



ХҮЧТЭЙ ХОЛБООСТ МУЖААС СУЛ ХОЛБООСТ МУЖ РУУ ШИЛЖИХ ШИЛЖИЛТИЙГ ТЭГ БУС ТЕМПЕРАТУРТ $SU(2)$ ЛАТТИС ГЭЙЖ ОНОЛООР СУДЛАХ НЬ

Ч. Содбилэг¹, Г.Энхтуяа^{1*}

¹ ШУА-ийн Физик Технологийн Хүрээлэн, Монгол Улс
Цахим шуудан: enkaa_tuyaa@yahoo.com

Редакцид ирүүлсэн: 2017.07.19

ХУРААНГУЙ

Энэхүү судалгааны ажлаар тэг температуртай үед конфайнмент фазад илэрдэг үзэгдэл болох глюоны урсгалын хоолойн таталцлын коэффициентийн утга нь хүчтэй холбоост мужаас сул холбоост муж руу шилждэг шилжилтийг тэг бус температурт буюу өөрөөр хэлбэл тодорхой температуртай тохиолдолд $SU(2)$ цэвэр латтис гэйж онолоор симуляци хийн ажиглахыг зорилго.

Бид глюоны урсгалын хоолойн өргөнийг урсгалын хоолой доторх орны хүчлэгийн хромо цахилгаан компонентийн хөндлөн түгэлтээс гарган авч кварк хоорондын зай ба температураас хамаарах хамаарлыг гаргав. Кваркуудын хоорондын зайг ихэсгэхэд глюоны урсгалын хоолойн өргөн өргөсдөгийг дахин батлан харуулсан. Харин холбоосын тогтмолын утгыг ихэсгэхэд урсгалын хоолойн өргөн тодорхой нэг утга хүртэл монотон байж байгаад тухайн утганд огцом өргөсөж байгааг харуулсан болно.

Түлхүүр үгс: Lattice QCD, quark confinement, roughening transition, string tension, flux tube;

ОРШИЛ

Квант хромодинамикийн (КХД) онолын судалгаанд кварк конфайнмент үзэгдлийн механизмыг ойлгох нь маш чухал асуудал байдаг. Конфайнмент гэдэг нь кваркууд хоорондоо ойр зайтай байхад квант электродинамикийн диполийн орон шиг холбоосын тогтмолын логарифм хамааралтай Кулон-төст потенциал давамгайлдаг бол хол зайд потенциал нь зайнаас шугаман хамааралтай өсдөг үзэгдэл юм. Энэхүү потенциал нь зайнаас шугаман хамааралтай өсөх үеийн коэффициентийг

таталцлын коэффициент (σ) гэж нэрлэдэг. Тодорхой температур болон нягттай квант хромодинамикийн судалгаа нь хүнд ионы мөргөлдөөний туршилт, мөн түүнчлэн маш олон астрофизикийн асуудлуудад хамааралтай юм. Тодорхой температуртай тохиолдолд потенциалыг тооцоход тухайн нэг температурт потенциал зайнаас шугаман хамаардаг хамаарал хадгалагддаг боловч температур ихсэхэд энэ хамаарлын хэвтээ тэнхлэгтэй үүсгэх налалтын өнцөг буурч байгааг харуулсан олон судалгаанууд



байдаг [1-4]. Энэ шугаман потенциал нь кваркуудын хооронд үүсдэг глюоны орны хоолойн төрх байдлаас шалтгаалж үүсдэг бөгөөд хоорондоо тодорхой зайд байгаа статик кваркуудын хоорондох хүч юм. Тоон тооцоолдолд энэ хүчийг зөвхөн харьцангуй бага $q\bar{q}$ зайн тохиолдолд л хэмжиж чаддаг. Кваркуудын хоорондох зай

Латтис дээр потенциалыг

$$V(R) = -\lim \left[\frac{1}{T} \ln W(R, T) \right] \quad (1)$$

гэж томъёолдог ба энд $W(R, T)$ нь огторгуй, хугацааны өргөсөлт нь тус тус R, T байх Вилсоны гогцооны магадлалын утга.

Вилсоны гогцооны магадлалын утга конфайнмент фазад талбайн хуулиар (σRT)

$$W(R, T) = e^{-\sigma RT - \alpha(R+T) + \gamma} \quad (2)$$

хэлбэртэй байна. Эндээс бид Кройцын харьцааг [5]

$$\chi(R, T) = -\ln \left(\frac{W(R, T)W(R-1, T-1)}{W(R, T-1)W(R-1, T)} \right) \quad (3)$$

судлан -г ялгаж чадна.

Өөрөөр хэлбэл, хэрэв Вилсон гогцоо нь тэгшитгэл 2-т өгөгдсөн аргаар R, T -с хамаардаг бол $\chi(R, T)$ эдгээр хувьсагчуудаас үл хамаарах болж глюоны урсгалын хоолойн таталцлын коэффициенттэй давхцдаг.

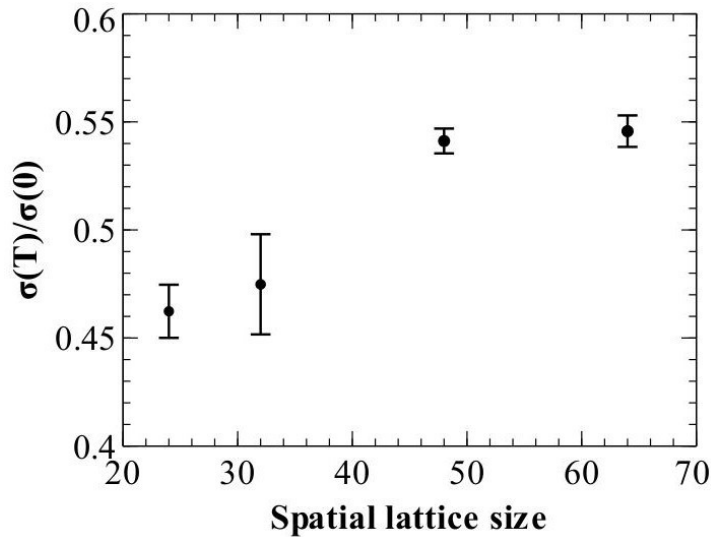
Таталцлын коэффициент σ -ийн жинхэнэ утгыг одоо болтол тогтоогоогүй байгаа бөгөөд латтис симуляцаар түүний бусад физик хэмжигдэхүүнүүдээс хэрхэн хамаардаг хамаарлыг тодорхойлсон байдаг. Одоог хүртэл σ -г тодорхойлохын тулд өөр өөр олон аргаар оролдсоор байгаа юм. Тухайлбал, σ нь гэж групуудын хэмжээс тус бүрийн хувьд өөр өөр утгатай байдаг. Кварк конфайнментийн механизм нь КХД ба $SU(N)$ цэвэр гэж онолуудад нэлээд төсөөтэй юм. КХД-ийн онолд

