

# Сансрын орчинд ажиллах хагас дамжуулагч материалын энерги шингээлтийг GEANT4 программ ашиглан тодорхойлох арга

Х.Лусванбат, Т.Ариунболд, М.Ананд, У.Төгөлдөр, Т.Төртогтох, Т.Бэгзсүрэн,  
Д.Улам-Оргих Д.Эрдэнэбаатар\*

Монгол Улсын Их Сургууль, Шинжлэх Ухааны Сургууль

Физикийн тэнхим, Нано хиймэл дагуул хөгжүүлэлтийн лаборатори

Жил бүр сансарт гарч буй техникуудийн даалгавар илүү олон үйлдэлтэй болж байгаа тул тухайн даалгаврыг гүйцэтгэхэд хэрэглэгдэх энерги/чадал/ даган өсөж байна. Сансарт ажиллах хагас дамжуулагч төхөөрөмжүүдийн чадал нэмэгдсэнээр түүний сансрын цацрагийн нөлөөгөөр эвдрэх магадлал даган ихэснэ. Иймд юуны түрүүнд өндөр энергитэй бөөм ба хагас дамжуулагчийн харилцан үйлчлэлийг судлах шаардлагатай болсон. Их энергитэй бөөм бодисын харилцан үйлчлэлийн судалгааг туршлагаар хийх боломж бага тул GEANT-4 Монте Карло арга дээр суурилан Хагас дамжуулагч материалын сансрын өндөр эрчимтэй протоны энергийг шингээх магадлалыг 1000 мкм зузаантай цэвэр цахиур дээр 100 MeV болон 200 MeV энергитэй протоны урсгал шингэх магадлалыг тооцоолж өмнө судалгаатай харьцуулан судалсан.

Түлхүүр үг: Өндөр энергитэй протон, хагас дамжуулагч төхөөрөмж, хагас дамжуулагч материалын энерги шингээлт.

## Товчлол

- $FR$  : Эвдрэлийн зэрэг (FIT)  
 $\alpha$  : Энергис цэнэгрүү хувиргах фактор  
 $\sigma(V)$  : Хөндлөн огтлол ( $\text{см}^2$ )  
 $F(E_p)$  : Бөөмийн урсгал ( $\text{МэВ}^{-1}\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$ )  
 $E_p$  : Бөөмийн анхны энерги (МэВ)  
 $A$  : Төхөөрөмжийн талбай ( $\text{см}^2$ )  
 $\Phi_{Ep}(Q_g)$  : Цэнэг үүсэх магадлалын функц ( $\text{Клг}^{-1}\mu\text{м}^{-1}$ )  
 $Q_g$  : Үүссэн цэнэг (Кл)  
 $Q_{dest}(V)$  : Эвдрэлд хүргэх босго цэнэг (Кл)

## ОРШИЛ

Сүүлийн жилүүдийн сансрын технологид хэрэглэгдэж байгаа электрон төхөөрөмжийн өсөлтөөс хамааран түүний хэрэглэх чадлын хэмжээ эрс нэмэгдсэн бөгөөд энэ хандлага цаашид ч мөн нэмэгдэх шинжтэй байна[1]. Ангараг гарагийг эзэмших болон бусад гариг болон солир дээр буух сансрын гүний хөлгүүд, сансрын олон улсын станц гэх мэт том хэмжээний төхөөрөмжүүдийн хувьд хэрэглэх чадал тун удахгүй мегаваттийн эрэмбэд очихоор байна [2,3]. Сансрын хөлгийн хэрэглэх чадал өсөхийн хэрээр түүнийг дамжуулах хэлхээний утасны масс даган ихэсдэг ба сансрын хөлгийн нийт хуурай массын 8 хувийг зөвхөн дамжуулах утас эзэлдэг [4].

