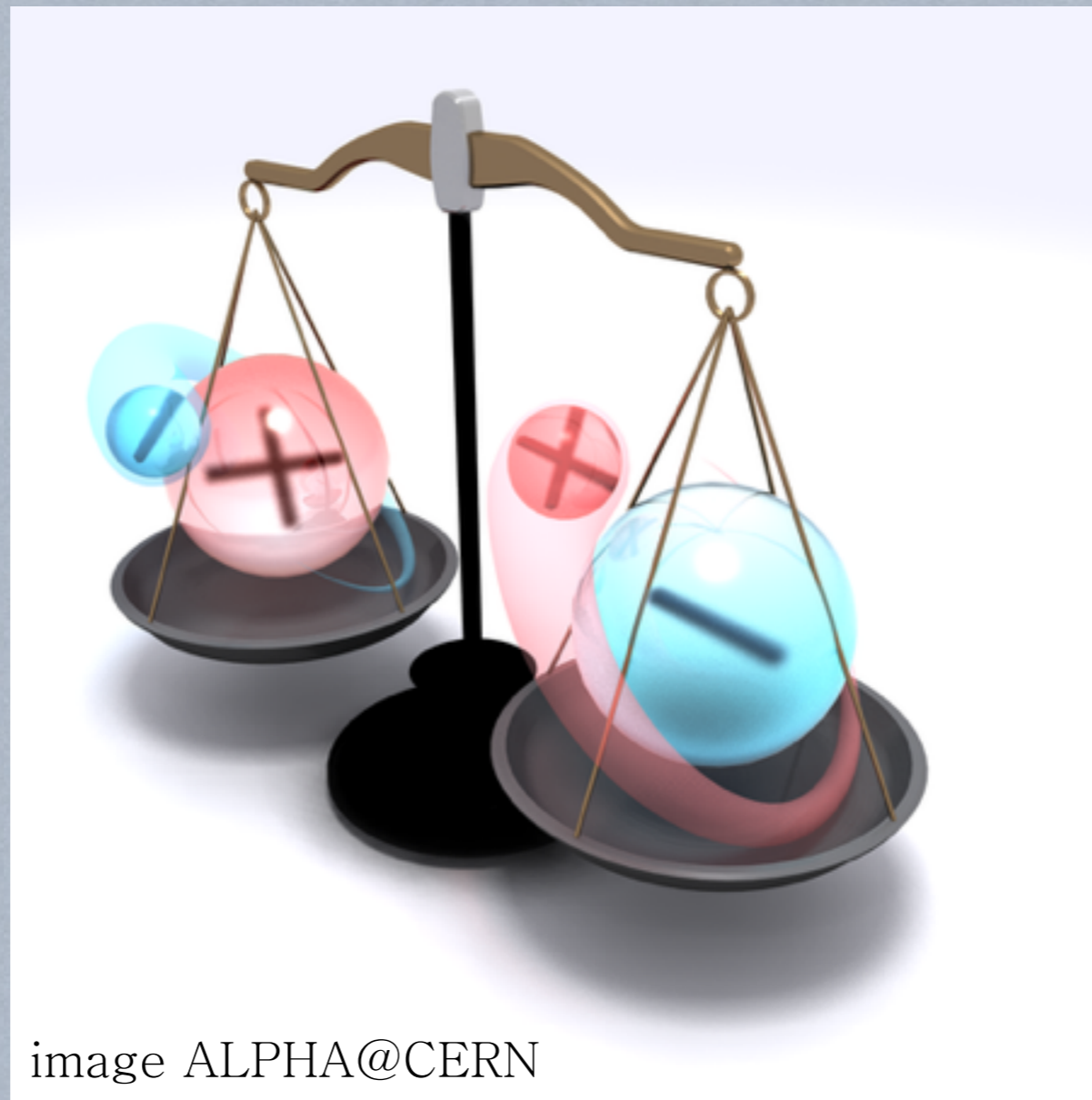


# Mérlegben az antianyag



Sótér Anna, Max Planck Kvantumoptikai Intézet  
[anna.soter@cern.ch](mailto:anna.soter@cern.ch)

# Áttekintés

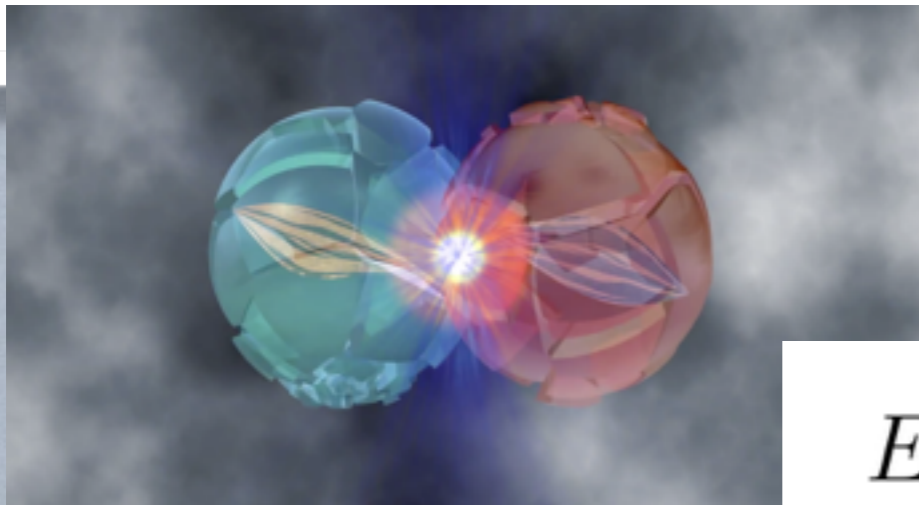
- Mik azok az antirészecskék, és miért vizsgáljuk őket?
- Hogyan mérjük az antianyag tehetetlen és súlyos tömegét?
- Antihélium csapdázása, antihélium nyalábkísérletek
- Lézerspektroszkópiai mérések antiprotonos héliumon
- Mérési technikák és eszközök az antianyag kutatásában

# Antirészecskék

- Az általunk ismert anyagot alkotó részecskéknek létezik egy antirészecske párja, mely semmi másban nem különbözik tőle, csak a töltése ellentétes.
- Találkozásukkor a részecske és antirészecske megsemmisítik egymást, és a tömegüknek megfelelő energia szabadul fel, fotonok és más részecskék formájában.

