

# Барiony чөлөөт энергийг өнгөний сувгуудаар тооцоолох нь

Г.Энхтуяа\*, Ч.Содбилэг, Б. Мөнхзаяа

ШУА, Физик, технологийн хүрээлэн,  
Онолын ба их энергийн физикийн лаборатори

## Удиртгал

Энэхүү ажилд барион системийг латтис КХД-ийн онолоор судалсан судалгааны ажлын эхний үр дүнгүүдийг танилцууллаа. Латтис дээр гурван кваркийг Поляковын гогцоогоор төлөвлүүлэн, тэдгээрийн корреляцийг тооцоолох замаар харилцан үйлчлэлийг нь судлав. Бид их температурт барионы чөлөөт энергийг тооцоолж, бусад судлаачдын үр дүнтэй харьцуулан програмаа баталгаажуулсны дараа чөлөөт энергээ температур ба гурван кваркийг холбож буй утасны уртаас хамааруулан судалсан. Мөн уг чөлөөт энергийг 1-хэмжээст (singlet), 8-хэмжээст (octet), 10-хэмжээст (decuplet) гэсэн өнгөний сувгуудаар тооцоолж, тэдгээрийн нийлбэр өнгөөр дундажлагдсан чөлөөт энергийг бодож, өнгөний сувгуудаас хэрхэн хамаарч буйг судлав. Симуляцыг  $32^3 \times 12$  хэмжээтэй латтис дээр, температурын 4, гурван кваркийг холбож буй утасны уртын 16 утганд гүйцэтгэв.

PACS: 12.38.-t Quantum chromodynamics – 11.15Na Lattice gauge theory

Түлхүүр үгс: Латтис КХД, кварк конфайнмент, барион, барионы чөлөөт энерги

Received: 23.12.2025

Revised: 14.01.2026

Accepted: 26.01.2026

## 1 Оршил

Материйг бүрдүүлэгч эгэл бөөмсийн нэг болох кваркууд нь гурваараа нийлж барионуудыг, кварк-антикварк нийлж мезонуудыг үүсгэдэг бөгөөд эдгээрийн хоорондын харилцан үйлчлэлийг квант хромодинамикийн (КХД) онолоор судалдаг. Энэ онолд кварк конфайнмент, адроны спектроскопи, адроны бүтэц гэх мэт өнөөдрийг хүртэл бүрэн тайлбарлагдаагүй асуудлууд байсаар байна. Эдгээр асуудлуудад хамгийн сайн тайлбар өгч чаддаг онол бол латтис КХД-ийн онол юм.

Кваркуудын харилцан үйлчлэлийг судлах онолын судалгаанууд кварк-антикварк системийн хувьд нэлээд нарийн судлагдсан байдаг бол гурван кварктай барион системийн хувьд харьцангуй бага судлагдсан. Учир нь програмчлалын хувьд нэлээд төвөгтэй, мөн гурван операторын корреляцын функцийг тооцоолдог учраас дохио маш хурдан дарагддаг, тиймээс физик хэмжигдэхүүний цэвэр дохио ялгаж авахад төвөгтэй. Кваркуудын харилцан үйлчлэлийн шинж чанарыг судлах гол аргуудын нэг бол тэдгээрийн хоорондын чөлөөт энерги ( $T = 0$ : потенциал)-ийг тооцоолох

\*э-шуудан: enkhtuyag@mas.ac.mn

юм [1, 2, 3, 4].

Бидний хувьд мөн адил өмнөх жилүүдэд мезоныг үүсгэдэг кварк-антикваркийн харилцан үйлчлэлийг судлах замаар кварк конфайнмент үзэгдэлд тайлбар өгөх судалгааны ажлууд хийж байсан [5, 6, 7, 8, 9, 10] бол сүүлийн үед барионыг үүсгэдэг гурван кваркийн харилцан үйлчлэлийг судалж шинэ мэдлэг, шинэ үр дүнгүүд гарган авахаар ажиллаж байна. Бид энэ ажилд барионы чөлөөт энергийг ялгаатай өнгөний сувгуудаар тооцоолох програмыг бичиж температур, гурван кваркийг холбож буй утасны урт буюу өөрөөр, гурван кваркийн үүсгэж буй гурвалжны периметрээс, өнгөний сувгуудаас хамааруулан судлах болно.

Энэхүү өгүүлэл нь таван бүлэгтэй. Нэг, хоёрдугаар бүлэгт ерөнхий оршил болоод онолын мэдээллүүдийг багтаасан. Латтис дээр барионы чөлөөт энергийг тооцоолох аргачлал болон түүнийг хэрхэн програмчилсан, мөн хэмжилтийн нөхцөл, параметруудийн талаар гурав, дөрөв дүгээр бүлэгт харуулсан. Дөрөвдүгээр бүлэгт үр дүнг танилцуулж, тавдугаар бүлэгт дүгнэлтийг багтаалаа.

