Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԿԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ

Հովհաննիսյան Կարեն Վարդանի

ՍԱՌԵՑՄԱՆ ՖՈՒՆԴԱՄԵՆՏԱԼ ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ՍԱՀՄԱՆԱՓԱԿՈՒՄՆԵՐԸ

Ա.04.02-"Տեսական ֆիզիկա" մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան – 2012

НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ им. А.И. Алиханяана

Оганесян Карен Варданович

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КВАНТОВЫЕ ПРЕДЕЛЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – "Теоретическая физика".

Ереван – 2012

Ատենախոսության թեման հաստատված է Ա. Ալիխանյանի անվան Ազգային Գիտական Լաբորատորիայում

Գիտական ղեկավար՝ ֆիզմաթ. գիտությունների թեկնածու Ա. Է. Ալլահվերդյան (ԱԳԼ)

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր Ե. Մամասախլիսով (ԵՊՀ)
ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր Ն. Անանիկյան (ԱԳԼ)

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի Պետական Համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2012 թ. մարտի 20 –ին ժամը 14.00 –ին Ա. Ալիխանյանի անվան Ազգային Գիտական Լաբորատորիայում գործող ԲՈՀ-ի 024 մասնագիտական խորհրդի նիստում (Ալիխանյան եղբայրների փող. 2, 0036 Երևան)

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ա. Ալիխանյանի անվան Ազգային Գիտական Լաբորատորիայի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է փետրվարի 7 –ին 2012 թ.

024 մասնագիտական խորհրդի գիտքարտուղար ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր, պրոֆեսոր Է. Գազազյան

Тема диссертации утверждена в Национальной Научной Лаборатории им. А.И. Алиханяна.

Научный руководитель: кандидат физ-мат наук, А. Э. Аллахвердян (ННЛ)

Официальные оппоненты: доктор физ-мат наук, Е. Мамасахлисов (ЕГУ)
доктор физ-мат наук, Н. Ананикян (ННЛ)

Ведущая организация: Ереванский Государственный Университет

Защита состоится 20 –го марта 2012 г. в 14.00 на заседании специализированного совета ВАК 024 действующего при Национальной Научной Лаборатории им. А.И. Алиханяна (ул. Братьев Алиханян, 0036 Ереван)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национальной Научной Лаборатории им. А.И. Алиханяна.

Автореферат раослан 7 февраля 2012 г.

Ученый секретарь спец. совета 024, Д.ф.м.н. проф. Э. Газазян

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Թեմայի արդիականությունը:

Սառեցման ֆիզիկան ընդհանրապես և նրա՝ սույն ատենախոսության սահմաններում մանրամասնորեն ուսումնասիրված առանձին գլուխները, ներկայումս հանդիսանում են ակտիվորեն հետազոտվող ոլորտներ: Թերմոդինամիկան երկար ժամանակ դուրս չէր գալիս հավասարակշիռ թերմոդինամիկական [Գ1], գծային ոչ շրջելի [Գ1], վերջավոր ժամանակային [Գ2] ֆենոմենոլոգիկ ֆորմալիզմների սահմաններից: Միայն վերջերս է, որ թերմոդինամիկական պրոցեսները սկսել են ուսումնասիրել առաջին սկզբունքներից, ինչը հնարավորություն է տալիս բացահայտորեն հաշվի առնել ժամանակը և իրականացնել բնութագրերի օպտիմիզացիան առանց որևե ֆորմալ սահմանափակումների: Այստեղ ուսումնասիրված խնդիրները հետքրքիր են թե՛ քվանտային ֆիզիկայի, թե՛ դասական ստոխաստիկ տեսանկյուններից:

Կա երկու մոտեցում դեպի սառեցումը: Առաջին մոտեցումը լոկալ է, քնազի այն ներառում է փոքր միջանկյալ համակարգեր, որոնք արտաքին ուժերի ազդեցության տակ ցիկլեր են կատարում երկու՝ տարբեր ջերմաստիճաններով թերմոստատների միջև: Եթե սառեցման թիրախը սառը/տաք թերմոստատն է, ապա սառեցուցիչը կոչվում է սառնարան/ջերմային պոմպ: Երկրորդ մոտեցումը գլոբալ է. արտաքին դաշտերը ազդում են սառցման ամբողջ թիրախի վրա, օր. միջուկների դինամիկական բևեռացումը (ՄԴԲ) միջուկային մագնիսական ռեզոնանսի (ՄՄՌ) ֆիզիկայում: Քվանտային սառնարանները, և, ընդհանրապես, ջերմային մեքենաները ուսումնասիրվում են նրանց օգտակար գործողության գործակցի (ՕԳԳ) և հզորության վարքով՝ կախված ջերմաստիճաններից, չափսերից և դասական անալոգներ ունենալուց [Գ3-Գ5]: Դինամիկ սառեցումն ու դրա հետ կապված թերմոդինամիկայի 3րդ օրենքը նույնպես ակտիվորեն ուսումնասիրվում են, առավելապես ՄՄՌ ֆիզիկայում ՄԴԲ առնչությամբ [Գ6-Գ8]: Միկրոկանոնիկ և կանոնիկ անսամբլների տարբերությունները և թերմոստատից աշխատանքի քաղումը ուսումնասիրվում են թե՛ ֆունդամենտալ (թերմոդինամիկայի 2րդ օրենք), թե՛ էներգիայի կուտակման և օգտագործման տեսանկյուններից [Գ9-Գ12]: Բևեռացվածության և կոհերենտության՝ մի համակարգից՝ մյուսին տեղափոխմանն ու նրանց՝ որպես ինֆորմացիայի կորուստին վերաբերվող գրականությունը շատ բազմաբնույթ է (քվանտային ինֆորմատիկա, քվանտային օպտիկա, քվանտային կենսաբանություն, ՄՄՌ ֆիզիկան և այլ.), բերում ենք երեք հղում միայն՝ [Գ6, Գ13, Գ14]:

Աշխատանքի նպատակն ու խնդիրները:

Այս աշխատանքի հիմնական նպատակն ու խնդիրները հետևյալն են.

