Лекц 6

МЕХАНИК

6.1 Харьцангуйн тусгай онол

6.1.1 Галилейн хувиргалт

Нэг инерциал тооллын системээс нөгөө инерциал тооллын системд шилжих хувиргалтыг авч үзье. Сонгодог механик гэж нэрлэгдэх XIX зууны сүүлч хүртэл бий болсон физикийн онолууд нь гэрлийн хурднаас олон дахин бага хурдтай хөдлөх хөдөлгөөнд тохирдог энэ хүрээнд тооллын системүүдийн хоорондох хувиргалтыг *Галилейн хувиргалт* гэнэ.

Галилейн хувиргалтын үндэслэл

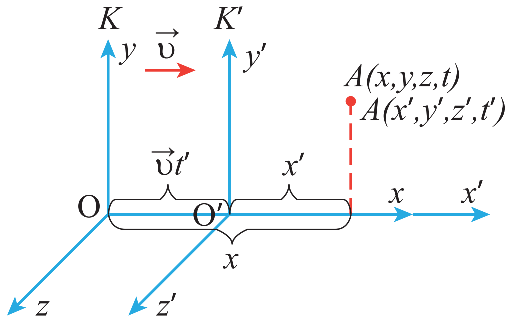
1. Огторгуйн нэгэн төрөл. Энэ нь огторгуйн бүх цэг тэгш эрхтэй байх нөхцөл учраас тооллын системийн эхлэлүүдийг хаана авснаас хувиргалт нь явцуурахгүй юм. Иймд координатын эхлэлүүдийг хугацааны тэг эгшинд давхцаж байхаар сонгоё.

2. Огторгуй изотроп. Энэ шинж чанар нь огторгуйн бүх чиглэл тэгш эрхтэй байх нөхцөл учир координатын тэнхлэгүүдийг ижилхэн чиглэлтэй бөгөөд x тэнхлэг нь K' тооллын системийн хурдны дагуу байхаар сонгоё.

3. Харьцангуйн зарчим биелнэ. Энэ нь аливаа хөдөлгөөн нь харьцангуй тодорхойлогдох бөгөөд бүх инерциал тооллын системүүдэд физикийн хуулиуд адилхан хэрэгжинэ.

Эдгээр гурван үндэслэлийг ашиглан K инерциал тооллын системтэй харьцангуй υ хурдтай хөдлөх K' тооллын системүүдийн координатуудыг 6.1 –р зурагт үзүүлснээр авъя. K тооллын системд t хугацааны эгшинд A цэгийн координат (x, y, z), харин K' тооллын системд A цэг t' хугацааны эгшинд (x', y', z') координаттай байг. Ингээд K' тооллын системээс K тооллын системд шилжих хувиргалтыг бичвэл

$$\text{Галилейн хувиргалт} \quad \begin{cases} x = x' + \upsilon t' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \tag{6.1}$$

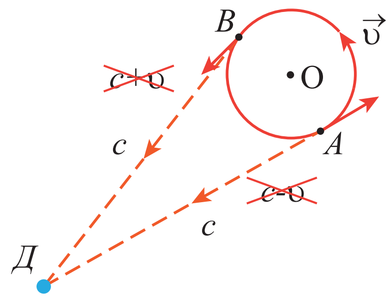


Зураг 6.1. Инерциал тооллын системүүд

Хугацааг координатуудын эхүүд давхцах үед тэг байхаар тохируулсан байна. Хоёр тооллын системүүдэд цаг нь ижилхэн учир хугацааны өөрчлөлт буюу явц нь адилхан байна. Иймд 6.1 – аас хугацаагаар уламжлал авч бичвэл хурдны хувирах дүрэм буюу хурд нэмэх дүрэм гарна.

$$\begin{cases} \upsilon_x = \upsilon'_x + \upsilon \\ \upsilon_y = \upsilon'_y \\ \upsilon_z = \upsilon'_z \end{cases} \Rightarrow \vec{\upsilon}_A = \vec{\upsilon}'_A + \vec{\upsilon} \tag{6.2}$$