нь латтисын алслалт a -аас хамаарах бөгөөд a -г сонгох нь бэрхшээлтэй асуудлуудын нэг юм. a -г хэтэрхий их байхаар сонговол эргээд тасралтгүй физик рүү шилжихэд бэрхшээлтэй байдаг бол, хэтэрхий нарийн байхаар сонговол бага хэмжээтэй латтис дээр хүчний асимптотик хэлбэрийг харах боломжгүй болдог.

тодорхойлогддог шинж чанартай байдаг бол деконфайнмент фазад периметрийн хуулиар $(R+T)$ тодорхойлогддог. $W(R, T)$ -ийн хэлбэрийг авч үзвэл

бодит утга нь $N = 3$ байдаг. Гэвч $SU(N)$ цэвэр гэж онол нь конфайнментийг илүү сайн ойлгох ерөнхий нөхцлийг бидэнд өгдөг. Тухайлбал, $N > 3$ болоход ялгаатай таталцлын коэффициентүүд бүхий глюоны урсгалын хоолойн шинэ хэлбэрүүд гарч ирдэг.

Түүнчлэн саяхан 2012 онд Кардосо, Бикудо [6] нар таталцлын коэффициентийг кварк-антикварк хосын өнгөөр дундажлагдсан чөлөөт энергээс тооцож гаргасан ба латтисын эзлэхүүн өөр өөр байх тохиолдолд эзлэхүүнээс хамааруулан Зураг 1-д зурсан байна. Тэд бага эзлэхүүнтэй латтисуудын хувьд эзлэхүүн ихсэхэд таталцлын коэффициент ихсэж байсан бол латтисын эзлэхүүн томрох тусам таталцлын коэффициентэд эзлэхүүний үзүүлэх нөлөө алга болж байна хэмээн дүгнэсэн.



Зураг 1: Таталцлын коэффициент латтисын орон зайн эзлэхүүнээс хамаарах хамаарал [6].

Мөн [6]-д $\sigma(T)$ -ийн критик муруйг температураас хамааруулан судалсан. Тэд $0.5T_c$ уганд таталцлын коэффициент тэг температуртай үеийн таталцлын коэффициент (σ_0)-тэй тэнцүү болж байгаа бөгөөд түүнээс цааш температур ихсэхэд буурч байгааг харуулсан. Ийнхүү таталцлын коэффициентийн утгыг тодорхойлох оролдлогуудын явцад конфайнмент мужид энэ таталцлын коэффициентийн шинж чанар өөрчлөгдөж байгаа нэгэн шилжилт болж байгааг ажигласан. Үүнийг **roughening transition** гэж нэрлэсэн бөгөөд энэ бол гадаргуу дээрх roughening шилжилтийн төрлийн үзэгдэл юм. Roughening бол гурван хэмжээст статистик механикт бидний маш сайн мэддэг үзэгдэл бөгөөд хангалттай их энергитэй үед тохиолддог хоёр фазын хоорондох интерфэйсийн делокализацийг тайлбарладаг [7].

Энэ үзэгдлийг абелын $U(1)$, $Z(N)$ ба абелын бус $SU(N)$ гэж групуудын хувьд 3 ба 4 хэмжээст тохиолдлуудад мөн дурын хэмжээсэнд гэх зэргээр олон өөр тохиолдлуудад судалсан [8-12]. Латтис КХД-ийн онолд энэ шилжилтийн үед глюоны орны хоолойн өргөн сарнидаг ба хоолойн гадаргуу бүхэлдээ делокализаци

болдог боловч roughening температурын орчимд таталцлын коэффициент тэг болдоггүй тодорхой ямар нэгэн утгатай байдаг.

Энэ үзэгдэл бол конфайнмент фазаас деконфайнмент фазад шилжих шилжилт биш юм. Учир нь Вилсон гогцоо талбайн хуулиар тодорхойлогддог ба таталцлын коэффициентийг тэг биш гэж авч үзэж байвал кварк конфайнмент хадгалагдаж байна гэж үздэг.

Мөн конфайнмент нь глюоны орны хоолойн хэлбэр, бүтэцтэй шууд холбоотой учраас конфайнментийн үзэгдлийг ойлгохын тулд үндсэндээ глюоны урсгалын хоолой бусад физик хэмжигдэхүүнээс хэрхэн хамаарч хувирч өөрчлөгдөж байгааг судлах хэрэгтэй.

Энэ ажил нь тодорхой температуртай үед, конфайнмент фазад глюоны урсгалын хоолойн өргөн холбоосын тогтмол буюу температураас хэрхэн хамаарч байгааг харахыг зорисон юм. Өөрөөр хэлбэл тэг температурт болдог глюоны урсгалын хоолойн өргөн сарних үзэгдэл тодорхой температуртай тохиолдолд ажиглагдах уу?, мөн тэг температурт $\beta \approx 1.9$ дээр сарнидаг сарнил тодорхой температурт холбоосын



тогтмолын ямар утганд сарних вэ?, тэг температуртай үеийнхтэй адил байх уу?

эсвэл өөр байх уу? зэрэг асуултаудад хариулт авах зорилготой юм.