- Հետազոտել սառնարանի քվանտային մոդել, գտնել նրա օպտիմալ ռեժիմները և այդ ռեժիմներում հաշվել ՕԳԳ-ն և հզորությունը:
- Ուսումնասիրել քվանտային միջնորմով ջերմության ինքնակամ հոսքի հատկությունները: Պարզել այդ հոսքի մեծացման պայմանները և անհրաժեշտ ռեսուրսները: Սահմանել ջերմային պոմպի համար ՕԳԳ:
- Ֆորմալիզացնել սառեցման սխեմաները ռեսուրսների սահմանափակության հաշվառմամբ, պարամետրիցնել ռեզերվուարների բնութագրիչ մոդելները: Ուսումնասիրել մինիմալ ջերմաստիճանը, որպես այդ օպերացիոնալ պարամետրերի ֆունկցիա:
- Հետազոտել ցիկլիկ պրոցեսների միջոցով քվանտային միկրոկանոնիկ վիճակներից մաքսիմալ աշխատանքի քաղման խնդիրը:
- Հետազոտել թե ինչպես է վնասվում խտության մատրիցի՝ իր էլեմենտների մասին ունեցած հիշողությունը, երբ նրանք տեղափոխվում են տրված համակարգից դեպի մեկ այլ համակարգ: Ուսումնասիրել և՛ իդեալական և՛ ոչ իդեալական տեղափոխության դեպքերը:

Ատենախոսության արդյունքների նորությունը:

Ատենախոսությունում բերված բոլոր արդյունքները նոր են: Ստորև բերված են նրանցից մի քանիսը:

- Առաջին անգամ կառուցված է սառնարանի մոդել, որը կարող է աշխատել Կառնոյի արժեքին ցանկացած չափով մոտ ՕԳԳ-ով՝ ունենալով զրոյից տարբեր հզորություն:
- Առաջին անգամ ներմուծվել և հիմնավորվել է սպոնտան պրոցեսների ուժեղացման էֆեկտիվությունը: Վերջինիս համար գտնվել է համակարգի մանրամասներից անկախ վերին սահման, որը հանդիսանում է ջերմային պոմպերի համար Կառնոյի արժեքի անալոգ և, ձևականորեն, համընկնում է սառնարանների համար Կառնոյի արժեքի հետ:
- Առաջին անգամ քվանտային մեխանիկայի օրենքներից ելնելով ցույց է տրվել ջերմաստիճանի բացարձակ զրոյի անհասանելիությունը, դրույթ, որը հանդիսանում է թերմոդինամիկայի 3-րդ օրենքի Ներնստի ձևակերպման շտկում, և չի պարունակում անուղղակիորեն կատարված ենթադրություններ, որոնք առկա են Ներնստի թեորեմում:

- Ուսումնասիրելով ռեզերվուարի միջոցով երկմակարդակ համակարգի դինամիկ սառեցումը հաշվված է վերջինիս համար հասանելի մինիմալ $T_{\min}$ ջերմաստիճանը: Ցույց է տրված, որ դրա համար անհրաժեշտ մինիմալ աշխատանքը աճում է $\propto T_{\min}^{-1}$: ՄՄՌ ՄԴԲ համապատասխանող N նույնանման սպիներից բաղկացած ռեզերվուարի համար ցույց է տրվում, որ $T_{\min} \propto 1/N$ և հաշվվում է աշխատանքը, որը վերջավոր է և ռեզերվուարի սպիների էներգետիկ ճեղքից կախված կարող է նաև լինել թեմոդինամիկայի 2-րդ օրենքով պահանջվող մինիմումին հավասար:
- Առաջին անգամ հաշվվում է մաքսիմալ աշխատանքը ($W_{\max}$), որը հնարավոր է քաղել մակրոսկոպիկ միկրոկանոնիկ ռեզերվուարից (T ջերմաստիճանում), որը կազմված է $N >> 1$ նույնանման սիպներից: $W_{\max}$ միշտ փոքր է ռեզերվուարի էներգիայից, բայց, այնուամենայնիվ, կարող է լինել մեծ՝ $O\left(\sqrt{N \ln N}\right)$: Ռեզերվուարին կցված համակարգի համար ազատ էներգիայի գաղափարը ընդհանուր դեպքում կիրառելի չէ, քանզի լինելով T ջերմաստիճանով կանոնիկ վիճակում այն կարող է մեծացնել ռեզերվուարից քաղված աշխատանքը, առանց իր սեփական վիճակը փոխելու: Ինչը անհնար է կանոնիկ ռեզերվուարների համար:
- Մակրոսկոպիկ միկրոկանոնիկ ռեզերվուարին կցված համակարգից մաքսիմալ աշխատանքի քաղման ուսումնասիրությունը ռեզերվուարի բարձր սկզբնական ջերմաստիճանների սահմանում թույլ է տալիս վերականգնել ազատ էներգիայի գաղափարի կիրառումը, որն արդեն ներառում է զծային էնտրոպիա, և ոչ թե ֆոն Նոյմանի էնտրոպիան:
- Առաջին անգամ քվանտային վիճակների կլոնավորման (cloning) և հեռարձակման (broadcasting) խնդիրը լուծվում է ոչ թե գլոբալ (ամբողջական վիճակների մակարդակով) մոտեցմամբ, այլ լոկալ. խտության մատրիցի էլեմենտների՝ մի համակարգից (A) մյուսին՝ (B) տեղափոխելու մոտեցմամբ: Հաշվված է A-ի վերջնական վիճակում ամեն տեղափոխված էլեմենտի մասին հիշողությունը: Ոչ իդեալական տեղափոխման համար ներմուծված է մատրիցական էլեմենտի մասին (լոկալ) հիշողության չափ:

Արդյունքների կիրառական նշանակությունը:

- Մեր մշակած օպտիմալ սառնարանի նախատիպը կծառայի իրական սառնարանների զարգացմանն առնվազն երկու ճանապարհով:

Առաջինը. նկարագրված մոդելի, նրա ցիկլի ուղղակի իրականացումն է: Երկրորդ. ՕԳԳ-ի համար մեր կողմից ստացված օպտիմալ արժեքները կմատնանշեն թե կոնկրետ իրական սառնարաններն զարգացման ինչ պոտենցիալ ունեն և սառնարնի նկարագրված կառուցվածքը կուղղորդի այդ պոտենցիալ հնարավորություններն իրականացնելու հարցում:

- Ջերմային պոմպի օպտիմալ ռեժիմների մեր կողմից տրված լրիվ նկարագրությունը թույլ կտա մշակել էֆեկտիվ ջերմահաղորդիչներ և նրանց օպտիմալ կերպով կառավարել, կամ կմատնանշի թե ինչ ուղղությամբ ձևափոխել եղած պոմպերը, որպեսզի վերջիններս ավելի էֆեկտիվ գործեն:
- Դինամիկ սառեցման խնդրի լուծումը ապահովում է առեցման ֆունդամենտալ սահմաններ, որոնք չեն կարող խախտել իրական սառեցուցիչները և օպտիմալ սառեցման սխեման մատնացույց է անում թե ինչպես կառուցել էֆեկտիվ սառեցուցիչներ:
- Տարատեսակ կառուցվածք ունեցող դինամիկ սառեցման սարքերի մաքսիմալ հնարավոր ելքային արժեքների իմացությունը թույլ կտա գնահատել այդ սարքերի փաստացի էֆեկտիվությունը և այդ էֆեկտիվության բարելավման հնարավորությունները:
- Միկրոկանոնիկ ռեզերվուարից մաքսիմալ աշխատանքի քաղման ուսումնասիրության արդյունքները էներգիայի էֆեկտիվ կուտակիչների ստեղծման նոր սկզբունքներ է առաջարկում, և ֆունդամենտալ սահմաններ ապահովում այդ կուտակիչների ունակության և էֆեկտիվության համար:

<u>Ստացված արդյունքների ապրոբացիան:</u>

Սույն ատենախոսության արդյունքները ներկայացվել են հետևյալ կոնֆերանսներում, սիմպոզիումներում և դպրոցներում.

- Workshop on Engineering and Control of Quantum Systems, 10-14 October 2011, Max-Planck-Institut fur Physik komplexer Systeme, Dresden, Germany
- Conference on Astrophysics, Gravitation and Quantum Physics (dedicated to 75'th birthday of academician E.V. Chubaryan), 20-21 May 2011, YSU, Yerevan, Armenia
- School on Cooperative Phenomena in Flows ("The Geilo School" 2011), 04-14 April 2011, IFE, Geilo, Norway
- International Symposium on Quantum Thermodynamics: Energy and Information Flow at the Nano-Scale, 13-17 September 2010, Stuttgart, Germany

- International Workshop on Modern Problems in Optics and Photonics, 27 August - 02 September 2009, Yerevan, Armenia

Այս աշխատանքի արդյունքները նաև ներկայացվել և քննարկվել են Երևանի Պետական Համլսարանի, Ալիխանյանի անվ. Ազգային Գիտական Լաբորատորիայի (ԵրՖԻ), Բարսելոնի ICFO – The Institute of Photonic Sciences, Շտուտգարտի համալսարանի II. Institut für Theoretische Physik սեմինարներին:

<u>Ատենախոսության հիմնական արդյունքները</u> հրատարակված են 6 տպագիր հոդվածներում, որոնց ցանկը բերված է սեղմագրի վերջում:

<u>Աշխատանքի կառուցվածքն ու ծավալը:</u>

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, հինգ գլխից, եզրակացությունից, 3 հավելվածից և օգտագործված գրականության ցանկից (155 անուն): Ատենախոսության ծավալը կազմում է 148 էջ:

Աշխատանքի բովանդակությունը

<u>Ներածության մեջ</u> քննարկվում է ատենախոսությունում ուսումնասիրված խնդիրների արդիականությունը, նրանց կարևորությունը ժամանակակից սառեցման ֆիզիկայում: Բերվում է նաև ատենախոսության կառուցվածքը և հակիրճ բովանդակությունը:

<u>Առաջին գլխում</u> ներկայացված է սառնարանի քվանտային մոդել, որն իրենից ներկայացնում է երկու մասից բաղկացած բանող մարմին՝ ընկղմված երկու թերմոստատների միջև ($T_c < T_h$ ջերմասիտճաններով): Բանող մարմնի մասերը փոխազդում են արտաքին իմպուլսաձև դաշտի միջոցով: Սահմանվում են սառնարանի հիմնական բնութագրիչները. սառը թերմոստատից քաղված ջերմաքանակ, հզորություն, օգտակար գործողության գործակից (ՕԳԳ): Ի տարբերություն Կառնոյի ցիկլով (որը քվազիստատիկ է) աշխատող մեքենաների [Գ1], դիտարկվող մոդելի աշխատանքային ցիկլը տևում է վերջավոր ժամանակ: Վերջավոր ժամանակ տևող ցիկլերով ջերմային մեքենաներ ուսումնասիրելու նպատակով ստեղծված դասական, ֆենոմենոլոգիական տեսության՝ վերջավոր-ժամանակային թերմոդինամիկայի սահմաններում օպտիմալ ՕԳԳ-ի համար ստացված (և բազմաթիվ մոդելներով ստուգված) այսպես կոչված Կուրզոն-Ալբորնի արժեքը [Գ2]՝

$$\eta_{CA} = (1 - T_c/T_h)^{-\frac{1}{2}} - 1$$

փոքր է Կառնոյի արժեքից [Գ2]՝

$$\eta_C = (1 - T_c/T_h)^{-1} - 1$$

Այս գլխում ցույց է տրվում կոմպլեմենտարության հետևյալ հատկությունը. սառը թերմոստատից քաղված ջերմաքանակի մաքսիմիզացիան (ըստ բոլոր պարամետրերի) զրոյացնում է ՕԳԳ-ն, և հակառակը: Սույն հատկությունից ելնելով ՕԳԳ-ի և սառը թերմոստատից քաղված ջերմաքանակի արտադրյալը սահմանվում է որպես սառնարանի ցիկլի օպտիմալության քանակական չափ: Այն ռեժիմը, երբ այդ մեծությունը մաքսիմալ է, կոչում ենք օպտիմալ ռեժիմ: Սույն գլխում ցույց է տրվում, որ օպտիմալ ռեժիմում մեր մոդելի ՕԳԳ-ն միշտ մեծ է Կուրզոն-Ալբորնի արժեքից և բանող մարմնի հիլբերտյան տարածության չափողականության աճի հետ մեկտեղ ձգտում է Կառոյի արժեքին՝ միշտ փոքր մնալով նրանից՝ ունենալով վերջավոր հզորություն:

<u>*Երկրորդ գլխում*</u> ուսումնասիրվում է ջերմային պոմպի քվանտային մոդել: Վերջինս համընկնում է առաջին գլխում դիտարկված մոդելի հետ: Սահմանվում են պոմպի հիմնական բնութագրիչները. տաք թերմոստատից քաղված ջերմաքանակ, հզորություն և էֆեկտիվություն: Ջերմաքանակի՝ տաքից դեպի սառը սպոնտան հոսքի առկայությունը անհնարին է դարձնում էֆեկտիվության սահմանումը, որպես ավանդական ՕԳԳ՝ արդյունք (քաղված ջերմաքանակ) բաժանած ջանք (արտաքին դաշտի կատարած աշխատանք): Մաքսիմիզացնելով տաք թերմոստատից սպոնտան արտահոսած ջերմաքանակն ըստ մոդելի բոլոր պարամետրերի և ցույց տալով, որ ավելի շատ ջերմաքանակ տեղափոխելու համար անհրաժեշտ է արտաքինից աշխատանք կատարել համակարգի վրա, գրականության մեջ առաջին անգամ ջերմային պոմպերի համար ներմուծվում է ՕԳԳ, որպես սպոնտան արժեքի նկատմամբ ջերմաքանակի աճի և դրա համար պահանջված աշխատանքի հարաբերություն: Նաև ցույց է տրվում, որ այդկերպ սահմանված ՕԳԳ-ի համար գոյություն ունի ունիվերսալ սահման, որը կախված է միայն թերմոստատների ջերմաստիճաններից: Դա նշանակում է, որ այդ սահմանը հանդիսանում է ջերմային պոմպերի համար Կառնոյի սահմանի անալոգ: Վերջինս ֆորմալ համընկնում է սառնարանների Կառնոյի սահմանի հետ՝ ($\eta_C = (1 - T_c/T_h)^{-1} - 1$):

<u>*Երրորդ գլխում*</u> ներկայացված է ուղղակիորեն սառեցման ընդհանուր սխեմա, որը հանդիսանում է ՄՄՌ ֆիզիկայում կիրառվող Միջուկների Դինամիկ Բևեռացման (ՄԴԲ) սխեմայի [Գ6, Գ7] ընդհանրացում և, որպես մասնավոր դեպք, իր մեջ է ներառում Ներնստի՝ թերմոդինամիկայի 3րդ օրենքի սխեման: Վերջինս ձևակերպվում է այսպես. ջերմաստիճանի

բացարձակ զրո արժեքին հանրավոր չէ հասնել ոչ մի վերջավոր պրոցեսի արդյունքում: Այնուամենայնիվ Ներնստի այս թեորեմում կան ոչ բացահայտ ենթադրություններ և ոչ հստակ սահմանումներ [Գ15]:

Մեր կողմից ուսումնասիրվող դինամիկ սառեցման սխեմայում բացարձակ զրոյի անհասանելիությունը հետևում է միանգամից, առանց որևէ անուղղակի ենթադրությունների և վատ սահմանված գաղափարների: Որպես սառեցվող համակարգ ընտրելով երկմակարդականի քվանտային համակարգը (այսուհետ՝ սպին), որը սկզբնականորեն գտնվում է ջերմային հավասարակշռության մեջ վերջավոր մակարդականի ռեզերվուարի հետ, մենք հաշվում ենք մինիմալ հասանելի ջերմաստիճանը ($T_{\min} > 0$) և ցույց տալիս, որ նրան հասնելու համար պետք է կատարել աշխատանք, որը հակադրած համեմատական է այդ ջերմաստիճանին: Ուսումնասիրվում է նաև N չփոխազդող սպիններից բաղկացած ռեզերվուարների դեպքը, որը մոդելավորում է ՄՄՌ ֆիզիկայում ՄԴԲ սխեման: Այդ դեպքի համար հաշվվում են մինիմալ հասանելի ջերմաստիճանը և դրա համար անհրաժեշտ մինիմալ աշխատանքը: $N >> 1$ դեպքում ցույց է տրվում, որ $T_{\min} \propto N^{-1}$: Ցույց է տրվում նաև, որ ռեզերվուարը կազմող սպինների էներգետիկ ճեղքի որոշ արժեքների դեպքում հնարավոր է ստանալ զգալի սառեցում՝ ծախսելով ընդամենը թերմոդինամիկայի 2րդ օրենքով պահանջվող մինիմալ աշխատանքը: Կարևոր արդյունք է նաև այն, որ ոչ-զրո մինիմալ ջերմաստիճանի գոյությունը կապված է ռեզերվուարի սպեկտրի՝ վերևից սահմանափակ լինելու հետ: Անսահմանափակ սպեկտրերով ռեզերվուարների համար նույնպես տեղի ունի բացարձակ զրոյի անհասանելիությունը, բայց հասանելի ջերմաստիճանների ինֆիմումը հավասար է զրոյի:

<u>*Չորրորդ գլխում*</u> մենք ուսումնասիրում ենք մակրոսկոպիկ միկրոկանոնիկ ռեզերվուարից մաքսիմալ աշխատանքի քաղման խնդիրը: Ինչպես նաև վերջավոր համակարգ+մակրոսկոպիկ միկրոկանոնիկ ռեզերվուար համակարգից մաքսիմալ աշխատանքի քաղման խնդիրը: Ռեզերվուարը մոդելավորվում է չփոխազդող և հավասար էներգետիկ ճեղքեր ունեցող երկմակարդականի քվանտային համակարգերի անսամբլով [Գ16]: Աշխատանքի քաղման խնդիրը ուսումնասիրված է կանոնիկ ռեզերվուարների համար և հայտնի է թերմոդինամիկայի 2րդ օրենքի Թոմսոնի ձևակերպման տեսքով. ոչ մի ցիկլիկ համիլտոնյան պրոցես ի վիճակի չէ աշխատանք քաղել կանոնիկ վիճակից [Գ1]: Իսկ եթե կանոնիկ ռեզերվուարին կցվի ևս մի վերջավոր համակարգ, ապա աշխատանք կարելի է քաղել միայն վերջինիս անհավասարակշռության պատճառով և հավասար է այդ համակարգի սկզբնական և վերջնական (հավասարակշիռ) ազատ էներգիաների տարբերությանը:

Այս գլխում ցույց է տրվում որ վերջավոր ջերմաստիճանային ռեզերվուարից քաղվող մաքսիմալ աշխատանքը $\propto \delta$, որտեղ δ-ն ռեզերվուարի մի մասնիկի էներգետիկ ճեղքն է: Անվերջության հավասար ջերմաստիճանով միկրոկանոնիկ ռեզերվուարից ստացված ամենաշատ աշխատանքը ձգտում է $\delta\sqrt{N \ln N}$-ին, N-ի աճելու հետ, ոտեղ N-ը ռեզերվուարի բաղադրիչների քանակն է: Այս արդյունքները շտկում են թերմոդինամիկայի 2րդ օրենքի Թոմսոնի ձևակերպումը՝ $\frac{W}{N} \to 0$, երբ $N \to \infty$: Երկրորդ դեպքում, երբ ռեզերվուարին կցված է նաև մի համակարգ, մենք ապացուցում ենք, որ հնարավոր է աշխատանքի քաղման կատալիզ. չնայած նրան, որ կցված համակարգի սկզբնական և վերջնական վիճակները համընկնում են, մաքսիմալ աշխատանքն ավելի մեծ է, քան մաքսիմալ աշխատանքը, որը հնարավոր է քաղել միայնակ թերմոստատից: Դա ցույց է տալիս, որ միկրոկանոնիկ ռեզերվուարին կցված համակագի համար ազատ էներգիայի գաղափարը կիրառելի չէ: Դրա կիրառելիությունը, սակայն, կարելի է վերականգնել ռեզերվուարի բարձր ջերմաստիճանների սահմանում՝ գծային էնտրոպիա ներմուծելով:

Հինգերորդ գլխում ներկայացված է մի համակարգի (A) խտության օպերատորից (λ) դեպի մեկ այլ համակարգի (B) խտության օպերատոր (r) մատրիցական էլեմենտների տեղափոխման խնդիրը: Սա հանդիսանում է դինամիկ սառեցման սխեմի ընդհանրացումը (քանզի ներառում է նաև ոչ անկյունագծային մատրիցական էլեմենտների տեղափոխություն) և ֆորմալիզացիան: Խնդիրը գրականության մեջ քվանտային վիճակների կլոնավորման (cloning) և հեռարձակման (broadcasting) լոկալ (այսինքն մատրիցական էլեմենտների մակարդակով) ուսումնասիրության առաջին դեպքն է: Տեղափոխման խնդիրը դիտարկվել է երկու դրվածքով.

- իդեալական, երբ տեղափոխությունը կատարվում է ամբողջությամբ՝ օրինակ, անկյունագծային էլեմենտի համար տեղափոխության պայմանն ունի հետևյալ տեսքը $\tilde{r}_{aa} = \lambda_{aa}$, որտեղ $\tilde{r}$-ը B-ի վերջնական խտության օպերատորն է:
- Ոչ իդեալական, երբ էլեմենտը տեղափոխվում է մասամբ, այլ կերպ ասած՝ էլեմենտի մասին աղդանշանի մագնիտուդը փոքրացվում է: Օր. $\tilde{r}_{aa} = \varepsilon \cdot \lambda_{aa}$, $\varepsilon < 1$:

Հիմնական արդյունքները հետևյալն են.

- Իդեալական դեպք: λ_{aa}-ի տեղափոխությունը բերում է A-ի վերջնական վիճակում՝ $\tilde{\lambda}$-ում բոլոր $\lambda_{a\neq c}$ էլեմենտների մասին

հիշողության կորստին: $\mathrm{Re}\,\lambda_{a\neq b}$, $\mathrm{Im}\,\lambda_{a\neq b}$ և $\lambda_{aa} - \lambda_{bb}$ մեծություններից որևէ մեկի տեղափոխությունը $\tilde{\lambda}$-ից ջնջում է մնացած երկուսի մասին հիշողությունը

- Ոչ իդեալական դեպք: Ներմուծելով $\tilde{\lambda}$-ում $\lambda_{a\neq c}$-ի մասին հիշողության քանակական չափ՝

$$\tfrac{1}{2}\sqrt{\left\|\partial\tilde{\lambda}/\partial\,\mathrm{Re}\,\lambda_{ac}\right\|^2 + \left\|\partial\tilde{\lambda}/\partial\,\mathrm{Im}\,\lambda_{ac}\right\|^2}$$

մենք ապացուցում ենք, որ λ_{aa}-ն ε ճշտությամբ տեղափոխելիս $\tilde{\lambda}$-ում $\lambda_{a\neq c}$ էլեմենտների մասին կարելի է պահպանել ամենաշատը $\sqrt{1-\varepsilon}$ հիշողություն: Այդ մաքսիմումները միաժամանակ հասանելի են: $\lambda_{a\neq b}$-ի տեղափոխման դեպքում $\tilde{\lambda}$-ում λ_{ab} և $\lambda_{aa} - \lambda_{bb}$ մասին մաքսիմալ հիշողությունը $\sqrt{1-\varepsilon^2}$ է: Այդ մաքսիմումները միաժամանակ հասանելի չեն:

Ամփոփման մեջ ներկայացված են ատենախոսության հիմնական դրույթներն , կատարված աշխատանքների արդյունքները:

Օգտագործված գրականության ցանկ:

[Գ1] H.B. Callen, "Thermodynamics", John Wiley, NY, 1985

[Գ2] R.S. Berry, V.A. Kazakov, S. Sieniutycz, Z. Szwast and A.M. Tsvilin, "Thermodynamic Optimization of Finite-Time Processes", John Wiley & Sons, Chichester, 2000

[Գ3] T. Feldmann and R. Kosloff, "Minimal temperature of quantum refrigerators", EPL 89, 20004 (2010)

[Գ4] P. Skrzypczyk, N. Brunner, N. Linden and S. Popescu, "The smallest refrigerators can reach maximal efficiency", J. Phys. A: Math. Theor. 44, 492002 (2011)

[Գ5] M. Esposito, K. Lindenberg and C. Van den Broeck, "Universality of Efficiency at Maximum Power", Phys. Rev. Lett. 102, 130602 (2009)

[Գ6] O.W. Sorensen, "Polarization transfer experiments in high-resolution NMR spectroscoopy", Prog. NMR Spectr. 21, 503 (1989)