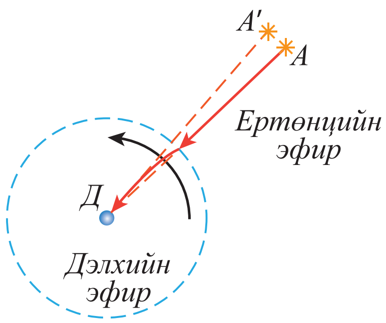
Энд A цэгийн хурд K' тооллын системд $\vec{\upsilon}'_A$, K тооллын системд $\vec{\upsilon}_A$ хурд нэмэх дүрэм ёсоор $\vec{\upsilon}$ нь K тооллын системд $\vec{\upsilon} + \vec{\upsilon}'_A$ буюу хурдуудыг шууд нэмж байна. Энэ нь бидний урсгал усанд завины хурдыг тооцдогтой ижил мэддэг зүйл шүү дээ. Нэг тооллын системээс нөгөө тооллын системд шилжихэд өөрчлөгдөхгүй байгаа хэмжигдэхүүнийг *инвариант* (inv) хэмжигдэхүүн гэнэ. Галилейн хувиргалтанд маш олон хэмжигдэхүүн инвариант байна. Биеийн урт $l = inv$, үйл явдлын үргэлжлэх хугацаа $\Delta t = inv$, хурдатгал $\vec{a} = inv$, масс $m = inv$, үйл явдал нэгэн зэрэг болох эсэх нь инвариант байна. Гэрлийн хурдыг хэмжих болсноор хурд нэмэх дүрэм гэрлийн хурдны хувьд биелэхгүй



Зураг 6.2. Гэрлийн хурд

болох нь туршлагаар батлагдаж байлаа. Жишээ нь 6.2 –р зурагт үзүүлснээр одны дагуулаас ирэх гэрлийн хувьд хурд нэмэх дүрэм ёсоор O одны дагуул B байрлалд цацах гэрэл $c + \upsilon$ хурдтайгаар дэлхий дээр ирэх байв. Энд $c = 3 \cdot 10^8$м/с гэрлийн хурд, υ одны дагуулын хурд. Гэвч ямарч хэмжилтээр гэрэл c хурдтай хэмжигддэг байна. Энэ нь хүн төрөлхтнийг гайхшралд оруулж байлаа. Учир нь классик механикийн хүрээнд ягштал биелдэг Галилейн хувиргалт алдаатай байна уу? эсвэл гэрэл өөрөө өвөрмөц шинж чанартай байна уу гэдэг асуудал гарч ирэв. XIX зууны төгсгөлд энэ асуудалд хариулт өгөхөөр олон туршилтууд таамаглалууд гарч ирсэн байна. Галилейн хувиргалт зөрчигдсөнөөр тохиолдол байхгүй тул гэрлийн шинж чанараас болсон гэж үзээд тайлбар хийсэн нэг үзэл нь гэрэл нь эфир хэмээх онцгой орчинд тархдаг учир ямарч тохиолдолд эфир дотор c хурдтай тархаж байна гэж үзэв. Эфир байгаа бол гарах үр дүнг дараах туршлагуудаар илрүүлэх байв.

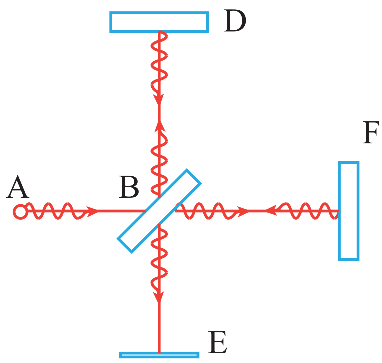
1. Эфир дэлхийтэй харьцангуй тайван бол дэлхийн эргэлтээр орчлонгийн эфир дэлхийн эфиртэй харьцангуй шилжих учир 6.3 –р зурагт үзүүлснээр одод байрлал нь шилжих одны паралаксын үзэгдэл ажиглагдах байлаа. Гэвч одон орны ажиг-



Зураг 6.3. Одны паралаксац

   лалтаар од A байрлалаас A' байрлах мэт шилжин ажиглагдах үзэгдэл дэлхийн эргэлтээс болж үүсэхгүй байсан учир энэ таамаглал мухардав.