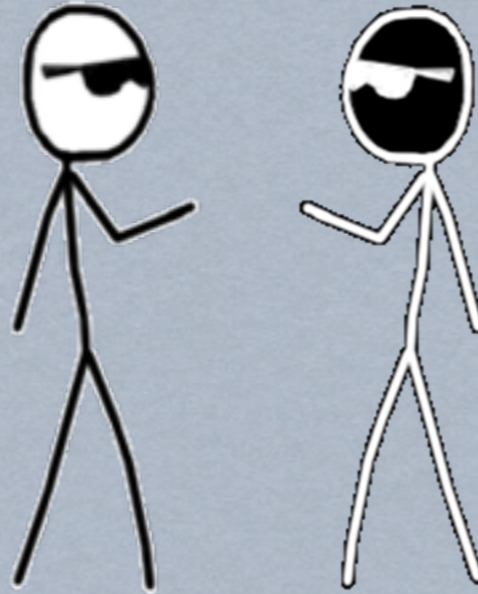
$$m_{\bar{p}} = m_p \quad Q_{\bar{p}} = -Q_p$$

Quarks		Anti-quarks	
$u$ up	$d$ down	$\bar{u}$	$\bar{d}$
$t$ top	$b$ bottom	$\bar{t}$	$\bar{b}$
$s$ strange	$c$ charm	$\bar{s}$	$\bar{c}$
Leptons		Anti-leptons	
$e$ electron	$\nu_e$ electron neutrino	$e^+$	$\bar{\nu}_e$
$\mu$ muon	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\bar{\mu}$	$\bar{\nu}_\mu$
$\tau$ tau	$\nu_\tau$ tau neutrino	$\bar{\tau}$	$\bar{\nu}_\tau$



$$E = mc^2$$

# Antipárok találkozása



100 kg

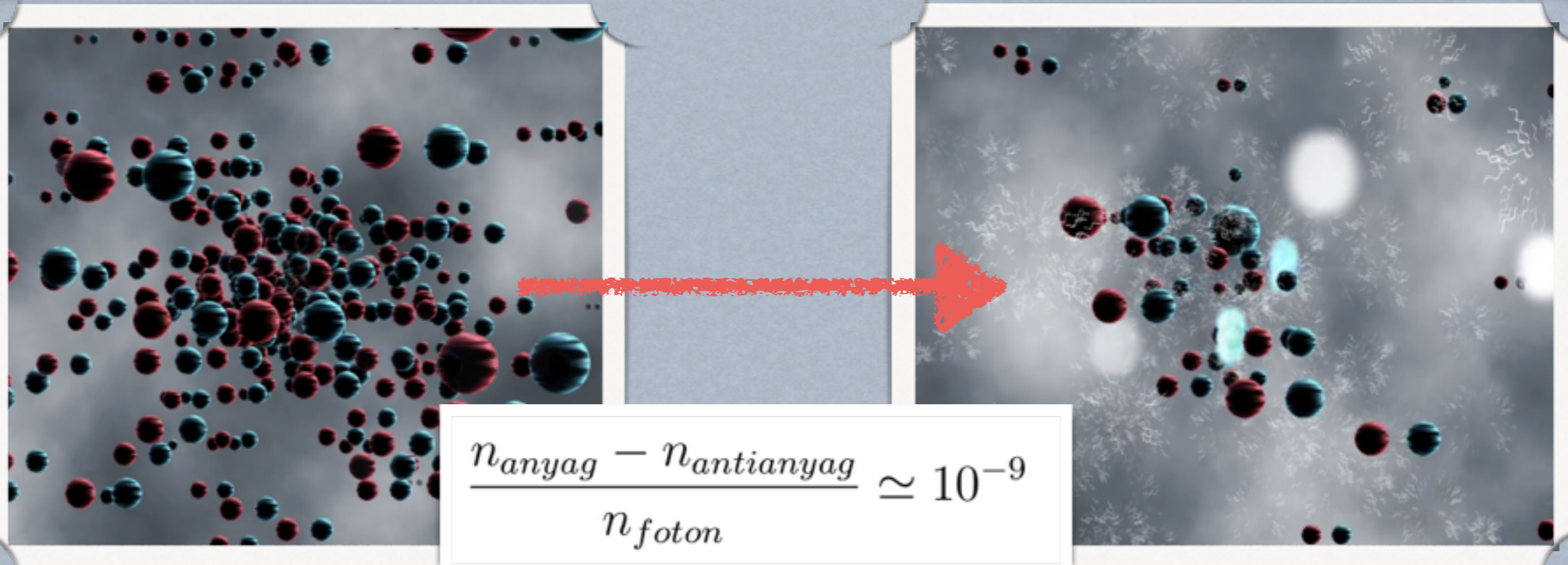
100 kg

$$E = mc^2$$

- Hozzávetőlegesen 500 nukleáris erőmű éves energia hozama ( $5 \times 10^{12}$  MWh)
- 4200 megatonna TNT robbanóereje

# A hiányzó antianyag problémája

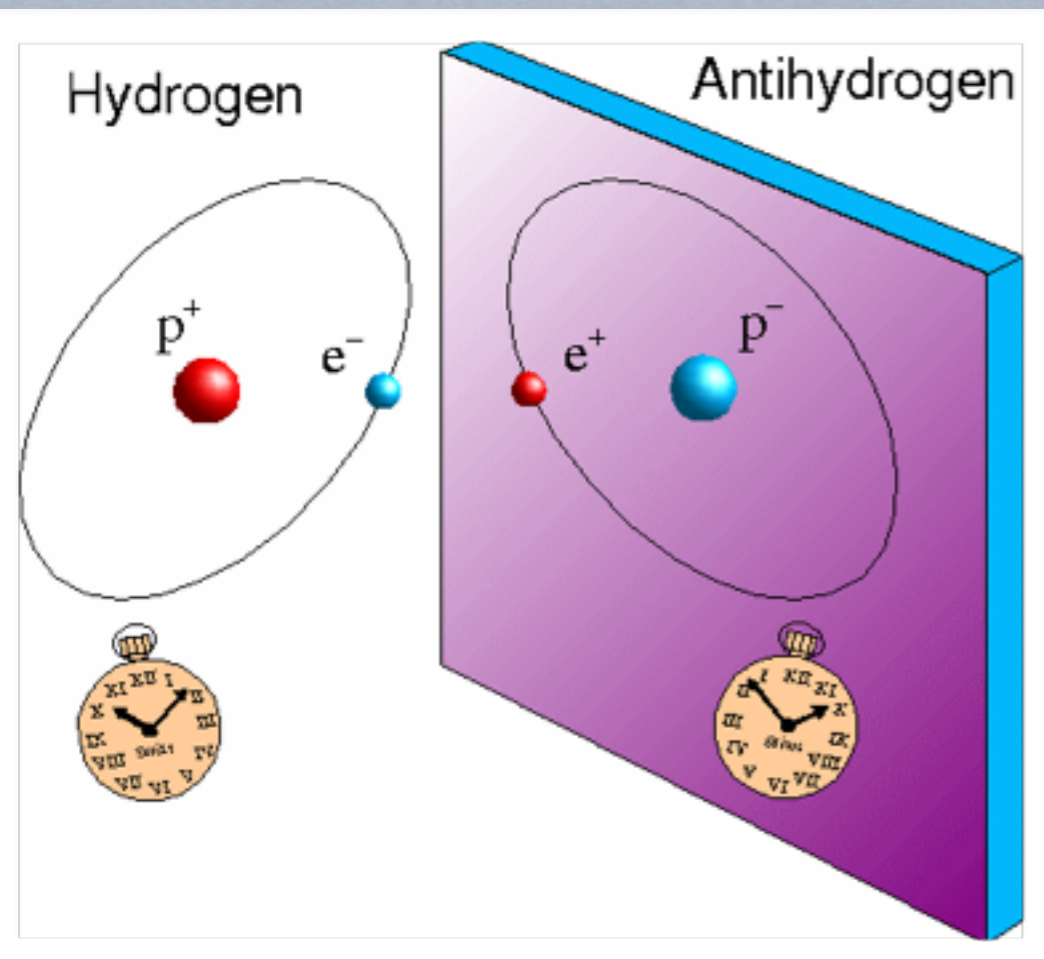
- A Világegyetemet csaknem teljes egészében anyag alkotja, holott az Ősrobbanás során párokban kellett volna keletkezniük (nagyenergiás ütközéseknél igaz!)



