

Хүнд адрон мөргөлдүүлэгч LHC (10 оноо)

Энэ бодлогыг бодож эхлэхээсээ өмнө тусдаа дугтуйнд хийсэн ерөнхий зааварчилгааг уншаарай.

Энэ даалгаварт CERN дэх LHC (хүнд адрон мөргөлдүүлэгч) хурдасгуурын физикийн тухай судлах болно. CERN бол дэлхий дээрх хамгийн том, эгэл бөөмсийн лаборатори юм. Үүний гол зорилт нь байгалийн тулгуур хуулиудыг судалж мэдэхэд оршино. Их энергитэй болтол нь хурдасгасан, бөөмсийн хоёр урсгалыг, хүчтэй соронзон орноор хурдасгуурын цагаригийн дагуу чиглүүлж, хооронд нь мөргөлдүүлдэг. Мөргөлдөөний улмаас шинээр төрөх эгэл бөөмсийг асар том бүртгэгчийн тусламжтайгаар судалдаг. LHC-ийн зарим нэг параметруудийг хүснэгт 1-т өгсөнийг ашиглана.

LHC цагариг	
Цагаригийн хүрээний урт	26659 м
Протоны нэгж урсгал дахь багцын тоо	2808
Багц бүр дэх протоны тоо	1.15×10^{11}
Протоны урсгал	
Протоны энерги	7.00 ТэВ
Массын төвийн энерги	14.0 ТэВ

Хүснэгт 1: LHC-тэй холбоотой параметруудийн тоон утгууд.

Эгэл бөөмсийн физикчид өөрт тохирсон энерги, импульс болон массын нэгж ашигладаг, үүнд: Энергийг электрон-Вольт [эВ] нэгжээр хэмждэг. 1 эВ нь эгэл е цэнэгтэй бөөм 1 В потенциалын ялгавраар өнгөрөхдөө олж авах энергитэй тэнцүү нэгж ($1 \text{ эВ} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ кг м}^2/\text{с}^2$) юм.

Импульсыг эВ/c, массыг эВ/c² нэгжүүдээр илэрхийлдэг, үүний c нь вакуум дахь гэрлийн хурд. 1 эВ нь энергийн маш бага хэмжигдэхүүн учраас, физикчид ихэвчлэн МэВ (1 МэВ = 10⁶ эВ), ГэВ (1 ГэВ = 10⁹ эВ), ТэВ (1 ТэВ = 10¹² эВ) зэрэг хэмжээг хэрэглэдэг.

А хэсэгт протон болон электроныг хурдасгах тухай судлана. В хэсэгт CERN-нд мөргөлдөөний дүнд үүсэх бөөмсийг ялгаж таних тухай авч үзнэ.

А хэсэг. LHC-ийн хурдасгуур (6 оноо)

Хурдатгал:

Протонуудыг V потенциалын ялгавраар хурдасгасан гэж үзье. Протоны хурд гэрлийн хурдтай маш ойрхон болсон бөгөөд, цацаргалт болон бусад бөөмтэй мөргөлдөх замаар энергиэ алдахгүй гэж үзнэ.

A.1	Хурдасгасан хүчдэл V болон бусад физикийн үндсэн тогтмолуудыг ашиглан протоны v хурдны илэрхийлэл бич.	0.7pt
-----	--	-------

CERN-ий ирээдүйд хэрэгжүүлэх туршилтанд, LHC-ийн протонуудыг 60.0 ГэВ энергитэй электронуудтай мөргөлдүүлэхээр төлөвлөж байгаа билээ.

- A.2 Бага тайвны масстай бөгөөд их энергитэй бөөмсийн хувьд, түүний хурд гэрлийн хурдаас ялгарах харьцангуй хазайлт $\Delta = (c - v)/c$ нь маш бага байдаг. Δ хэмжигдэхүүнийг нэгдүгээр эрэмбийн ойролцооллоор олж, V болон физикийн үндсэн тогтмолуудаар илэрхийлж бичээд 60.0 ГэВ энергитэй электроны хувьд тоон утгыг нь тооцоол. 0.8pt

Одоо бүгдээрээ LHC-ийн үүсгэх протоныг эргэж сонирхоё. Бөөмсийн замыг тойрог хэлбэртэй гэж үзнэ.