2. Хэрэв эфир ертөнцийг дүүргэн тайван байгаа бол дэлхий дээр бид эфир дотуур хурдтай эргэлдэн шилжих учир эфирийн салхи үүсэх ёстой. Дэлхий нарыг тойрон 30 км/с орчим хурдтай хөдлөх учир гэрэл гэрэл эфирийн салхинд туугдан шилжинэ. Үүнийг Майкельсон-Морли нар Майкельсоны интерферометрээр олон дахин туршаад ямар ч эфирийн салхины ул мөр олоогүй юм(6.4 –р зураг)



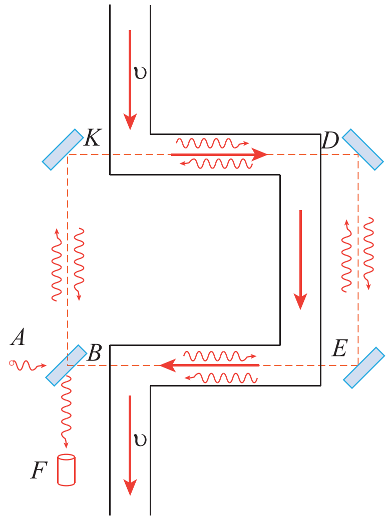
Зураг 6.4. Майкельсоны интерферометр

3. Эфир бодисыг дагаж хөдлөх үүсэх үү? гэдгийг шалгахаар урсгал усанд гэрэл тарах хурдны өөрчлөлт байгаа эсэхийг Физогийн туршлагаар шалгав. Гэрэл усыг дагаж урссангүй (6.5 –р зураг).

   Ингээд эфирийн тухай таамаг мухардалд орсон энэ үед А.Эйнштейн Галилейн хувиргалт өөр байж болох санааг дэвшүүлж гэрэл бүх тооллын системд тогтмол хурдтай байна гэж үзэв.

6.1.2 Лоренц хувиргалт

Эйнштейн Галилейн хувиргалтын үндэслэл дээр гэрэл бүх тооллын системд тогтмол c хурдтай байна гэсэн дөрөв дэх үндэслэлийг нэмэн оруулснаар харьцангуйн тусгай

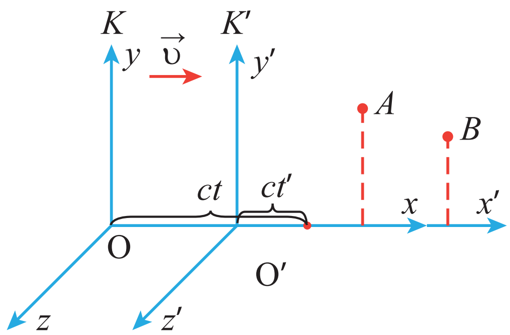


Зураг 6.5. Физогийн туршлага

онол бий болов. Харьцангуйн тусгай онолын үндэс нь инерциал тооллын системүүдийн хоорондох хувиргалт болох Лоренц хувиргалт юм.
Лоренцын хувиргалтын үндэслэл

1. Огторгуй нэгэн төрөл
2. Огторгуй изотроп
3. Харьцангуйн зарчим биелнэ
4. $c = const$

K инерциал тооллын системтэй харьцангуй x тэнхлэгийн дагуу v хурдтай хөдлөх K' тооллын системийг 1 ба 2 – р үндэслэлээр хялбар байхаар сонгон авав. 6.7 –р зураг Координатын эхүүд давхцах үед $t = t' = 0$ байхаар цагийг тохируулсан.



