

# A Geant4 használatának alapjai

---

Bíró Gábor

**A**tommag és

**N**ehézionfizikai

**T**éli

**I**skola

2016. február 2-3.



# Tartalom



- ▶ Bevezetés
  - ▶ Részecsketranszport szimulációk
- ▶ Geant4 alapok
  - ▶ Történet
  - ▶ Működési alapok
- ▶ GeantV
  - ▶ A jövő

**Geant 4** is a toolkit for the simulation of the passage of particles through matter. It has been developed and maintained by a world-wide Collaboration of approximately 100 scientists.

Its application areas include high energy physics, astrophysics and nuclear physics experiments, medical, accelerator and space science studies.

**GLAST** Gamma-ray Large Area Space Telescope

**Borexino** at Gran Sasso Laboratory

**ESA XMM** X-ray telescope

**CMS** at LHC CERN

**BaBar** at SLAC

High energy  $\mu$  Courtesy of L3

Photon attenuation. Low energy photons Courtesy of the Italian Nat. Inst. for Cancer Research

Neutrons Courtesy of CMS

Stopping  $\alpha$  absorption nuclear deexcitation Geant4 Exp. data

An abundant set of Physics Processes handle the diverse interactions of particles with matter across a wide energy range.

Geant4 exploits advanced Software Engineering techniques and Object Oriented technology to achieve transparency of physics implementation.

Logos: ATLAS, BABAR, eesa, INFN, IHEP, IN2P3, Jefferson, PPARC, Stanford Linear Accelerator Center, TERA, Budker Inst. of Physics IHEP, Proton, MDPHI Moscow, Pindang University

# Bevezetés

---



- ▶ Miért van szükség detektorszimulációkra?



# Geant4 telepítés



1) gcc, cmake telepítése:

```
$ sudo apt-get install gcc, cmake
```

2) *geant4.10.XX.tar.gz* letöltése és kicsomagolása:

```
$ wget http://birogabesz.web.elte.hu/ANTI_2016/geant4.10.XX.tar.gz  
$ tar -xvf geant4.10.XX.tar.gz
```

3) Konfigurálás és telepítés

```
$ cd geant4.10.XX && mkdir build && cd build  
$ cmake ../ -DCMAKE_INSTALL_PREFIX=/telepítésicél  
-DGEANT4_INSTALL_DATA=ON -DGEANT4_USE_OPENGL_X11=ON  
-DGEANT4_BUILD_CXXSTD=c++11
```

```
$ make -j4 && make install
```

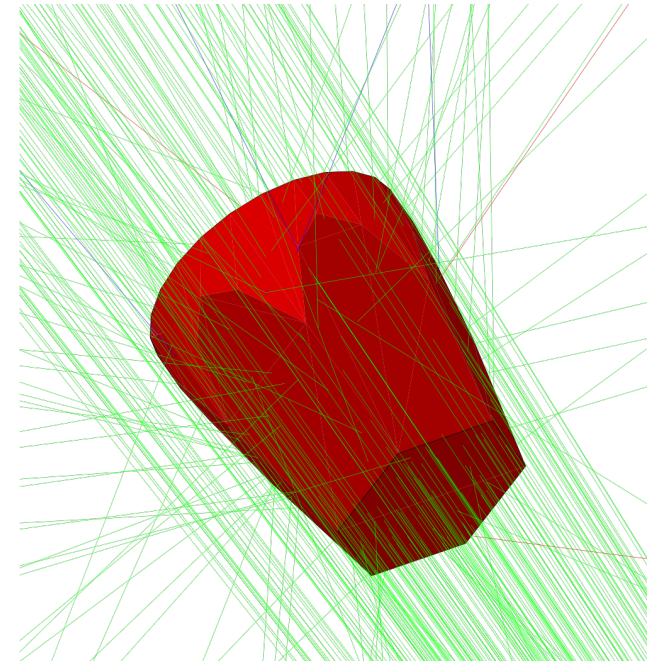


4) Környezeti változók beállítása

```
$ wget http://birogabesz.web.elte.hu/ANTI_2016/g4_10.XX_env.sh  
$ source g4_10.XX_env.sh
```



- ▶ Miért van szükség detektorszimulációkra?
  - ▶ Új detektorok tervezése
  - ▶ Detektorok validálása, detektorválasz mérése, hatásfok számolása
  - ▶ Elméleti modellek ellenőrzése
    - ▶ Futási idő...?



- ▶ Részecsketranszport: részecskék mozgása + ütközése
- ▶ Adott **típusú részecske** adott **energiával** mozog adott **közegben**
  - ▶ Honnan tudjuk mi történik??
    - ▶ Egy folyamat az adott kinematika mellett csak bizonyos valószínűséggel következik be
    - ▶ Véletlen számok használata: **Monte Carlo**





```
int getRandomNumber()  
{  
    return 4; // chosen by fair dice roll.  
             // guaranteed to be random.  
}
```



# Bevezetés

---



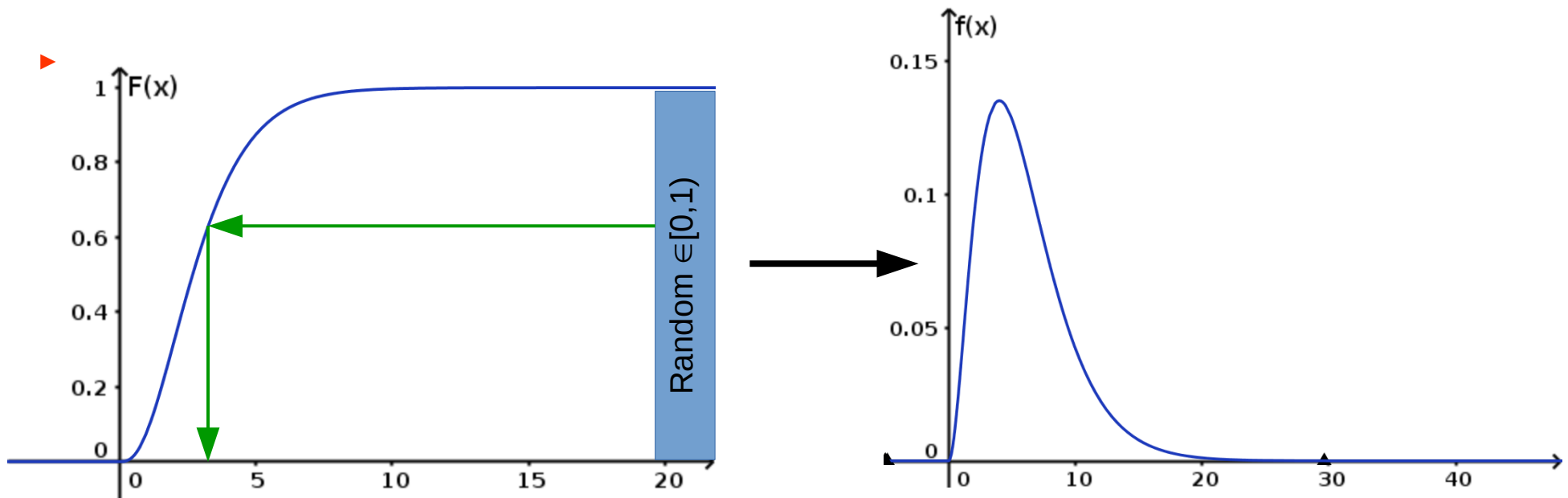
- ▶ Tetszőleges eloszlású véletlen szám? 
- ▶ Adott folyamat valószínűsége? 
- ▶ Mikor történik kölcsönhatás? 
- ▶ Melyik kölcsönhatás történik meg? 

# Bevezetés



- ▶ Adott folyamat valószínűségének eloszlása:  $f(x)$
- ▶ ahol  $x$  valószínűségi változó pl. a részecske kinetikus energiája,





- ▶ 
$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1, \quad F(x) = \int_{-\infty}^x f(g) dg \quad \longrightarrow \quad x = F^{-1}(R_{01})$$



# Bevezetés

---



- ▶ Tetszőleges eloszlású véletlen szám? 
- ▶ Adott folyamat valószínűsége? 
- ▶ Mikor történik kölcsönhatás? 
- ▶ Melyik kölcsönhatás történik meg? 

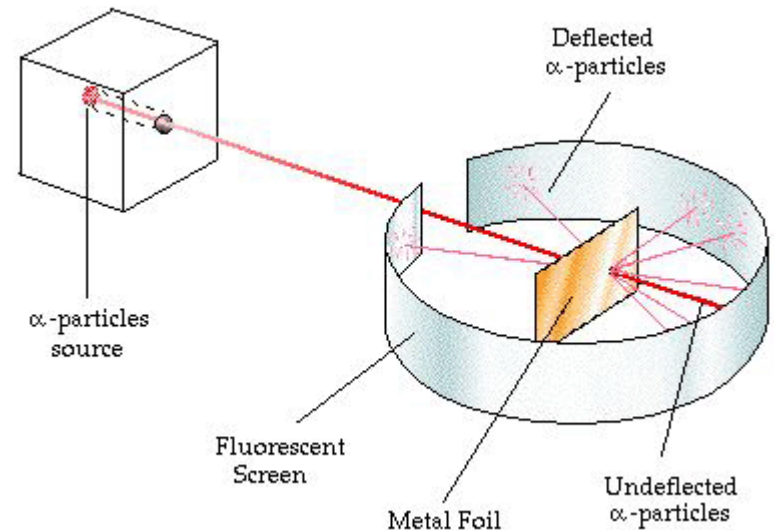
# Bevezetés

- ▶ Adott folyamat valószínűsége?

Pl.: Rutherford szórás:  $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{8\pi\epsilon_0 m v_0^2} \right)^2 \left( \sin^4 \frac{\Theta}{2} \right)^{-1}$

$$v = \frac{E r f^{-1}(2R_{01} - 1)}{\sqrt{m/2\pi k_B T}}$$

$$\Theta = \arccos(1 - 2R_{01})$$



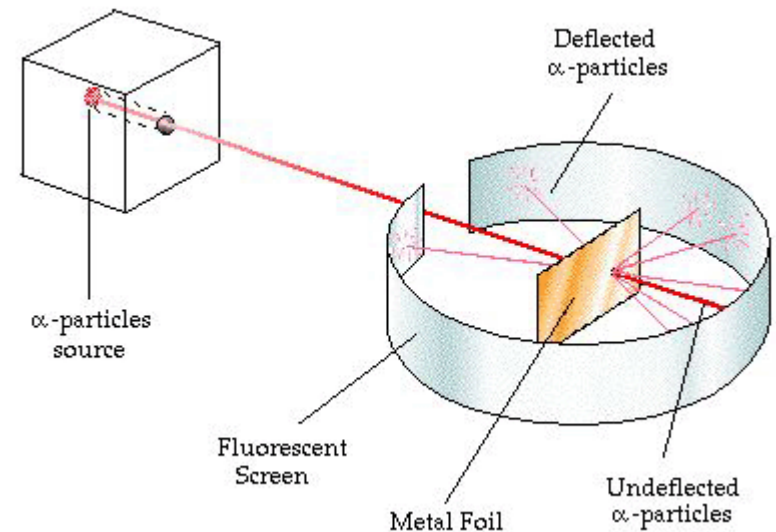
# Bevezetés

- ▶ Adott folyamat valószínűsége?



Pl.: Rutherford szórás: 
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{8\pi\epsilon_0 m v_0^2} \right)^2 \left( \sin^4 \frac{\Theta}{2} \right)^{-1}$$

$$\sigma_{tot}(v) = 2\pi \int_0^\pi \frac{d\sigma(\Theta, v)}{d\Omega} d\Omega$$

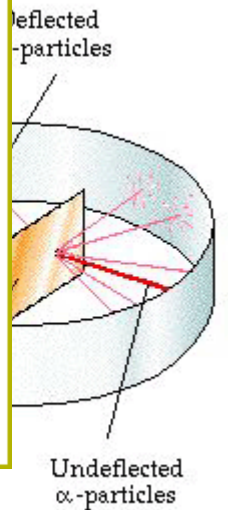
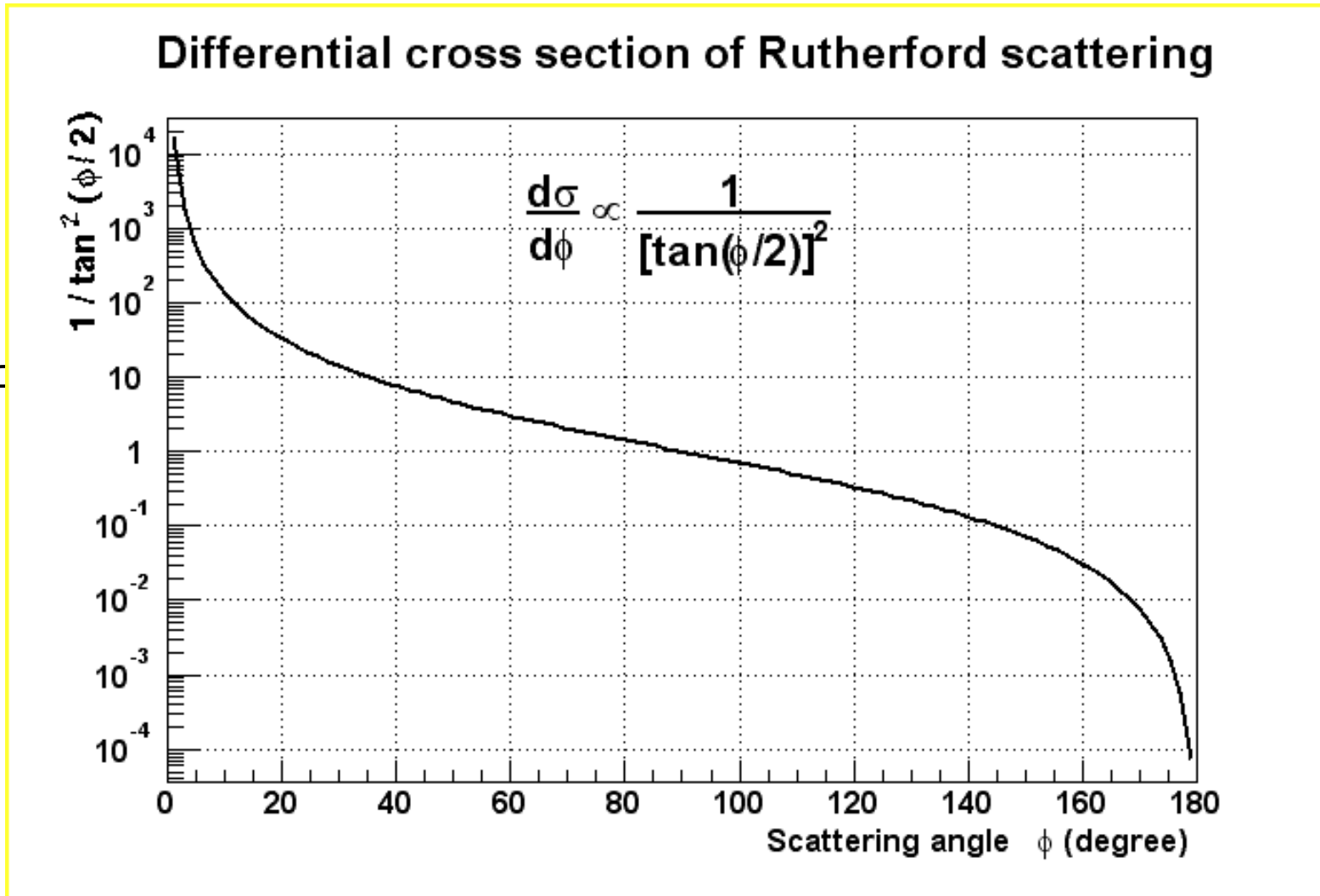


# Bevezetés







► Ado

Pl.: F




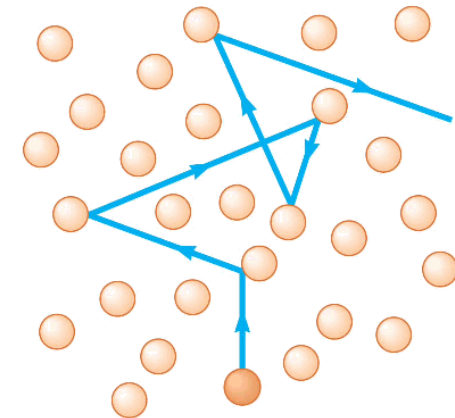
# Bevezetés

---

- ▶ Tetszőleges eloszlású véletlen szám? 
- ▶ Adott folyamat valószínűsége? 
- ▶ Mikor történik kölcsönhatás? 
- ▶ Melyik kölcsönhatás történik meg? 

