

ОХЛАЖДЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭНЕРГИИ

Я. Б. Зельдович

Рассматривается принципиальная возможность охлаждения двухуровневой системы (например спинов в магнитном поле) с помощью высокочастотной накачки энергии (обобщающая известный способ динамической ориентации спинов) и возможность привлечения квазиэнергии для подбора условий осуществления процесса.

Согласно второму началу термодинамики в холодильном устройстве от системы находящейся при низкой температуре T_1 отбирается малая энергия Q_1 , термостату находящемуся при более высокой температуре T_2 отдается большая энергия $Q_2 = Q_1 + A$, работа A производится внешним источником энергии, предельное охлаждение дается выражением $T_1 \geq T_2 Q_1 / Q_2$.

Представим себе, что охлаждаемая система является двухуровневой, с разностью энергий δ между двумя состояниями A, B , т. е. $\delta = E_B - E_A$. Пусть термостат содержит другую двухуровневую систему C, D с разностью энергий $\Delta = \delta + \hbar\omega = E_D - E_C$ (см. рис. 1). Естественно предположить, что при воздействии высокочастотным источником энергии с частотой ω удастся адиабатически осуществить отбор энергии δ от

системы A, B и отдачу энергии $\Delta = \delta + \hbar\omega$ системе C, D , с заимствованием разности $\hbar\omega$ у внешнего источника энергии. При этом можно будет охладить A, B до температуры T_1 более низкой чем температуру термостата T_2 , в пределе

$$T_1 = T_2 \delta / (\delta + \hbar\omega). \quad (1)$$

У двухуровневой системы температура определяется отношением заселенностей двух уровней¹⁾

$$[B]/[A] = \exp(-\delta/T_1), \quad (2)$$

$$[D]/[C] = \exp(-\Delta/T_2).$$

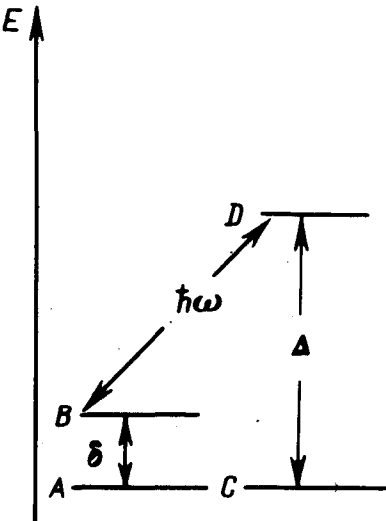
Термодинамическое соотношение между T_1 и T_2 соответствует предположению, что при наличии высокочастотного поля становятся возможными переходы $B + C \rightleftharpoons A + D$

$$\frac{d[B]}{dt} = -\frac{d[A]}{dt} = K_1[A][D] - K_2[B][C]. \quad (3)$$

Предполагается также, что $K_1 \equiv K_2 = K$, вероятность обоих переходов пропорциональна интенсивности высокочастотной накачки (или по крайней мере обращается в ноль без накачки и одинаково зависит от накачки²⁾). В таком случае в стационарном состоянии $d[B]/dt = 0$ получим

$$[A][D] = [B][C], \quad (4)$$

что даст $[B]/[A] = [D]/[C]$, $T_1 = T_2 \delta / \Delta$.



¹⁾ Заселенности обозначаем квадратными скобками, все статистические веса для простоты полагаем равными единице.

²⁾ При этом пренебрегаем диссипативными процессами взаимодействия системы A, B с термостатом. Накачку считаем достаточно интенсивной для классической трактовки, так что в точных квантовых выражениях вероятности поглощения ($\sim n$) и испускания (спонтанного + индуцированного $\sim 1 + n$) кванта $\hbar\omega$ можно пренебрегать единицей по сравнению с n .

К такой ситуации сводится, в частности, динамическая поляризация ядер [1] в пределе слабой связи ядра и электрона.

Для доказательства того, что такой процесс возможен, а также для сознательного целеустремленного подбора условий проведения процесса воспользуемся концепцией квазиэнергии [2 – 5].

