



Milyen eszközökkel figyelhetők meg a világ legkisebb alkotórészei?

Veres Gábor
ELTE Fizikai Intézet
Atomfizikai Tanszék
e-mail: vg@ludens.elte.hu

**“Az atomoktól a csillagokig”
előadássorozat nem csak középiskolásoknak**

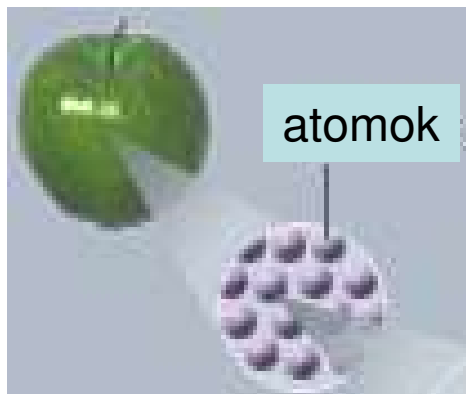
ELTE, 2007. december 20.

Az anyag részecskékből áll („részecskefizika”)

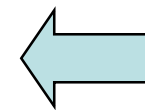
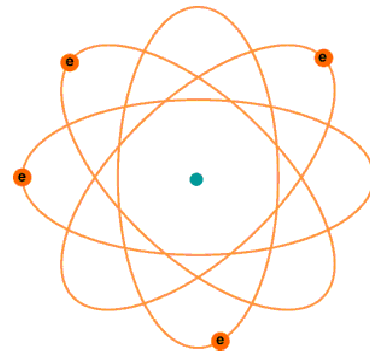
Ha egy almát elkezdünk félbe és újból félbe vágni, akkor előbb-utóbb eljutunk az atomokhoz.

Kérdés: Hány vágás szükséges?

Válasz: Csak 84!



Egyetlen atom

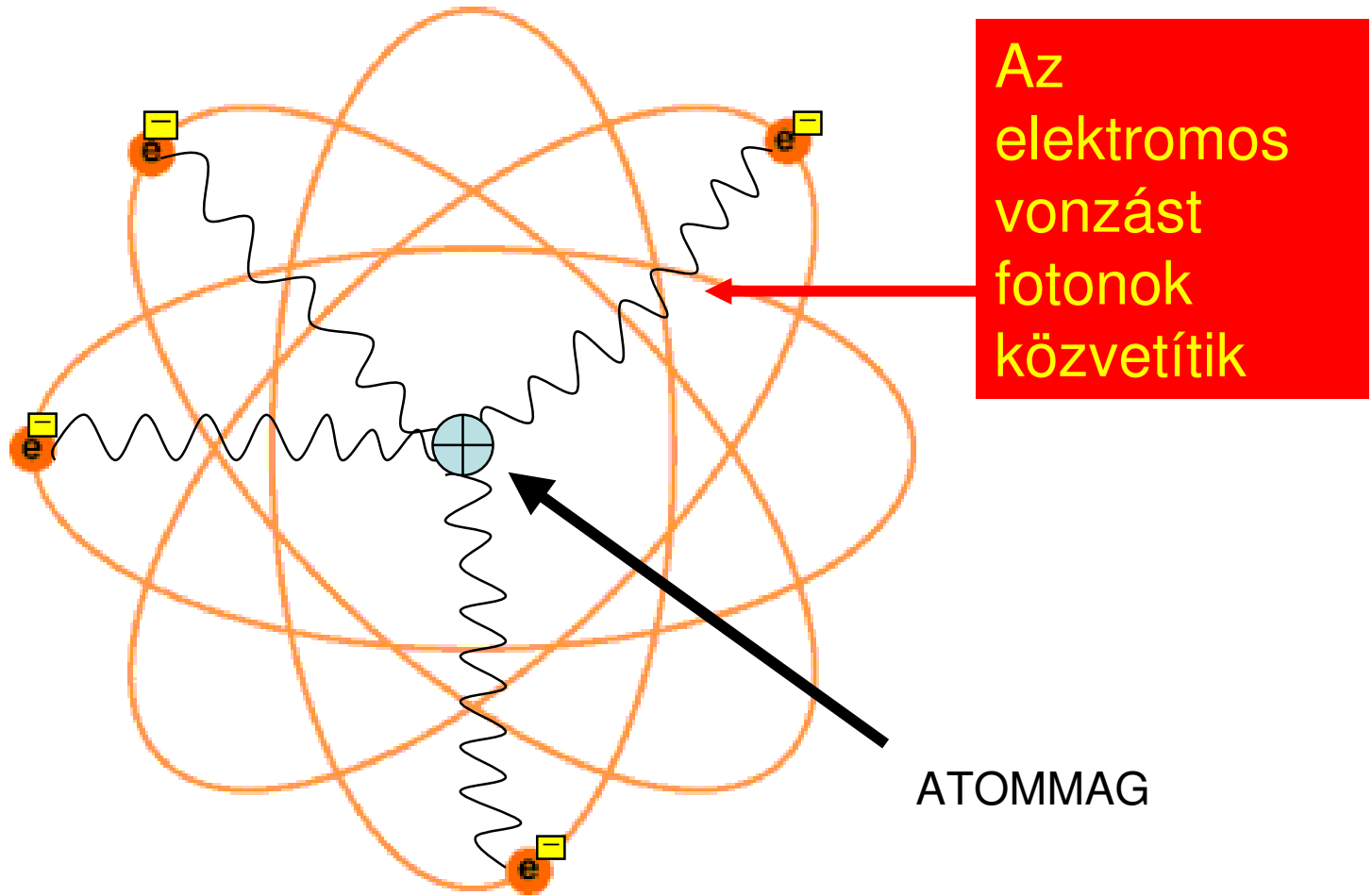


A mag
„keringő”
elektronokkal

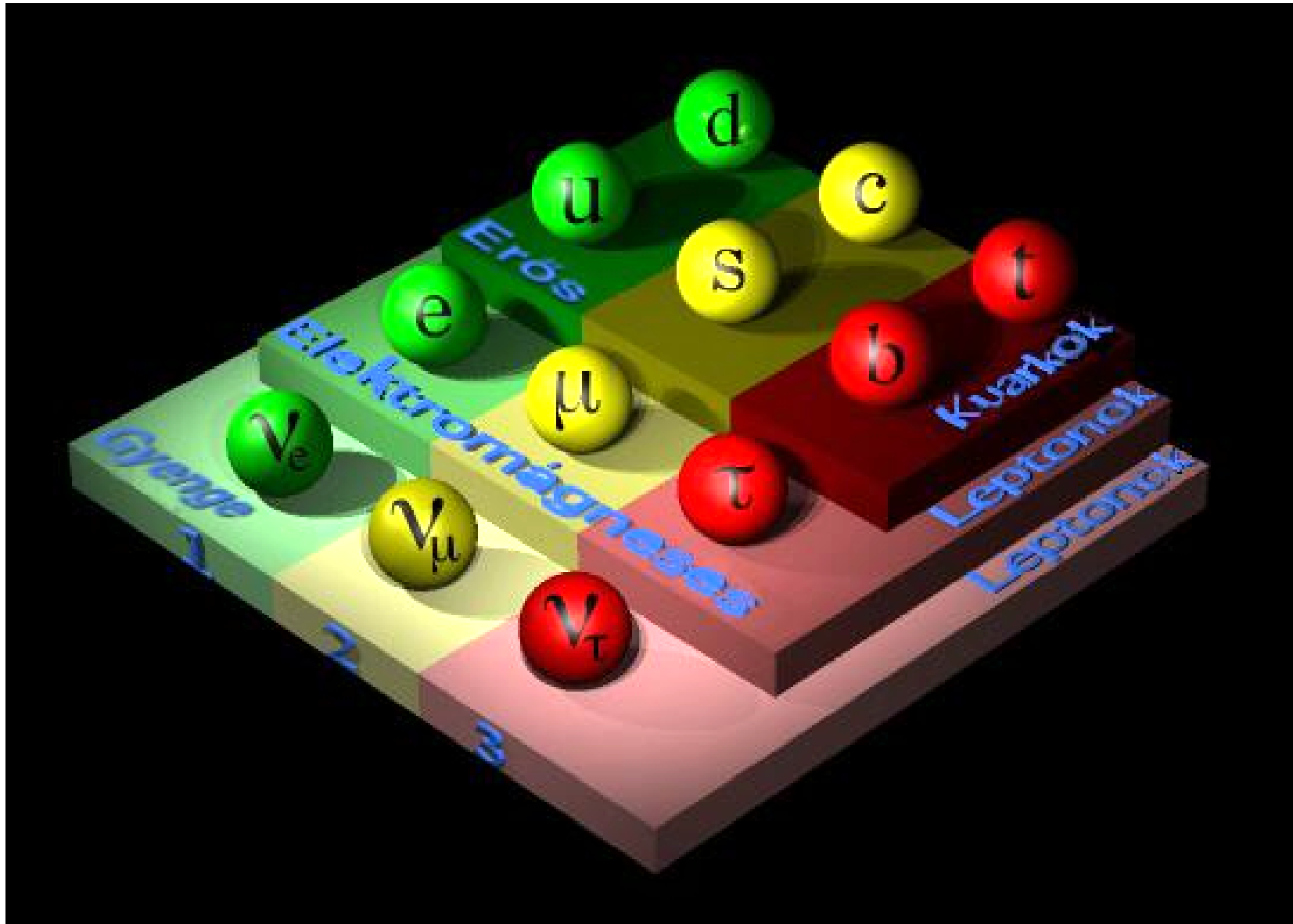


nanométer=0,000001 milliméter

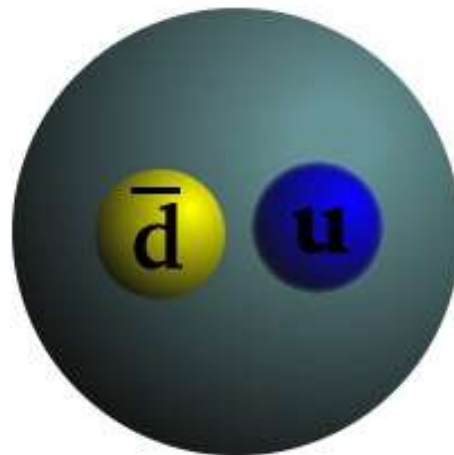
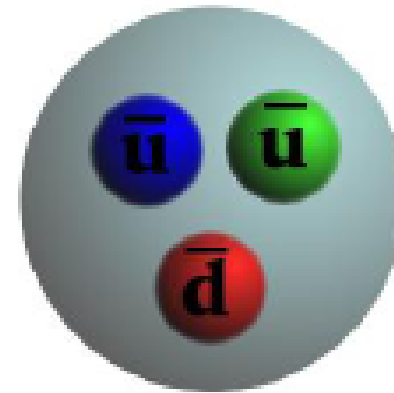
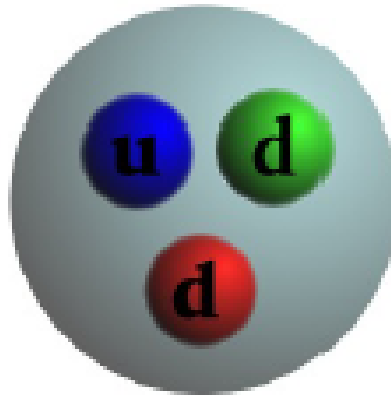
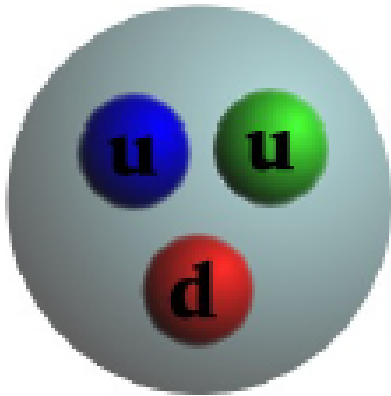
ATOM



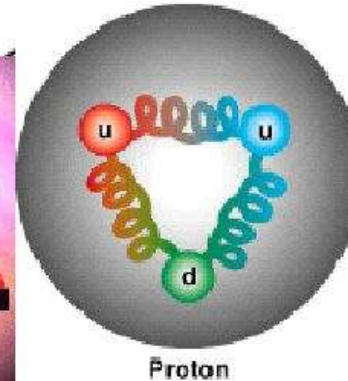
Részecskecsaládok



Barionok és mezonok



Kölcsönhatások

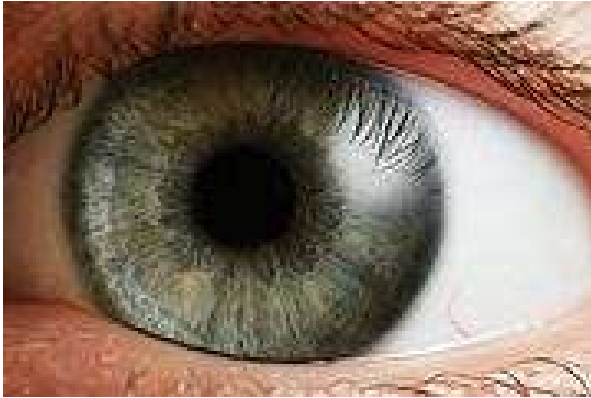


Kölcsönhatás	Erősség	Hatótávolság (m)	Közvetítő	Közvetítő tömege (GeV/c ²)
<u>erős</u>	1	10 ⁻¹⁵	gluonok (8 féle)	0
<u>elektromágneses</u>	10 ⁻²	végtelen	foton	0
<u>gyenge</u>	10 ⁻⁵	10 ⁻¹⁸	W ⁺ W ⁻ Z ⁰	80, 80, 91
<u>gravitációs</u>	10 ⁻³⁸	végtelen	graviton	0

Hogyan lehet mindezt
kísérletekkel vizsgálni?

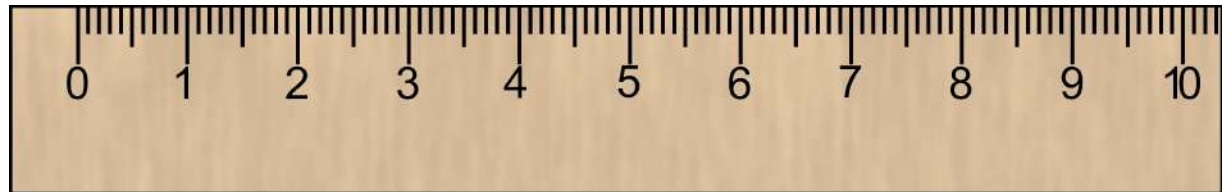
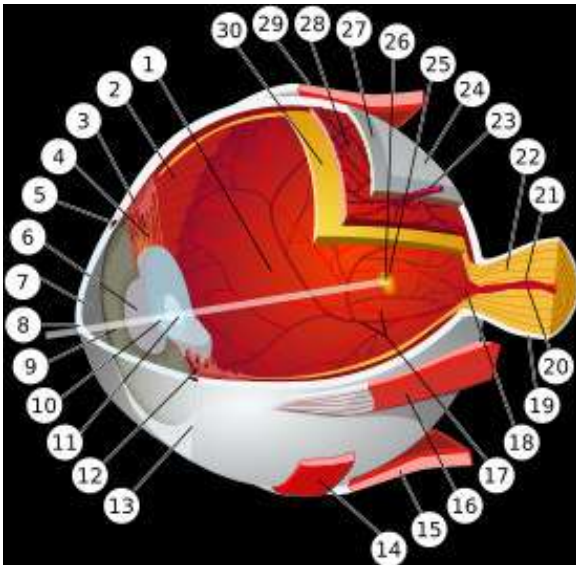
Szabad szemmel nem láthatók!!!

Emberi szem



Tipikus felbontás: kb. 0,02 fok, azaz:

0,1mm (10^{-4} m)



Nagyítólencse



Tipikus nagyítás: 2x – 10x

“Felbontás”: 10-100 mikron (10^{-5} - 10^{-4} m)



Optikai mikroszkóp

1600-as évek eleje

Biológia, geológia

Egysejtűek mérettartománya

Tipikus nagyítás: 1500x

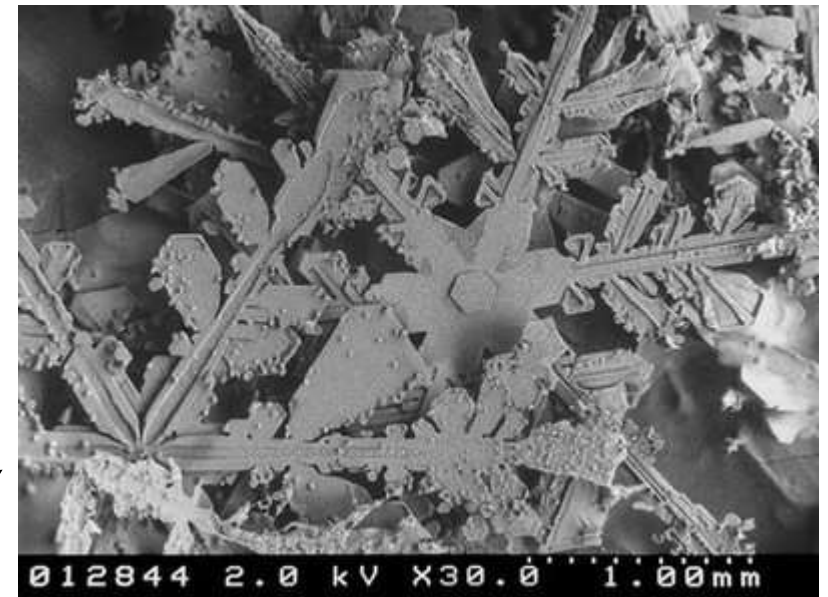
Felbontás: 0,2 mikron ($2 \cdot 10^{-7}$ m)

Infravörös: mélyebbre lát

Röntgen: nagyobb felbontás



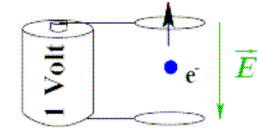
hópelyhek



Elektronmikroszkóp



Az *elektron* hullámhossza sokkal kisebb mint a látható fényé → jobb felbontás.



Nyalábenergia: 1-100 keV

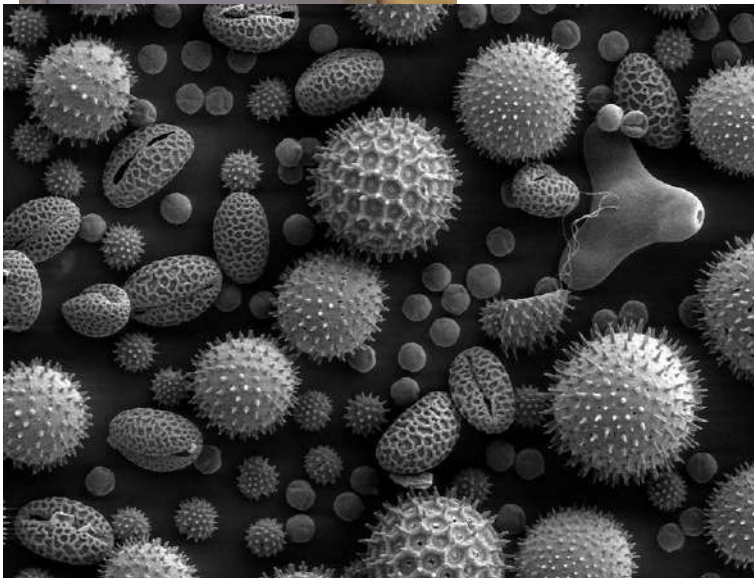
Felbontás: 1-10 nm (10^{-9} - 10^{-8} m)

Nehézség: *vákuumot* igényel.