ХҮЧТЭЙ ХОЛБООСТ ЗАДАРГАА

Хөндөх онолыг хэрэглэж болдоггүй зарим үзэгдлүүд байдаг бөгөөд жишээлбэл, динамикмассынүүсгэгч, кваркконфайнмент гэх мэт юм. Тиймээс хөндөх бус аргуудыг шаарддаг. Энэ хөндөх бус аргуудын нэг нь хүчтэй холбоост задаргааны арга юм. Энэ арга нь латтис холбоосын тогтмол (β)-ийн зэрэгт цуваагаар задардаг. Хүчтэй холбоост задаргаа нь латтис онолоор хязгаарлагддаг бөгөөд тасралтгүй онолын хувьд шууд хэрэглэж болдоггүй.

Энэхүү хүчтэй холбоост задаргааны онцлог нь зөвхөн асимптотик задаргаанд хүргэдэг хөндөлтийн онолоос ялгаатай бөгөөд нийлэлтийн тодорхой мужтай. Тухайн муж дотор латтис гэж онолоор кварк конфайнмент үзэгдлийн талаар мэдээлэл авахад энэ аргыг хэрэглэдэг. Мөн энэ аргыг Монте Карло симуляцийн үр дүнг шалгахад хэрэглэдэг. Хүчтэй холбоост задаргаа бол ямар нэг фазын шилжилтийг тайлбарлахад маш сайн шалгарсан арга юм.

Дээр дурдсанчлан Вилсоны гогцооны магадлалын утгын шинж чанараар гэж инвариант физик хэмжигдэхүүний утгыг тодорхойлж өөр өөр фазуудыг ялгах

боломжтой байдаг учраас энэ бол маш чухал юм.

Функционал интегралын төлөвт эвклидийн квант орны онол ба статистик механикын хоорондын аналогоор тасралтгүй физикийн холбоосын тогтмол g^2 нь температуртай ижил үүрэг гүйцэтгэдэг. Хүчтэй холбоос буюу бага β -ийн хувьд ($\beta=2N/g^2$) латтис гэж онол нь их температур дахь статистик системд харгалздаг. Тиймээс хүчтэй холбоост задаргааг статистик механикийн их температур дахь кластер задаргааны аргаар гаргадаг.

Тэг температурт, конфайнмент фазад вортексийн чөлөөт энергийн шинж чанар нь Вилсон гогцооны магадлалын утгын шинж чанартай адилаар талбайн хуулийг дагадаг. Энэ талбайн коэффициент нь статик кваркуудын хоорондох таталцлын коэффициенттэй тэнцүү.

1981 онд Мюнстер цэвэр латтис гэж онолоор, $SU(2)$ гэж груп ашиглан, 4-н хэмжээст тохиолдолд вортексийн чөлөөт энергээс хүчтэй холбоост задаргааг арван хоёрдугаар эрэмбэ хүртэл

$$\begin{aligned} \sigma_{\infty} &= -\ln u - 4u^4 + 8u^6 - 12u^4v - 56u^8 + 120u^{10} - 168u^8v - 72u^6v^2 - 12v^5 - \frac{4732}{3}u^{10}v - \\ &- 888u^{10}v - 396u^8v^2 - 48u^6v^2 - 48u^4v^4 + 36v^6 - 48u^9w - 24v^5wu^{-1} \dots = \\ &= -\ln u - 4u^4 - \frac{176}{8}u^8 - \frac{10936}{405}u^{10} - \frac{1532044}{1215}u^{12} - \dots \end{aligned} \quad (4)$$

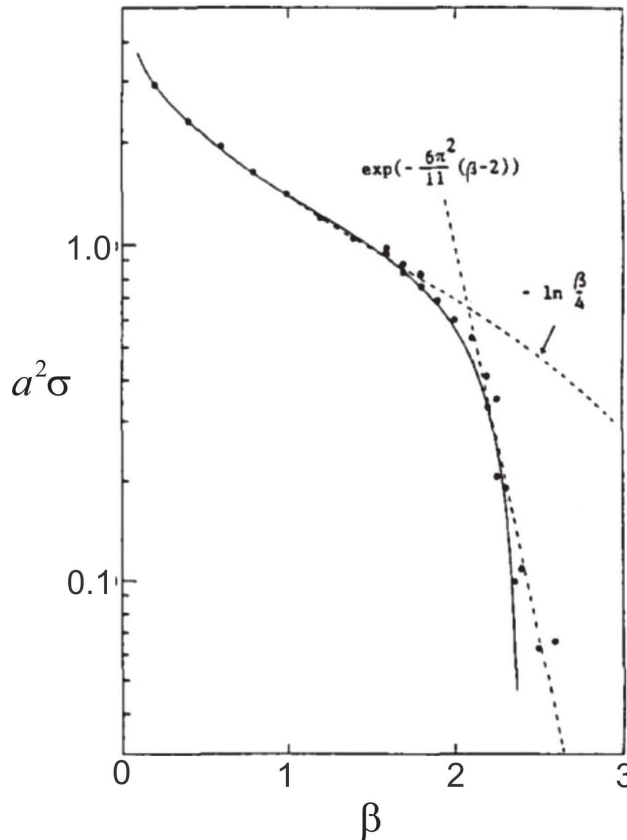
гэж тооцсон [13]. Мөн 1980 онд Кройц $SU(2)$ онолоор Монте Карло арга ашиглан глюоны урсгалын хоолойн таталцлын коэффициентын утгыг гаргаж авсан [14]. Дээрх хоёр үр дүнг хамтад нь β -аас хамааруулан Зураг 2-д зуржээ. Мөн энэ

зурагт $\exp\left(-\frac{6\pi}{11}(\beta-2)\right)$ томъёогоор харуулсан дахин нормчлолын группээр

илэрхийлэгдэж гарсан сул холбоост задаргааны (weak coupling expansion) муруйг багтаасан байна [14]. Хүчтэй холбоост задаргааны арван хоёрдугаар эрэмбийн үр дүнтэй харьцуулах үүднээс хамгийн бага эрэмбийн үр дүнг мөн багтаасан. Зургаас харахад $2.2 < \beta < 2.5$ байх мужид МК дата нь сул холбоост задаргааны экспоненциал муруйг дагаж байна. Өөрөөр

хэлбэл таталцлын коэффициент нь хүчтэй холбоост шинж чанараас сул холбоост шинж чанар руу шилжиж байна. Мөн хүчтэй холбоост задаргааг арван хоёрдугаар эрэмбэ хүртэл тооцоход энэ задаргааны муруй нь мөн сул холбоост задаргааны

муруйг дагаж байгаа нь харагдаж байна. Үүнийг roughening transition гэж нэрлэдэг. Өөрөөр хэлбэл, β -ийн тодорхой нэг уганд хүрээд дээрх шилжилт болохыг онолоор болон симуляцийн үр дүнгээр аль алианаар нь батлан харуулж байна.



