

Харьцангуйн Ерөнхий Онол ба Космологи

Ч.Лхагважав

МУИС, Физик Электроникийн Сургууль

Харьцангуйн Ерөнхий Онол (Общая теория относительности – The General Theory of Relativity) -

- Таталцлын орны харьцангуйн онол буюу физик биедээр бий болох орон-цагийн нийлмэл огторгуйн муруйлтын мөн чанарын тухай онол, таталцлын орон дахь бодис – материйн тасралтгүйн тэгшитгэлээр илэрхийлэгдэх материйн түгэлт болон хөдөлгөөний хоорондын, мөн орон – цагийн геометр шинжүүд хоорондын холбоог тодорхойлогч шинжлэх ухааны салбар тогтолцоот мэдлэг.

Орчлон судлал (Космология - Cosmology) -

- Астрономийн ажиглалтаар хуримтлуулсан Ертөнцийн тэр хэсэгт хамаарах мэдээ баримтанд тулгуурласан, онолын дүгнэлтэнд үндэслэсэн Ертөнцийн тухай бүхлэг тогтолцоогоор нь судлах физикийн шинжлэх ухааны салбар – астрофизикийн салбарын тогтолцоот мэдлэг.

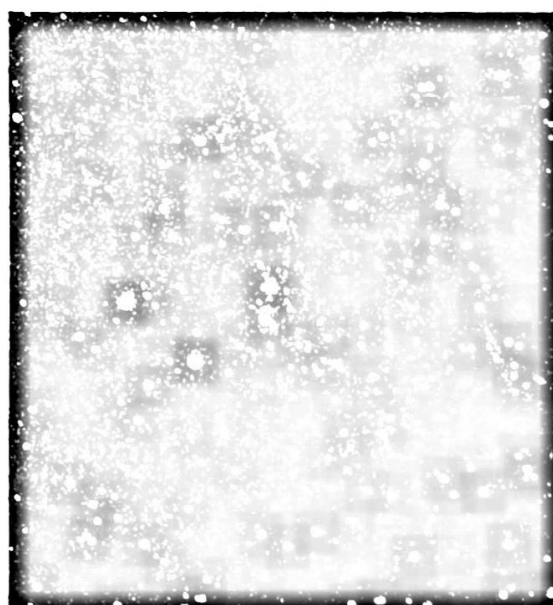
I. Харьцангуйн Ерөнхий Онол Орчлон судлалд үзүүлсэн нөлөөлөл

Орчлон судлалын онолын суурь үндэс нь таталцлын онол, цахилгаан – соронзон орны онол, квант онол болон физикийн бусад суурь мэдлэгийн тогтолцоот онол учраас 1905 онд физикийн шинжлэх ухааны хөгжилд хувьсгалт эргэлт болсон А.Эйнштейний ГУРВАН (Фотоэффект, Харьцангуйн тусгай онол, Броуны хөдөлгөөн) цуутай, суут том бүтээл бүгдээрээ орчлон судлалд үсрэлтийн шинжтэй хөгжлийн түлхэц болсон[1-14].

XIX зууны сүүлч XX зууны эхээр орчлон судлалын олон асуудалд сонгодог физикийн тулгуур хуулиудаар гүйцэд шийдэхээргүй мухардмал бэрхшээлтэй байдал, сонгодог физикийн онолын хүрээнд тайлбарлахааргүй парадокс тулгарч байсан жишээ олон бий. Үүнээс зөвхөн Эйнштейний “Харьцангуйн Ерөнхий Онол” бий болсноор ойлгомжтой хялбар, “дотоод логик зөрчилгүй” тайлбарлагдах болсон тухай ярихдаа – “онолын мөрдлөгөө - ажиглалтын баримтын зөрөө” гэхээр зарим парадоксын шинжтэй жишээ баримтаас санаж, Эйнштейний бүтээлүүд хэрхэн Орчлон судлалд нөлөөлснийг төсөөлж болох юм.



2 дугаар гэрэл. 20 см-ийн Шмидт системийн дурангаар авсан сүүлт олны зураг.

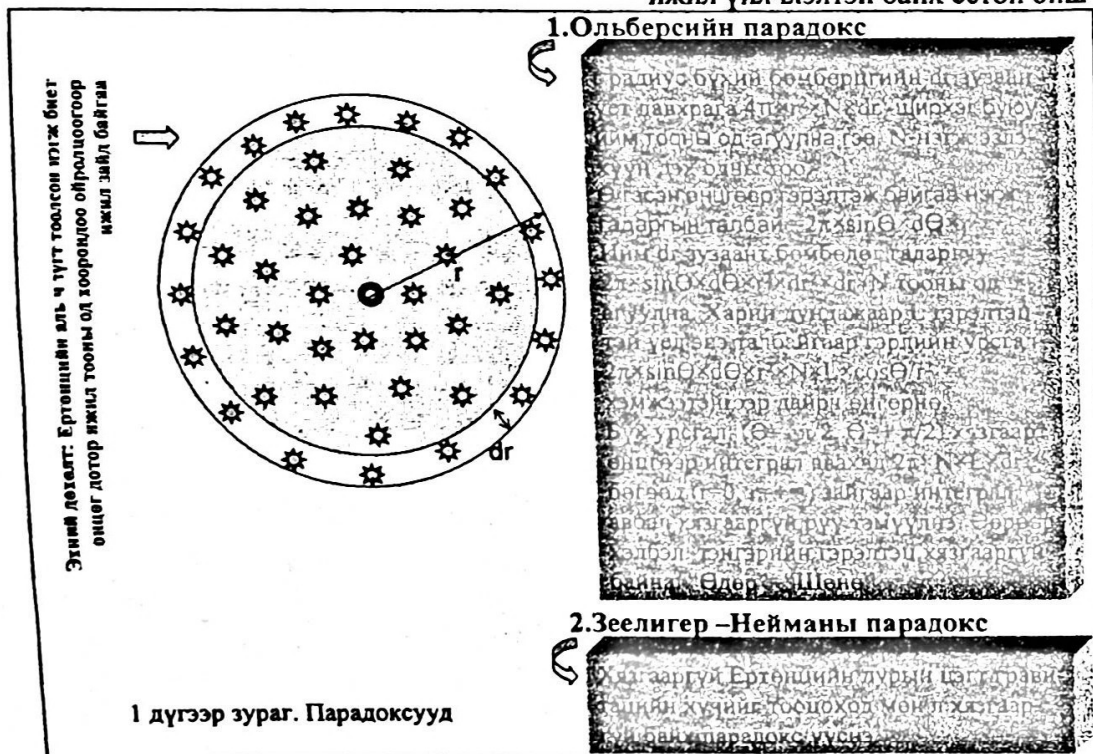


1 дүгээр гэрэл зураг. “Хун” (Cygnus - Лебедь) хэмээх одны ордод байрлалтай “Бүрхүүл” (Veil) гэх мананцар. “Сүүн зам” буюу “Тэнгэрийн заадас”-ын оддын тоогоороо нлүү баалаг муж дахь сулавтар гэрэлтэгч хийн хөвөгч бүс хэсэг. Эхний дөхөлтөөр «Одод чиглэл бүрт тооны хувьд ижил түгэлттэй, бодисын нягташралын хувьд нэгэн төрөл бус тархалттай» гэж болно.

