

Их температур дахь кварк антикваркийн чөлөөт энерги

Г.Энхтуяа*, Ч.Содбилэг, П.Баттогтох

Физик, технологийн хүрээлэн, ШУА, Монгол улс

Энэ судалгааны ажлаараа өнгөөр дундажлагдсан чөлөөт энерги, халхлагдах масс, гүйдэг тогтмол гэсэн хэмжигдэхүүнүүдийг бүтэн КХД-ийн онолоор их температурт судлав. Симуляцийг tree level improved Symanzik gauge болон highly improved staggered quark үйлчлэлтэйгээр (2+1) фермионтой тохиолдолд гүйцэтгэж гэжж конфигурациудыг үүсгэсэн бөгөөд хэмжилтийг $32^3 \times 8, 48^3 \times 12$ хэмжээтэй латтисууд дээр, температурын $0.97T_c - 1.10T_c$, кварк хоорондын зайн 0.56 фм-2.5 фм мужид гүйцэтгэв. Чөлөөт энергийн зайнаас хамаарах хамаарлаас өнгөт цэнэгүүдийн халхлагдах үзэгдэл ажиглагдсан бөгөөд халхлагдах зайг $\sim 1 - 1.2$ фм гэж тогтоов. Халхлагдах масс, гүйдэг тогтмолын анализаас кваркуудын халхлагдах үзэгдэл нь температураас мөн хамаардаг болох нь харагдсан.

I. ОРШИЛ

Орчлон ертөнцийг бүрдүүлж байдаг бүх материйн хоорондын харилцан үйлчлэлийг гравитацийн, цахилгаан соронзон, сул, хүчтэй харилцан үйлчлэл гэсэн ертөнцийн 4 хүчний онолоор тайлбарладаг. Эдгээрээс хүчтэй харилцан үйлчлэлийн онолоор материйг бүрдүүлэгч хамгийн эгэл хэсэг болох кваркуудын харилцан үйлчлэлийг судалдаг. Бидний мэдэх цахилгаан соронзон онолд хоёр цэнэгийн хоорондын зайг холдуулахад харилцан үйлчлэлийн хүч нь буурдаг бол хүчтэй харилцан үйлчлэлийн онолд үүний эсрэг үзэгдэл ажиглагддаг. Өөрөөр хэлбэл, хоёр кваркийн хоорондын зайг холдуулахад тэдгээрийн харилцан үйлчлэлийн хүч зайнаас шугаман хамааралтай өсдөг бөгөөд энэ үзэгдлийг кварк конфайнмент гэж нэрлэдэг. Үүнээс шалтгаалж кваркууд байгаль дээр хэзээ ч дангаар буюу чөлөөт байдалтайгаар оршдоггүй, үргэлж адрон дотор хашигдсан хэлбэртэйгээр ажиглагддаг байна. Тиймээс кваркуудын харилцан үйлчлэлийг тэдгээрийн хоорондын зай болон температураас хамааруулан судлах нь кварк конфайнмент үзэгдлийг тайлбарлахад чухал ач холбогдолтой. Релятив хүнд ионы мөргөлдөөний туршилтуудын үр дүнгээс их температур ба нягттай үед кваркууд адроны төлвөөс кварк глюоны плазм (КГП) руу шилжих фазын шилжилт болно гэдгийг баталсан квант хромодинамикийн (КХД) сонирхолтой шинж чанаруудыг нээсэн байдаг [1]. Энэхүү хүнд ионы мөргөлдөөний туршилтаас гарч ирж байгаа

фазын шилжилтийн нарийвчилсан сигналыг гаргаж авахын тулд КГП-ын дулааны шинж чанарын тооцоог анхдагч зарчмаас нь хийх зайлшгүй шаардлагатай. Энэхүү анхдагч зарчмаас нь, хөндөх бус аргаар тооцоолол хийдэг арга бол Латтис КХД юм. Кварк глюоны плазмын хамгийн чухал шинж чанаруудын нэг бол өнгөт цэнэгүүдийн халхлагдах үзэгдэл юм [2]. Конфайнмент фазаас деконфайнмент болох критик температур T_c -ээс их ямар нэг температурын утганд өнгөт цэнэгүүдийн халхлагдах үзэгдэл явагдсанаас шалтгаалж кваркууд сална гэж үздэг [3]. Энэхүү хүнд кваркуудын халхлагдах үзэгдлийг латтис КХД-ийн онолоор тооцоолсон статик кварк антикваркийн чөлөөт энергийн анализаар судлах боломжтой. Чөлөөт энерги гэдэг бол систем ямар нэг бэхлэгдсэн температурт ($T \neq 0$) байхад тухайн системийн төлвийг илэрхийлдэг хэмжигдэхүүн. Кваркуудын хоорондын чөлөөт энергийн судалгаа нь цэвэр гэжж [4,5] болон бүтэн КХД-ийн онолуудаар [6-9] судлагдсан байдаг.

