

Лазерийн Удирдлагат Халуун Цөмийн Нэгдэл Явагдах Зайлшгүй Нөхцөлийн Онолын Тооцоолол ба Түүний Үндсэн Параметруудийн Хамаарал

Ж.Далхсүрэн*

ШУТИС, Хэрэглээний Шинжлэх Ухааны Сургууль

Лазерийн удирдлагат халуун цөмийн нэгдэх урвалын хурд температураас хамаарах хамаарал, лазерийн үйлчлэлээр плазмын температур, ионуудын хурд, концентраци зэрэг физик хэмжигдэхүүнүүд лазерийн цацрагийн энерги, чадал, эрчимээс хэрхэн хамаарч байгааг онолын тооцоолол, загварчлалын аргаар судлаж үзлээ. Хөнгөн элементийн цөмүүд $10^8 - 10^9\text{K}$ температуртай плазмд хувирсан үед тэдний нэгдэх урвал маш бага хугацаанд эрчимтэй явагдах нөхцөл нь бүрддэг. Судалгааны тооцооллоор бол лазерийн цацрагийн импульсын энерги нь 1-8 МЖ, чадал нь $10^{15} - 10^{18}$ Вт, эрчим нь $10^{19} - 10^{22}$ Вт/см² байхад дээр дурдсан өндөр температуртай плазмыг гарган авч болохоор байна. Ийм температурын үед даралт хэдэн зуун мегабараас хэдэн арван гигабарт хүрч плазм дотор байгаа цөмийн түлшийг өөрөөр хэлбэл дейтери ба тритийн холимогийг 90-300 г/см³ нягттай болтол адиабатаар шахаж агшаах боломжтой болж байна. Ийм даралтын үйлчлэлээр 1нс-10пс хугацаанд адиабатаар агшсан хийн холимогийн (цөмийн түлшний) температур $10^8 - 10^9\text{K}$ хүрэх агшинд хөнгөн элементийн халуун цөмүүд цөмийн түлхэх хүчийг ялан давж хоорондоо нэгдэх урвал эрчимтэй явагдах нөхцөл бүрдэж байна.

Түлхүүр үг: даралт, температур, нягт, энерги, чадал.

УДИРТГАЛ

Хүн төрөлхтөн шинжлэх ухааны шинэ, дэвшилтэт техник, технологийг ашиглан хөнгөн элементүүд буюу халуун цөмүүд нэгдэх процессыг удирдаж чаддаг болчихвол эрчим хүч, энергийн асар их нөөцийг ашиглах боломж нээгдэнэ гэж үздэг. Хэрэв халуун цөмүүд нэгдэх үед ялгарах асар их хэмжээний энергийг ашиглаж эхэлбэл хатуу түлш (нүүрс, мазут гэх мэт) хэрэглэх шаардлагагүй болно.

Өнөөдөр лазерийн техник, технологийн дэвшилийг ашиглан халуун цөмийн нэгдлийг удирдан жолоодох цаг тун ойрхон байна. Лазерийг бүтээж, лазерийн цацрагийг гарган авсан тэр цагаас хойш өндөр нягтралын энергитэй, чадлын их нягтралтай цацрагийн импульсыг гарган авах чиглэл дээр эрдэмтэд уйгагүй ажиллаж ирсэний дүнд 1.8МЖ хүртэл энергитэй 10^{17} Вт чадалтай, 10^{21} Вт/см²эрчимтэй, 1нс-10пс хүртэл үргэлжлэх хугацаатай цацрагийн импульс гаргадаг орчин үеийн лазерийг бүтээгээд байна.

Үүнтэй нэгэн зэрэг дээр дурдсан чадлын өндөр нягтралтай импульсээр халуун цөмийн нэгдлийг удирдан явуулах боломжийн талаар өнөөг хүртэл тасралтгүй эрэл хайгуул, судалгаа хийсээр ирлээ. Энэ чиглэлээр хийгдсэн судалгааны дүнгүүд энергийн өндөр нягтралтай лазерийн импульсыг гарган авч чадвал халуун цөмийн нэгдэл явагдах нөхцлийг бүрдүүлээд

зогсохгүй халуун цөмийн урвалыг удирдан явуулах боломжтой гэдгийг харуулаад байна.