[Գ7] L.J. Schulman, T. Mor, and Y. Weinstein, "Physical Limits of Heat-Bath Algorithmic Cooling", Phys. Rev. Lett. 94, 120501 (2005)

[Գ8] D. Janzing, P. Wocjan, R. Zeier, R. Geiss and Th. Beth, "Thermodynamic cost of reliability and low temperatures: Tightening Landauer's principle and the second law", Int. Jour. Theor. Phys. 39, 2217 (2000)
[Գ9] A. Campa, T. Dauxois and S. Ruffo, "Statistical mechanics and dynamics of solvable models with long-range interactions", Phys. Rep. 480, 57 (2009)
[Գ10] R. Marathe and J. M. R. Parrondo, "Cooling Classical Particles with a Microcanonical Szilard Engine", Phys. Rev. Lett. 104, 245704 (2010).
[Գ11] S. Vaikuntanathan and C. Jarzynski, "Modeling Maxwell's demon with a microcanonical Szilard engine", Phys. Rev. E 83, 061120 (2011)
[Գ12] D. Abreu and U. Seifert, "Extracting work from a single heat bath through feedback", EPL 94, 10001 (2011)
[Գ13] K. Ishikawa, B. Patton, Y.-Y. Jau and W. Happer, "Spin Transfer from an Optically Pumped Alkali Vapor to a Solid", Phys. Rev. Lett. 98, 183004 (2007)
[Գ14] H. Barnum et al., "Noncommuting Mixed States Cannot Be Broadcast", Phys. Rev. Lett. 76, 2818 (1996)
[Գ15] J. C. Wheeler, "Nonequivalence of the Nernst-Simon and unattainability statements of the third law of thermodynamics", Phys. Rev. A 43, 5289 (1991)
[Գ16] J. Gemmer, M. Michel and G. Mahler, "Quantum Thermodynamics", Springer, 2004

Աշխատանքի հիմնական արդյունքները

- Լոկալ սառեցման համատեքստում կառուցեցինք սառնարանի մոդել, որը կարող է գործել Կառնոյի արժեքին ասիմպտոտիկ կերպով մոտ ՕԳԳ-ով և ոչ զրո հզորությամբ: Բոլոր նախորդող մոդելները վերջավոր հզորությունների ռեժիմում ապահովում էին Կառնոյի արժեքից զգալիորեն ցածր ՕԳԳ [4]:
- Ուսումնասիրեցինք ջերմության տեղափոխման ուժեղացման խնդիրը՝ ջերմային պոմպի բավական ընդհանուր մոդել առաջին սկզբունքներից ելնելով ուսումնասիրելով: Գրականության մեջ առաջին անգամ մենք կառուցում ենք ՕԳԳ-ի համար ադեկվատ չափ և ցույց տալիս, որ այն վերևից սահմանափակ է մի մեծությամբ, որը կախված է թերմոստատների ջերմաստիճանների հարաբերությունից միայն: Այդ մեծությունն, այդպիսով, հանդիսանում է ջերմային պոմպերի համար Կառնոյի սահմանի անալոգ և ֆորմալ համընկնում է սառնարանների Կառնոյի արժեքի հետ [3]:
- Գլոբալ սառեցման համատեքստում ուսումնասիրեցինք միջուկային մագնիսական ռեզոնանսի ֆիզիկայում միջուկների դինամիկ սառեցման մեթոդի ընդհանրացումը: $T=0$ անհասանելիությունը դինամիկ սառեցման խնդրի դրվածքի ուղիղ հետևանքն է: Ի տարբերություն թերմոդինամիկայի 3րդ օրենքի $T=0$ անհասանելիության ձևակերպման, այն որևէ չապացուցված կամ թաքնված ենթադրություններ չի պարունակում: Եթե ռեզերվուարի էներգետիկ սպեկտրն անսահմանափակ է, ապա չկա մինիմալ ջերմաստիճան. հասանելի ջերմաստիճանների բազմության ինֆիմումը զրո է: Իսկ եթե ռեզերվուարի էներգետիկ սպեկտրի վերին սահմանը ֆիքսված է, ապա գոյություն ունի ոչ զրոյական մինիմալ ջերմաստիճան: Այդ մինիմումին հասնելու համար անհրաժեշտ աշխատանքը հակադրած համեմատական է նրան: Ինչևէ, փոքր ինչ բարձր վերջնական ջերմաստիճաններ թույլ տալը հնարավորություն է ընձեռում փոխել աշխատանքի աճի ռեժիմը գծայինից դեպի (բազմակի) լոգրաթիմիկի [1]:
- Մեր դինամիկ սառեցման սխեմայում երկմակարդականի համակարգը որպես թիրախ ընդունելով՝ բացահայտորեն հաշվում ենք մինիմալ հասանելի ոչ զրո ջերմաստիճանը ($T_{\min}$): $T_{\min}$ ձգտում է զրոյի՝ ռեզերվուարի էներգետիկ սպեկտրի վերին սահմանն անվերջություն տանելիս: Նաև ուսումնասիրվում են ռեզերվուարների այլ մոդելներ: Նրանց համար գտել ենք $T_{\min}$ -ը և անհրաժեշտ մինիմալ աշխատանքը՝ սառեցման դինամիկաներով օպտիմիզացնելով: $N>>1$ իդենտիկ սպիներից բաղկացած ռեզերվուարի համար կապեր ենք հաստատել

սառեցման ռեսուրսների և որոշ հարաբերական էնտրոպիաների միջև: Այս ռեզերվուարի միջոցավ հասանելի $T_{\min} \propto N^{-1}$: $T_{\min}$ հասնելու համար անհրաժեշտ մինիմալ աշխատանքը վերջավոր է և ռեզերվուարի պարամետրերի որոշ արժեքների դեպքում այն կարող է նաև լինել $T \ln 2$՝ թերմոդինամիկայի 2րդ օրենքով պահանջվող մինիմումը [1]:

- Հետազոտում ենք ցիկլիկ համիլտոնյան պրոցեսների միջոցով՝ ռեզերվուարի միկրոկանոնիկ վիճակից մաքսիմալ աշխատանքի քաղման խնդիրը: N նույնանման սպիներից բաղկացած ռեզերվուարի համար ցույց ենք տալիս, որ մաքսիմալ աշխատանքը, $W_{\max}$-ը, վերջավոր է $T < \infty$ դեպքում, և $W_{\max} \propto \sqrt{N \ln N}$ ֆիքսած $N >> 1$ և $T = \infty$ համար: Այս և ավելի ընդհանուր անալիզը մեզ հնարավորություն է տալիս վերաձևակերպել թերմոդինամիկայի 2րդ օրենքի Թոմսոնի ձևակերպումը. թերմոստատից ցիկլիկ համիլտոնյան պրոցեսների միջոցվ քաղված մաքսիմալ աշխատանքի և N-ի հարաբերությունը ձգտում է զրոյի երբ $N \to \infty$ [2]:
- Կանոնիկ հավասարակշիռ համակարգը (գտնվելով թերմոստատի ջերմաստիճանում) կարող է ուժեղցնել միկրոկանոնիկ թերմոստատից քաղված աշխատանքը առանց փոփոխելու իր սեփական վիճակը: Ուստի միկրոկանոնիկ իրավիճակում ազատ էներգիայի գաղափարն ընդհանուր դեպքում կիրառելի չէ: Նրա կրառելիությունը վերականգնվում է միայն բարձր ջերմասիտճանների ռեժիմում, բայց այն արդեն ներառում է զծային և ոչ թե ֆոն Նոյմանի էնտրոպիա [2]:
- Ուսումնասիրվում է մատրիցական էլեմենտների տեղափոխումը մի համկարգից (A)՝ մյուսը (B): Իդեալական տեղափոխման դեպքում ցույց ենք տալիս, որ տեղափոխված և/կամ նրանց հետ առնչվող էլեմենտների մասին հիշողությունն ամբողջությամբ ջնջվում է A-ի վերջնական վիճակից: Սահմանելով վիճակի՝ մեկ մատրիցական էլեմենտի մասին (լոկալ) հիշողության չափ, հետազոտում ենք ոչ իդեալական տեղափոխումը, որտեղ գտնում ենք, որ հնարավոր է պահպանել հիշողության ինչ-որ քանակություն՝ տեղփոխման ճշգրտության գնով: Այդ կոմպրոմիսն արտահայտվում է մի շարք համակարգից անկախ անորոշությունների առնչություններով [5, 6]:

Ատենախոսության շրջանակներում հրատարակված աշխատանքների ցանկը

[1] A.E. Allahverdyan, K.V. Hovhannisyan, D. Janzing and G. Mahler, "Thermodynamic limits of dynamic cooling", Phys. Rev. E **84**, 041109 (2011)

[2] A.E. Allahverdyan and K.V. Hovhannisyan, "Work extraction from microcanonical bath", EPL **95**, 60004 (2011)

[3] K.V. Hovhannisyan and A.E. Allahverdyan, "Thermodynamics of enhanced heat transfer: a model study", J. Stat. Mech. (2010) P06010

[4] A.E. Allahverdyan, K.V. Hovhannisyan and G. Mahler, "Optimal refrigerator", Phys. Rev. E **81**, 051129 (2010)

[5] A.E. Allahverdyan and K.V. Hovhannisyan, "Transferring elements of a density matrix", Phys. Rev. A **81**, 012312 (2010)

[6] K.V. Hovhannisyan, "Copying elements of density matrix", in Modern Problems in Optics and Photonics Proceedings of the International Workshop (held at YSU and IPR of NAS), 27 August - 2 Septemer 2009, Yerevan, Armenia, ed. by G.Y. Kryuchkyan, A.V. Papoyan and D.A. Antonosyan, p. 10-13 (Lusabats publishing house, 2010)

РЕЗЮМЕ

В этой диссертации изучаются фундаментальные пределы охлаждения. Они обусловлены законами квантовой механики и конечностью ресурсов в природе.

Есть два подхода к охлаждению. Первый подход локальный, т.к. он включает малые промежуточные системы, приводимыме внешними силами и совершающие циклы между двумя термостатми при температурах $T_h > T_c$. Если мишень охлаждения – холодный/горячий термостат, то машина называется холодильник/тепловой насос. Второй подход глобальный – внешние поля действуют на всю мишень охлаждения, например динамическое охлаждение ядер в ЯМР. Мы исследуем эти базовые механизмы охлаждения и их ограничения изучая достаточно общие квантовые модели – исходя из первых принципов. Найдены фундаментальные ограничения на эффективность использования ресурсов. Фундаментальные, ибо они, кроме внешних термодинамических параметров, включают только такие базовые свойства систем, как спектральная структура и размерность гильбертова пространства.

Некоторые пределы и на глобальное, и на локальное охлаждения были уже известны. Для последнего существенны два ресурса – работа и время цикла. Для холодильников значение Карно $T_c/(T_h - T_c)$ ограничивает КПД сверху. КПД определяется как отношение тепла отданного холодным термостатом за цикл и совершенной при этом работы. Изучая модель холодильника, состоящего из двух n-уровневых систем, взаимодействующих посредством пульсовидных внешних полей, мы показываем, что холодильник может работать с конечной мощностью и с эффективностью машины Карно. Мощность определяется как отношение выделенного тепла и времени цикла. Мы также показываем, что КПД у достаточно оптимальных холодилников имеет нижний предел, зависящий только от температур T_h и T_c.

Тепловой насос – это усилитель спонатанного потока тепла от горячего к холодному. Однако из-за неравновесного характера спонтанных процессов общих термодинамических границ для тепловых насосов не существовало. Здесь усиленная передача тепла исследована с помощью той-же модели, что и для холодильника. Мы находим максимальную спонатнную теплоту и показываем, что для ее увеличения необходимо совершить работу. Оказывается, что КПД можно определить как инкремент в теплоте поделенное на совершенную работу. Это КПД оказывается ограниченным сверху величиной $T_c/(T_h - T_c)$ – границей Карно для холодильников.

В рамках квазиравновесной термодинамики для широкого класса методов глобального охлаждения Нернст доказал т.н. 3-й закон термодинамики

– невозможно достичь абсолютного нуля температур посредством *физически разумных* процессов. Основная слабость этой формулировки в том, что понятие 'физически разумный процесс' формально не определено. Уточняя это понятие, мы приходим к изучению динамического охлаждения, где приводимая извне система охлаждается с помощью резервуара – квантовой системы в Гиббсовом начальном состоянии. Здесь ресурсы – это работа и запас поляризации резервуара (верхняя граница его спектра). Для двухуровневой системы мы в явном виде находим минимальную температуру $T_{\min} > 0$, которую она может достичь. Минимальная работа, необходимая для $T_{\min}$ растет как $T_{\min}^{-1}$. Наш результат по $T_{\min} > 0$ доказывает недостижимость абсолютного нуля без неоднозначности, сопровождающей традиционный термодинамический вывод. Для резервуара, состоящего из $N >> 1$ идентичных спинов мы показываем, что $T_{\min} \propto N^{-1}$ и находим максимальное охлаждение, совместимое с минимальной работой определенной разностью свободной энергии.