Энэхүү судалгааны ажлаараа бид хоорондоо R зайд байрлаж байгаа Поляковын гогцоо болон түүний эрмит хосмог гогцооны корреляцаас тооцоолсон өнгөөр дундажлагдсан чөлөөт энергийг кварк хоорондын зай ба температураас хамааруулан судалсан. Мөн чөлөөт энергийн датанд тохирох функцаар фит хийж халхлагдах масс, гүйдэг тогтмол гэсэн хэмжигдэхүүнүүдийг тооцоолон анализ хийлээ. Эдгээр хэмжигдэхүүнүүдийг судалсан өмнөх ажлуудын ихэнх нь синглет чөлөөт энергиэс тооцоолсон

* Electronic address: enkhtuyag@mas.ac.mn

байдаг. Харин бид өнгөөр дундажлагдсан чөлөөт энергиэс тооцоолж байгаагаараа онцлогтой. Энэ өгүүлэл нь таван бүлгээс бүрдэнэ. Эхний хоёр бүлэгт ерөнхий оршил, судлагдсан байдлууд болон онолын талаарх мэдээлэл өгөх бол гуравдугаар бүлэгт симуляци явуулсан нөхцөл болон параметруудийн талаар мэдээллийг оруулсан. Дөрөвдүгээр бүлэгт үр дүнгээ тайлбарласан бол тавдугаар бүлэгт дүгнэлт хэсгийг багтаасан. Төгсгөлд нь ашигласан материалын жагсаалтыг орууллаа.

II. ОНОЛЫН ХЭСЭГ

Кварк глюоны плазмын термодинамик шинж чанарыг цэвэр гэж онол болон динамик кварктай КХД-ийн онолоор судлахад хэд хэдэн чанарын ялгаа гарч ирдэг. Жишээлбэл, бүтэн КХД-ийн онолд термодинамик хэмжигдэхүүнүүдийн сингуляр чанартай “жинхэнэ” фазын шилжилтээс илүү crossover фазын шилжилт илэрдэг. Мөн конфайнмент фазад, цэвэр гэж болон бүтэн КХД-ийн онолуудаар тооцоолсон чөлөөт энергүүд өөр өөр шинж чанарыг үзүүлдэг. Цэвэр гэж онолоор тооцоолсон чөлөөт энергийн утга зайнаас хамаарч тасралтгүй өсдөг бол бүтэн КХД-ийн онолд кварк антикваркийн дунд хос үүсэх үзэгдлээс шалтгаалж кваркуудын хоорондын зай хол үед тодорхой нэг тогтмол утганд хүрдэг. Үүнийг утас тасрах (string breaking) үзэгдэл гэж нэрлэдэг.

Кваркийн чөлөөт энерги нь өнгөний синглет $F_1(R, T)$, октет $F_8(R, T)$ болон өнгөөр дундажлагдсан $F(R, T)$ сувгуудаар судлагдсан байдаг. Өнгөөр дундажлагдсан чөлөөт энерги нь синглет болон октет чөлөөт энергүүдтэй

$$e^{-\frac{F(R, T)}{T}} = \frac{1}{9} e^{-F_1(R, T)/T} + \frac{8}{9} e^{-F_8(R, T)/T} \quad (1)$$

гэсэн холбоотой. Өнгөөр дундажлагдсан болон синглет чөлөөт энергүүд нь адилхан таталцдаг шинж чанартай байдаг бол октет чөлөөт энерги нь түлхэлцдэг шинж чанартай байдаг [8,9].