Иймээс массын өсөлтийг бага байлгахын тулд өндөр хүчдэлийг өндөр чадал хэрэглэж

байгаа төхөөрөмжид ашиглаж массыг бууруулах арга хэмжээ авдаг[5] Хэрэв шугамын хүчдэлийг 28В-оос 100В болгох юм бол нийт утасны массыг 75%-иар буурдаг байна. Эндээс үзвэл шугамын хүчдэлийн өсөлт нь ирээдүйд бүтээгдэх сансрын хөлгүүдийн үндсэн шаардлагуудын нэг байхаар байна. Гэсэн хэдийн ч өндөр чадлын хагас дамжуулагч төхөөрөмжийн сансарт хэрэглэхэд сансрын өндөр энергитэй бөөмсийн нөлөөгөөр үүсэх эвдрэл бодит эрсдэл болж байна. Өмнөх судалгааны ажлууд энэ үзэгдлийг тодорхой хэмжээнд судалсан бөгөөд “Нэг удаагийн үзэгдлээр эвдрэх” үзэгдэл гээд чадлын электроникийн төхөөрөмжүүдийн ийм эвдрэлийг судалж эхэлсэн байдаг[6].

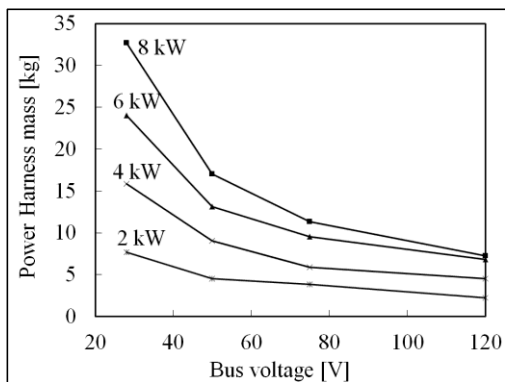
Дээрх эрсдлийг бууруулж хагас дамжуулагч төхөөрөмжийн сансарт ажиллах найдвартай байдлыг хангахын тулд сансрын орчин дахь эвдрэлийн зэргийг тодорхойлсон байх шаардлагатай.

Хиймэл дагуул сансрын хөлгүүд ихэвчлэн байдаг дэлхийн нам орбитын орчны хувьд өндөр энергитэй бөөмсийн ихэнхийг нь протон эзэлдэг.

Иймээс хагас дамжуулагч төхөөрөмжийн найдвартай ажиллагааг судлахдаа энергитэй цацрагийг протоноор сонгож авсан болно. Өмнө

\* Electronic address: erdenebaatar.d@num.edu.mn

нь судлаачид дээрх эвдрэлийн зэргийг үнэлэх аргыг боловсруулж тодорхой томъёог санал болгосон байдаг. Уг загвар нь үндсэн гурван хэсгээс тогтох бөгөөд янз бүрийн орчны цацрагийн мэдээлэлд тулгуурлан янз бүрийн орчинд хагас дамжуулагч өндөр чадлын төхөөрөмжийн эвдрэлийн зэргийг тооцож болохоор байв. Өмнөх судалгаануудын хувьд хагас дамжуулагч төхөөрөмжийн эвдрэлийн шалтгаан нь өндөр энергитэй бөөмүүд байдаг нь тогтоогдсон байдаг [7,8,9].

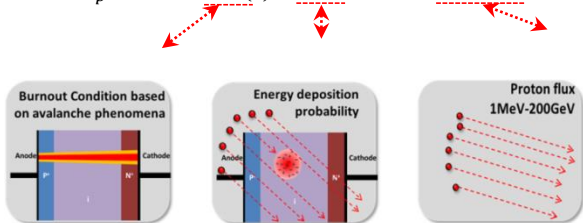


Зураг 1. Хиймэл дагуулын хэрэглэх чадал ба дамжуулагч утасны хоорондын хамаарлыг харуулав.

### ЭВДРЭЛИЙН ЗЭРГИЙГ ТОДОРХОЙЛОХ АРГАЧЛАЛ

Энэ судалгааг хийх үндэслэл болсон өмнөх судалгаанд дэвшүүлсэн үндсэн томъёо нь (1)-р тэгшитгэлд үзүүлсэн байдлаар бичигдсэн. Уг томъёо нь 2-р зурагт үзүүлсэн байдлаар үндсэн гурван хэсгээс тогтоно.