Жишээ баримтаар тодотгоё. Одон орон судлал (астрономи), астрофизикийн шинжлэх ухааны тухайн үеийн ололтын хүрээнд мэдэгдэж байсан тэр цагийн ажиглалтын баримтаас санавал, ертөнц даяар харах чиглэлээс үл хамааран, жишээлбэл, тэнгэрийн дурын цэг рүү чиглэх нэгж биет өнцгөөр үзэгдэх оддын тоо ойролцоогоор тэнцүү буюу одод орон зайн жигд түгэлттэй, гэхдээ масс тархалтын хувьд нэгэн төрөл бус гэдэг илэрхий байлаа (1, 2 дугаар гэрэл зураг).

XX зууны эхэн үе хүртэлх орчлон судлалын энэ баримтыг, мөн одон орон судлалын ажиглалтын үүнтэй төсөөтэй бусад олон баримтыг сонгодог физикийн онолын хүрээнд бүрэн, гүйцэд

тайлбарлаж чадахгүй байсаар байсан тэр үед Эйнштейний ГУРВАН алдарт бүтээл хэвлэгдэж, үүнийг хожмоо “1905 онд Физикийн шинжлэх ухаанд сэтгэлгээний хувьсгал хийсэн ажил” гэж нэрлэсэн билээ. Үүнээс хойш гүйцэд биш тайлалттай байсан байгалийн зарим үзэгдэл ойлгомжтой болж эхлэв. Тухайлбал, космологит ойлгомжгүй, тайлбаргүй байсан, фотометрийн парадокс, гравитацийн парадокс юм.



1. **Фотометрийн парадокс (Ольберсийн):** Хязгааргүй Ертөнцөд хаашаа л харна заавал од тохионо. Гэрэл цацруулагч аливаа биетийн гадаргуугийн гэрэлтэцийн тодрол (яркость – brightness) зайнаас үл хамаарах хэмжигдэхүүн учраас харааны дурын чиглэлд тэнгэрийн дурын муж хэсэг нь одны гадаргуугийн гэрэлтэцийн тодролтой тэнцүү гэрэлтэцийн тодролтой байх буюу гэрэлтэй, гэрэлтэцтэй байх ёстой. Өөрөөр хэлбэл, “шөнө” болон “өдөр” гэсэн ойлголтоор гэрэлтэцийн ялгаа байх учиргүй. Гэтэл шөнө тас харанхуй, өдрийн тэнгэр шөнийхээс гэрэлтэцээрээ 10^{13} дахин тод хурц, энэ нь ямар учиртай вэ? Яагаад ийм бэ? Хязгааргүй Ертөнцөд хаашаа л харна, заавал од харагдана. Чиглэлээс үл хамааран нэгж биет өнцөг дотор ойролцоогоор ижил тооны од ажиглагддаг. Гэсэн хэдий ч шөнөдөө харанхуй тэнгэрт сая живаа од түгсэн үзэгдэнэ, өдөртөө болохоор Нар хэмээх хамгийн ойр одны гэрлээс илүү

гэрэлтэй биет тэнгэрт огт харагддаггүй ээ. Өдөр Нарны гэрэл тэнгэрт давамгайлна. Тэгвэл энэ чинь физикийн ойлголтоор юу гэсэн үг вэ? Сонгодог физикийн хууль Ертөнц даяар үйлчлэлгүй байна уу? Эсвэл бид үүнээс илүү түгээмэл хууль байх ёстойг хараахан нээгээгүй байгаа юм уу? Физикийн хууль Ертөнцийн энэ хэсэгт хүчин төгөлдөр байгаа бол өөр хэсэгт мөн л ижил үйлчлэлтэй байх ёстой биш үү?

2. **Гравитацийн парадокс (Зеелигер-Нейманы):** Хязгааргүй Ертөнцийн дурын зайд орших дурын цэг дээр $F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$

гравитацийн хүчийг бодъё. Энэ дурын цэг дээр ертөнц даяар байрших бүх массаар таталцах хүчний тоон утга “ $+\infty$ ”, эсвэл “ $-\infty$ ” төрлийн тодорхойгүй байх, түүний дотор бас тодорхой, гэхдээ энэ нь “хязгааргүй” гэсэн утга байх болно. Мөн “хязгааргүй” холоос ирэх материаллаг цэгийн хурд

$$\left(v_2 = \int_{t_1}^{t_2} a_2(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} [F/m_2] dt = \int_{t_1=0}^{t_2=\infty} G \frac{m_1}{r^2} dt \right)$$

хязгааргүй их байх болно. Ийм “хязгааргүй” гэсэн утга санаа нь агуулгын хувьд физикийн ямар мөн чанарыг илэрхийлнэ вэ?

Орчлон судлалд эдгээр болон тэдгээртэй мөн чанарын хувьд төсөөтэй олон ойлгомжгүй парадокс бүхий асуудал тунарч тулгарсан ийм

нөхцөл байдлын үед “Харьцангуйн Тусгай Онол” болон “Харьцангуйн Ерөнхий Онол” бий болсон. Эквалентийн зарчим ёсоор, “хурдатгалтай хөдөлж байгаа координат бүхий тооллын систем (солбицлын тогтолцоо)” нь “Таталцлын нэгэн төрөл бус орон”-той хоорондоо физик мөн чанараараа эквивалент. Механикийн энэ зарчимаас үүдэж Эйнштейн ийм эквивалент зарчмыг бүх физик үзэгдэлд хэрэглэж болно гэсэн таамаглал дэвшүүлсэн. Биетүүдийн “таталцал” бол орон-цагийн нийлмэл огторгуйн муруйлтын илрэл болох шинж тэмдэг, өөрөөр илэрхийлбэл, аливаа биетээс орон-цагийн нийлмэл огторгуйн геометр (хэлбэр)-т гажилт – муруйлт бий болгож байгаа илрэл нь тэдгээр биетийн таталцал юм. Ийм тулгуур үзэл санаа, таамаглалыг дэвшүүлсэн нь А.Эйнштейн “Харьцангуйн Тусгай Онол” болон “Харьцангуйн Ерөнхий Онол”-оо бүтээх үндэслэл болсон.

Г.Лоренц, А.Пуанкаре гэх мэт эрдэмтдийн бүтээл туурвил нь А.Эйнштейн Харьцангуйн Тусгай Онол (ХТО)-оо 1905 онд бүтээх урьдчилсан нөхцөл болсон бөгөөд тухайн цаг үеийн физикийн тулгамдсан олон асуудал бас энэ онол бий болох, энэ чиглэлд эрдэмтэд анхаарлаа төвлөрүүлэх сэдэл болж байжээ.

