

Получение и применение низких температур и сильных магнитных полей в физике

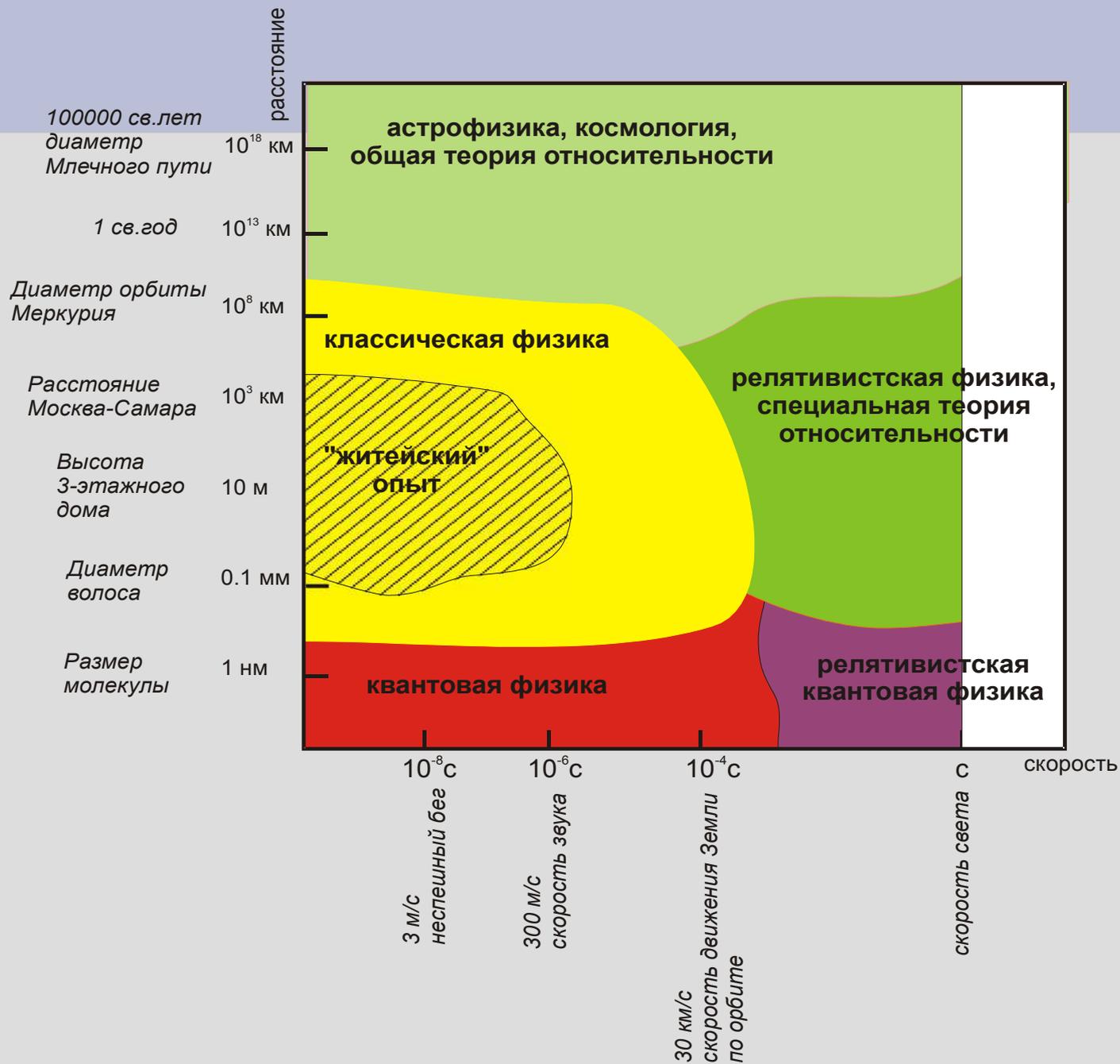
В.Н.Глазков

НИУ ВШЭ,
ИФП им. П.Л.Капицы РАН

План

- Что такое температура?
- Что такое магнитное поле?
- Что значит «*низкие температуры*» и «*сильные поля*» для физиков?
- Как их получают?
- И зачем это делают?

О применимости здравого смысла



Температура

медицинский ртутный
термометр



Цвет	Наименование	t° C
	Ослепительно белый	1250 - 1300
Yellow	Светло-желтый	1150 - 1250
Orange-yellow	Темно-желтый	1050 - 1150
Orange	Оранжевый	900 - 1050
Red-orange	Светло-красный	830 - 900
Red	Светло-вишнево-красный	800 - 830
Dark red	Вишнево-красный	770 - 800
Dark red	Темно-вишнево-красный	730 - 800
Dark red	Темно-красный	650 - 730
Dark red	Коричнево-красный	580 - 650
Dark red	Темно-коричневый	530 - 580

термометрия «в кузне»: по цвету
раскаленного металла



ADVANCING SCIENCE

Home > Products > Cryogenic Temperature Sensors

Cryogenic Temperature Sensors

	Temperature range
Diodes	
Silicon	1.4 K to 500 K
GaAlAs	1.4 K to 500 K
Negative Temperature Coefficient RTDs	
Cernox™	0.10 K to 420 K
Germanium	0.05 K to 100 K
Ruthenium Oxide (Rox™)	0.01 K to 40 K

термометры для физического
эксперимента

Темп

медицинский ртутный
термометр



Но что же такое
температура?



Цвет	Наименование	t, °C
	Ослепительно белый	
Yellow	Светло-желтый	
Orange	Темно-желтый	
Orange	Оранжевый	
Red	Светло-красный	
Red	Светло-вишнево-красный	800 - 830
Red	Вишнево-красный	770 - 800
Red	Темно-вишнево-красный	730 - 800
Red	Темно-красный	650 - 730
Brown	Коричневый	580 - 650
Dark Brown	Темно-коричневый	530 - 580

термометрия «в кузнице»: по цвету
раскаленного металла

temperature range

1.4 K to 500 K

1.4 K to 500 K

Negative Temperature Coefficient RTDs

Cernox™

0.10 K to 420 K

Germanium

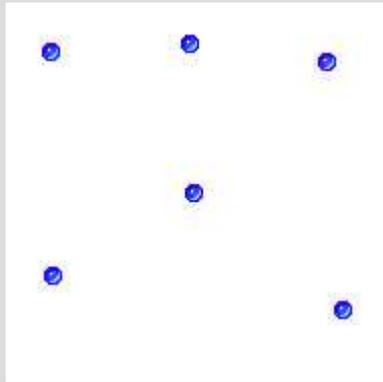
0.05 K to 100 K

Ruthenium Oxide (Rox™)

0.01 K to 40 K

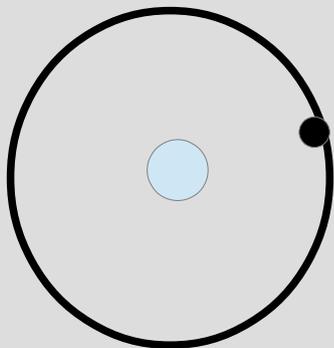
термометры для физического
эксперимента

Температура...