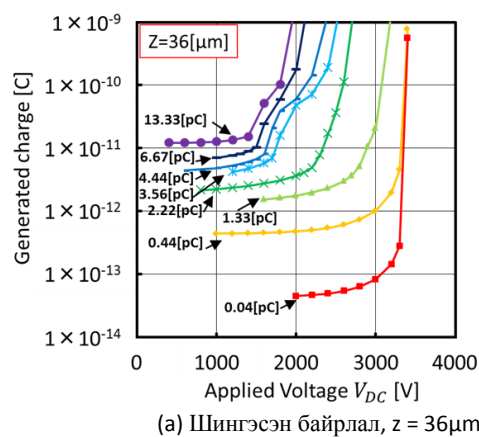
$$FR = \int_{E_p^{min}}^{E_p^{max}} A * \int_{Q_{dest}(V)}^{Q_{max}} \Phi_{E_p}^{300}(Q) dQ * F(E_p) dE_p \quad (1)$$



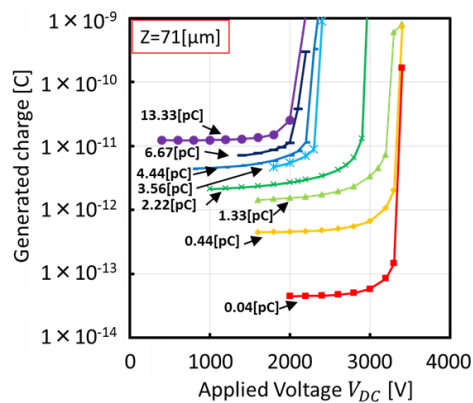
Зураг 2. Эвдрэлийн зэрэг тооцох томъёоны бүрэлдэхүүн хэсгүүд.

Нэгдүгээрт T-CAD хагас дамжуулагч чадлын төхөөрөмжийн загварчлал, симуляцийг хийх зориулалттай програмаас гаргаж авсан үр дүн бөгөөд уг үр дүн нь хагас дамжуулагч төхөөрөмжийн дотор ямар хүчдэлд ажиллаж байгаагаас хамааран хэдий хэмжээний цэнэг өндөр энергитэй протоны нэвтрэлтээс үүсвэл уг

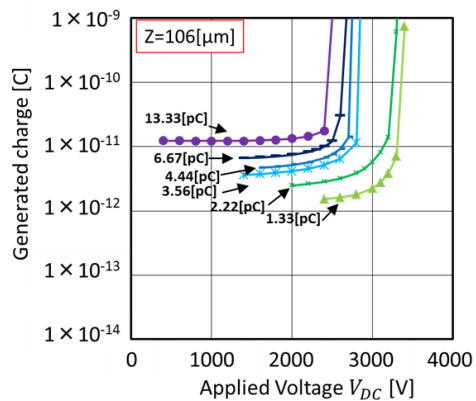
төхөөрөмж эвдрэхийг тодорхойлсон босго утгуудыг илэрхийлэх хэсэг юм. Өндөр чадлын хагас дамжуулагч төхөөрөмжийн хувьд дээрх эвдрэл үүсгэх цэнэгийн босго утга нь түүний ажиллаж байгаа хүчдэлээс шууд хамаарч байдаг. Хагас дамжуулагч төхөөрөмжид протон нэвтрэн цэнэг үүсгэх нь эвдрэлийн шалтгаан болж байгаа боловч уг шингээлтийн байрлал үүсч буй цэнэгийн хэмжээнд төдийлөн хүчтэй нөлөө үзүүлдэггүй байна. Уг хамаарлыг шалгасан үр дүнг 3-р зурагт үзүүлэв.



(а) Шингэсэн байрлал, z = 36μm



(б) Шингэсэн байрлал, z = 71μm



(в) Шингэсэн байрлал, z = 106μm

Зураг 3. Диодны босоо тэнхлэгийн хувьд өөр өөр байрлалд шингээгдсэн протоноор үүсгэгдсэн

*цэнэгийн хэмжээ ба ажиллаж байгаа хүчдэлийн хамаарал (300μm i-давхарга PiN диод)*

