван Протасов



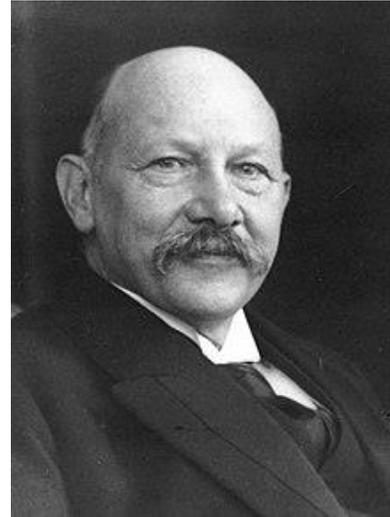
Магнетокалорический эффект (МКЭ) – это процесс охлаждения или нагревания вещества под действием приложенного магнитного поля.

Изучение МКЭ является важным как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Одним из ключевых способов исследования МКЭ является метод адиабатического размагничивания.

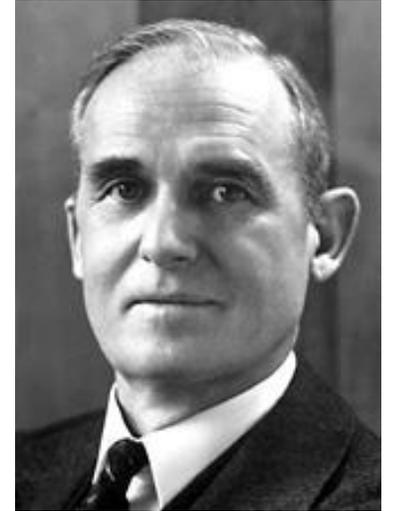
Цель данного доклада — дать подробный обзор метода, его физических принципов, применяемых материалов и современных направлений исследований. Отдельно рассматриваются циклический и непрерывный методы.



1922 год - Х. Камерлинг-Оннес достиг 0,83 К, накачивая жидкую ванну He^4 с помощью огромной батареи насосов.
1926 год – П. Дебай и У. Джиок открыли метод использования парамагнитных солей.
1933 год - У. Джиок и группа ученых из Беркли достигли 0,53 К, чуть позже группа ученых из Лейдена достигла 0,27 К. Адиабатическое размагничивание парамагнитных солей стало первым методом охлаждения, позволившим достичь температур значительно ниже 1 К.



Х. Камерлинг-Оннес



У. Джиок



П. Дебай

Полная энтропия спиновой системы определяется выражением:

$$S = R \ln(2J + 1)$$

Для идеального парамагнетика энтропия является функцией B/T :

$$S(B_i/T_i) = S(B_f/T_f)$$

Для адиабатического процесса:

$$T_f/B_f = T_i/B_i$$

Теплота намагничивания, выделяющаяся при увеличении приложенного поля с нуля до B_i и которая должна поглощаться ванной предварительного охлаждения при постоянной температуре T_i , определяется по формуле

$$Q(T_i) = nT_i[S(0, T_i) - S(B_i, T_i)]$$

Охлаждающая способность соли после размагничивания до B_f , или тепло, которое она может поглощать при нагревании, равно

$$Q(B_f) = n \int_{T_f}^{\infty} T(\partial S / \partial T)_{B_f} dT$$

Выделим два способа измерения величины МКЭ.

Первый способ - измерение зависимостей намагниченности от температуры $M(T)$ в постоянном поле. Дифференцируя эти зависимости и используя соотношение Максвелла -

$$M = \frac{\chi B}{\mu_0}$$

$$Q(T_i) = nT_i \int_0^{B_i} (\partial S / \partial B)_{T_i} dB = nT_i \int_0^{B_i} (\partial M / \partial T)_B dB$$

- можно получить зависимости производной $(\partial S / \partial B)_T$ от поля при различных фиксированных температурах. Изменение энтропии при изотермическом размагничивании можно вычислить, численно интегрируя эти зависимости.

Второй способ - измерение зависимости теплоемкости от температуры в разных полях. Значение абсолютной величины энтропии для разных значений полей можно получить при помощи интегрирования:

$$S(B, T_1) - S(B, T_2) = \int_{T_2}^{T_1} (C_V/T) dT$$

Получив зависимости $S(T)$ в разных полях, можно опять вычислить изменения энтропии в процессе размагничивания при различных постоянных температурах. При температурах, представляющих интерес для наших экспериментов по АДР, магнитная часть энтропии всегда велика по сравнению со всеми другими вкладами (например, фононным), которыми мы будем пренебрегать.