- A.3 Протоны урсгалыг тойрог замын дагуу барьж чадах B соронзон орны илэрхийллийг бич. Уг илэрхийлэл зөвхөн протоны кинетик энерги E , тойргийн урт L , болон бусад үндсэн тогтмолуудаар илэрхийлэгдсэн байх ёстой. Хэрэв тухайн эффект хамгийн бага утгат оронд нөлөөлөхгүй байвал тохирох ойролцоолол ашигла. $E = 7.00$ ТэВ энергитэй протоны хувьд B соронзон орны утгыг тооцоол. Протон хоорондын харилцан үйлчлэлийг тооцохгүй. 1.0pt

Цацаргалтын чадал:

Хурдатгалтай хөдөлж буй цэнэгт бөөмс цахилгаан соронзон долгион цацаргах замаар энерги алдаж байдаг. Тойрог замаар, тогтмол өнцөг хурдтай хөдөлж буй цэнэгт бөөмийн цацаргалтын чадал P_{rad} нь зөвхөн тухайн бөөмийн хурдатгал a , цэнэг q , гэрлийн хурд c болон вакуумын нэвтрүүлэх чадвар ϵ_0 -ээс хамаардаг байна.

- A.4 Хэмжээсийн анализ буюу нэгж тааруулах арга ашиглан цацаргалтын чадлын P_{rad} илэрхийллийг бич. 1.0pt

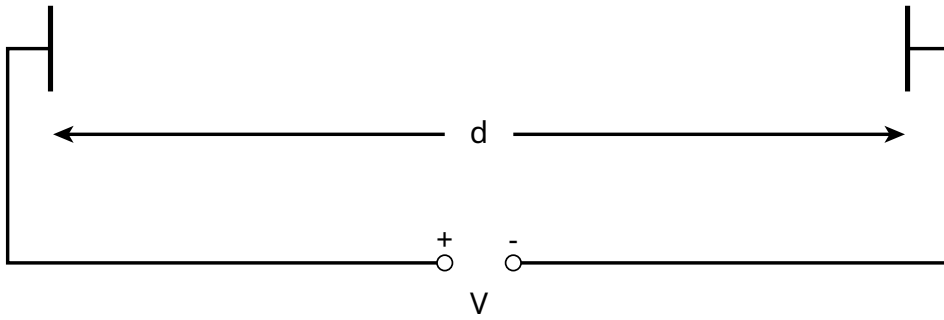
Цацаргалтын чадлын жинхэнэ томъёонд $1/(6\pi)$ гэсэн пропорционалийн коэффициент; цаашлаад релятивист эффект тооцвол γ^4 гэсэн нэмэлт коэффициент ордог, энд $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5 LHC-ийн үүсгэх протоны нэгж урсгалын (хүснэгт 1 үзэж ашиглаарай!) цацаргах нийт P_{tot} чадлыг тооцоолж ол. Урсгал дахь протон тус бүрийн энерги $E = 7.00$ TeV. Тохиромжтой ойролцоолол ашигла. 1.0pt

Шугаман хурдасгуур

CERN нь тайван байх протонуудыг $d = 30.0$ м урттай, $V = 500$ МВ хүчдэлийн зөрүү бүхий шугаман хурдасгуураар хурдасгадаг. Цахилгаан орны хүчлэгийг нэгэн төрөл гэж үзнэ. Шугаман хурдасгуур нь Зураг 1-д үзүүлсэн хоёр хавтангаас тогтдог.

- A.6 Протон энэ орноор нэвтрэн өнгөрөхдөө зарцуулах T хугацааг тодорхойл. 1.5pt



Зураг 1: Шугаман хурдасгуурын бүдүүвч зураг.