Хөнгөн элементийн цөмүүд нэгдэх гол нөхцөл нь $10^6 - 10^7\text{K}$ температуртай орчин буюу плазм байдаг. Энэ орчинг бүрдүүлэхийн тулд лабораторын нөхцөлд $10^6 - 10^7\text{K}$ температуртай халуун плазмыг үүсгэх явдал юм. Байгаль дээрхи үүний тод жишээ бол нар юм. Ийм плазмыг үүсгэх, зогсоох, температурыг тохируулах зэрэг үйл ажиллагааг удирдан явуулж чадвал халуун цөмийн нэгдэлийг удирдах бүрэн боломжтой болно гэсэн үг. Энэхүү боломжийг зөвхөн өндөр чадлын лазерийн цацрагийн импульсээр $10^{-9} - 10^{-12}$ с хугацаанд тусгай бодист үйлчлэх замаар бүрдүүлж боломжтой гэдгийг олон тооны туршилтууд нотлон харуулж байна. Лазерийн 10^{22} Вт/см² эрчимтэй 1нс-20пс үргэлжлэх хугацаатай импульсээр бодист үйлчлэхэд $10^6 - 10^7\text{K}$ температуртай 100Мбар-200Гбар даралттай, $10^{16} - 10^{17}$ Ж/см³ энергийн нягттай халуун плазм үүсдэг. Ийм халуун плазм дотор байрлаж буй цөмийн түлш буюу хатуу ба хийн төлөвт байгаа хөнгөн элементүүдийн холимог (дейтери+тритий) 100Мбар-20Гбар даралттай болтлоо адиабатаар шахагдан агшиж температур нь $10^8 - 10^9\text{K}$ –д хүрч улмаар халуун цөмийн нэгдэх урвал маш идэвхитэй явагдана.

* Electronic address: jdalkhsuren@yahoo.com

ҮНДСЭН ХЭСЭГ

I. Плазмын төлөв болон энергийн балансыг тодорхойлогч хэмжигдэхүүнүүд температураас хамаарах хамаарал

Халуун цөмийн нэгдлийн хувьд энергийн балансын нөхцөл болох Лоусоны критери нөхцөл:

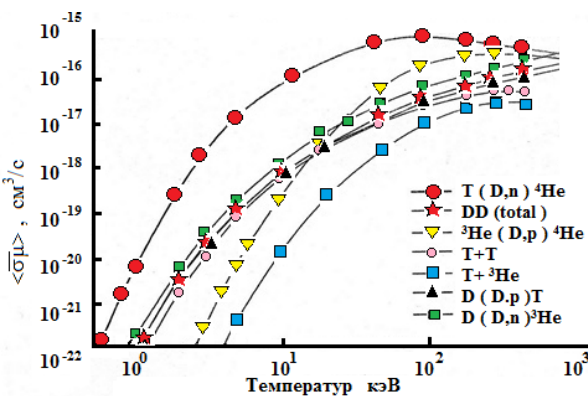
$$n \cdot \tau \approx \frac{\rho \cdot r}{4c \cdot m} \approx 2 \cdot 10^{14} \frac{c}{\text{см}^3} \quad (1)$$

$$10^8 \text{K үед } n\tau > 10^{14} \frac{c}{\text{см}^3} \quad \text{ба}$$

$$10^9 \text{K үед } n\tau > 10^{16} \frac{c}{\text{см}^3} \quad (2)$$

томъёонуудаар тодорхойлогдоно.

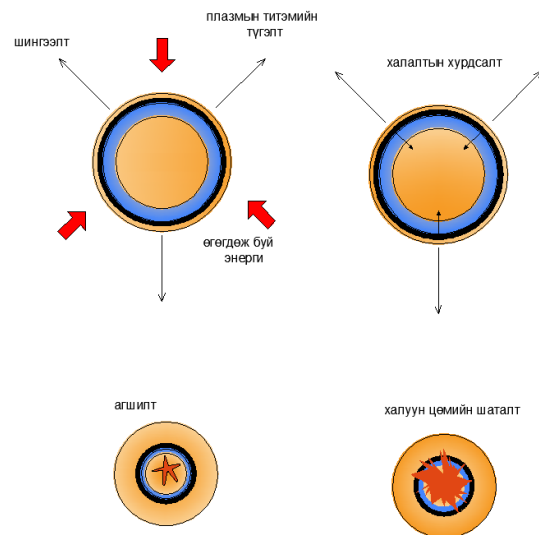
Плазм нь (1) томъёоны нөхцөлийг хангаж байгаа тохиолдолд түүн дотор байгаа халуун цөмүүд нэгдэх нөхцөл бүрдэнэ. Харин халуун цөмүүд (2) томъёоны нөхцөлийг хангаж байвал тэд цөмийн түлхэх хүчийг давж хоорондоо нэгдэж чадна. Ийнхүү халуун цөмийн урвалийн хурд нь температураас хамаарах хамаарал дейтерий трититэй нэгдэх урвалыг бодитой болгох гол нөхцөл нь болж байгаа юм. Энэхүү урвалыг идэвхитэй явуулахын тулд 2-10 кэВ энерги шаардагдана гэсэн тооцоо гарч байгаа юм. Халуун цөмийн плазмын гүйдлын (нисэлтийн) хурд нь ойролцоогоор 10^8 м/с байна. Үүний тулд 10^{-1} см диаметртэй бөмбөлөг биет-цөмийн түлшний хувьд тодорхойлогч хугацаа нь 1нс байна. Ийм халуун цөмийн урвалын хувьд энергийн балансын нөхцөл нь Лоусоны эгзэгт нөхцөлийг хангаж байгаа бөгөөд $\rho r \approx 0.1 + 3g/\text{см}^2$ байх нь тодорхой болж байна. Халуун цөмийн нэгдэх урвалын хурд температураас хамаарах хамаарлыг (зураг 1)- д харуулав.