тепловое движение в
идеальном газе

$$\left\langle \frac{m V^2}{2} \right\rangle = \frac{3}{2} k_B T$$



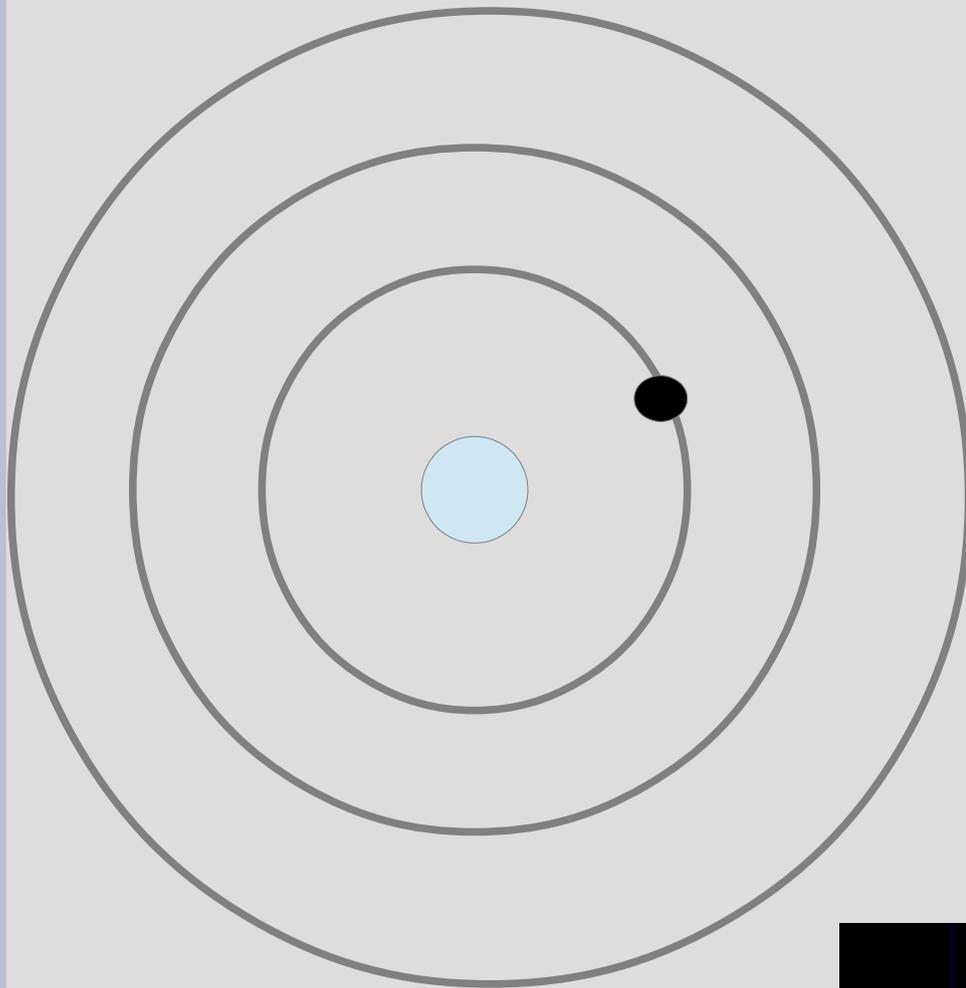
электрон в атоме
водорода: радиус
орбиты 0.5\AA

$$K = \frac{m V^2}{2} = \frac{R}{2} \left(m \frac{V^2}{R} \right) = \frac{R}{2} k \frac{e^2}{R^2} = \frac{1}{2} k \frac{e^2}{R} = 13.6 \text{ эВ}$$

$\sim 150000\text{K}$

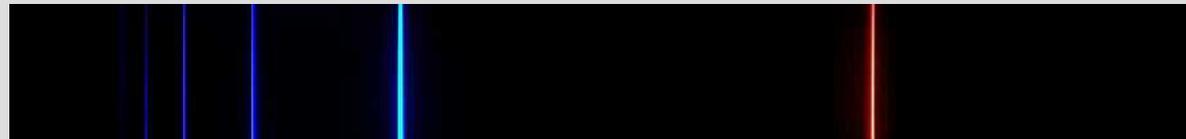


Температура для квантовых систем

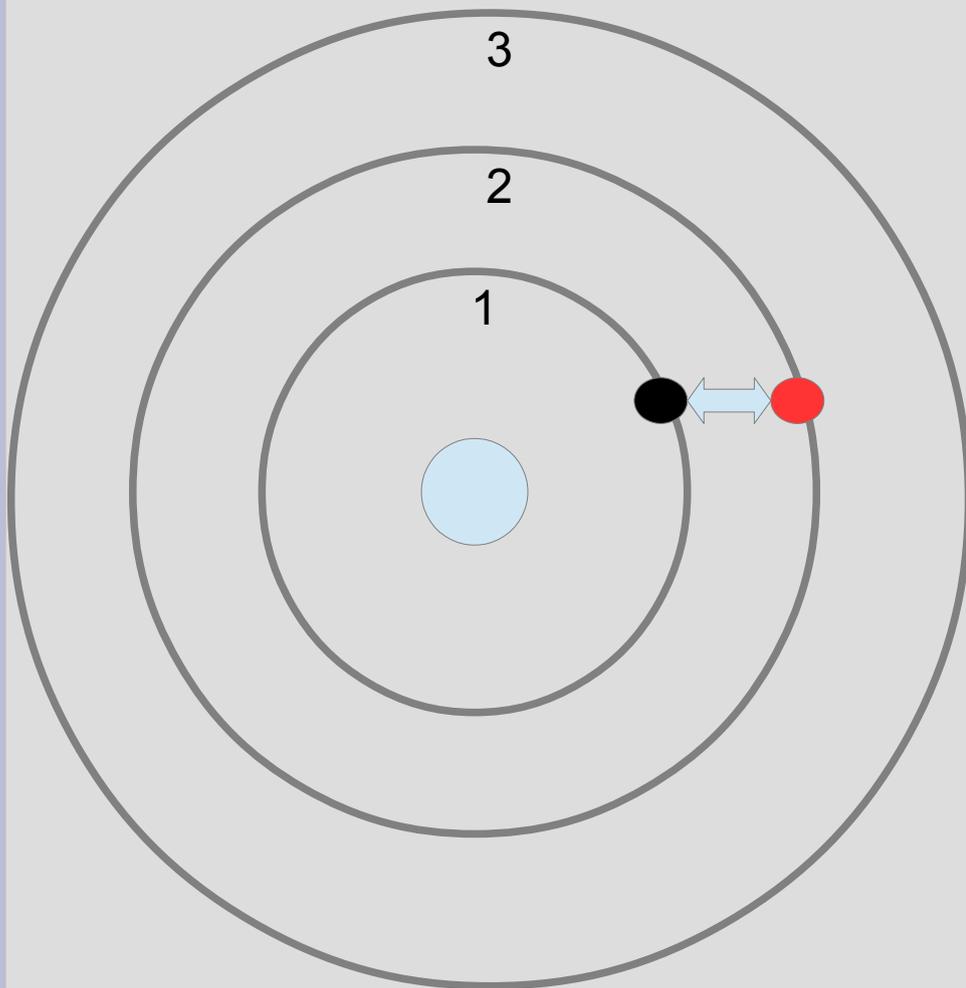


Движение электрона по орбите — квантовое движение, может продолжаться и при $T=0$!

Но есть разные уровни энергии (в атоме переходы между уровнями энергии дают линейчатые спектры)