Зураг 2: Глюоны орны таталцлын коэффициент холбоосын тогтмлоос хамаарах хамаарал [13].

2008 онд Мюнстер нар хүчтэй холбоост задаргааг тодорхой N_r -тай буюу тодорхой температуртай үед эхний хэдэн эрэмбийг

$$f(N_r, u) = -\frac{3}{N_r} u^{4N_r} c^{N_r} \left[1 + 12N_r u^4 - \frac{1556}{81} N_r u^6 + \left(83N_r^2 + \frac{41417}{243} N_r \right) u^8 + O(u^{10}) \right] \quad (5)$$

гэж тооцсон. Энд $u = \frac{I_2(\beta)}{I_1(\beta)} = \frac{1}{4}\beta - \frac{1}{96}\beta^3 + \frac{1}{1536}\beta^5 - \frac{1}{23040}\beta^7 + O(\beta^9)$

Цаашидын судалгааны ажилд энэхүү тодорхой температур дахь хүчтэй холбоост задаргааны үр дүнг симуляцаас гаргаж

авсан үр дүнтэй харьцуулах шаардлагатай юм.

**ГЛЮОНЫ УРСГАЛЫН ХООЛОЙН ӨРГӨН**

Таталцлын коэффициентын утга хүчтэй холбоост мужаас сул холбоост мужруу шилжих шилжилт болж байгаа сигналыг мөн глюоны урсгалын хоолойн бүтэц шинж чанараас тодорхойлж болдог. Үүний тулд бид глюоны урсгалын хоолойн өргөн

хэмээх хэмжигдэхүүнийг авч үзэх хэрэгтэй. Уг хоолой доторх энергийн нягтын хөндлөн түгэлтийг бид глюоны орны хоолойн физик өргөн гэж үздэг. Өнгөт орны энергийн нягтыг [15]

$$\varepsilon(x) \propto \langle q\bar{q} | \text{Tr} E^2(x) | q\bar{q} \rangle - \langle q\bar{q} | q\bar{q} \rangle - \langle \text{Tr} E^2(x) \rangle \quad (6)$$

тэгшитгэлээр тооцдог бол латтис дээр тооцоолохдоо Вилсоны гогцоо болон плакетийн корреляцаар

$$\varepsilon(x) \propto \frac{\langle W(C)P_x \rangle - \langle W(C) \rangle \langle P_x \rangle}{\langle W(C) \rangle} \quad (7)$$

гэж илэрхийлдэг. Харин тодорхой температуртай тохиолдолд Поляковын гогцоо, плакетийн корреляцаар дараах

$$\varepsilon(x) \propto \frac{\langle L(0)L(R)P_x \rangle - \langle L(0)L(R) \rangle \langle P_x \rangle}{\langle L(0)L(R) \rangle} \quad (8)$$

томъёогоор тооцоолдог. Эндээс энергийн нягтын хөндлөн түгэлтийг

$$D^2 = D^2(R/2) = \frac{\int d^2 x_{\perp} x_{\perp}^2 \varepsilon(x)}{\int d^2 x_{\perp} \varepsilon(x)} \quad (9)$$

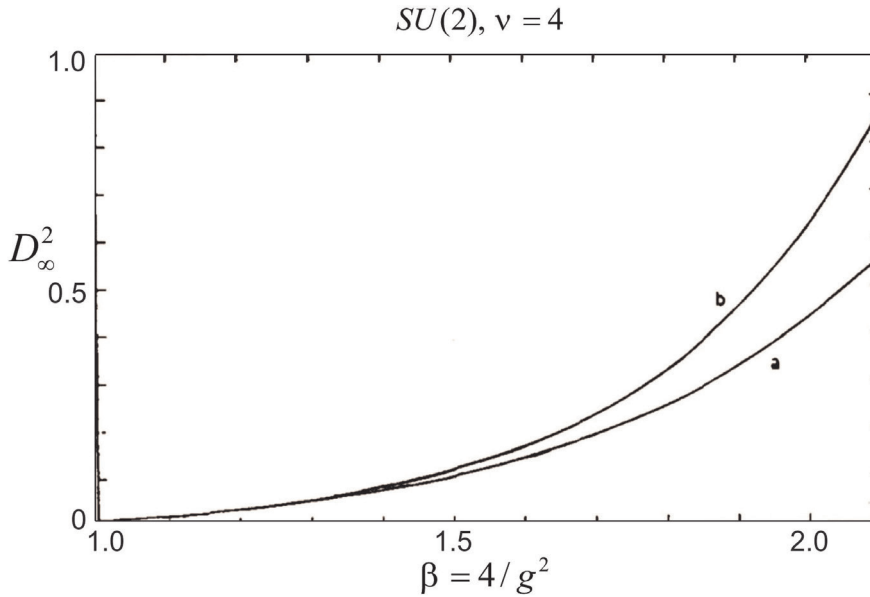
гэж олно.

1981 онд Люшер нар хүчтэй холбоост задаргааны аргаар глюоны урсгалын хоолойн өргөнийг тэг температурт мөн арван хоёрдугаар эрэмбэ хүртэл

$$D_{\infty}^2 = 4 \left\{ u^4 + 2u^6 + \frac{92}{3}u^8 + \frac{37727}{405}u^{10} + \frac{1412551}{1215}u^{12} + \dots \right\} \quad (10)$$

гэж бодсон байдаг [15]. Энэ цувааг холбоосын тогтмолоос хамааруулан Зураг 3-д харуулав. Зургаас харахад конфайнмент фазад бидний мэдэх эффектив утасны (string) флуктуацаас гарч ирдэг хамаарлын дагуу $\beta=2$ хүртэл 0-оос 0.5 хүртэл монотон өсөж байна, гэвч $\beta \geq 2$ болоход өсөлт

нь илүү хурдан болж байгаа нь харагдаж байна. Энэ нь Кройц [14]-ын Монте Карло тооцооллоос гарч ирсэн таталцлын коэффициент хүчтэйгээс сул холбоосруу шилждэг холбоосын тогтмолын угтатай тохирч байна.