Зураг 6.6. Инерциал тооллын системүүд

Хувиргалтын ерөнхий хэлбэр

$$\begin{cases} x = f_1(x'y'z't') \\ y = f_2(x'y'z't') \\ z = f_3(x'y'z't') \\ t = f_4(x'y'z't') \end{cases} \tag{6.3}$$

энд функцын дифференциал авбал

$$dx = \frac{\partial f_1}{\partial x'}dx' + \frac{\partial f_1}{\partial y'}dy + \frac{\partial f_1}{\partial z'}dz + \frac{\partial f_1}{\partial t'}dt \tag{6.4}$$

A ба B цэг дээр яг ижилхэн процесс явагддаг гэе. $dx_A = dx_B$ гэдэг нь 1 –р үндэслэлээс гарна. 6.4 –ийг A ба B цэгүүдийн хувьд бичиж тэнцүүлбэл dx', dy', dz', dt' –үүд нь ул хамаарах хувьсагчид учир дифференциалын өмнөх коэффициентүүд $\left\{\frac{\partial f_1}{\partial x'}, \frac{\partial f_1}{\partial y'}, \frac{\partial f_1}{\partial z'}, \frac{\partial f_1}{\partial t'}\right\} = const$ байна. Иймд

$$x = ax' + by' + cz' + dt' + e_1 \tag{6.5}$$

$O' = O$ үед $t = t' = 0$ учир $E_1 = 0$ болж $x = ax' + by' + cz' + dt'$ болно. Бусад координатуудын хувьд дээрх үйлдлийг адилхан хийж болно. Иймд $y = ax' + by' + cz' + dt'$ гэж бичиж болно. Одоо $x = 0$ дээр цэг авбал $y = 0, y' = 0$ болох учир $0 = ax' + b \cdot 0 + cz' + dt' \Rightarrow a = c = b = 0$ $y = by'$ үүний адил $z = c \cdot z'$ нөгөө талаас K' тайван K хөдөлж байгаа гэвэл $y' = b'y$ $z' = c'z$ байх ба энд $b = b'$, $c = c'$ тул тэгшитгэлүүдийг харгалзан үржүүлж

$$\begin{cases} y \cdot y' = b^2 yy' & b = \pm 1 \\ z \cdot z' = c^2 zz' & c = \pm 1 \end{cases} \tag{6.6}$$

болох ба $t = 0$ үед тэнхлэгүүд давхцах учир $b = c = 1$ болно.

$$\begin{cases} y = y' \\ z = z' \end{cases} \tag{6.7}$$

Нэгэнт эдгээр тэнхлэгүүд эквивалент учир үзэгдэл нь координатын хувиргалтаар шилжихдээ мөн эдгээр тэнхлэгээс хамаарахгүй байх ёстой. Иймд x ба t нь

$$\begin{cases} x = Ax' + Dt' \\ t = ax' + dt' \end{cases} \tag{6.8}$$

энд A, D, a, d тогтмолууд. O цэг нь харьцангуй зарчим ёсоор $x' = -vt'$ ба $x = 0$.

$$0 = -A \cdot vt' + Dt' \tag{6.9}$$

Эндээс $v = \frac{D}{A}$ учир, K' –ээс K Тооллын системд x –ийг, K –ээс K' Тооллын системд мөн бичвэл

$$\begin{cases} x = \alpha(x' + vt') \\ x' = \alpha'(x - vt) \end{cases} \tag{6.10}$$

энд 3 –р үндэслэлээр $\alpha = \alpha'$ болно. Одоо O ба O' давхцах үед координатын эхээс гэрэл x –ийн дагуу цацсан гэе. 4 –р үндэслэлээр K –д t хугацааны дараа гэрэл $x = ct$, K' –д t' хугацааны дараа гэрэл $x' = ct'$ координатуудтай болно. эдгээрийг 6.10 –д орлуулж тооцвол.