Температура для квантовых систем



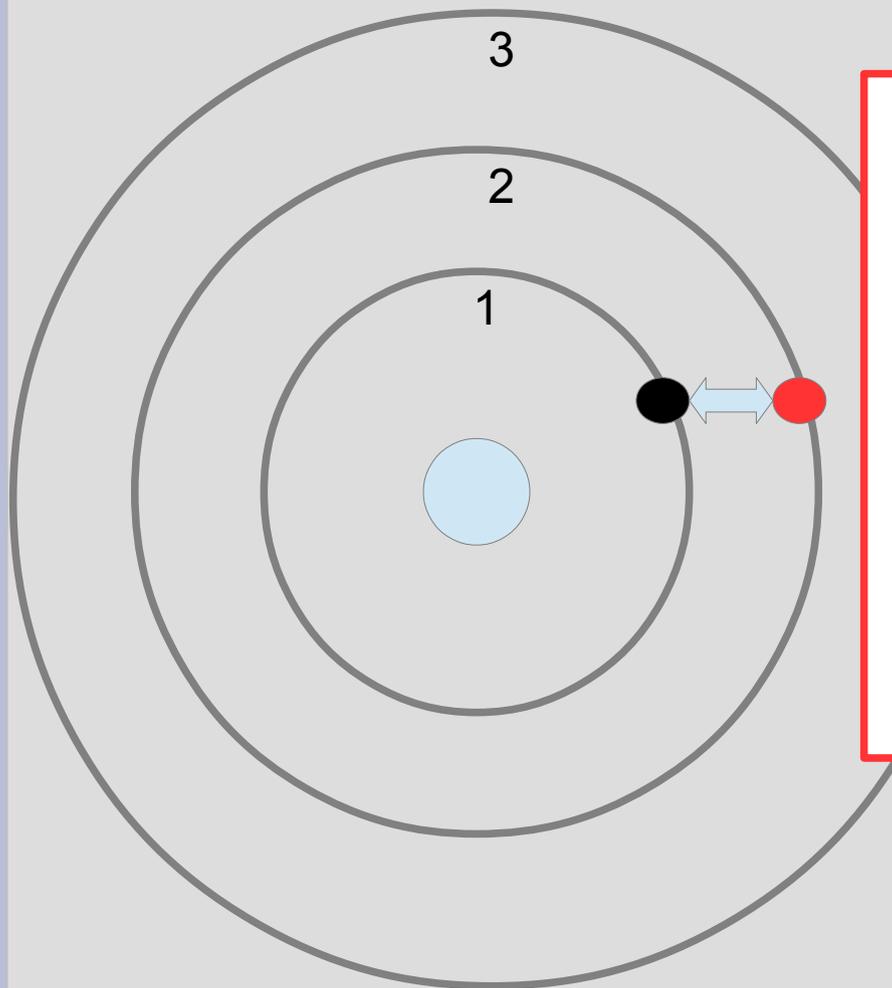
Движение электрона по орбите — квантовое движение, может продолжаться и при $T=0$!

Тепловое движение: случайные переходы между орбитами.

В тепловом равновесии вероятность обнаружить электрон на n -ой орбите с энергией E_n

$$w_n \propto \exp\left(-\frac{E_n}{k_B T}\right)$$
$$\frac{w_2}{w_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right)$$

Температура для квантовых систем



Движение электрона по орбите —

При понижении температуры уменьшается вероятность обнаружить квантовую систему на «высоких» энергетических уровнях:

начинают проявляться свойства основных квантовомеханических состояний, в том числе таких экзотических как сверхпроводимость или сверхтекучесть.

$$\frac{w_2}{w_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right)$$

Какие температуры самые низкие «в дикой природе»?

комнатная температура: $\sim 300\text{K}$



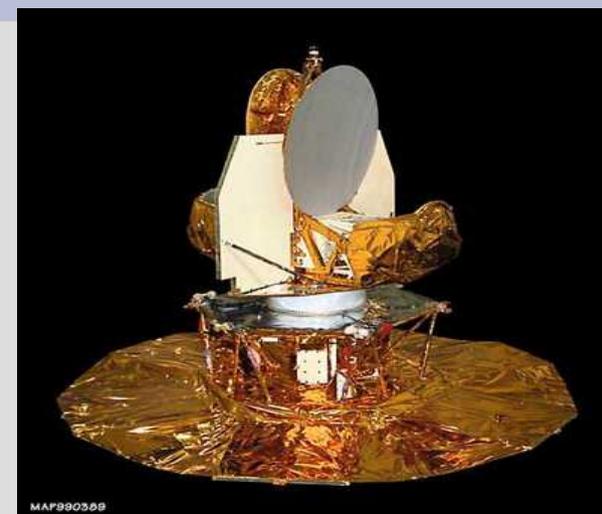
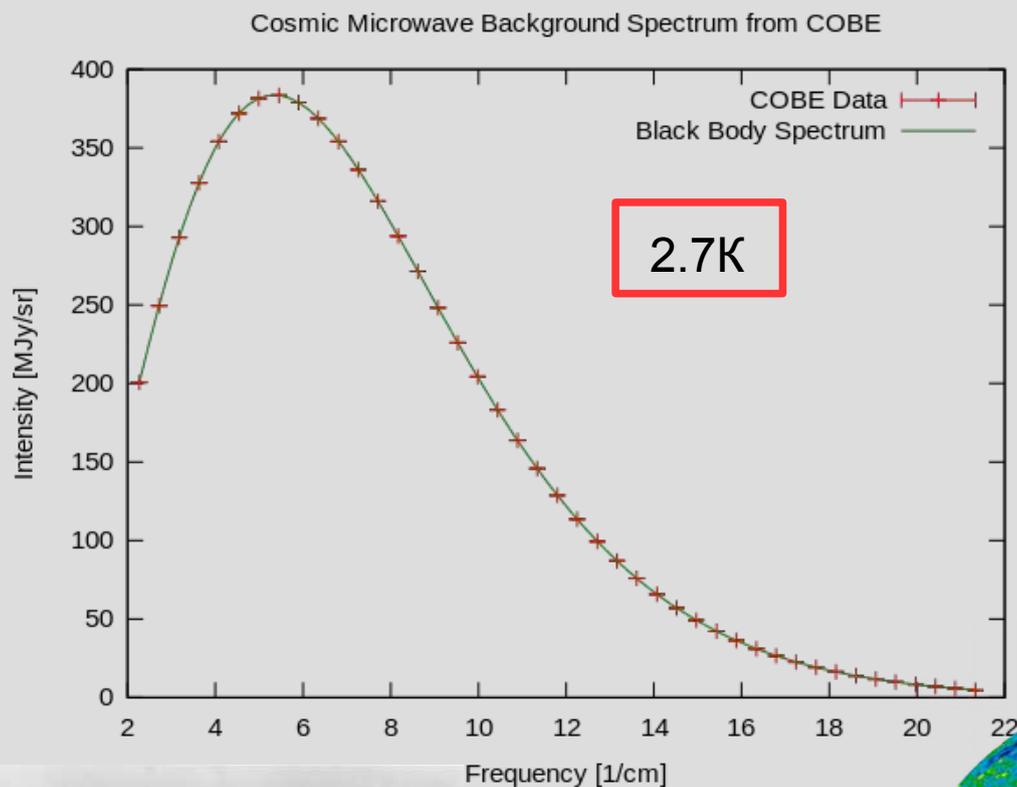
Оймякон, Якутия: 200K ($-70\text{ }^{\circ}\text{C}$)



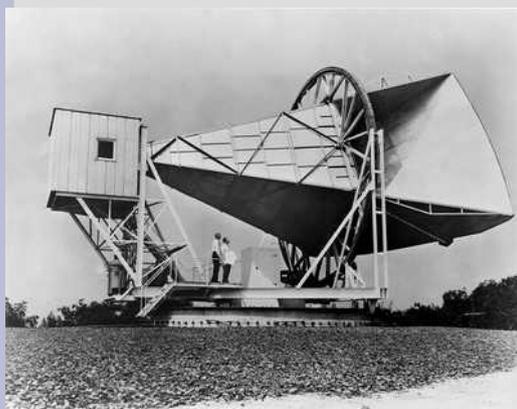
Плутон, 50K ($-220\text{ }^{\circ}\text{C}$)