Lencse helyett *mágneses tér*

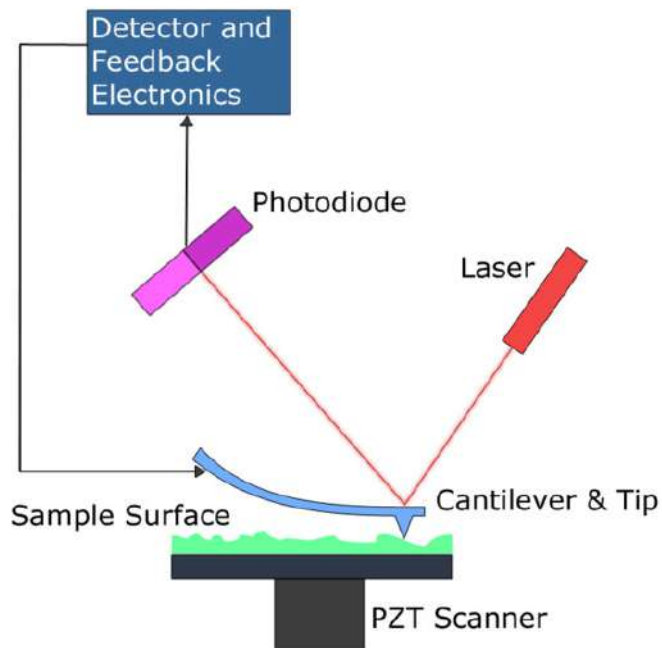
Érzékelő: foszfor-képernyő vagy CCD

- Pásztázó e.m.: felületet vizsgálunk vele, az elektronok visszaverődnek
- Transzmissziós e.m.: az elektronok átmennek a mintán



← Pollenek

Atomi erő mikroszkóp



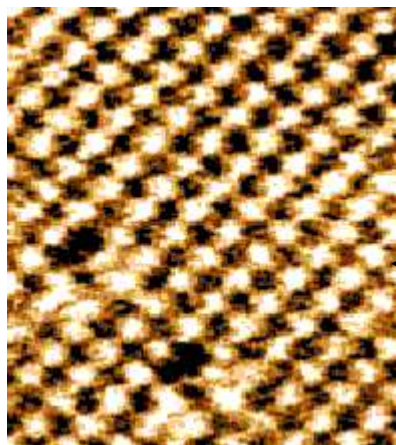
Első AFM: 1986

Felbontás: 0,1-1 nm (10^{-10} - 10^{-9} m)

Nem szükséges a mintát
fémmel bevonni, lefagyasztani,
mint az elektronmikroszkópnál

Nem szükséges vákuum

Csak kis terület vizsgálható



← NaCl kristály
atomjai

Hogyan tudunk még kisebb
méretű részecskéket vizsgálni?

de Broglie hullámhossz

$\lambda = h/p$, ahol h a Planck-állandó: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{Js} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}$
 p a részecske impulzusa.

Ez határozza meg a mikroszkóp elvi **felbontóképességét**.

Pl. **100 keV** energiájú elektronra:

$$p = \sqrt{2mE} = \sqrt{2 \cdot 511 \cdot 100} = 320 \text{ keV}/c = 0,001 \text{ eV} \cdot \text{s}/\text{m}$$

$$\lambda = (4,14 \cdot 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}) / (0,001 \text{ eV} \cdot \text{s}/\text{m}) = 4,14 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

Egy **100 MeV** energiájú elektron már *relativisztikusan* mozog. Ekkor:

$$p \approx 100 \text{ MeV}/c = 0,33 \text{ eV} \cdot \text{s}/\text{m}$$

$$\lambda = 12,5 \cdot 10^{-15} \text{ m} = 12,5 \text{ fm.} \quad \text{Ez már az **atommag** mérete!}$$

Egy **100 GeV** energiájú elektronra már $\lambda = 0,013 \text{ fm}$

Alkalmas az atommag, proton, neutron belső részeinek vizsgálatára is!!

Nagyobb energiájú részecskenyalábokra van szükség!

Részecskegyorsítók

Gyorsítófizika:

Nagyteljesítményű rádiófrekvenciás hullámok
hidegfizika, folyékony He
szupravezetés
mágnes tervezés és gyártás
vákuumtechnika

Részecskenyalábok fizikája:

egyrészecske-dinamika
kollektív effektusok
két nyaláb kölcsönhatása

Klasszikus mechanika, kvantummechanika, nemlineáris
dinamika, relativitáselmélet, elektrodinamika, számítástechnika

Történelem

Első gyorsító: 1932

Előtte: csak természetes α források, pl. rádium

Az egyetlen ismert magreakció ez volt:



Minden gyorsító elve: elektromos térrel való gyorsítás,
(Töltött részecskék!)

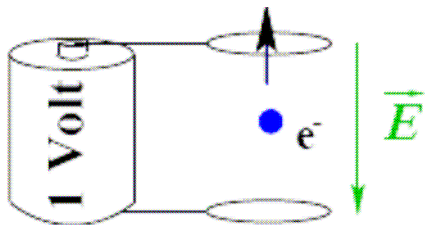
Nagyon változatos kivitelezés...

Gyorsítás elektromágneses térrel

Lorentz-erő:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = Q * \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

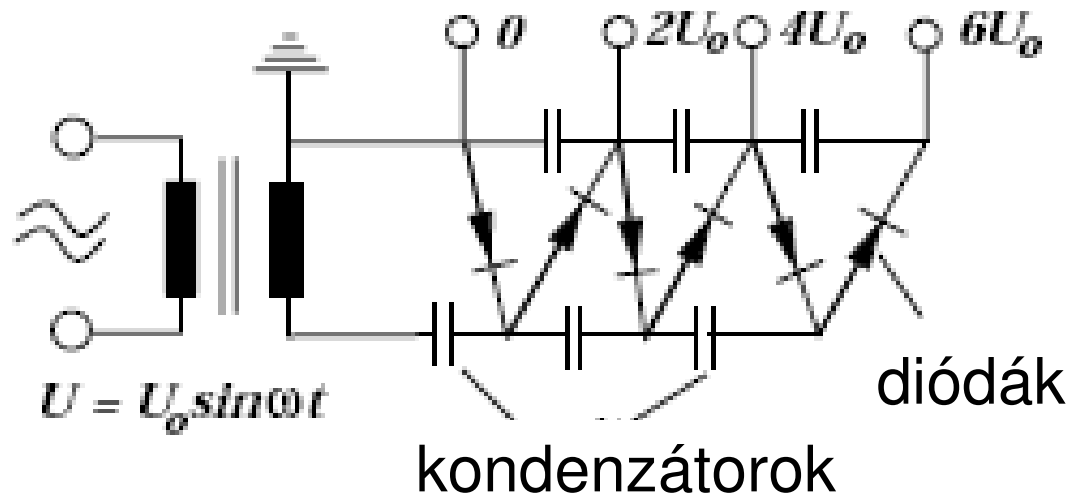
Csak az **elektromos** tér gyorsít, a mágneses nem!



$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

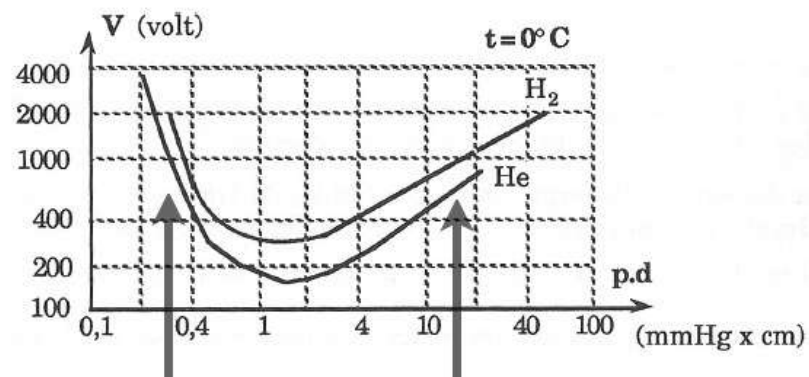
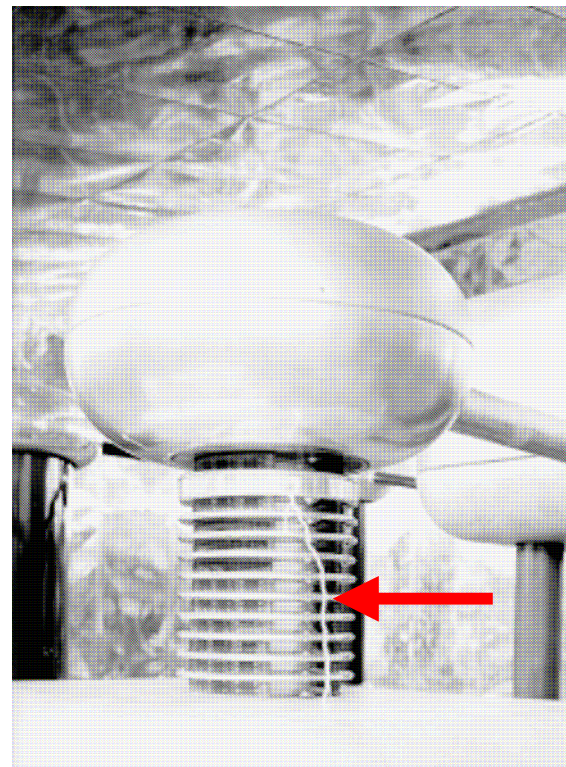
Nagyobb egységei:
keV, MeV, GeV, TeV

Kaszád-feszültséggenerátor



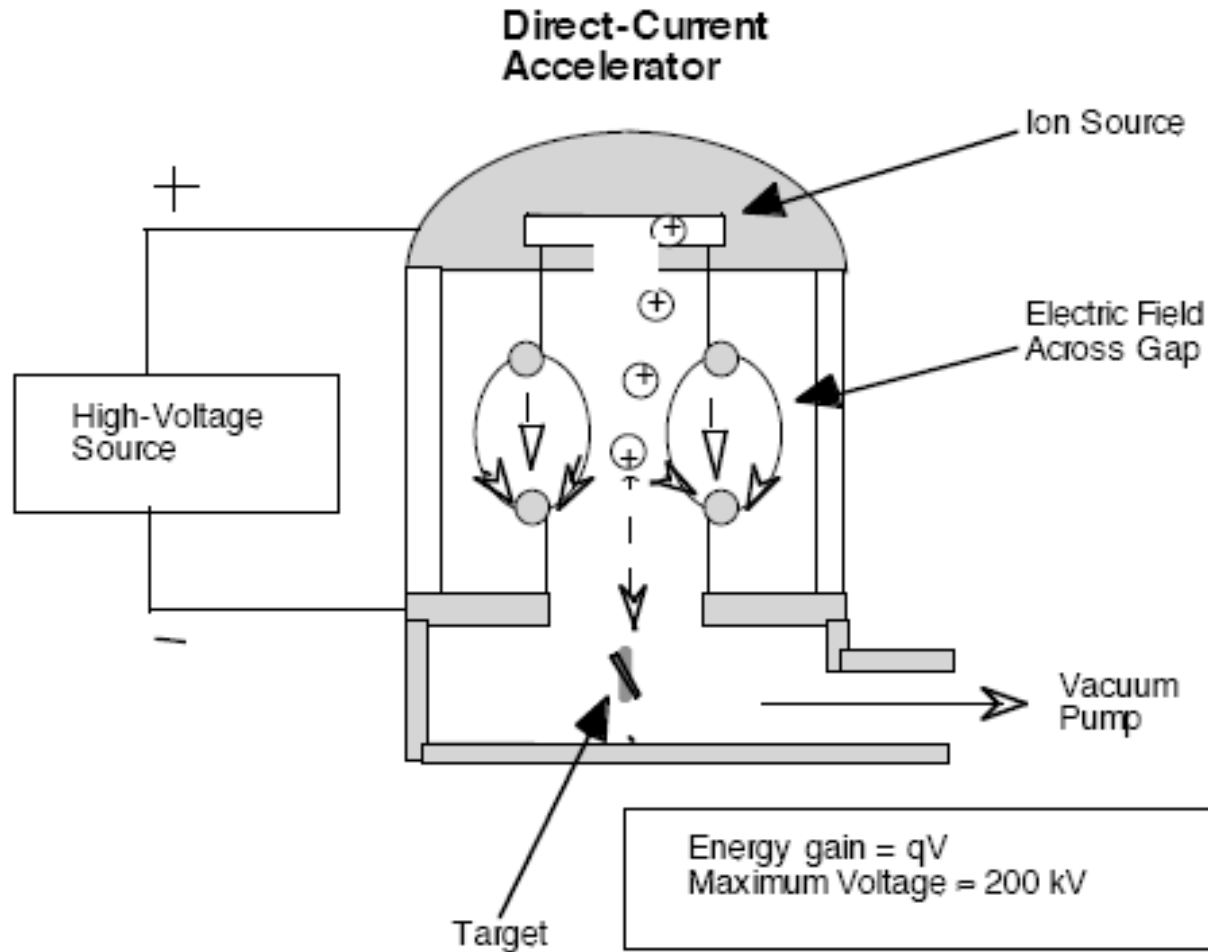
Váltófeszültség → nagy egyenfeszültség
Egyszerű, olcsó, könnyű (transzformátorhoz képest)
Bármelyik szakaszból levehető a kívánt feszültség

Limitáció: 1 MV



Átütési feszültség

Cockcroft-Walton, 1932



Max. 1 MV, feszültségduplázó áramkörökkel,
Első proton-gyorsító. Ma: injektorokban alkalmazzák.
1951: Nobel-díj: $p + \text{Li} \Rightarrow 2\text{He}$ (alagúteffektussal. ≈ 100 keV)

Van de Graaff, 1929

Mozgó szalagról állandó **pozitív sztatikus** töltésutánpótlás → nagy, **10 MV** feszültség!

Ionforrás: a pozitívan töltött gömbben, +10 MV és a földpotenciál között gyorsulnak

Feszültség növelése: „tandem” elv (1950).

-először: negatív ionok.... Pozitív terminál felé gyorsulnak

... stripper (elektronok eltávolítása)

... sokszorosan pozitívan töltött ionok

... visszafele (termináltól távolodva) is gyorsulnak!

(pl. 25 MV, Holifield, Oak Ridge National Laboratory)

A van de Graaf generátor működési elve

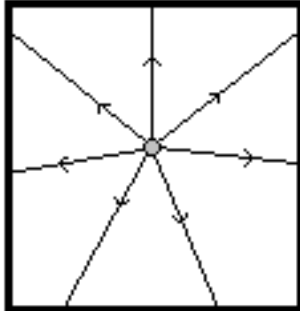


FIG. 1
A CHARGED METAL
BALL AND THE E-FIELD.
(REPRESENTED BY
LINES)

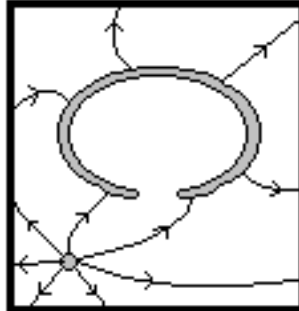


FIG. 2
CHARGED METAL
BALL APPROACHES
A NEUTRAL HOLLOW
SPHERE.

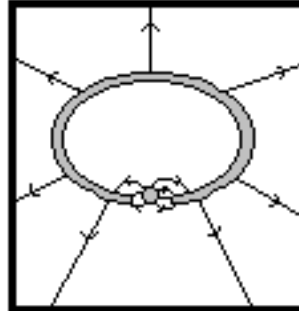


FIG. 3
CHARGED BALL GOES
INSIDE.

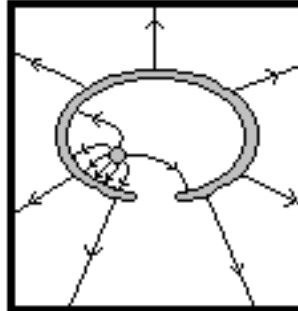


FIG. 4
CHARGED BALL
INSIDE HOLLOW
SPHERE.

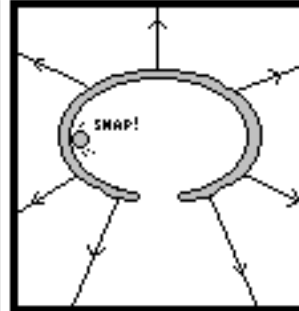


FIG. 5
CHARGED BALL
TOUCHES THE
INSIDE OF THE
HOLLOW SPHERE
AND LOSES ALL ITS
CHARGE TO THE
SPHERE.

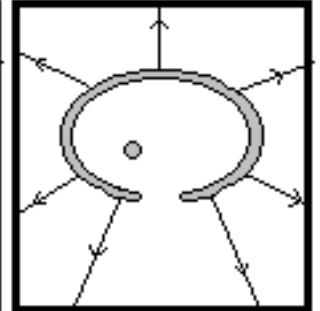
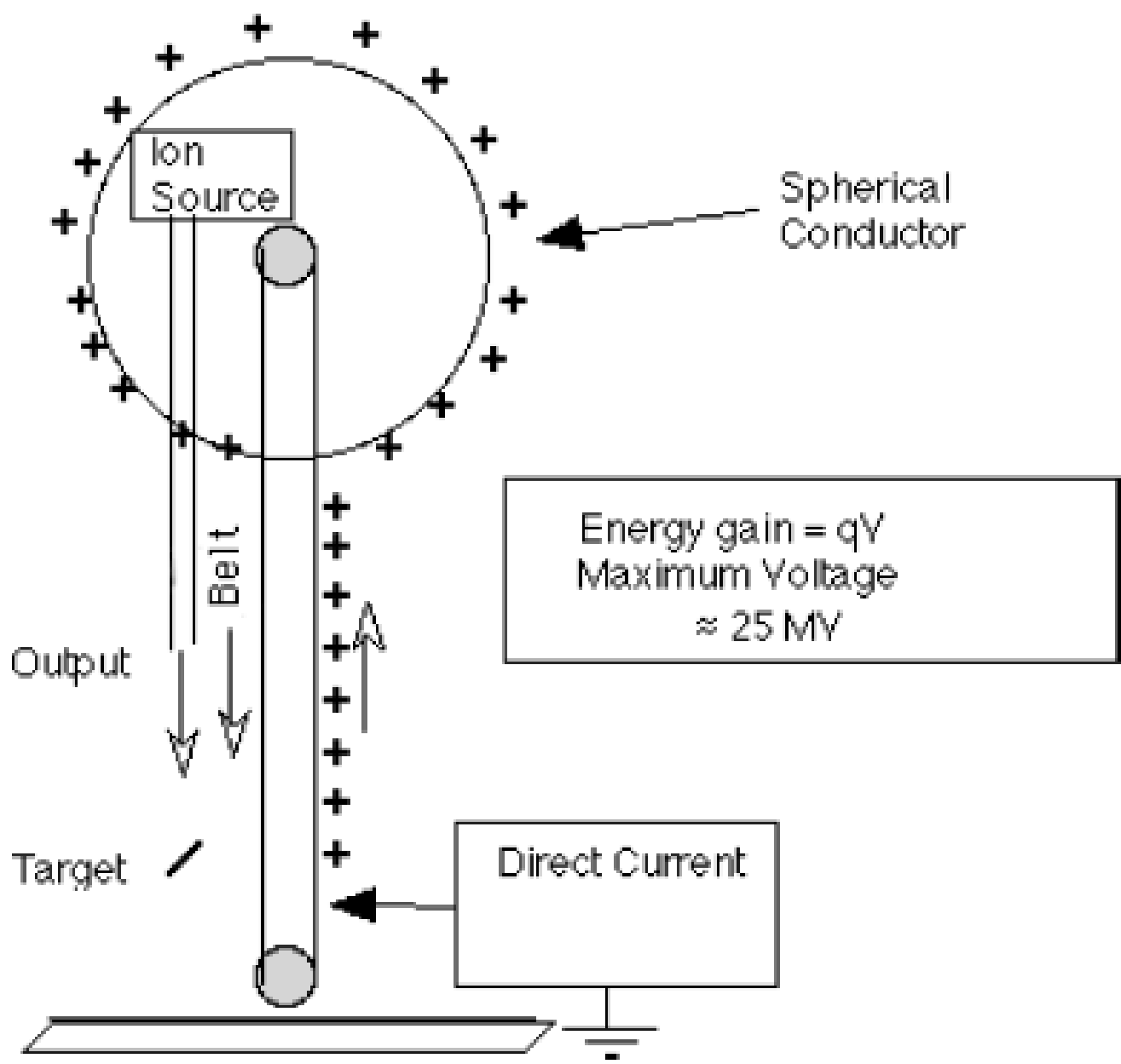
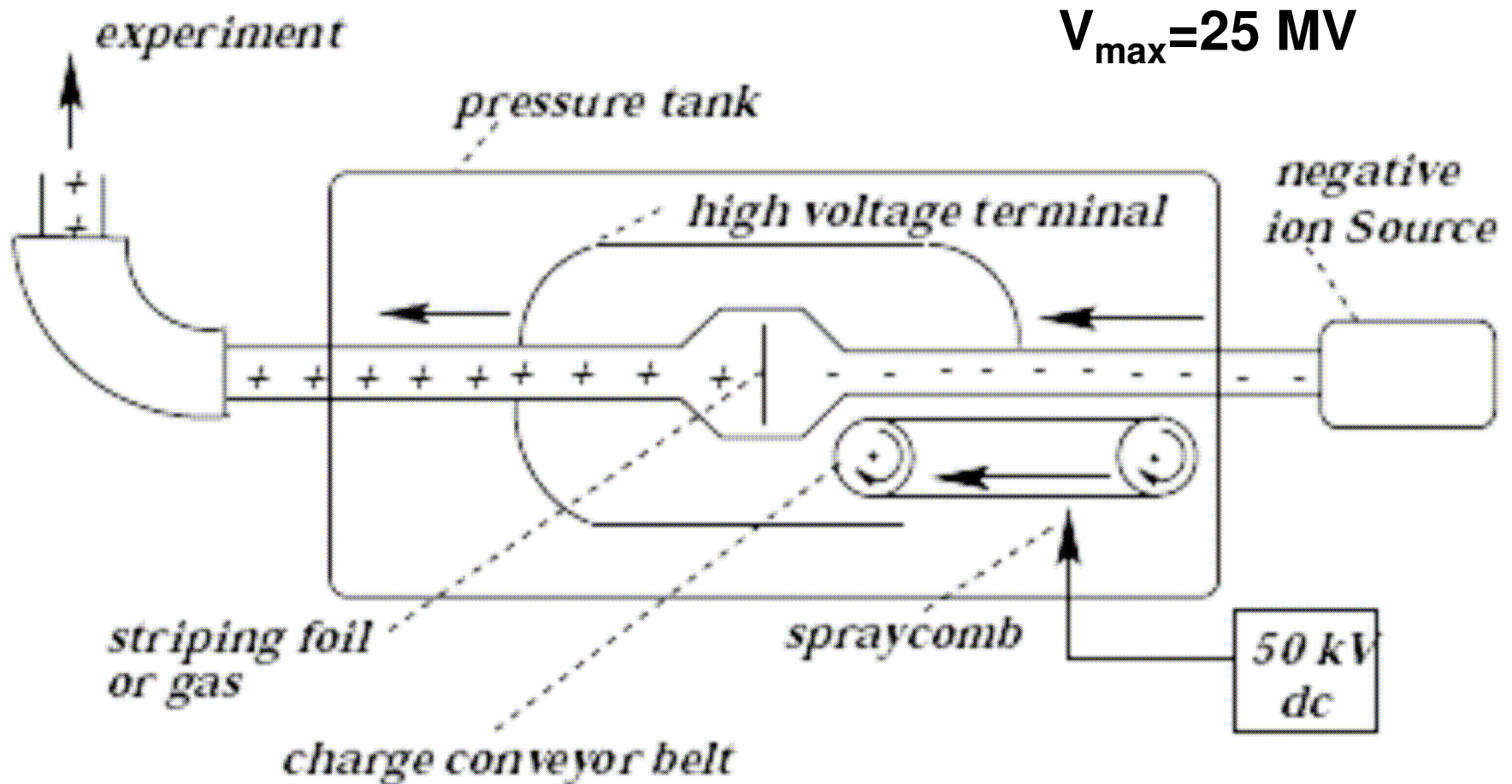