$$ct' = x' = \alpha(x - vt) = \alpha(ct - vt) = \alpha(c - v)t \tag{6.11}$$

$$ct = x = \alpha(x' + vt') = \alpha(ct' + vt') = \alpha(c + v)t' \tag{6.12}$$

Эндээс

$$\alpha^2(c^2 - v^2) = c^2 \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \tag{6.13}$$

6.10 –д α –г орлуулж хугацааг олбол

$$\begin{cases} x = \alpha(x' + vt') \\ x' = \alpha(x - vt) \end{cases} \Rightarrow t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{6.14}$$

Ингээд Лоренц хувиргалт нь дараах систем тэгшитгэл болж байна.

$$\begin{cases} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \end{cases} \tag{6.15}$$

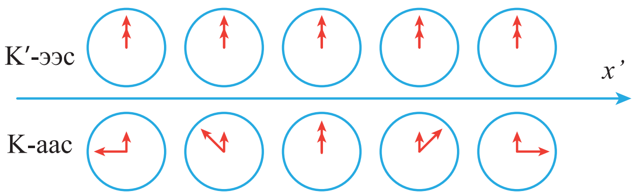
Аливаа шинэ онол нь өмнөх онолоо бүрэн няцаахгүй нөхөн гүйцээсэн байх философийн зарчмаар Лоренцийн хувиргалтын тухайн тохиолдол нь Галилейн хувиргалт байх ёстой. Тооллын систем бага хурдтай хөдлөх бол

$$v << c \quad \Rightarrow \quad \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1 \tag{6.16}$$

болохыг тооцвол 6.15 –с 6.1 –р Галилейн хувиргалт гарч ирж байна.

6.1.3 Лоренц хувиргалтын мөрдлөгүүд

1. Цагийн явц.
   Тооллын системүүдэд ялгаатай байна. K' тооллын системд байгаа синхрончлогдсон цагуудыг K' ба K тооллын системээс харагдах байдлыг 6.7 –р зурагт үзүүлэв. 6.15 –с t хугацааг тооцоолоход $x' > 0$ координаттай үед $t > t'$ ба $x' < 0$ үед $t < t'$ болох учир K Тооллын системд цагууд зөрүүтэй байна. Энэ нь K' –д зэрэг болох үйл явдал K –д зэрэг болдоггүйг харуулж байна.



Зураг 6.7. Цагийн явц

2. Инвариант хэмжигдэхүүн
   Галилейн хувиргалтанд инвариант хэмжигдэхүүнд Лоренц хувиргалтанд инвариант биш байна. Лоренц хувиргалтанд (дөрвөн хэмжээст огторгуйн) ертөнцийн хоёр цэгийн хоорондох зай инвариант байна.

$$S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2} \tag{6.17}$$

   Галилейн хувиргалтын инвариант хэмжилгдэхүүн нь Лоренц хурвиргалтанд

$$\begin{cases} l \neq inv \\ \Delta t \neq inv \\ \vec{a} \neq inv \\ \text{нэгэн зэрэг эсэх нь} \neq inv \end{cases}$$

   Лоренцийн хувиргалтанд инвариант

$$S^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2 = inv$$

3. Лоренц агшилт.
K' тооллын системд l_0 урттай бие x тэнхлэгийн дагуу байрлахад төгсгөлүүд нь x'_1, x'_2 координаттай байсан бол K' –д $l_0 = x'_2 - x'_1$ бол K системд биеийн урт $l = x_2 - x_1$ үед x_1, x_2 –ийг ижил (нэг хугацааны эгшинд хэмжсэн хэмжилт) Лоренц хувиргалтаас K Тооллын системд x_1, x_2 –г олбол

$$x_1 = \frac{x'_1 + \upsilon t'_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}, \quad x_2 = \frac{x'_2 + \upsilon t'_2}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \tag{6.18}$$