- miért látunk egyáltalán anyagot, miért nem semmisítették meg egymást a Világegyetem kezdeti szakaszában?

# Van valami különbség köztük?

- Részecske és antirészecske azonosságát a 'CPT szimmetria' mondja ki. Az antirészecske a számolásokban azonos egy időben visszafele haladó, ellentétes töltésű részecskével



- C - töltéstükrözés
- P - paritástükrözés
- T - időtükrözés



ismereteink szerint mikroszkopikus szinten a fizikai törvények változatlanok ennek a három műveletnek az együttes elvégzésére

# Mi magyarázza tehát az antirészecskék hiányát?

- Nincs rá kielégítő magyarázat, tehát érdemes kutatni!

- Stratégia: benézni a “szőnyeg alá” ott ahol tudunk, és összehasonlítani az anyagot az antianyaggal több szempontból

Ugyanaz-e a tömegük?

Ugyanaz-e a töltésük?

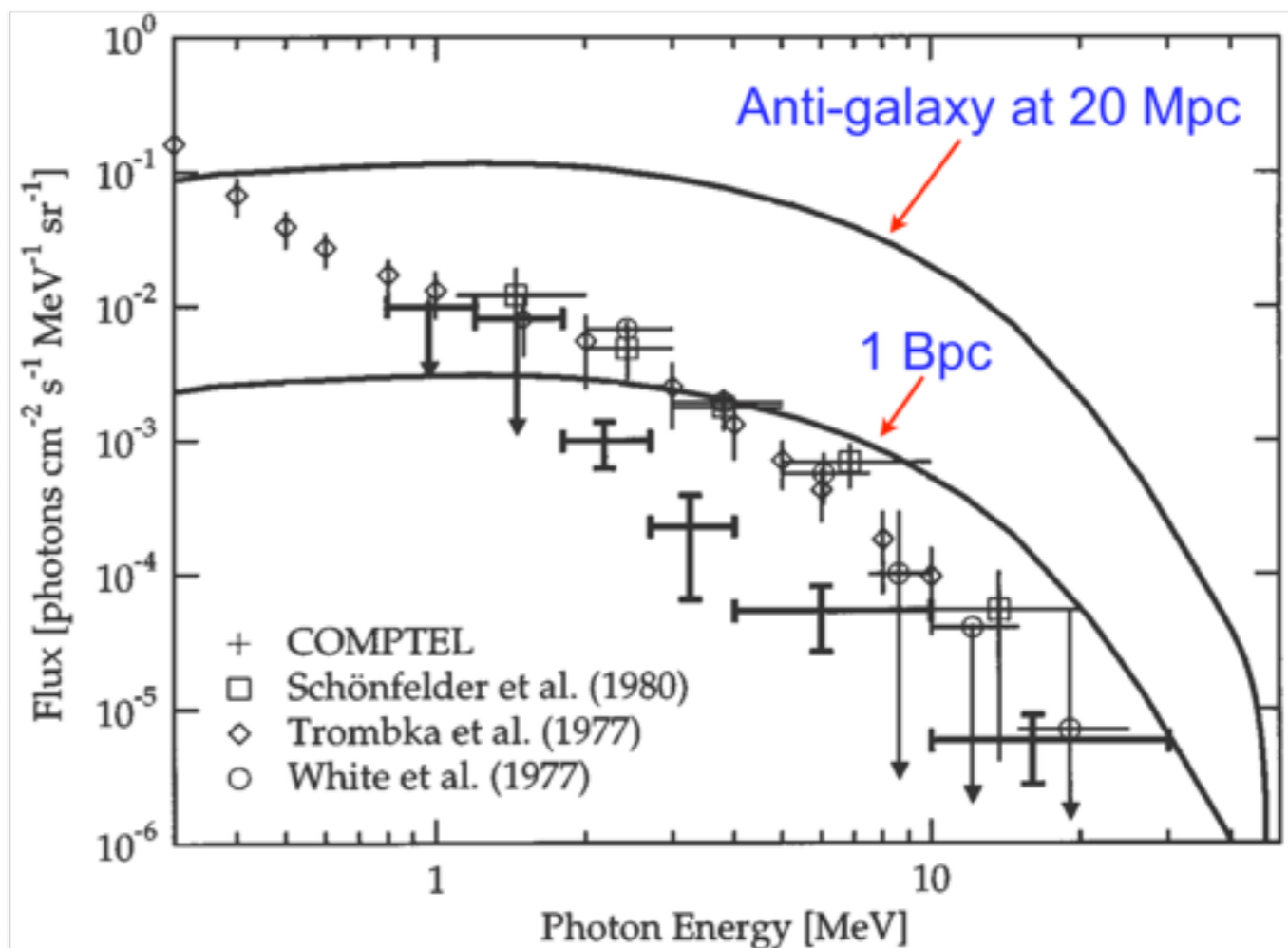
Ugyanúgy bomlanak-keletkeznek vagy sem?

Ugyanúgy viselkednek-e gravitációs térben?

# Antianyag kísérletek – atomoktól a csillagokig 1.

- Lehet hogy léteznek antianyag-szigetek a Világegyetemben (antigalaxisok)?
- Ha igen, anyag és antianyag tartományok határáról mérnünk kellene nagyenergiájú gamma sugárzás vagy antirészecskék megnövekedett fluxusát

