

Методы получения низких температур

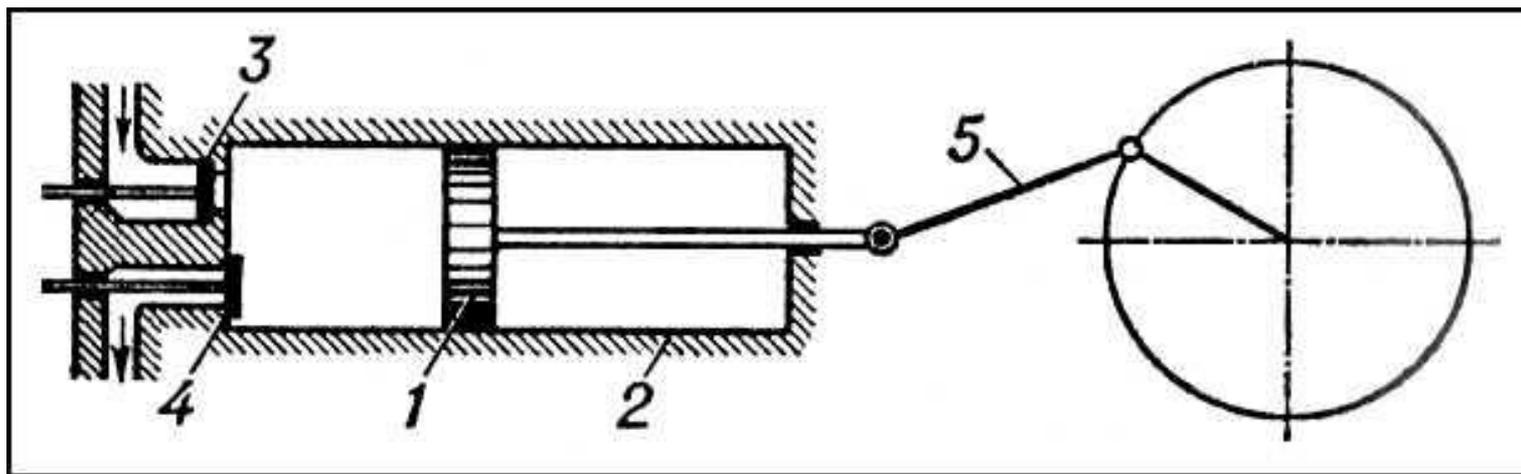
- Методы получения низких температур
- Адиабатическое расширение
- Эффект Джоуля - Томсона
- Третье начало термодинамики и его следствия.

Адиабатическое расширение

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1}$$

При увеличении объема газа происходит его **ОХЛАЖДЕНИЕ**

Поршневой детандер



1 — поршень; 2 — цилиндр; 3 — впускной клапан; 4 — выпускной клапан;
5 — кривошипно-шатунный механизм