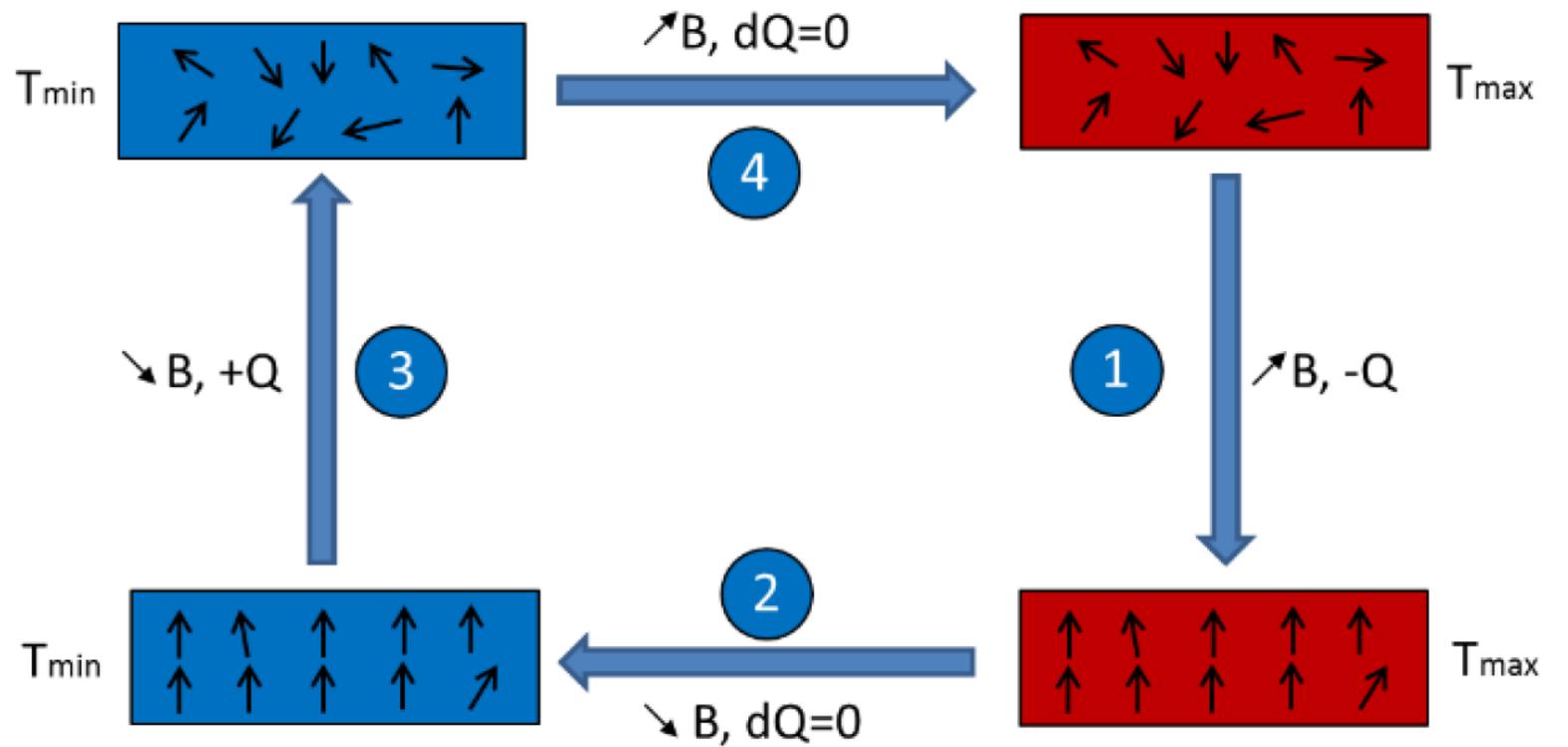
0. Приведение размагничиваемого вещества и охлаждаемой детали в тепловое равновесие со стартовой температурой.