# Bevezetés

- ▶ Mikor történik kölcsönhatás?
- ▶ **Átlagos szabad úthossz:**  $\lambda = \frac{1}{\sigma n}$
- ▶ Az a távolság, amit a  $\mathbf{p}$  impulzusú részecske  $\Delta t$  idő alatt megtesz:  $\lambda_p$
- ▶ A kölcsönhatás valószínűsége:   
 $R_{01}$
- ▶ Ha  $\lambda < \lambda_p$ : valószínűbb a kölcsönhatás



[https://en.wikipedia.org/wiki/Mean\\_free\\_path](https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_free_path)





<http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/node19.html>



# Bevezetés

---

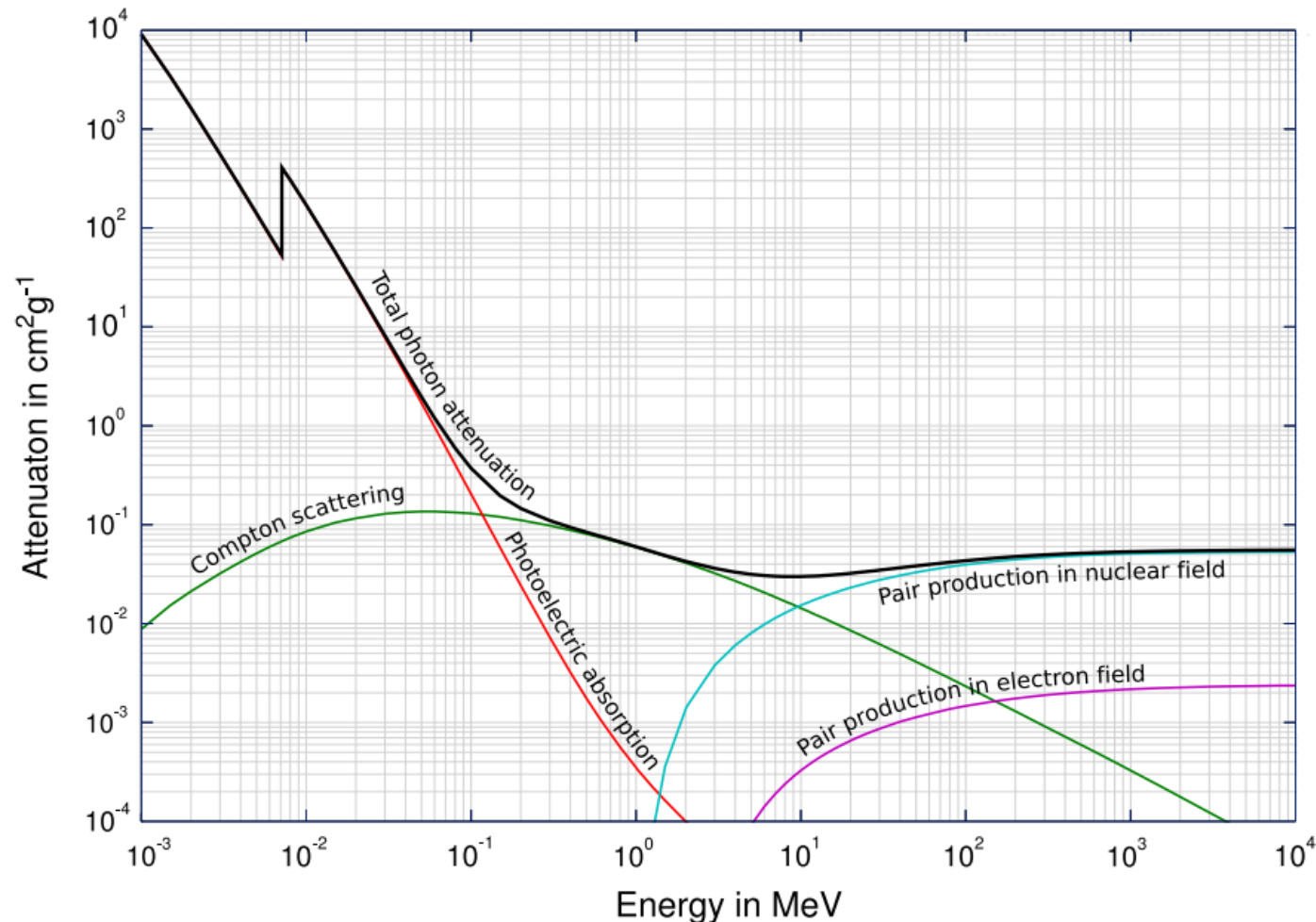


- ▶ Tetszőleges eloszlású véletlen szám: 
- ▶ Adott folyamat valószínűsége? 
- ▶ Mikor történik kölcsönhatás? 
- ▶ Melyik kölcsönhatás történik meg? 

# Bevezetés



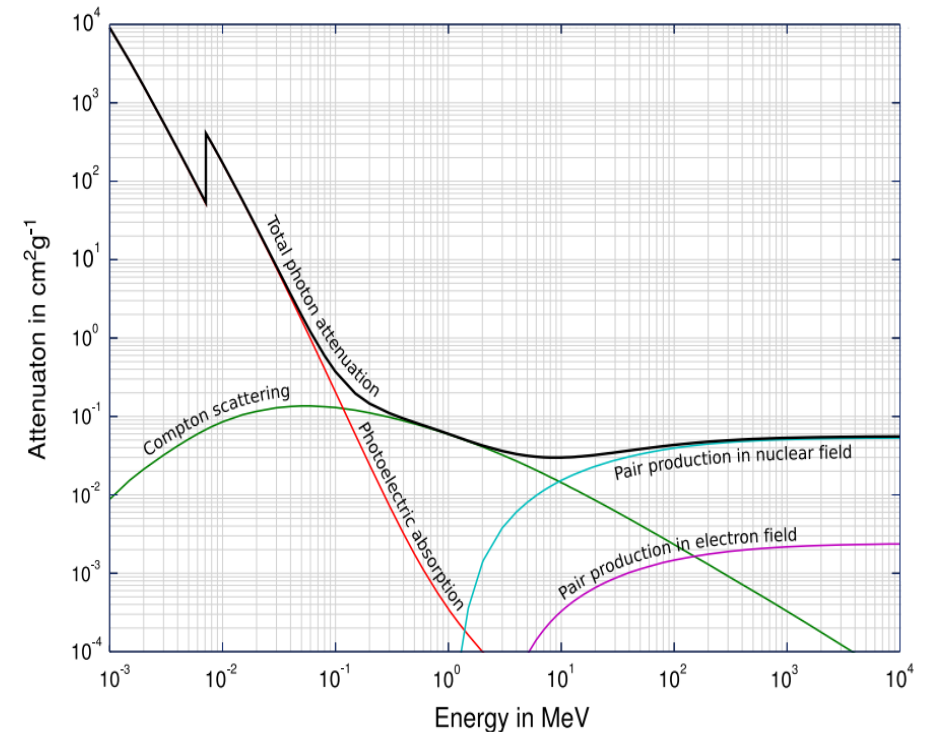
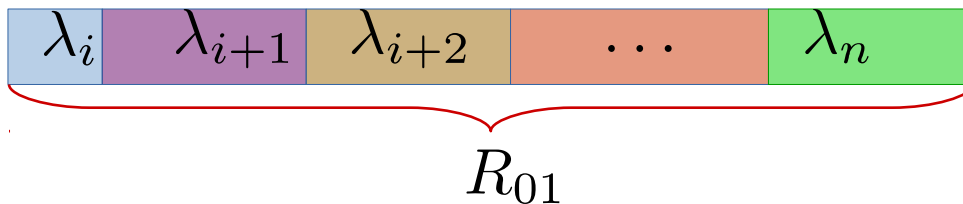
- Melyik kölcsönhatás történik meg?



# Bevezetés





- ▶ Melyik kölcsönhatás történjen?
- ▶ **Átlagos szabad úthossz:**

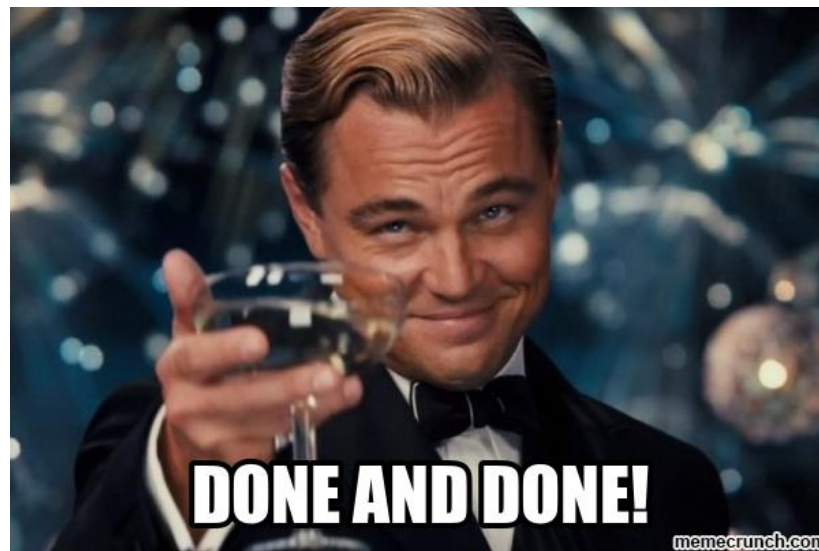
$$\frac{1}{\lambda_{tot}} = \sum \frac{1}{\lambda_i} \quad \sigma_{tot} = \sum \sigma_i$$



# Bevezetés



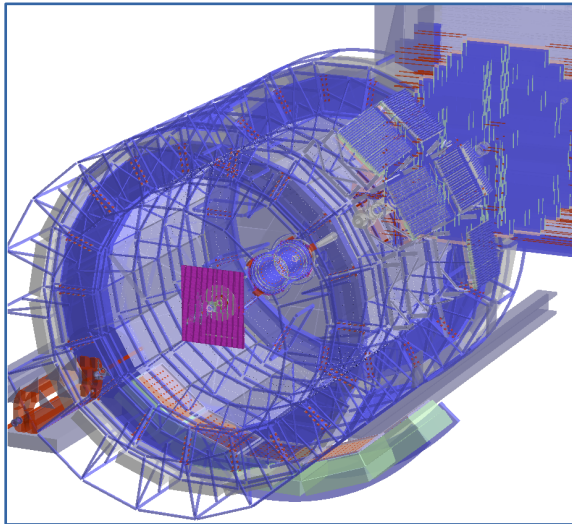
- ▶ Tetszőleges eloszlású véletlen szám: 
- ▶ Adott folyamat valószínűsége? 
- ▶ Mikor történik kölcsönhatás? 
- ▶ Melyik kölcsönhatás történik meg? 