1 дүгээр зураг. Хөнгөн цөмүүдийн нэгдлийн хурд температураас хамаарах график.

Энэ нөхцлөөр бол цөмийн түлшний нягт хэдэн зуун г/см³ болтлоо шахагдаж агших шаардлагатай болно. 10кэВ температурын үед 100-200Гбар хэмжээний асар их даралт үүснэ. Халуун цөмийн нэгдэх урвалын дүнд 500Мж энерги ялгаруулахын тулд 3мг дейтери ба

тритийн холимог түлш шахагдах ба түүний диаметр ойролцоогоор 300мкм байна. Лазерийн цацрагаар үйлчлэх үед түлшний төв хэсэгт түүний нягт 90г/см³ болж энэ үед түлшийг шахааж агшаах плазмын даралт нь 13.5Гбар, энерги нь 30кЖ болно. Имплозын хурд $1.4 \cdot 10^7$ см/с хүрсэн байна. Байны бүтэц, драйверын сонголтоос хамаарч эдгээр параметрууд мэдэгдэхүйц өөрчлөгдөж болно. Халуун цөмийн бай дээр явагдах ажлын процессын схемийг (зураг 2.-)д харуулав. Драйвераас гарсан буюу өгч буй энергийн урсгалын үйлчлэлээр түлшний гадаад гадарга халж улмаар плазм үүсч, түүний титэм хална. Титмийн хөдөлгөөний өөрчлөлтийн хурд, ионуудын (урсгалын) хөдөлгөөний чиглэл байруу чиглэсэн энергийг зөөгч цацрагийн эсрэг байна. Энэ хоёр чиглэлийн харилцан үйлчлэлийн дүнд үүссэн шахалтийн импульс бай дотор агшилтын буюу шахалтын долгионыг хэлбэршүүлнэ. Энэ долгион байны төвд фукуслагдана. Түлшний агшилт максимум утгандаа хүрэх тэр агшинд түүний төвд халуун цөмийн шаталт явагдаж эхэлнэ. Энэхүү шаталт (цөмийн урвал) долгион хэлбэрээр гадагш өрнөнө. Энэ үед цөмийн түлшний температур 10⁸-10⁹К, даралт хамгийн их утга буюу хэдэн арван гигабар болно. Энэ нь халуун цөмийн нэгдэл явагдах нөхцөл бүрэн биелэсэн байна гэдгийг нотлож байгаа юм.



2 дугаар зураг. Халуун цөмүүд нэгдэх процессын шатлалын схем.

Инерцийн тогтоолтой лазерийн удирдлагат халуун цөмийн урвалын ийм схемийг “шууд үйлчлэл”-ийн арга гэж нэрлэдэг. Түлшний адиабат агшилт, шаталт нь P=100Мбар даралт, T=10⁶К температуртай плазмын үйлчлэл дор явагдаж байна. Энэхүү плазм нь байны гадарга дээр фукуслагдсан лазерын цацрагийн шууд үйлчлэлээр үүсгэгддэг. Өнөө үед судлаачид шууд үйлчлэлийн халуун цөмийн түлшний

(байны) олон тооны бүтцийг санал болгож байна. Тэдгээрийн гаргах энергийн нягт нь 10^{16} - 10^{17} Ж/см³ хүрч байгаа нь астрофизик нөхцөлтэй дүйцэхүйц байна.