Хагас дамжуулагч цахиур дотор протоноор шингээгдсэн энерги нь цэнэг үүсгэх, аваланч үржих үзэгдэл нь тодорхой магадлалтайгаар явагддаг байна. Мөн уг үзэгдэл нь төхөөрөмжийн материалын геометр зузаан ба нэвтрэн орогч протоны анхны энергиэс хамаарч янз бүр байдаг байна. Хамаардаг Дээрх магадлалыг математик функцээр илэрхийлсэн хэсэг (1)-р томъёоны хоёрдугаар хэсгийг бүрдүүлж байна. Яг энэ судалгааны ажлаар бид эвдрэлийн зэргийг тодорхойлох томъёоны хоёрдугаар хэсгийг авч үзэх юм. Томъёоны гуравдугаар хэсэгт хагас дамжуулагч орчны ажиллах орчны цацрагийн мэдээллийг тусгаж өгсөн байна. Өмнө хийгдсэн бусад эрдэмтдийн судалгаанаас сансрын протоны урсгалыг 1МэВ-ээс 200ГэВ хүртэлх энергийн мужид тодорхойлсон байдгийг авч хэрэглэсэн байна.

## **ПРОТОН ЦАХИУРЫН ХАРИЛЦАН ҮЙЛЧЛЭЛ**

Протоноос цахиурт энерги шингэх үзэгдлийн судалгаа олон янзаар хийгдэж байсан ч зузаан, анхны энергийн өргөн муж, энерги шингэх магадлал зэргийг хамтад нь авч үзсэн бүтээл төдий л үгүй учир энэ удаагийн судалгааны гол цөм нь өндөр энергитэй протон ба цахиурын харилцан үйлчлэлийг ойлгох, томъёолох зорилготой юм. Электроник төхөөрөмжүүд тэр дундаа хагас дамжуулагч төхөөрөмжүүдийн сансрын орчин дахь ажиллагааг нь 20-р зууны сүүлээс эрчимтэй судлаж эхэлсэн. Гэсэн хэдий ч сансрын орчны цэнэгт бөөмсийн энерги асар их бөгөөд шууд туршлагаар шалгах боломж бага тул атом, цөмийн түвшин дахь физик болон химийн харилцан үйлчлэлийн процессуудыг бодит туршлага дээр үндэслэн загварчилсан компьютерын програмуудыг ашиглан голчлон судалсан байдаг. Эдгээрээс В.Doucine, Y.Patin, J.P.Lochard тэргүүтэй Францын судлаачдын бүтээл [10] нь энэ салбарт жинтэй бүтээлд зүй ёсоор тооцогддог. Энэхүү судалгаа нь сансрын их энергитэй протон хагас дамжуулагч төхөөрөмжүүдийн гол орц болсон цахиурт ямар магадлалаар энерги шингэх хамаарлыг тогтоох зорилготой байсан бөгөөд судалгаандаа “NETC /High Energy Transfer Code/” ашигласан бөгөөд

үр дүнг энэ салбарт ашиглагдаж буй бусад програмуудын үр дүнтэй харьцуулан баталгаажуулсан юм. “NETC” нь MHS электрониксийн хагас дамжуулагч төхөөрөмж дээрх туршлагаар баталгаажсан программ байв.

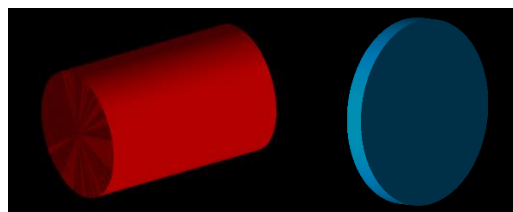
## **АРГА ЗҮЙ**

Энэхүү судалгаанд хагас дамжуулагч төхөөрөмжийн үндсэн элемент болох цахиурт энерги шингэх магадлалын хамаарлыг GEANT4 багц программ ашиглан тооцов. Судалгаанд GEANT4 багц программаар тооцоолсон үр дүн 1994 онд хэвлэгдсэн "Characterization of proton interactions in electronic components" өгүүллийн [10] үр дүнтэй харьцуулж баталсан ба энерги шингэх магадлал нь цахиурын зузаан болон протоны анхны энергиэс хэрхэн хамаарч буй хамаарлыг тодорхойлов.