FIG. 6
NEUTRAL METAL
BALL CAN NOW BE
REMOVED.



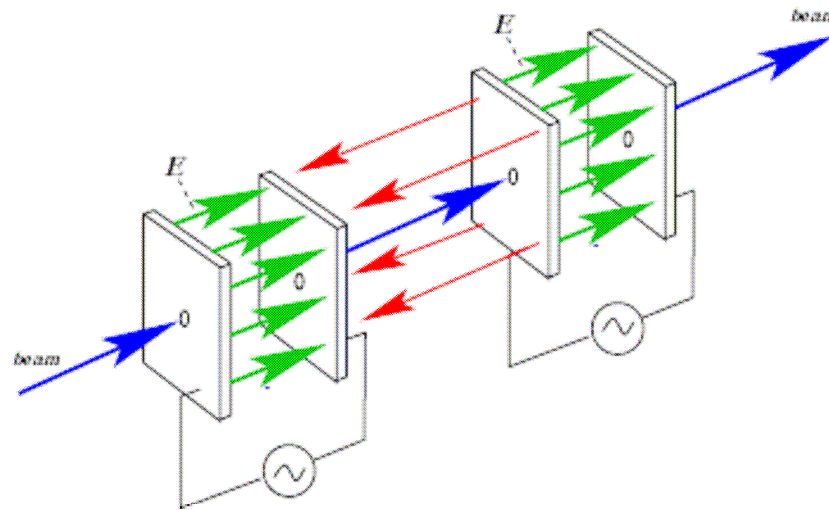
Tandem van de Graaf generátor



Limitációk:

- mekkora **potenciálkülönbség** tartható fenn
- **negatív ion** kell (egyres elemekre nincs, nehéz)
- általában csak egyszeresen negatív ionok

Változó elektromos terek



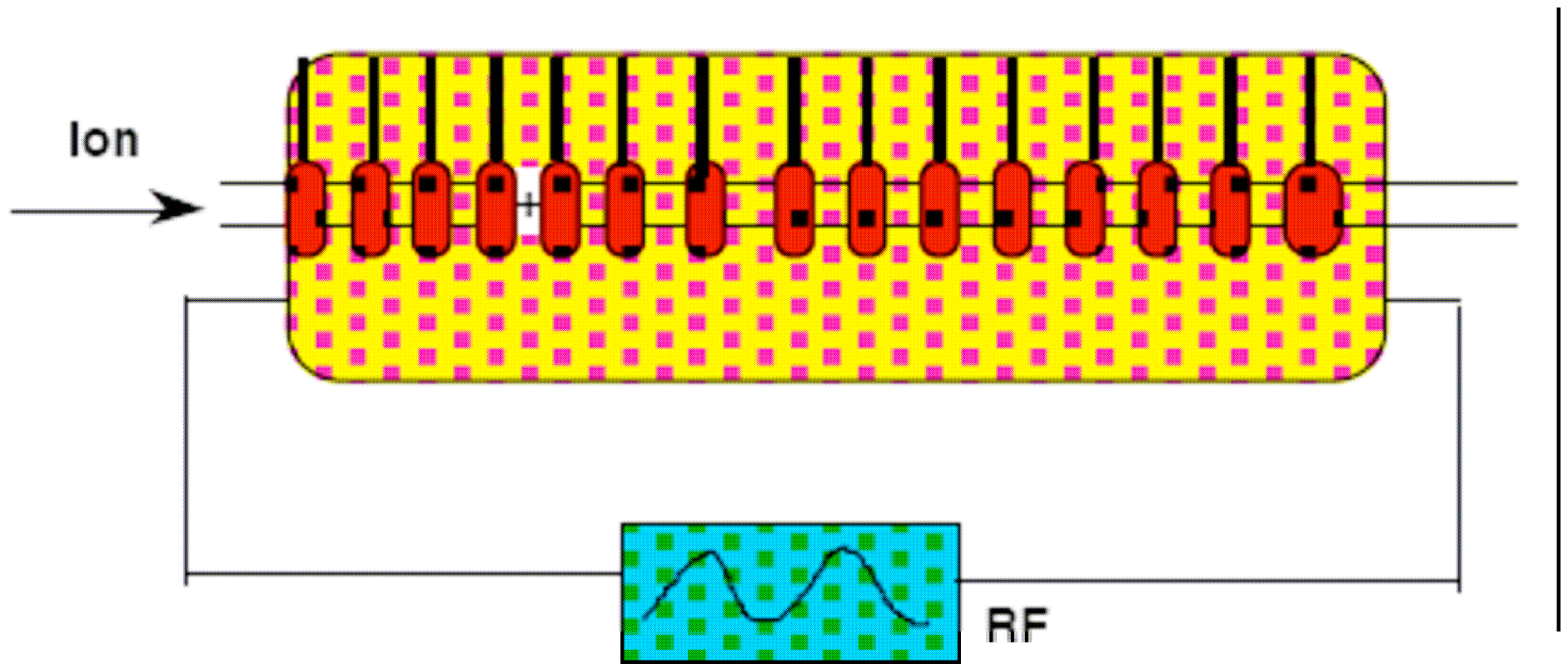
Lineáris gyorsító (LINAC)

Csomagocskákban vannak az ionok

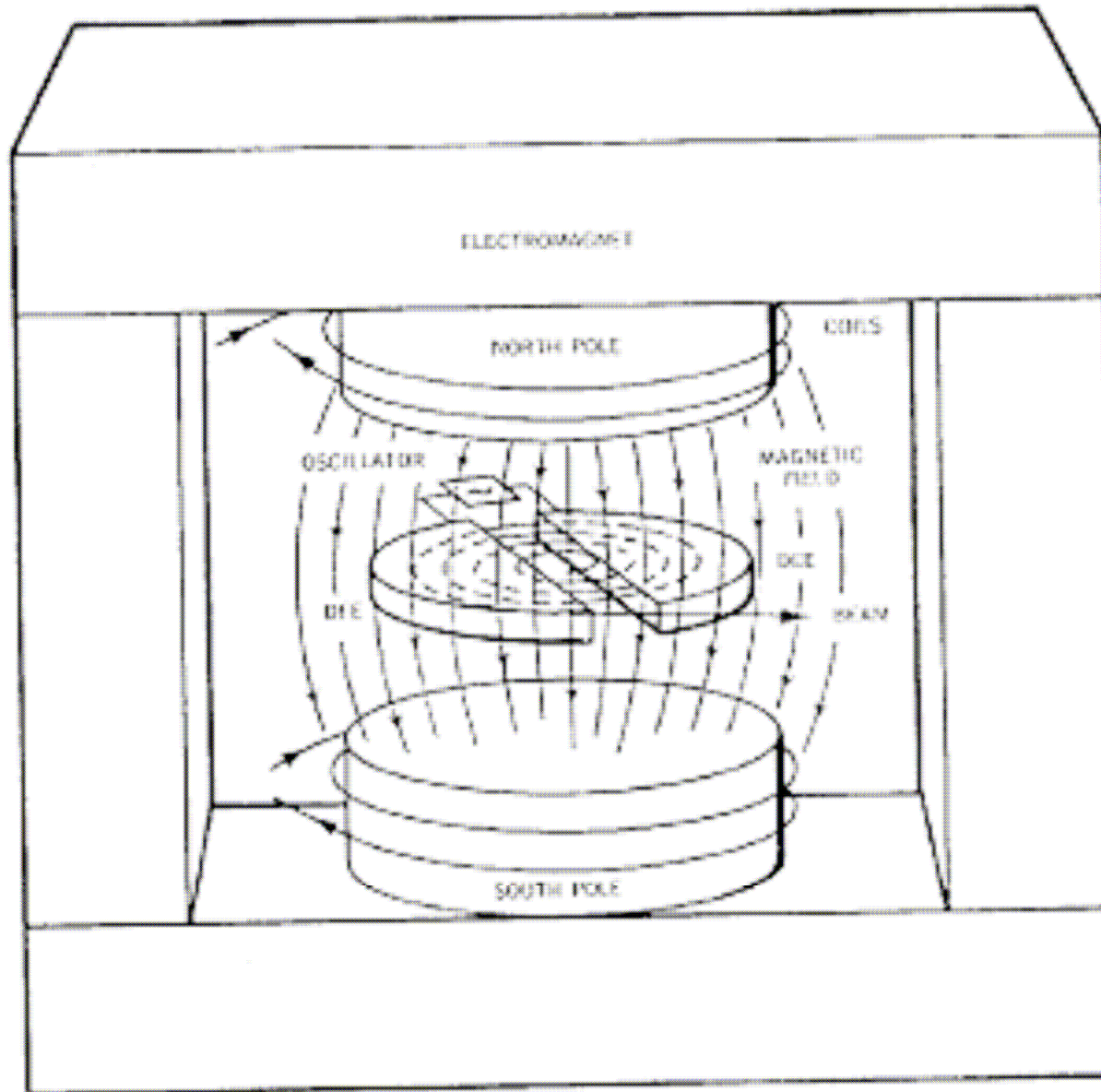
Hosszú gyorsító kell!

Változó tér kell!

Lineáris gyorsító (linac)



Ciklotron

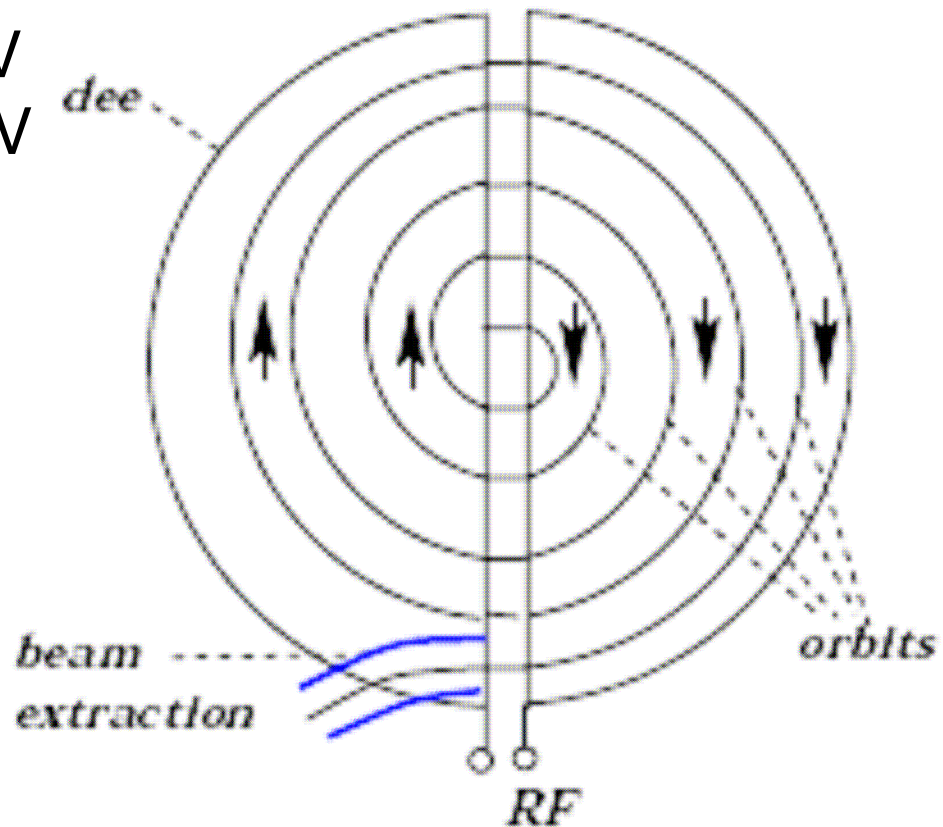


Ciklotron

1929 Lawrence

1931 Livingston 80 keV

1932 Lawrence 1,2 MeV



PI. NSCL National Superconducting Cyclotron
Laboratory, East Lansing, MI, USA

(az Atomfizikai Tanszék aktív részvételével!)



NSCL ciklotron
Michigan, USA

Szinkrotron

Kiküszöböli a *speciális relativitáselmélet* miatti ciklotron-limitet:

Mindig ugyanaz a pályasugár, miközben a mágneses teret fokozatosan növelik

Rádiófrekvenciás oszcillátor: gyorsítás mint eddig.

Példa: RHIC - Relativistic Heavy Ion Collider, NY, USA

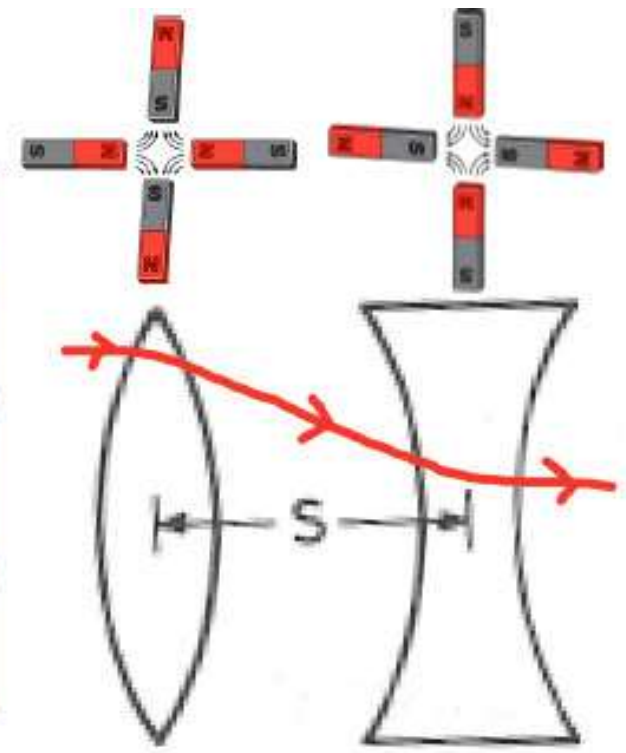
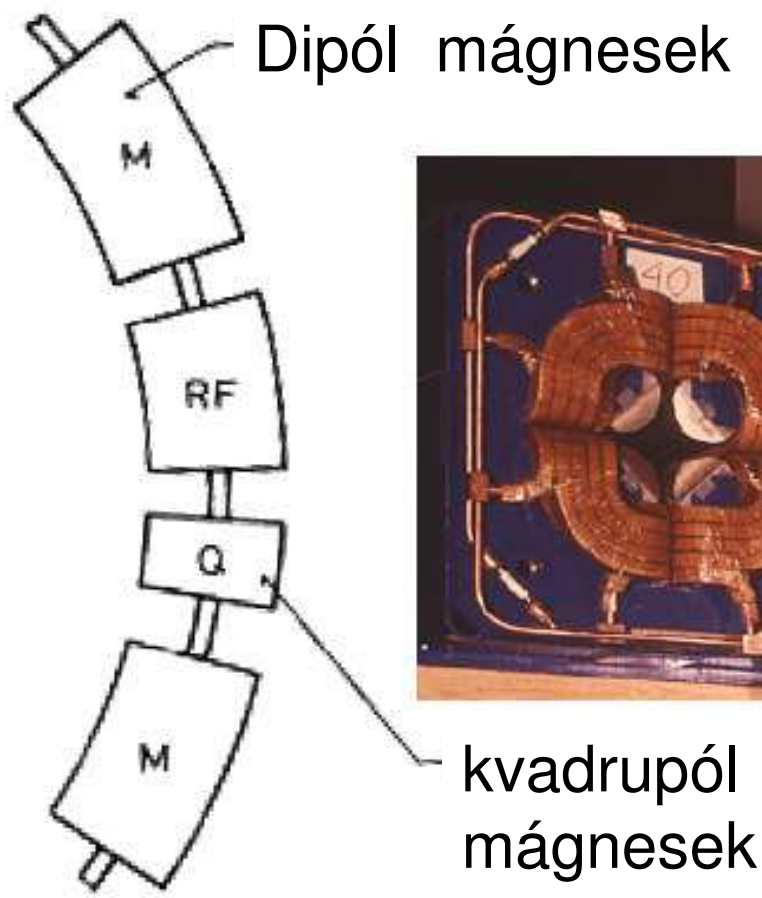
(az Atomfizikai Tanszék aktív részvételével!)