## 2 Барионы латтис дээр томъёолох нь

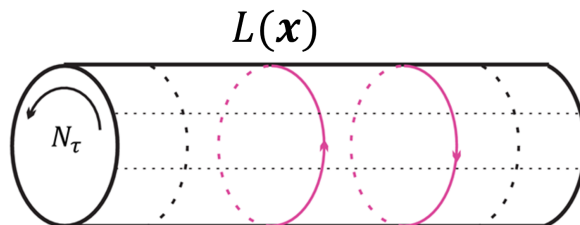
Огторгуй-хугацааны  $N_\sigma \times N_\sigma \times N_\sigma \times N_\tau$  гэсэн 4-хэмжээст латтис дээр кваркууд нь латтисын зангилаа цэгүүд дээр байрлах бол тэдгээрийг холбож буй шулуунууд нь кваркуудын харилцан үйлчлэлийг зөөгч глюонуудыг илэрхийлэх линк хувьсагч бөгөөд

$$U_\mu(\mathbf{x}) = \exp(aA_\mu(\mathbf{x})) \quad (1)$$

гэж илэрхийлэгдэнэ.  $A_{\mu\nu}(\mathbf{x})$  нь тасралтгүй огторгуй дахь гэжж орон,  $a$  нь латтисын алслалт буюу хоёр зангилаа цэгийн хоорондох зай. Зангилаа цэгүүд дээр байрлаж буй кваркуудыг тэг бус температуртай,  $T \neq 0$ , үед Поляковын гогцоо хэмээх оператороор төлөөлүүлдэг бөгөөд математик илэрхийлэл нь

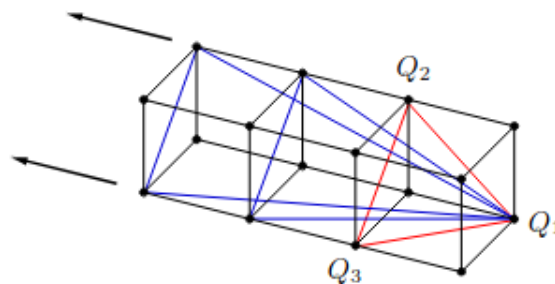
$$L(\mathbf{x}) = \frac{1}{N_c} \text{Tr} \prod_{x_4=0}^{N_\tau-1} U_4(\mathbf{x}, x_4) \quad (2)$$

гэж өгөгдөнө. Энд  $U_4(\mathbf{x}, x_4)$  нь латтисын хугацааны дагуух линк хувьсагч. Поляковын гогцоо нь Зураг 1-т харагдаж байгаагчлан латтисыг хугацааны дагуу хуйлахад үүссэн битүү гогцоо хэлбэрээр дүрслэгдэх бөгөөд огторгуйн цэг бүр дээр тодорхойлогддог.



Зураг 1. Поляковын гогцоо [11].

Барионыг үүсгэж буй гурван кваркууд нь латтис дээр Зураг 2-т үзүүлсний дагуу байрлах ба эдгээр гурван кваркийг илэрхийлж буй Поляковын гогцоонуудийн корреляцын функцийг тооцоолсноор хоорондын харилцан үйлчлэлийг нь судлах боломжийг олгоно.



Зураг 2. Корреляцыг тооцоолох гурван кваркийн латтис дээрх дүрслэл [4].

Корреляцын функцийн ерөнхий хэлбэр

$$C_{QQQ}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3) = \langle L_1(\mathbf{x}_1)L_2(\mathbf{x}_2)L_3(\mathbf{x}_3) \rangle \quad (3)$$

гэж өгөгддөг. Эдгээр гурван кваркууд хоорондоо харилцан үйлчлэлцэх дараах хоёр төрлийн хэлбэр байна:

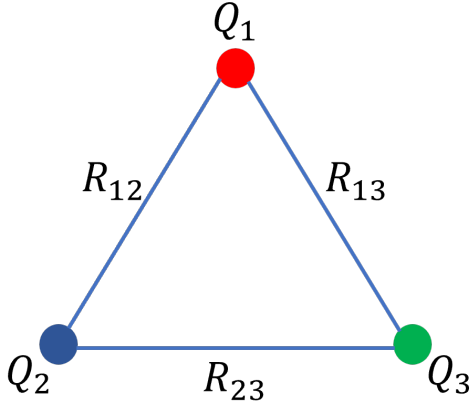
### 1. $\Delta$ -хэлбэр

Энэ хэлбэрийн харилцан үйлчлэлийн үед кваркууд хоёр хоёроороо холбогдсон хэлбэртэй байх буюу гурван кваркийг холбож буй утасны урт нь гур-

валжны периметрээр

$$P = \sum_{i < j} R_{ij} \quad (4)$$

гэж өгөгдөх бөгөөд Зураг 3-г харуулав.