# Bevezetés

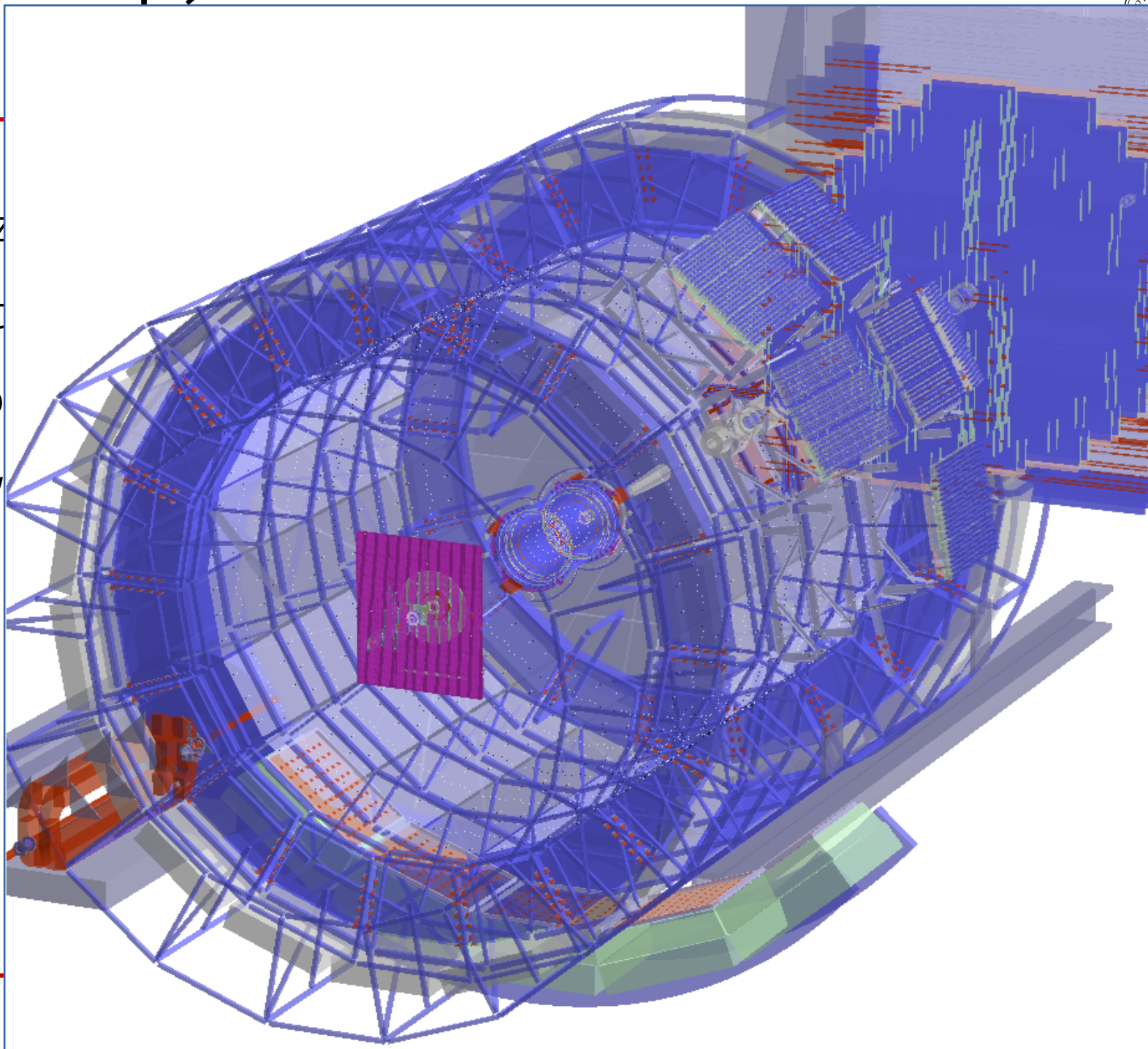


- ▶ Tetszőleges eloszlású véletlen szám: ✓
- ▶ Adott folyamat valószínűsége? ✓
- ▶ Mikor történik kölcsönhatás? ✓
- ▶ Melyik kölcsönhatás történik meg? ✓



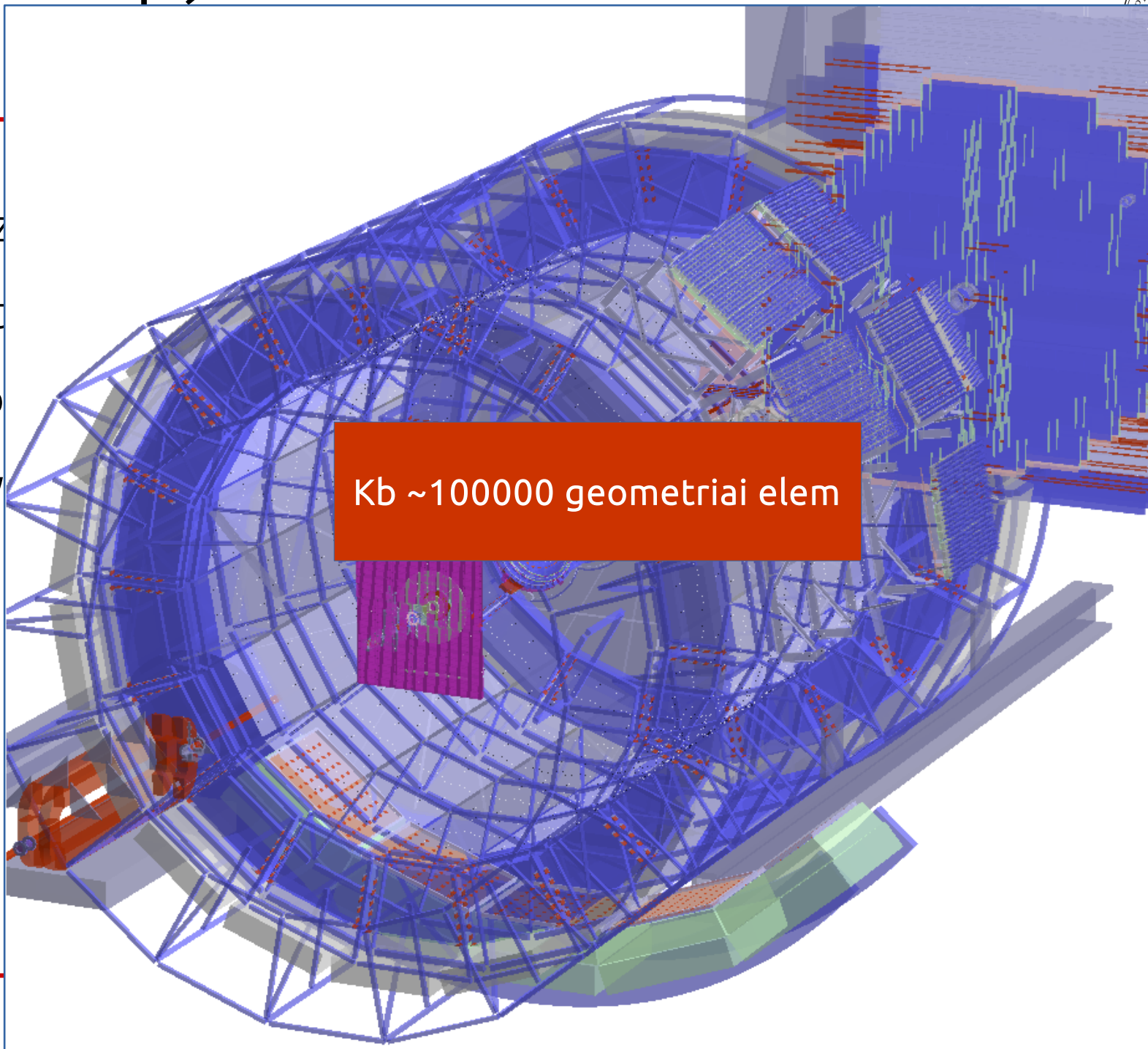
# Bev

- ▶ Tetsz
- ▶ Adot
- ▶ Miko
- ▶ Mely



# Bev

- ▶ Tetsz
- ▶ Adot
- ▶ Miko
- ▶ Mely



Kb ~100000 geometriai elem



# Geant4 – Áttekintés

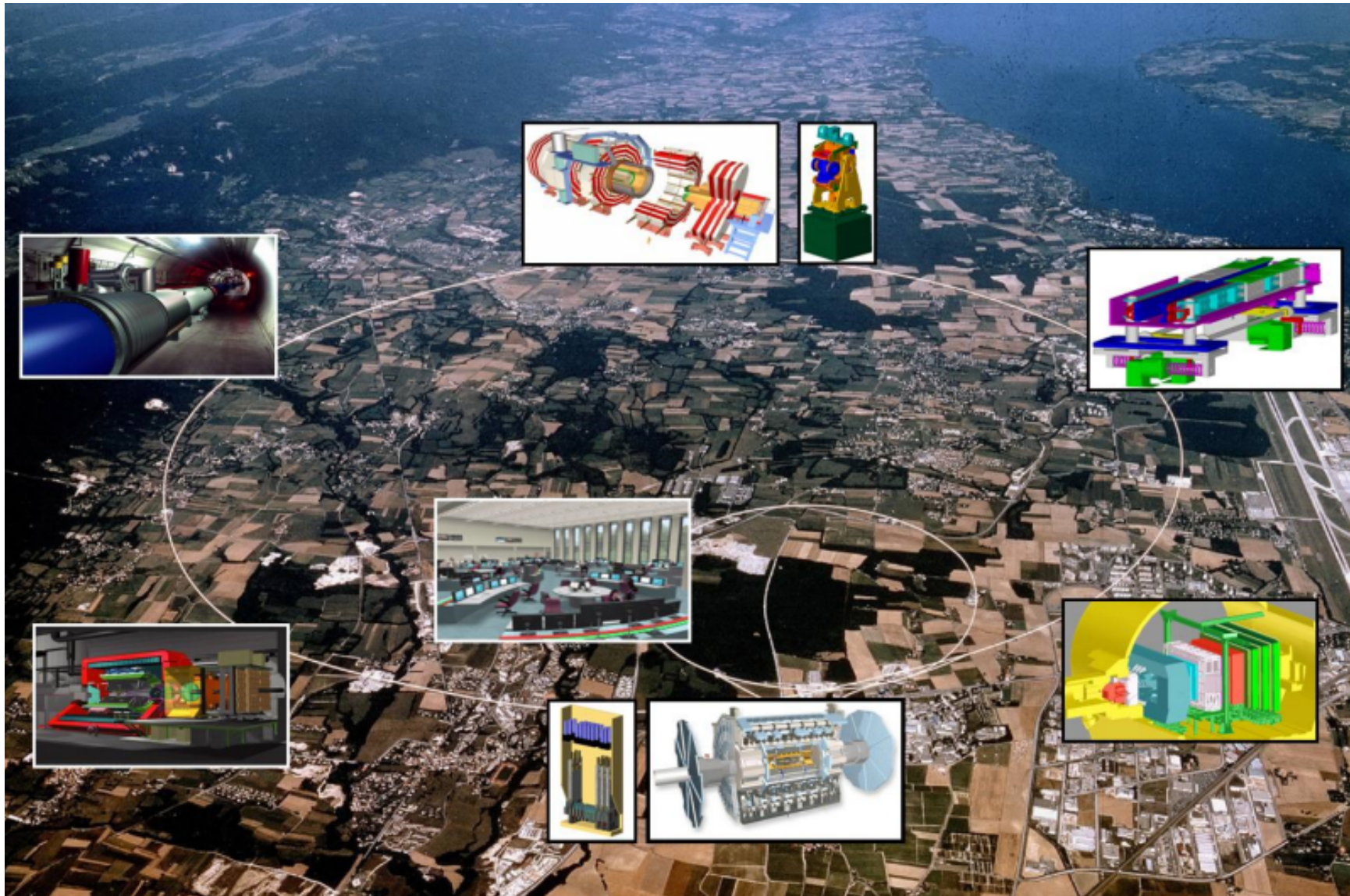
---



- ▶ Általános célú MC **eszköz** részecskék és anyag kölcsönhatásának szimulálására
- ▶ Nagyenergiás részecskefizika, magfizika, orvosi fizika, űrfizika, anyagtudományok...
- ▶ Három fő rész: geometria, fizika, kernel
- ▶ Keretrendszer: az alkalmazást a felhasználónak kell megépítenie



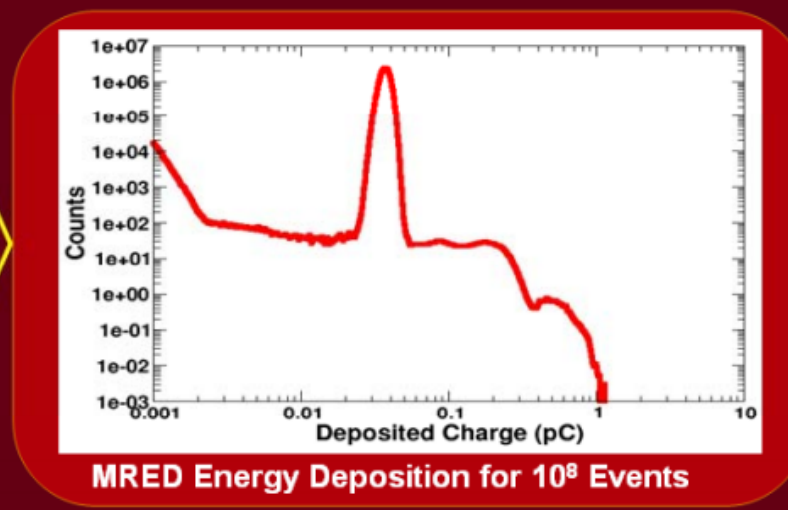
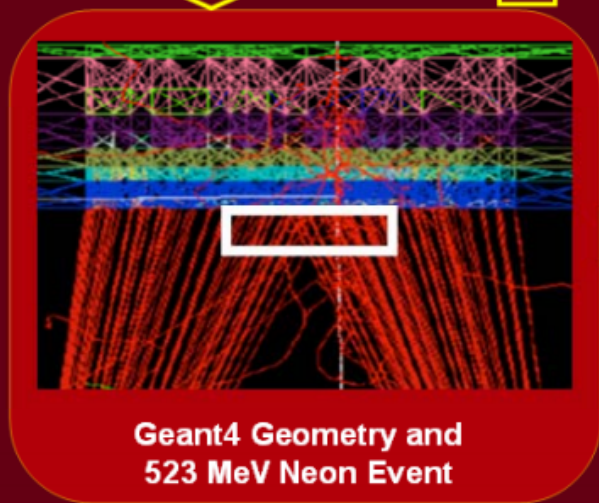
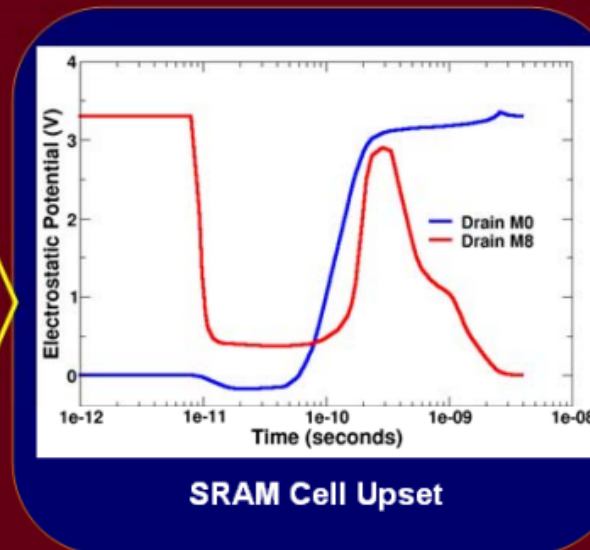
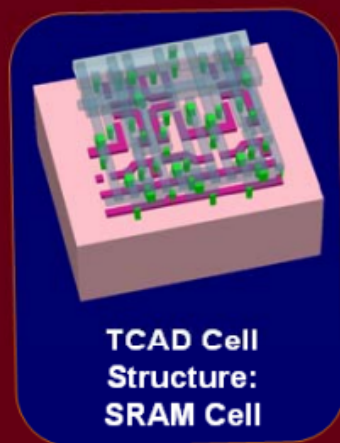
# Geant4 – Áttekintés