1949 elektronok

1952 3 GeV protonok

1955 Bevatron 6 GeV protonok

Modern szinkrotron, fókuszálással



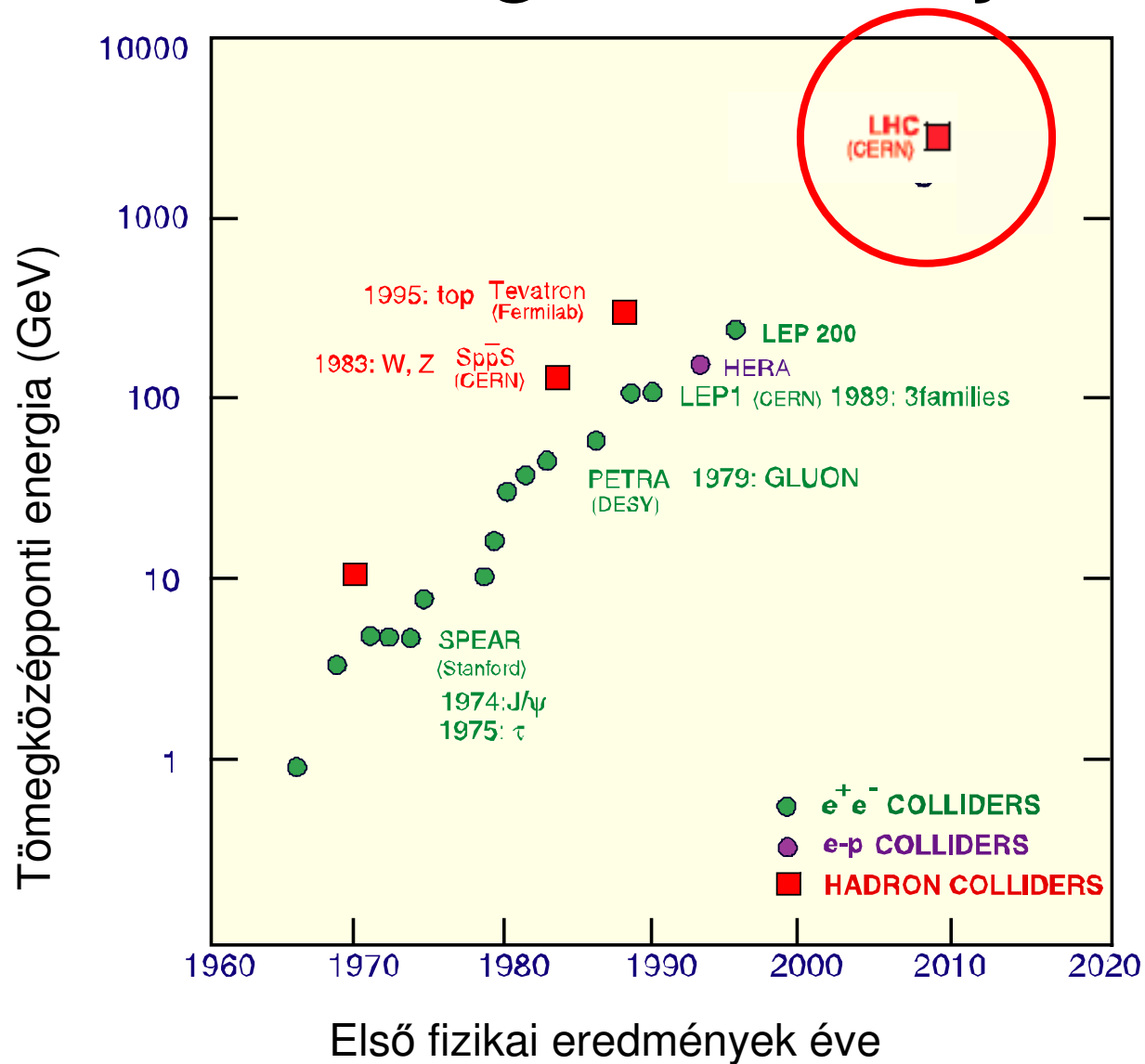
Minden mai szinkrotron így működik

Mai gyorsítók paramétere

Frascati	0,5 GeV	1999
Cornell	6 GeV	1979
KEK	8 GeV	1999
SLAC PEP-II	12 GeV	1999
SLAC SLC	50 GeV	1989
CERN LEP	105 GeV	1989
DESY HERA	30(920) GeV	1992
CERN SPS	300 GeV	1981
Tevatron	1000 GeV	1987
CERN LHC	7000 GeV	2008

Nem teljes lista!!!

Gyorsítóenergiák időfeljődése



Milyen részecskét ütköztessünk?



Elektronok: pontszerűek.
Az energia teljesen az ütközésre fordítódik.

Előny:
Az energia pontosan ráállítható pl. egy részecsketömegre (W,Z), precíziós mérések

Hátrány:
Egy adott energia fölött túl sok szinkrotronsugárzás

LEP

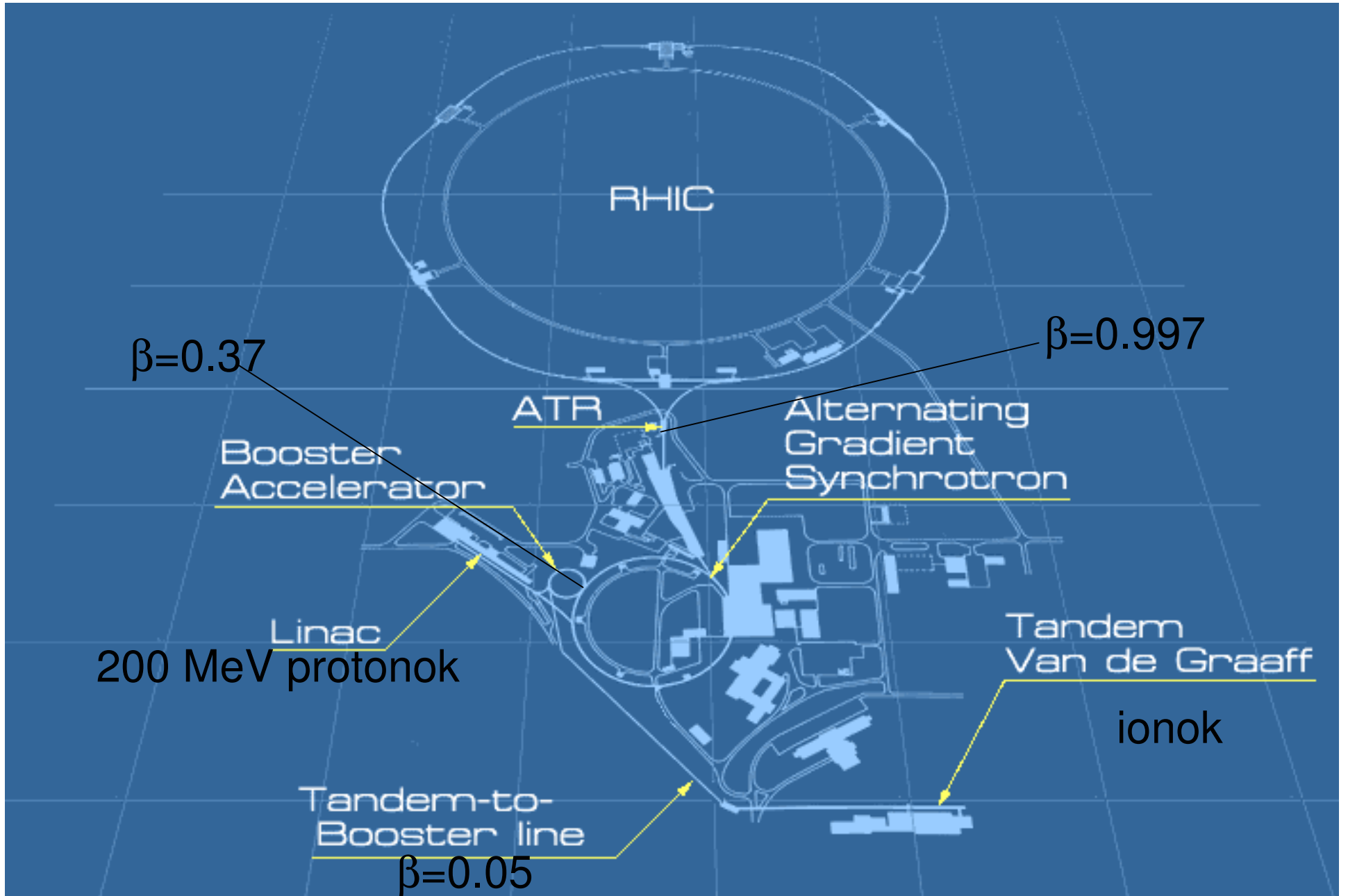


Az energiát a proton összetevői hordozzák, de csak az egyik összetevő ütközik!

Előny:
Egyetlen energián sok folyamat tanulmányozható (felfedezések!)

Hátrány:
Kisebb energia fordítódik az ütközésre, mint a nyalábenergia

LHC



BNL AGS (Alternating Gradient Synchrotron)

1960

Egyik legsikeresebb gyorsító:

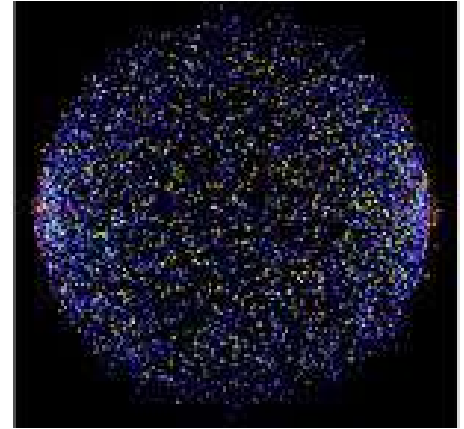
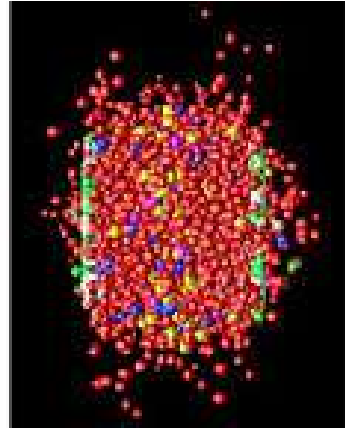
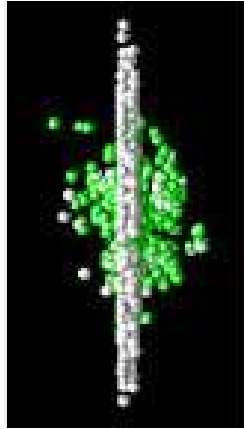
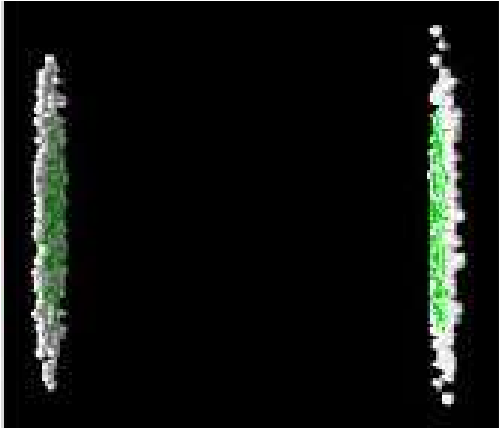
3 Nobel-díj:

1988: muon-neutrínó (Lederman, Schwartz, Steinberger), neutrínó-nyaláb

1980: CP-sértés (Cronin, Fitch). $K_L \rightarrow 2\pi$

1976 Ting: J/Ψ (c kvark)

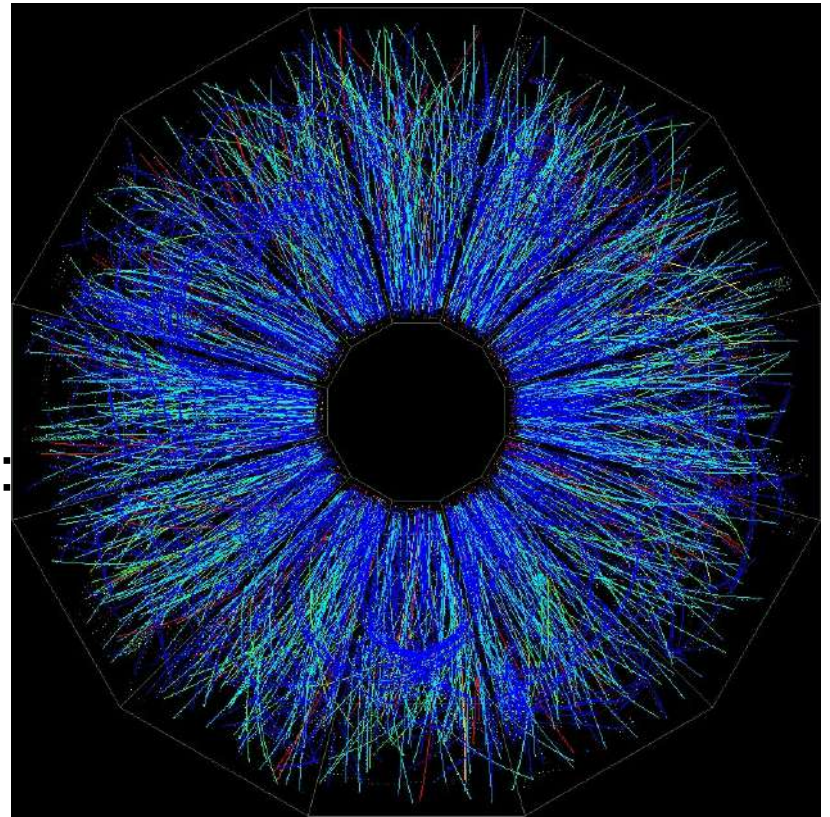




Gyorsítani már tudunk.

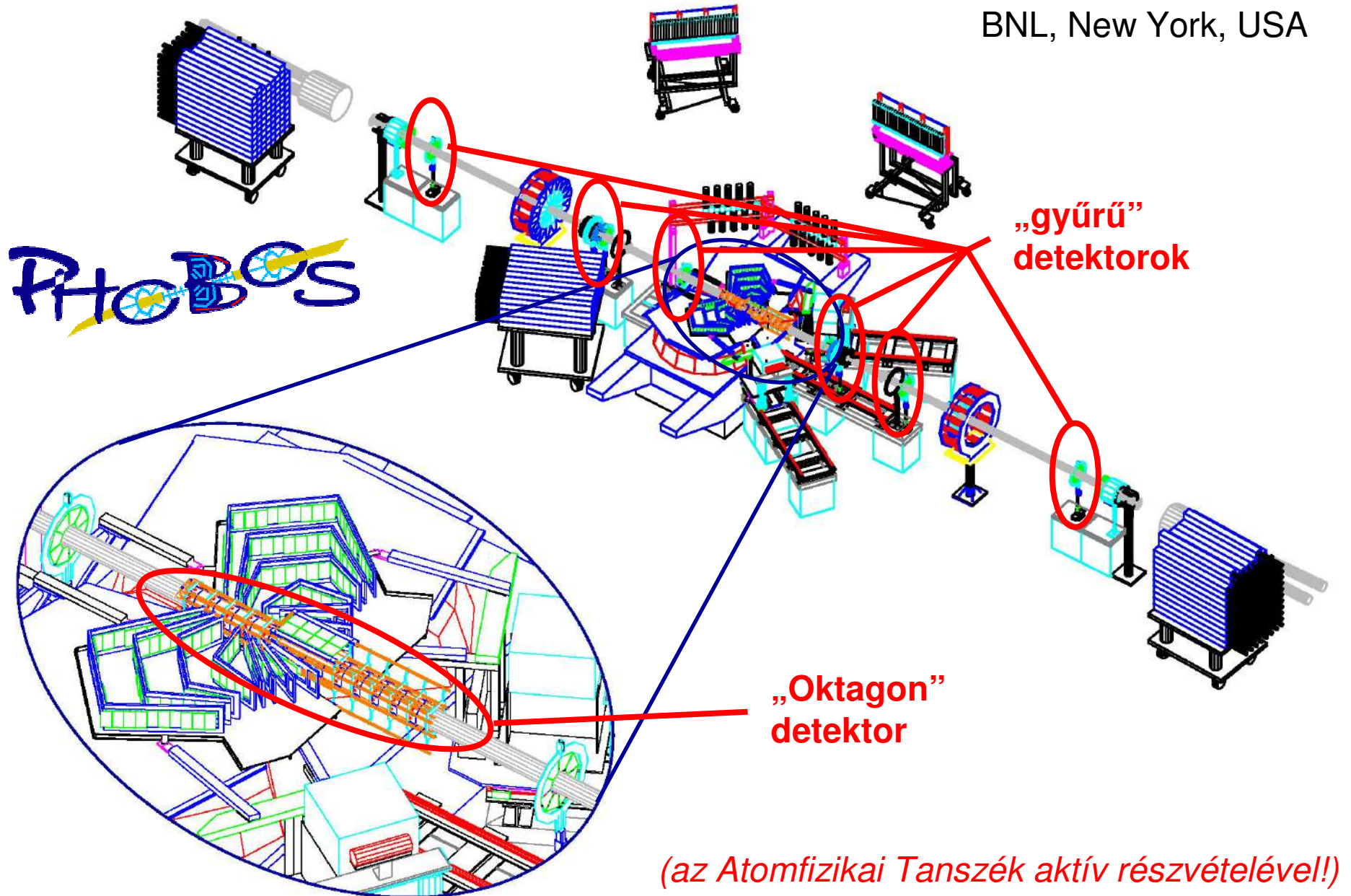
Hogyan érzékeljük a
keletkezett részecskéket?

pl: nehézion-ütközések a RHIC-nél:



Példa: a PHOBOS kísérlet

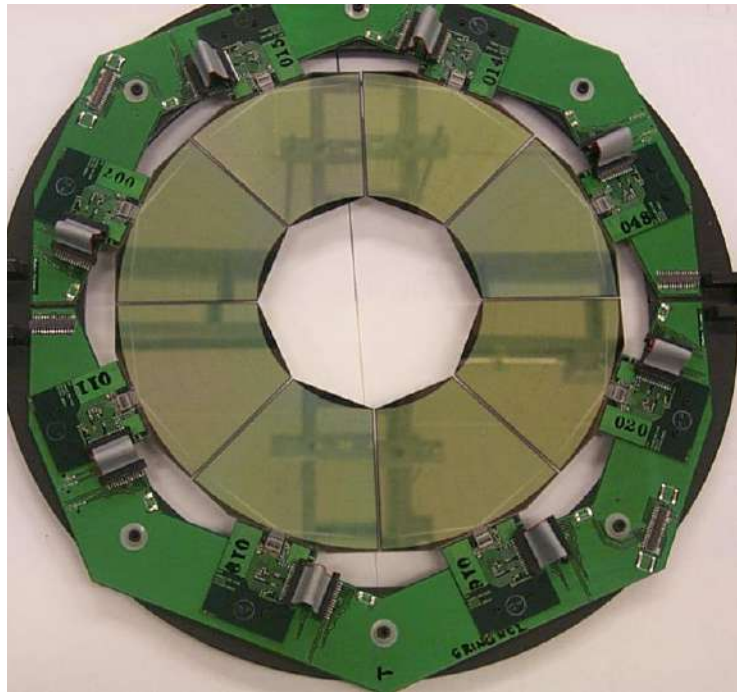
BNL, New York, USA



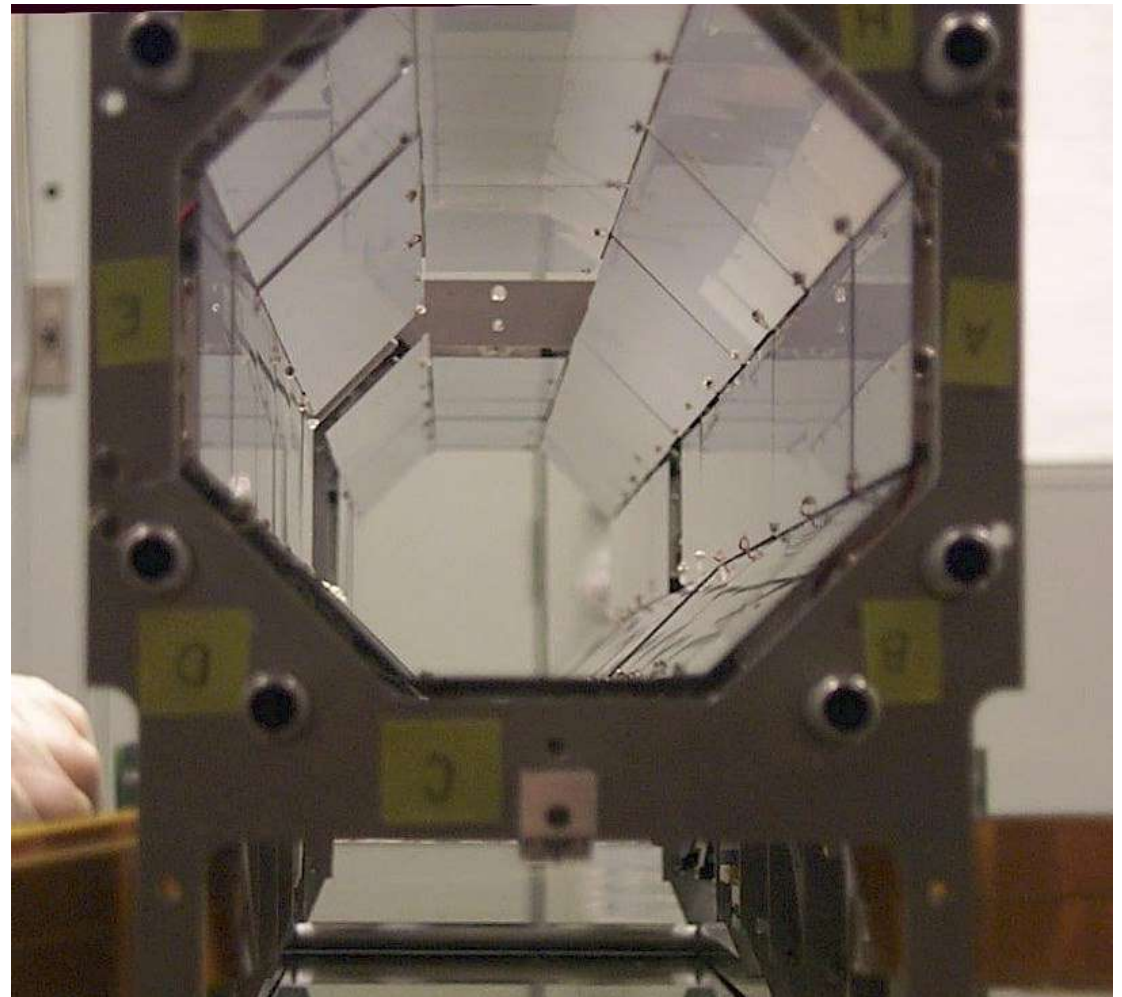
Félvezetű detektorok a PHOBOS-ban

Töltött részecskéket érzékelnek. Hasonlítanak a digitális fényképezőgéphez

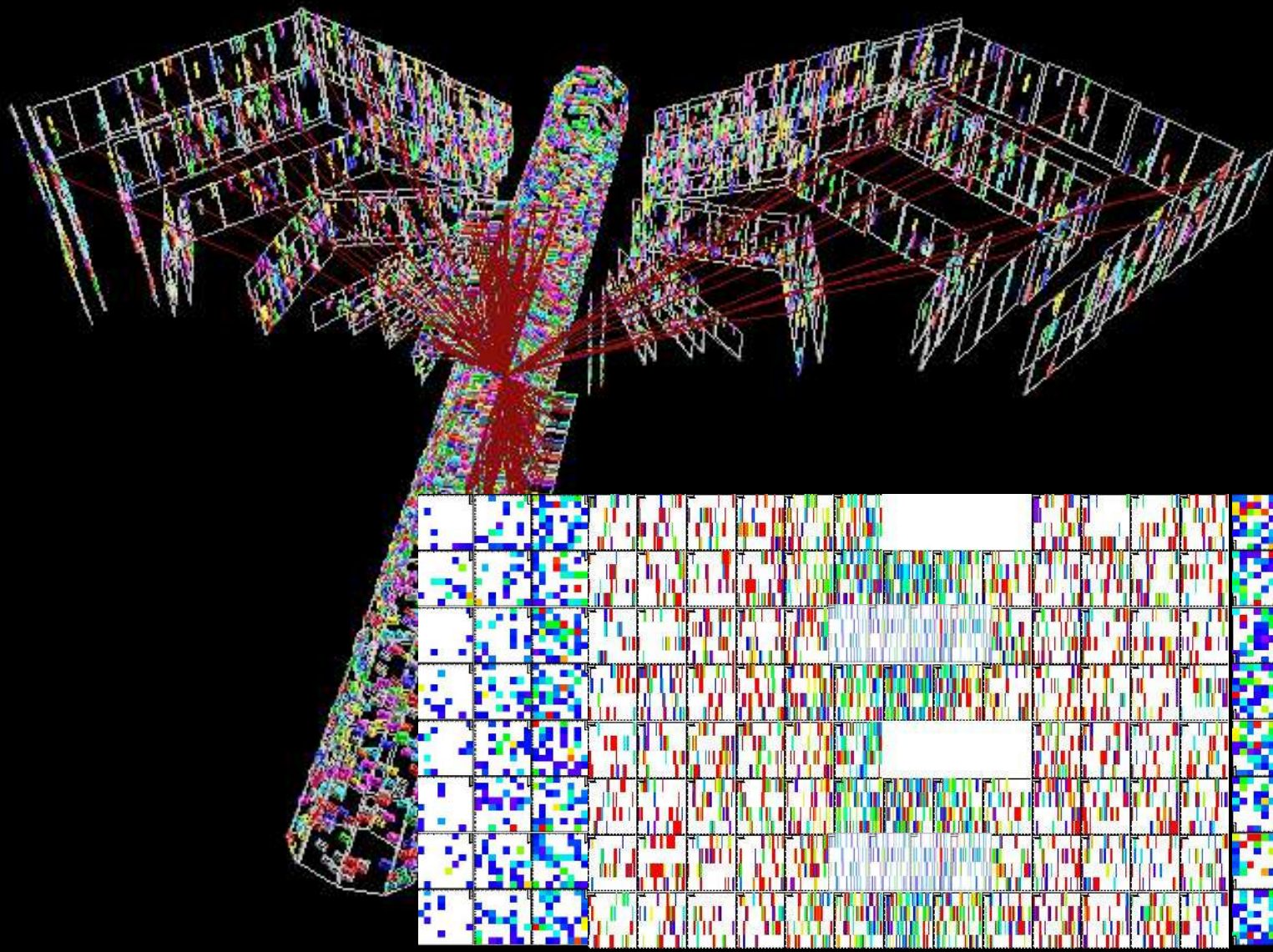
„Gyűrű” detektor



„Oktagon” detektor

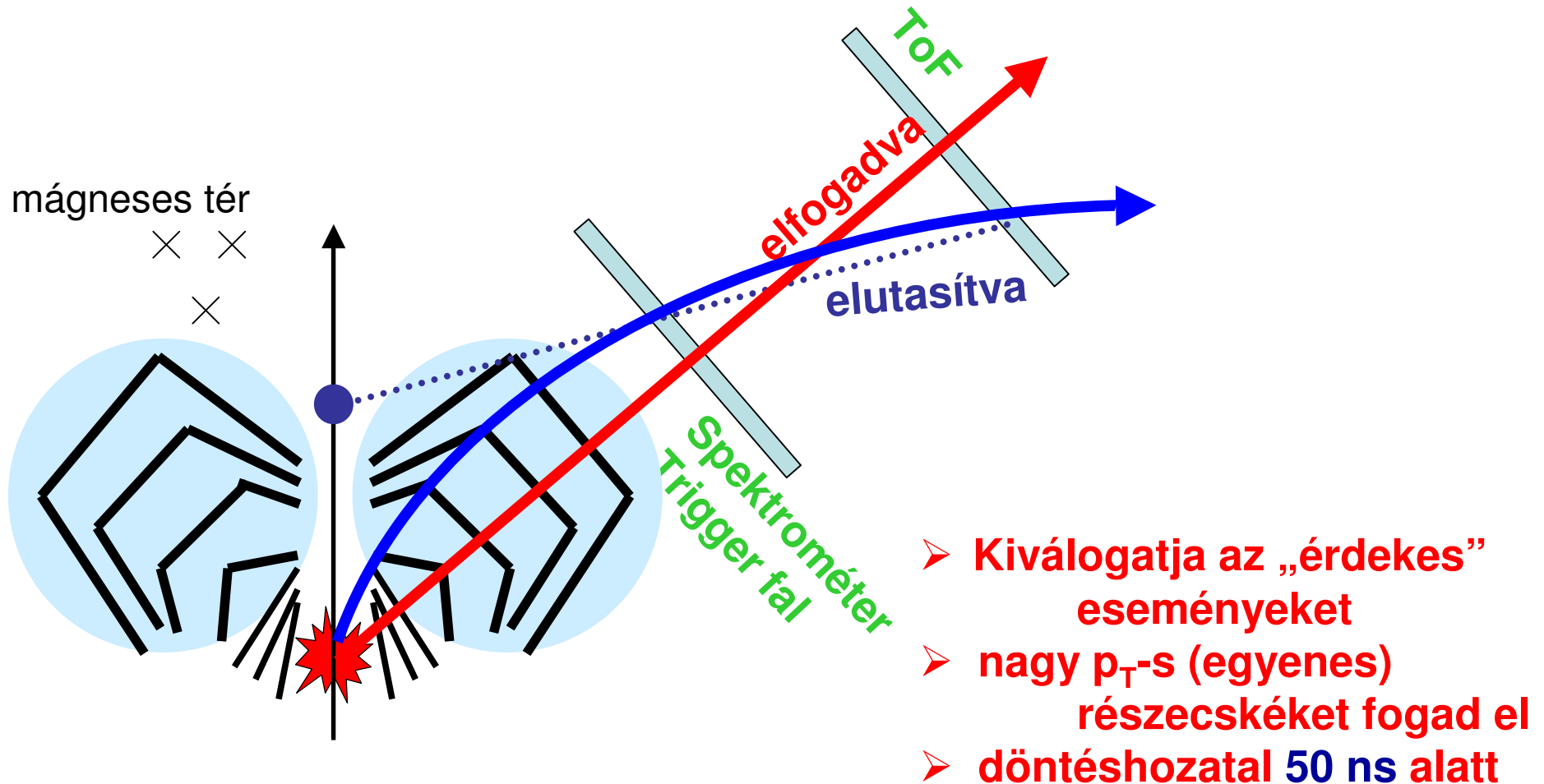


Sok tízezer elektronikus csatorna

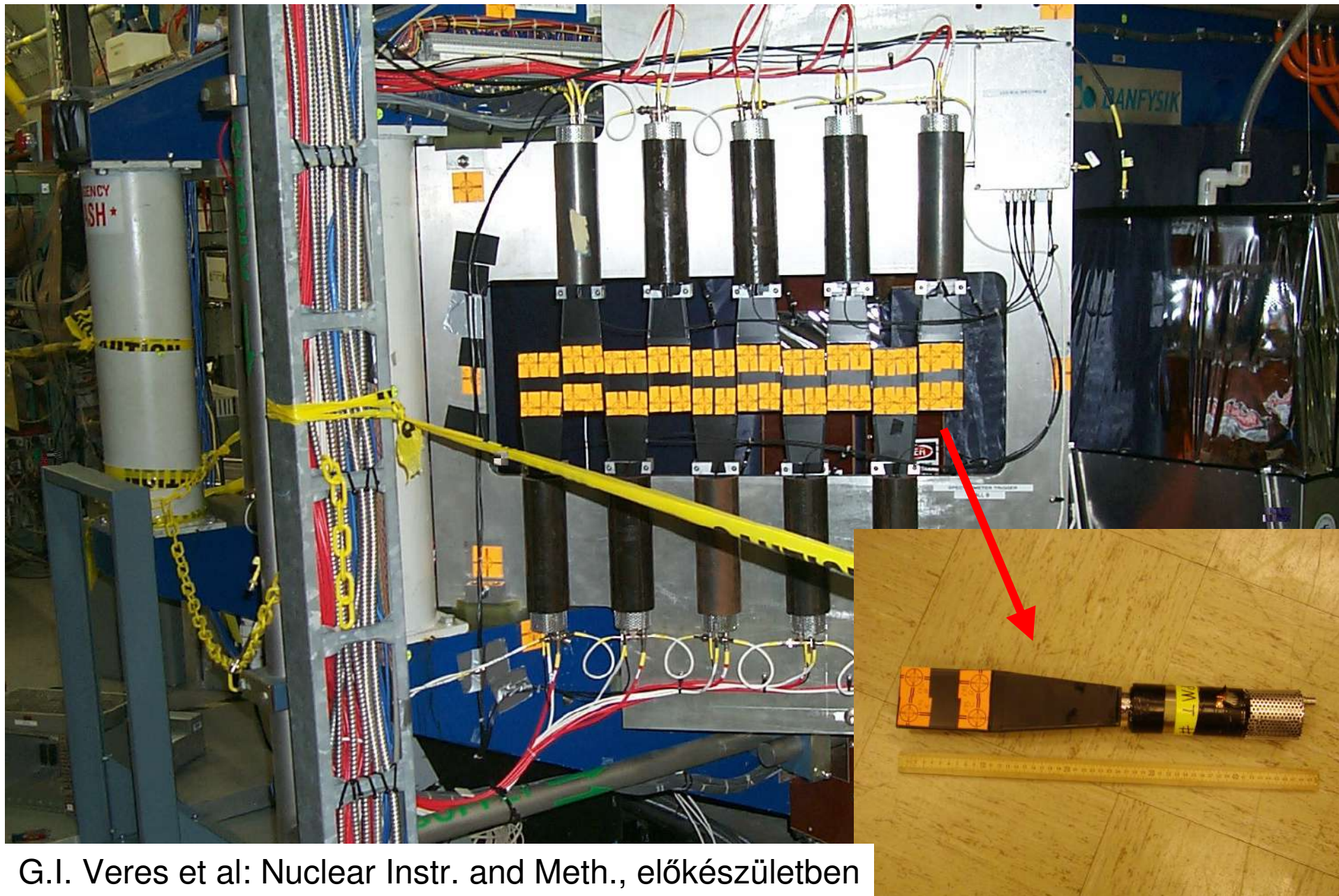


Trigger: részecskék kiválogatása

Szegmentált szcintillátor fal az Időmérő fallal (ToF) kombinálva:



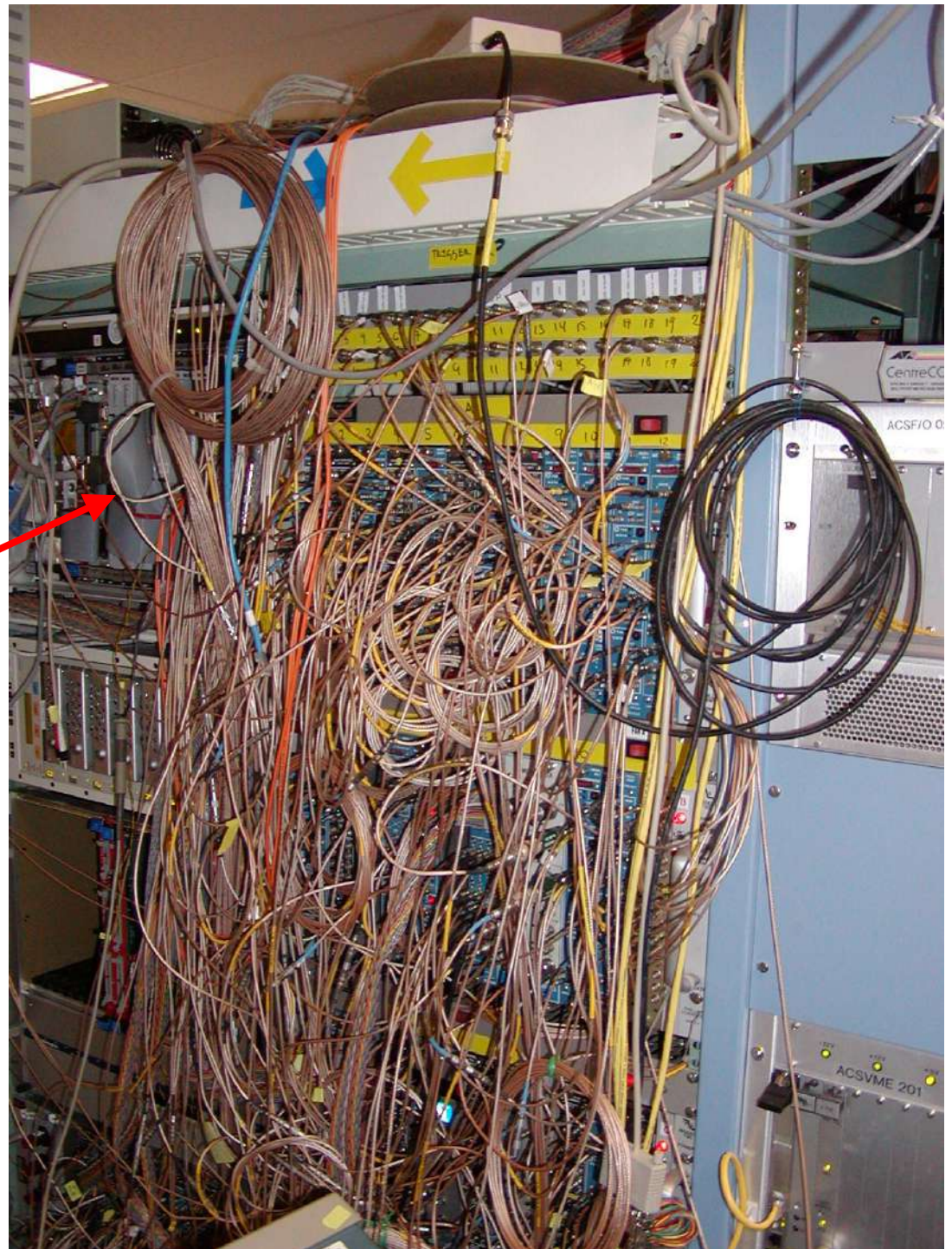
PHOBOS Spektrométer Trigger fal



G.I. Veres et al: Nuclear Instr. and Meth., előkészületben

PHOBOS Trigger áramkör....