Зураг 3: Глюоны урсгалын хоолойн өргөн β -аас хамаарах хамаарал [15].

Мөн энэ [15] ажилд хэрэв тасралтгүй хязгаарт $D_\infty^2 < \infty$ байдаг бол $\beta \geq 2$ байхад $\sigma \cdot D_\infty^2$ нь тодорхой нэг тогтмол утганд

хүрэх ёстой гэж үзэн [13]-д σ -г бодож гаргасан хүчтэй холбоост цувааг ашиглан

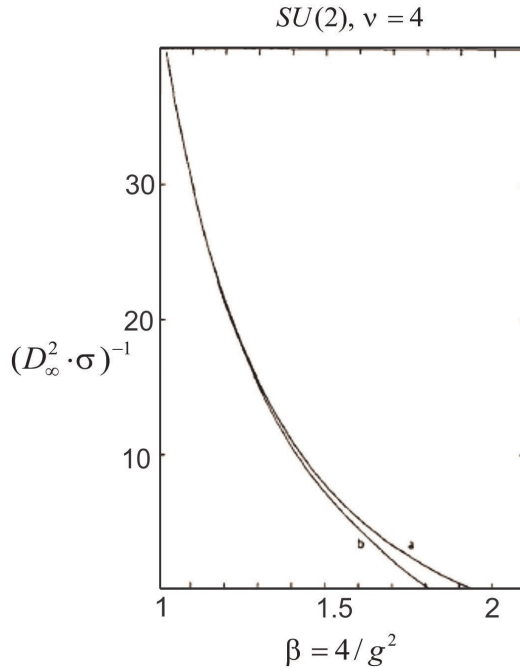
$$(\sigma D_\infty^2)^{-1} = \frac{-1}{4u^4 \ln u} \left\{ -2u^2 - 4u^4 \left(\frac{20}{3} + \frac{1}{\ln u} \right) + 4u^6 \left(\frac{2179}{405} + \frac{2}{\ln u} \right) - u^8 \left(\frac{244903}{1215} - \frac{48}{\ln u} - \frac{16}{(\ln u)^2} \right) + \dots \right\} \quad (11)$$

гэж гаргаж авсан. Харгалзах 6 ба 8-р эрэмбийн муруйнуудыг-аас хамааруулан зурсан байдаг бөгөөд Зураг 4-д харууллаа. Ингэхэд $(\sigma \cdot D_\infty^2)^{-1}$ нь тодорхой нэг утганд хүрч байна гэхээсээ илүүтэйгээр ойролцоогоор $\beta \approx 1.9$ дээр тэг болж байна. Энэ утга нь $\beta \geq 2$ байх шилжилтийн мужийн яг доор нь байгаа юм. Энэ үед глюоны урсгалын хоолойн өргөнийг сарниж байна гэж үздэг бөгөөд энэхүү холбоосын тогтмолын утгыг roughening утга гэж нэрлэдэг. Roughening цэг дээр глюоны орны хоолойн гадаргуу бүхэлдээ

делокализации (delocalized) болдог боловч тодорхой бодит хэвээр байх ба тодорхой таталцалтай хэвээр байдаг.

Бид симуляцаас гарсан үр дүнгүүдийг боловсруулан глюоны урсгалын хоолойн өргөнийг тооцоолж, кваркуудын хоорондох зайнаас болон холбоосын тогтмолоос хамаарах хамаарлыг олох зорилготой. Глюоны урсгалын хоолойн өргөнийг тооцохдоо уг хоолой доторх хромоцахилгаан ба хромосоронзон орнуудын хөндлөн түгэлтэнд Кулоны

$$\frac{a_1}{(a_2 + x_\perp^2)^3} \quad (12)$$



Зураг 4: $(\sigma \cdot D_\infty^2)^{-1}$ нь β аас хамаарах хамаарал. a ба b нь харгалзан b ба δ -р эрэмбийн үр дүнгүүд [15].

болон экспоненциал

$$b_1 e^{-b_2 x_\perp} \tag{13}$$

[16] функцуудаар фит хийж фитийн параметрийн утгуудаар тэгшитгэл 9-ийн интегралыг бодож өргөнийг тооцоолсон. Хромосоронзон орны байгуулагчууд болон хромоцахилгаан орны перпендикуляр

байгуулагчийн утгууд нь ойролцоо харин цахилгаан орны параллель байгуулагчийн утга нь илүү их утгатай байгааг [3]-т тооцоолж харуулсан байдаг. Иймээс бид зөвхөн цахилгаан ба соронзон орны параллель байгуулагчуудад фит хийж үр дүнг тооцоолсон. Манай тохиолдолд соронзон орны параллель байгуулагчийн датаг кулоны функц

$$\frac{1}{2\beta} B_\parallel^2(r, x_\perp) = \frac{a_1}{(a_2 + x_\perp^2)^3} \tag{14}$$

сайн илэрхийлж байсан бол цахилгаан орны параллель байгуулагчид фит хийхэд нэмэлт экспоненциал функц

$$\frac{1}{2\beta} E_\parallel^2(r, x_\perp) = \frac{a_1}{(a_2 + x_\perp^2)^3} + b_1 e^{-b_2 x_\perp} \tag{15}$$

шаардагдаж байсан юм. Эндээс фитийн параметрүүдээр энергийн нягтын өргөнийг

$$a^{-2} D^2 = \frac{6}{b_2^2} \tag{16}$$

ХЭМЭЭН ТООЦООЛСОН.

ХЭМЖИЛТ БА ҮР ДҮН

Хэмжилтийг $16 \times 8^2 \times 4$ хэмжээтэй латгис дээр, хоёр кваркийн хоорондох зайг 4a-8a хүртэлх утганд хийсэн. $N_{\zeta}=4$ үед деконфайнмент фазын шилжилт болох критик холбоосын тогтмолын утга $\beta_c = 2.2985 \pm 0.0006$ байдаг бол бид конфайнмент фазад хэмжилт хийнэ. Мөн хүчтэй холбоост мужаас сул холбоост мужруу шилжих шилжилтийн тэг температур дахь холбоосын тогтмолын утгатай харьцуулах ёстой. Дээрх хоёр шалгууртаа нийцүүлэн бид холбоосын

тогтмолын $\beta = 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2$ гэсэн утгуудыг сонгож аван хэмжилтийг гүйцэтгэсэн. 400000 удаагийн хэмжилтийг боловсруулан статистик боловсруулалт хийв.