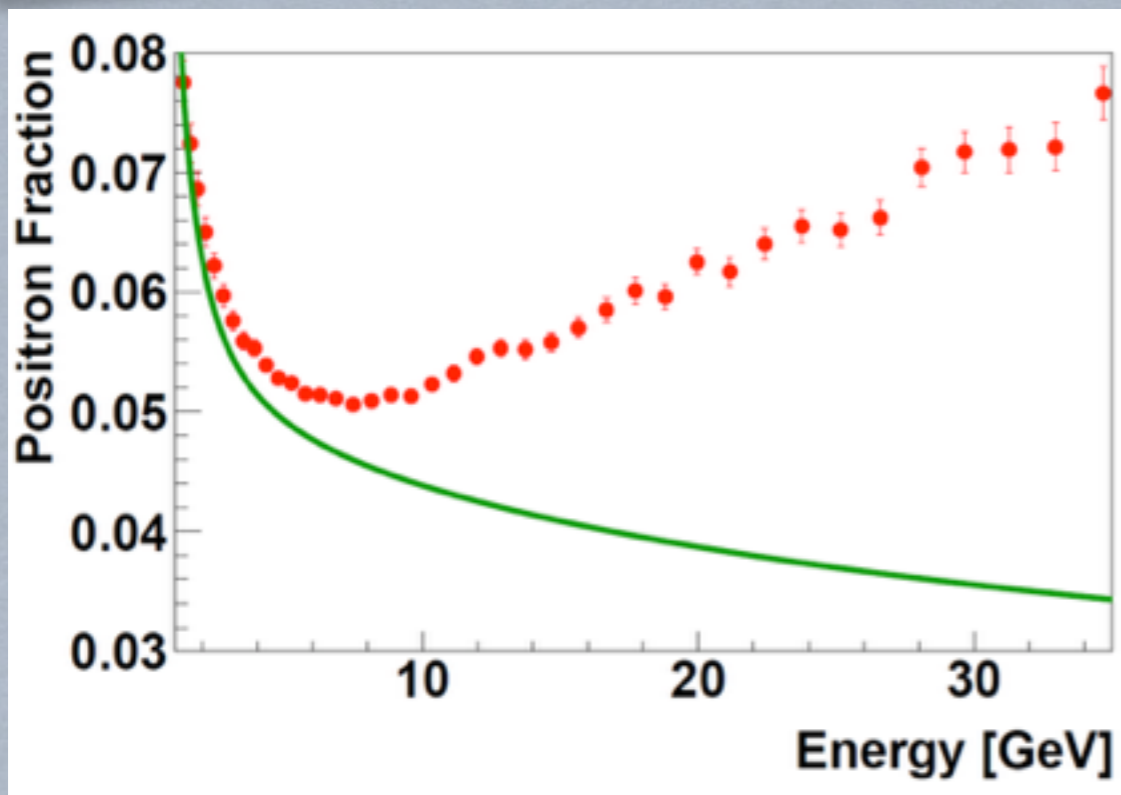
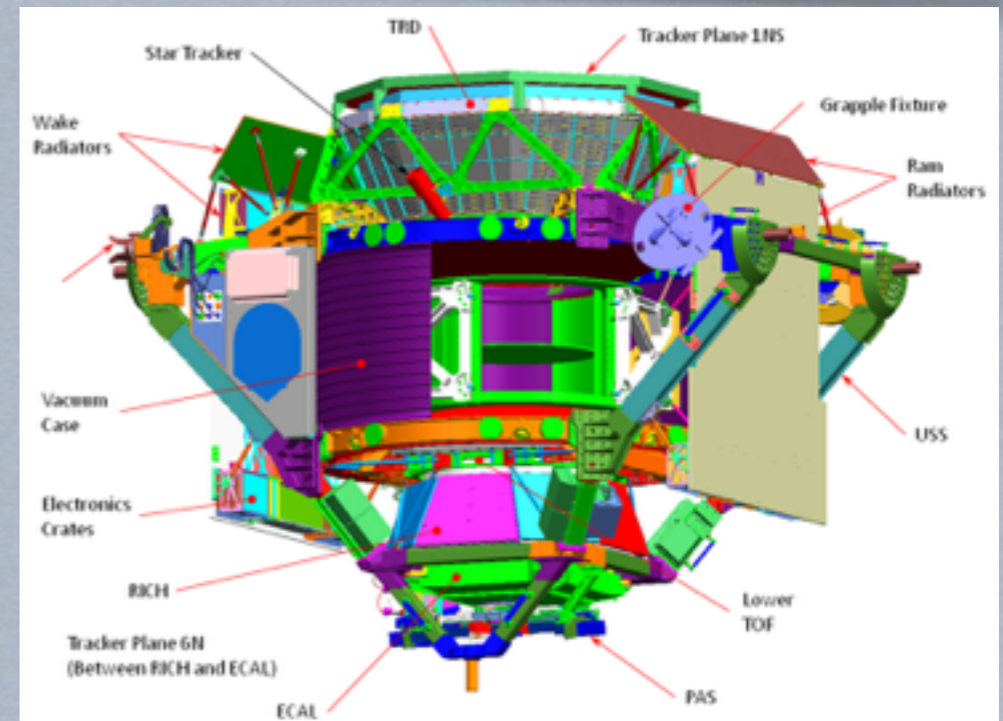
- Kozmikus gamma-sugárzás mérése





# Antianyag kísérletek – atomoktól a csillagokig 2.

- AMS-2, részecskefizikai kísérlet az űrben (41 milliárd esemény!)



- Új pozitron forrás, konzisztens egy  $\sim 1\text{TeV}$ -es sötét anyag részecske ütközéseivel
- esetleges különbség elektronok és pozitronok között (?)

- És még sok más... Neutrínók és antineutrínók vizsgálata szupernova-robbanásból kimutatta például, hogy neutrínók és antineutrínók fluxusa egyszerre érkezik, utalva a (súlyos) tömegük azonosságára

# Antianyag kísérletek – atomoktól a csillagokig 3.

- Az antianyag, mint láttuk, ritka jószág.
- ha nem hozott anyagból dolgozunk, elő kell állítanunk nagyenergiás ütésekkel

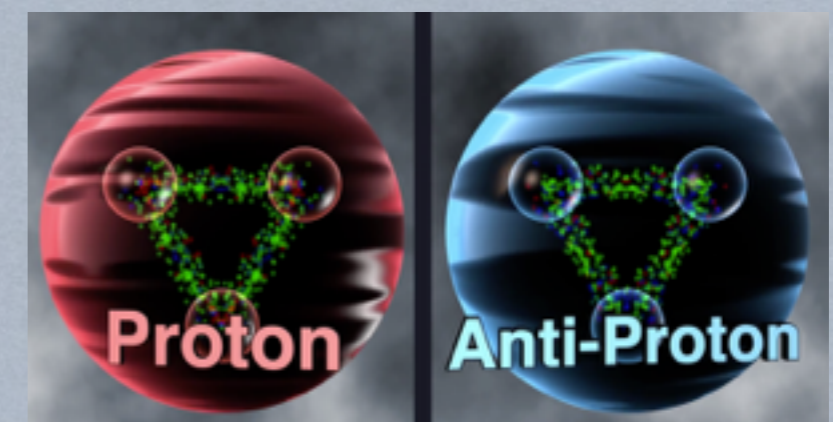
Ez lehetőséget ad új kísérletekre,

- Antihélium szintézise, csapdázása és lézerspektroszkópiája
- Antihélium szabadesése
- Antiprotonos hélium lézerspektroszkópiája