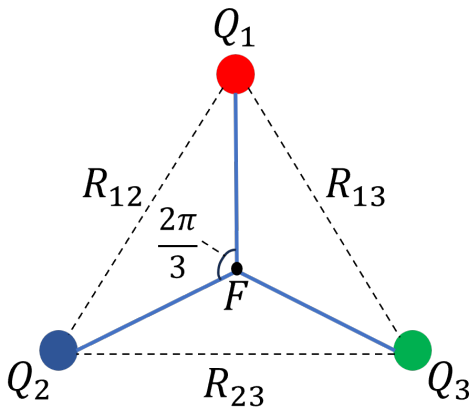
Зураг 3. Кваркуудын Δ-хэлбэрийн харилцан үйлчлэл.

### 2. Ү-хэлбэр

Энэ хэлбэрийн харилцан үйлчлэлийн үед кваркуудын харилцан үйлчлэл гурвалжны Фермат цэг дээр холбогдсон хэлбэртэй байна. Тэдгээрийг холбож буй утасны уртыг

$$L = \left[ \frac{1}{2 \sum_{i < j} R_{ij}^2 + 2\sqrt{3}A_{\Delta}} \right] \quad (5)$$

гэж тооцоолно. Энд  $A_{\Delta}$  гурвалжны талбай.



Зураг 4. Кваркуудын Ү-хэлбэрийн харилцан үйлчлэл.

Бид энэ судалгааны ажилд кваркуудыг Δ-хэлбэрийн харилцан үйлчлэл үүсгэж байхаар томъёолж, периметрээс хамааруулан судлана.

## 3 Чөлөөт энергийг тооцоолох

Температур, периметр тус бүрийн хувьд барионы чөлөөт энерги нь Тэгшитгэл 3-г өгөгдсөн корреляцын функцээс

$$F_{QQQ}(T, P) = -T \ln \langle C_{QQQ}(T, P) \rangle \quad (6)$$

гэж олдоно. Их температурт дээрх корреляцийн функцийг өнгөний сувгуудаар задалж судлах нь ач холбогдолтой. Өнгөний огторгуй дахь гурван кваркийн төлөөллүүдийн үржвэрийг симметр төлвүүд рүү

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8' \oplus 10 \quad (7)$$

гэж задалж болно. Энд 1 нь 1-хэмжээт төлөв бөгөөд кваркуудын хоорондын потенциал энергийг илэрхийлдэг. 8, 10 нь 8-хэмжээт болон 10-хэмжээт төлөвүүд, эдгээр нь өнгөтэй, бодит физик төлөв биш боловч их температурт буюу кварк глюоны плазм төлөвт явагддаг халхлагдах үзэгдэл, кваркуудын өдөөгдсөн холбоост төлвүүд болох экзотик төлвүүдийг судлахад чухал ач холбогдолтой. Ялангуяа сүүлийн үеийн судалгаанд эдгээр өнгөт төлөвүүд нь пентакварк, дибарион гэх мэт мульт-кварк системүүд тогтвортой оршиход хэрхэн хувь нэмэр оруулдаг болохыг судлахад чухал ач холбогдолтой гэж үзэж байна.

Ингэж өнгөний төлөвүүдээр корреляцын функцийг тодорхойлоход Поляковын гогцооны оронд Вильсоны дулаан шугам гэж нэрлэгддэг операторыг ашиглана. Энэ нь Поляковын гогцоотой адил боловч трэйс аваагүй

$$L(\mathbf{x}) = \prod_{x_4=0}^{N_{\tau}-1} U_4(\mathbf{x}, x_4) \quad (8)$$

оператор юм. Бид Вильсоны дулаан шугамыг Поляковын гогцоотой адил  $L$  гэж тэмдэглэх ба үүнээс цааш бүх  $L$  тэмдэглэгээнүүд Вильсоны дулаан шугамыг илэрхийлнэ. Дээрх өнгөний сувгууд тус бүрийн хувьд гурван Вильсоны дулаан шугамуудаар илэрхийлэгдэх корреляцын функцууд нь дараах хэлбэртэй бичигдэнэ [4]:

$$C_{QQQ}^1 = \frac{1}{6}(27\text{Tr}L_1\text{Tr}L_2\text{Tr}L_3 - 9\text{Tr}L_1\text{Tr}(L_2L_3) - 9\text{Tr}L_2\text{Tr}(L_1L_3) - 9\text{Tr}L_3\text{Tr}(L_1L_2) + 3\text{Tr}(L_1L_2L_3) + 3\text{Tr}(L_1L_2L_3)), \quad (9)$$