Орон зай хийгээд цаг хугацааны ойлголт ажиглагчийн хөдөлгөөнөөс хамааралтай нь гайхалтай бөгөөд хамааралгүй байх ёстой гэдэг таамаглал ёсоор тухайн агшинд нэгэн утга – “абсолют утга” –тай байх чухамхүү тэр солбицлын тэнхлэг бүхий тооллын тогтолцооны (систем) математик илэрхийлэл нь муруйлтгүй орон-цагийн огторгуйн геометрийн хувьд зөвхөн тодорхой дөрвөн хэмжээст огторгуй байдаг. Үүийг тодруулан тайлбарлая. Тухайн сонирхож байгаа цэг болон ажиглагч хоёртой холбоо бүхий координатын систем хөдөлж байх үед уг цэгээс эх бүхий хэрчмийг сонирхогчийн ажиглаж байгаа харааны өнцгөн хэмжээ, мөн тэр цэг болон ажиглагч хоёрын хоорондох зайн хэмжээ – тоон утга харьцангуй бөгөөд координатын системээс хамааралгүй, тухайлбал, тэр тухайн сонирхож буй цэг болон ажиглагч хоёрын хоорондох зай нь инвариант бөгөөд үнэмлэхүй нэг утгатай [абсолют] байх тооллын тогтолцоо олдох уу гэвэл олдоно. Харин энэ нь зөвхөн орон- цаг нийлсэн дөрвөн хэмжээст[1]:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \equiv \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (1)$$

гэж математик хэлбэрээр илэрхийлэгдэх огторгуйд л хүчин төгөлдөр байна. Энд μ, ν гэж тэмдэглэсэн “им” буюу индекс нь 0, 1, 2, 3 гэсэн дараалсан утгууд авна. Энэ (1) дүгээр томъёоны $\equiv$ тэмдгээс баруун гар дахь хэсэгт байгаа илэрхийлэл нь дээд доод имээр нийлбэр авахыг нийлбэрийн тэмдэггүйгээр зааж байгаа бөгөөд имүүд өөрчлөгдөх үе дэх утгууд, жишээлбэл, $x^0 = c \cdot t, \quad x^1 = x, \quad x^2 = y, \quad x^3 = z,$
 $-\eta_{00} = \eta_{11} = \eta_{22} = \eta_{33} = -1$, бусад бүх $\eta_{\mu\nu} = 0$ байна. Харин муруйлттай огторгуйн хувьд энэ томъёо хүчинтэй биш. Учир нь ийм огторгуй дахь цэгүүдийг холбох “шулуун” шугамын мөн чанар нь хавтгайн геометрийн ойлголтоос өөр. Евклид геометрийн “шулуун шугам” хэмээх ойлголтын ерөнхийлөл нь муруйлттай огторгуйн геодезийн шугам юм. Нар мэт масс ихтэй сансрын нүсэр биетээр бий болох гравитацийн орон ямар ч тохиолдолд, хэзээч, хаана ч, үргэлж нэгэн төрөл бус учраас ийм оронд тооллын аливаа локаль-инерциаль тогтолцоо (систем) орчлонгийн бүх орон зай - цаг хугацааны огторгуй даяар хүчин төгөлдөр байх үйлчлэлтэй байх боломжгүй, ийм оронд (1) дүгээр томъёо инвариант хэлбэртэй, абсолют агуулгын үйлчлэлтэй гэж хэрэглэж болохгүй. Тэгвэл орон-цагийн нийлмэл муруйлттай нэгдмэл огторгуйд (1) дүгээр томъёо үйлчлэхгүй, бодит орон зайг бас л тодорхойлохгүй гэсэн үг. А.Эйнштейн ийм “нэгэн төрөл бус” таталцлын оронгийн мөн чанарыг орон-цагийн огторгуйн муруйлттай адилтгасан утгаар ойлгож таталцлын орны нэгэн төрөл биш чанар бол орон-цагийн нийлмэл нэгдмэл огторгуйн муруйлт гэж үзсэн.

Муруйлттай огторгуйн геометрийн математик аппаратын үндсийг оросын эрдэмтэн Н.И.Лобачевский, унгарын математикч Я.Бойаи болон немцийн математикчид К.Гаусс, Г.Риман нар тавьсан байлаа.

Муруйлттай орон-цагийн огторгуйн геометрийн хувьд зайн хэмжээ нь (тооллын тогтолцооны сонголтоос үл хамаарах зайн хэмжээг олох инвариант томъёо):

$$ds^2 = g_{\mu\nu} \cdot dx^\mu \cdot dx^\nu \quad (2)$$

гэж тодорхойлогдоно. Дээрх (1) дүгээр томъёо дахь тодорхой тооны хэмжигдэхүүний багц нэгдэл болох $\eta_{\mu\nu}$ - илэрхийллийг Минковскийн огторгуй дахь буюу орон-цагийн нийлмэл хавтгай огторгуйн метрик тензор нэж нэрлэдэг.

Метрик гэж нэрлэж байгаагийн учир нь эдгээр хэмжигдэхүүн нь агшин хоорондын хугацааг болон цэг хоорондын зайг тодорхойлоход оролцох гол үүрэгтэйг тэмдэглэсэн хэрэг л болохоос яг ердийн “метр” хэмээх хэмжээсээр нэгжлэгдэнэ гэсэн утгатай биш юм. Харьцангуйн тусгай онолын мөрдлөг болж зөвхөн орон зай, цаг хугацаа төдийгүй масс, импульс, хүч гэсэн физикийн чухал хэмжигдэхүүний тухай ойлголт ч мөн л өөрчлөгдсөн бөгөөд эдгээр нь хурднаасаа хамааралтай өөрчлөгдөж байдаг, тогтмол биш утгатай болно. Тухайлбал, физикийн сурах бичигт байгаа: $m = m_0 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$ - бодисын масс, $E = m_0 c^2 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$ - бодисын энерги,

$p = m_0 v / \sqrt{1 - (v/c)^2}$ - түүний импульс болно. Энерги, импульс хамтдаа нийлээд дөрвөн компонент (байгуулагч) бүхий нэгэн вектор хэмжигдэхүүнийг үүсгэдэг. Харин тасралтгүй ус шиг “нийлэнгэ” орчны хувьд энергийн нягт, импульсийн нягт, импульсийн урсгалын нягт хамтдаа нийлээд арван компонент бүхий энерги-импульсийн нэгэн $T_{\mu\nu}$ -тензор бий болгодог.

Бодисын буюу аливаа материйн “Энергийн нягт”, “Импульсийн нягт”, “Импульсийн урсгалын нягт” гэсэн гурван хэмжигдэхүүнийг хамтад нь 10 компоненттой (байгуулагчтай) нэгэн хэмжигдэхүүнээр буюу $T_{\mu\nu}$ - энерги-импульсийн тензор гэдэг хэмжигдэхүүнээр илэрхийлж болно.

Муруйлтын $R_{\mu\nu\alpha\beta}$ -тензорыг “метрик” $g^{\alpha\beta}$ -тензортой нэмээд, үүнийг тензор тооллын үйлдлээр илэрхийлбэл, $R_{\mu\nu} \equiv g^{\alpha\beta} R_{\mu\nu\alpha\beta}$ гэсэн тэгш хэмт тензор үүсгэж болно. Энэ $R_{\mu\nu}$ тензор нь гравитацийн орон үүсгэгч эх сурвалж болох бодис – материйн $T_{\mu\nu}$ - энерги-импульсийн тензортой адил тооны байгуулагчтай.

А.Эйнштейн $R_{\mu\nu}$ болон $T_{\mu\nu}$ хэмээх энэ хоёр тензорын хооронд ямар нэгэн холбоо байх ёстой гэсэн таамаглал дэвшүүлсэн. Энэ холбоог эцсийн дүндээ таталцлын буюу гравитацийн орны тэгшитгэл л илэрхийлнэ гэж үзсэн. Түүнээс гадна электродинамикт хүчин төгөлдөр гэж батлагдсан гүйдлийн тасралтгүйн тэгшитгэл адил төсөөтэй агуулга бүхий тэгшитгэл байх ёстой, энэ нь гравитацийн

оронд бодисын - материйн тасралтгүйн тэгшитгэл болно гэж урьдчилан таамаглажээ. Ийм тэгшитгэлийг төсөөтэйн аргаар бараг автоматаар бичиж болох бөгөөд энэ нь Эйнштейний хэмээн нэршсэн алдарт тэгшитгэл юм. Харин А.Эйнштейн электродинамикийн сонгодог хууль илэрхийлэгч гүйдлийн тасралтгүйн тэгшитгэлээр адилтгал авч цэвэр физикийн хуулийн гаргалгааны логик алхам, бодомж сэтгэлгээний гайхамшгаар энэхүү тэгшитгэлийнхээ анхны гаргалгааг 1916 онд хийсэн.