Соотношения Максвелла

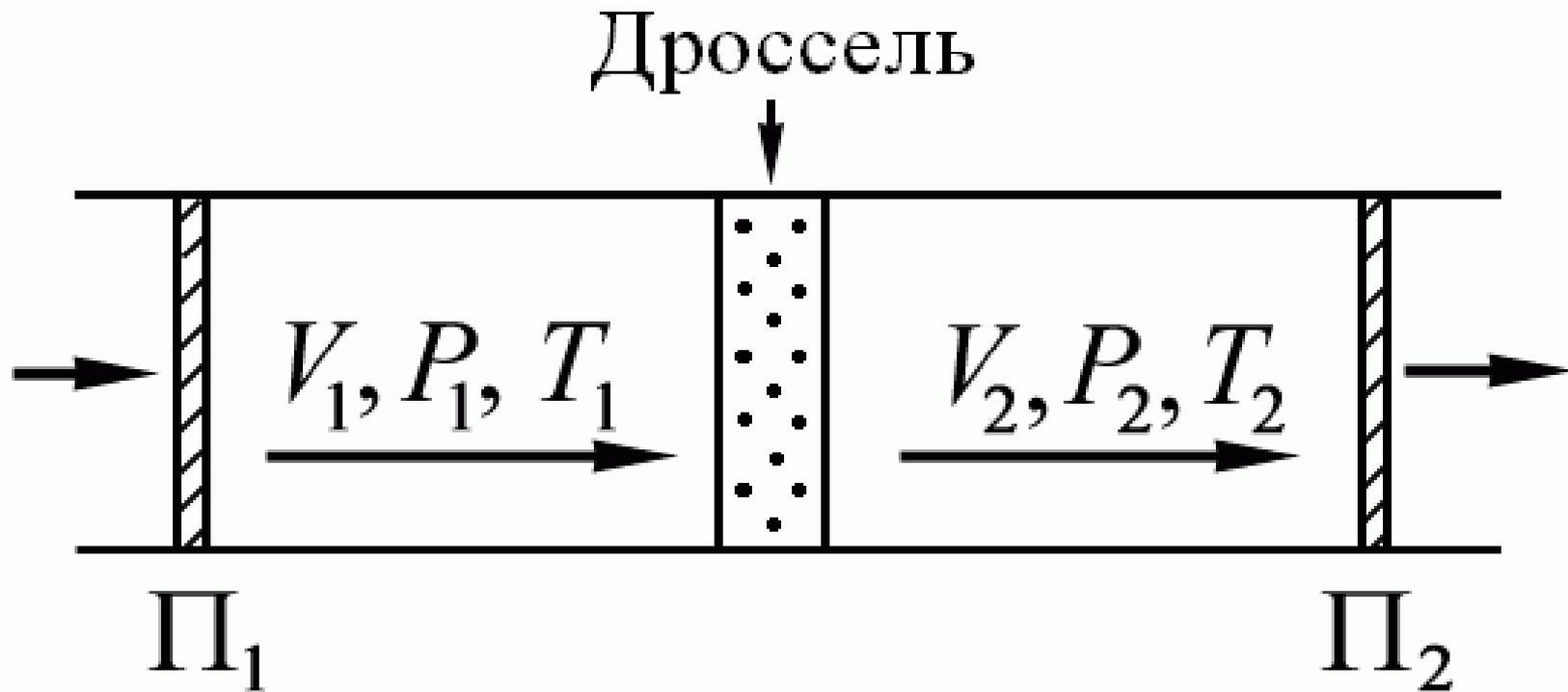
$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p$$

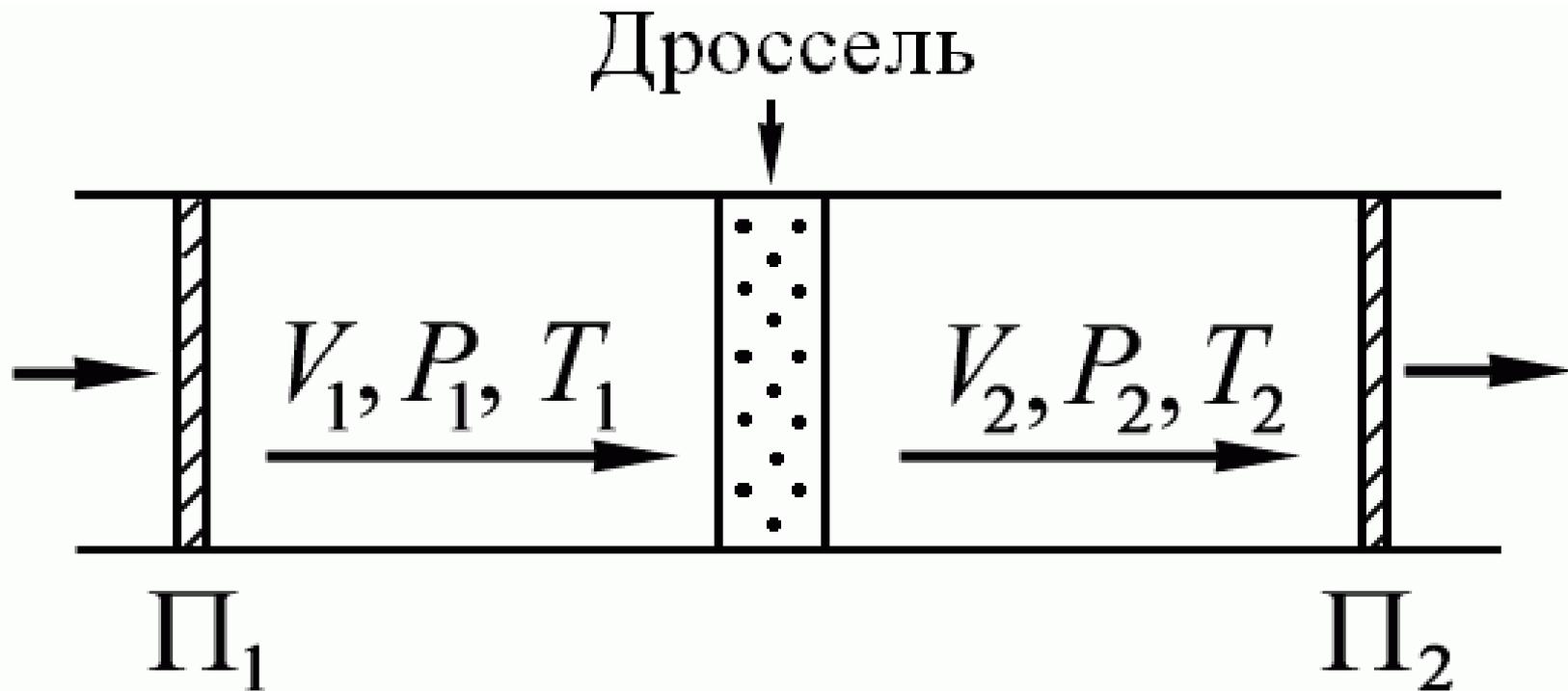
$$-\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$$