$$C_{QQQ}^8 = \frac{1}{6}(27\text{Tr}L_1\text{Tr}L_2\text{Tr}L_3 + 9\text{Tr}L_1\text{Tr}(L_2L_3) - 9\text{Tr}L_3\text{Tr}(L_1L_2) - 3\text{Tr}(L_1L_2L_3)), \quad (10)$$

$$C_{QQQ}^{8'} = \frac{1}{6}(27\text{Tr}L_1\text{Tr}L_2\text{Tr}L_3 + 9\text{Tr}L_3\text{Tr}(L_1L_2) - 9\text{Tr}L_1\text{Tr}(L_2L_3) - 3\text{Tr}(L_1L_2L_3)), \quad (11)$$

$$C_{QQQ}^{10} = \frac{1}{60}(27\text{Tr}L_1\text{Tr}L_2\text{Tr}L_3 + 9\text{Tr}L_1\text{Tr}(L_2L_3) + 9\text{Tr}L_2\text{Tr}(L_1L_3) + 9\text{Tr}L_3\text{Tr}(L_1L_2) + 3\text{Tr}(L_1L_2L_3) + 3\text{Tr}(L_1L_2L_3)). \quad (12)$$

Эндээс өнгөөр дундажлагдсан корреляцын функцийг

$$C_{QQQ}^{av} = \frac{1}{27}C_{QQQ}^1 + \frac{8}{27}C_{QQQ}^8 + \frac{8}{27}C_{QQQ}^{8'} + \frac{10}{27}C_{QQQ}^{10} \quad (13)$$

гэж олно.

## 4 Програмчлал ба симуляц

Хэмжилтийг ФТХ-ийн NVIDIA Tesla P100 маркийн GPU тооцоолол хурдасгагчтай супер компьютер дээр гүйцэтгэв. Симуляцыг огторгуй-хугацааны  $32 \times 32 \times 32 \times 8$  хэмжээтэй латтис дээр хийв. Гэйж орны конфигурацыг SU(3) цэвэр гэйж онолоор, стандарт Вильсон үйлчлэлтэйгээр

$$S_W = \beta \sum (1 - \frac{1}{N_c} \text{Re Tr } U_{\mu,\nu}(\mathbf{x})) \quad (14)$$

үүсгэсэн. Энд  $\beta$  хүчтэй харилцан үйлчлэлийн холбоосын тогтмол,  $N_c = 3$  өнгөний тоо,  $U_{\mu,\nu}$  латтисын  $x$  зангилаа бүр дээр тодорхойлогддог “плакет” гэж нэрлэгддэг оператор бөгөөд латтисын зангилаануудыг холбодог дөрвөн линк хувьсагчдын үржвэрээр

$$U_{\mu,\nu}(\mathbf{x}) = U_\mu(\mathbf{x})U_\nu(\mathbf{x} + \hat{\mu})U_\mu^\dagger(\mathbf{x} + \hat{\nu})U_\nu^\dagger(\mathbf{x}) \quad (15)$$

гэж илэрхийлэгдэнэ. Гэйж конфигурацуудыг  $0.90T_c$ ,  $1.03T_c$ ,  $1.68T_c$ ,  $6.00T_c$  гэсэн дөрвөн температурын утганд үүсгэсэн. Үүний дараа Градиент урсгалын арга [12, 13] ашиглан конфигурацуудын статистик шуугианыг буурууллаа.

Тэгшитгэл 9, 10, 11, 12, 13-т өгөгдсөн ялгаатай өнгөний сувгуудаар корреляцын функцуудыг тооцоолоход ашиглагдаж буй Вильсоны дулаан шугам оператор нь гэйж инвариант биш учир орны конфигурацуудад гэйж бэхэлгээг хийх шаардлагатай [4, 14]. Энэ ажилд Кулоны гэйжээр бэхэлгээг хийсэн ба тасралтгүй огторгуйд

$$\partial_\mu A^\mu(x) = 0, \quad \mu \in 1, 2, 3 \quad (16)$$

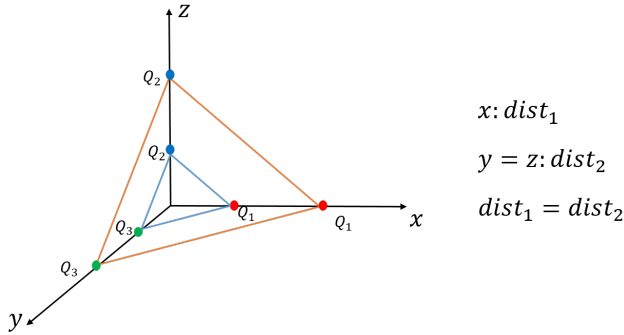
гэж өгөгдөнө. Харин латтис дээр гэйж бэхэлгээ нь

$$F_U[g] = \sum_{\mathbf{x},i} [g(\mathbf{x})U_i(\mathbf{x}, x_4)g^\dagger(\mathbf{x} + i, x_4)] \quad (17)$$

гэсэн гэйж хувиргалтын минимумыг олох оптимизацийн бодлого болдог. Бид гэйж бэхэлгээг хийхдээ ХБНГУ-ын латтис физикчдийн хөгжүүлсэн SIMULATEQCD [15, 16] багц програмын нэг дэд код болох *gaugeFixing.cu* програмыг ашигласан.