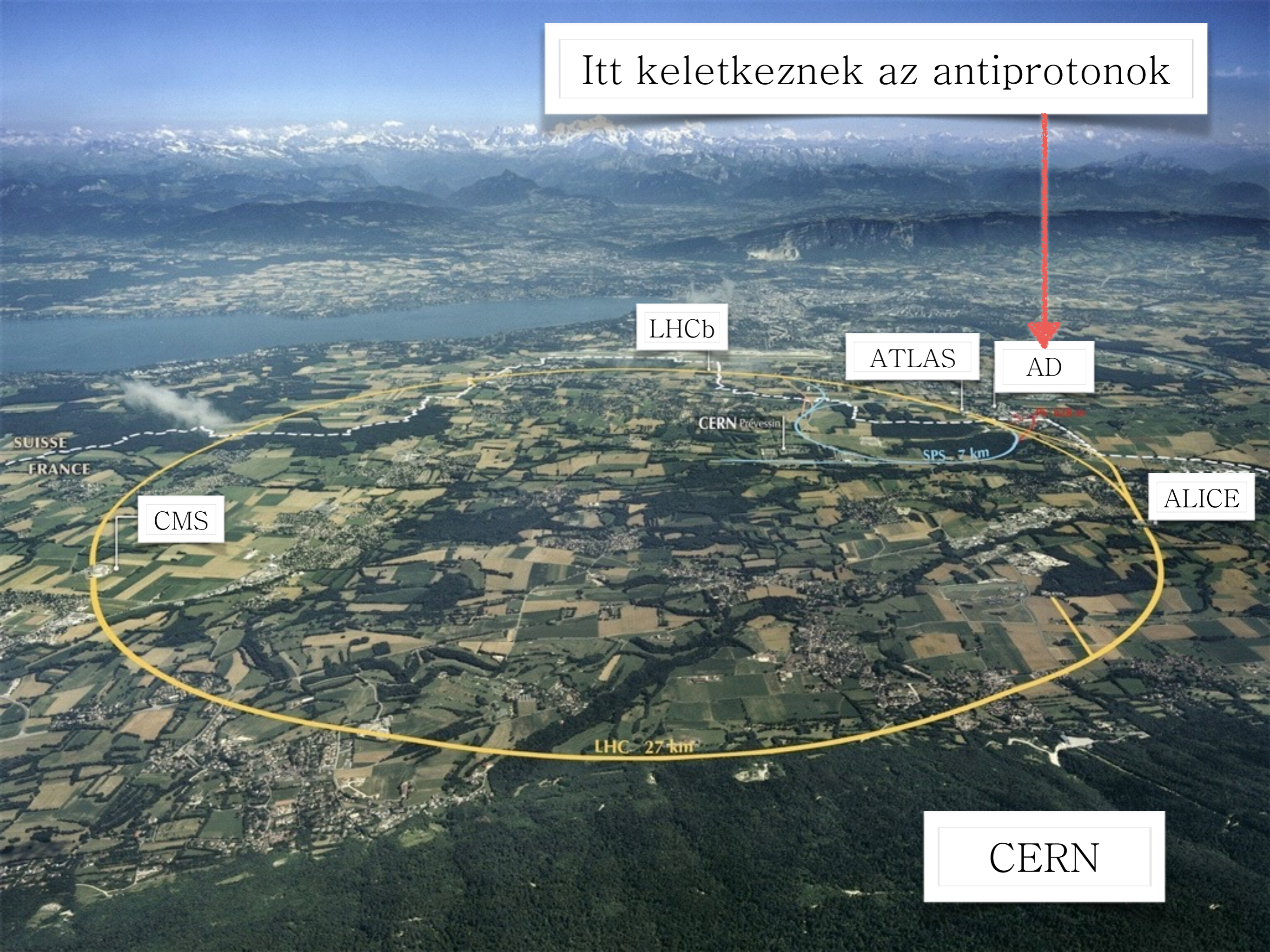
proton-proton  
ütközés gyorsítóban

energia

részecske-  
antirészecske párok



Itt keletkeznek az antiprotonok



LHCb

ATLAS

AD

CERN Prévessin

SPS 7 km

CMS

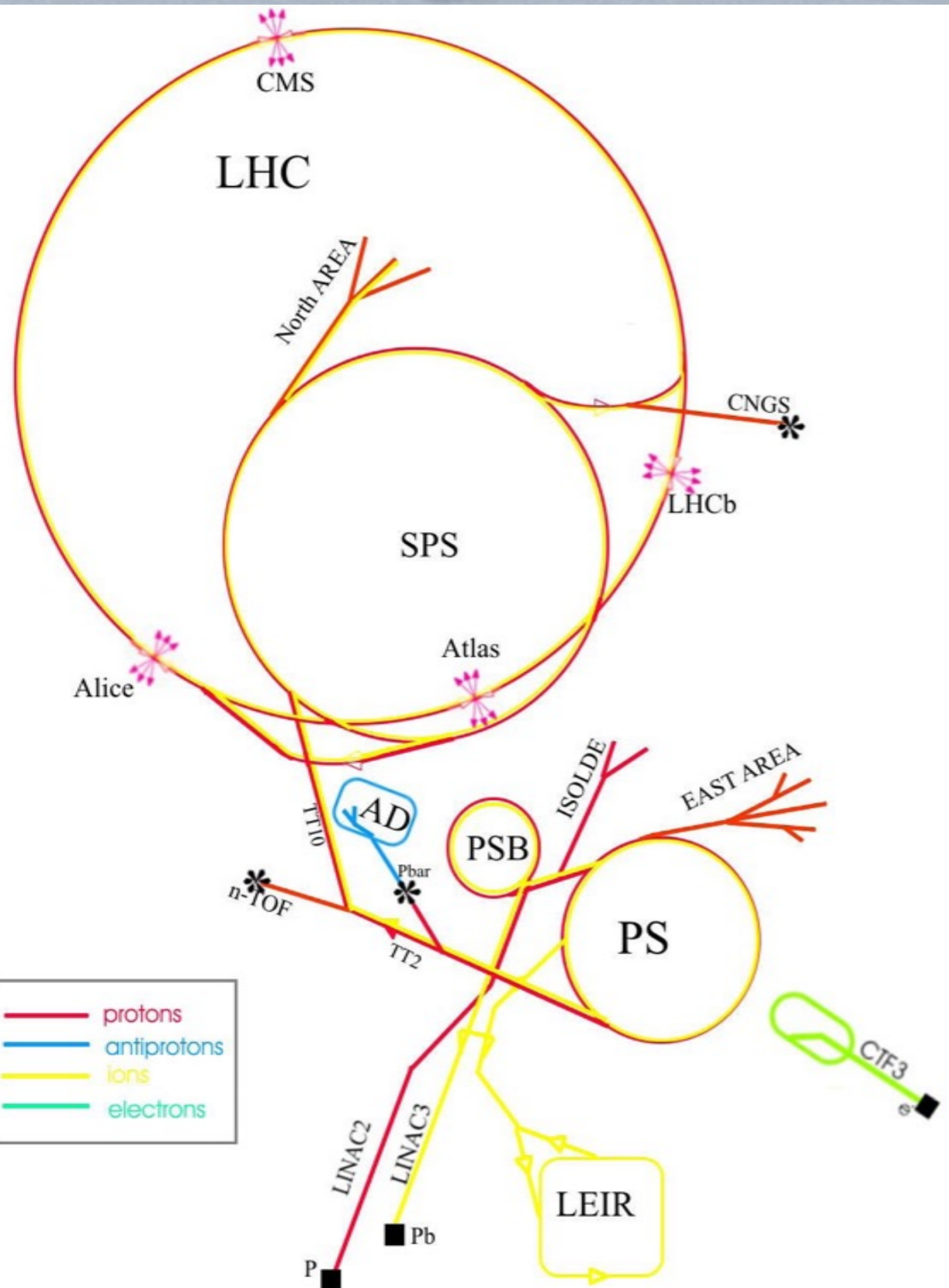
ALICE

LHC 27 km

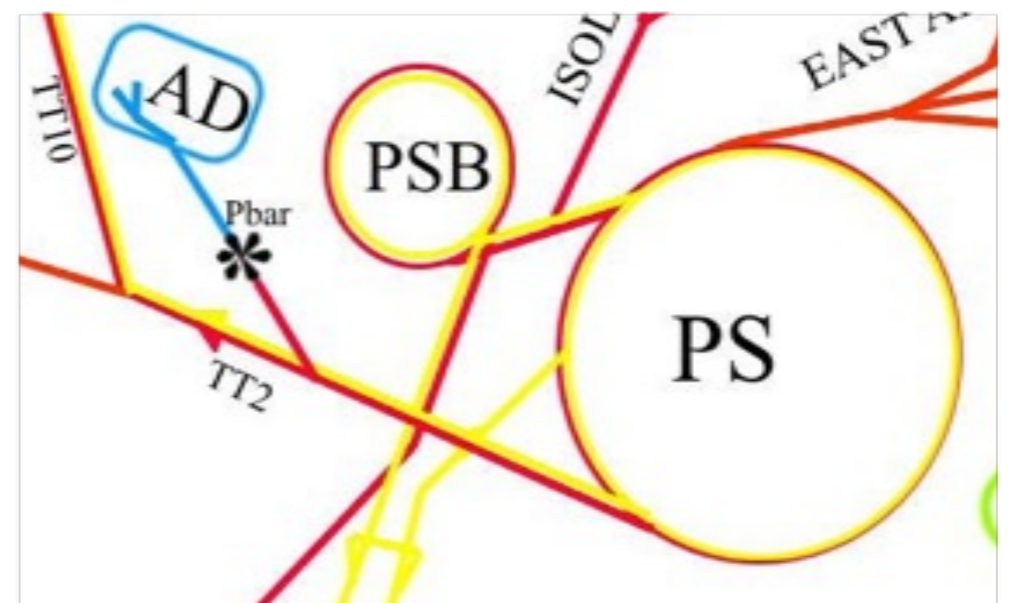
CERN

SUISSE  
FRANCE