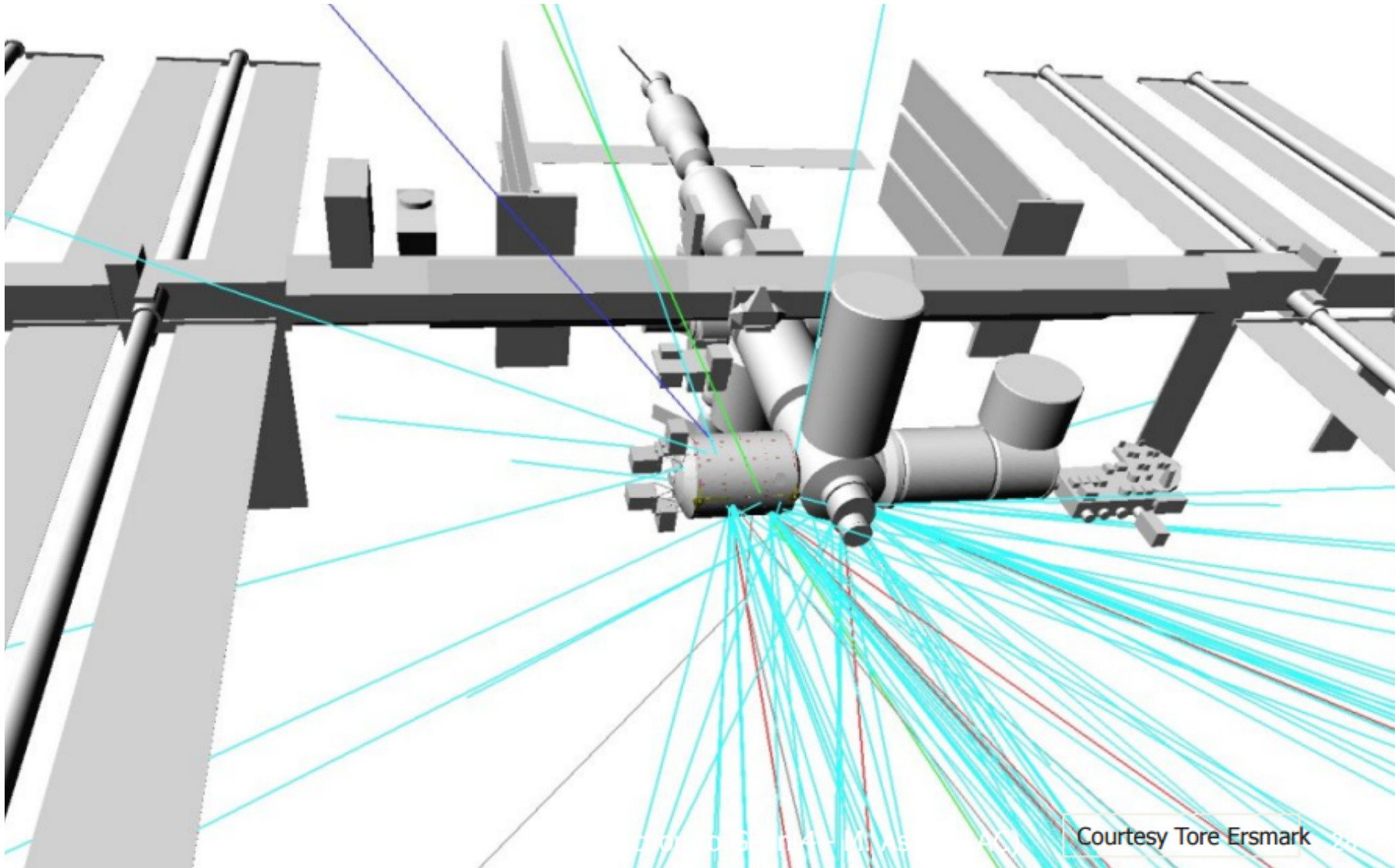
# Geant4 – Áttekintés



## RADSAFE on SEE in SRAMs



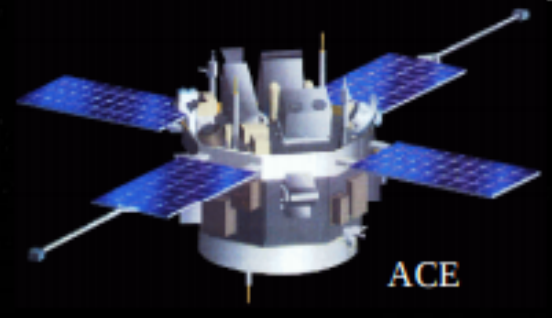
# Geant4 – Áttekintés



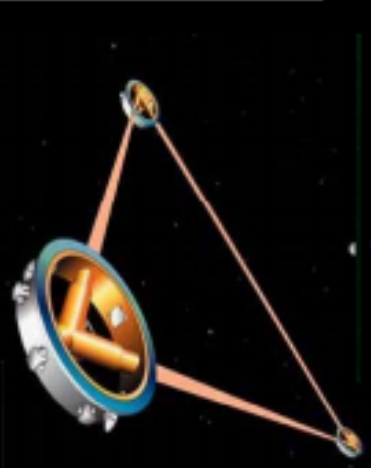
Courtesy Tore Ersmark



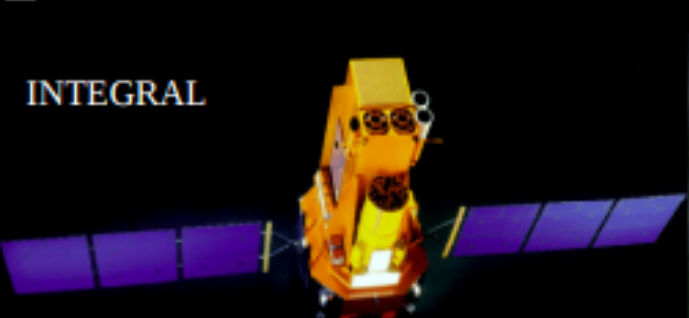
Smart-2



ACE



LISA



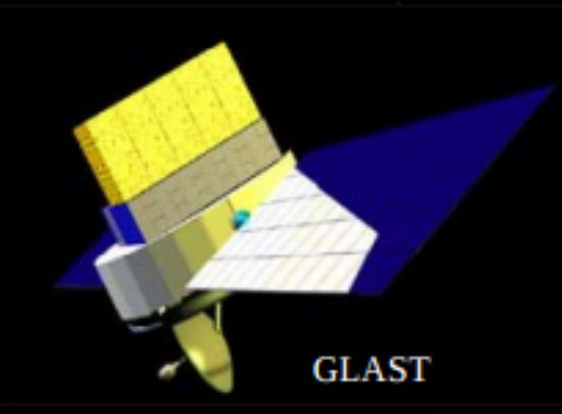
INTEGRAL



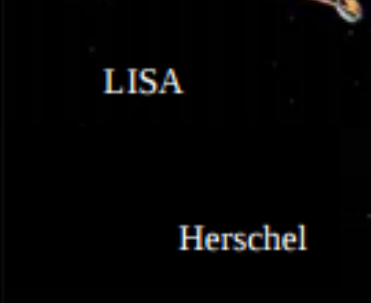
Cassini



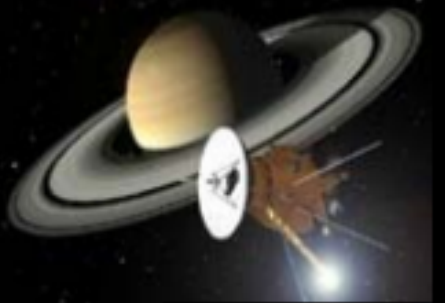
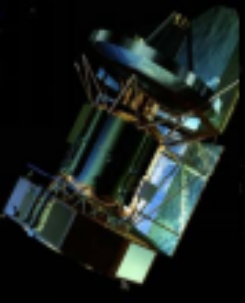
Bepi Colombo



GLAST



Herschel



SWIFT



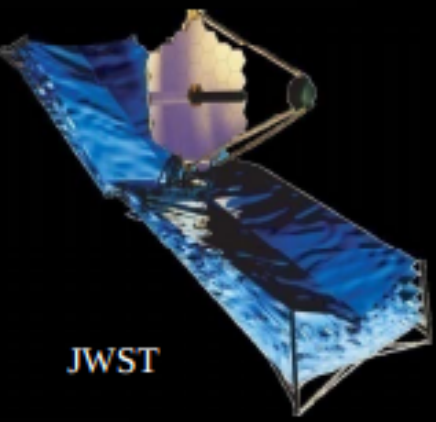
Astro-E2



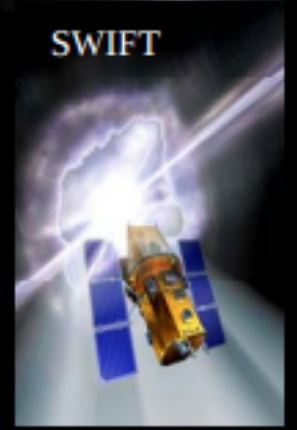
XMM-Newton



GAIA



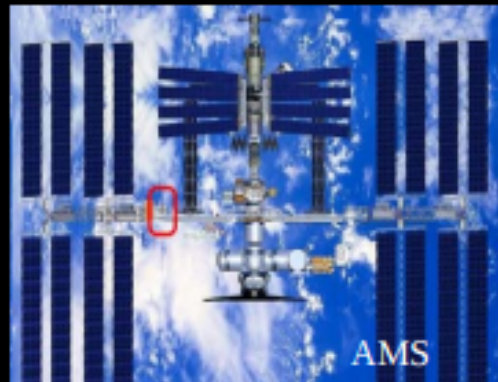
JWST



ISS Columbus



EUSO



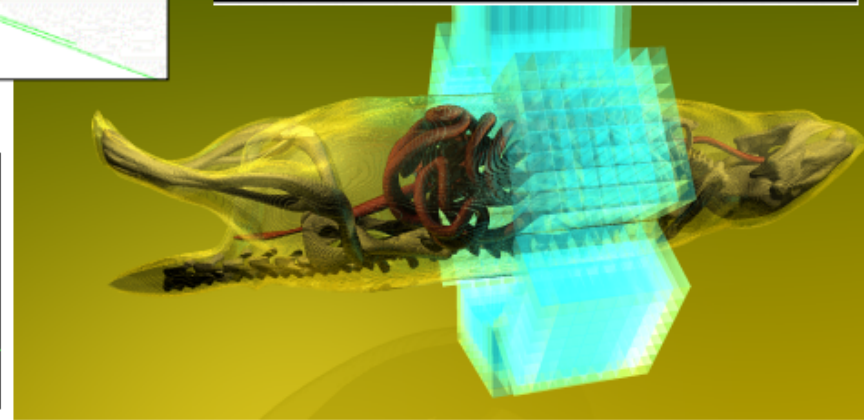
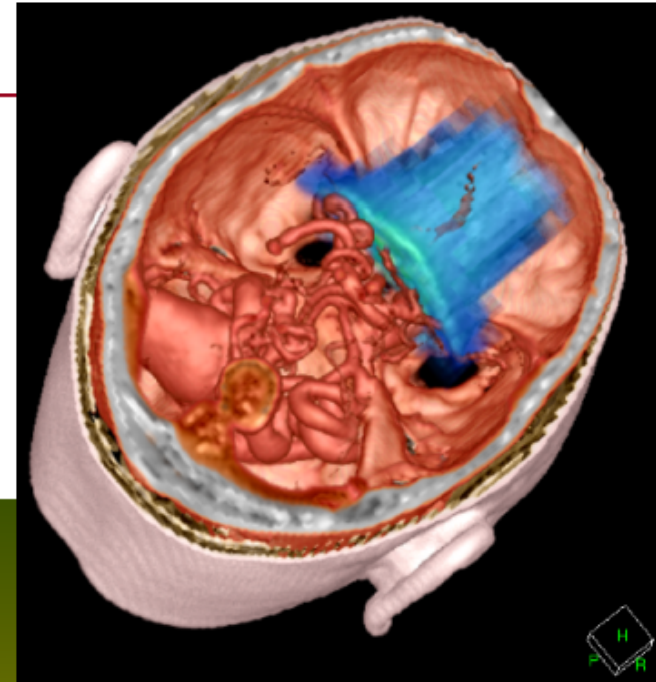
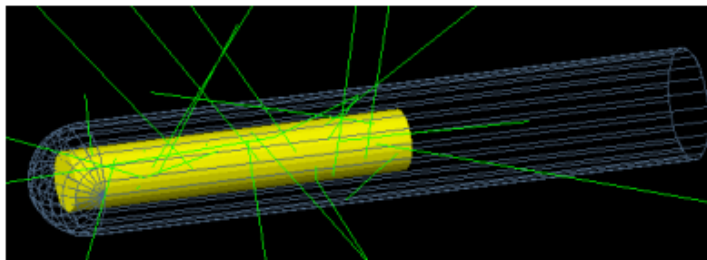
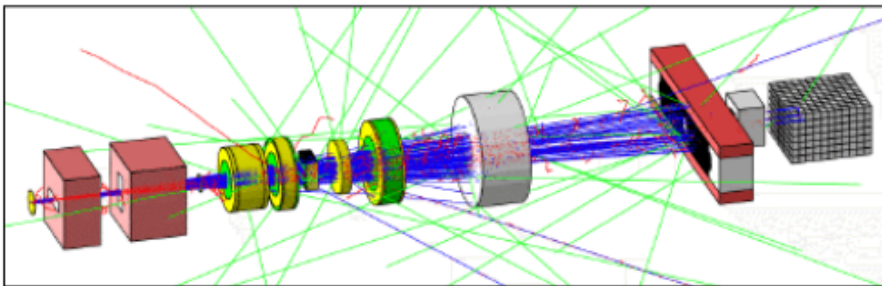
AMS



MAXI

## Geant4 @ Medical Science

- Four major use cases
  - Beam therapy
  - Brachytherapy
  - Imaging
  - Irradiation study