Дээрх бүх алхамуудыг хийсний дараа корреляцын функцээ тооцоолох ба бид энэхүү корреляцыг тооцоолох кодыг CUDA/C++ хэл дээр бичсэн. Ингэхдээ дээрх SIMULATEQCD багц програмын дэд код байдлаар хөгжүүлсэн. Програмчлахдаа статик кваркууд буюу Вильсоны дулаан

шугамуудын огторгуйн координатуудыг тодорхойлох шаардлагатай. Үүнийг бид Зураг 5-д харуулсан байдлаар сонгосон ба энэ ажилд зөвхөн тэнцүү талт гурвалжин байхаар координатуудыг сонгосон.



Зураг 5. Кваркуудыг латтис дээр байрлуулах нь.

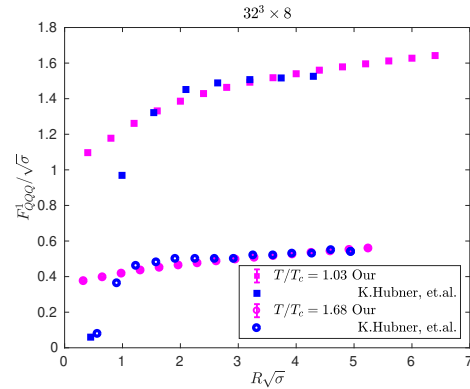
Зурагт харуулсан  $dist_1$  гэсэн тэмдэглэгээ нь  $x$ -тэнхлэгийн дагуух шилжилт бол,  $y, z$ -тэнхлэгийн дагуу ижил  $dist_2$  хэмжээгээр шилжинэ гэж зааж өгсөн. Энэ ажилд тэнцүү талт гурвалжнуудыг авч үзэж байгаа учраас  $dist_1 = dist_2$  гэж нөхцөл оруулсан. Дараагийн ажлуудад адил хажуут гурвалжин үүсгэн харилцан үйлчлэлийг судлах болно.

Гэйж конфигурацыг heathbat аргаар үүсгэж, overrelaxation аргаар тогтворжуулсан ба 1:4 харьцаатай байхаар сонгосон. Гэйж конфигурацын автокорреляцийг бууруулахын тулд үүссэн 10 конфигурац бүрийн нэгийг нь хадгалж авах байдлаар 1000 конфигурац хадгалж авсан. Үр дүнгийн статистик алдааг Jackknife арга ашиглан боловсруулсан. Ингэхдээ нэг блокийн хэмжээг 100 конфигурацтай байхаар сонгож 10 блокийн хувьд статистик алдааг үнэллээ.

## 5 Үр дүн

Корреляцыг хэмжээний дараа Тэгшитгэл 6-р өнгөний суваг тус бүрийн хувьд чөлөөт энергийг тооцооллоо. Бид өөрсдийн програмаас зөв үр дүн гарч байгаа эсэхийг шалгах зорилгоор бусад судлаачдын ажилтай харьцууллаа [4]. Зураг 6-д  $T = 1.03T_c$ ,  $T = 1.68T_c$  температурт, 1-хэмжээст чөлөөт

энергийн гурвалжны нэг талын урт  $R$ -аас хамаарах хамааралд харьцуулалтыг хийв.

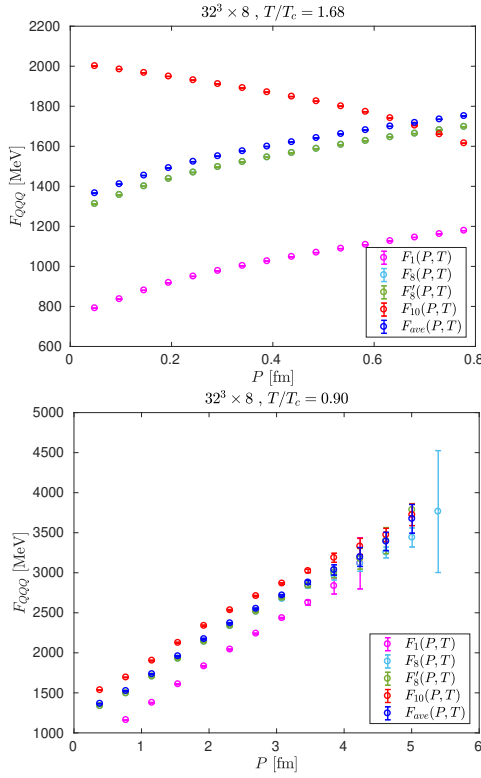


Зураг 6. Шинэ програмаас гарсан үр дүнг бусад судлаачдын ажилтай харьцуулсан нь.