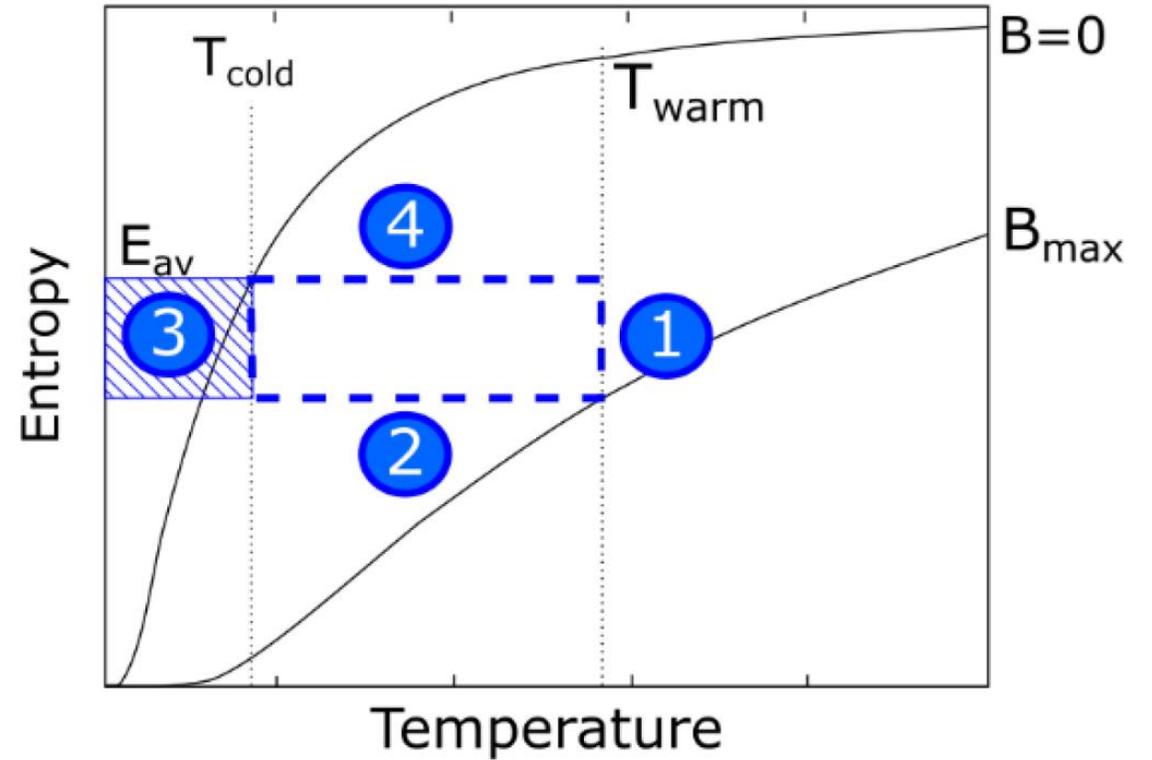
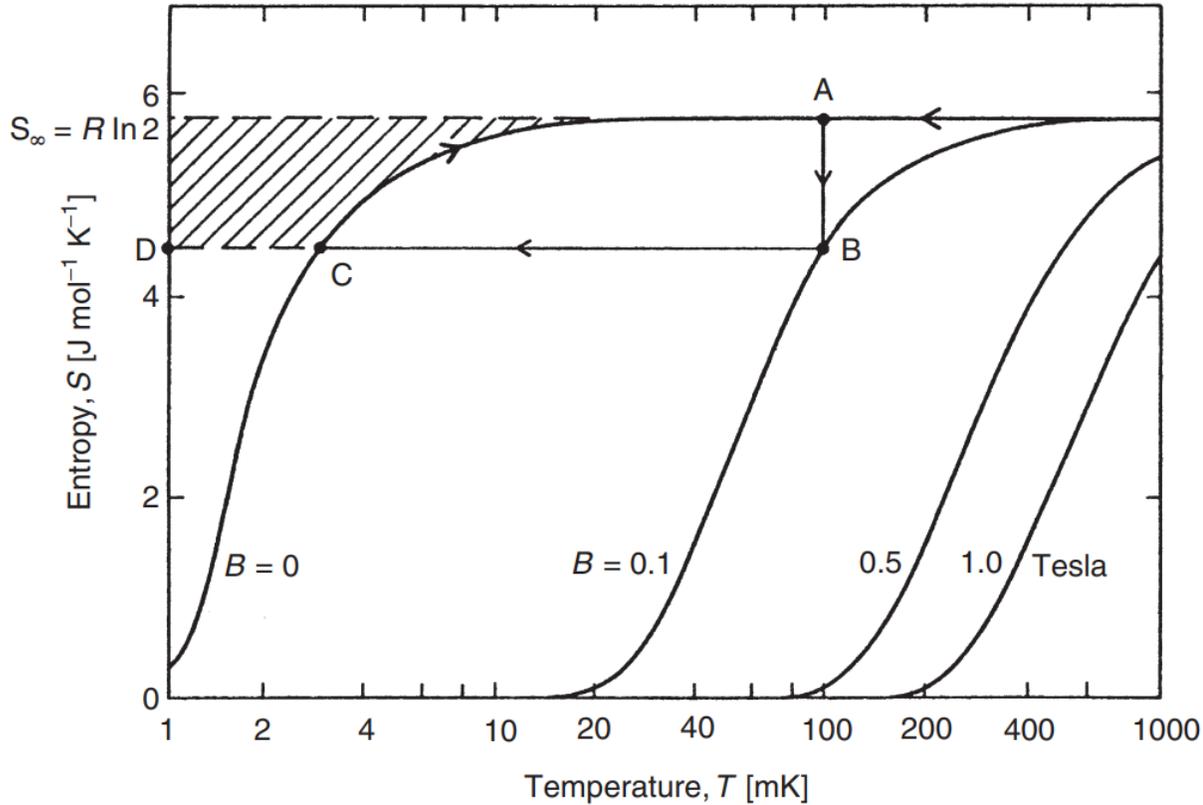
1. Намагничивание при постоянном контакте со стартовой температурой, уменьшение энтропии.