# Geant4 – Áttekintés



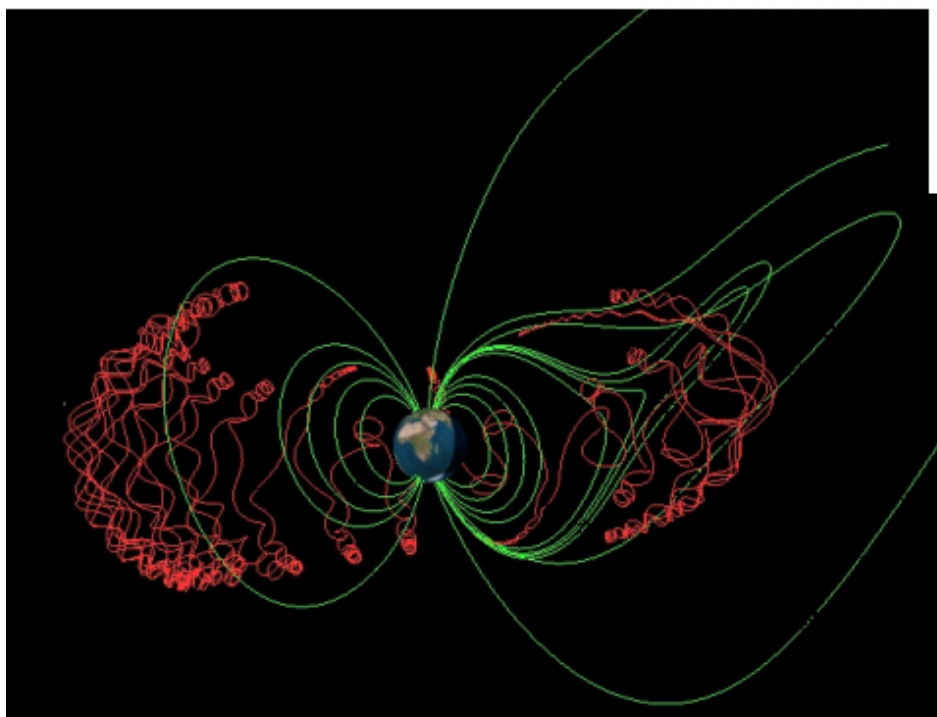
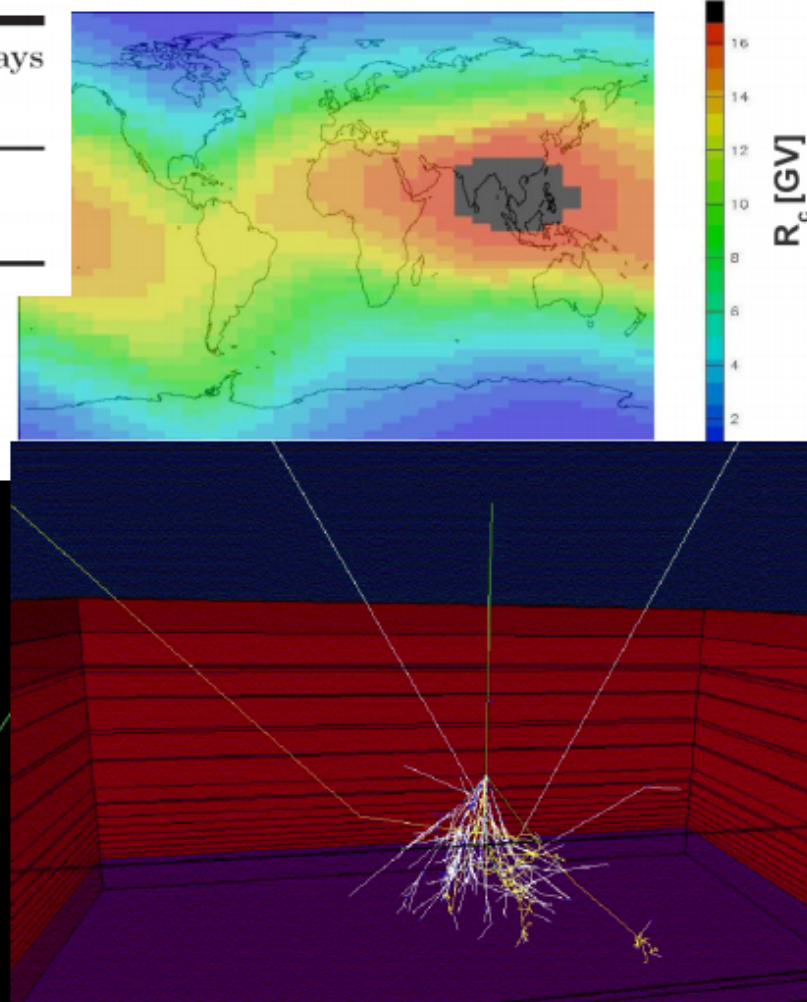
28th International Cosmic Ray Conference

— 4277

## Geant4 Simulation of the Propagation of Cosmic Rays through the Earth's Atmosphere

L. Desorgher, E. O. Flückiger, M. R. Moser, and R. Bütikofer  
*Physikalisches Institut, University of Bern, CH-3012 Bern, Switzerland*

### Cutoff Rigidities vs position



Ld. még: [http://regard.kfki.hu/index\\_en.php?page=publications&sub=conferences](http://regard.kfki.hu/index_en.php?page=publications&sub=conferences)

# Geant4 – Áttekintés

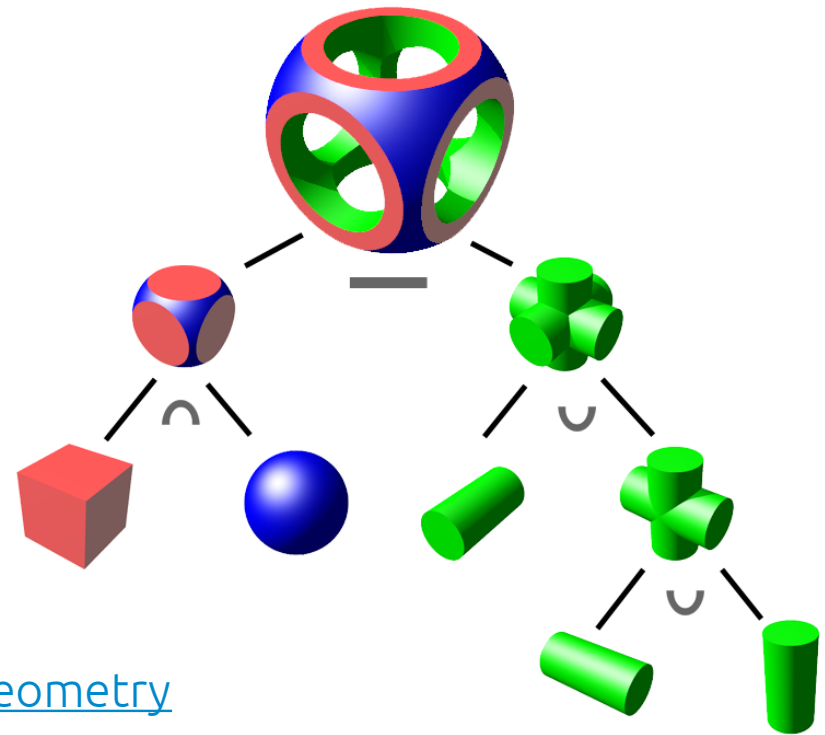
---



- ▶ GEometry ANd Transport
- ▶ Készítői: fizikusok világszerte
  - ▶ Geant1: 1974 (GEneration ANd Transport)
  - ▶ Geant3: 1982, René Brun, Andy McPherson
  - ▶ Alapja: OPAL szimulációs program, FORTRAN
- ▶ Geant4: 1994-1998, C++
- ▶ GeantV: 20??

# Geant4 – Geometria

- ▶ Constructed Solid Geometry (CSG): 3D-s elemi, könnyen paraméterezhető egységek mint építőkövek
- ▶ Paraméterek: hossz, szög, sugár, anyag típusa...

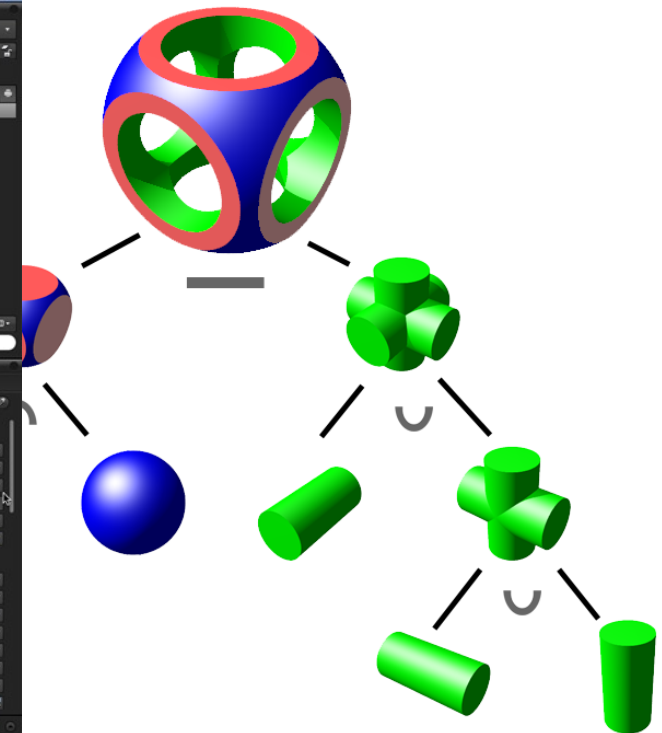
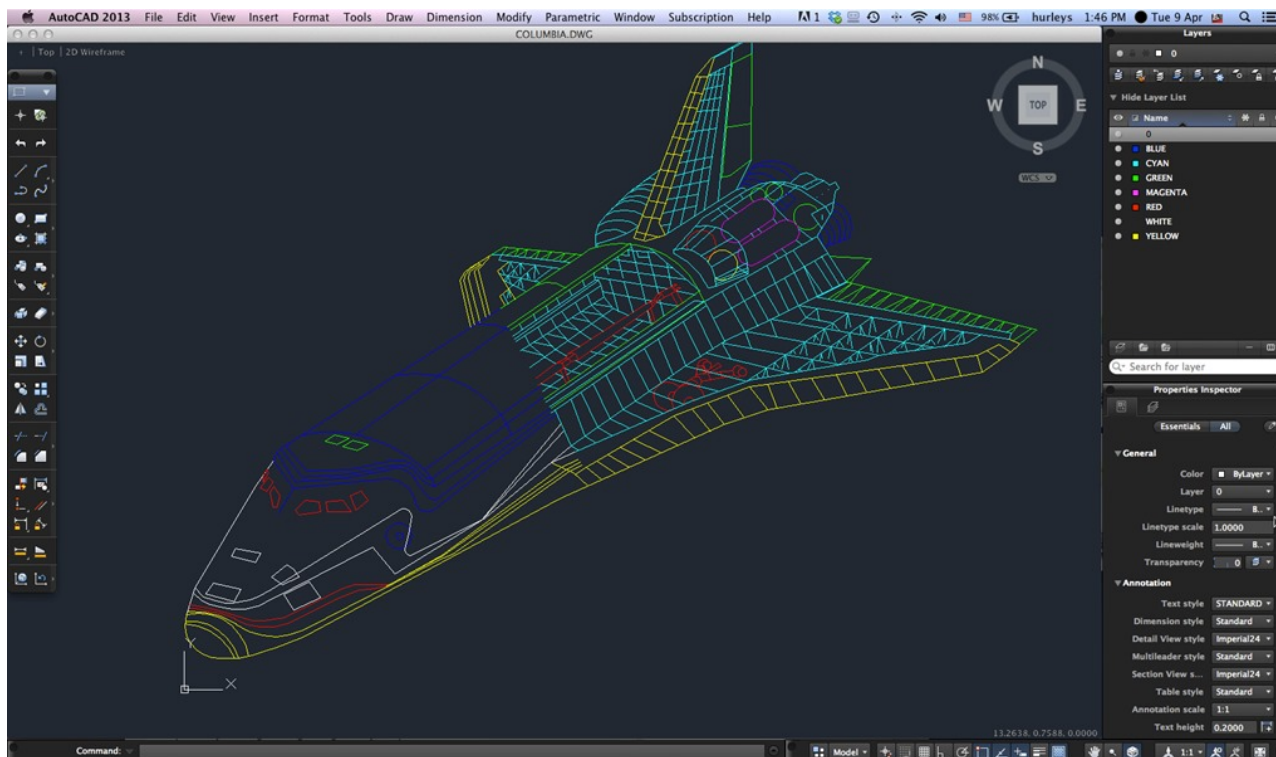


[https://en.wikipedia.org/wiki/Constructive\\_solid\\_geometry](https://en.wikipedia.org/wiki/Constructive_solid_geometry)



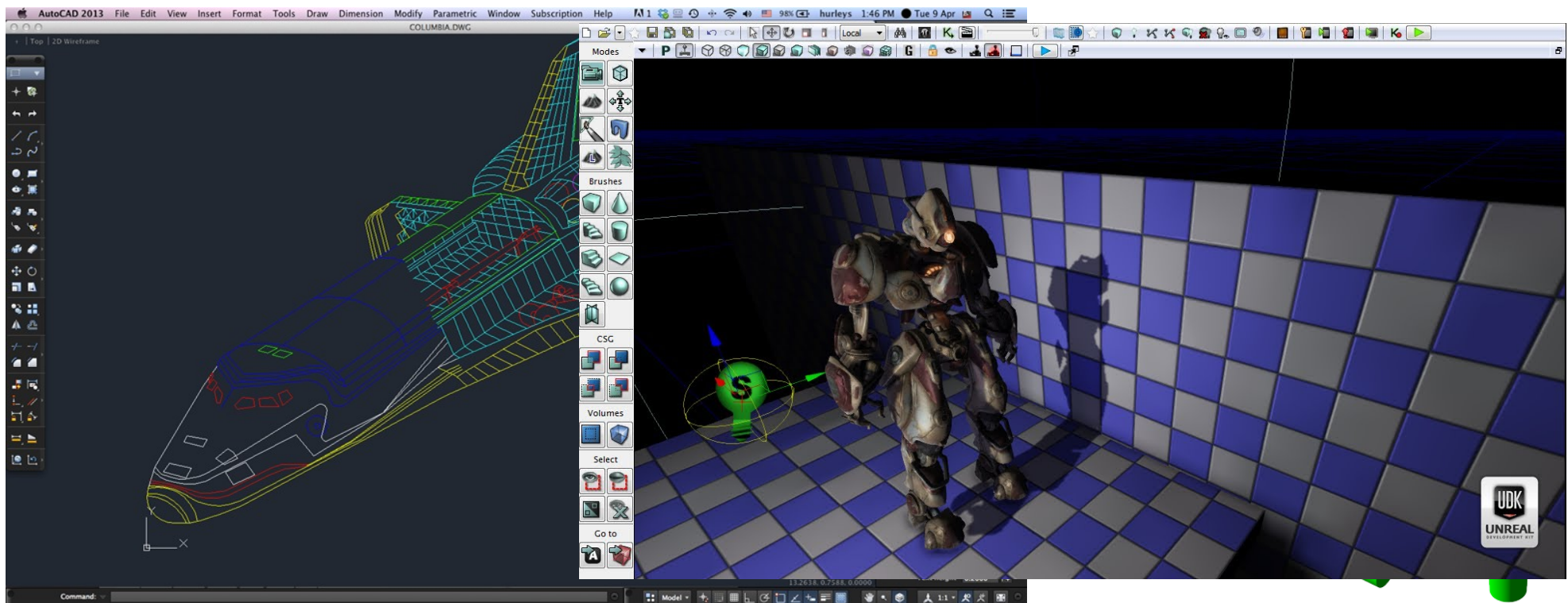
# Geant4 – Geometria

- ▶ Constructed Solid Geometry (CSG): 3D-s elemi, könnyen paraméterezhető egységek mint építőkövek
- ▶ Paraméterek: hossz, szög, sugár, anyag típusa...