Мөн их температур дахь кварк антикваркийн харилцан үйлчлэлийн шинж чанарыг илүү сайн тодорхойлох физик хэмжигдэхүүнүүдийн нэг бол халхлагдах масс юм. Халхлагдах массыг хөндөх онолын хоёрдугаар эрэмбийн β -функц ашиглан температурын утга бүр дээр тооцоолж

болно. Энд бид [6,7]-д тодорхойлсон илэрхийллийг авч үзэх бөгөөд Бүлэг 4.2-т латтис датанаас тооцоолсон халхлагдах массын утгуудтай харьцуулах болно. Хөндөх онолоор тооцоолсон халхлагдах масс нь

$$\frac{m_D(T)}{T} \equiv A \left(1 + \frac{N_f}{6} \right)^{\frac{1}{2}} g_{2-loop}(T) \quad (2)$$

гэж тодорхойлогдоно [6,7]. Энд A -чөлөөт параметр бөгөөд дататай хамгийн сайн тохирч байхаар бэхлэгддэг, хангалттай их температурт A болох ёстой гэж үздэг. Бид [6]-д олсон $A = 1.417(19)$ гэсэн утгыг ашигласан. $g_{2-loop}(T)$ нь хоёрдугаар эрэмбийн β -функц бөгөөд

$$g_{2-loop}^{-2}(T) = 25\beta_0 \ln \left(\frac{\mu T}{\Lambda_{\overline{MS}}} \right) + \frac{\beta_1}{\beta_0} \ln \left(2 \ln \left(\frac{\mu T}{\Lambda_{\overline{MS}}} \right) \right) \quad (3)$$

гэсэн хэлбэртэй байна. Энд β_0, β_1 -үүд нь

$$\beta_0 = \frac{1}{16\pi^2} \left(11 - \frac{2N_f}{3} \right)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{(16\pi^2)^2} \left(102 - \frac{36N_f}{3} \right)$$

байх ба бусад коэффициентуудыг [6]-д тодорхойлсны дагуу $\mu = 1.14\pi, \Lambda_{\overline{MS}} = 261$ МэВ гэж авсан.

III. СИМУЛЯЦИЙН НӨХЦӨЛ

Бид симуляцийг $32^3 \times 8, 48^3 \times 12$ хэмжээтэй латтисууд дээр, RHMC алгоритм ашиглан (2+1) фермионтой бүтэн КХД-ийн онолоор явуулсан. Энд хүнд кваркийн масс (m_s)-ыг β -ийн утга бүр дээр түүний физик утганд нь бэхлээд хөнгөн кваркийн масс m_l -ыг $m_s/m_l = 27$ байхаар сонгосон. Энэ нь хөнгөн кваркийн массын физик утганд харгалздаг. Хэмжилтийн статистик шуугианыг бууруулахын тулд бид градиент урсгалын арга ашигласан. Латтис симуляциас гарсан хэмжигдэхүүнүүдийн тоон утгуудыг физик нэгжээр илэрхийлэхийн тулд хэмжээсийн функц (scaling function) ашигладаг. Бидний ашигласан хэмжээсийн функц болон градиент урсгалын аргын дэлгэрэнгүйг [10]-аас харах боломжтой. Симуляци явуулсан параметруудийн утгуудыг Хүснэгт 1-д харууллаа.

Хүснэгт 1. Симуляцийн параметрууд.

$N_s^3 \times N_\tau$	β	T [МэВ]	T/T_c	a [фм]	N_{conf}	R/a
32 ³ ×12	6.390	156.5	0.97	0.156	5890	4-16
	6.423	161.9	1.00	0.150	6526	4-16
	6.445	165.7	1.03	0.147	6168	4-16
	6.474	170.7	1.06	0.142	7644	4-16
	6.500	175.3	1.09	0.139	8344	4-16
48 ³ ×12	6.794	157.3	0.98	0.105	3500	4-24
	6.850	166.2	1.03	0.099	3100	4-24
	6.910	176.3	1.10	0.093	2772	4-24

Хэмжилтийн статистик алдааг Жэйкнайф (Jackknife) аргаар үнэлсэн.