II. А. Ойролцоогоор 2,5 мм диаметр бүхий бөмбөлөг хэлбэрийн 3мг дейтери ба тритийн холимогийг 300мкм диаметртэй бөмбөлөг болтол агшаах үед тэдгээрийн халуун цөмүүд нэгдэх урвалын онолын тооцоолол.

Ойролцоогоор 2.5мм диаметр бүхий бөмбөлөг хэлбэртэй 3мг дейтери ба тритийн холимогоос тогтсон цөмийн түлшийг 25480 Ж энергийн үйлчиллээр 14Гбар даралттай, 93 Г/см^3 нягттай, $d \approx 300$ мкм диаметртэй, 1.8

Хүснэгт 1.

$P_1 = 14 \cdot 10^{14} = 14 \text{ Гбар}$	$V_1 = 2.5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$	$N_1 = 75 \cdot 10^{16}$
$P_2 = 14 \text{ Гбар}$	$V_2 = 5.2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$	$N_2 = 53 \cdot 10^{18}$
$P_3 = 14.3 \text{ Гбар}$	$V_3 = 10.28 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$	$N_3 = 6.66 \cdot 10^{20}$
$n_1 = 3 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3} = 3 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3}$	$\rho_1 = 1.25 \text{ Г/см}^3$	$T_1 = 3.4 \cdot 10^8 \text{ К}$
$n_2 = 1.02 \cdot 10^{31} \text{ м}^{-3} = 1.02 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3}$	$\rho_2 = 41.5 \text{ Г/см}^3$	$T_2 = 10^7 \text{ К}$
$n_3 = 6 \cdot 10^{31} \text{ м}^{-3} = 6 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3}$	$\rho_3 = 250 \text{ Г/см}^3$	$T_3 = 1.6 \cdot 10^6 \text{ К}$
	$\bar{\rho} = 93 \text{ Г/см}^3$	

Хүснэгтэнд бичигдсэн онолын тооцооны өгөгдлүүдээс анализ хийж үзвэл цөмийн түлшний эзэлхүүнийг температураас нь хамааруулан халуун ба хүйтэн гэсэн хоёр мужид ангилж болохоор байна. Энэ хоёр мужид температураас гадна холимогийн нягт түүний радиусаас хамааралтайгаар огцом өөрчлөгдөж байна. Тэдгээрийн хамаарлыг (зураг 3.)-д харуулав. Графикаас харахад бөмбөлөгийн төвөөс гадагшлах тутам температур хамгийн их утгаасаа огцом буурч радиусын тодорхой утганд бууралт тогтворжсон тэр мужаас цөмийн плазмын нягт огцом нэмэгдэж улмаар радиусын тодорхой утганд огцом буурч байна. Нягтын огцом бууралт зогссон тэр үеээс цааш төгсгөл хүртэл нягт тогтворжиж, температур бас тогтворжиж байна. Температур огцом буурах мужид нягтын огцом өсөлт эхлэж цааш температур аажмаар буурах мужид нягтын огцом өсөлт үргэлжилж улмаар температурын тодорхой утганд огцом бууралт явагдаад температурын тодорхой утганд огцом бууралт зогсож цаашдаа тогтворжиж байна. Өөрөөр хэлбэл температурын хамгийн бага утга тогтмолжсон мужид нягт бага утгаа авч тогтмолжиж байна. Эндээс дүгнэж үзвэл, цөмийн түлшний нягт зарим мужид