Фитийн чөлөөт параметрийн утгууд болон 16 томъёогоор бодож гаргасан урсгалын хоолойн өргөний утгыг Хүснэгт 1-д үзүүлэв. Дараах үр дүнгүүд нь бүгд физик нэгжрүү шилжүүлээгүй буюу латгисын алслалт a -ын нэгжээр илэрхийлэгдсэн болно.

Хүснэгт 1: Фитийн чөлөөт параметрийн утга ба глюоны урсгалын хоолойн өргөн

r/a	β	a_1	a_2	b_1	b_2	a^2D^2	χ
4	1.6	8.36(15.25)	2.55(1.79)	-0.56(31)	0.87(44)	7.92(37)	0.154
	1.7	3.49(14.00)	0.94(1.19)	3.19(3.44)	1.35(69)	3.24(94)	0.0034
	1.8	-616.14(4.90)	24585.9(6.5E+16)	-2.70(3.29)	2.56(1.36)	0.91(22.12)	0.0092
	1.9	9708.2(2.09E+04)	77.80(60.36)	0.23(02)	3.72(1.73)	0.35(6.12)	0.0062
	2.0	-5136(9227)	66.98(43.47)	0.13(1)	0.95(9)	6.64(2.27)	0.6075
	2.1	1.52(42)	4.55(52)	0.053(1)	1.29(5)	3.61(93)	0.2695
	2.2	0.57(14)	2.93(26)	0.0100(6)	0.65(4)	14.20(1.47)	5.17
6	1.6	2.45E+05	0.09(62.93)	-0.09(4)	-0.04(16)	3750(96)	0.02656
	1.7	-9.05E+05	316.59(1737.00)	0.17(7)	0.097(17)	740.74(45.34)	0.0534
	1.8	10138.7(1.5E+04)	37.62(21.1)	-0.21(8)	0.17(14)	207.61(19.76)	0.0942
	1.9	3.39(14.28)	0.94(1.26)	-3.24(2.83)	1.23(16)	3.96(3.12)	0.0515
	2.0	0.008(2)	-0.47(7)	0.22(34)	0.76(8)	10.38(2.52)	0.31.65
	2.1	165(430)	26.66(26.39)	0.02(1)	1.97(1.89)	1.54(23.02)	0.2059
	2.2	0.43(82)	4.90(3.39)	0.010(2)	0.62(15)	15.60(5.80)	1.36
8	1.6	2.54E+07(3.58E+08)	646(3041)	0.20(4)	0.02(8)	15000(96)	0.0684
	1.7	-1.68(4.67)	2.38(2.36)	0.01(10)	1.22(9.73)	4.03(191.41)	0.0991
	1.8	18.54(29.09)	5.23(54.32)	0.33(7)	0.33(9)	0.55(6.54)	0.0754
	1.9	-189864(1.52E+06)	202.02(560.0)	0.06(1)	0.04(10)	113.42(2.08)	0.0514
	2.0	-65.46(165.7)	12.05(11.31)	0.029(21)	-0.10(23)	600(55.2)	0.0842
	2.1	-6.51E+06(4.44E+07)	560(1224)	0.050(9)	0.10(7)	495(15.27)	0.1238
	2.2	0.22(30)	3.73(1.79)	-0.003(1)	-0.01(12)	15000(144)	0.23

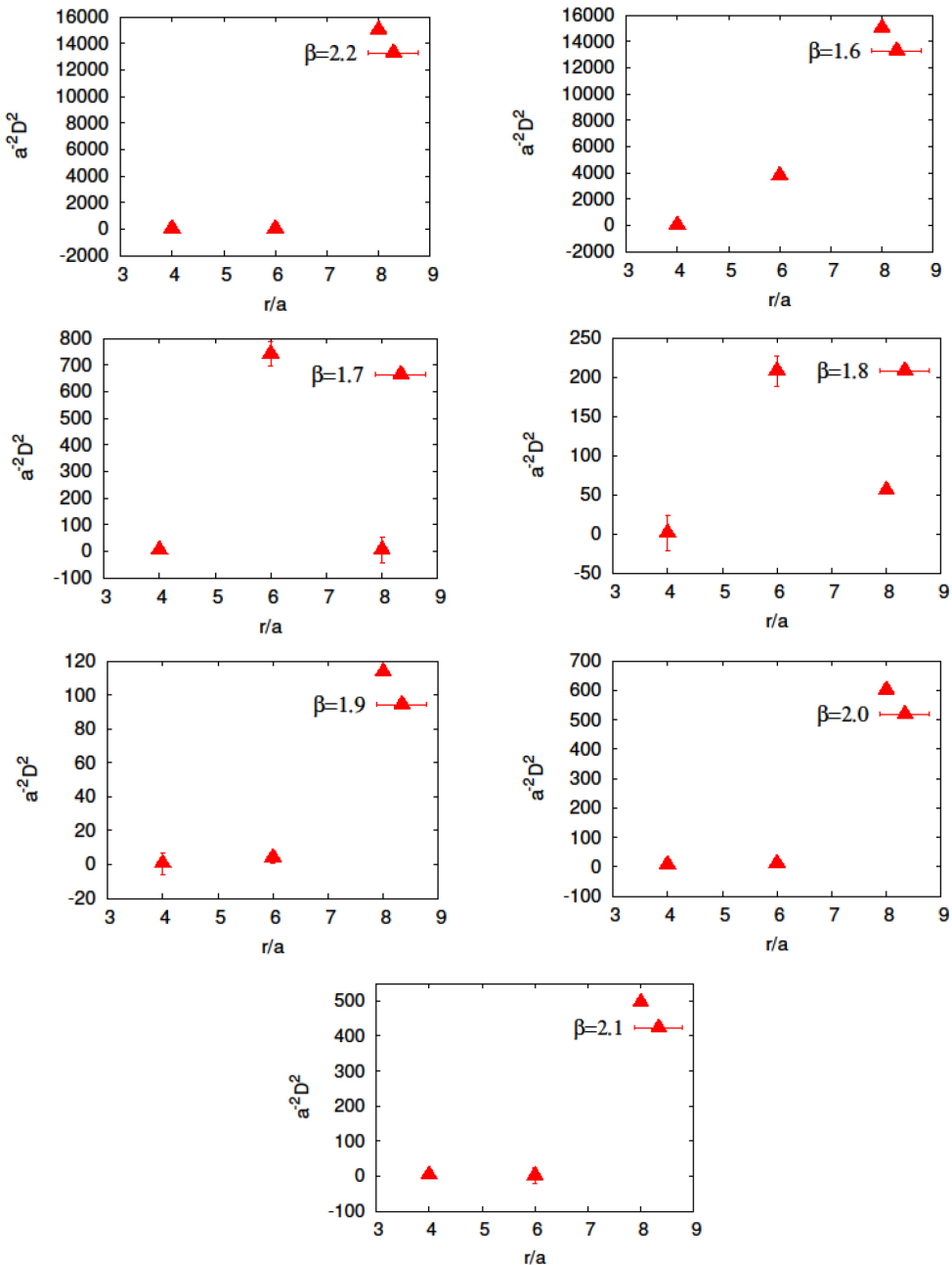
Зураг 5-д холбоосын тогтмолын утга тус бүрийн хувьд глюоны урсгалын хоолойн өргөний зайнаас хамаарах хамаарлыг зурж үзүүллээ. Харин Зураг 6- д дээрх зургуудаа хамтад нь нэг хавтгайд зурж хамаарлыг харуулав. Глюоны урсгалын хоолойн өргөн