Тооллын тогтолцооны сонголтоос үл хамаарах, хэлбэрийнхээ хувьд инвариант шинжтэй Эйнштейний тэгшитгэл:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \cdot R = \frac{8\pi G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu} \quad (3)$$

- бодисын тархалт болон хөдөлгөөн, нэг талаас, мөн түүний орон-цагийн геометр шинж чанар, нөгөө талаас, хоёрын хоорондын холбоог илэрхийлсэн тэгшитгэл юм.

Энэ (3) дугаар тэгшитгэлийн зүүн гар тал дахь $R_{\mu\nu}$ - тензорийн байгуулагчууд нь орон-цагийн нийлмэл огторгуйн геометрийг тодорхойлох бөгөөд баруун гар дахь $T_{\mu\nu}$ - тензорийн байгуулагчууд болохоор гравитацийн орны эх үүсгүүрүүд буюу таталцлын орнуудын болон бодисын физик шинж чанарыг илэрхийлнэ. Харин $g_{\mu\nu}$ гэсэн хэмжигдэхүүнүүд гравитацийн оронг тодорхойлогч функц төдийгүй, үүний хамт орон-цагийн огторгуйн метрик тензорын байгуулагчууд юм. Энэ тэгшитгэлийн гаргалгааг нарийвчилсны дараа А.Эйнштейн:

- «Би ажил нээлтийнхээ ихэнх хэсгээ цаг үеийн физик судалгаанд “эрдэмтдийн анхаарал татсан”-шийдвэрлэх ёстой тулгамдсан асуудал байсан учраас, тухайлбал, “Харьцангуйн тусгай онол”, “Гэрлийн квантын онол” зэрэг бүтээлээ бусад эрдэмтдээс 2-3 жилээр түрүүлж хийсэн бол “Таталцлын Онол”-ыг харин 50 жилийн дараа л бусад хүмүүс бүтээнэ[1]» – гэж бичсэн нь үнэн байв. Энэ бол үнэнхээр гайхалтай зөн гэмээр алсын хараа.

Үнэндээ 1960-аад оны үеэс оронгийн онолын ерөнхий шинэ арга бий болж орон-цагийн хавтгай огторгуйд өгөгдсөн оронгийн ойлголтоос үүдэлтэй “Таталцлын шугаман бус

онол” –д өөр хандлага, сэтгэлгээ, хөтөч үзэл төрж бий болсон байна. Геометрийн сэтгэлгээгээр бий болсон Эйнштейний онолын мөрдлөг болох “Орон зайн битүү Ертөнцийн онол”, “Хар нүхийн онол” зэргээр түүний бүтээлийн үнэн зөвийг батлаж болохоос гадна “Орчлон судлал” болон “Одон орон судлал”-д геометр тайлбар шаардсан асуудлууд илүү тулгамдсан байдаг, ийм арга илүү үр дүнтэйг энэ нь бас харуулж байна.

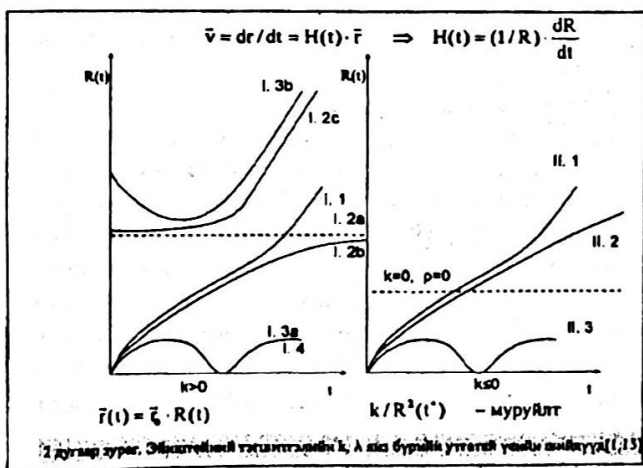
Татах хүчлэлээр бий болох (сурах бичиг бүрт бичигдэх болсон) хурдатгал:

$$g = -\frac{4}{3}\pi G\rho r \quad (4)$$

учраас, мөн хэрэв зөвхөн татах хүчлэл л үйлчилж байгаа бол Ертөнц агшсаар цэг болтлоо нийлэх ёстой, ийм байхгүйн тулд заавал түлхэх хүчлэл хэрэгтэй гэж А.Эйнштейн үзэж “ Λ с²” космологийн гишүүн” гэдэг хэмжигдэхүүн хэрэглэхдээ:

$$g_{\text{түлхэх}} = +\frac{4}{3}\pi G\rho r = \Lambda c^2 r \quad (5)$$

гэж түлхэх хүчлэлээр бий болох хурдатгалыг тодорхойлно гэсэн байна. Энд $\rho = 2 \cdot 10^{-29} \text{ г} -$ ертөнцийн дундаж нягт бөгөөд харин “космологийн гишүүн” хэмээх хэмжигдэхүүний Λ -тогтмол тоо бол ойролцоогоор $\Lambda = 5 \cdot 10^{-38} \text{ см}^{-2}$ болно.



Энэ өчүүхэн бага хэмжигдэхүүнийг космологийн тогтмол буюу вакуумын гравитаци гэж нэрлэдэг. 1916 онд А.Эйнштейн татах хүчлэлийн хувьд λ , түлхэх хүчлэлийн хувьд Λ гэсэн хэмжигдэхүүн хэрэглэж (3) тэгшилгэлийн шийдийг олжээ. Эйнштейний (3) дугаар тэгшитгэлийг 1922-1924 онд А.А.Фридман тогтонги бус Ертөнцийн хувьд

космологийн гишүүн байхгүйгээр, $r = r_0 R(t_2)$ гэж үзээд шийдсэн. Энд r_0 бол Ертөнцийн эхлэх үеэс одоогийн t_2 үе хүртэл хугацаанд тэлсэн зай юм.

Ертөнцийн нягт янз бүрийн утгатай, түлхэх хүчлэл байх болон байхгүй үед олж болох Эйнштейний тэгшитгэлийн шийдийг 2 дугаар зурагт дүрслэв. Эндээс Ертөнцийн хувьсал хөгжил янз бүрийн хуулиар өөрчлөгдөх боломжтойг харж болно.