Spektrométer trigger jelek

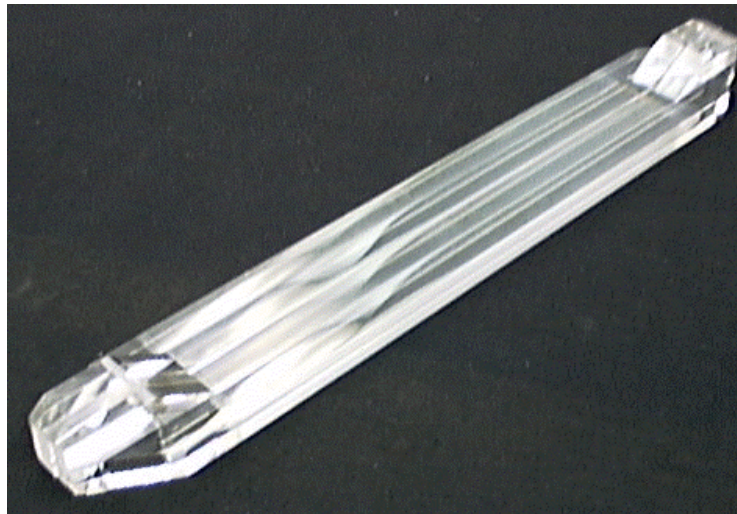


A repülési idő mérése: a részecskék **azonosításának** eszköze

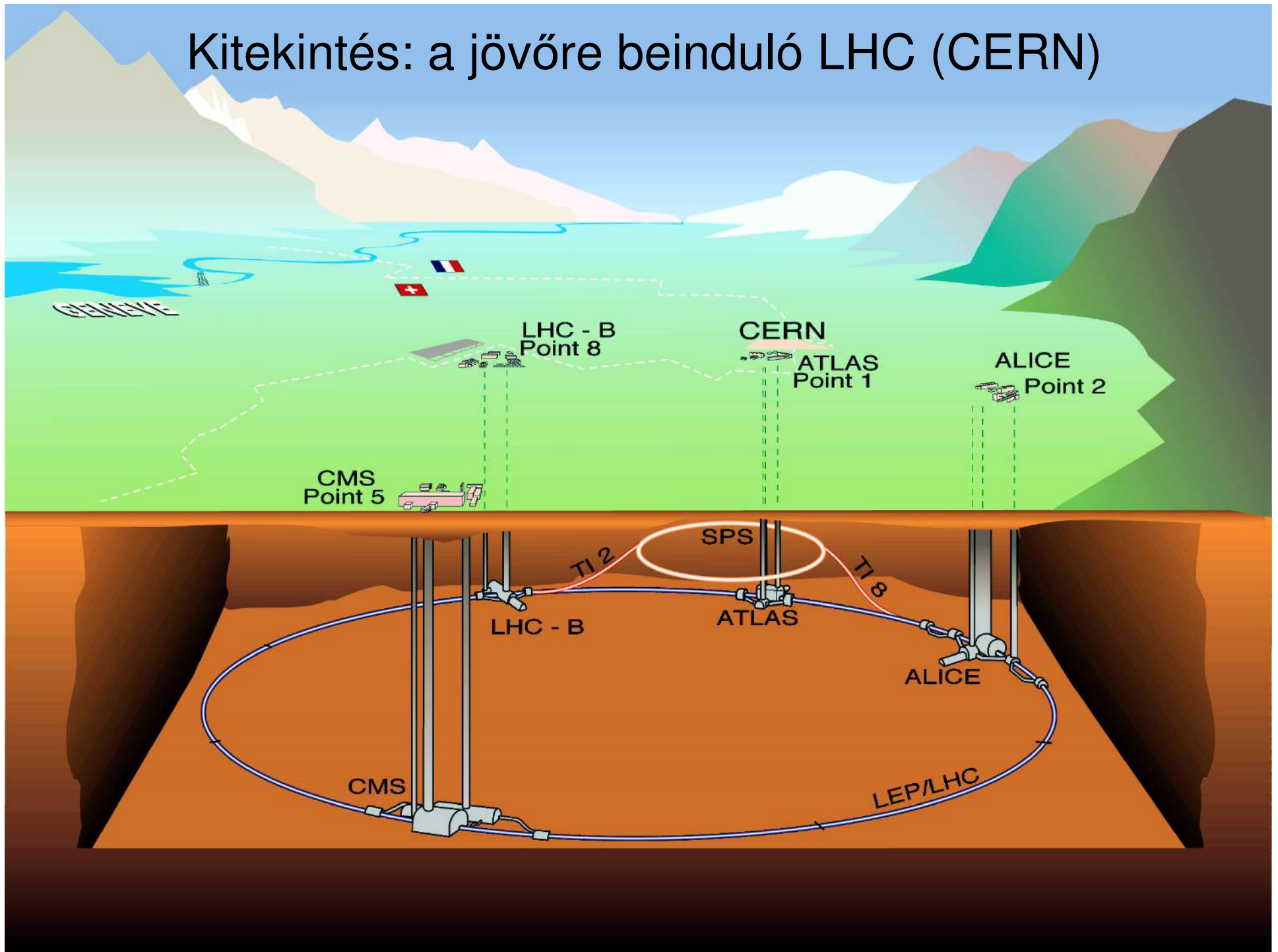
- Öt évig tartó fejlesztő munka
- 10^{-10} s alatti időfelbontás (3 fény-cm!)
- Három évig tartó adatfelvétel és kiértékelés



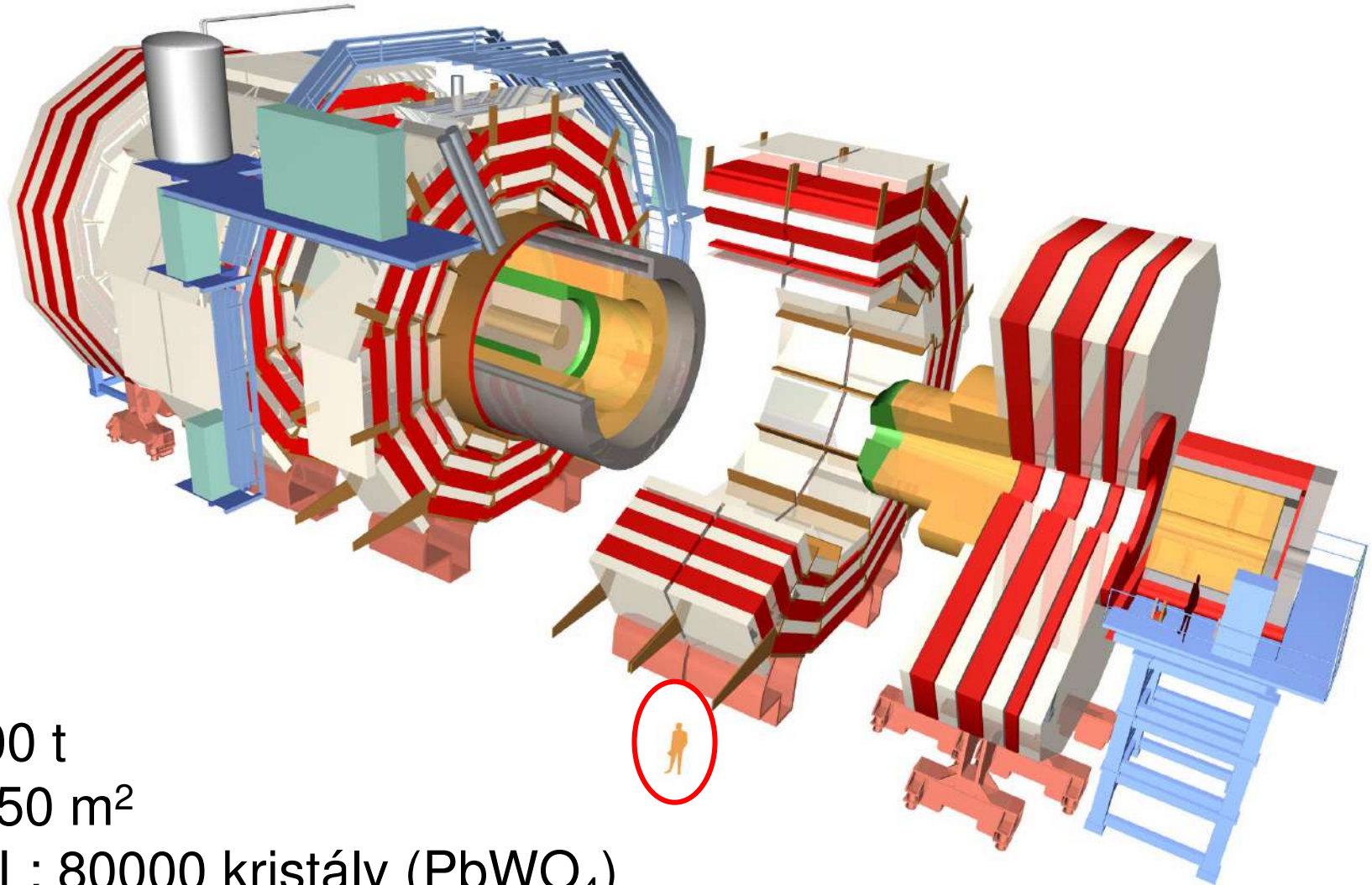
PHOBOS repülési idő fal



Kitekintés: a jövőre beinduló LHC (CERN)



A CMS detektor



12500 t

Si: 250 m²

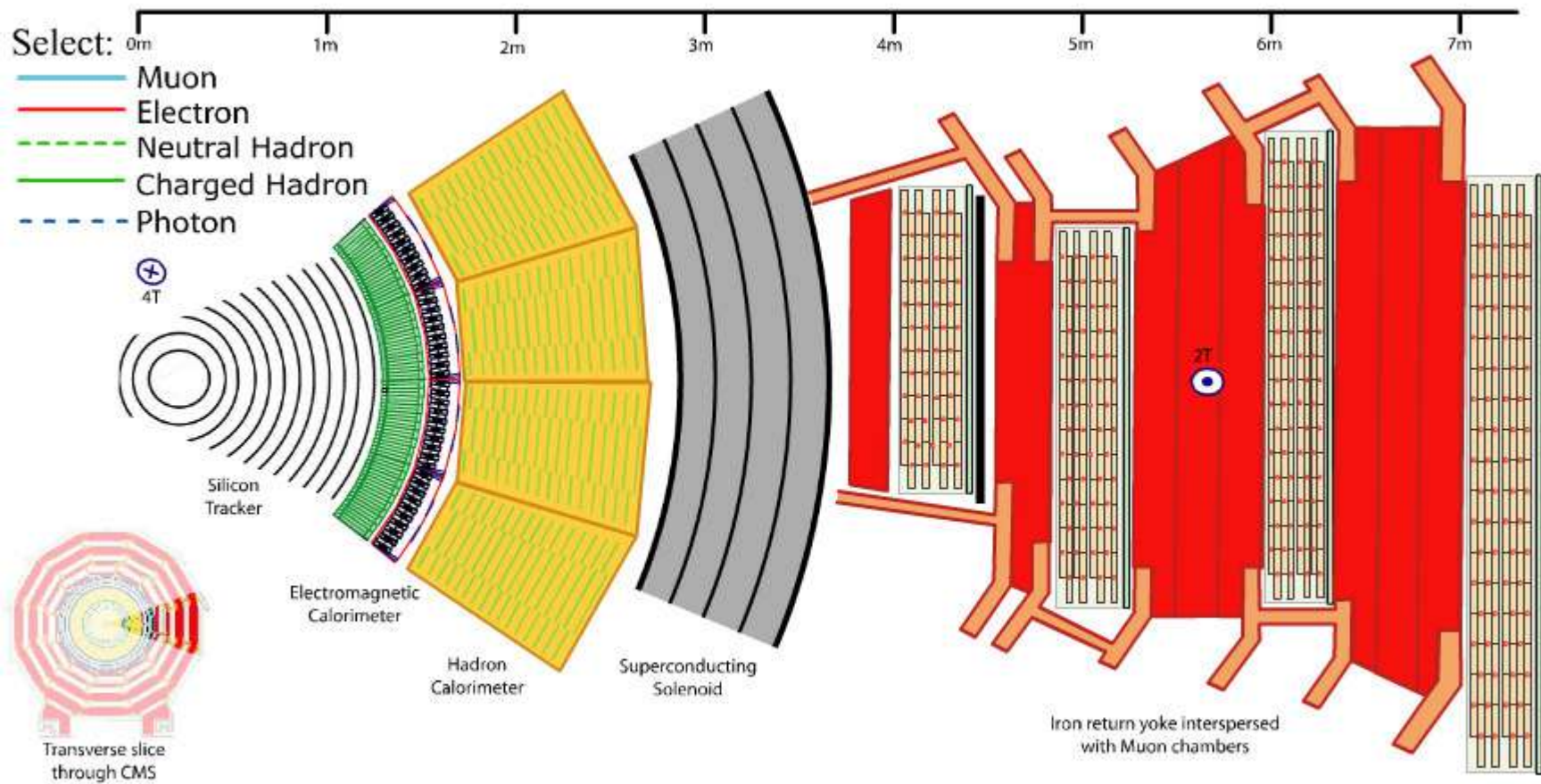
ECAL: 80000 kristály (PbWO₄)



A CMS mágnes vasmagja
(Eiffel-torony)
már összeszerelve,
de még a felszínen

Benne lesz a valaha épült
Legnagyobb szolenoid (4T)

A CMS detektor keresztmetszete



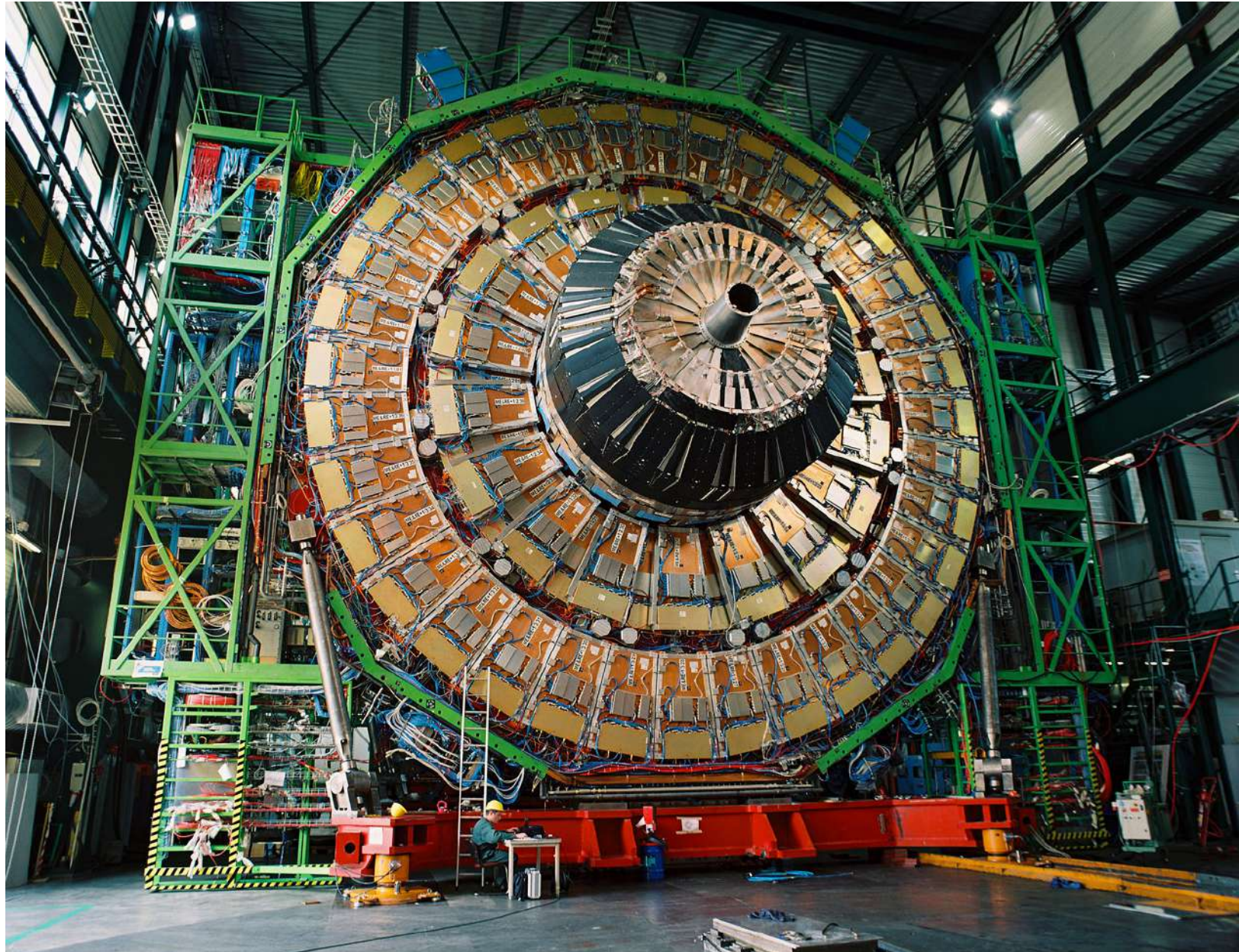
A CMS helye 2000-ben (Genf mellett)