Расчет дифференциального эффекта Джоуля — Томсона



1. Между газами в объемах V_1 и V_2 отсутствует прямой теплообмен через пористую перегородку, которая делается из материала с достаточно низкой теплопроводностью.
2. Вся система теплоизолирована.

Расчет дифференциального эффекта Джоуля — Томсона



- Эффект Джоуля — Томсона проходит при постоянной энтальпии ($H=U+pV=\text{const}$).
- Выберем в качестве независимых переменных T и p

Эффект Джоуля — Томсона

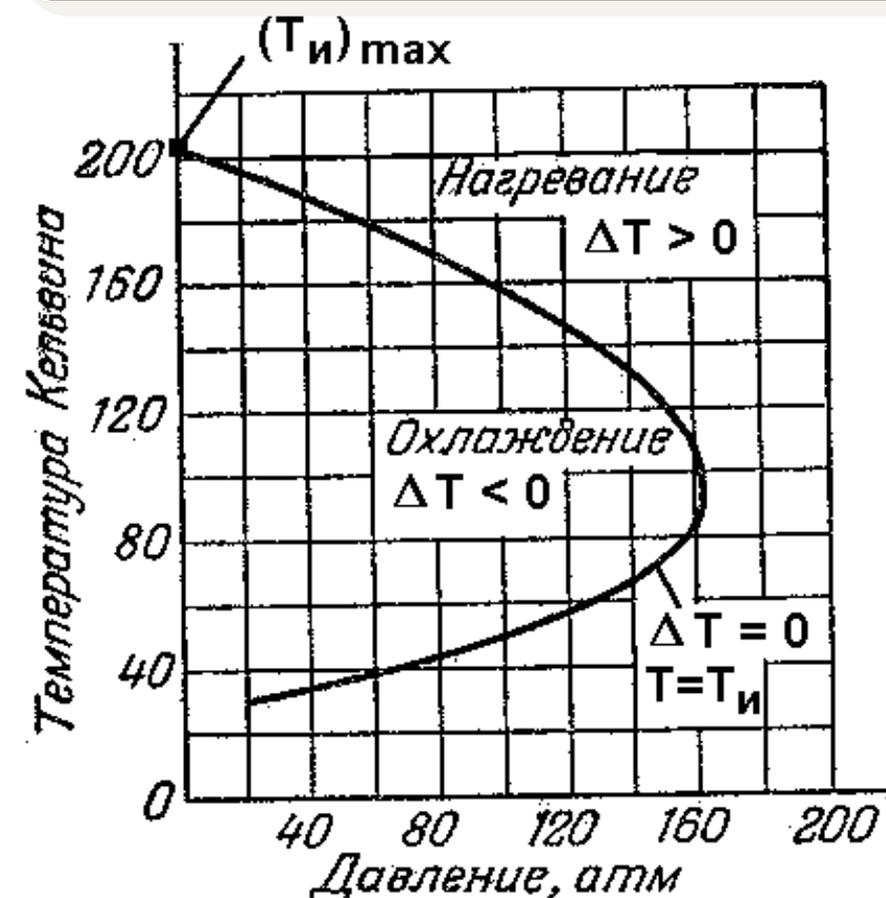
Изменение температуры ∂T при малом изменении давления ∂p называется дифференциальным **эффектом Джоуля–Томсона**.