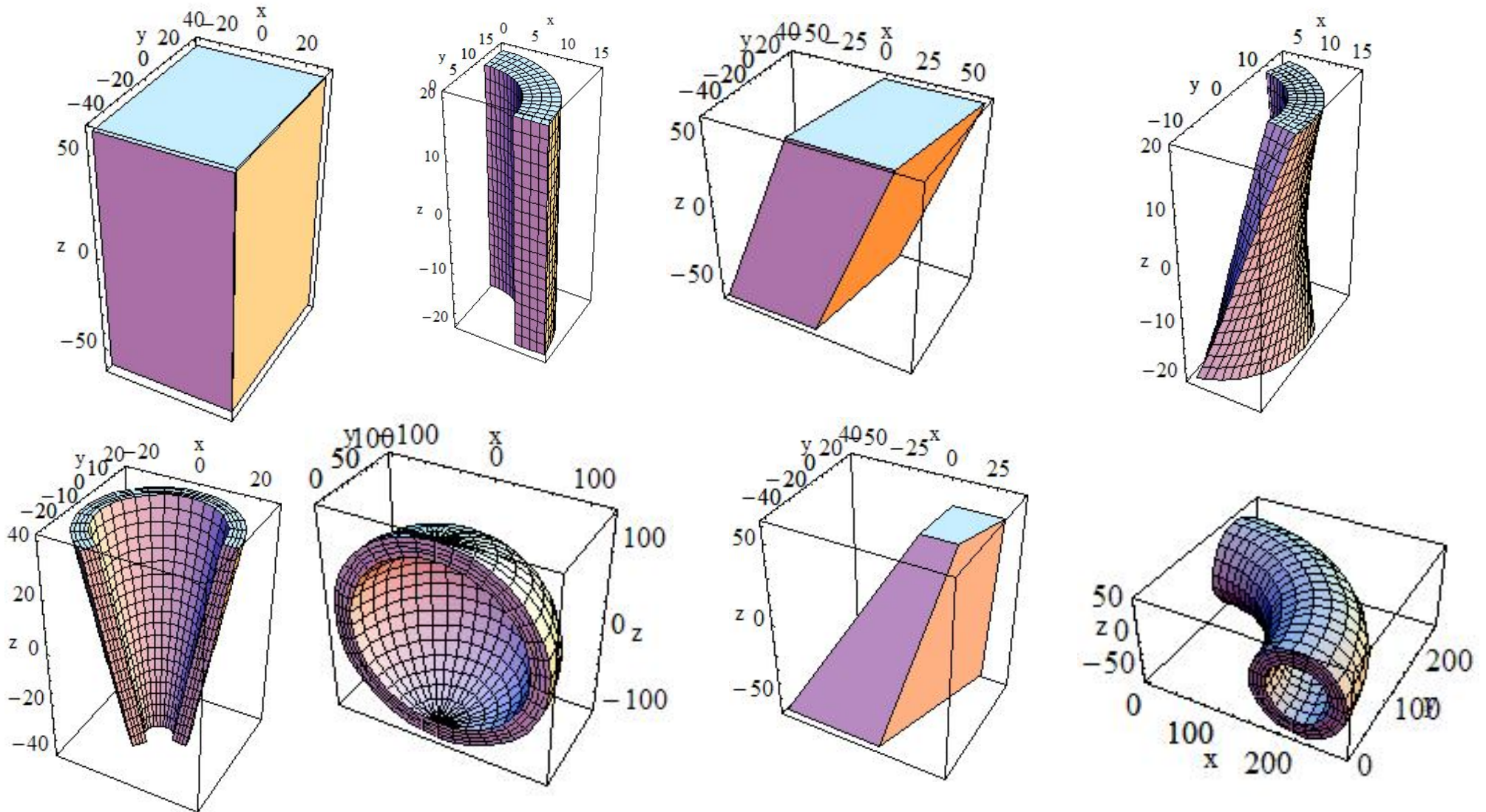


# Geant4 – Geometria

- ▶ Constructed Solid Geometry (CSG): 3D-s elemi, könnyen paraméterezhető egységek mint építőkövek
- ▶ Paraméterek: hossz, szög, sugár, anyag típusa...



# Geant4 – Geometria



# Geant4 – Geometria

- ▶ Hierarchia: az egyes elemek másolhatóak, felhasználhatóak, csoportosíthatóak, származtathatóak egymásból
- ▶ Elemek elhelyezése: több lépcsőn keresztül:

```
G4Box* solidWorld =  
    new G4Box("World", //its name  
             world_sizeXY/2, world_sizeXY/2, world_sizeZ/2); //its size  
  
G4LogicalVolume* logicWorld =  
    new G4LogicalVolume(solidWorld, //its solid  
                       world_mat, //its material  
                       "World"); //its name  
  
G4VPhysicalVolume* physWorld =  
    new G4PVPlacement(0, //no rotation  
                    G4ThreeVector(), //at (0,0,0)  
                    logicWorld, //its logical volume  
                    "World", //its name  
                    0, //its mother volume  
                    false, //no boolean operation  
                    0, //copy number  
                    true); //overlaps checking
```

# Geant4 – Geometria

---

- ▶ A DetectorConstruction osztály:

```
class anti01DetectorConstruction : public G4UserDetectorConstruction
{
    public:
        anti01DetectorConstruction();
        virtual ~anti01DetectorConstruction();

        virtual G4VPhysicalVolume* Construct();
};
```

- ▶ A tényleges implementációt a Construct() tartalmazza
- ▶ A main() függvényben:

```
G4RunManager* runManager = new G4RunManager;
```

```
anti01DetectorConstruction* detConstruction = new
anti01DetectorConstruction();
runManager->SetUserInitialization(detConstruction);
```

# Geant4 – Fizika

---

- ▶ Számos modell különböző energiatartományokra és részecske típusokra [http://geant4.cern.ch/support/proc\\_mod\\_catalog/physics\\_lists/useCases.shtml](http://geant4.cern.ch/support/proc_mod_catalog/physics_lists/useCases.shtml)
- ▶ EM, hadronikus, foton/lepton-hadronikus, optikai, bomlási, zápor folyamatok
- ▶ Alternatív fizikai modellek
  - ▶ Lehetőség bővítésre
- ▶ A `main()` függvényben:

```
G4VModularPhysicsList* physicsList = new FTFP_BERT;  
runManager->SetUserInitialization(physicsList);
```

- ▶ Bonyolultabb esetben:  
A PhysicsList osztály:

```
class anti01PhysicsList : public G4VUserPhysicsList
{
    public:
        anti01PhysicsList();
        ~anti01PhysicsList();

    protected:
        void ConstructParticle();
        void ConstructProcess();
        void SetCuts();

    protected:
        void ConstructBosons();
        void ConstructLeptons();
        void ConstructMesons();
        void ConstructBaryons();

    protected:
        void ConstructGeneral();
        void ConstructEM();
        void ConstructOp();
};
```

- ▶ Ami szükséges még egy működő szimulációhoz:
  - ▶ `PrimaryGeneratorAction`, `ActionInitialization`
  - ▶ Leírják, hogyan is történjen a szimuláció
- ▶ *event*: egy *primary* részecske életének végigkövetése
- ▶ *run*: az eventek összessége
- ▶ *track*: egy részecske pillanatképe
- ▶ *process*: a részecske lehetséges kölcsönhatása. Típusai:
  - ▶ *atRest*: álló részecskével történő folyamatok, pl. bomlás
  - ▶ *alongStep*: mozgás során történő folyamatok, pl. ionizáció
  - ▶ *postStep*: a mozgás után történő folyamatok, pl. rugalmas szórás
- ▶ *step*: a track (trajektória) egy pontja egy adott pillanatban → a track-et a lépések frissítik



Egy (kis) lépés története:

- 1) Ha a részecske megáll, minden aktív *atRest* folyamat lépéshosszát kiszámoljuk; a legkisebbet végrehajtjuk.
- 2) Ugyanez az aktív *postStep* és *alongStep* folyamatokra, a legkisebb lépéshosszt vesszük.
- 3) „Safety” számolása: a legközelebbi szomszédos geometriai elemtől való távolság számolása. Ha ez nagyobb, mint a legkisebb fizikai lépéshossz, akkor több geometriai számolás már nem lesz, a fizikai lépéshosszt választjuk.
- 4) Ellenkező esetben a távolságot a következő határfelületig pontosítjuk és újravizsgáljuk.



Egy (kis) lépés története (folytatás):

- 5) Az aktív *alongStep* folyamatokat meghívjuk. Miután lezajlottak, a részecske kinetikus energiáját frissítjük a folyamatok járulékainak összegével.
- 6) A részecske pályáját (kinetikus energia, hely, idő) frissítjük és a keletkező másodlagos részecskéket eltároljuk.
- 7) Ha a részecske nem "semmisült meg" és az új kinetikus energia 0-ra csökken, a következő lépésben *atRest* folyamat hívódik meg.
- 8) *postStep* folyamatok meghívása. Miután lezajlottak, újra frissítjük a részecske energiáját, helyét és idejét, majd eltároljuk a másodlagos részecskéket.



Egy (kis) lépés története (folytatás):

- 9) Ellenőrizzük, hogy az előző lépés után is megvan-e még a részecske. Ha igen, frissítjük a „Safety”-t.
- 10) Ha a következő geometriai elem elég közel van, a részecskét átrakjuk.
- 11) Lehetőség közbeavatkozásra: `G4UserSteppingAction` meghívása.
- 12) Elmenjtük a részecske adatait.
- 13) Frissítjük a *postStep* folyamatok átlagos szabad úthosszait.
- 14) Vége egy lépésnek.



# Geant4 – Programszerkezet

---

- ▶ `main()`:
  - ▶ Mi hozzuk létre, a *manager* osztályokon keresztül irányítjuk a program lefutását
- ▶ Inicializálás:
  - ▶ `G4RunManager::SetUserInitialization()`
  - ▶ `G4VUserDetectorConstruction`
  - ▶ `G4VUserPhysicsList`
  - ▶ `G4VUserPrimaryGeneratorAction`
  
  - ▶ `G4UserRunAction`
  - ▶ `G4UserEventAction`
  - ▶ ...



- ▶ A minket érdeklő információ kinyerése:
  - ▶ Egy run alatt sem a geometria, sem a fizika nem módosítható
  - ▶ A geometria, fizika és az elsődleges részecskék generálásának ismeretében a Geant4 szép csendben elvégzi a szimulációt
  - ▶ Az értékes adat kinyeréséhez még egy kis extra munka kell
    - a) `G4UserTrackingAction`, `G4UserSteppingAction`: az adatok elmentése lépésről lépésre
    - b) `G4VSensitiveDetector`: érzékeny detektorrészek definiálása, ahol a beütéseket össze tudjuk gyűjteni

# Geant4 – Összefoglalás

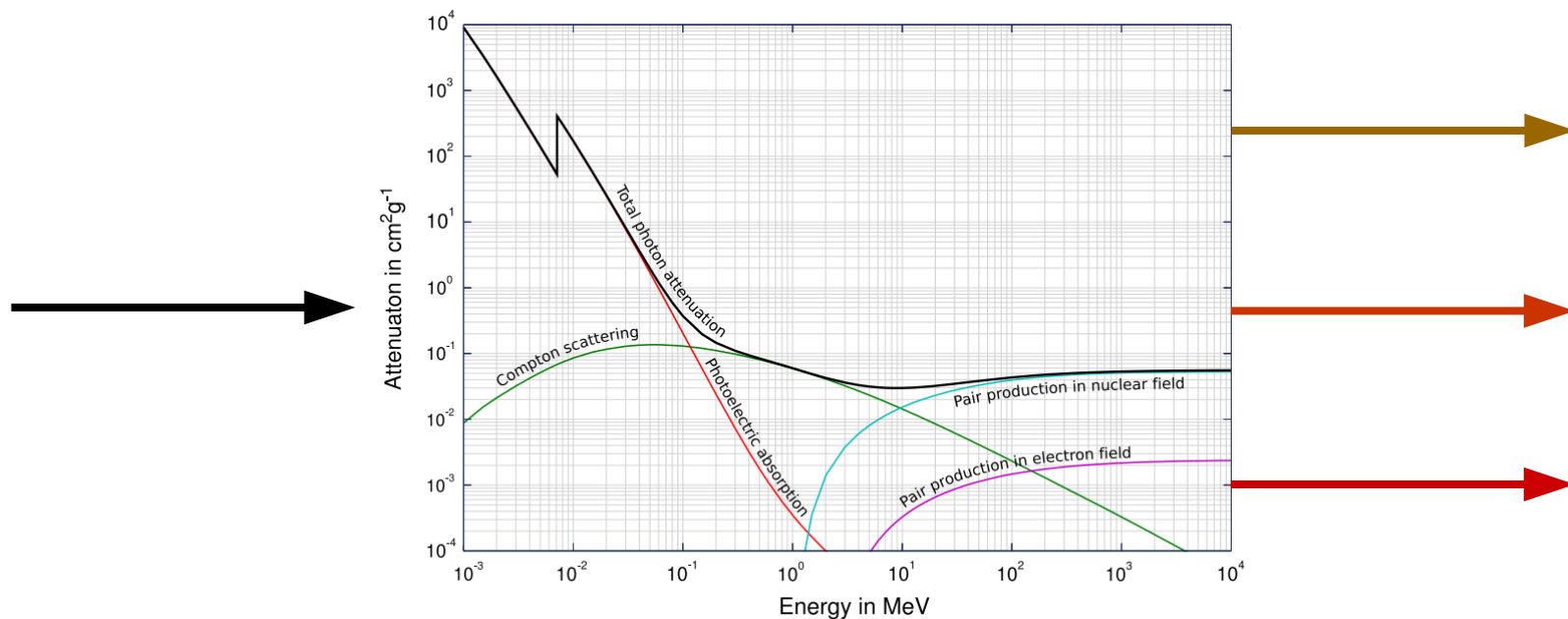


- ▶ A Geant4 egy keretrendszer
- ▶ Egy szimulációhoz szükséges:
  - ▶ A geometriai elrendezés definiálása (detektor megépítése az elemi építőkövekből, az anyagtípusok és az elektromágneses tér meghatározásával)
  - ▶ A fizika definiálása (részecskék, kölcsönhatástípusok, folyamatok, modellek, keltési küszöbértékek meghatározása)
  - ▶ Egy esemény (event) indításának definiálása (milyen típusú kezdeti részecskék legyenek, mekkora energiával és kezdeti iránnyal)
  - ▶ Kívánt információ kinyerése
- ▶ Egyéb extrák:
  - ▶ Vizualizáció, UI, saját parancsok...