Тодорхой нөхцөл тавин бодох (3) тэгшитгэлийн шийдүүд буюу Ертөнцийн боломжит загварууд (2 дугаар зураг) [15] нь:

I. Ертөнцийн ерөнхий муруйлтын хэмжээг

k/R^2 гэж илэрхийлсэн $k > 0$ үед

$\lambda = \Lambda = [4/3 \pi G \rho] / c^2$ гэсэн критик утга олдох бөгөөд ийм тохиолдол хүчин төгөлдөр үеийн шийд;

1) $R(t) = 0$ үеэс эхлэлтэй “Хязгааргүй тэлэгч Ертөнц” болох Леметрийн загвар буюу $\lambda > \lambda_c$ байх үеийн шийд;

2) $\lambda = \lambda_c$ үед шийд гурван хувилбартай:

а) Эйнштейний “Тогтонги Ертөнц”-ийн загвар буюу $R(t) = \text{const} = R_0$ үеийн шийд;

б) $R(t) = 0$ үеэс эхлэлтэйгээр аажмаар тэлэхдээ хурдацаа сааруулсаар төгсгөл утга руугаа хязгааргүй дөхөх загвар;

с) Эддингтон-Леметрийн загвар буюу $R(t) \neq 0$ үеэс эхлэлтэй, тэгээд аажим тэлсээр хэтдээ хурдацтай тэлэх загвар;

3) $\lambda_c > \lambda > 0$ үед хоёр хувилбар шийдтэй:

а) $R(t) = 0$ үеэс эхлэлтэй, цааш тэлсээр тодорхой утга хүрээд эргэж агшсаар $R(t) = 0$ утгаас дахин тэлэх шийд буюу “Лугшигч Ертөнц”-ийн загвар;

б) $R(t) \neq 0$ үеэс эхлэлтэй, ямар нэг тодорхой утга хүртэл агшсаар, дараа нь тэндээсээ хязгааргүй тэлэх загвар;

4) $\lambda \leq 0$ үед 3. а) шиг лугшигч загварын Ертөнц байх шийдтэй;

II. $k = 0$, $k < 0$ үед хоорондоо төсөө бүхий гурван шийдтэй:

- 1) $\lambda > 0$; $R(t) = 0$ үеэс эхлэлтэй хязгааргүй тэлэхдээ цаг хугацаа өнгөрөх тусам их хурдацтай болох загвар;
- 2) $\lambda = 0$; мөн $R(t) = 0$ үеэс эхлэлтэй, II.1) тохиолдолтой ижил, гэхдээ цаг хугацаа өнгөрөх тусам $R(t)$ -ийн өсөлт аажимсана. ;
- 3) $\lambda < 0$; бас $R(t) = 0$ үеэс эхлэлтэй “Лугшигч Ертөнц” байх загвар.

болно.

Эдгээрээс гадна их тэсрэлтээс үүдэлтэй тэлж буй “Халуун Ертөнц”, “Инфляцийн Ертөнц” гэх мэт олон загвар бий болсон. Ямар ч загвар байлаа гэсэн Ертөнц орчин үед тогтонги бус, тэлэлтийн үедээ байгаа гэдэг нь астрофизикийн олон ажиглалтын баримтаар нотлогдож байна. Энэ нь А.Эйнштейний Харьцангуйн Ерөнхий Онол үнэн болохыг нотлож байгаа учраас эдгээр баримтын зарим хэсгээс дурдах нь зүйтэй.

II. Харьцангуйн Ерөнхий Онолын баталгаа

A. Гравитацийн сул оронд ажиглагдах эффектээс

Дэлхийн хувьд сансрын 2 дугаар хурд (11.2 км/с) –ыг гэрлийн хурд ($2.9979 \cdot 10^{10}$ см/с)-тай харьцуулахад бараг “0” учраас Харьцангуйн Ерөнхий Онолоос Ньютоны механик, таталцлын онолын хуулиудыг гаргадаг. Өөрөөр хэлбэл, гравитацийн сул орны нөлөөлөл бага учраас тэр бүр анзаарагддаггүй, үйлчлэлийн хэмжээ, тоон утгын хувьд тооцохооргүй бага эффектэй. Гэвч зарим эффектийг хэмжиж Харьцангуйн Ерөнхий Онол зөв болохыг ажиглалтын баримтаар нотолсон жишээ олон бий. Үүний заримаас сонирхон авч үзье.

1. Гравитац шилжилт: Таталцлын орон дахь фотоны энерги хадгалагдах хуульд үндэслэн 1911 онд А.Эйнштейн гэрлийн давтамжийн гравитац харьцангуй шилжилтийг $((v_2 - v_1)/v_1 = (\phi_2 - \phi_1)/c^2)$ урьдчилан хэлсэн. Энд ϕ_2 -гэрлийн долгион ирсэн орчны болон ϕ_1 -гарсан орчин дахь гравитацийн потенциал буюу $\phi_2 = -(G \cdot M_1)/r_{1,2}$ болно. Энэ эффектийг одны спектрийн судалгаагаар 1%-ийн нарийвчлалтай, сансрын нислэгийн нөхцөлд $2 \cdot 10^{-4}$ нарийвчлалаар тодорхойлсон.
2. Гэрлийн цацрагийн муруйлтын эффект (гравитацийн фокуслолт): Алсын одноос Нарны ойролцоо өнгөрч ажиглагч хүрэхдээ

тэр гэрэл $\alpha = 2r_g/r = 4GM_\odot/c^2 R_0 \approx 1.75''$

-өнгөөр хазайна. Энд R_0 -Нарнаас төвөөс гэрлийн цацраг хүртэл хамгийн бага зай. 1919 онд А.Эддингтон [9] Нар хиртэлтийн үеийн ажиглалт, хэмжилтээр баталсан. Радиointерферометрийн тусламжтай хийсэн квазарын ажиглалт радио долгионы замын муруйлт байгааг 1%-ийн алдааны нарийвчлалтай тогтоосон.

3. Перигелийн шилжих эффект: Аливаа төв биетээ тойрон эргэх нөгөө биетийн тойрог замын (орбитын) радиус:

$$r = p[1 + e \cdot \cos(1 - \frac{3GM_\odot}{p \cdot c^2})\theta]^{-1} \text{ учраас Буд}$$

гаригийн хувьд 100 жилд

$$\Delta\theta = \frac{6\pi GM_\odot}{c^2 a(1 - e^2)} \approx 43'' \text{ байх ёстой нь}$$

хэмжилтээр нотлогдсон [1].

4. Чөлөөт тэнхлэг бүхий “ээрүүл”-ийн прецесс: Нарны аймгийн хувьд тооцоолж гариг хооронд аялах замдаа олон төрлийн судалгаа явуулах зориулалттай сансрын төхөөрөмжийн тойрог замыг өндөр нарийвчлалтай тооцоолох шаардлагатай үед заавал тооцох ёстой эффект юм.
5. Биет тойрог замаар тойрон эргэх үе багасалт: Энэ эффектийг хэмжиж хос биетийн массын тоон утгыг өндөр нарийвчлалтай гаргадаг [1].