NASA

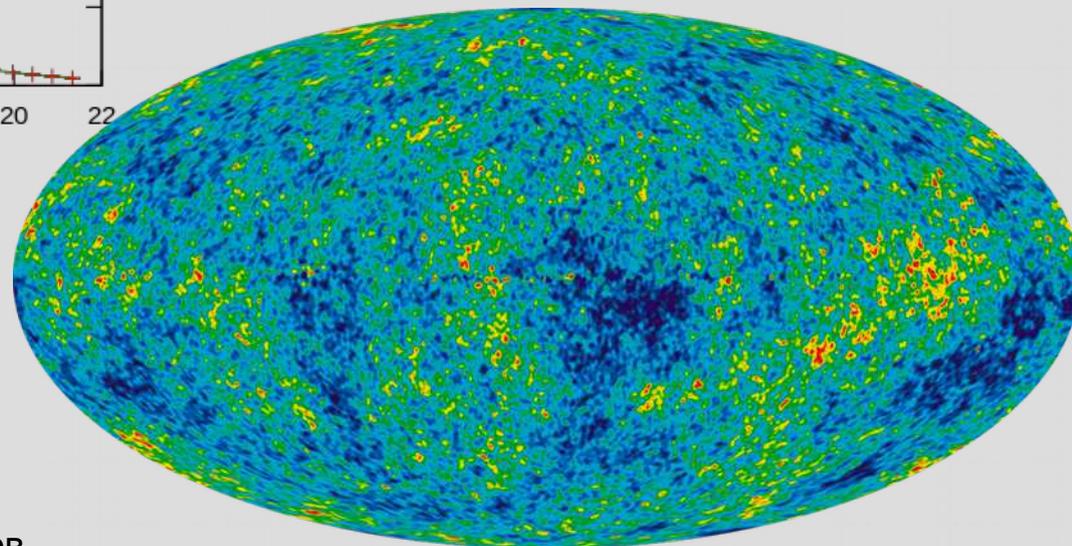
Реликтовое излучение: эхо Большого Взрыва, определяющее минимальную температуру в природе



9 лет спутникового эксперимента WMAP, неоднородность температуры ± 200 мкК



антенна первых наземных экспериментов



Низкие температуры в физических лабораториях

- Кипение азота при атм.давлении: 77К
- Кипение водорода при атм.давлении: 20К
- Кипение гелия-4 при атм.давлении: 4.2К
- Откачка паров гелия-4: до 1К
- Откачка паров гелия-3: до 0.3К
- Криостат растворения: 10 мК
- Размагничивание ядер: 1 мК (ИФП РАН — самое холодное место в России!)
-
- «Температуры» небольшого количества атомов в ловушках ~ 1 нК

В «дикой природе» такого не бывает!

Как это работает в лаборатории

Шаг 1: получить жидкий гелий
(4.2К)

Кстати, газообразный гелий на Земле это в основном продукт радиоактивного альфа-распада тяжёлых элементов в земной коре



гелиевый охладитель ОГ-200, «Гелиймаш»



сосуды Дьюара для хранения жидкого гелия

Как это работает в лаборатории



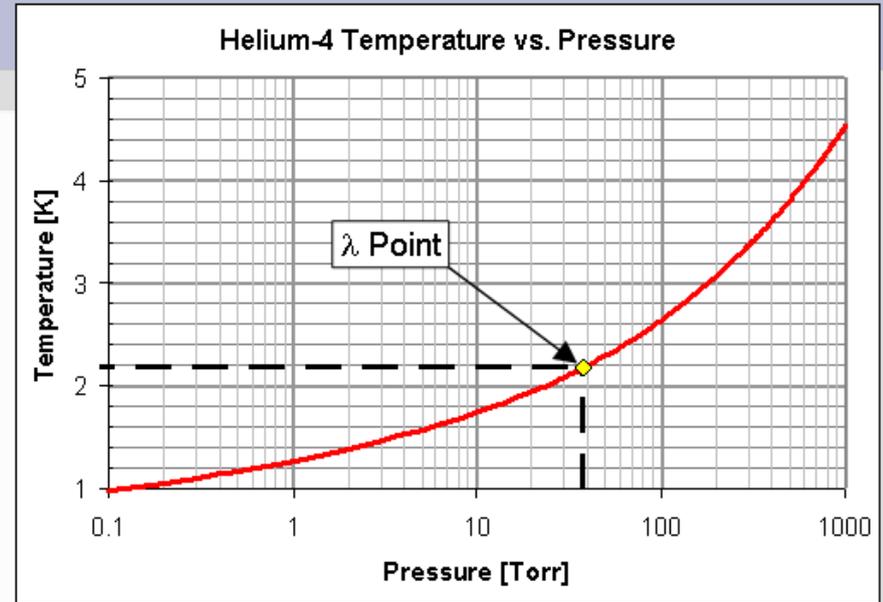
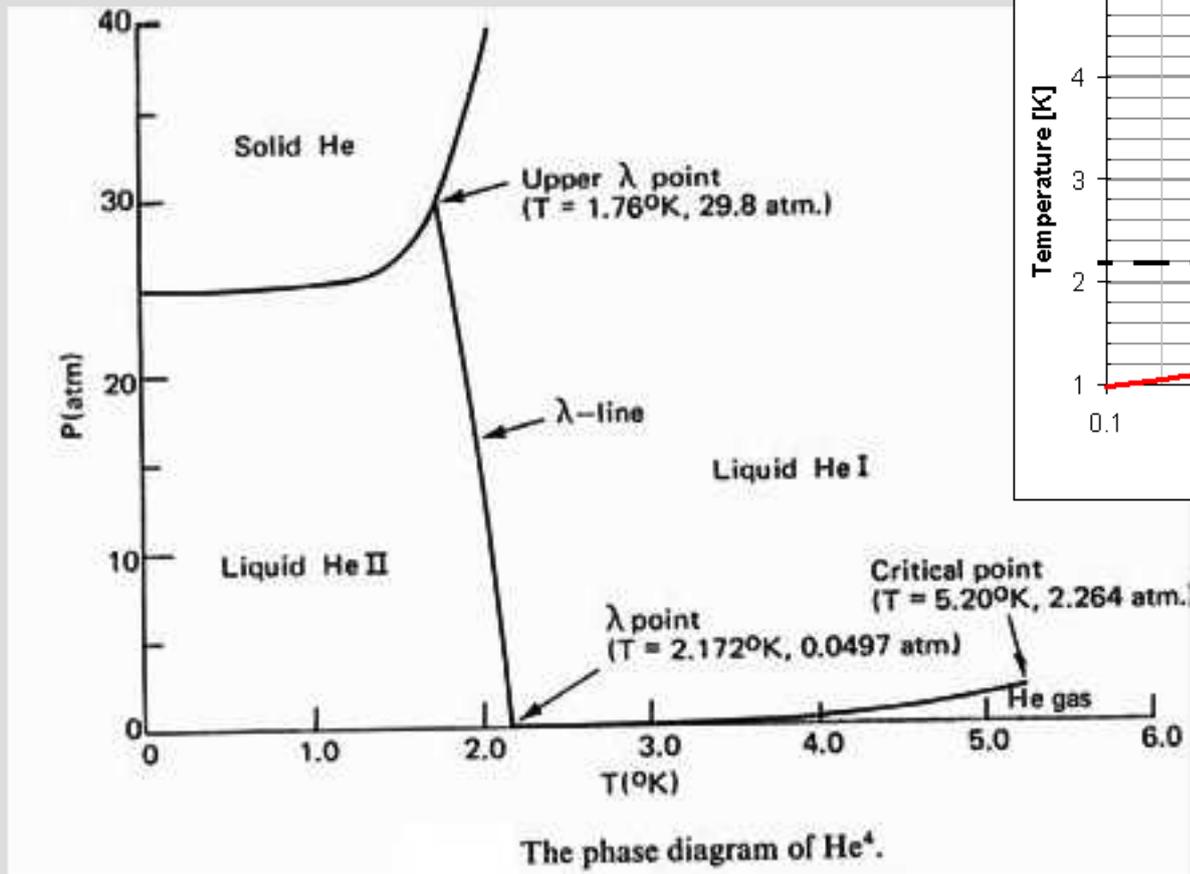
В лаборатории ИФП РАН,
подготовка ЭПР спектрометра к
эксперименту

Шаг 2: перелить гелий в
экспериментальную установку

4.2K достигнуто

и можно работать дальше...