K Тооллын системд x_1 ба x_2 координатуудын t хугацааны эгшинд зэрэг хэмжих учир

$$t = \frac{t'_1 + \frac{\upsilon}{c^2} x'_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{t'_2 + \frac{\upsilon}{c^2} x'_2}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \Rightarrow t'_2 - t'_1 = -\frac{\upsilon}{c^2}(x'_2 - x'_1) \tag{6.19}$$

6.18 –оор савааны уртыг олж 6.19 илэрхийллийг тооцвол

$$l = x_2 - x_1 = \frac{l_0\left(1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}\right)}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = l_0\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}} \Rightarrow l = l_0\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}} \tag{6.20}$$

Үүнийг Лоренц агшилт гэнэ. Хөдөлж буй Тооллын системийн биеийн шугаман хэмжээс x тэнхлэгийн дагуу агшина l_0 –ийг хувийн урт гэнэ.

4. Цаг хугацааны удаашрал.
Хөдөлж байгаа тооллын системд цаг хугацаа удаашрна. Одоо K' Тооллын системд болж буй үйл явдлыг авч үзье. K' –x_0 цэг дээр t'_1 –ээс t'_2 хугацааны эгшинд үйл явдал болжээ. K –д x_1 –д t_1 –ээс x_2 –д t_2 хугацаанд үйл явдал ажиглагдана.

$$\begin{cases} t_1 = \frac{t'_1 + \frac{\upsilon}{c^2} x'_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \\ t_2 = \frac{t'_2 + \frac{\upsilon}{c^2} x'_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \end{cases} \Rightarrow \quad \Delta t = t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \tag{6.21}$$

энд K' –д болсон үйл явдлын үргэлжлэх хугацааг Δt_0 гэе. Үүнийг хувийн цаг гэнэ.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \tag{6.22}$$

Хөдөлж байгаа тооллын системд Δt_0 хугацаанд болсон үйл явдал K Тооллын системд $\Delta t > \Delta t_0$ удаан үргэлжилж байгаа ажиглагдах учир K' Тооллын системд цаг хугацаа удааширсан байна.

5. Хурд нэмэх дүрэм.
K' Тооллын системд $\vec{\upsilon}'_A(\upsilon'_x, \upsilon'_y, \upsilon'_z)$ хурдтай хөдлөх биеийн хурдыг K Тооллын системд тодорхойлъё. K Тооллын системтэй харьцангуй υ хурдтай хөдлөх K' Тооллын системд $\vec{\upsilon}'$ хурдтай хөдлөх биеийн хурд нь $\vec{\upsilon}_A(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$ бол Галилейн хувиргалтаар тооллын системийн хурд нэмэгдэж $\vec{\upsilon}_A = \vec{\upsilon} + \vec{\upsilon}'_A$ байдаг. Харин их хурдтай тооллын системд Галилейн хувиргалт биелэхгүй учир Лоренц хувиргалтаар хурд хэрхэн нэмэгдэхийг авч үзье. 6.15 –д байгаа координатын хувиргалтын тэгштгэлүүдийг

дифференциалчилбал

$$\begin{cases} dx = \frac{dx' + \upsilon dt'}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}} \\ dy = dy' \\ dz = dz' \\ dt = \frac{dt' + \frac{\upsilon}{c^2} dx'}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}} \end{cases} \tag{6.23}$$