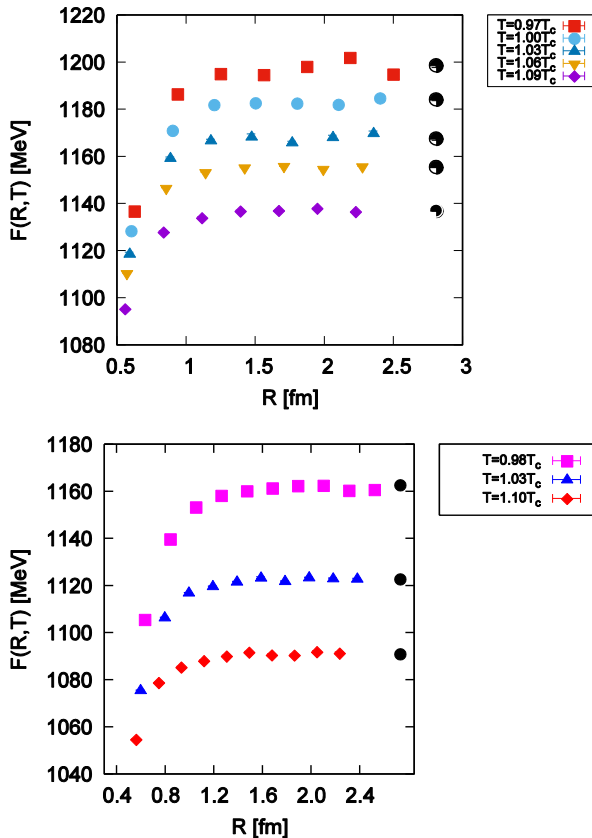
IV ҮР ДҮНГИЙН ХЭСЭГ

IV.1. Кварк антикваркийн чөлөөт энерги

Өнгөөр дундажлагдсан чөлөөт энергийг хоорондоо R зайд байрлах Поляковын хоёр гогцооны корреляцаас кварк хоорондын зай болон температур тус бүр дээр

$$F(R, T) = -\ln(P(0)P^+(R)) \cdot T \quad (4)$$

гэж тооцоолно. Тэгшитгэл 4-өөр тооцоолсон чөлөөт энергийн утгуудыг физик нэгжээр илэрхийлэн кварк хоорондын зай болон температураас хамааруулан, Зураг 1-д харуулав.



Зураг 1. Кварк-антикваркийн чөлөөт энерги $F(R, T)$ -ийн зай ба температураас хамаарах хамаарал. Дугуй

хар цэгүүд нь Тэгшитгэл 5 -д фит хийгээд гарсан $2F_Q$ -ийн утгууд.

Эхлээд чөлөөт энергийн утга кварк хоорондын зайнаас хэрхэн хамаарахыг авч үзье. $q\bar{q}$ -ийн хоорондох зай холдоход $F(R, T)$ ихсэж байгаад, кваркуудын зайн тодорхой нэг утгаас цааш тогтмол утганд хүрч байна. Энэ нь динамик кваркуудыг тооцсон тохиолдолд конфайнмент болон деконфайнмент фазуудын аль алинд нь ажиглагддаг бөгөөд конфайнмент фазад утас тасрах, деконфайнмент фазад өнгөт цэнэгүүдийн халхлагдах үзэгдэл болж байгааг тус тус илэрхийлдэг. Температураас хамаарах хамаарлын хувьд температур ихсэхэд чөлөөт энергийн утга буурч байна. Энэ нь температур ихсэхэд кваркуудын бие биедээ таталцдаг хүчний хэмжээ буурч байгааг харуулж байна. Харин кваркууд хоорондоо ойр зайтай буюу ойролцоогоор 0.50 фм – 0.65 фм байхад температураас хамаарч буурах бууралтын хэмжээ бага байгаа бол 1 фм-ээс их үед бууралтын хэмжээ их байна. Синглет чөлөөт энергид анализ хийсэн ажлуудад богино зайд $F_1(R, T)$ –ийн утга температураас үл хамаарах бөгөөд тэг температур дахь потенциал $V(R)$ – тэй давхцаж байгаад зай холдоход $F_1(R, T)$ нь $V(R)$ -ээс хазайж, температураас хамааралтай болж байна гэж дүгнэсэн байдаг [7,9]. Энэ нь бидний $F(R, T)$ -ийн үр дүнтэй тохирч байна. Мөн чөлөөт энерги тогтмол утганд хүрч байгаа зайн утга температур ихсэхэд буурч байна. Энэ нь их температур дахь халхлагдах үзэгдлийн бас нэг шинж чанар юм.

Мөн бид Бүлэг 4.2-т Тэгшитгэл 5-аар фит хийж тооцоолсон $2F_Q$ буюу дан кваркийн чөлөөт энергийг хоёр дахин авсантай тэнцүү хэмжигдэхүүний утгыг Поляковын хоёр гогцооны корреляцаас тооцоолсон чөлөөт энергийн утгатай харьцуулан, Зураг 1-д хар дугуй цэгээр тэмдэглэн зурлаа. Зургаас температур тус бүрийн хувьд хол зай дахь $F(R, T)$ -ийн утгууд нь $2F_Q$ -тэй тэнцүү байгаа нь харагдаж байна.