Для дифференциального эффекта:
$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \frac{V}{C_p} [\alpha_p T - 1]$$

где $\alpha_p = \frac{(\partial V / \partial T)_p}{V}$ – изобарический коэффициент теплового расширения.

Температура инверсии T_i – такая исходная температура газа, при которой коэффициент Джоуля – Томсона равен нулю (температура не изменяется в процессе дросселирования).

Эффект Джоуля — Томсона

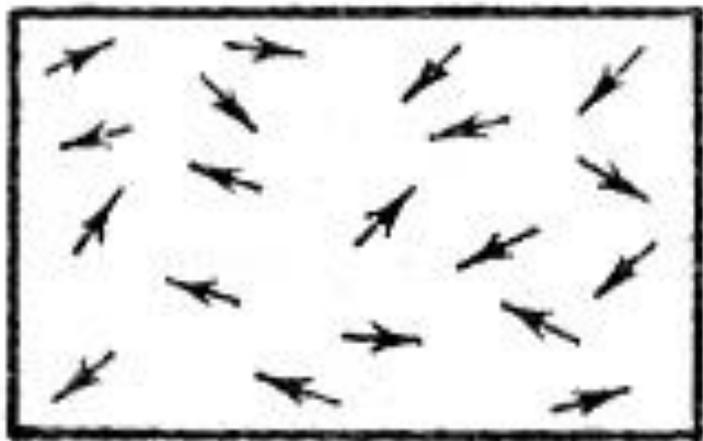


При температуре опыта $T < T_i$ дифференциальный эффект положителен $(\partial T / \partial p)_H > 0$, то есть при просачивании газа в область с меньшим давлением его температура понижается. И наоборот, при температуре опыта $T > T_i$ эффект Джоуля – Томсона отрицателен $(\partial T / \partial p)_H < 0$, то есть в процессе дросселирования температура газа повышается.

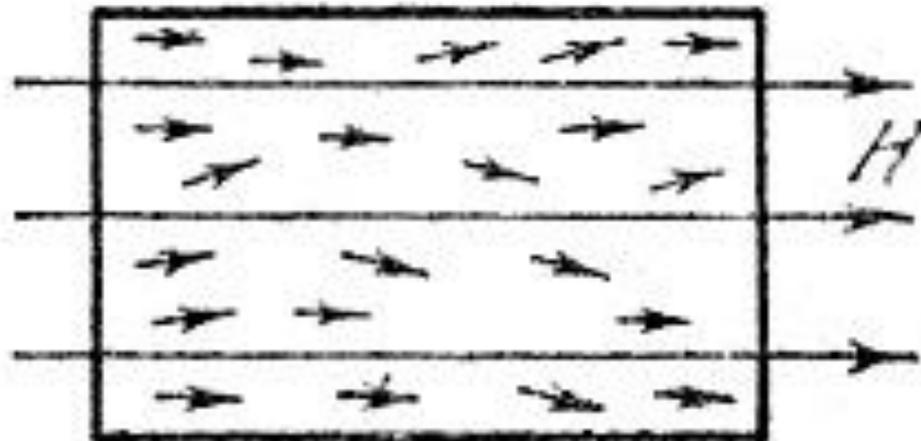
Методы получения низких температур

- Сначала газ изотермически сжимается до давления в несколько сотен атмосфер при доступной температуре (например, комнатной).
- После этого он расширяется либо в процессе Джоуля — Томсона, либо адиабатически. В обоих случаях газ охлаждается.
- Далее он используется для охлаждения следующей порции газа, сжатого до большего давления.
- Таким образом, следующая исходная порция сжатого газа имеет более низкую температуру, чем в предыдущем акте охлаждения. Поэтому после расширения этой порции газа либо в процессе Джоуля — Томсона, либо адиабатически температура полученного газа более низка, чем в предыдущем цикле. И т. д. В конце концов температура понижается до необходимого значения.