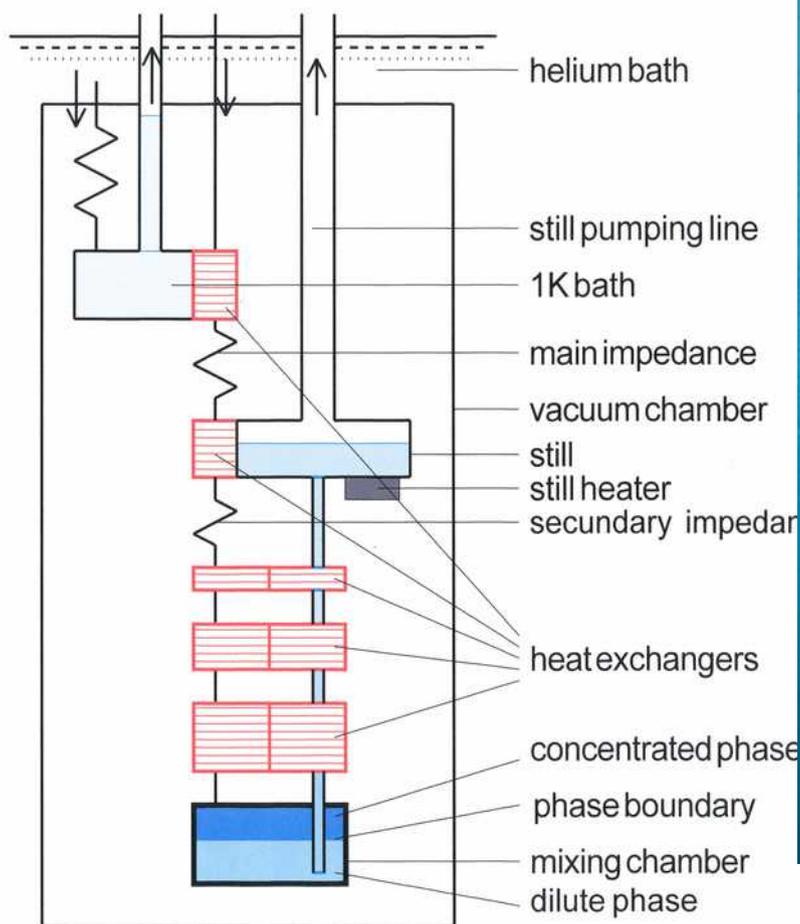
Температуры ниже 4.2К: Откачка паров гелия-4



фазовая диаграмма гелия-4

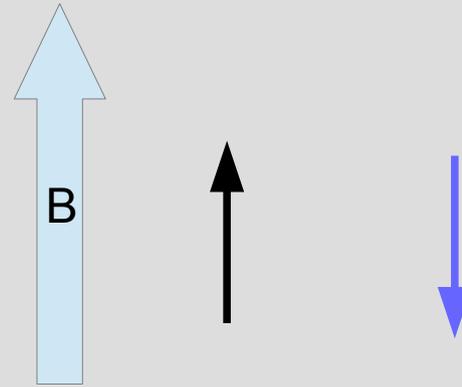
Получение сверхнизких температур 1: криостат растворения

эксп.факт: гелий-3, растворяясь в гелии-4, поглощает тепло...



Получение сверхнизких температур 2: размагничивание ядер

$$w_n \propto \exp\left(-\frac{E_n}{k_B T}\right)$$
$$\frac{w_2}{w_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right)$$



В магнитном поле магнитный момент ядра как стрелка компаса «смотрит по полю»: энергия состояния с магнитным моментом вдоль поля меньше, чем энергия состояния с магнитным моментом против поля. В нулевом поле ориентация магнитных моментов хаотична.

Если «выровнять» все магнитные моменты сильным полем, а потом адиабатически выключить поле, то восстановление хаотической равновесной ориентации моментов заберёт тепло у решётки кристалла — температура понизится! Температуры до 1 мК!

Магнитное поле.

«Игрушки»



Производство



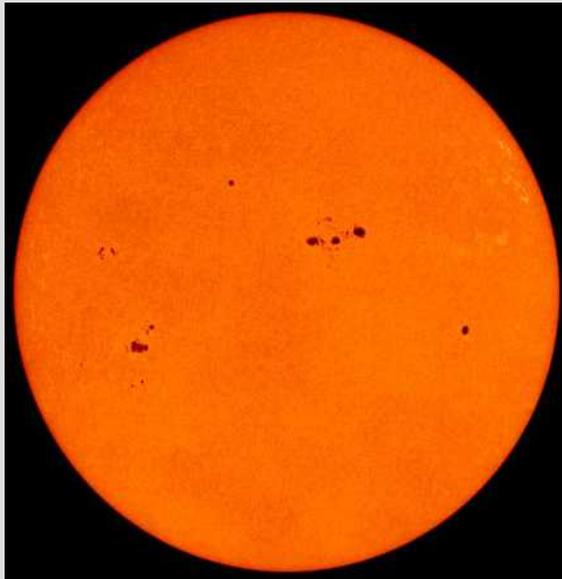
Наука



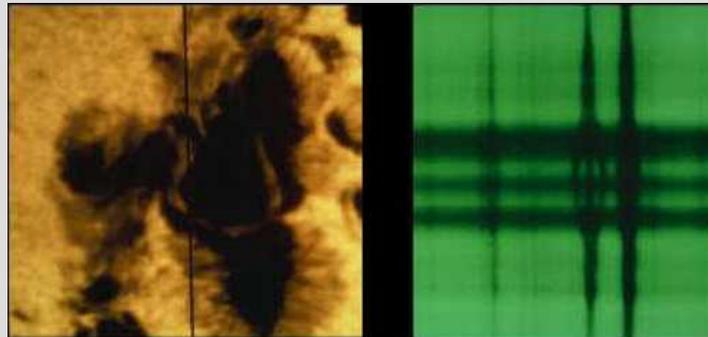
Какое магнитное поле «сильное»?



Поле Земли — 1 Гс или 0.0001 Тл



Солнечные пятна — области концентрации силовых линий магнитного поля, индукция поля в пятне 0.5Тл



Некоторые нейтронные звёзды: до 10^{10} Тл...

Лабораторные источники магнитного поля 1



Bruker.com

водоохлаждаемый электромагнит
до 1.5Тл,
12 кВт потребляемой мощности,
примерно 1.5 метра в размере...

при удвоении поля,
мощность увеличится в
4 раза...

$$B = \mu_0 n I$$
$$W = I^2 \times R$$

Лабораторные источники магнитного поля 2



сверхпроводящий соленоид
на 8 Тл, ИФП РАН

Сверхпроводимость!
Ток течёт без потерь, $R=0$, $W=0!!!$

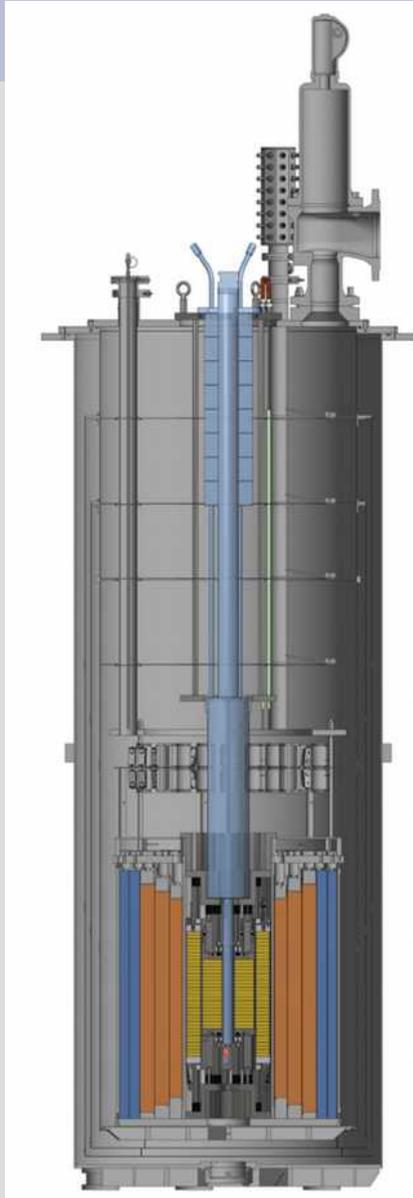
$$B = \mu_0 n I$$
~~$$W = I^2 \times R$$~~

Но....