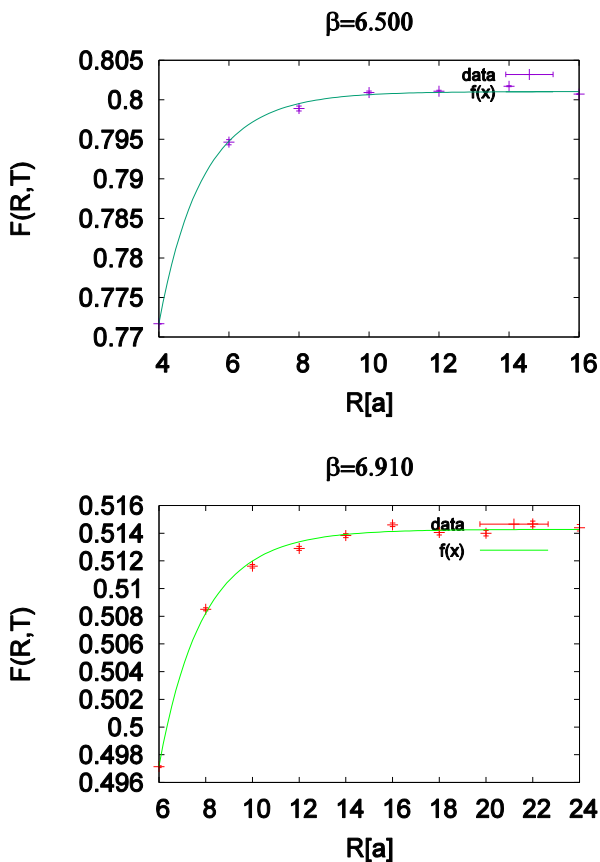
IV.2. Халхлагдах масс ба гүйдэг тогтмол

Чөлөөт энергийн зайнаас хамаарах хамааралд тохирох функцаар фит хийснээр $F(R, T)$ -ийн хол зай дахь экспоненциал халхлагдах шинж чанарт анализ хийхэд шаардлагатай халхлагдах масс болон гүйдэг тогтмолыг тооцоолох боломжтой

болдог. Фитийг T_c -ээс их температур дахь $F(R, T)$ -ийн датанд хийх бөгөөд [9]-д тодорхойлсон халхлагдсан Кулоны төрлийн

$$F(R, T) = -\frac{\alpha(T)}{R} e^{-m_D(T)R} + 2F_Q \quad (5)$$

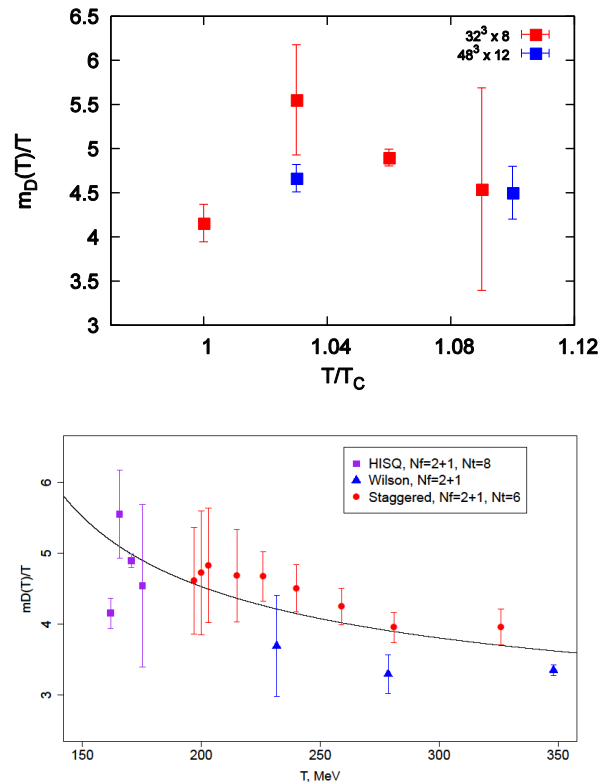
функцийг ашиглана. Энд $\alpha(T)$ -гүйдэг тогтмол, $m_D(T)$ -Дебай халхлагдах масс, F_Q -дан кваркийн чөлөөт энерги. Энэ сонгосон функц нь бидний датанд хэр тохирч байгааг харуулахын тулд жишээ болгож $32^3 \times 8$ латтисын хувьд $\beta = 6.500$, $48^3 \times 12$ латтисын хувьд $\beta = 6.910$ үед хийсэн фитийн үр дүнгүүдийг Зураг 2-д харууллаа.