6.23 –ийн эхний гурван тэгшитгэлийг 4 –р тэгшитгэлээр хувааж тэгшитгэлүүдийг баруун талуудыг dt' –д хүртвэр ба хуваарийг хуваавал $\frac{dx'}{dt'} = \upsilon'_x$, $\frac{dy'}{dt'} = \upsilon'_y$, $\frac{dz'}{dt'} = \upsilon'_z$ болох учир K Тооллын систем дэх хурд нь

$$\begin{cases} \upsilon_x = \frac{\upsilon'_x + \upsilon}{1 + \frac{\upsilon \cdot \upsilon'_x}{c^2}} \\ \upsilon_y = \frac{\upsilon'_y}{1 + \frac{\upsilon \cdot \upsilon'_x}{c^2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}} \\ \upsilon_z = \frac{\upsilon'_z}{1 + \frac{\upsilon \cdot \upsilon'_x}{c^2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}} \end{cases} \tag{6.24}$$

үүнийг хурд нэмэх дүрэм гэнэ. Одоо υ хурдтай хөдлөх пуужин дээрээс хөдөлгөөний дагуу гэрэл цацсан бол гэрлийн хурд бидэнд буюу K Тооллын системд ямар байхыг авч үзье. $\upsilon'_x = c$ учир $\upsilon_x = \frac{c+\upsilon}{1+\frac{\upsilon \cdot c}{c^2}} = c$ энд K тооллын системд ч гэрлийн хурд c хэвээр байна. Иймд энэ ертөнц дээрх хурдны дээд хязгаар c бөгөөд биесийн хурд хэзээ ч гэрлийн хурданд хүрэхгүй, давахгүй юм. Эдгээр мөрдлөгүүдээс харахад харьцангуйн тусгай онол гарснаар бидний классик механикийн болон огторгуй, орон зай, цаг хугацааны тухай ойлголтууд өөрчлөгдөж байна. Биеийн хурд ихсэхэд (тооллын системийн) цаг хугацааны явц, шугаман хэмжээ нь хурднаас хамааран өөрчлөгдөж байна. Үүнтэй уялдан их хурдтай хөдөлгөөний үед динамикийн ойлголтууд мөн өөрчлөгддөг. Иймд их хурдтай системийн механикийг релятив механик гэнэ.

Харьцангуй ерөнхий онолоор биеийн хурд ихсэхэд түүний масс ихэсдэг байна.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \tag{6.25}$$

энд m_0 нь тайван байгаа биеийн масс. Хөдөлж эхлэхэд биеийн масс ихсэхийн зэрэгцээ энерги ихэснэ. Энэ нь харьцангуйн ерөнхий онолоос масс энерги хоёрын холбоогоор тайлбарлагдана.

$$E = m \cdot c^2 \tag{6.26}$$

m масстай бие E энергитэй байв. Иймд энерги өөрчлөгдвөл масс өөрчлөгдөнө. Масс өөрчлөгдвөл энерги өөрчлөгдөнө.

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \tag{6.27}$$

6.25, 6.27 –р илэрхийллүүд нь цөмийн хурдасгуурт цөмийн урвалын үед олон туршлагаар батлагдсан байна. Релятив механикт бөөмийн импульс

$$\vec{P} = m \cdot \vec{\upsilon} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \vec{\upsilon} \tag{6.28}$$

болох ба энерги импульсийн холбоог тодорхойлбол

$$E^2 = m^2 \cdot c^4 = m_0^2 \cdot c^4 + P^2 \cdot c^4 \qquad E = \sqrt{m_0^2 \cdot c^4 + P^2 \cdot c^4} \tag{6.29}$$

Биеийн кинетик энерги нь

$$E_K = mc^2 - m_0c^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right) \cdot m_0c^2 \tag{6.30}$$

энд $v << c$ үед $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \approx 1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}$ ойролцоолол хийвэл 6.30 –өөс классик механикийн кинетик энерги гарна.

$$E_K = \frac{m_0v^2}{2} \tag{6.31}$$

Биетэй харьцангуй тайван байгаа тооллын систем дэх биеийн масс m_0, биеийн урт l_0, үйл явдалтай харьцангуй тайван байгаа цагаар хэмжсэн хугацаа Δt_0 –ийг хувийн масс, хувийн урт, хувийн цаг гэнэ.