2. Адиабатическое отсоединение соли и образца от теплового контакта со стартовой температурой

3-4. Отключение магнитного поля. Увеличение энтропии магнитной системы приводит к охлаждению решётки кристалла соли и образца.

Magnetic moment illustration





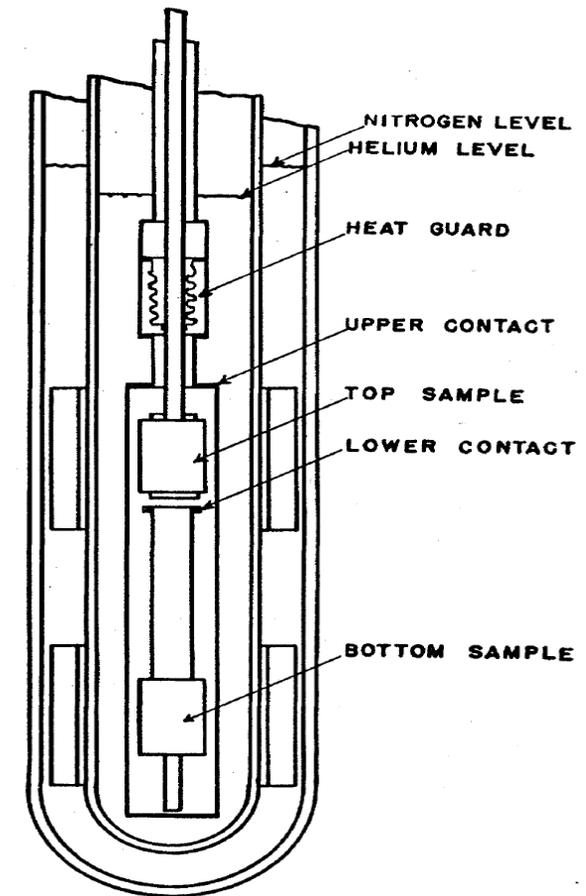
Цикл адиабатического
размагничивания в координатах T-S

Циклическое адиабатическое размагничивание

Цель: Охладить образец соли до 0,73 К при температуре теплоотвода 1,13 К.

Устройство: Два образца соли, один из которых используется как хладагент, расположены на расстоянии 12 см друг от друга в вакуумированном корпусе. Хладагент может контактировать либо с вакуумным корпусом (погружённым в жидкий гелий), либо с охлаждаемым образцом.