кваркуудын хоорондох зайнаас хамаарч шугаман өргөсдгийг [17] харуулсан байдаг. Эдгээр хоёр зургаас харахад бидний үр дүн дээрх ажлын дүгнэлттэй ерөнхий хамаарлаараа тохирч байгаа нь харагдаж байна.

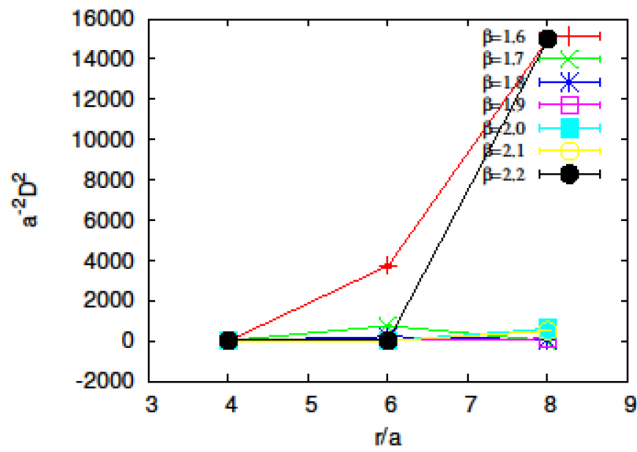


Зураг 7-д урсгалын хоолойн өргөн холбоосын тогтмолоос хамаарах хамаарлыг $r=4a$, $6a$ $8a$ байх тохиолдлуудад зурж үзүүлээ. Зураг 8-д Зураг 7-ын графикуудыг нэгтгэн зурсан. Зургаас харахад $r=4a$

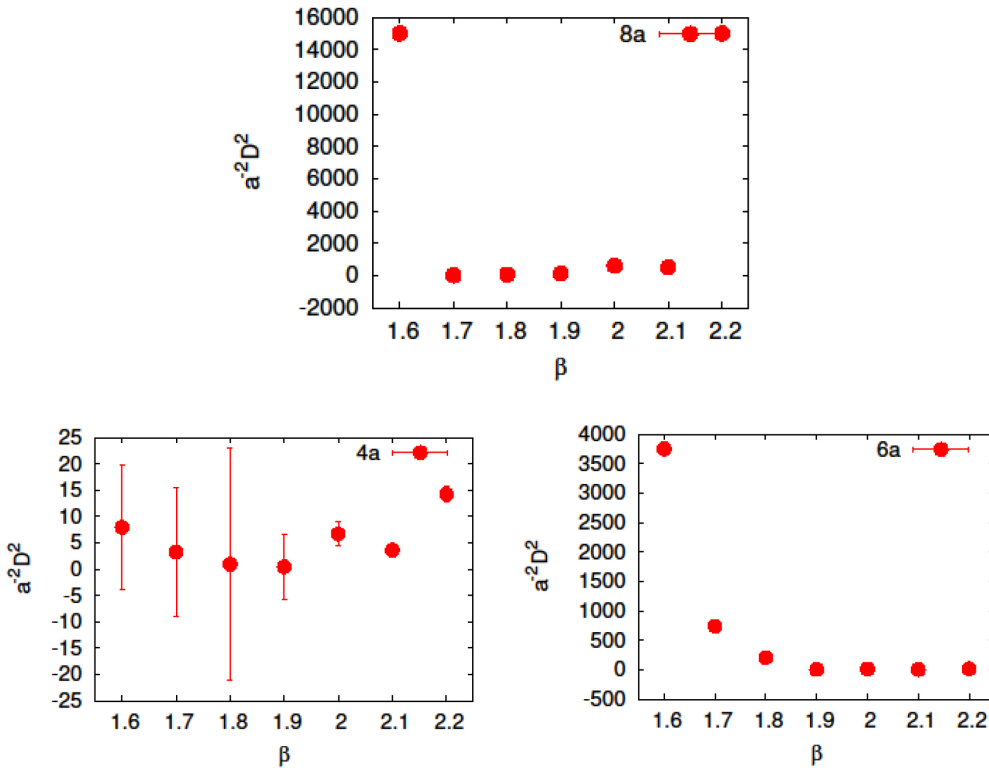
үед $\beta=2.2$ дээр бага зэргийн өргөсөлт ажиглагдсан бол $r=8a$ байх үед $\beta=1.6$ -аас 2.1 тогтвортой байж байгаад $\beta=2.2$ уганд огцом өргөсөж байна.