Представим себе в качестве катализатора процесса (3) третью двухуровневую систему F, G , которая в результате совместного действия высокочастотной накачки и постоянных полей (магнитного поля, поля решетки, спинорбитального или сверхтонкого расщепления и т. п.) имеет разность квазиэнергий δ

$$E_G^{(0)} - E_F^{(0)} = \delta. \quad (5)$$

Но согласно общей теории квазиэнергия определена по модулю $\hbar\omega$ каждое из состояний F, G имеет сателлиты (n_1, n_2, n_3 – целые) $E_F^{(n_1)} = E_F^{(0)} + n_1 \hbar\omega$; $E_G^{(n_2)} = E_G^{(0)} + n_2 \hbar\omega$

$$E_G^{(n_1)} - E_G^{(n_2)} = \delta + n_3 \hbar\omega, \quad n_3 = n_2 - n_1. \quad (6)$$

Таким образом, система F, G находится в резонансе одновременно и с A, B и с C, D (с первой – за счет основного перехода, а со второй – за счет сателлита) см. рис. 2. Существенно, что основное состояние и сателлиты, например $F_0, F_1, F_2, F_{-1}, F_{-2}$ вместе образуют единый комплекс F -квазиэнергетическое состояние, внутри которого соотношения амплитуд и фаз поддерживаются быстро и без диссипации высокочастотным полем. Есть заселенность $[F]$, но не существует – как независимая – $[F_0]$ или $[F_1]$ и т. п.

Рассматриваем резонансные переходы

$$A + G \rightleftharpoons B + F; \quad C + G \rightleftharpoons D + F.$$

Из принципа детального равновесия (из равенства матричных элементов для прямого и обратного перехода), следует, что в стационарном состоянии

$$\frac{[B]}{[A]} = \frac{[G]}{[F]} = \frac{[D]}{[C]} \quad (7)$$

чем и доказываются утверждения первой части статьи. Для простоты предполагаем, что A, B и C, D не расщепляются накачкой, что делает однозначным определение их температур¹⁾. В принципе не исключено прямое использование (для радиоприема и т. п.) самих F_0, G_0 .

¹⁾ Для квазиэнергетической системы F, G заселенности и их отношение определяются однозначно, но эффективная температура определена не однозначно в силу неоднозначности самой квазиэнергии $T_{eff}^{(n)} = (\delta + n\hbar\omega) \{-\ln [F]/[G]\}^{-1}$

Для процесса существенно предположение о подавляющем преобладании резонансных процессов. Нерезонансно, с заимствованием части энергии у решетки возможен, например и процесс $C + F = G + D$, который испортил бы все соотношения — но такими процессами мы пренебрегаем.

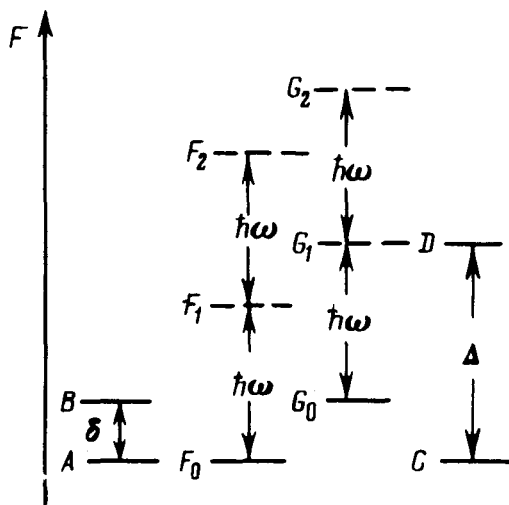


Рис. 2

В вероятность процесса $C + G \rightarrow F + D$ входит вес сателлита G_1 в состоянии G ; соответственно эта вероятность стремится к нулю при уменьшении амплитуды накачки. Но этот же вес G_1 входит в вероятность обратного процесса $F + D \rightarrow C + G$. Поэтому в пренебрежении потерями предельное охлаждение (как и следует из формулы (1)) не зависит от амплитуды накачки, которая влияет лишь на мощность холодильника.

Благодарю С.А.Альтшуллера, А.С.Боровика-Романова, В.Намиота, А.А.Овчинникова, И.И.Собельмана за обсуждения.

Поступила в редакцию
13 декабря 1973 г.

Литература

- [1] К.Джеффрис. Динамическая ориентация ядер, М., изд. Мир, 1965.
- [2] А.И.Никишов, В.И.Ритус. ЖЭТФ, 46, 777, 1969.
- [3] В.И.Ритус. ЖЭТФ, 51, 1544, 1966.
- [4] Я.Б.Зельдович. ЖЭТФ, 51, 1492, 1966.
- [5] Я.Б.Зельдович. УФН, 110, 139, 1973.