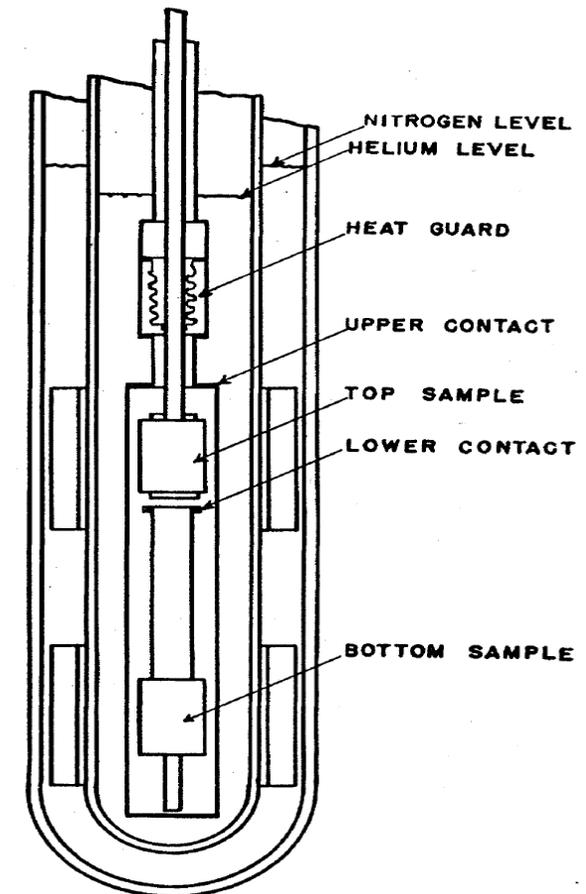
Используется сульфат железа – аммония, который запечатан в латунную капсулу с небольшим количеством гелия для улучшения теплопередачи.



Циклическое адиабатическое размагничивание

Принцип работы:

- К верхнему образцу, которые находится в контакте с теплоотводом прикладывается постоянное магнитное поле 1850 Гаусс на две минуты.
- Убираем магнит и контакт с теплоотводом – образец адиабатически размагничивается и остывает
- Приводим в контакт охлажденный образец к нижнему телу, за 5 минут температуры между ними выравниваются, начинается новый цикл.
- Спустя несколько циклов температура нижнего образца устанавливается на некотором значении, которое определяется величиной притока тепла в систему и силой магнита.





Важное замечание:

Тепло, генерируемое в системе за счёт механических вибраций, оказывается гораздо более значительным, чем теплопроводность составляющих элементов. Вибрации также гораздо труднее поддаётся контролю.

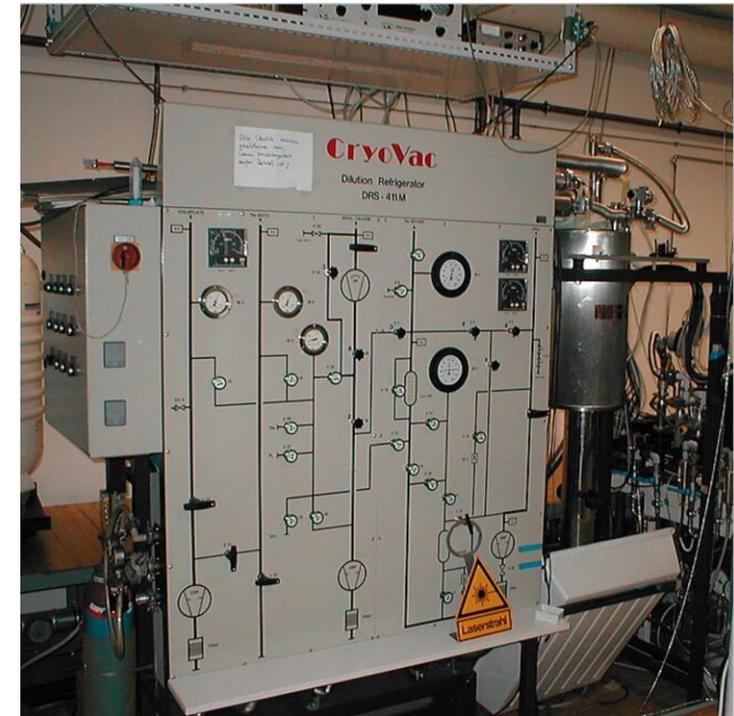
Альтернатива: криостат растворения

Криостат растворения (dilution refrigerator) лучше ADR (Adiabatic Demagnetization Refrigerator) в некоторых случаях по следующим причинам:

1. Более низкие температуры: Криостаты растворения могут достигать более низких температур, ADR. Они могут охлаждать системы до 10-20 мК, а в некоторых случаях и до 1 мК или ниже.