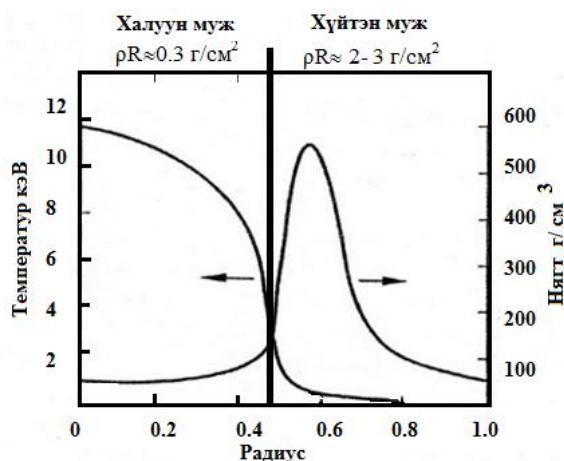
$\cdot 10^{-11} \text{ м}^3$ эзэлхүүнтэй болтол шахан агшаах үед цөмийн түлшний температур, даралт, нягт, концентраци, ионуудын хурд зэрэг параметруудийг тодорхойлж тэдгээрийн харилцан хамаарал, уялдаа холбоог нарийвчлан тогтооход судалгааны зорилго оршино. Гадаад плазм ба цөмийн түлшний бүтцийг загварчилж, бүх эзэлхүүнд даралтыг тогтмолоор авч харин муж тус бүрт энергийн хувиарлалт хийх аргаар муж тус бүрийн үндсэн параметруудийг тодорхойллоо. Онолын тооцооллоор гарч ирсэн физик хэмжигдхүүнүүд туршилтын өгөгдлүүдтэй ойролцоо байна. Цөмийн түлшний эзэлхүүнийг 3 мужид (бүсэд) хувааж, муж тус бүрийн үндсэн параметруудийг онолын тооцооллоор тодорхойлсон ба тооцооны дүнг хүснэгт 1-д харууллаа.

температураас огцом харин тодорхой мужид аажим хамааралтай байна.

В. Энэхүү лазерийн удирдлагат халуун цөмийн урвалыг явуулахад зайлшгүй шаардагдах лазерийн цацрагийн энерги, чадал, ба эрчимын тооцоолол:

Түлшний 1-р мужид лазерийн цацрагийн өгсөн эрчим $42 \cdot 10^{18} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ харин нэг импульсийн эрчим $10^{18} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ байх тул байд үйлчилсэн импульсийн тоо 42 ширхэг байна. Түлшинд өгсөн лазерийн цацрагийн нийт энерги $W = 25452 \text{ Ж}$ учираас нэг импульсийн энерги нь $W_{\text{имп}} = \frac{25490 \text{ Ж}}{42} = 606 \text{ Ж}$ тул нэг импульсын чадал $N_{\text{имп}} = I_{\text{имп}} \cdot S = 5 \cdot 10^{14} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ харин нэг импульсийн үргэлжлэх хугацаа 1.2пс байна. Нэгдүгээр мужид цөмийн ионуудыг тогтоон барих хугацааг халуун цөмийн урвал зайлшгүй явагдах $T = 3.8 \cdot 10^8 \text{ К}$ үед $n_{1/T1} > 10^{14} \frac{\text{с}}{\text{см}^3}$ байх ёстой гэсэн нөхцлөөс олбол: $\tau > 3.3 \cdot 10^{-10} \text{ с} = 0.33 \text{ нс}$ болно. Энэ нь нэгдүгээр мужийн ионуудыг буюу цөмүүдийг 0,33нс – ээс дээш хугацаанд тогтоон барих шаардлагатай гэсэн үг юм. Ингэхийн тулд 1,2 пс хугацаатай 42ш импульсээр 275-аас доошгүй удаа үйлчилнэ. Ингэснээр 3мг цөмийн түлшийг нэгдэх урвалд оруулахад нийтдээ 7МЖ лазерийн цацрагийн

энерги зарцуулна гэсэн тооцоо гарч байна. Энэ үедгадаад плазмын ионууд цохилтот долгионы болон лазерийн цацрагийн гэрлийн даралтын үйлчлэлээр $14 \cdot 10^{14}$ Па даралтанд байна. Энэ даралтын үйлчлэлээр цөмийн плазм 300 мкм диаметртэй бөмбөлөг болтлоо шахагдаж агшсан байна. Энэ үед цохилтот долгионы (рентген туяаны) энерги цөмийн плазмын төвд (фокуслагдаж) төвлөрөх үед цөмийн түлшний температур $3.2 \cdot 10^8$ К болж цөмийн нэгдэл буюу урвал явагдана. Плазмыг шахаж агшаах цохилтот долгионы энергийн зарим хэсэг нь гадаад, дотоод плазмыг шахаж агшаахад зарцуулагдах ба тодорхой хэсэг нь плазмыг нэвтэрч улмаар байны төвд төвлөрч, цөмийн түлшний энергийг нэмэгдүүлэн халуун цөмийн урвал явагдах нөхцөлийг бүрдүүлж өгнө. Лазерийн цацрагийн нийт энерги нь хатуу бодисыг буюу байг атом, молекулын түвшинд ууршуулах, хайлуулах, уурын атом, молекулуудыг иончлох, ионууд, электронуудад релятив хурд, энерги өгөх, цохилтот долгион үүсгэх, байг шахаж агшаах, гадаад, дотоод плазмыг өндөр даралтанд тогтоон барих зэрэгт зарцуулагдана.