Зургаас харахад чөлөөт энерги  $R$ -аас хамаарч ихсэж байгаа хамаарал адил байв. Мөн температур ихсэхэд  $F_{QQQ}^1(R, T)$  буурч байгаа нь хамаарлын хувьд тохирч байгаа бөгөөд бидний бичсэн програмын үр дүн физикийн хувьд зөв үр дүн гаргаж байгааг харуулж байна. Харин тоон утгын хувьд харьцуулахад  $R$  бага үед буюу кваркууд хоорондоо ойр байх үед бидний үр дүн [4]-өөс ялгаатай байсан бол,  $R$  их үед тоон утга тохирч байсан. Энэхүү ялгаатай байгаагийн учир шалтгааныг судалж үзэхэд [4]-д ойр зай дахь чөлөөт энергийг тэг температуртай үеийн чөлөөт энергитэй давхцуулах замаар Поляковын гогцоог дахин нормчилсон [17] байсан бөгөөд бид энэхүү дахин нормчлолыг хийгээгүй учраас тоон утгын хувьд ялгаа гарч байна гэж дүгнэсэн. Өөрөөр хэлбэл бид өөрсдийн тооцоолсон чөлөөт энергийн датаг тэг температуртай үеийн датагай давхцуулах замаар дахин нормчлолыг хийсэн бол  $R$  бага үеийн тоон үр дүнгүүд [4]-ын ажилтай таарах байсан гэж үзэж байна. Гэсэн хэдий ч,  $R, T$ -ээс хамаарах хамаарал тохирч байгаа учраас дараагийн анализуудыг хийх боломжтой гэж үзлээ.  $R$  ихсэхэд чөлөөт энергийн утга ихсэж байгаа нь кварк хоорондын зайг ихсэхэд тэдгээрийн хоорондын харилцан үйлчлэлийн хүч нэмэгддэг кварк конфайнмент үзэгдлийн шинж чанартай тохирч байна.

Барионы чөлөөт энергийн өнгөний сувгаас хамаарах хамаарлыг критик температураас их,  $1.68T_c$ , ба критик температураас

бага,  $0.90T_c$ , гэсэн мужуудад авч үзлээ. Үр дүнг Зураг 7-т харуулж байна.

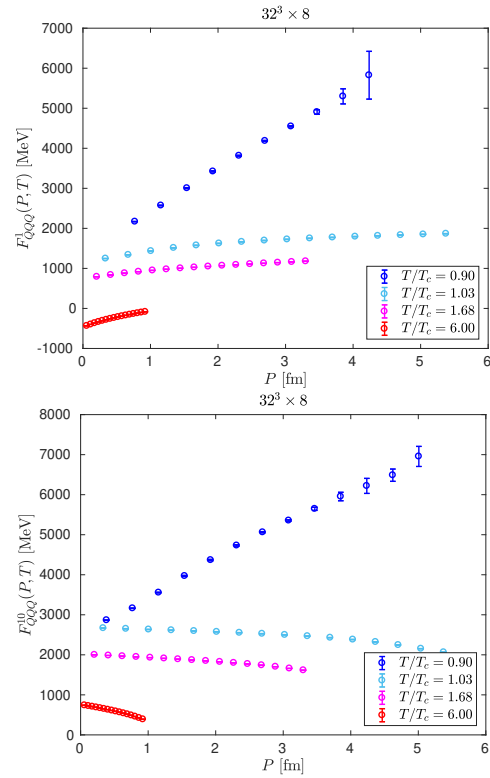


Зураг 7. Чөлөөт энергийн өнгөний сувгаас хамаарах хамаарал конфаинмент ба деконфаинмент фазуудад.

Зургаас деконфаинмент фазад 1-хэмжээст, 8-хэмжээст, өнгөөр дундажлагдсан чөлөөт энергүүд периметртэй шууд хамааралтай байгаа бол 10-хэмжээст чөлөөт энерги урвуу хамааралтай байгаа нь харагдаж байна. Эндээс 1-хэмжээст, 8-хэмжээст, өнгөөр дундажлагдсан чөлөөт энергүүд таталцах шинж чанартай бол 10-хэмжээст чөлөөт энерги түлхэлцэх шинж чанартай байна гэдэг нь илэрхий байна. Харин конфаинмент фазад бүх өнгөний сувгуудад периметр ихсэхэд чөлөөт энерги ихсэж байсан. Энэ нь [4]-д харуулсан хамааралтай адил байсан боловч энэ ажилд деконфаинмент фазад кваркууд хоорондоо хол зайтай байхад буюу периметрийн их утганд чөлөөт энерги өнгөний сувгуудаас хамаарахгүй, ижил тоон утганд хүрч байсан бол бидний тооцооллоос энэхүү давхцал харагдаагүй. Үүнийг мөн Поляковын гогцооны дахин нормчлол хийгээгүйгээс шалтгаалсан гэж олж тогтоосон. Учир нь [17] Поляковын гогцооны дахин нормчлолыг