Зураг 2. $F(R, T)$ -ийн зайнаас хамаарах хамааралд Тэгшитгэл 5-аар фит хийсэн үр дүн.

Зургаас бидний сонгосон функц дататай нэлээд сайн тохирч байгаа нь харагдаж байна. Фитээс тооцоолсон халхлагдах массын температураас хамаарах хамаарлыг Зураг 3-д үзүүлэв. Зургийн зүүн гар талын $m_D(T)$ -ын температурын хамаарлаас харахад критик температураас их гэхдээ T_c -тэй ойр байх тодорхой нэг температур хүртэл $m_D(T)$ өсөөд дараа нь температур өсөхөд буурч байна. Энэ нь [7]-д синглет чөлөөт энергиэс тооцоолсон халхлагдах массын температураас хамаарах хамааралтай адил

байна. Энэ ажилд $m_D(T)$ нь T_c -ээс их тодорхой нэг утга хүртэл өсөөд, цааш буурч байсан. Мөн латтисын эзэлхүүн ихсэхэд халхлагдах массын утга буурч байгаа нь харагдаж байна.



Зураг 3. Халхлагдах масс $m_D(T)$ -ын температураас хамаарах хамаарал.

Баруун гар талын плотонд бид өөрсдийн $32^3 \times 8$ латтис дээр тооцоолсон үр дүнг бусад судлаачдын болон Бүлэг 2-д тодорхойлсон хөндөх онолын үр дүнтэй харьцуулсан. Энд [9] $32^3 \times 4, 6, 8, 10, 12$ латтис дээр, Вильсон кварк үйлчлэлтэй тохиолдолд тооцоолсон бол [7] $24^3 \times 6$ латтис дээр, стаггерд кварк үйлчлэлтэй тохиолдолд тооцоолсон. Эдгээр нь бүгд (2+1) фермионтой КХД-ийн онолоор тооцоолсон үр дүнгүүд. Хэдийгээр бидний өөрсдийн үр дүнтэйгээ харьцуулж байгаа халхлагдах массын утгууд нь синглет чөлөөт энергиэс тооцоолсон, тоон утгын хувьд шууд харьцуулж болохгүй ч синглет болон өнгөөр дундажлагдсан чөлөөт энергиүд нь адилхан таталцдаг шинж чанартай учраас хамаарал болон чанарын хувьд харьцуулах боломжтой гэж дүгнэсэн. Мөн бидний харьцуулах латтисын эзэлхүүнүүд өөр өөр байгаа. Зөвхөн Вильсон үйлчлэлтэйгээр, $T=348$ МэВ үед олсон $m_D(T)$ бидний HISQ үйлчлэлтэйгээр тооцоолсонтой ижил латтисын

эзэлхүүнтэй буюу $32^3 \times 8$ байна. Гэсэн хэдий ч, халхлагдах массын утга латтисын эзэлхүүнээс бага хамаардаг учир харьцуулах боломжтой юм. Зургаас харахад HISQ болон стаггерд кварк үйлчлэлтэй тооцоолсон $m_D(T)$ -ын утгууд Вильсоны үйлчлэл ашиглан олсон утгуудаас их байна. Мөн стаггерд болон Вильсоны үйлчлэлтэй ажлууд нь бидний HISQ үйлчлэлтэй тооцоолсноос их температуруудад $m_D(T)$ -г олсон бөгөөд зургаас харахад эдгээр ажлуудын $m_D(T)$ -үүд нь HISQ үйлчлэлтэй тооцоолсон $m_D(T)$ -ээс температур ихсэх чиглэлд буурах хандлагатай байна.