2. Долгосрочная работа: Криостат растворения может работать на продолжительное время, обеспечивая стабильное охлаждение. Он использует процесс смешивания двух изотопов гелия (гелий-3 и гелий-4) для охлаждения, что позволяет поддерживать низкие температуры в течение многих часов или дней.

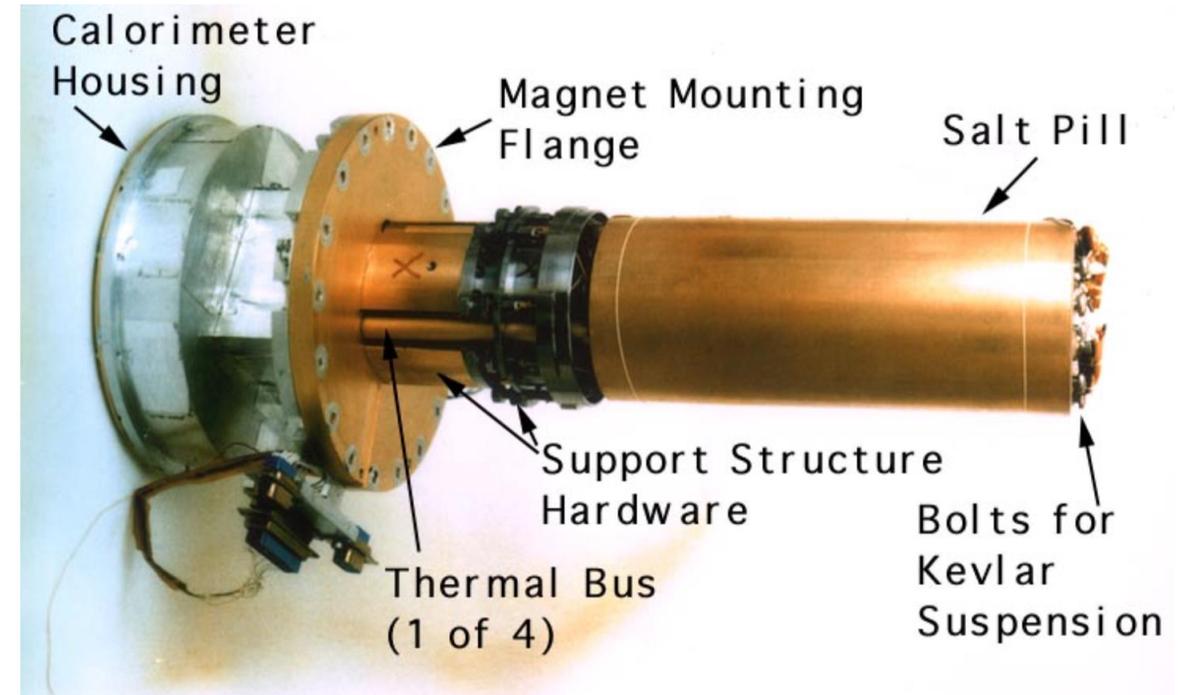
Главный минус: требуется гравитация для смешивания изотопов, более сложный в обслуживании.



Применение

NASA:

- ADR, разработанный в NASA, работает между температурой жидкого гелия и температурами порядка мК. ADR был разработан для рентгеновского спектрометра (XRS), чтобы охлаждать детекторы излучения. Для космоса был выбран ADR вместо криостата растворения, потому что он не требует гравитации.



1. Frank Pobell. Matter and Methods at Low Temperatures. – 2007.
2. Мендельсон К. Физика низких температур. — М.: ИЛ, 1963. — 277 с.
3. В. И. Суханова. ВКР «Магнетокалорический эффект в дипольном магнетике $LiGdF_4$ ». – М., 2023.
4. S. C. Collins, F. J. Zimmerman. Cyclic Adiabatic Demagnetization - Cryogenic Engineering Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. – 1953.
5. Jean-Marc Duval. Adiabatic Demagnetization Refrigerators. – EASISchool 2 on Cryogenics. – 2019.



Спасибо за внимание!