Б. Хүчтэй гравитацийн оронд ажиглагдах эффектээс

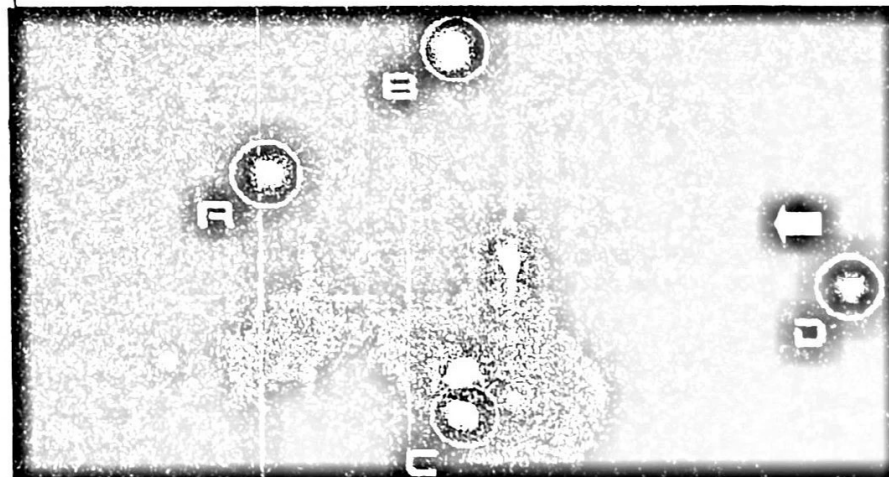
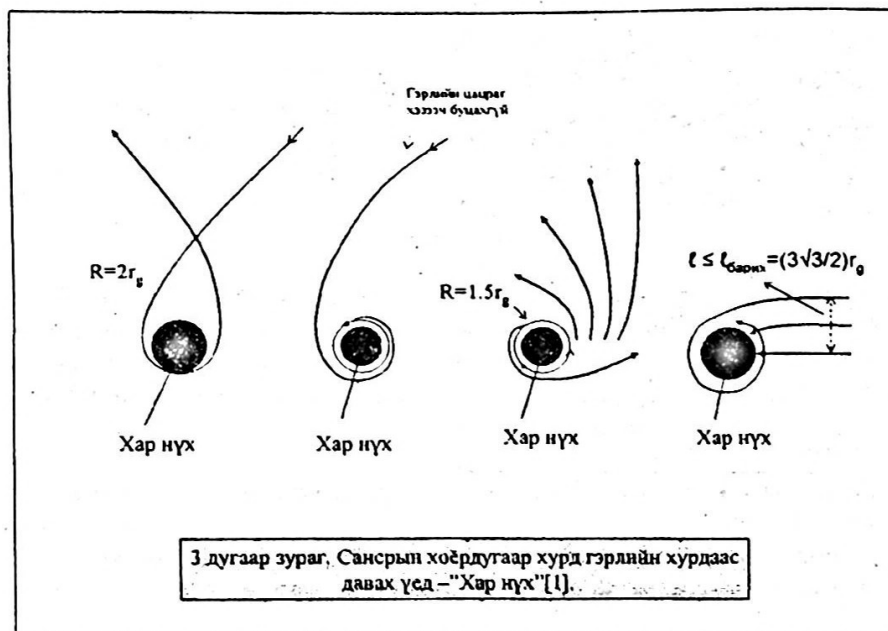
1. Нейтрон од

Энэ нь од бүрэлдүүлэгч бодис нь үндсэндээ нейтроноос тогтох гидростатистик тэнцвэрийн төлөвтэй биет бөгөөд 1967 онд Пульсар буюу “Лугшигч од”, 1971 онд Рентген пульсар, 1975 онд тэсрэлттэй рентген эх үүсгүүр – Барстер хэлбэрийн содон биет Ертөнцөд оршин тогтдогийг илрүүлсэн байна. Ийнхүү Харьцангуйн Ерөнхий Онолын эффект буюу нүсэр биетийн татах-түлхэх үйлчлэлийн оронг тооцож гидростатистик тэнцвэрт байгаа бодис бүхий одны дотоод төлөвийн тэгшитгэлийн шийдийг олох үед урьдчилан таамагласан биет оршин байгааг нээсэн нь Эйнштейний уг онолын үнэн зөвийг, өөрөөр хэлбэл, бодит ертөнцийн бодисын тасралтгүйн (3) дугаар тэгшитгэл нь асар их масс, нягт

$$(M_{\max} = (1.4 - 2.7)M_\odot < 5.73M_\odot,$$

$$\rho_{c,\max} = 2 \cdot 10^{15} - 10^{16} \text{ г·см}^{-3}$$

энд $\rho_{c, \max}$ -од мэт нүсэр биетийн төв массын хамгийн их байх боломжигт утга[1]) бүхий орчинд хүчин төгөлдөр болохыг баталж байгаа хэрэг.

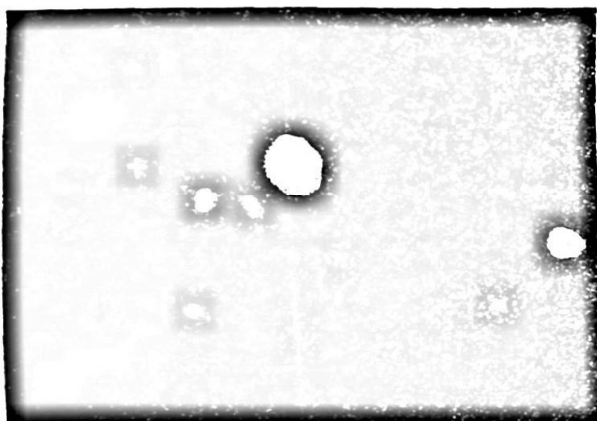


3 дугаар гэрэл зураг. Олдны Sgr A ("Нумын") ордны энэ "Chandra X-ray" гэрэл зураг [16] дээр A, B, C, D гэж тэмдэглэсэн рентген цацрагийн хүчтэй 4 үүсгүүр нь "Хар нүх"-тэй, эсвэл "Нейтрон од"-той хос биетийн тогтолцоо бий болгосон байх магадлалтай [16]. Мөн 1 дүгээр гэрэл зураг дээрх оддын "Хун" буюу Cyg орд дахь "Cygnus X-1" рентген эх үүсгүүр нь тэнд "Хар нүх" байж болох магадлалтайн [1] баримт болдог. Учир нь нүсэр масс бүхий од агшихдаа "Хар нүх" болсон бол хүчтэй таталцлын орон үүсгэж ийм асар их хүчирхэг хүчлэл бүхий оронгийн үйлчлэлээр тэр "Хар нүх" рүү өөр биетээс бодис урсах нөхцөл бүрдэж болно. Хос биетийн нэг нь "Хар нүх" рүү бодисоо хурдатгалтайгаар юүлэхдээ хийн орчноо хүчтэй халааж рентген цацраг илгээх боломжтой.

2. Хар нүх

Тухайн биетээс салж одохуйц эрч олгох хурд буюу сансрын хоёрдугаар хурд нь гэрлийн хурднаас илүү гарах хэмжээний асар их хурд шаардах тийм хүчтэй таталцлын орон бүхий орон цагийн огторгуйн муж бол "Хар нүх" (3 дугаар зураг) гэсэн физик ухагдахууныг бий болгосон.

Тэнгэрийн аливаа биет – түүний дотор одод хувьслын явцдаа агшилтаараа "Хар нүх" болох нөхцөл нь: $r < r_g = 2G \cdot M/c^2$ бөгөөд энд r_g - гравитацийн радиус, Нарны тохиолдолд $M_\odot \approx 2 \cdot 10^{33}$ г учраас $r_g \approx 2.96$ км болно[1].



4 дүгээр гэрэл зураг. Биднээс 4000 гэрлийн жил зайд байгаа M82 гэж тэмдэглэдэг оддын айн доторх хэсгийн энэ зөвхөн рентген цацраг нэвтрүүлэх шүүлтүүртэй авсан зураг дээр "ЧАГТ" буюу "+" тэмдэг тавьсан тэр мужийг нүсэр масс бүхий "Хар нүх" гэж үзэж байгаа ажээ[17].

Хар нүхний бий болгож байгаа таталцлын оронг (3) буюу Эйнштейний тэгшитгэлээр тодорхойлох бөгөөд Хар нүхний ойролцоох орчинд цаг хугацаа түүнээс алс орших орчныхтой харьцуулбал удааширна. "Хар нүх" байгааг нотлохоор орчлонгийн тийм болзошгүй олон биетийн (кварзар, квазар, барстер гэх мэт) дотор нэлээд магадлалтайд "Хун" хэмээх оддын орд дахь рентген үүсгүүрийн ойролцоох муж гэж тооцдог[1].