Адиабатическое размагничивание



а)

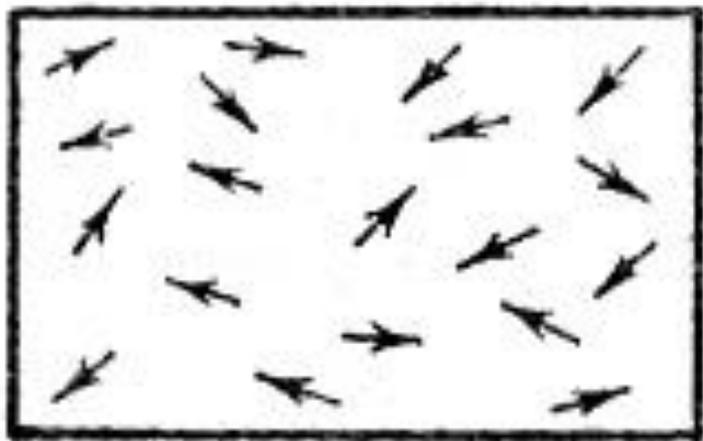


б)

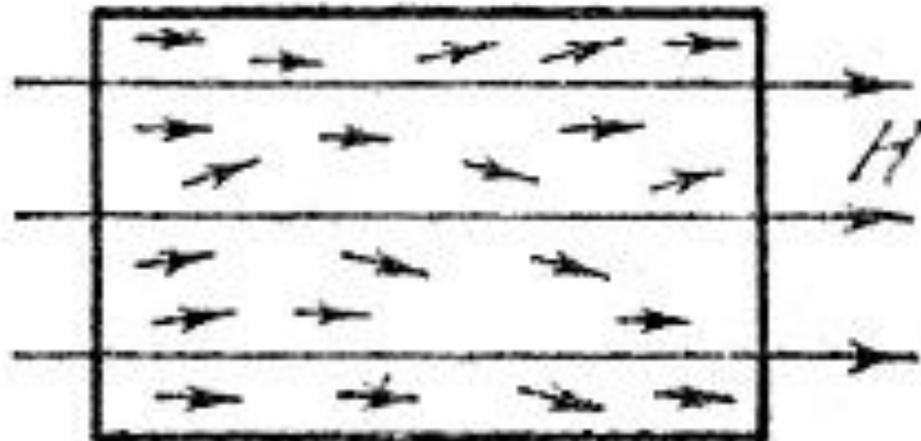
Для получения сверхнизких температур используют метод адиабатного размагничивания парамагнитных солей. Он основан на зависимости энтропии парамагнитной соли от напряженности магнитного поля.

Атомы парамагнитного вещества обладают магнитными моментами. В обычных условиях эти магнитные моменты ориентированы беспорядочно из-за теплового движения, в котором участвуют молекулы соли:

Адиабатическое размагничивание



а)



б)

Если такую соль поместить в сильное магнитное поле, то магнитные моменты будут ориентироваться вдоль поля. Этот процесс называется намагничиванием.

Следовательно, магнитное поле приводит к тому, что степень беспорядка (магнитного) уменьшается. Поэтому уменьшается и связанная с ним энтропия

Адиабатическое размагничивание

Парамагнитную соль охлаждают жидким гелием до $\sim 1\text{K}$ и намагничивают.

После этого намагниченную, охлажденную соль изолируют от жидкого гелия и адиабатно размагничивают, удаляя из магнитного поля.

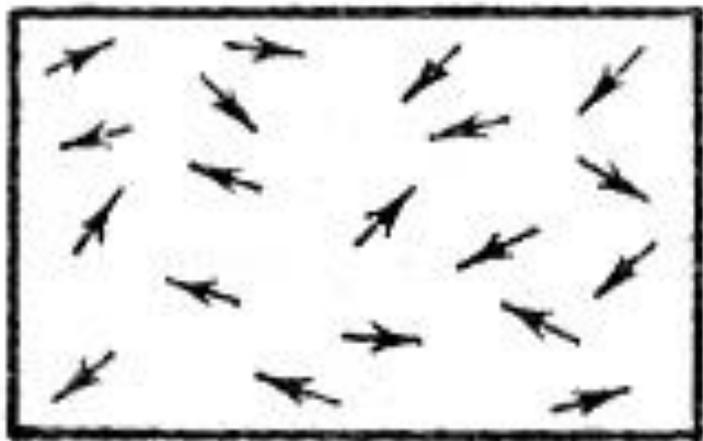
При адиабатическом процессе:

$$\Delta S = \Delta S_T + \Delta S_M = 0$$

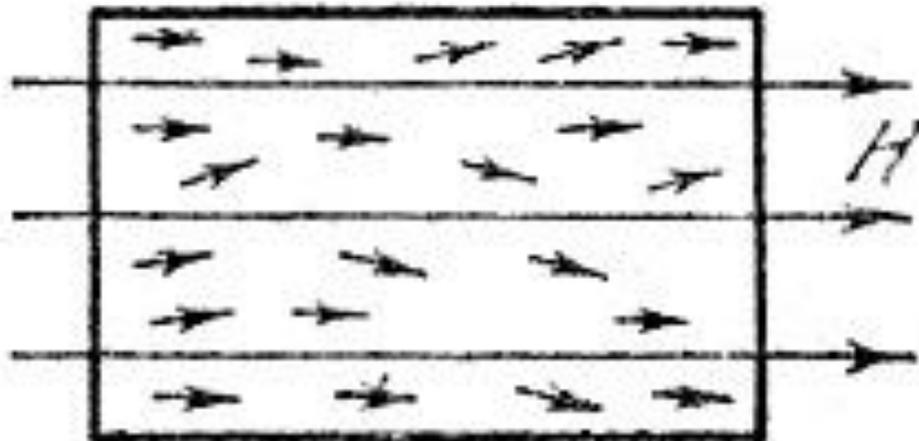
где ΔS_T – изменение энтропии, обусловленное тепловым движением молекул (температурой),

ΔS_M – изменение энтропии, обусловленное магнитными свойствами.

Адиабатическое размагничивание



а)



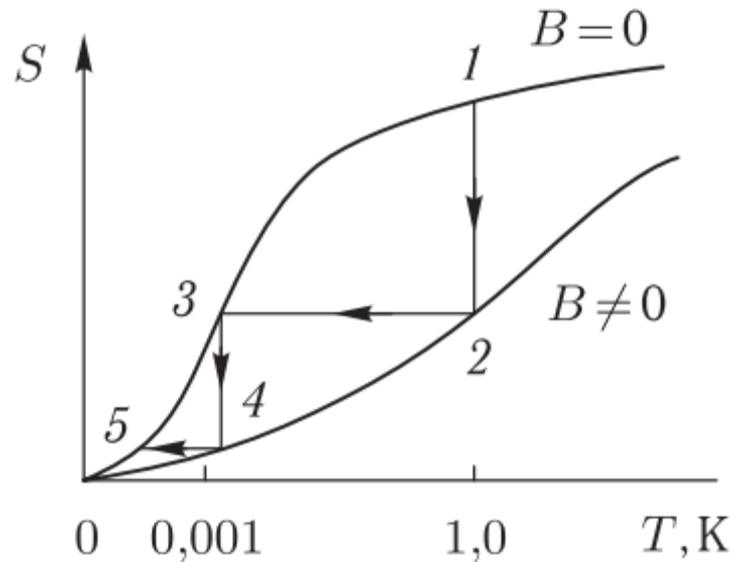
б)

При адиабатном размагничивании $\Delta S_M > 0$ – энтропия, обусловленная магнитными свойствами, возрастает, потому что магнитные моменты молекул в отсутствие магнитного поля ориентируются беспорядочно (рис.б,а).

Следовательно, при этом должна уменьшиться энтропия, связанная с тепловым движением (температурой) $\Delta S_T < 0$.

Поэтому температура парамагнитной соли уменьшится. Используя этот метод можно получить температуры $\sim 10^{-5}\text{K}$.

Адиабатическое размагничивание



$$\Delta S = \Delta S_T + \Delta S_M = 0$$

где ΔS_T – изменение энтропии, обусловленное тепловым движением молекул (температурой),

ΔS_M – изменение энтропии, обусловленное магнитными свойствами.

Методы получения низких температур

- 1) Холодильная машина
- 2) Адиабатическое расширение
с совершением работы
- 3) Дросселирование
- 4) Адиабатическое размагничивание
- 5) Лазерное охлаждение

Третье начало термодинамики

- **Третье начало термодинамики (тепловая теорема Нернста):** при стремлении температуры к абсолютному нулю энтропия стремится к конечному значению S_0 , не зависящему от давления, агрегатного состояния и других характеристик вещества. (Эту величину (S_0) можно положить равной нулю.)