A mágnes vasmagja



Egy CMS gyűrű a szerelőcsarnokban



A kísérleti csarnok a föld alatt

2003



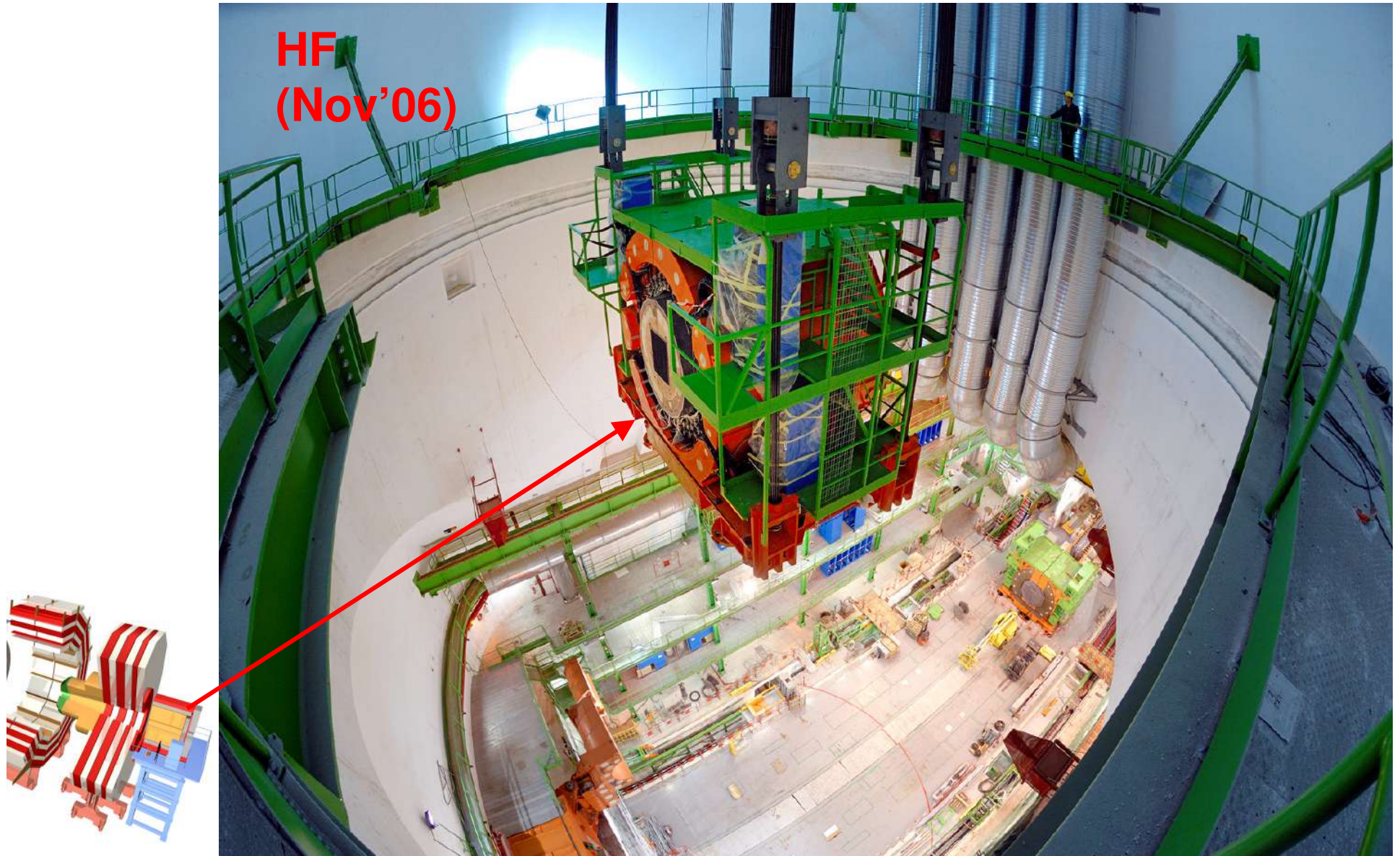
2004



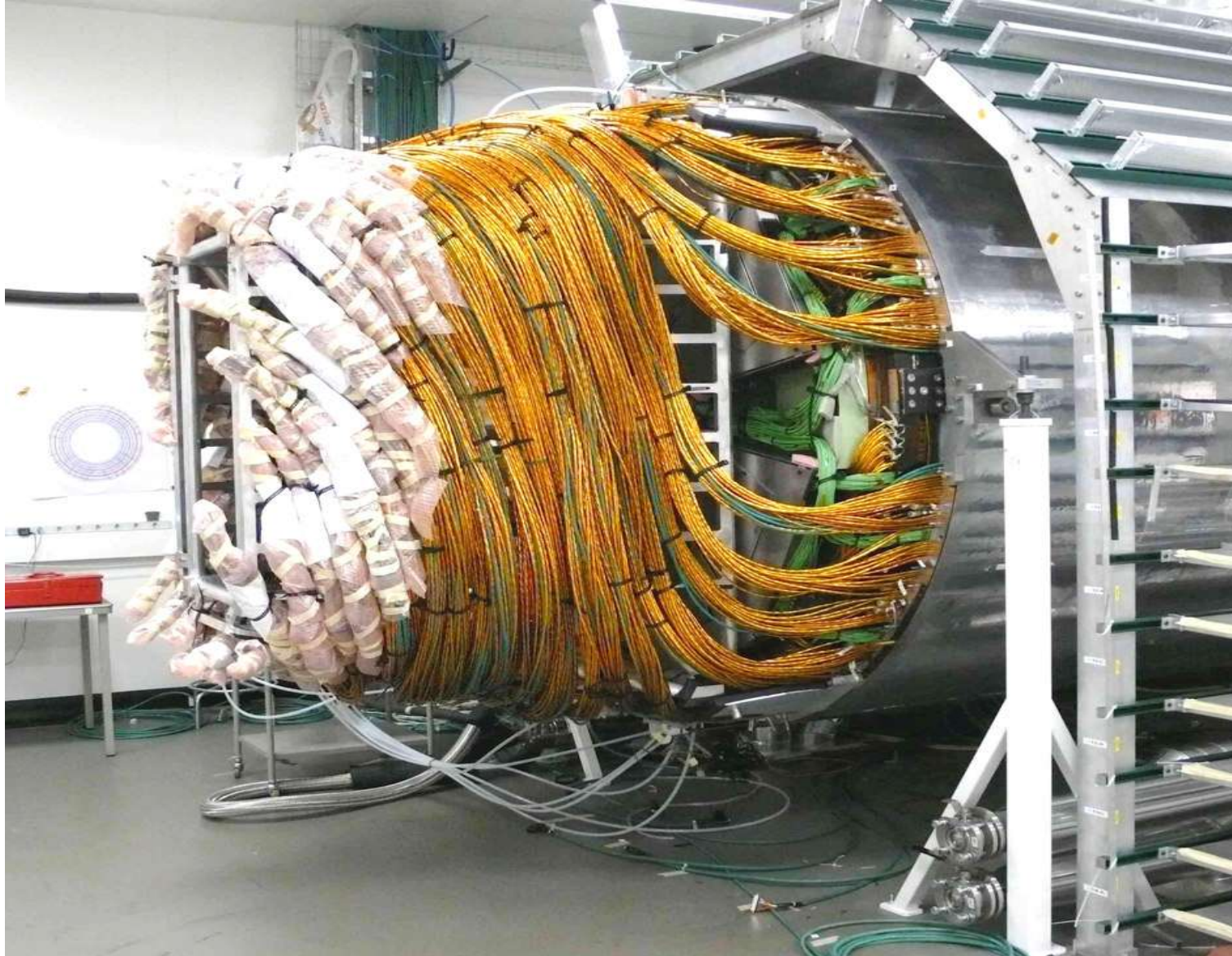
A felszíni szerelőcsarnok



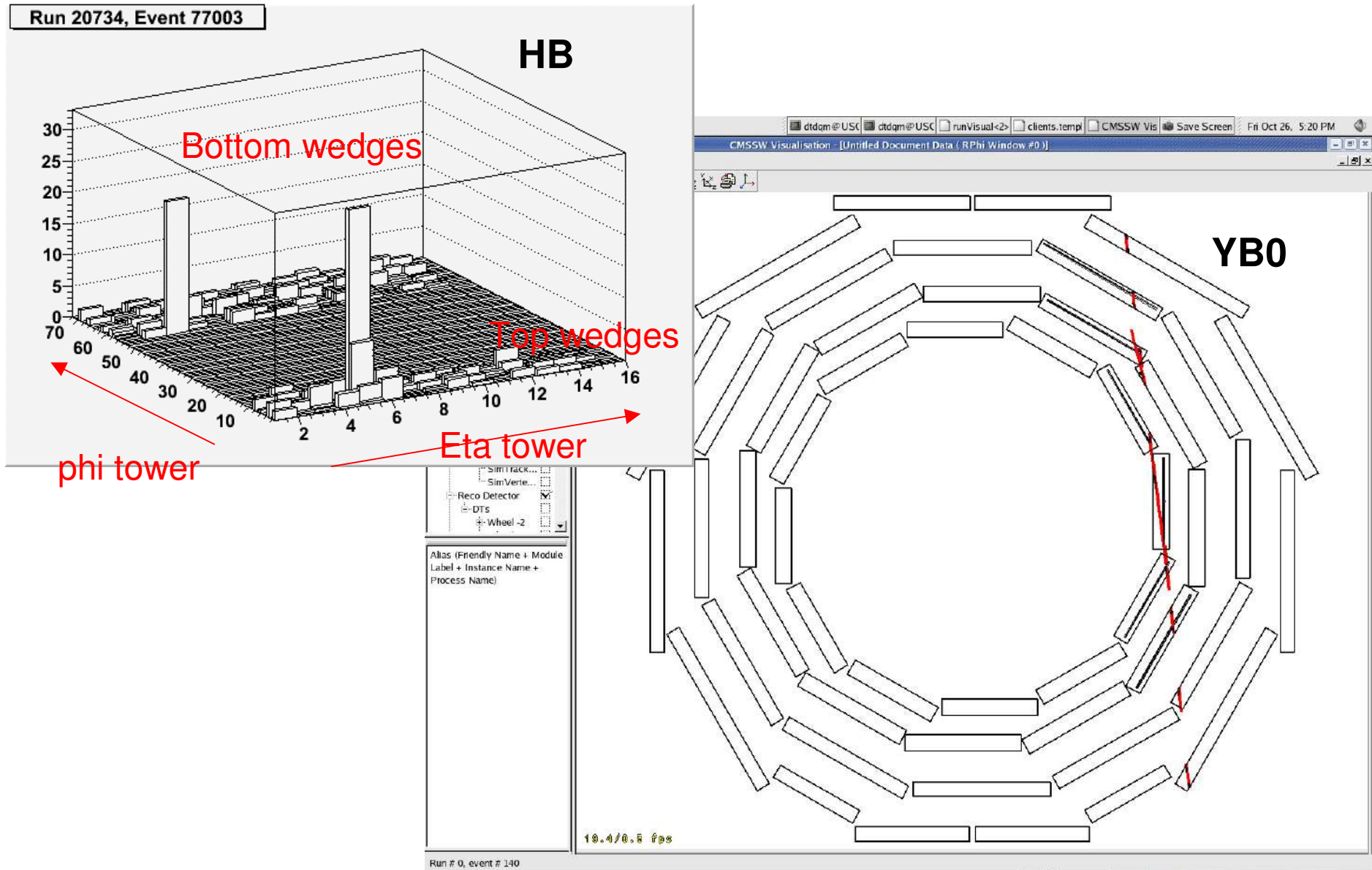
A kaloriméter leeresztése daruval



Szilícium nyomkövető



Kozmikus müonok mérése a föld alatt



Nyomkövető megérkezése a helyszínre

2007. december 13, 03:00

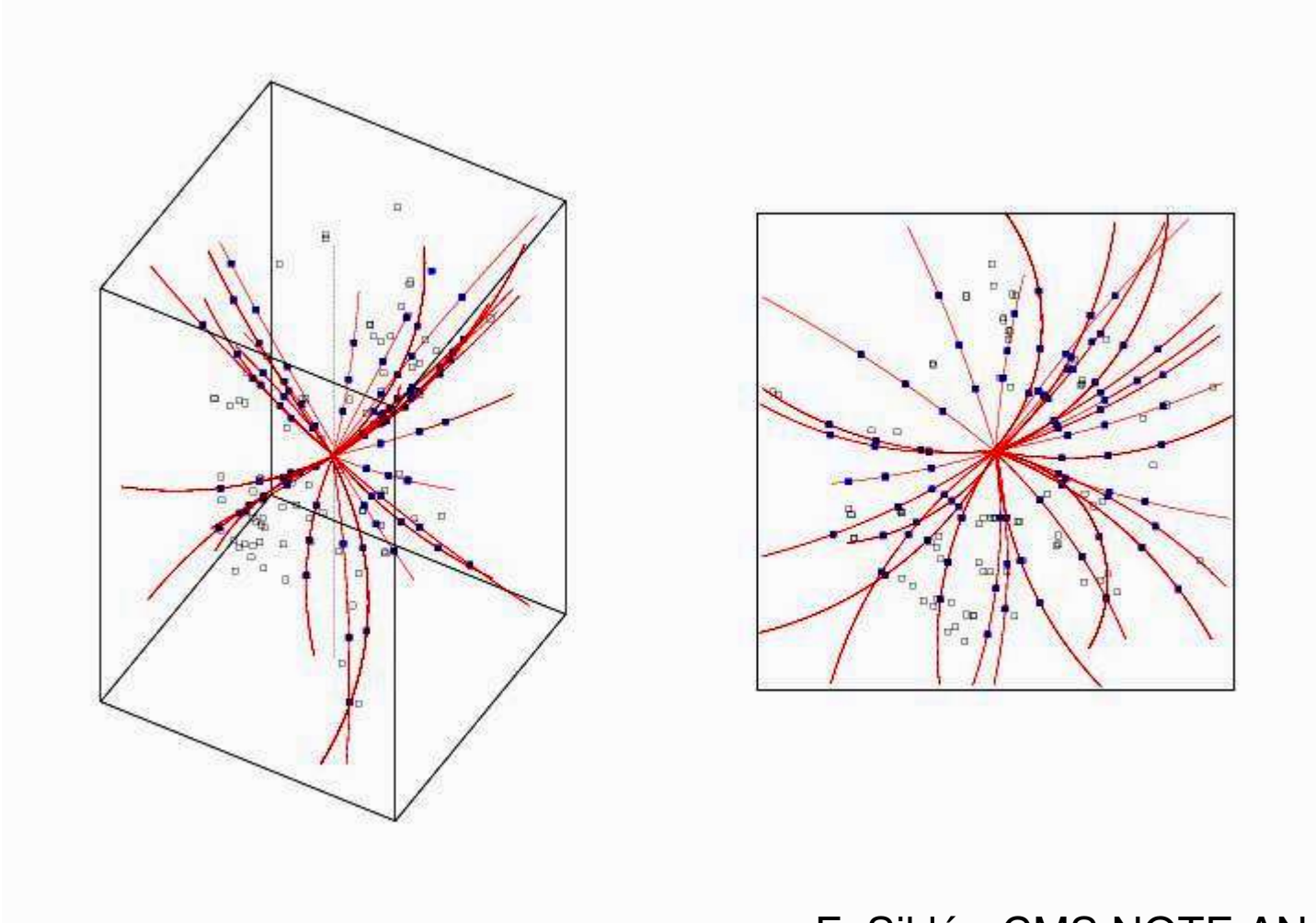


~ 3 am 13/12/07.

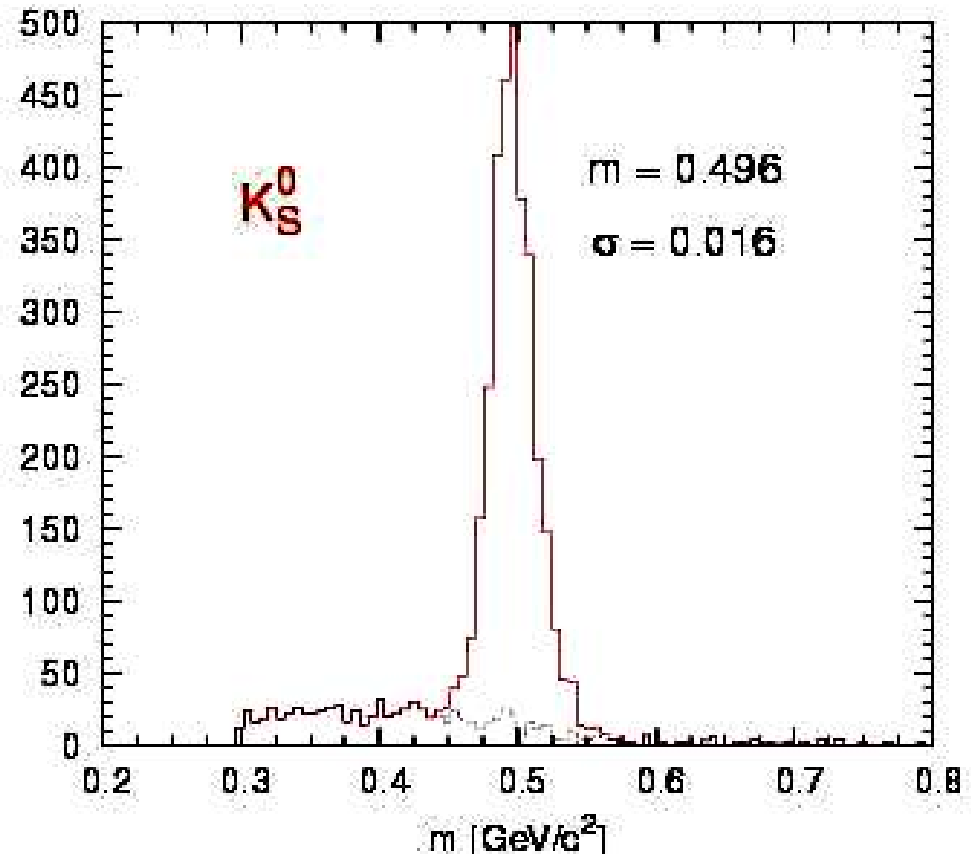
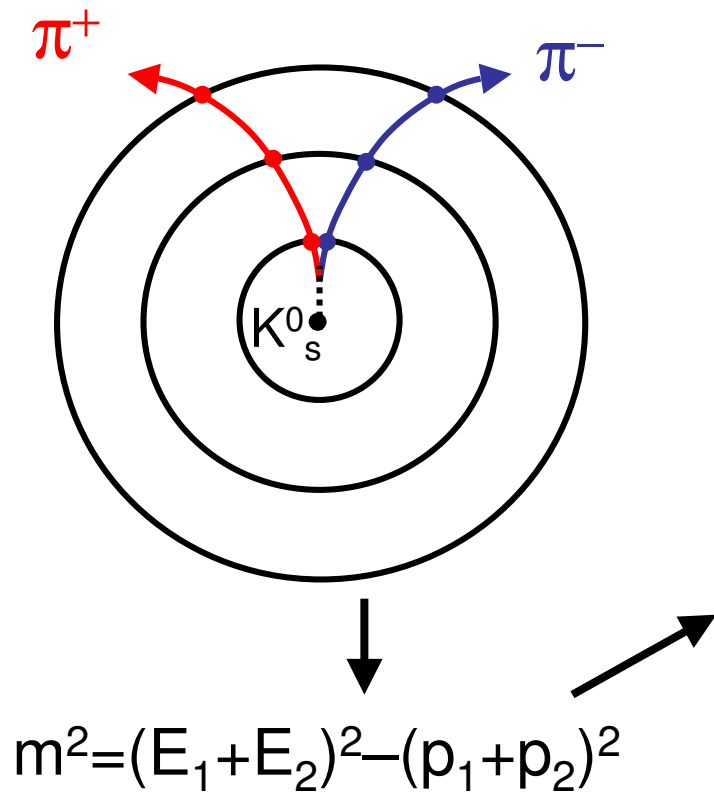
Elektromágneses kaloriméterek: fotonok és elektronok detektálása



Egy proton-proton ütközés képe



Példa: K_s^0 tömegspektrum p+p ütközésekben



ELTE részvétel a CMS-ben

Formálisan 26 intézmény, fontosabbak:

MIT, Moszkva, Budapest, UIC, Lyon, Kansas, Los Alamos.

Kb. 30 aktív kutató.

CMS (2000 fő) négy analízis csoporttal rendelkezik:
nehézionok, Higgs, Standard Model, SUSY/BSM.

Csoportunk:

RMKI: Siklér Ferenc

ELTE: V.G., Krajczár Krisztián, Patay Gergely

CMS



**High Density QCD
with Heavy Ions**

Physics Technical Design Report vol. III.

Két fejezet ennek a magyar
csoportnak a munkája!

Cikkünk előkészületben:

Proton-proton minimum bias események,
részecskespektrumok (azonosított és
azonosítatlan)

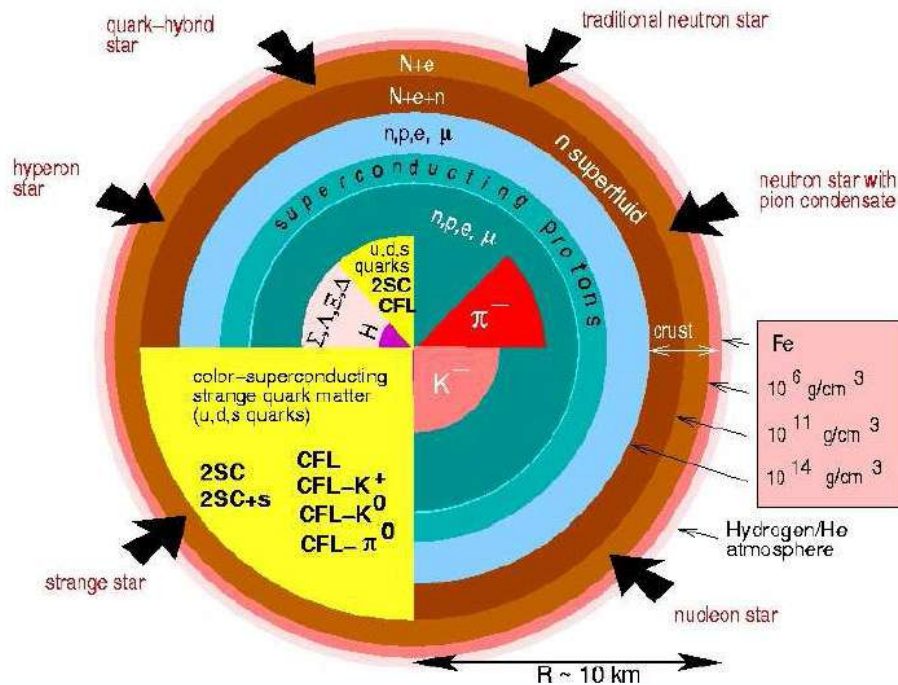
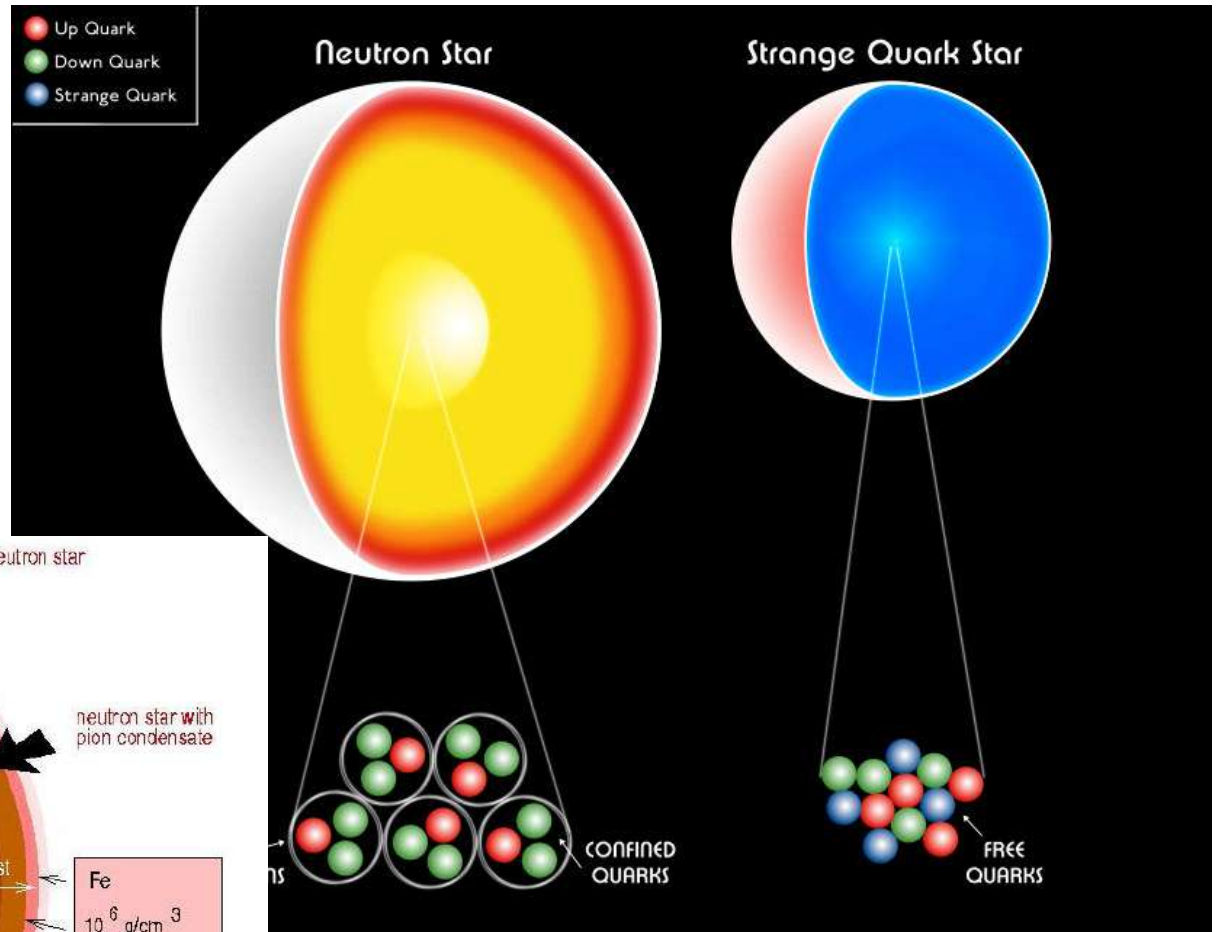
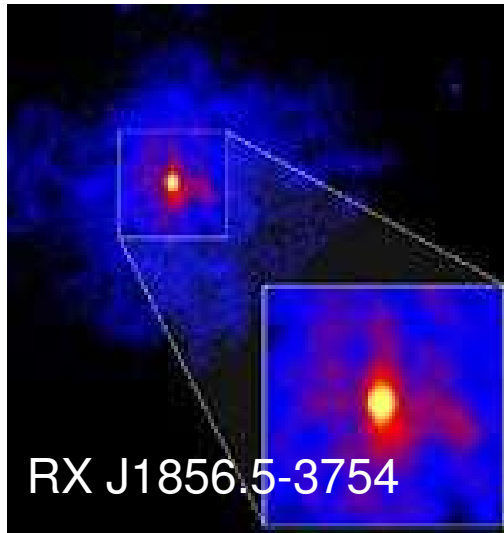
- a CMS egyik első publikációja lehet!