# 3, 4... V?

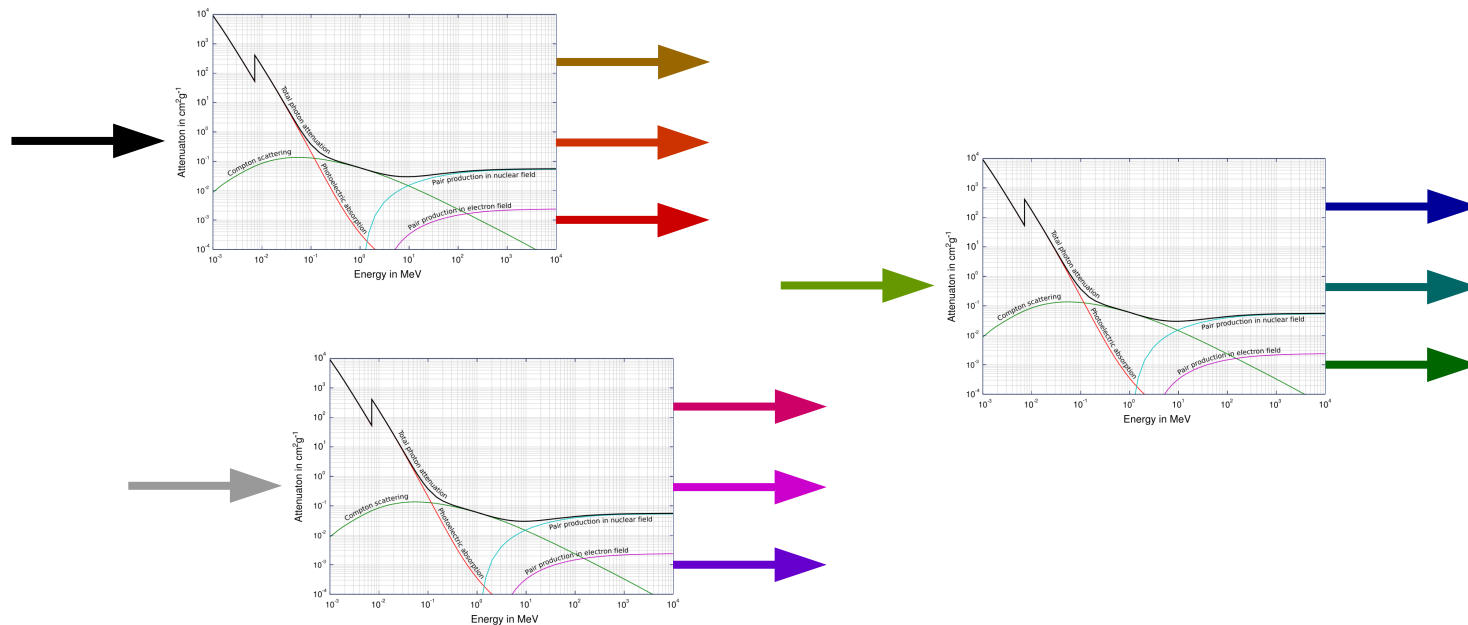


- ▶ Probléma: számítási idő
  - ▶ Egy részecskével sok dolog történhet
  - ▶ Számítási idő ~ Szimulációs lépések száma ~ 1/lépéshossz



# 3, 4... V?

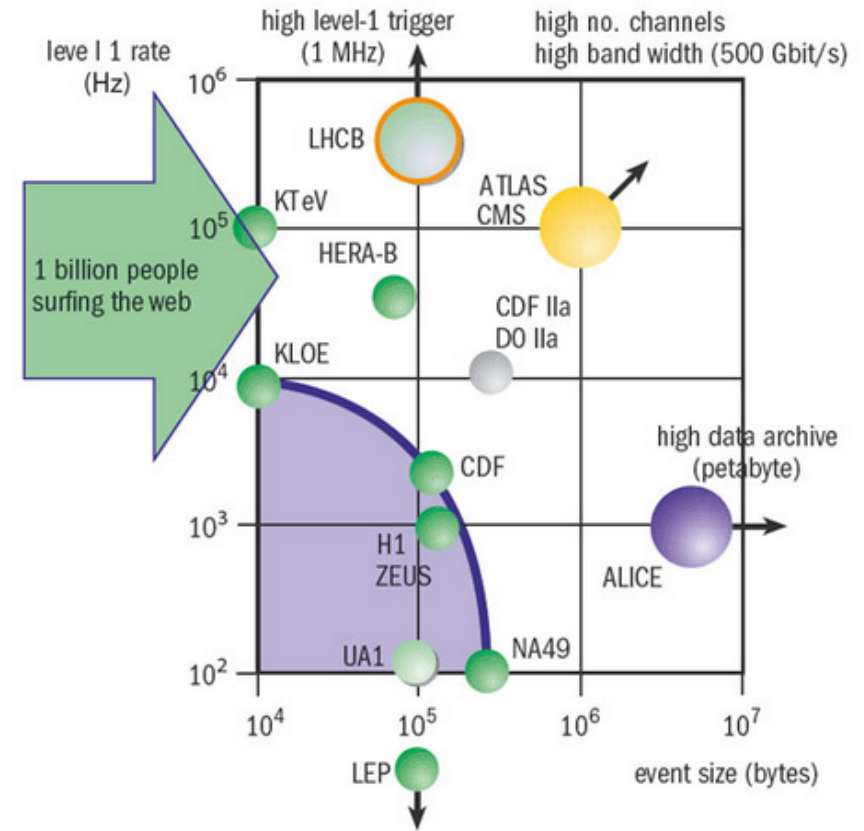
- ▶ Probléma: számítási idő
  - ▶ Egy részecskével sok dolog történhet
  - ▶ Számítási idő ~ Szimulációs lépések száma ~ 1/lépéshossz





# 3, 4... V?

- ▶ Ideális esetben: szimulált adat mennyisége  $\approx$  valós adat mennyisége
- ▶ Ütközések az LHC-ben:  $\mathcal{O}(10^8)/s$
- ▶ A szükséges számítási idő 1 db részecskéhez az ALICE-ban:  $\mathcal{O}(ms)$
- ▶ Az ALICE egyetlen másodpercének szimulációja:  $\mathcal{O}(\text{napok})$



# 3, 4... V?

---



Sok időre van szükségünk...



# 3, 4... V?

Sok időre van szükségünk...

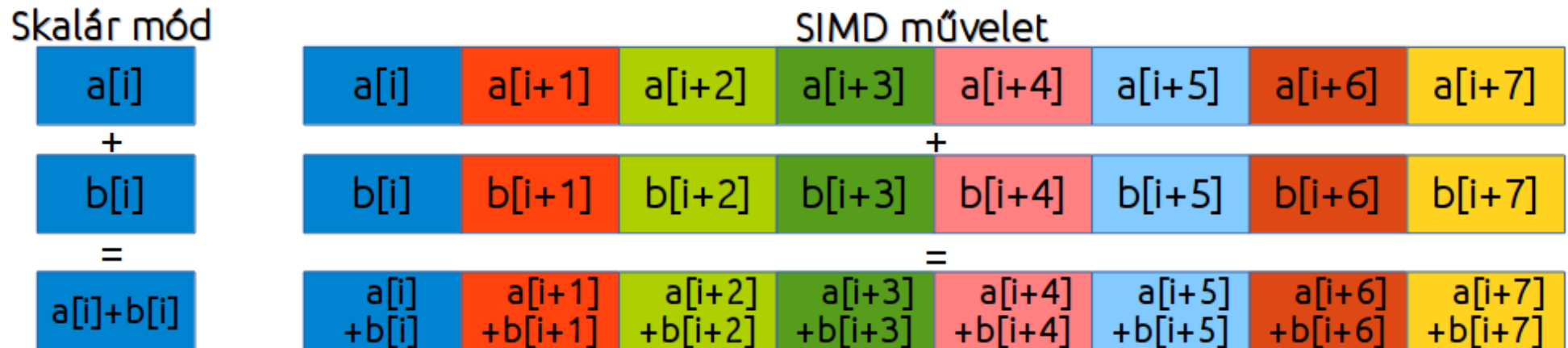


...vagy sok számítógépre...

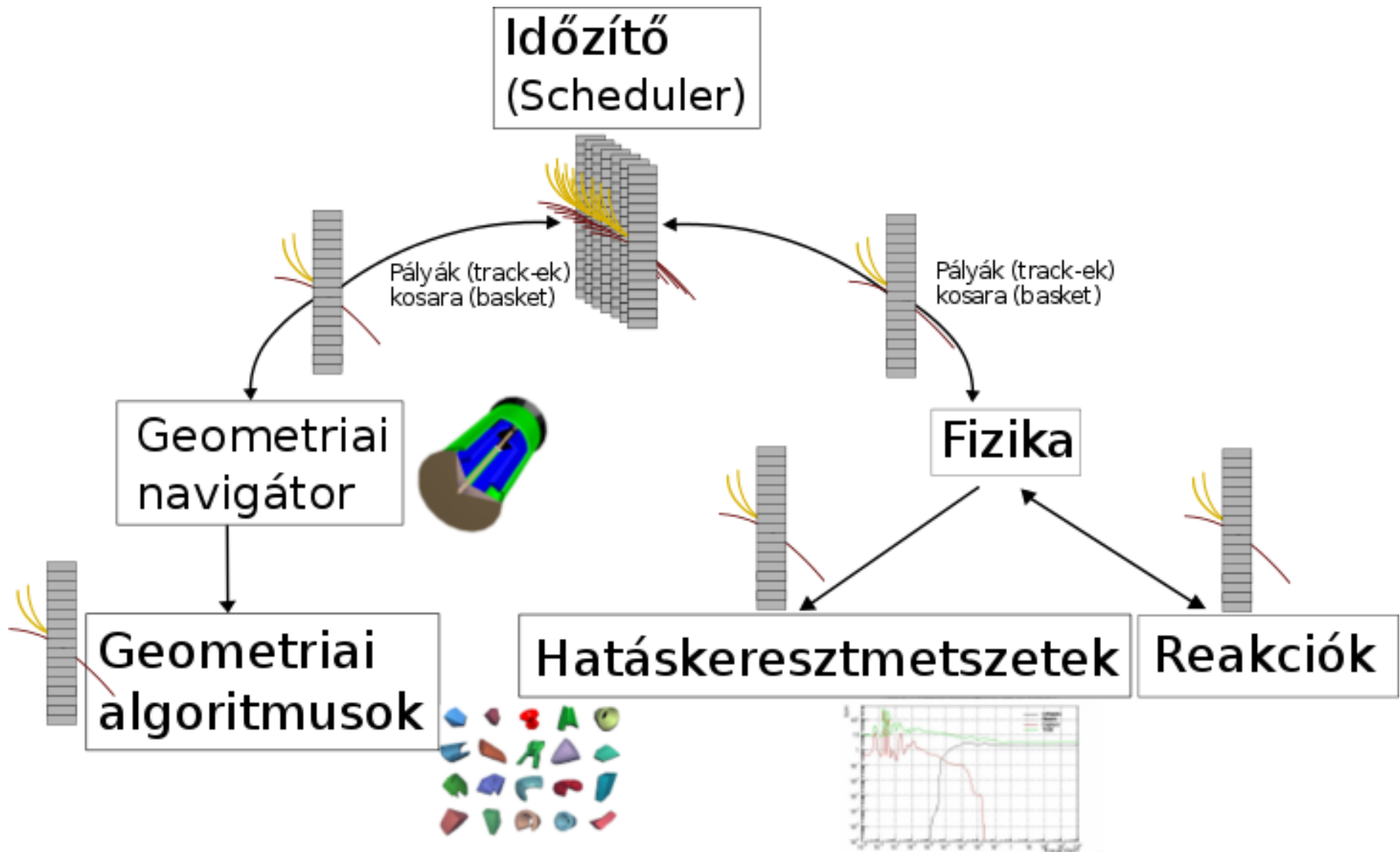
# 3, 4... V?

...vagy parallelizáljunk! (a Geant4 10.0 verziója óta esemény szintű párhuzamosítás lehetséges)

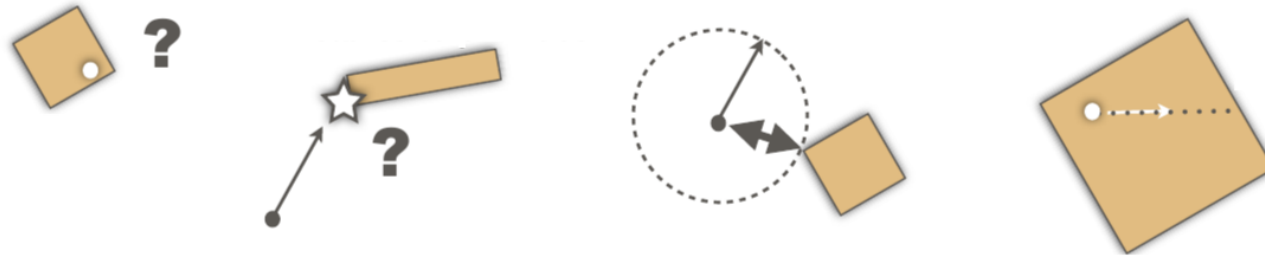
- ▶ SIMD: Single Instruction Multiple Data
- ▶ GeantV: Geant Vector Prototype



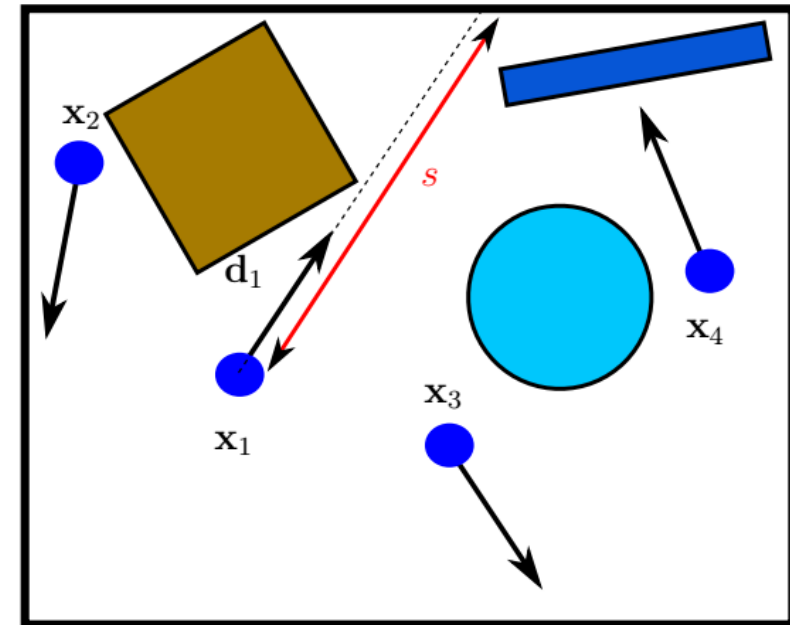
# 3, 4... V?