нужны температуры ниже 10K
(жидкий гелий),
большой ток/большое
магнитное поле разрушают
сверхпроводимость...

Рекордный сверхпроводящий магнит



Сверхпроводящие магниты:
до 10 Тл — может сделать студент (из правильного провода)
до 14-16Тл — стандартные коммерческие соленоиды
до 22Тл — редкие экземпляры
рекорд 2016: 32 Тл в лаборатории высоких магнитных полей в Талахаси, Флорида, США

32 Тл, комбинированный сверхпроводящий магнит, 2.3 тонны (NHMFL, USA)

Лабораторные источники магнитного поля 3

Стационарные поля до ~40 Тл: резистивные магниты

$$B = \mu_0 n I$$
$$W = I^2 \times R$$

← очень много энергии в тепловые потери... А что делать...



35 Тл в области диаметром 30 мм, мощность 20 МВт

Лабораторные источники магнитного поля 4

Импульсные поля: большая мощность на малое время!

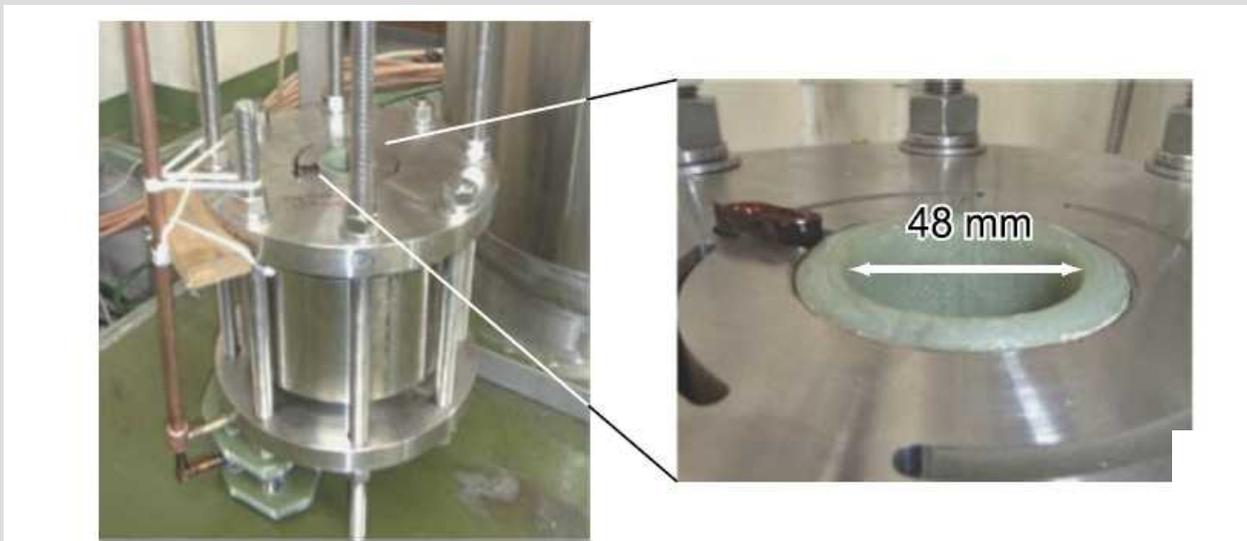


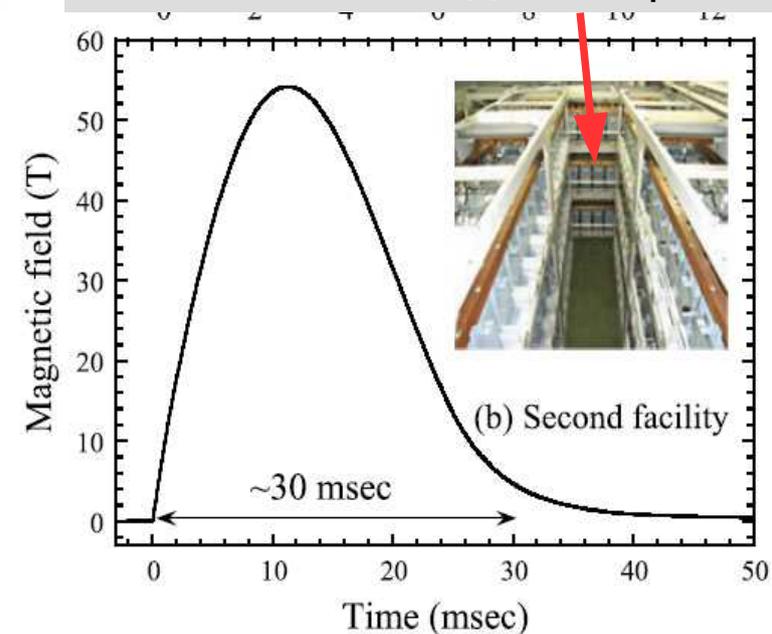
Fig. 6 Pictures of the wide-bore nondestructive pulse magnet designed by Prof. Kindo (Color online)

J Low Temp Phys (2013) 170:531–540

M. Hagiwara · T. Kida · K. Taniguchi · K. Kindo

поля до 100 Тл

2МДж в батарее конденсаторов

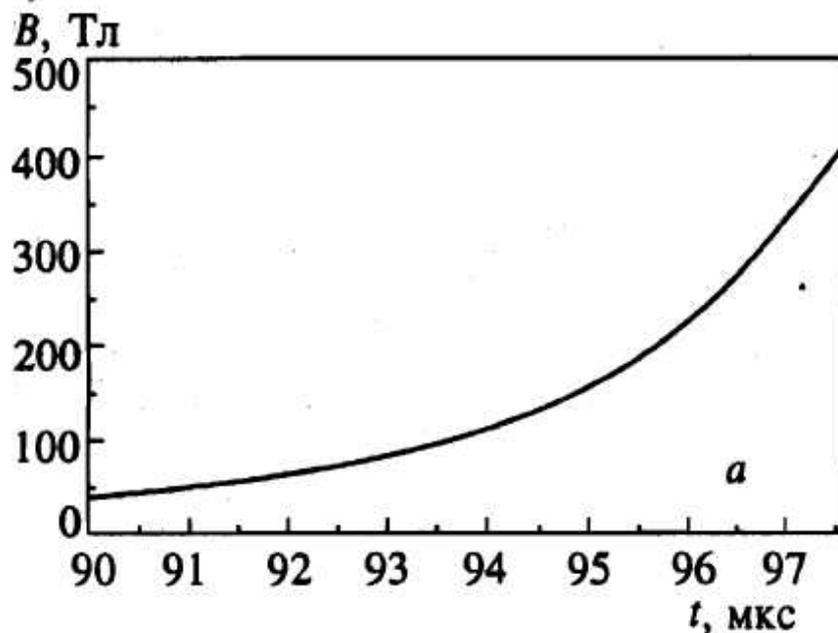


Сверхсильные магнитные поля до 1000 Тл: Саров, ВНИИЭФ

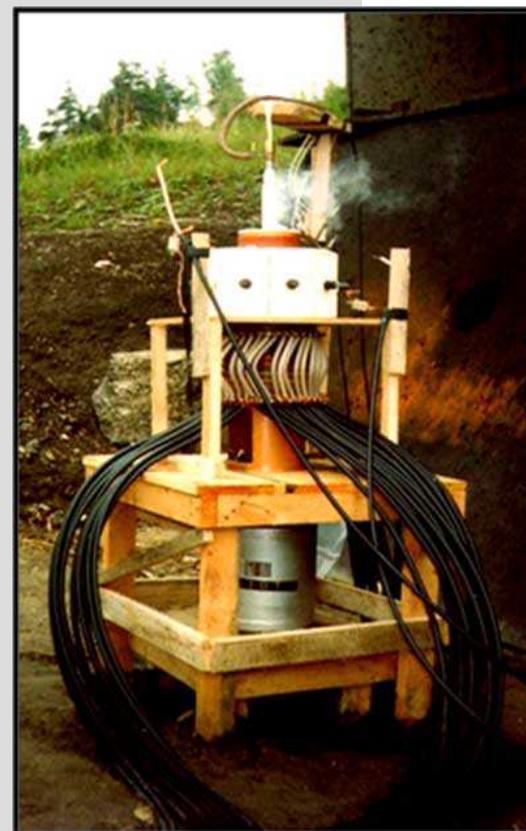
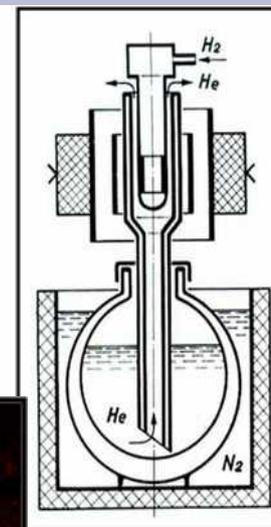
криостат, образец.... и 16 кг тротила

$$\Phi = B S = const$$

при взрывном сжатии проводящего контура поток сохраняется, индукция увеличивается