## **ЭНЕРГИ ШИНГЭХ ПРОЦЕССЫГ ЗАГВАРЧЛАХ НЬ**

А. GEANT4 багц программ  
GEANT4 багц программ нь “CERN” буюу Европын цөмийн судалгааны байгууллагаас хөгжүүлдэг их энергийн физик, сансрын орчны физик, анагаах ухааны салбаруудад өргөн хэрэглэгддэг бөгөөд матер бөөмийн харилцан үйлчлэлийн үед явагдах физик процессуудыг загварчлахад зориулагдсан программ юм. GEANT4 багц программ нь программчлалын C++ хэлээр бичигддэг ба бүх төрлийн физик процессуудын бэлэн сангуудыг дуудан тооцоо хийх боломжтой юм.

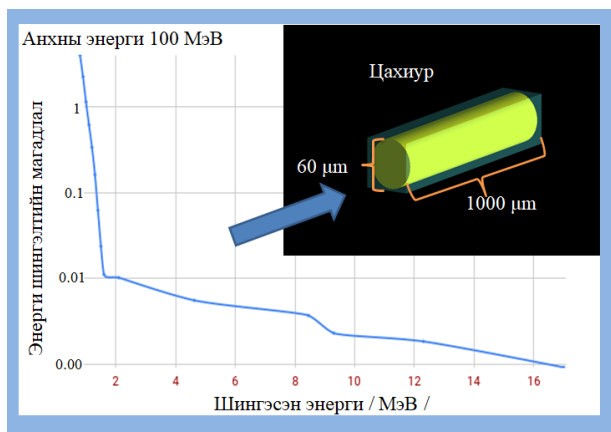
В. Симуляцийн загварчлал  
Судалгаанд бичил диодыг жишиг болгон материйг загварчилсан. Симуляцийн орчинг буюу вакуум орчныг маш бага нягттай хийгээр бичил диодыг цэвэр цахиураар төлөөлүүлэн зураг 4-т үзүүлснээр загварчлав.



*Зураг 4. Микро метрийн эрэмбэтэй хэмжээтэй бичил диодын загварууд.*

**С. Цахиурт энерги шингэх процессыг симуляцлах**

Загварчилсан биетэд өөр өөр энергитэй протоноор үйлчилж шингэсэн энергийг тооцоолж үр дүнг зураг 5-д харуулав. Симуляцид цөмийн болон цахилгаан соронзон харилцан үйлчлэлийн физик процессуудын сангуудыг ашиглан биетэд шингэсэн энергийг тооцоолов.



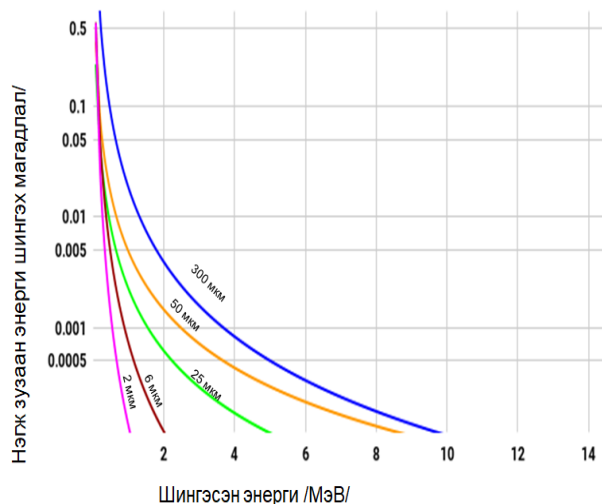
Зураг 5. 100 МэВ анхны моно-энергитэй протон 30 мкм –ийн радиустай 1000 мкм –ийн зузаантай цахиуртай харилцан үйлчилж энерги шингээх буюу алдах магадлалын хамаарал. 22000 удаагийн симуляцийн үр дүнд.