# CERN, a Gyűrűk Ura



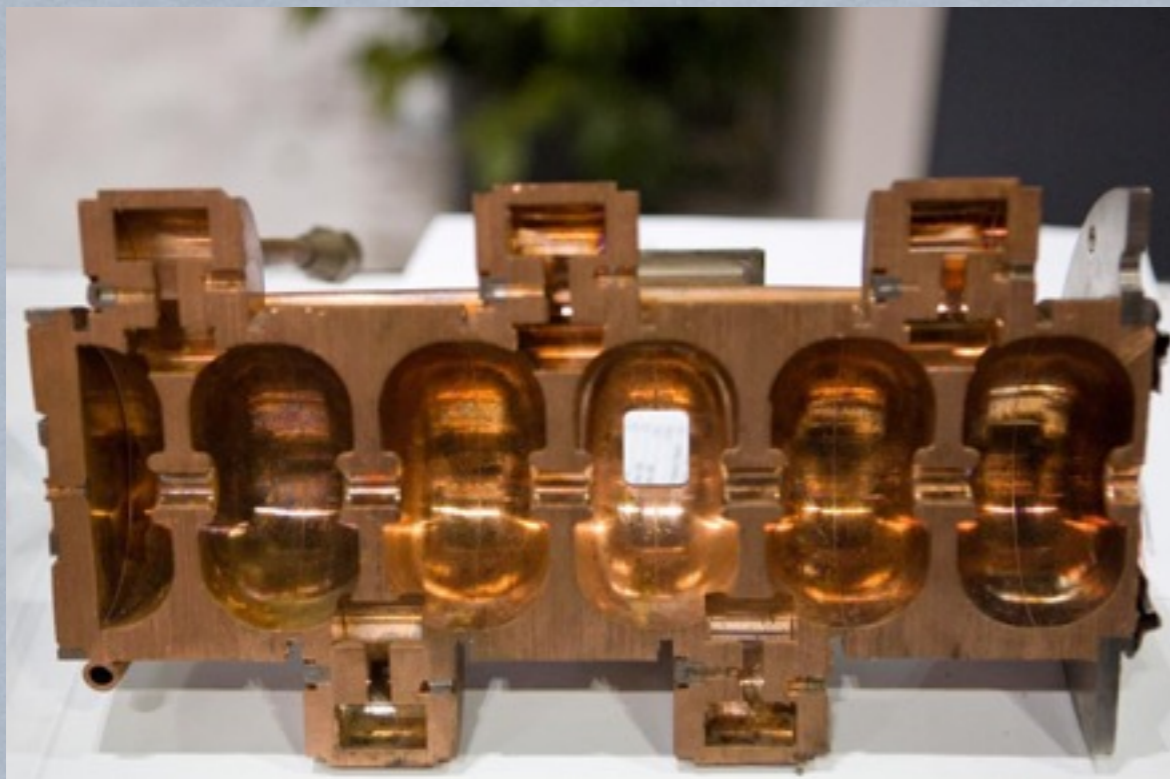
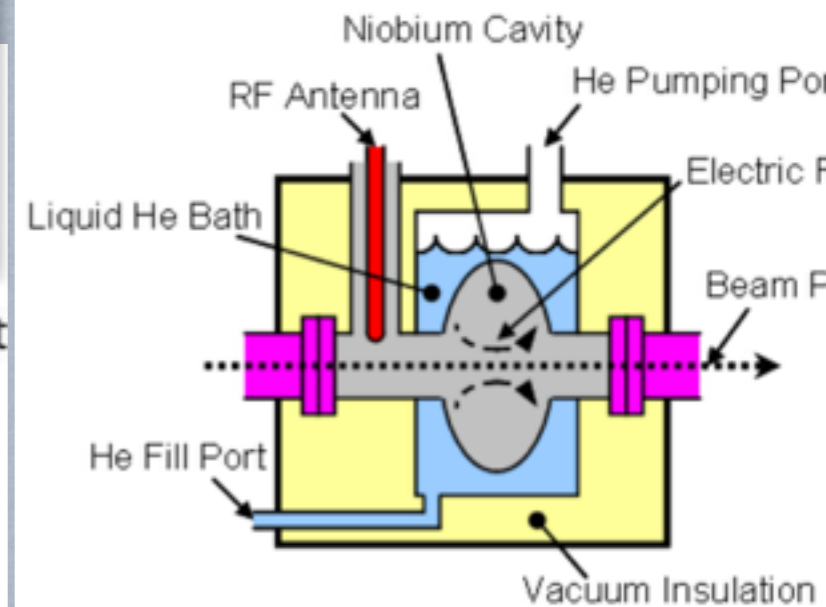
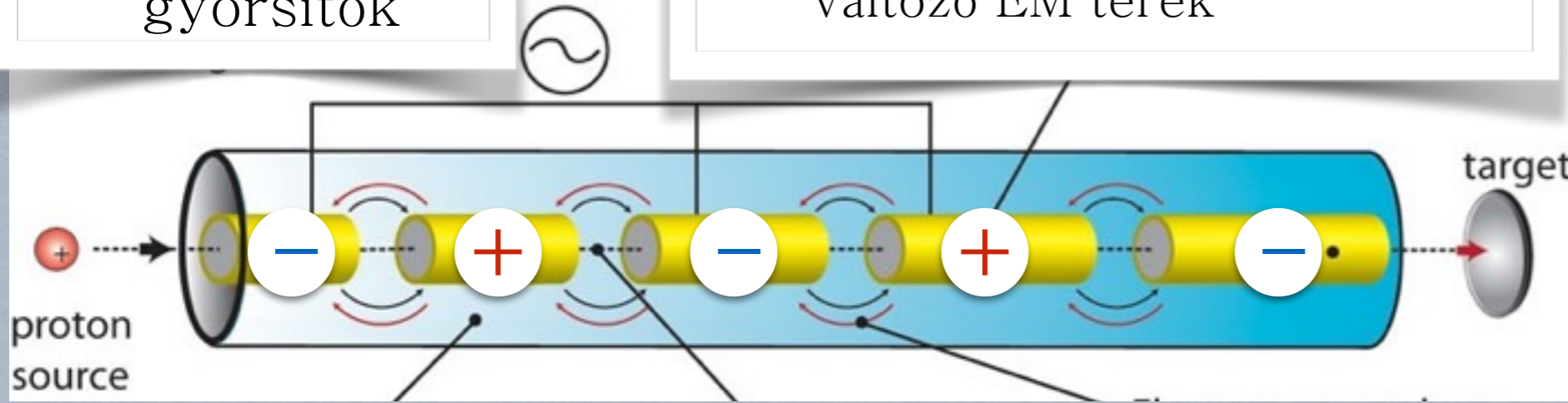
- Linac2 lineáris gyorsító (50 MeV)
- PS Booster (1.4 GeV)
- PS (Proton Synchrotron, 28 GeV)
- SPS (Super Proton Synchrotron, 400 GeV)
- LHC (Large Hadron Collider, 7 TeV ütközési)