ЖЭТФ, 1999, 116, вып. 5(11)



Курьёзы высоких магнитных полей



nmr.science.oregonstate.edu



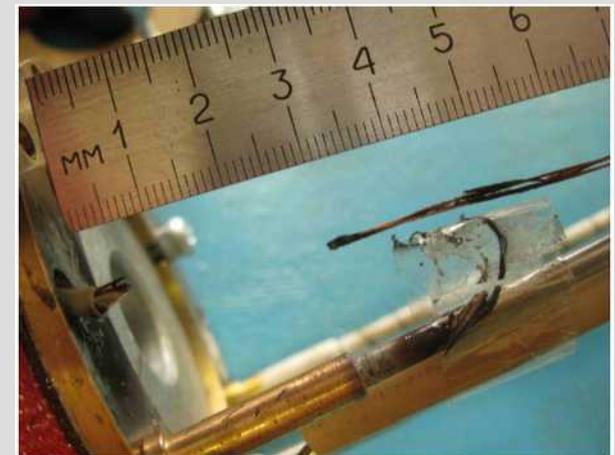
<http://www.ru.nl/hfml/research/levitation/diamagnetic/>

Quench!



https://www.youtube.com/watch?v=d-G3Kg-7n_M

(рис.автора)

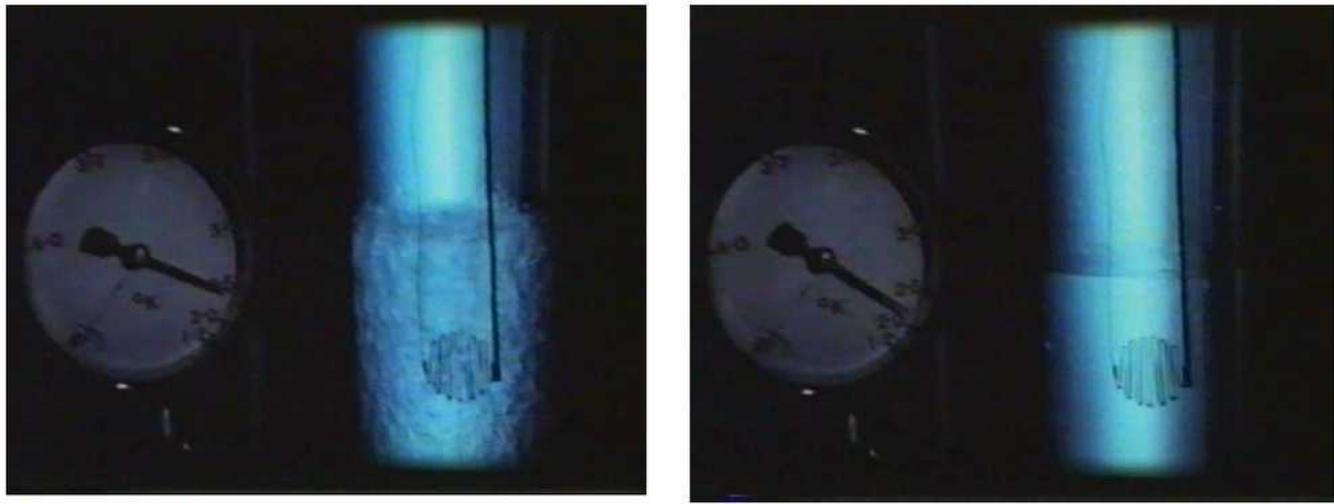


Зачем?

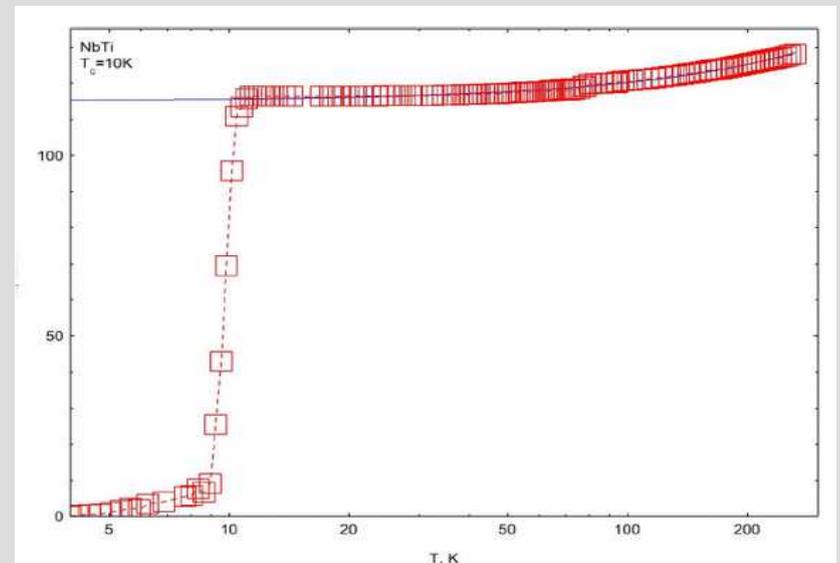
Во-первых, это интересно...

- 1) Создавая в лаборатории не существующие в природе условия можно получить новые состояния вещества
- 2) Отсутствие случайного теплового движения частиц при низких температурах делает картину физических явлений более «чистой», позволяет в них разобраться
- 3) Практические применения: ЯМР томография, детектирование слабых сигналов (в т.ч. в астрофизике)

Макроскопические квантовые явления: сверхтекучесть и сверхпроводимость

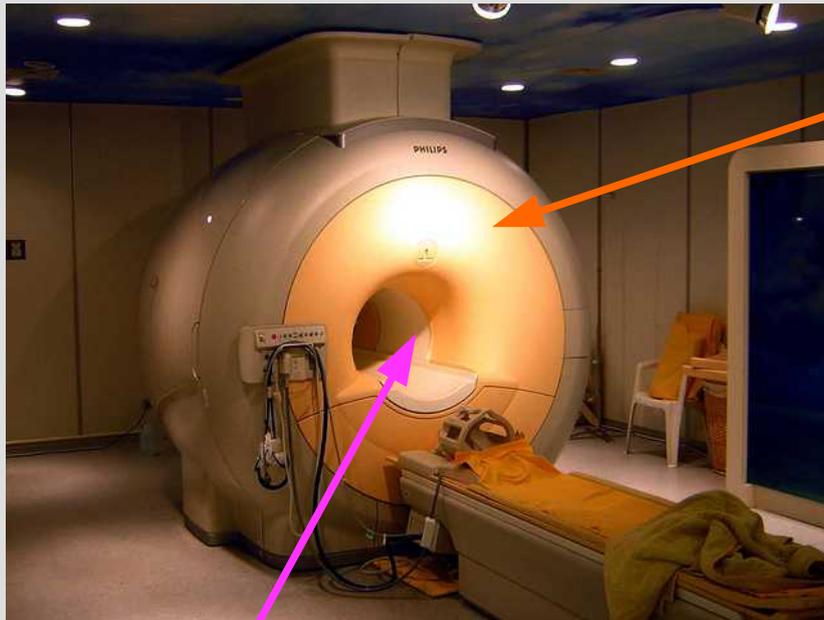


Sebastien Balibar, Looking Back at Superfluid Helium ,Seminaire Poincare,1 (2003)