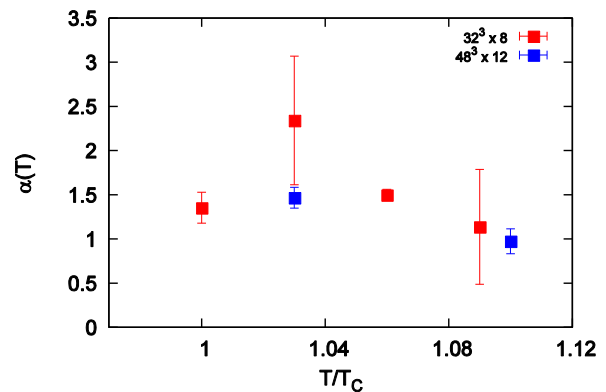
Мөн харьцуулах үүднээс Зураг 3-ын баруун гар талын плотонд Бүлэг 2-г хөндөх онолоор тодорхойлсон халхлагдах массын утгуудыг зурсан. Зургаас Вильсон кваркийн үйлчлэлтэй тооцоолсон $m_D(T)$ -ийн утгууд нь хөндөх онолын үр дүнгээс бага байсан бол HISQ болон стаггерд кваркийн үйлчлэлтэй тооцоолсон $m_D(T)$ -ийн үр дүнгүүд нь хөндөх онолын шулуунтай ойролцоогоор давхцаж байгаа нь харагдаж байна.

Энд Вильсон үйлчлэлтэй үед $T = 348$ МэВ байхад латтисын эзэлхүүн нь бидний HISQ үйлчлэлтэй, латтисын эзэлхүүнтэй ижил буюу $32^3 \times 8$ байна. Тиймээс бид өнгөний сувгууд болон үйлчлэлийн нөлөөг тооцохгүйгээр кваркуудын массаас $m_D(T)$ хэрхэн хамаарахыг тооцох боломжтой. [11]-д их температуруудад халхлагдах массын утганд кваркийн массын үзүүлэх нөлөө бага байдаг гэж тайлбарлажээ. Тиймээс бид кваркийн массын нөлөөг тооцохгүй байж болно. Латтисын эзэлхүүн өөр тохиолдолд бусад нөлөөг тооцохгүйгээр, латтисын хэмжээ өөрчлөгдөхөд тоон утгууд хэрхэн өөрчлөгдөхийг авч үзэж болно. Ерөнхий тохиолдолд латтисын эзэлхүүн ихсэхэд физик хэмжигдэхүүний тоон утгууд буурах хандлагатай байдаг. [10]-д 232 МэВ, 279 МэВ утгууд дээр бодож гаргасан халхлагдах массууд нь $N_t = 12, 10$ буюу илүү нягтаршилтай латтисууд дээр тооцоологдсон. Эдгээр халхлагдах массын утгууд нь $N_t = 8$ буюу бидний тооцоолсонтой ижил латтисын эзэлхүүнтэй болох үед $m_D(T)$ -ын утга ихсэж, хөндөх онолын шулуунтай ойролцоогоор давхцаж магадгүй юм. Харин [8]-д олсон $m_D(T)$ -үүд нь жижиг латтис дээр

тооцоологдсон. Латтисын хэмжээг нь нэмэгдүүлж, $32^3 \times 8$ болговол халхлагдах массын утгууд буурч, мөн адил хөндөх онолын шулуунтай илүү сайн давхцах магадлалтай юм.

IV.3. Гүйдэг тогтмол

Кварк хоорондын холбоосын хүчийг илэрхийлдэг өөр нэг чухал хэмжигдэхүүн бол гүйдэг тогтмол $\alpha_{(qq^-)}(R, T)$. Энд бид $\alpha_{(qq^-)}(R, T)$ -г кварк хоорондын зайнаас хамаарахгүй, зөвхөн температураас хамааралтай гэж авч үзэх бөгөөд $\alpha(T)$ гэж тэмдэглэнэ. Энэхүү гүйдэг тогтмол $\alpha(T)$ -г халхлагдах масстай адилаар Бүлэг 4.1-т гүйцэтгэсэн фитийн анализаас гаргаж авсан бөгөөд Зураг 4-т температураас хамааруулан плотоллоо.



Зураг 4. Гүйдэг тогтмол $\alpha(T)$ -ын температураас хамаарах хамаарал.

Зургаас харахад $\alpha(T)$ -ын температураас хамаарах хамаарал нь $m_D(T)$ -ын температураас хамаарах хамааралтай ижил байна. T_c -гэй ойр температурын утгуудад $\alpha(T)$ -ын утгууд $\sim 1.5 - 2.5$ гэсэн их утгуудтай байгаа бол температур ихсэхэд буурсаар бидний тооцоолсон хамгийн их температур $1.10T_c$ -д 0.97 болж байна. Мөн бидний тооцоолсон $\alpha(T)$ -ын утгууд нь [7]-д 2-фермионтой КХД-ийн онолоор, [12]-д цэвэр гэж онолоор тооцоолсон үр дүнгүүдтэй тоон утгын хувьд ойролцоогоор тохирч байна. Эдгээр ажлуудад температур ихсэхэд $\alpha(T)$ тасралтгүй буурсаар $T = 1.15T_c$ болоход $\alpha(T) \leq 1$ болсон байна.