3 дугаар зураг. Цөмийн түлшин доторхи температур ба нягтын түгэлт.

ДҮГНЭЛТ

1. Халуун цөмийн түлшийг температураас нь хамааруулж халуун ба хүйтэн гэсэн 2 мужид хуваан авч үзэж муж тус бүрд явагдах процессуудыг нарийвчлан судлах боломжтой. Халуун мужид температур 2кэВ - 10кэВ, хүйтэн мужид 0.125кэВ – 2кэВ температур тус тус харгалзаж байна.
2. 10кэВ температуртай $3 \cdot 10^{23}$ см⁻³ концентрацитай цөмийн түлшний ионуудын нэгдэх урвалыг 0.33нс хугацаанд тогтоон барихын тулд 7Мж энерги зарцуулагдана гэсэн тооцоо гарч байна. Лазерийн цацрагийн

импульсийн эрчим энэ үед 10^{18} Вт/см² - аас багагүй байна.

3. Цөмийн түлшний нягт ба концентраци нэгдүгээр мужид хамгийн баг, хоёрдугаар мужид хамгийн их, гуравдугаар мужид нэгдүгээр мужаас арай их өөрөөр хэлбэл ойролцоо байна. Эндээс харахад цөмийн түлшний ионуудын дийлэнх хэсэг нь хоёрдугаар мужид төвлөрдөг байна.
4. Онолын тооцоолол ёсоор халуун плазмын температур 10кэВ, даралт 100Мбараас багагүй, ионуудын концентраци 10^{23} см⁻³, ионуудын плазмд байх хугацаа 1нс орчим байх үед хөнгөн элементийн цөмүүд нэгдэх хамгийн боломжит нөхцөл бүрдэж байна. Ийм параметруудтэй халуун плазмыг үүсгэхэд нийтдээ 356МЖ энерги шаардагдана. Хамгийн сүүлийн үеийн өндөр чадалтай лазерийн цацрагийн импульсын энерги 1.8Ж, хугацаа нь 1нс байгааг тооцож үзвэл 199 лазерийн цацрагийн импульсээр ионжигч бодист нэгэн зэрэг үйлчлэх хэрэгтэй гэж үзэж байна.
5. Цөмийн түлшийг адиабатаар агшаах гадаад халуун плазмын даралт нь түлшийг халуун цөмийн нэгдэлд идэвхтэй орох хэмжээний нягт, температуртай болтол үйлчилэхэд хүрэлцэхүйц хэмжээтэй байхаас гадна цөмийн урвал өрнөх хугацаанаас багагүй хугацаанд үйлчлэх зайлшгүй шаардлагатай гэдэг нь судалгааны дүнгээс тодорхой харагдаж байна. Халуун цөмийн урвалд оролцогч цөмийн массуудын нэгж эзэлхүүн дэх тоо хэдий чинээ их байна тэдгээрийг тогтоон барих хугацаа төдий чинээ багасана гэсэн дүгнэлт гарч байна.
6. Цөмийн түлшний нягт температураас хамаарах хамаарал муж бүрт эрс өөр өөр байна. Тодруулбал, температурын утгын зарим мужид огцом өөрчлөгдөж зарим утганд маш бага өөрчлөлттэй байна. Температур огцом буурах мужид нягтын огцом өсөлт эхлэж цааш температур аажмаар буурах мужид нягтын огцом өсөлт үргэлжилж улмаар температурын тодорхой утганд огцом бууралт явагдаад температурын тодорхой утганд огцом бууралт зогсож цаашдаа тогтворжиж байна. Өөрөөр хэлбэл температурын хамгийн бага утга тогтмолжсон мужид нягт бага утгаа авч тогтмолжиж байна. Эндээс дүгнэж үзвэл, цөмийн түлшний нягт зарим мужид температураас огцом харин тодорхой мужид аажим хамааралтай байна.

АШИГЛАСАН НОМ, ХЭВЛЭЛ

[1] Гаранин С.Г. Мощные лазеры их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии. УФН. 2011.
[2] Фортов В.Е. Шарков Б.Ю. Введение в релятивистскую ядерную физику. Физматлит. 2011.

[3] Беляев Б.С. Крайнов В.П. Генерация быстрых заряженных частиц и сверхсильных магнитных полей при взаимодействии сверхкоротких интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями. УФН. 2008.