Процессы выделения работы охлаждают систему т.к. уменьшают ее энергию. Они важны для понимания сохранения и переработки энергии. Мы исследуем максимальную работу, которую можно выделить из микроканонического состояния резервуара из $N >> 1$ спинов с помощью циклических гамильтоновых процессов. Эта работа не может быть макроскопична, но может расти как $\sqrt{N \ln N}$. В общем случае, для системы присоединенной к микроканоническому термостату понятие свободной энергии не может быть определено, т.к. начиная с канонического равновесия с температурой термостата, эта система может увеличить работу из термостата не измененяя своего состояния. Это невозможно для систем, присоединенных к каноническим термостатам из-за связи работы и свободной энергии.

Перенос поляризации – еще один аспект охлаждения. Это базовый ингредиент квантовых имерений и переработки информации. Здесь ресурсы и ограничения связаны с информацией о начальном состоянии источника поляризации. Перенос поляризации моделируется переносом элементов матрицы плотности от одной системы (A) к другой (B). Здесь мы имеем дело с одним ресурсом, с памятью конечного состояния A о перенесенном элементе. Мы даем операционно совместимое определение локальной памяти состояния об одном матричном элементе, и находим, что память о перенесенных и некоторых других элементах полностью стирается. Обобщение на перенос с конечной точностью приводит к компромиссу между точностью и количеством сохраненной памяти. Этот компромисс выражен в виде не зависящих от деталей систем соотношений неопределенности.

ABSTRACT

In this thesis fundamental limitations on cooling are studies. They are caused by the finiteness of resources in nature and the laws of quantum mechanics.

There are two approaches to cooling. The first approach is local as it involves small intermediate systems that, being driven by an external force, reciprocate between two thermal baths at different temperatures $T_h > T_c$. If the target of cooling is the cold/hot bath, the cooler is called refrigerator/heat pump. The second approach is global – external fields act on the whole target of cooling, e.g. dynamic nuclear polarization (DNP) in NMR physics. We investigate these basic cooling mechanisms, together with their limitations, via a first principle study of rather general quantum models. Fundamental restrictions on the efficiency of resource usage are found. Fundamental, because in addition to external thermodynamic parameters they involve only such basic quantum properties of systems, as spectral structure and dimensionality of Hilbert space.

Several limitations both on local and global cooling were already known. For local cooling two resources are relevant – the work and the cycle time. For refrigerators the Carnot value $(=(1-T_c/T_h)^{-1}-1)$ limits the efficiency from above. The latter is defined as the heat taken from the cold bath per cycle over the work input. Studying a refrigerator model consisting of two n-level systems interacting via a pulsed external field we show that one can operate at finite power and as effectively as Carnot machine. Power is defined as extracted heat over cycle time. We also show that sufficiently optimal refrigerators have a lower bound on their efficiency that depends only on temperatures T_h and T_c.

Heat pump is designed to enhance the spontaneous transfer of heat from hot to cold. However, because of the non-equilibrium nature of the spontaneous heat flow, no general thermodynamic bound was known for the efficiency of heat pumps. Here the enhanced heat transfer is studied via the same model as for the refrigerator. We find the maximal possible spontaneous heat and show that to increase it a work input is indispensable. The efficiency is defined via the increment in the heat power over the amount of consumed work. This efficiency turns out to be bounded from above by $(1-T_c/T_h)^{-1}-1$, the Carnot bound for refrigerators.

Within macroscopic quasi-equilibrium thermodynamics some of the global cooling methods were summarized in the Nernst set-up of cooling and culminated into the so called third law of thermodynamics. It states that it is impossible to reach absolute zero of temperature via a *tractable* physical process. The essential weakness of this formulation is that the notion of tractability is not formalized generally. By clarifying this notion we end up studying dynamic cooling, where an externally

driven quantum system is cooled via a reservoir, a quantum system with initial canonical equilibrium state. Here the resources are the work done on the whole system and the polarization supply of the reservoir (the upper bound of its energy spectrum). For a two-level system we obtain explicitly the minimal possible temperature $T_{\min} > 0$ it can reach. The minimal work needed to reach $T_{\min}$ grows as $T_{\min}^{-1}$. Our results on $T_{\min} > 0$ prove unattainability of the absolute zero temperature without ambiguities that surround its traditional thermodynamic derivation. We also study cooling via a reservoir consisting of $N >> 1$ identical spins. Here we show that $T_{\min} \propto N^{-1}$ and find the maximal cooling compatible with the minimal work determined by the free energy.

Work extraction processes cool the system by lowering its energy. They are important for understanding the conversion and storage of energy. We study the maximal work extractable via cyclic Hamiltonian processes from a positive-temperature ($T > 0$) equilibrium, *microcanonical* state of a $N >> 1$ spin bath. The work cannot be macroscopic but can still scale as $\sqrt{N \ln N}$. For a system coupled to a microcanonical bath the concept of free energy does *not generally* apply, since such a system – starting from the canonical equilibrium at the bath temperature T – can enhance the work extracted from the bath without changing its state. This is impossible for any system coupled to a canonical bath due to the relation between the maximal work and free energy.

The polarization transfer is yet another aspect of cooling. It is the basic ingredient of quantum measurements and information processing. Here the interplay of resources and limitations relates to information on the initial state of the polarization source. We model polarization transfer via density matrix element transfer from one system (A) to another (B). The sole resource we deal with here is the memory of post-transfer state of A on the transferred element. We give an operationally consistent definition of the local memory of a state on its matrix element, and find that the memory on transferred and several other elements is completely erased. Generalization to a finite-accuracy transfer brings in a trade-off between the accuracy and the amount of preserved memory. This trade-off is expressed via system-independent uncertainty relations which account for local aspects of the accuracy-disturbance trade-off in quantum measurements.