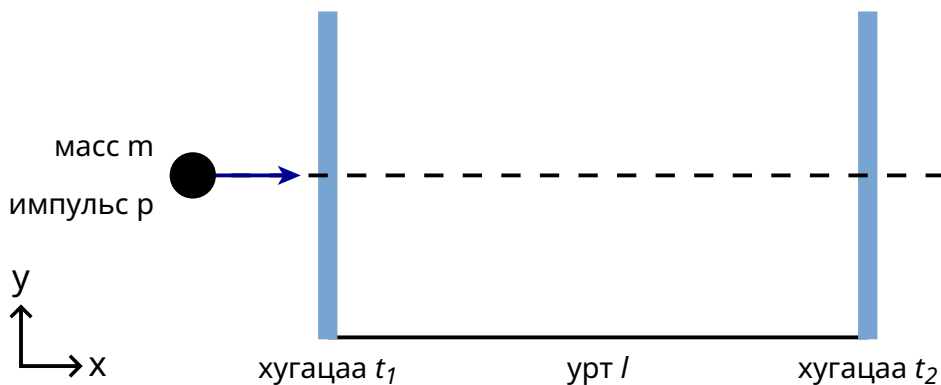
В хэсэг. Бөөмсийг ялгаж таних (4 оноо)

Нисэлтийн хугацаа:

Харилцан үйлчлэлийн үзэгдлийг нь тайлбарлахын тулд мөргөлдөөний явцад үүсэх өндөр энергитэй бөөмсийг ялгаж таних нь чухал ач холбогдолтой билээ. Импульс нь мэдэгдэж буй бөөмийн, l урттай зайг туулан гарах t хугацааг хэмжих замаар бүртгэх аргыг "Нислэгийн хугацааны арга" (буюу ToF арга - Time of Flight арга) гэж нэрлэдэг. Хүснэгт 2-д ийм аргаар илрүүлж болох зарим бөөмсийг, массынх нь хамт жагсаан бичив.

Бөөмс	Масс [МэВ/ c^2]
Дейтери	1876
Протон	938
цэнэгт Каон	494
цэнэгт Пион	140
Электрон	0.511

Хүснэгт 2: Эгэл бөөмс ба тэдгээрийн масс.

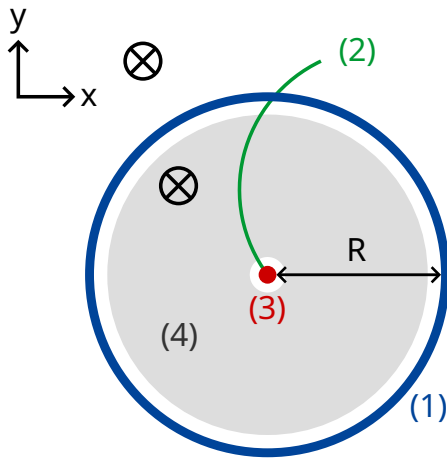


Зураг 2: ToF бүртгэгчийн бүдүүвч.

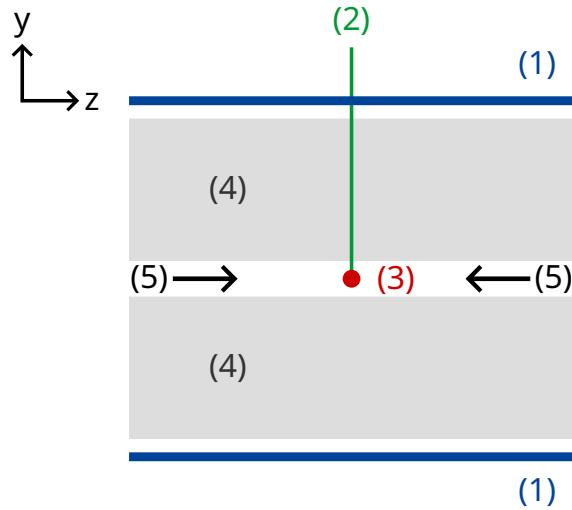
- В.1 ТоF бүртгэгчийн хоёр хавтан хоорондуур, тэдэнд перпендикуляр чиглэлээр, гэрлийн c хурданд ойрхон хурдтайгаар, шулуун замын дагуу (зураг 2 үз) нисч өнгөрөх e эгэл цэнэг бүхий бөөмийн тайвны m массыг түүний p импульс, нисэлтийн замын l урт, нисэлтийн t хугацаанаас хамааруулан илэрхийлж бич. 0.8pt