**Д. Бусад судалгааны үр дүнтэй харьцуулах нь**

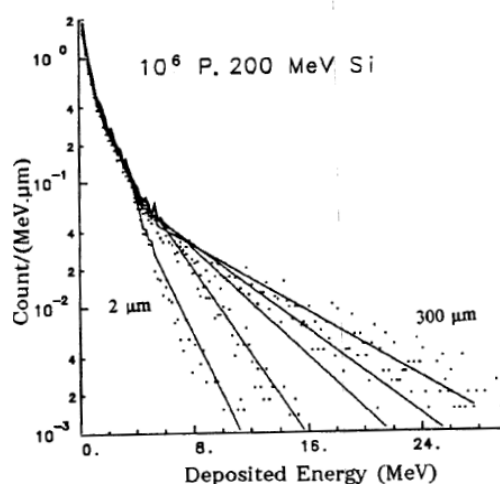
Сонгож авсан өмнөх судалгааны үр дүнтэй энэ удаагийн судалгааны үр дүнг харьцуулж үзэв. Үүний тулд тодорхой нэг тогтмол зузаанд энерги шингээлтийг тооцоолж дундаж утгуудыг харьцуулав, тодорхой хэмжээний тогтмол анхны энергитэй протон урсгал цахиурын өөр өөр зузаанд энерги хэрхэн алдах хамаарлыг тус тус харьцуулж үзлээ. 1000 мкм-ийн зузаантай 30 мкм-ийн радиустай цахиурт 200 МэВ болон 100 МэВ анхны энергитэй протоны зүгээс алдах буюу шингээх энергийн дундаж утгыг симуляц хийж HETC-ийн үр дүнтэй харьцуулбал: / HETC нь 1000000 удаагийн симуляцийн үр дүн, GEANT4 нь 22000 удаагийн симуляцийн үр дүн/ хүснэгтэд үзүүлсэн үр дүн гарав:

Анхны энерги	HETC /МэВ/	GEANT4 /МэВ/
100 МэВ	0.9	0.885
200 МэВ	1.4	1.372

200 МэВ энергитэй протон тогтмол 30 мкм радиустай өөр өөр зузаантай цахиурт энерги алдах буюу шингээх магадлалын хамаарлын график / А нь GEANT4 дээрх 22000 удаагийн симуляцийн үр дүн, Б нь HETC дээрх 1000000 удаагийн туршилтын үр дүн/-г зураг 6-д үзүүлэв.



А) GEANT4 симуляцийн үр дүн



Б) GEANT4 симуляцийн үр дүн

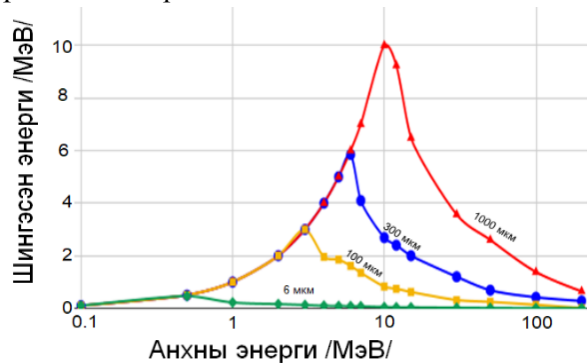
Зураг 6. GEANT4 ашигласан симуляцийн үр дүнг өмнө хийгдсэн судалгаатай харьцуулж үзэв.

**Энерги шингэх магадлал протоны анхны энергиэс хамаарах нь**

Цахиурт энерги шингэх магадлал нь цахиурын зузаанаас хэрхэн хамаарч буй хамаарлыг харуулав. Хоёр өөр эзлэхүүнд энерги шингэх магадлал протоны анхны энергиэс хэрхэн хамаарахыг харуулав.

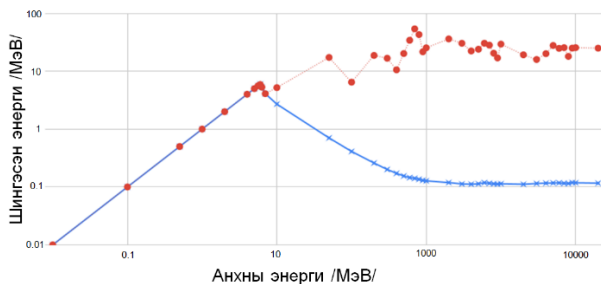
Тогтмол 30 мкм-ийн радиустай өөр өөр зузаантай цахиурт шингэх энергийн дундаж утга протоны анхны энергиэс хамаарах хамаарал / цэг

бүр 22000 удаагийн симуляцийн үр дүнгээр /-г зураг 7-д харуулав. Эндээс бид Браг пикийн үндсэн хэлбэрийг мөн ажиглаж болно.



Зураг 7. Ялгаатай зузаан бүхий цахиуруудын протоны анхны энергиэс хамааран энерги шингээлт.