хийсний дараа 1-хэмжээст болон өнгөөр дундажлагдсан чөлөөт энергүүд хол зайд давхцаж байгааг харуулсан. Энэ давхцал нь деконфаинмент фазад, хол зайд кваркууд өнгөний сувгаас үл хамааран халхлагдаж байгааг илэрхийлдэг. Өөрөөр хэлбэл, их температурт ч кваркууд хоорондоо ойр байх үед хоорондоо холбоост төлөвт буюу конфаинмент фазад оршин байдаг бол хол зайд тэдгээрийн харилцан үйлчлэл "глюоны үүлээр" халхлагддаг гэж үздэг.

Зураг 8-д 1-хэмжээст  $F_{QQQ}^1(P, T)$  ба 10-хэмжээст  $F_{QQQ}^{10}(P, T)$  сувгуудын хувьд температураас хамаарах хамаарлыг судалсан үр дүнг харуулав.



Зураг 8. Чөлөөт энергийн температураас хамаарах хамаарал. Дээд: 1-хэмжээст. Доод: 10-хэмжээст

Зургаас аль ч сувгийн хувьд температур ихсэхэд чөлөөт энерги буурч байгаа нь харагдаж байна. Энэ их температурт кваркуудын хоорондын харилцан үйлчлэлийн хүч суларч байгааг харуулж байгаа бөгөөд их температур дахь кваркуудын харилцан үйлчлэлийн ерөнхий шинж чанартай тохирч байв. 10-хэмжээст сувгийн хувьд  $T_c$ -ээс бага температурт чөлөөт энерги периметрээс хамаарч нэмэгдэж байгаад  $T_c$ -

ээс их температурт буурч, шинж чанар нь өөрчлөгдөж байгаа нь харагдаж байна. Маш их температур буюу  $6T_c$ -д чөлөөт энергийн утгууд сөрөг болж байгаа нь харагдаж байна. Үүний шалтгаан нь чөлөөт энерги нь дотоод энерги ба энтропийн ялгавараар

$$F_{QQQ}(P, T) = U(P, T) - TS(P, T) \quad (18)$$

гэж тодорхойлогддог бөгөөд кваркуудын хоорондын харилцан үйлчлэлийн хүч суларч, чөлөөтэй хөдөлж эхлэхэд системийн энтропи их болж байгаатай холбоотой юм.

## 6 Дүгнэлт

Бид энэхүү ажлаар гурван кваркаас тогтох барион системийг латтис КХД-ийн онолоор судалсан эхний үр дүнгүүдийг танилцууллаа.

Бид барионы чөлөөт энергийг ялгаатай өнгөний сувгуудаар латтис дээр тооцоолох програмыг бичиж, бусад судлаачдын ажилтай харьцуулан баталгаажуулав. Үр дүнгүүдээс харахад бидний тооцоолсон үр дүн физик хамаарал, шинж чанарын хувьд бусад судлаачдын ажилтай тохирч байсан бол тоон утгын хувьд зөрөөтэй байгаа нь харагдлаа.

Температур ихсэхэд кваркуудын харилцан үйлчлэлийн хүч суларсаар, маш их температурт системийн энтропи харилцан үйлчлэлийн энергиэс их болж байгааг харуулав.

Бид цаашид програмаа сайжруулах шаардлагатай байгаа ба үүний тулд Поляковын гогцооны дахин нормчлолыг програмдаа нэмж оруулах болно. Ингэснээр тоон үр дүнгүүд нарийн, зөв тооцоологдоно гэж үзэж байна. Мөн адил талт гурвалжны хувьд болон  $Y$ -хэлбэрийн харилцан үйлчлэлийг судлах болно.