V. ДҮГНЭЛТ

Энэ ажлаар бид (2+1) фермионтой бүтэн КХД-ийн онолоор симуляци явуулан, хоорондоо R зайд байрлах Поляковын хоёр гогцооны корреляцаас гаргаж авсан чөлөөт энергийн

датанд анализ хийв. $32^3 \times 8,48^3 \times 12$ хэмжээтэй латтисууд дээр, температурын $0.97T_c - 1.10T_c$, кварк хоорондын зайн $0.56 \text{ фм} - 2.5 \text{ фм}$ мужид хэмжилтийг гүйцэтгэв.

Чөлөөт энерги $F(R, T)$ нь температур бүрийн хувьд кварк хоорондын зайн тодорхой нэг утгаас эхлэн тогтмол утганд хүрч байгаа нь, мөн хол зайд кварк антикваркийн чөлөөт энерги нь дан кваркийн чөлөөт энергийг 2 дахин авсантай тэнцүү болж байгаа нь өнгөт цэнэгүүдийн халхлагдах үзэгдэл явагдаж, кварк антикваркийн хоорондын харилцан үйлчлэл халхлагдаж байгааг харуулж байна. Чөлөөт энергийн зайнаас хамаарах хамаарлаас хоёр кваркийн халхлагдах зайг ойролцоогоор $1 - 1.2 \text{ фм}$ гэж тогтоов.

Халхлагдах масс $m_D(T)$, гүйдэг тогтмол $\alpha(T)$ -ийн температураас хамаарах хамааралд анализ хийхэд деконфайнмент фазад, T_c -ээс хол байхад температур ихсэхэд эдгээр хэмжигдэхүүний утга буурч байсан нь их температурт кварк антикваркуудын халхлагдах үзэгдэл нь температураас мөн хамаардаг болохыг харуулж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] K. Yagi, T. Hatsuda and Y. Miake, Quark-Gluon Plasma, Cambridge University Press, Cambridge, 2005
- [2] L. D. McLerran and B. Svetitsky, Quark liberation at high temperature: A Monte Carlo study of SU(2) gauge theory, Phys. Rev. D24 (1981) 450.
- [3] T. Matsui and H. Satz, J/ψ Suppression by Quark-Gluon Plasma Formation, Phys. Lett. B178 (1986) 416-422.
- [4] O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann and M. Lutgemeier, Heavy quark potentials in quenched QCD at high temperature, Phys. Rev. D62 (2000) 034021.
- [5] A. Nakamura and T. Saito, Long-distance behavior of qq color dependent potentials at finite temperature, Prog. Theor. Phys. 111 (2004) 733-743.
- [6] O. Kaczmarek and F. Zantow, Static quark anti-quark interactions in zero and finite temperature QCD. I. Heavy quark free energies, running coupling and quarkonium binding, Phys. Rev. D71 (2005) 114510.
- [7] K. Petrov and RBC-Bielefeld collaboration, Free energy of static quarks and the renormalized Polyakov loop in full QCD, PoS (LATTICE 2007) 217 (2007).
- [8] Y. Maezawa et al., Heavy-quark free energy, Debye mass and spatial string tension at finite temperature in two flavor lattice QCD with Wilson quark action, Phys. Rev. D75 (2007) 074501.
- [9] Y. Maezawa et al., Free energies of heavy quarks in full-QCD lattice simulations with Wilson-type quark action, Nucl. Phys. A830 (2009) 247c-250c.
- [10] S. Chagdaa, E. Galsandorj, B. Purev, O. Kaczmarek and H. T. Ding, Flux tube with dynamical fermions from high temperature S(3) lattice gauge theory, PoS (LATTICE 2019) 170 (2019).
- [11] A. Bazavov, et al., Meson screening masses in (2+1) flavour QCD, Phys. Rev. D100 (2019) 094510.
- [12] O. Kaczmarek, F. Karsch, F. Zantow and P. Petreczky, Static quark-antiquark free energy and the running coupling at finite temperature, Phys. Rev. D70 (2004) 074505.