B.2 Ижил 1.00 ГэВ/с импульстэй, цэнэгт каон болон цэнэгт пионыг хооронд нь ялгах чадвартай ToF бүртгэгчийн l урт хамгийн багадаа ямар байхыг тооцоолж ол. Хооронд нь сайн ялгаж чаддаг байхын тулд нисэлтийн хугацааны зөрүү нь бүртгэгчийн хугацааны нарийвчлалаас дор хаяж гурав дахин их байх ёстой гэж үздэг. Энгийн ToF бүртгэгчийн хугацааны нарийвчлал 150 пс ($1 \text{ пс} = 10^{-12} \text{ с}$) байдаг. 0.7pt

Дараах хэсэгт LHC-д үүссэн бөөмсийг, мөрт (tracking) бүртгэгч болон ToF бүртгэгчээс тогтох хоёр шатлалт бүртгэгчээр таних тухай авч үзнэ. Зураг 3-т ийм бүртгэгчийн бүтцийг, протоны урсгалын тууш болон хөндлөн чиглэлийн дагуу тоймлон үзүүлжээ. Хоёр бүртгэгч аль аль нь мөргөлдөөний мужыг хүрээлсэн цилиндр хэлбэртэй бөгөөд бөөмийн урсгал цилиндрийн тэнхлэгтээр өнгөрнө. Мөрт (tracking) бүртгэгч нь, протоны урсгалтай параллель чиглэл бүхий соронзон орны дундуур дамжин өнгөрөх цэнэгт бөөмийн траекторийг бүртгэж авдаг. Уг траекторийн муруйлтын r радиусыг мэдсэнээр, бөөмийн хөндлөн чиглэлийн дагуу p_T импульсийг тодорхойлох боломжтой. Мөргөлдөөн болсон хугацаа мэдэгдэж байгаа тул, ToF бүртгэгчийн нисэлтийн хугацааг (мөргөлдөөн болсноос хойш ToF-д бүртгэгдэх хүртэлх хугацаа) хэмжихийн тулд ганцхан цилиндр хана байхад хангалттай. ToF-ийн энэ хана нь мөрт бүртгэгчтэй залгаа (дөнгөж гадна талаар нь) байрлана. Энэ даалгаврыг гүйцэтгэхдээ мөргөлдөөний дүнд үүсэх бөөмс нь зөвхөн протоны урсгалд перпендикуляр чиглэлийн дагуу хөдлөнө гэж үзээрэй. Өөрөөр хэлбэл шинээр үүсэх бөөмс протоны урсгалын дагуу импульсгүй гэсэн үг.



хөндлөн хавтгай



цацрагийн дагуух
хөндлөн харагдац
тууш харагдац

- (1) - ToF цилиндр
- (2) - мөр (зам)
- (3) - мөргөлдөөний цэг
- (4) - мөрт (tracking) бүртгэгч
- (5) - протоны урсгал
- ⊗ - соронзон орон

Зураг 3: Мөрт (tracking) бүртгэгч болон ToF бүртгэгчийн тусламжтайгаар бөөмсийг танин ялгах туршилтын бүдүүвч. Хоёр бүртгэгч нь хоёулаа мөргөлдөөний цэгийг төвдөө агуулсан цилиндр хэлбэртэй. Зүүн: цацрагийн шугамд перпендикулярар харагдах байдал, баруун: цацрагийн шугамын дагуу тууш харагдах байдал. Шинээр үүсэх бөөмс, зөвхөн, протоны цацрагийн шугамд перпендикуляр чиглэлийн дагуу хөдлөнө.

В.3 Бөөмийн массыг соронзон орон B , ToF бүртгэгчийн радиус R , үндсэн тогтмолууд болон бусад хэмжиж болох хэмжигдэхүүнүүдээр илэрхийл. Хэмжиж болох хэмжигдэхүүн гэдэгт: траекторийн муруйлтын радиус r , нисэлтийн хугацаа t орно. 1.7pt

Бид дөрвөн янзын бөөм бүртгэж авсан ба ямар бөөм болохыг нь ялгаж таних шаардлагатай байна. Мөрт бүртгэгч доторх соронзон орон $B = 0.500$ Т байсан. ToF бүртгэгчийн радиус R нь 3.70 м байв. Хэмжилтийн утгууд нь ($1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$):

Бөөмс	Радиус r [м]	Нисэлтийн хугацаа t [нс]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Массыг нь тооцоолж, энэ дөрвөн бөөмсийг тань.

0.8pt