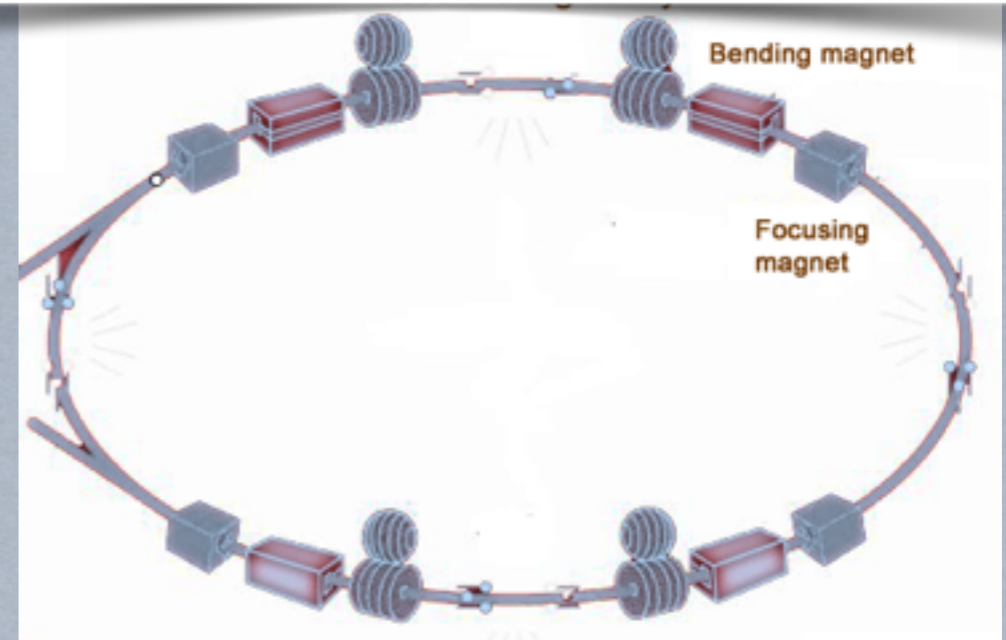
# Gyorsítók (gyorstalpalva)

- Lineáris gyorsítók

- Rádiófrekvenciás sebességgel változó EM terek



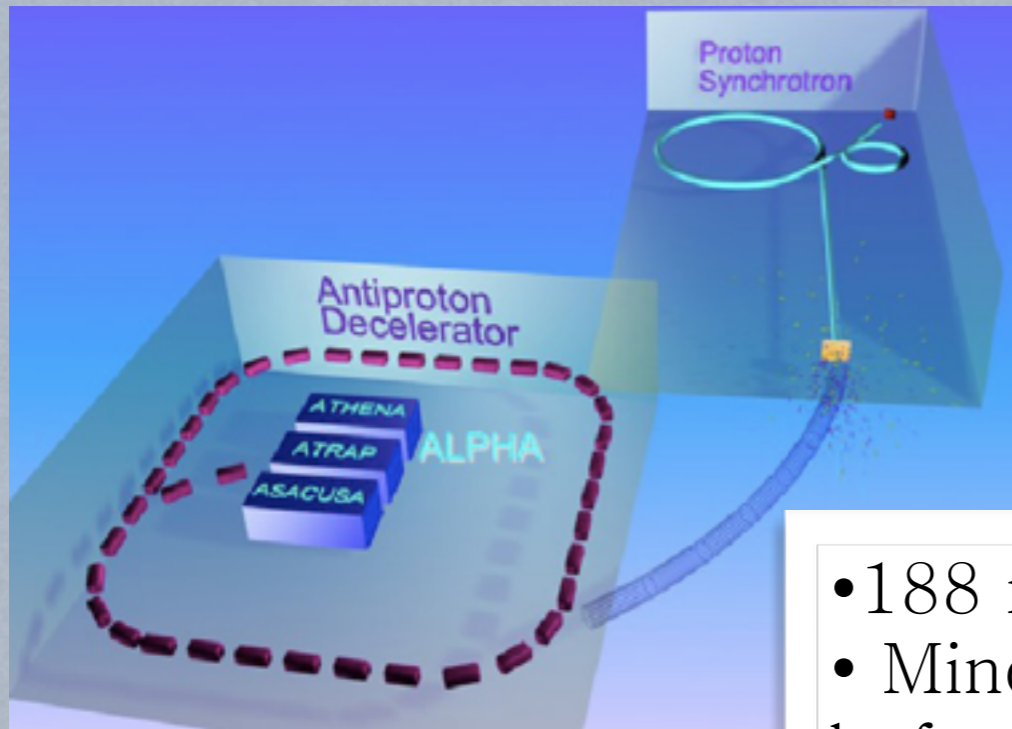
- 'Ekonomikus változat': cirkuláris gyorsítók (ciklotron, szinkrotron)