3. Космологийн сингулярность

Эйнштейний тэгшитгэлийн онолын судалгааны 30-аад жилийн ажлын явцад: «Ертөнц үүсэх эхлэл үе бол материйн шинж чанарын тухай нэмэлт таамаглал дэвшүүлсэн нөхцөлтэй үед бодогдох энэ тэгшитгэлийн системийн шийдийн ерөнхий шинж чанар» гэдгийг тогтоосон байна [1]. Сингуляр төлөвт ойр байгаа үед бол мэдээжээр сонгодог физикийн хууль хүчин төгөлдөр үйлчлэхгүй, харин тэнд гравитацийн оронгийн квант шинж илрэх учиртай. Энэ нь "эсрэг эгэл бөөмс" төрөх, "эсрэг бодис" орших - адрон, лептон үүсэх эрнн үе болно. Өндөр нарийвчлалтай хэмжилтийн дүнд сансрын туяаны бүрэлдэхүүнд "эсрэг бодис" байгааг илрүүлэх боломжтой. Гэвч орчин үеийн багажийн нарийвчлалын хүрээнд энэ нь одоогоор ажиглагдахгүй байгаа учраас Ертөнцийн "Барiony тэгш хэмт бус чанар" л одоогийн орчлон бий болж төлөвшиж, хувьсан хөгжих эхлэл болжээ гэж судлаачид үзэж байна. Орчин үеийн одон орон судлалын ажиглалтаар: $(n_B - n_{\bar{B}})/n_B \approx \beta = n_B/n_\gamma = 10^{-9}$ гэж тогтоож байгаа[1] бөгөөд энэ нь "Эгэл бөөмсийн онол"-д, ялангуяа, "Их энергийн физик"-т сэтгэлгээний өөрчлөлт шаардсан чухал баримт

болжээ. Энд n_B -барiony (барyon бол $\hbar=h/(2\pi)$ нэгжээр хэмжвэл $\frac{1}{2}$ спин бүхий адроны ерөнхий нэр, бөгөөд h -Планкийн тогтмол) нягт, $n_{\bar{B}}$ -эсрэг (анти-) барiony нягт, n_γ -реликт (үлдэгдэл) цацрагийн нягт юм. Реликт дэвсгэр цацраг байгааг ирүүлж байгаа явдал нь оддын айн спектр дэх "улаан шилжилт" хэмээх Доплер эффектний хамт Ертөнцийн үүсэл ($t_{\text{пл}} \approx 10^{-43}$ с, $T_{\text{пл}} \approx 10^{32}$ К, $\rho_{\text{пл}} \approx 10^{93}$ г/см³) үеийн нөхцөлд "Харьцангуйн Ерөнхий Онол" хүчинтэй, үнэн зөв болохыг нотлохын дээр тэлж буй "Халуун Ертөнц"-ийн загвар илүү бодиттойг гэрчлэх ажиглалтын чухал баримт юм.

В. "Гравитон" эгэл бөөмийн хайгуул, гравитацийн долгионы эрэл

Хөдөлж байгаа гравитацийн орон үүсгэгч нь соронзон орон дотор хөдөлж буй цэнэгт биений адил шинж чанар хадгалах ёстой гэсэн бодомжоос гравитацийн долгион, гравитон хэмээх эгэл хэсэг орчлонд үйлчлэх ёстой гэсэн мөрдлөг гардаг. Астрофизикт ийм үзэгдэл, юмсыг илрүүлэх боломж бий. Лугшигч од – "Пульсар PSR 1913+16" болон нейтроны од хамтдаа хос одны тогтолцоо үүсгэсэн учир хоёр биет нийлбэр массын төвөө тойрох эргэлтийн үе нь богиносж байгааг урт хугацааны ажиглалтаар тогтоосон явдал бол гравитацийн долгионы дам баталгаа болох юм. Эргэлтийн үе богиносж байгаа явдал нь гравитацийн долгионоор хоёр од энергиэ алдаж хоорондын зай нь ойртож байгаа гэсэн үг юм.

Сансрын "физик хос биет"-ийн тойрог замаараа хамтдаа ерөнхий эргэх ийм үе нь богиносж байгааг астрофизикийн бусад хос биетийн хэмжилтийн дүнд ч тогтоосон байна. Ийм дам аргаар гравитон оршин байгааг нотлох ажиглалтын баримт олон бий[1].

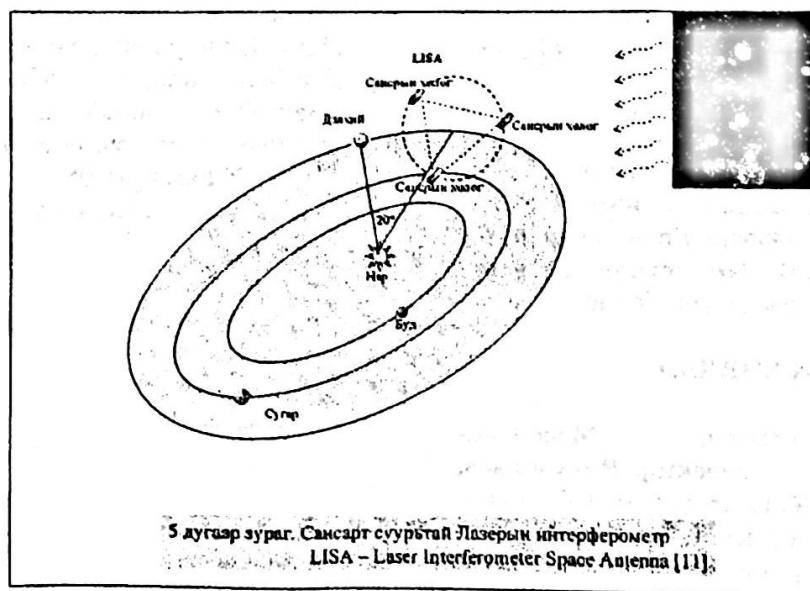
Орчлон судлалын орчин цагийн мэдлэгийн хүрээнд сансар судлалын амжилт ашиглаж одон орон судлаачид 1500 Мпк зайд (1 пк зай $\approx 3.086 \cdot 10^{16}$ м) хэдэн тэрбум галактик (буюу оддын хэдэн тэрбум ай) байгааг илрүүлээд байна. Эдгээр оддын олон айн дотор зарим нь хүчтэй радио долгионы эх сурвалж, зарим нь хүчтэй рентген цацраг үүсгүүр болж байгаа нь "Хэт шинэ од"-дын тэсрэлтээс болон "Хар нүх", "Нейтрон од"-дын мөргөлдөөнөөс үүдэлтэй гравитацийн долгионыг илрүүлэх найдвар төрүүлдэг.



3 дугаар гэрэл зураг. Сүүлийн бараг 40 жилийн турш физикчид "Гравитоны хайлт" хийж байгаа жишээ: Зүүн гар талд "CERN" дэх "Explorer bar", баруун гар талд Италийн Падуа-гийн ойролцоох "AURIGA detector" зэрэг нам температурын бүртгэгч багажууд [11, phw_16022005.pdf].