Van-e mindennek köze a csillagokhoz?

Ma már a csillagászoknak is kell tudniuk a részecskefizikát...

⇒ asztro-részecskefizika.

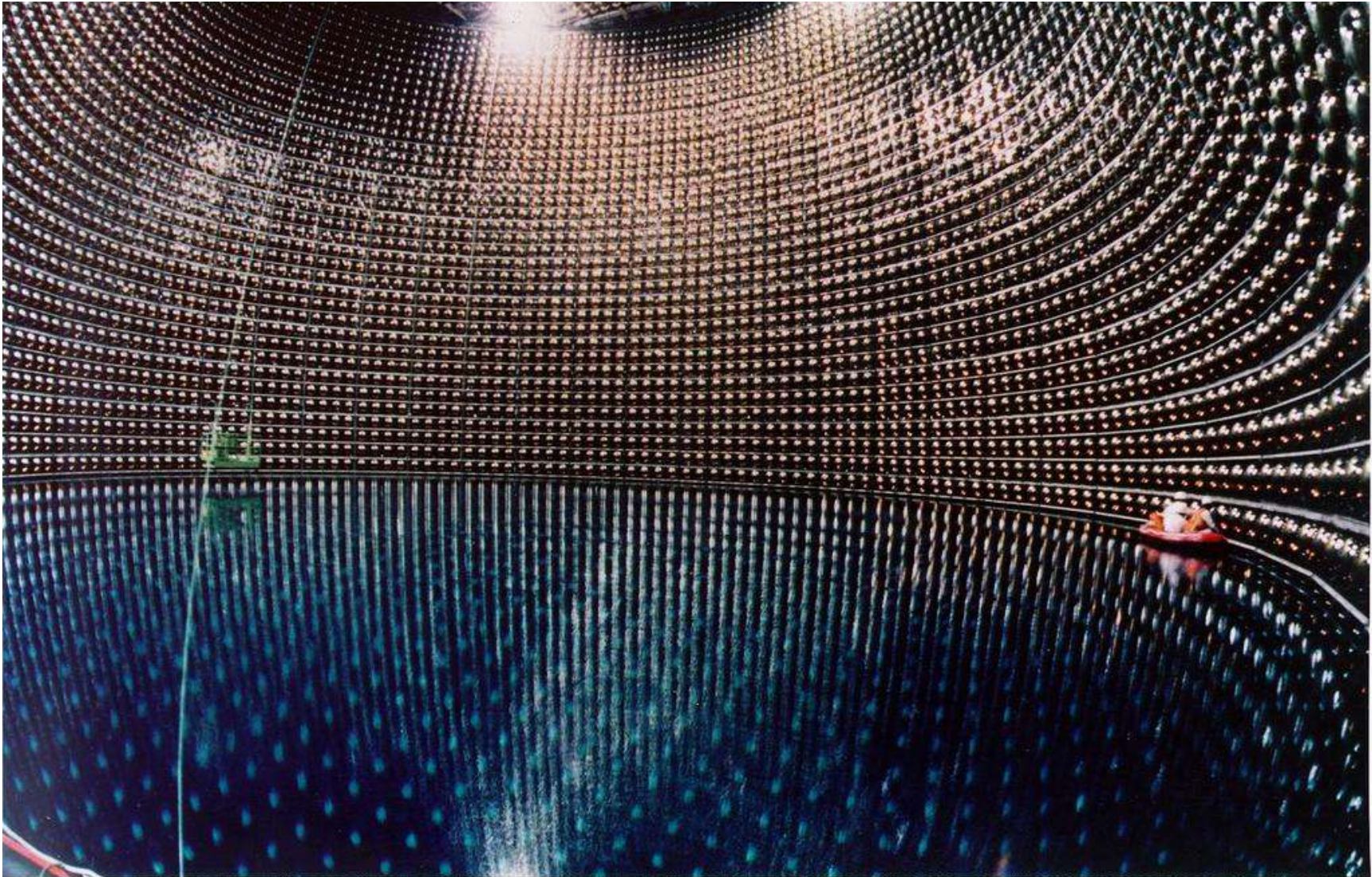
Asztrofizika: neutron- és kvarkcsillagok

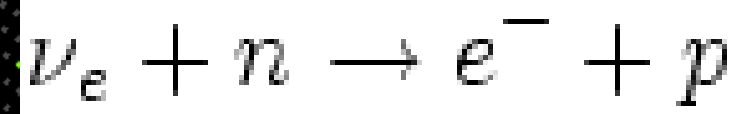
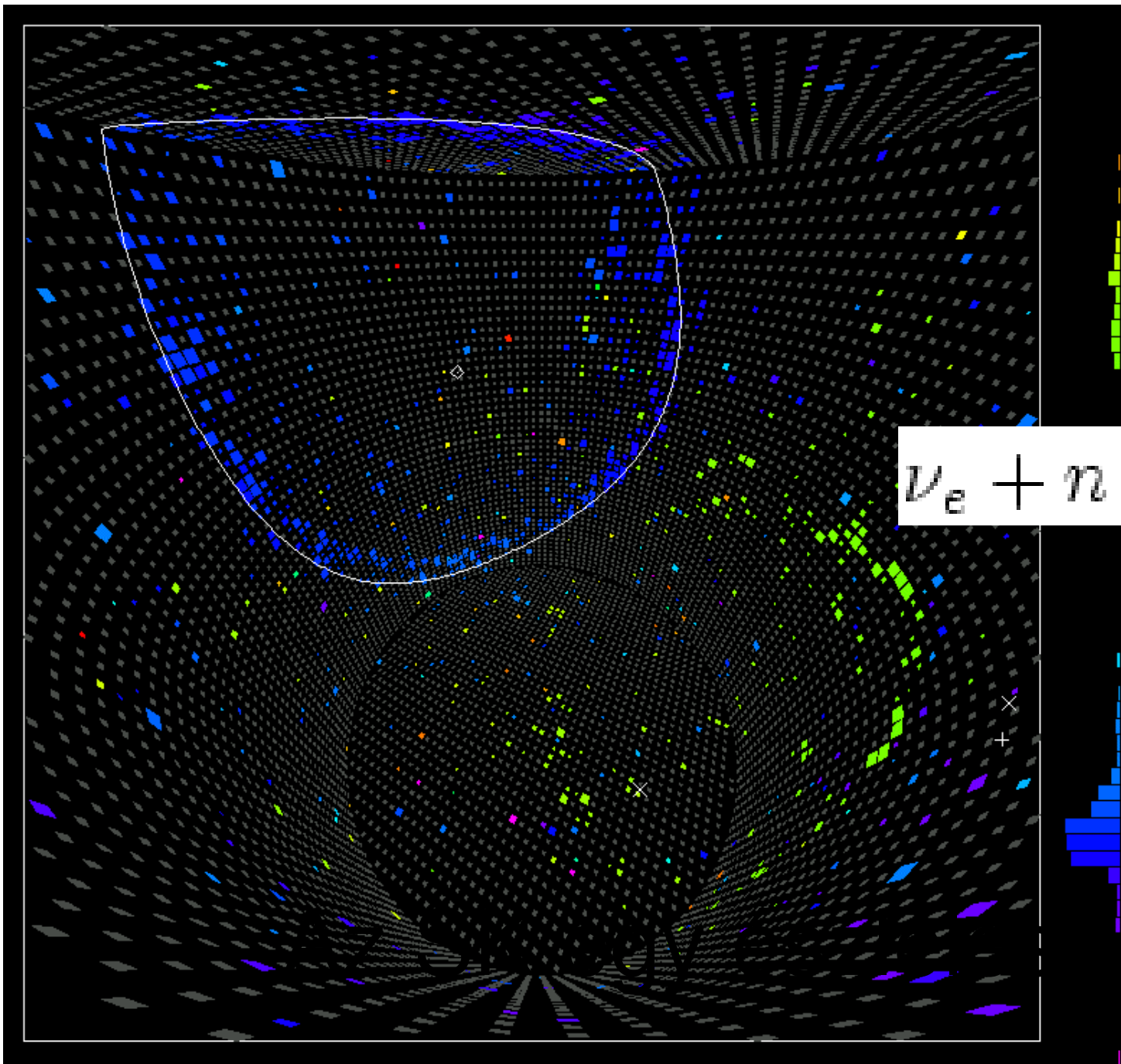


Ehhez hasonlóan állítunk elő nehézion-
ütköztetési kísérletekben!

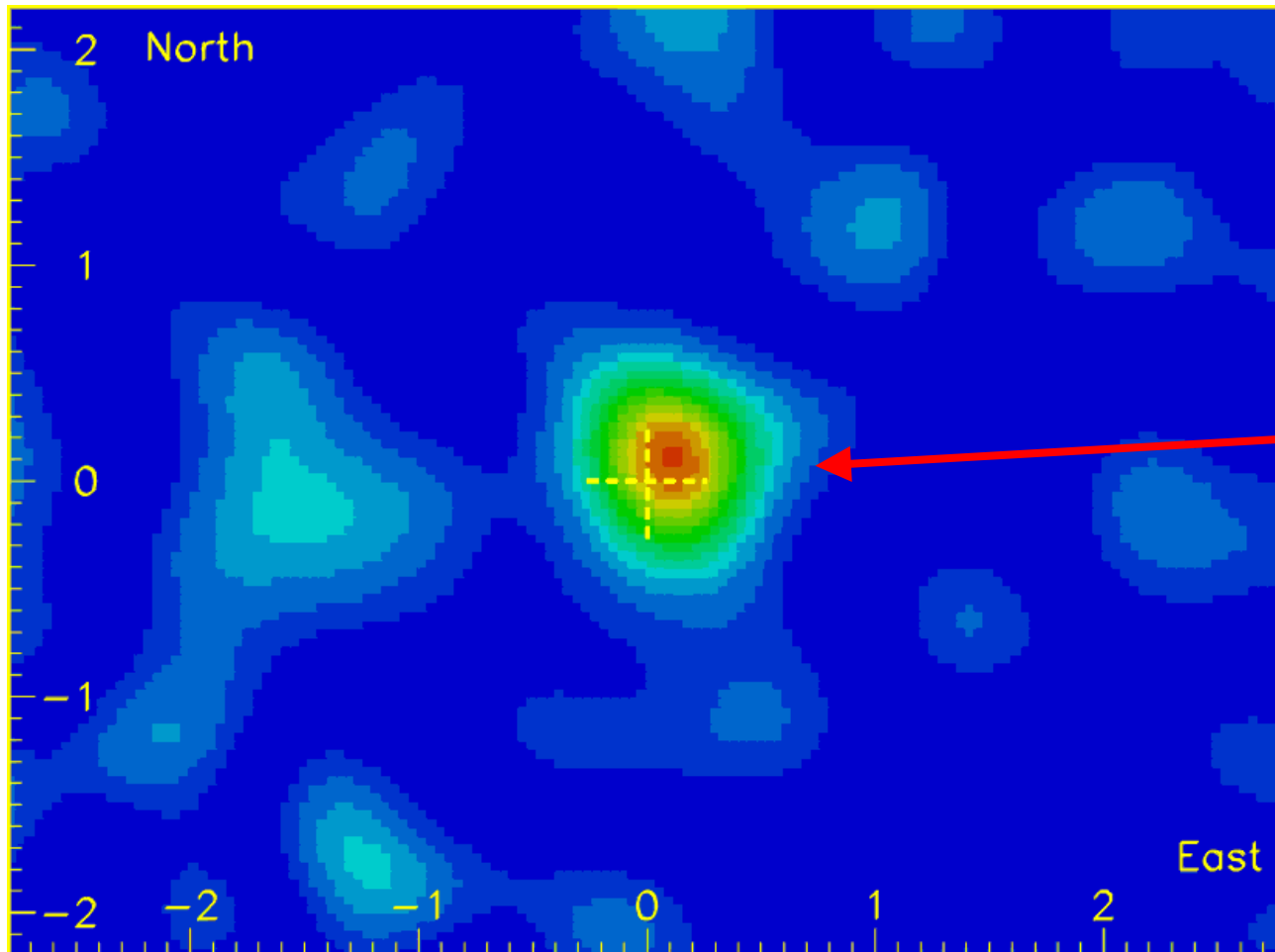
A Super-K egy csónakkal

A világúrból érkező **neutrínókat** figyelő hatalmas „távcső”





A Hold képe föld alatti müonok detektálásával



Az Univerzum története

Részecskegyorsítók

**NAGY
BUMM**

Inflation



t	10^{-44}	10^{-37} s
T	10^{32}	10^{28}
E	10^{19}	10^{15}

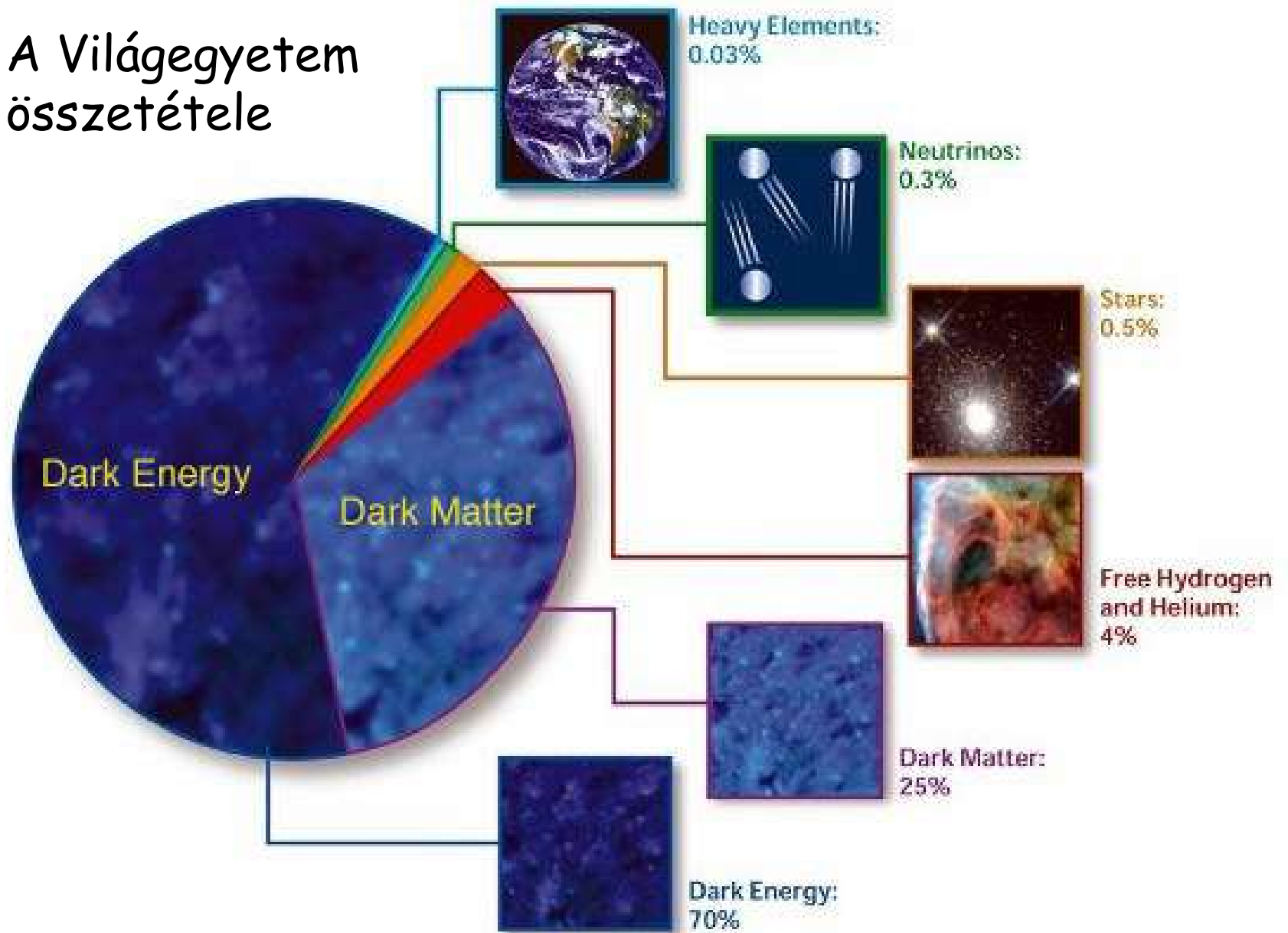
possible dark matter relicts

cosmic microwave radiation visible

Key:

W, Z bosons	photon
quark	meson
gluon	baryon
electron	ion
muon	atom
tau	star
neutrino	galaxy
	black hole

A Világegyetem összetétele



Összefoglalás

- A fizika sok alapvető kérdésére a kis mérettartományokban keressük a választ
- Ez nagy energiájú részecskék előállításával lehetséges
- A keletkező részecskéket érzékelnünk kell, nehéz technikailag
- Mindez nemcsak az ATOMOK, hanem a CSILLAGOK megértéséhez is kell!
- Most érdemes csatlakozni a kutatáshoz: sok új felfedezés várható
- Nagyon változatos ELTE részvétel a kísérletekben:
 - LHC gyorsító, CMS, és TOTEM kísérlet (CERN, Genf)
 - RHIC gyorsító, PHENIX és PHOBOS kísérlet (New York, USA)
 - NSCL, Michigan State University (East Lansing, Michigan, USA)
 - SPS gyorsító, NA49 és NA61 kísérlet

**Jövőre indul az LHC,
a világ legnagyobb részecskegyorsítója!**

MINDENKINEK KELLEMEK ÜNNEPEKET!!!