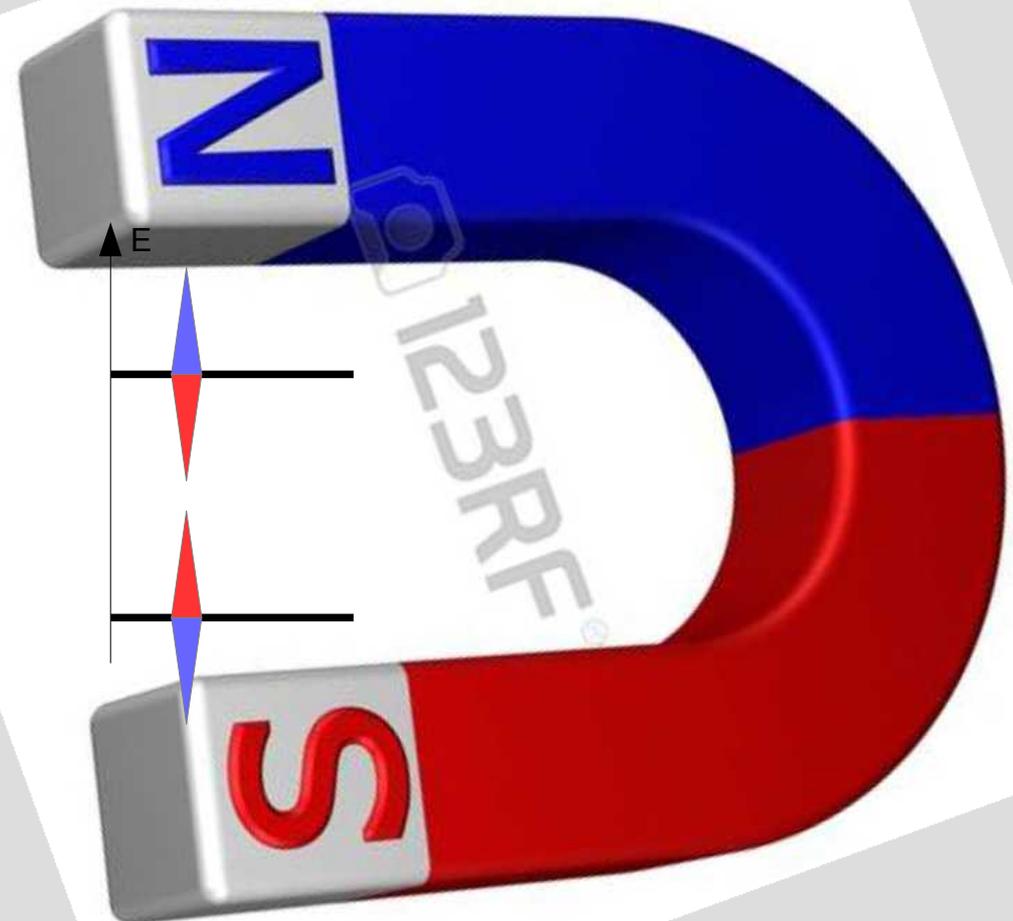


МРТ: низкие температуры и сильные поля в поликлинике

охлаждаемый жидким гелием (4.2К) сверхпроводящий магнит



Поле 3 Тл



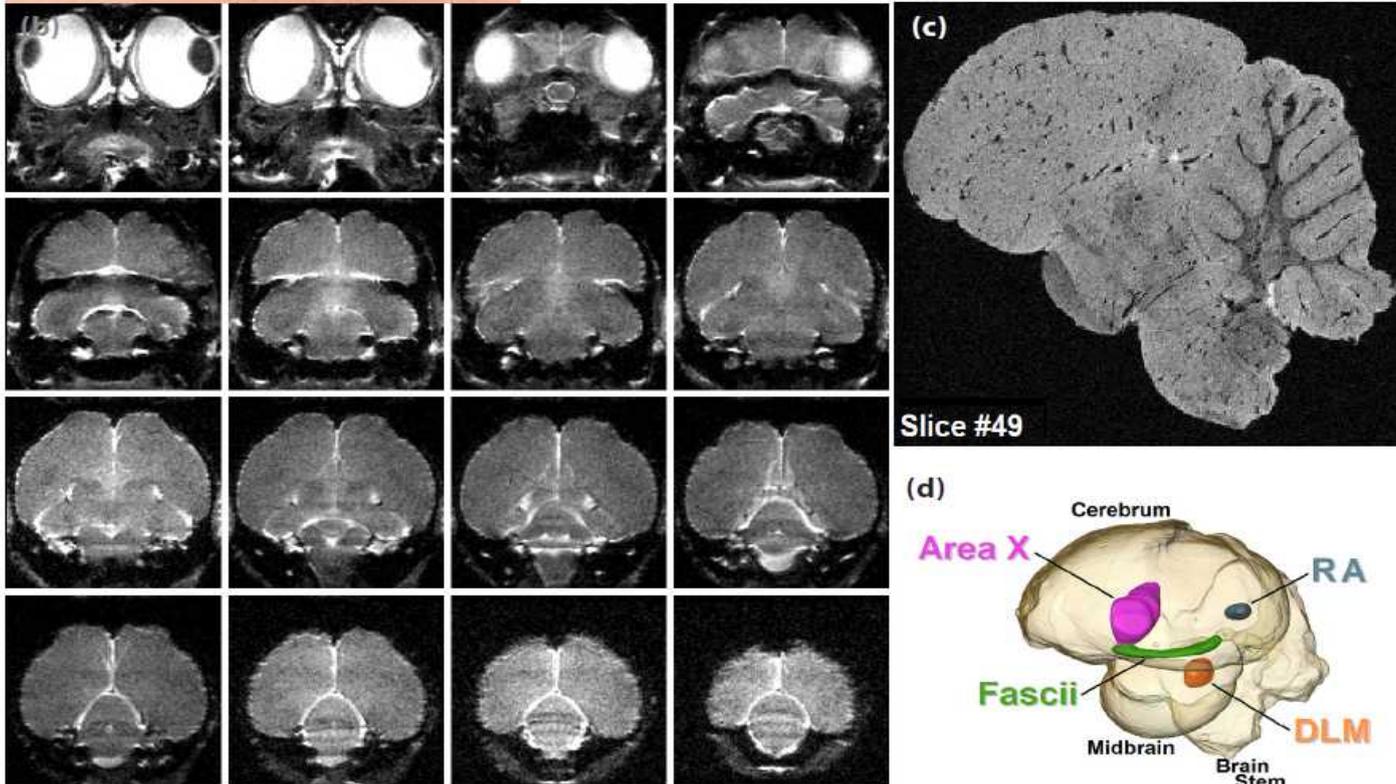
Расщепление уровней в магнитном поле немного зависит от химического окружения молекулы-зонда. Это позволяет картографировать расположение «нужных» молекул.

MRT в поле 21 Тл!



Figure 4.

(a) The adult male zebra finch bird; (b) An *in vivo* coronal image of the finch brain acquired using a 2D fat-suppressed fast spin-echo sequence at a resolution of $100 \times 100 \times 500 \mu\text{m}$ in 5.5 min; (c) A single 2D section taken from a 3D GRE dataset acquired at 21.1 T from a fixed finch brain at $40\text{-}\mu\text{m}$ isotropic resolution; (d) Segmentation of song nuclei (Area X, Fascii, robust nucleus of the arcopallium; RA and dorsal part of the medial thalamus; DLM) using 3D images so that these neuroanatomical areas can be compared quantitatively between treatment groups.



In vivo MR Imaging at 21.1 T

Victor D. Schepkin, Samuel C. Grant and Timothy A. Cross

That's all Folks!