Хэрэв ертөнцийн тэлэлтийг илэрхийлэгч хэмжигдэхүүн – Хабблын тогтмол $= H_0 = 50 \text{ км/(с·Мпк)}$ гэвэл эхлэлийн цэгээс алсрах хэмжээ – $6000 \text{ Мпк} \approx 2 \cdot 10^{28} \text{ см}$ гэсэн үг бөгөөд реликт радио цацрагийг ажиглаж байгаа учраас бараг 3000 Мпк зайн мэдээлэл авч байгаа хэрэг юм. Ажиглалтаар мэдэгдэж байгаа энэ орчинд "Хэт шинэ од"-дын тэсрэлт (3 Мпк радиус бүхий бөмбөлөг орон зайд оддын 300 орчим ай байх бөгөөд оддын нэг айд дундажаар 20-30 жилд нэг удаа хэт буюу нэн шинэ оддын тэсрэлт болдог), "Хар нүх" – "Нейтрон од"-ны мөргөлдөөн, их масс бүхий оддын хүчтэй гравитацийн тэгш хэмийн бус агшилт (коллапс), болон гравитацийн долгионы хүчтэй генератор болох эх үүсвэр байгааг дам хийгээд шууд аргаар илрүүлэх судалгаа эрчимтэй хийж байна [1, 11].

"VIRGO", "GEO600", "TAMA", "LIGO" [11] гэх мэт олон улсын хамтарсан туршилтуудын хүрээнд үргэлжилж байна. Туршилтаар мэдээлэл цуглуулж, 2012-2013 онд эцсийн дүгнэлт гаргах юм байна. Гравитацийн долгион асар сул эрчимтэй тул илрүүлэхэд нэн хүндрэлтэй, багажийн нарийвчлал тун өндөр байх технологи шаарддаг. Дээрх туршилтуудыг, тухайлбал, "LIGO" туршилтаа "газар хөдлөлийн долгион"-ы тусгаарлалт, багажийн хэмжилтийн нарийвчлалыг улам найдвартай болгон эрэмбэ ахиулж сайжруулах зэргээр илүү боловсронгуй болгож "Advanced LIGO" нэрээр 2013 оноос хэмжилт эхлэхээр бэлтгэж байна. Мөн "LISA" (5 дугаар зураг) буюу "Сансарт суурьтай Лазерын Интерферометр Антенн"-ыг 5 сая км-ийн алслалд аваачиж, дэлхий орчмын



5 дугаар зураг. Сансарт суурьтай Лазерын интерферометр LISA – Laser Interferometer Space Antenna [11].

1960-аад оноос хойш 40 гаруй жилийн турш гравитацийн долгион хайх судалгааны ажил

тодорхой тойрог замд адил талт гурвалжингийн оройд 3 хөлгийн тусламжтай байрлуулж

туршилтаа мөн 2013 оноос эхлэж 10 жилийн турш үргэлжлүүлэхээр NASA, ESA (European Space Agency)-аас бэлтгэж байгаагаа мэдээлсэн [11]. Массгүй эгэл бөөмс - гравитоны хайлт үргэлжилсээр байна.

ДУГНЭЛТ

Орчлон судлал (космологи)-ын судалгаа, туршилтын үр дүн нь орчин үеийн улам боловсронгуй болгосоор байгаа астрофизикийн аргууд, сансрын техникийн тусламжтай физикийн хамгийн сүүлийн үеийн ололт амжилтанд тулгуурлан «Эйнштейний “Харьцангуйн Ерөнхий Онол”-ын үнэн зөвийг нотлохын чацуу “Таталшлын орны тэгшитгэл бол бодисын түгээмэл бодит шинж чанарыг илрүүлэх дэвшилтэт арга ухаан» болохыг баталсаар байна. Харьцангуйн Ерөнхий Онол эргээд орчин цагийн физикийн шинжлэх ухааны бүх салбар мэдлэгийн (Бозе-Эйнштейний конденсацын квант төлөв, Фотон-Фотоны, эсвэл фотонуудын, мөн ион-ионы, эсвэл ионуудын сүлэгдмэл квант төлөв, лазерын болон мазерын эффект гэх мэт) бүх тэргүүн шугамын ололт амжилтанд нөлөөлсөөр байгаа адил Орчлон судлалд мөн л шийдвэрлэх түлхэц өгч, Ертөнцийн тухай мэдлэг, мэдээллийн санд хувьсгалын буюу “инноваци” шинж чанартай нөлөөлөл үзүүлж байна. Цаашид үзүүлсээр байх болно гэсэн итгэл мэргэжлийн судлаач нарт улам бүр төрөх нь лавтай. Харьцангуйн Ерөнхий Онол болон Квант Гравитацийн Онолын нэгдэл, Харьцангуйн Ерөнхий Онол болон Релятивист Квант Механикийн нэгдэл, эдгээр нэгдсэн онолуудын нэгдэл рүү физикчид - судлаачдын оюун бодол чиглэн хөгжиж, орчин үеийн Физикийн Ерөнхий Онол ($\hbar$, G , $\frac{1}{c}$ - энэ гурван өчүүхэн бага тогтмолуудыг зэрэг тооцсон онол) бүтээх мөч ойртох тусам энэ итгэл лавширна. Физикийн ийм Ерөнхий Онол бүтээвэл Харьцангуйн Ерөнхий Онолын нөлөө хүн төрөлхтний сэтгэлгээний хөгжилд улам тод томруун мэдрэгдэхүйц болно.

АШИГЛАСАН НОМ ХЭВЛЭЛ

- [1] Физика космоса, Маленькая энциклопедия, Гл. редактор Р.А.Сюняев, Ред. коллегия: Ю.Н.Дрожин-Лабинский, Я.Б.Зельдович, В.Г.Курт, Р.З.Сагдеев, Изд. “Советская Энциклопедия”, -М. 1986, 783с.
- [2] <http://www.nap.edu/readingroom/books/cosmology/>

- [3] Chen Ning Yang, Einstein's Impact on Theoretical Physics in the 21st Century, AAPPS Bulletin, Vol.15, No.1, February 2005, pp.4-9.
- [4] Ming-Feng Shih, Developing Ideas about Photons: since the First Paper about Photoelectric Effect by Einstein in 1905, AAPPS Bulletin, Vol.15, No.1, February 2005, pp.31-34.
- [5] Bruce H.J.McKellar, AAPPS Bulletin, Vol.15, No.1, February 2005, pp.35-36.
- [6] A Brief History of Albert Einstein, Physics World, Volume 18, NO 1, January 2005, pp.14-15.
- [7] Five papers that shook the world, Physics World, Volume 18, NO 1, January 2005, pp.16-17.
- [8] Mark Haw, Einstein's Random Walk, Physics World, Volume 18, NO 1, January 2005, pp.19-22
- [9] Matthew Stanley The 1919 Eclipse: a celebrity is born, Physics World, Volume 18, NO 1, January 2005, pp.25-26.
- [10] Clifford M Will, Relativity at the centenary, Physics World, Volume 18, NO 1, January 2005, pp.26-32
- [11] Jim Hough and Sheila Rowan, The search for gravitational waves, Physics World, Volume 18, NO 1, January 2005, pp.37-41.
- [12] Robert Bluhm, Very special centenary, Physics World, Volume 18, NO 1, January 2005, p.43.
- [13] Charles W Clark, Strange ways of light and atoms, Physics World, Volume 18, NO 1, January 2005, pp.44-45.
- [14] Harald Weinfurter, The power of entanglement, Physics World, Volume 18, NO 1, January 2005, p.47-51.
- [15] Д.Я.Мартынов, Курс общей астрофизики, “Наука”, Гл.ред. ФМЛ., -М., 1971, 616с.
- [16] http://www.cerncourier.com/main/article/45/1/10/1/CCEast1_01-05
- [17] http://skyandtelescope.com/news/article_124_4_1.asp