# 3, 4... V?



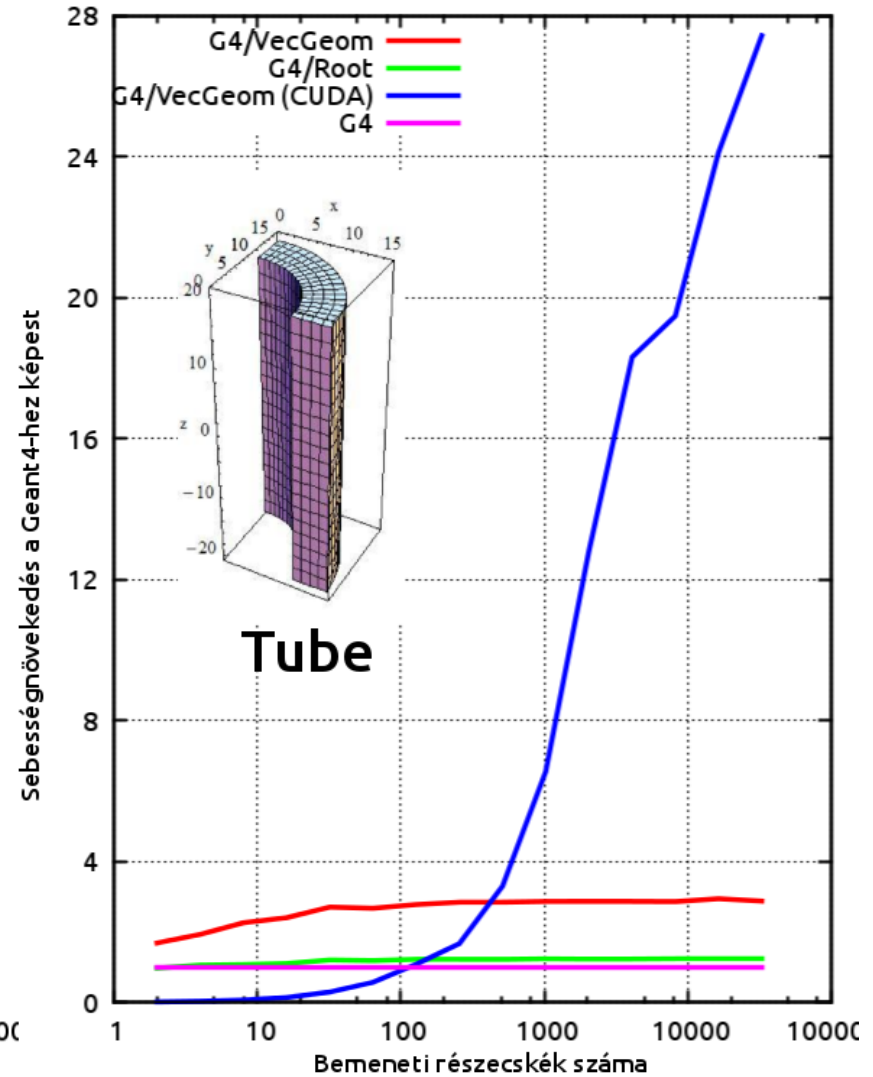
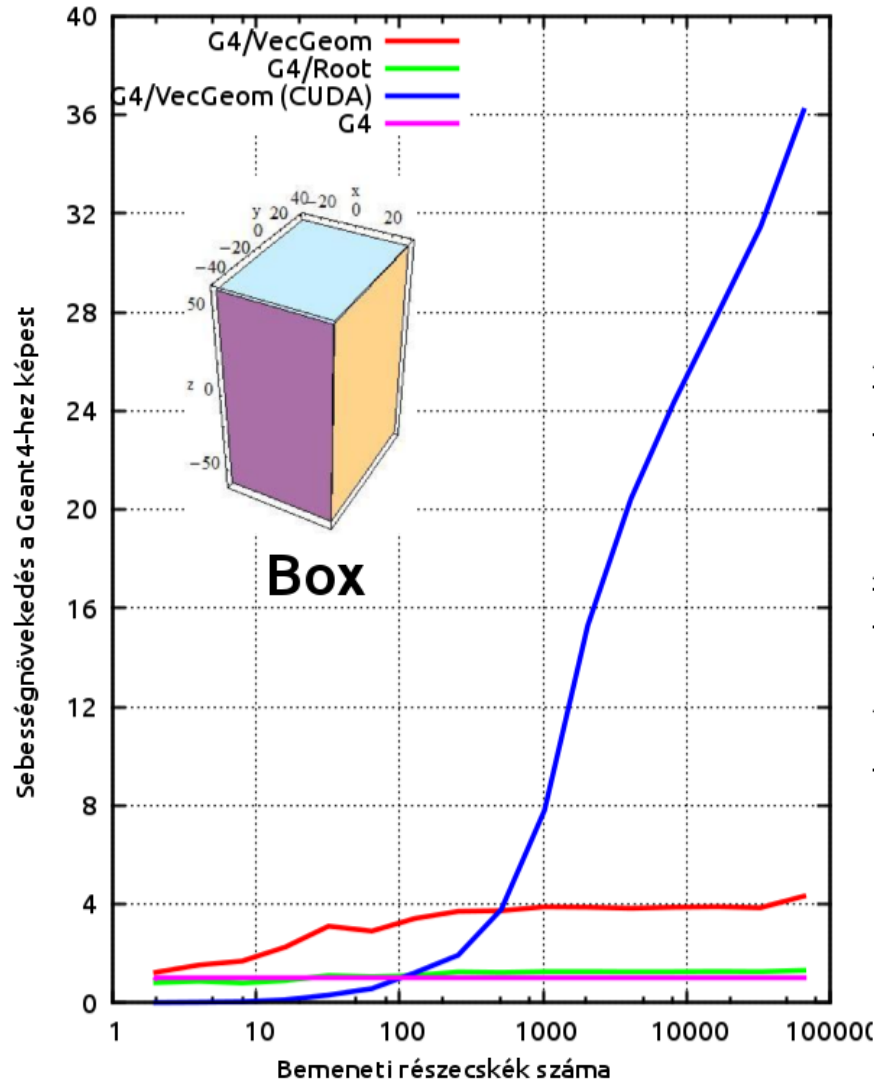
- ▶ VecGeom: Vectorized Geometry
- ▶ Nagyfokú hordozhatóság: modern CPU-k, visszamenőleges kompatibilitás és GPU támogatás ugyanabban a kódban
- ▶ Jelenleg: NVidia kártyák támogatása (CUDA)
  - ▶ OpenCL: folyamatban



# 3, 4... V?



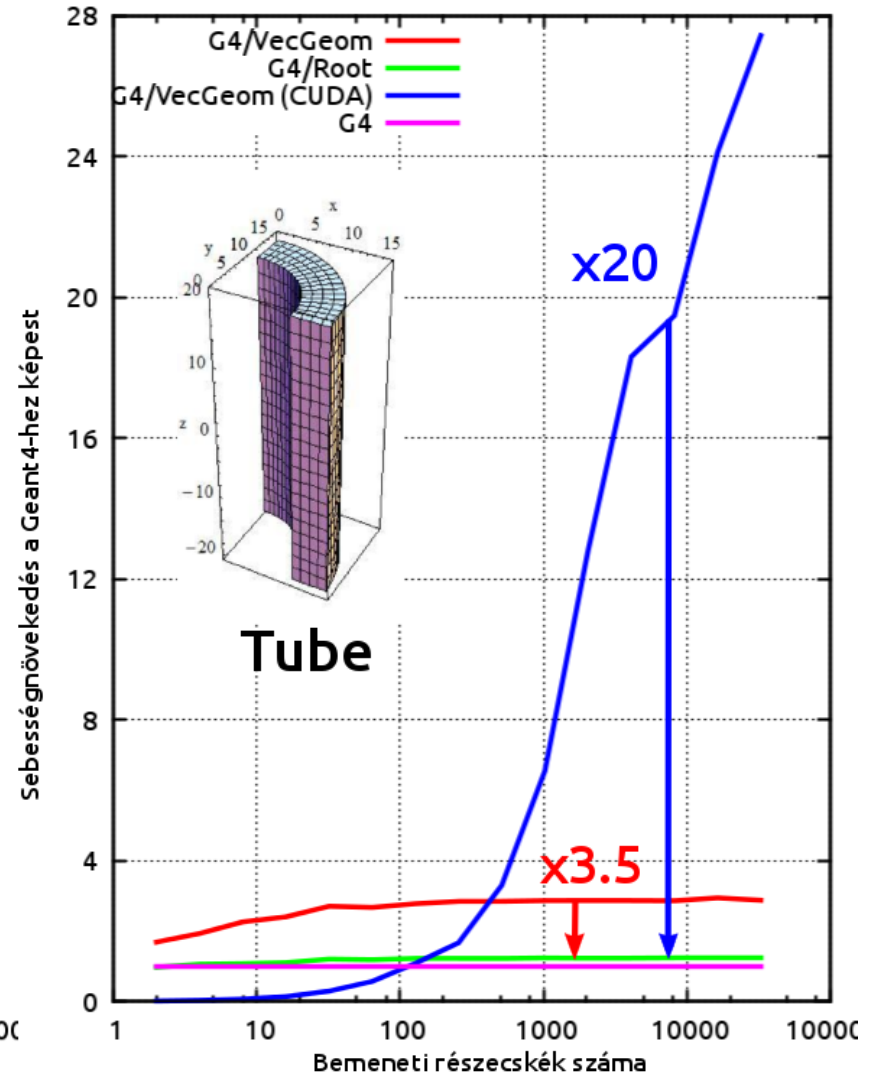
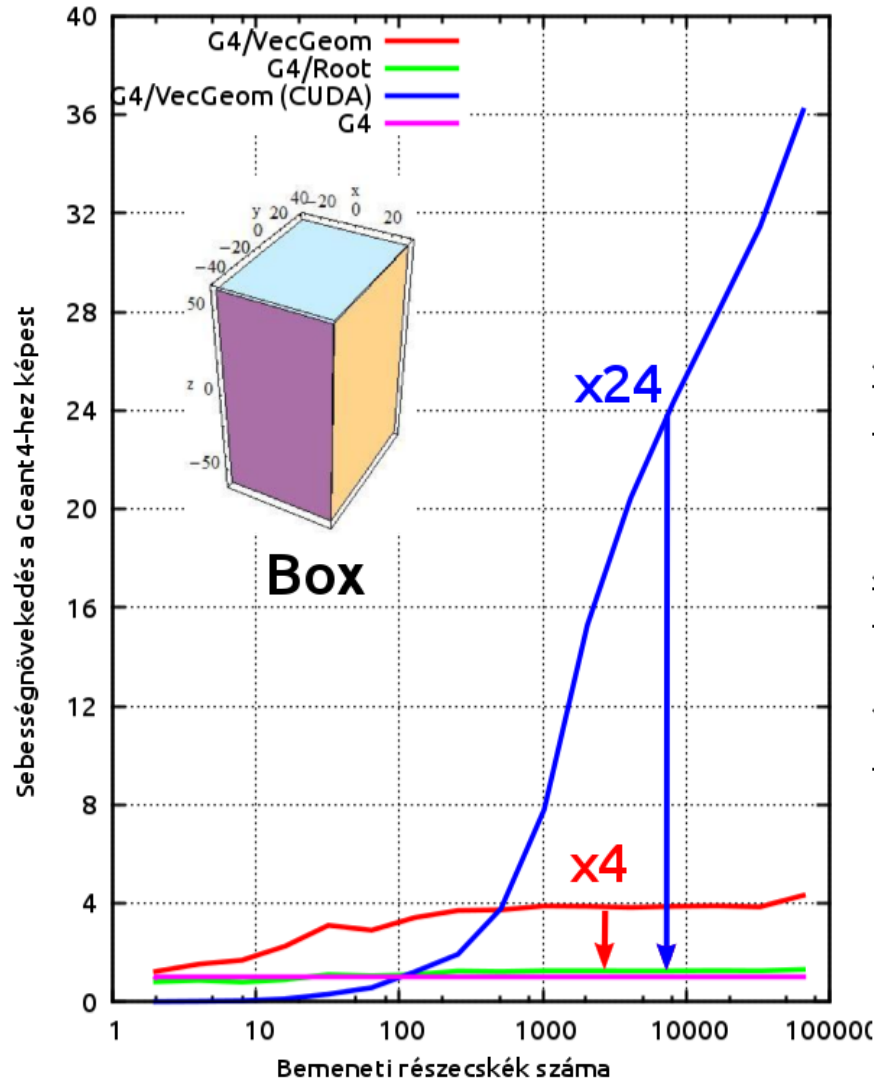
Távolság a határig, 5000 ismétlés, Intel® Core™ i7-920 Processor + NVidia Tesla C2050



# 3, 4... V?



Távolság a határig, 5000 ismétlés, Intel® Core™ i7-920 Processor + NVidia Tesla C2050





# Linkek

---



<http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/download.shtml>

<http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/fo/BookForAppliDev.pdf>

<http://geant4.cern.ch/support/training.shtml>

<http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/Detector/geomSolids.html>

[http://geant4.cern.ch/support/proc\\_mod\\_catalog/physics\\_lists/useCases.shtml](http://geant4.cern.ch/support/proc_mod_catalog/physics_lists/useCases.shtml)