## Ашигласан ном

- [1] R. Sommer and J. Wosiek, *Baryonic strings on a lattice*, Nuc. Phys. B**267** (1986) 531.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/055032138690129X>
- [2] C. Alexandrou, Ph. de Forcrand and A. Tsapalis, *The static three-quark  $SU(3)$  and four-quark  $SU(4)$  potentials*, Phys. Rev. D**65** (2002) 054503.  
<https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.65.054503>
- [3] T. T. Takahashi and H. Suganuma, *Detailed analysis of the gluonic excitation in the three-quark system in lattice QCD*, Phys. Rev. D**70** (2004) 074506.  
<https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.70.074506>
- [4] K. Hubner, F. Karsch, O. Kaczmarek and O. Vogt, *Heavy quark free energies for three quark systems at finite temperature*, Phys. Rev. D**77** (2008) 074504.  
<https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.77.074504>
- [5] S. Chagdaa, E. Galsandorj, E. Laermann and B. Purev, *Width and string tension of the flux tube in  $SU(2)$  lattice gauge theory at high temperature*, Jour. of Phys. G**45** (2017) 025002.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6471/aa888d>
- [6] S. Chagdaa, E. Galsandorj, B. Purev, O. Kaczmarek and H. T. Ding, *Flux tube with dynamical fermions from high temperature  $SU(3)$  lattice gauge theory*, PoS (LATTICE 2019) 170 (2019).  
<https://pos.sissa.it/363/170/pdf>
- [7] S. Chagdaa, B. Purev, and E. Galsandorj, *Flux tubes in full QCD at high temperature*, Jour. of Phys. G**48** (2021) 125001.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6471/ac2679>
- [8] E. Galsandorj, S. Chagdaa, B. Purev and M. Munkhzaya, *Distribution of energy-momentum tensor around static quarks in  $SU(3)$  gauge theory at high*

- temperature*, PoS (LATTICE 2022) 278 (2022).  
<https://pos.sissa.it/430/278/pdf>
- [9] E. Galsandorj, S. Chagdaa and B. Purev, *Color screening from flux tube in (2+1)-flavour QCD*, Phys. of Part. and Nucl. Lett., **20(1)** (2023), 10-16.  
<https://link.springer.com/article/10.1134/S1547477123010065>
- [10] E. Galsandorj, S. Chagdaa and M. Batgerel, *Pure gauge flux tube and running coupling from EMT at high temperature*, The Euro. Phys. Jour. A, (2024) 60:113.  
<https://link.springer.com/article/10.1140/epja/s10050-024-01328-0>
- [11] S. Chagdaa, Flux tube profiles at high temperature, doctoral dissertation, (2008), Bielefeld university, Germany.  
<https://pub.uni-bielefeld.de/download/2303220/2303223/thesis.pdf>
- [12] R. Luescher, *Properties and uses of the Wilson flow in lattice QCD*, J. High Energ. Phys. **08** (2010) 071.  
[https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP08\(2010\)071](https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP08(2010)071)
- [13] R. Luescher, P. Weisz, *Perturbative analysis of the gradient flow in non-abelian gauge theories*, J. High Energ. Phys. **02** (2011) 051.  
[https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP02\(2011\)051](https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP02(2011)051)
- [14] Ch. Gattringer and Ch. B. Lang, *Quantum chromodynamics on the lattice*, In: Lect. Notes Phys. 788 (2010).  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-01850-3>
- [15] L. Mazur, *Topological aspects in lattice QCD*, Ph.D. thesis, Bielefeld University (2021).  
<https://doi.org/10.4119/unibi/2956493>
- [16] L. Altenkort, D. Bollweg, D. A. Clarke, O. Kaczmarek, L. Mazur, C. Schmidt, P. Scior and H.-T. Shu, *HotQCD on Multi-GPU Systems*, PoS (LATTICE2021) 196 (2021).  
<https://pos.sissa.it/396/196/pdf>
- [17] O. Kaczmarek, F. Karsch, P. Petreczky and F. Zantow, *Heavy quark antiquark free energy and the renormalized polyakov loop*, Phys. Lett. **B543** (2002) 41.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0370269302024152?via%3Dihub>

# Computation of the free energy of a baryon in different colour channels

Enkhtuya Galsandorj<sup>†</sup>, Sodbileg Chagdaa and Munkhzaya Batgerel

*Laboratory of theoretical and high energy physics,  
Institute of physics and technology, MAS, Mongolia*

## Удиртгал

*In this study, we present our preliminary result of a study of the baryon system from lattice QCD. The interaction of the three quarks was studied by computing the correlation of the three Polyakov loops. We computed the free energy of the baryon at high temperatures and validated our program by comparing it with the results of other researchers. After that, we studied the free energy as a function of temperature and the length of the string connecting the three quarks. The free energy also computed in singlet, octet and decuplet colour channels and calculated the color-averaged free energy over their summation, then studied the dependence of these channels. The simulations were performed on a lattice of size  $32^3 \times 12$  and for four temperatures and 16 values of the lengths of string connecting the three quarks.*

**PACS:** 12.38.-t Quantum chromodynamics – 11.15Ha Lattice gauge theory

**Түлхүүр үгс:** Lattice QCD, quark confinement, baryon, free energy of the baryon

---

<sup>†</sup>Э-шуудан: enkhtuyag@mas.ac.mn