Зураг 8-д 100 мкм-ийн радиустай 200 мкм-ийн зузаантай цахиурт протоны анхны энергийн өөр мужид шингэх энергийн дундаж утгын хамаарал / цэг бүр 22000 удаагийн симуляцийн үр дүн/ба Улаан цэгэн графикаар 22000 удаагийн симуляцаас шингэсэн энергиүдийн хамгийн их утгыг харуулав.\



Зураг 8. Энерги шингээлтийн дундаж утгын түгэлт ба хамгийн их шингээлтийн тохиолдлын харьцуулалт.

## ДҮГНЭЛТ

Энэ удаагийн ажлаар хагас дамжуулагч төхөөрөмжийн үндсэн материал болох цахиурын сансрын орчны протоноос энергийг ямар магадлалтай шингэхийг тооцоолохыг зорьсон билээ. Зураг 7-д үзүүлсэн үр дүнг харах юм бол хамгийн өндөр магадлалтай энергийн шингэлт 10МэВ орчмоос хойш буурч байгаа үзүүлэлт харагдаж байгаа нь өндөр энергитэй протонууд өндөр чадлын хагас дамжуулагч төхөөрөмжүүдэд аюул учруулахгүй мэт харагдаж байгаа ч зураг 8-ийг харах юм бол дөнгөж 10000-ын эрэмбэтэй тохиолдолд дор хаяж нэг удаа 40-50МэВ энерги шингэж байгаа нь харагдаж байна. Энэ хэмжээний энерги нь шингэх магадлал нь бага хэдий ч төхөөрөмжийг

эвдэх хэмжээний цэнэгийг бий болгож байгаа нь шууд эрсдэлийг өндөрсгөж байгаа юм. Иймээс цаашид 100000-ийн эрэмбэтэй тооны тохиолдолд ялгаатай зузаантай материалуудад энерги шингэлт ямар байхыг судалж үзэх шаардлагатай.

## НОМ ЗҮЙ

- [1] Ethan E. Haase, Carissa Bryce Christensen, Hans Ten.: *Cate Global Commercial Space Industry Indicators and Trends*, Acta Astronautica, 2002, Vol. 50, No. 12, pp. 747–757.
- [2] John R. Brophy, Robert Gershman, Nathan Strange, Damon Landau.: *300-kW Solar Electric Propulsion System Configuration for Human Exploration of Near-Earth Asteroids*, 47<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011, AIAA 2011-5514.
- [3] Mengu Cho, Akiyo Saionji, Kazuhiro Toyoda, Masayuki Hikita.: *High Voltage Solar Array for 400V Satellite Bus Voltage: Preliminary Test Results*, 41<sup>st</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2003, AIAA 2003-683.
- [4] James R. Wertz, David F. Everett, Jeffery J. Puschell.: *Space Mission Engineering: The New SMAD*, Space Technology Library, Vol. 28, July 29, 2011
- [5] Kitt C. Reinhardt, Clay S. Mayberry, Dave S. Glaister.: *Space Power Technology in Power Management and Distribution Electronics*, Journal of Spacecraft and Rockets. November–December 1998, Vol. 35, No. 6.
- [6] W.L. Bendel, E.L. Petersen.: *Proton Upsets In Orbit*, IEEE Transactions on Nuclear Science, 1983, Vol. NS-30, No. 6.
- [7] W. Kaindl, G. Solkner and G. Wachutka.: *Analysis of charge carrier multiplication events in NPT and PT-diodes triggered by an ionizing particle*, Electron Devices and Solid-State Circuits, IEEE Conference on, 2003, pp. 383-386.
- [8] Gerald Soelkner, Peter Voss, Winfried Kaindl, Gerhard Wachutka, K. H. Maier, H.-W. Becker.: *Charge Carrier Avalanche Multiplication in High-Voltage Diodes Triggered by Ionizing Radiation*, IEEE

Transactions on Nuclear Science, December 2000, Vol. 47, No. 6.

- [9] A.M. Albadri et al.: *Single event burnout in power diodes: Mechanisms and models*, Microelectronics Reliability, Volume 46, Issues 2–4, February–April 2006, Pages 317-325.
- [10] B. Doucin et al.: *Characterization of proton interactions in electronic components*, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 41, no. 3, pp. 593-600, Jun 1994.