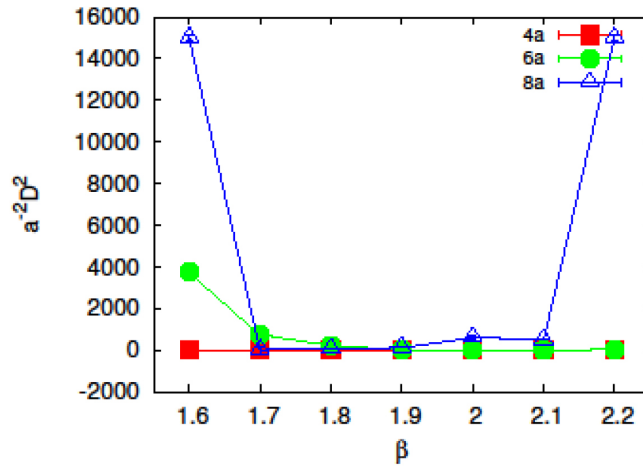
Зураг 5: Глюоны урсгалын хоолойн өргөн холбоосын тогтмолоос хамаарах хамаарал.



Зураг 6: Глюоны урсгалын хоолойн өргөн кваркуудын хоорондох зайнаас хамаарах хамаарал.



Зураг 7: Глюоны урсгалын хоолойн өргөн холбоосын тогтмолоос хамаарах хамаарал.



Зураг 8: Глюоны урсгалын хоолойн өргөн холбоосын тогтмолоос хамаарах хамаарал.

ДУГНЭЛТ

Бид энэ ажлаар тэг биш температурт, конфайнмент фазад глюоны урсгалын хоолойн бүтэц шинж чанар холбоосын тогтмол ба хоёр кваркийн хоорондох зайнаас хамаарч хэрхэн өөрчлөгдөж байгааг судлав.

Латтис онолоор бага β -ийн утганд симуляци хийж гүйцэтгэхэд үүсэх утгууд нь флуктуац ихтэй гардаг учраас бидний үр дүн статистик шуугиан ихтэй, дүгнэлт хийхэд хүндрэлтэй байсан хэдий ч дараах дүгнэлт хийлээ. Хоёр кваркийн хоорондох зай холдоход глюоны урсгалын хоолойн өргөн өргөсдөгийг дахин батлан харуулав. Харин холбоосын тогтмолын тодорхой мужид уг өргөн монотоны буюу тогтвортой

байсан бол тодорхой нэг утганд огцом өргөсөж байна гэсэн дүгнэлтийг хийлээ. Эндээс тодорхой температурт глюоны урсгалын хоолойн өргөн сарниж байна гэж дүгнэв. Энэ утга манай тохиолдолд буюу $N_c=4$ байхад $\beta=2.2$ байв. Холбоосын тогтмолын энэ утга нь $0.79T_c$ -д харгалзана. Иймээс тэг температурт $\beta=1.9$ байдаг холбоосын тогтмолын утга тодорхой температурт өөр байна.

Цаашид илүү том латтис дээр $0.79T_c$ -ийн эргэн тойрон дахь холбоосын тогтмолын утгуудад хэмжилт хийх шаардлагатай гэсэн дүгнэлтэнд хүрлээ. Түүнчлэн таталцлын коэффициентийг тооцоолж, холбоосын тогтмолоос хамаарах хамаарлыг гаргана.

**НОМ ЗҮЙ**

- [1] O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann and M. Lutgemeimer, *Phys. Rev. D*62 034021, 2000.
- [2] O. Kaczmarek, F. Karsch, P. Petreczky and F. Zantow, *Phys. Rev. D*70 074505, 2004.
- [3] S. Chagdaa, *Flux tube profiles at high energy, Doctoral dissertation, 2008.*
- [4] S. Chagdaa, E. Laermann, G. Gombojav and E. Galsandorj, *Mongolian Journal of Physics* 33, 2016.
- [5] M. Creutz, *Quarks, Gluons and Lattices, Cambridge university Press, 1983.*
- [6] N. Cardoso and P. Bicudo, *Lattice QCD computation of the SU(3) String tension critical curve, Phys. Rev. D*85 077501, 2012
- [7] J.M. Drouffe, *Nucl. Phys. B*170 [FS1] 91, 1980.
- [8] G. Munster and P. Weisz, *Nucl. Phys. B*180 [FS2] 13, 1981.
- [9] G. Munster and P. Weisz, *Nucl. Phys. B*180 [FS2] 330, 1981.
- [10] J. M. Drouffe and J. B. Zuber, *Nucl. Phys. B*180 [FS2] 253, 1981.
- [11] J. M. Drouffe and J. B. Zuber, *Nucl. Phys. B*180 [FS2] 264, 1981.
- [12] A. Hasenfratz, E. Hasenfratz and P. Hasenfratz, *Nucl. Phys. B*180 [FS2] 353, 1981.
- [13] G. Munster, *Nucl. Phys. B*180 [FS2] 23, 1981.
- [14] M. Creutz, *Phys. Rev. D*21 2308, 1980.
- [15] G. Munster, *Nucl. Phys. B*180 [FS2] 1, 1981.
- [16] R. Sommer, *Nucl. Phys. B*306 181, 1988
- [17] A. Allais and M. Gaselle, *Journal of High Energy Physics, JHEP* 0901 073, 2009.



THE ROUGHENING TRANSITION IN SU(2) LATTICE GAUGE THEORY AT FINITE TEMPERATURE

Ch. Sodbileg¹, G. Enkhtuya^{1*}

¹ Institute of Physics and Technology, MAS, Mongolia

*corresponding author, e-mail: enkaa_tuyaa@yahoo.com

Abstract: In this work, we have tried to observe the roughening transition in SU(2) pure gauge theory at finite temperature by performing numerical simulation which occurs at zero temperature in confined phase.

The physical width of the flux tube has been determined from the transverse profiles of chromoelectric component of the field strength in the flux tube and we have investigated the width as a function of the interquark distance and the temperature. We have confirmed that the width of the flux tube increases with $q\bar{q}$ separation and also showed that the width rises steeply when the coupling constant has reached a certain value.

Key words: Lattice QCD, quark confinement, roughening transition, string tension, flux tube;