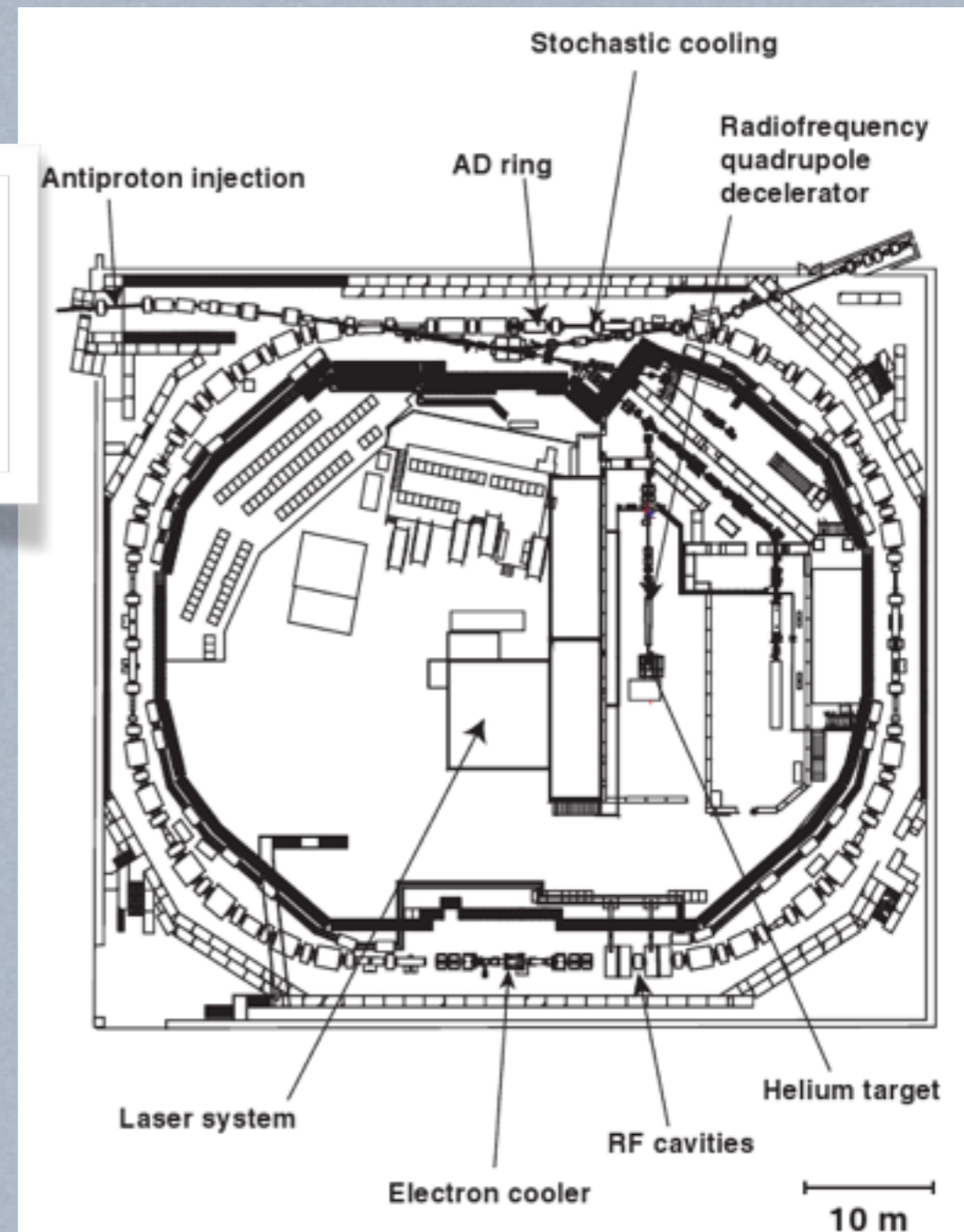
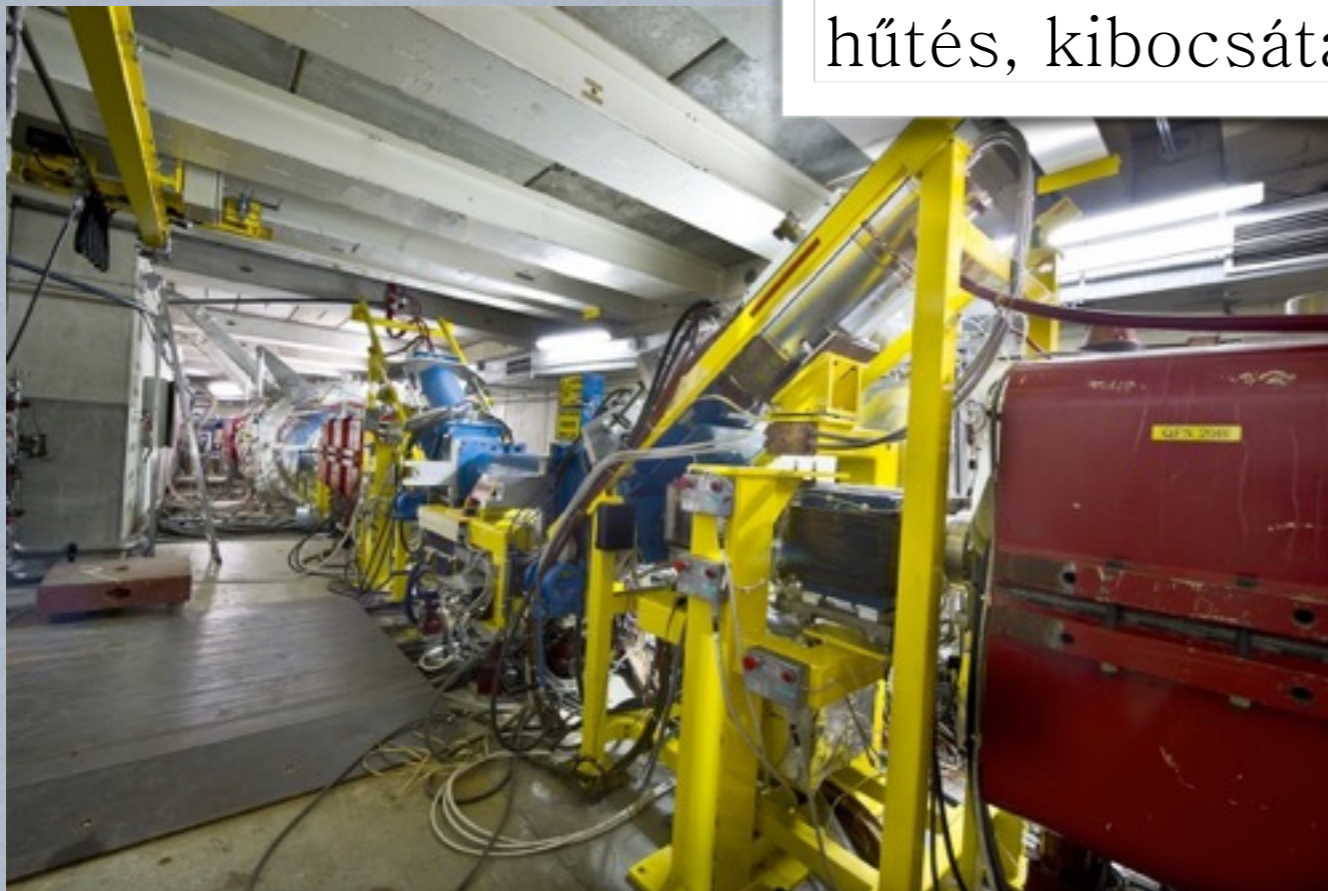
# Az Antiproton Lassító (AD)

Az antiproton az egyetlen részecske a CERNben akit nem szeretünk gyorsan! (Atomfizikai kísérletek!)

Antiproton lassítás  $3.5 \text{ GeV}/c - 100 \text{ MeV}/c$  ( $5.3 \text{ MeV}$  mozgási energia)

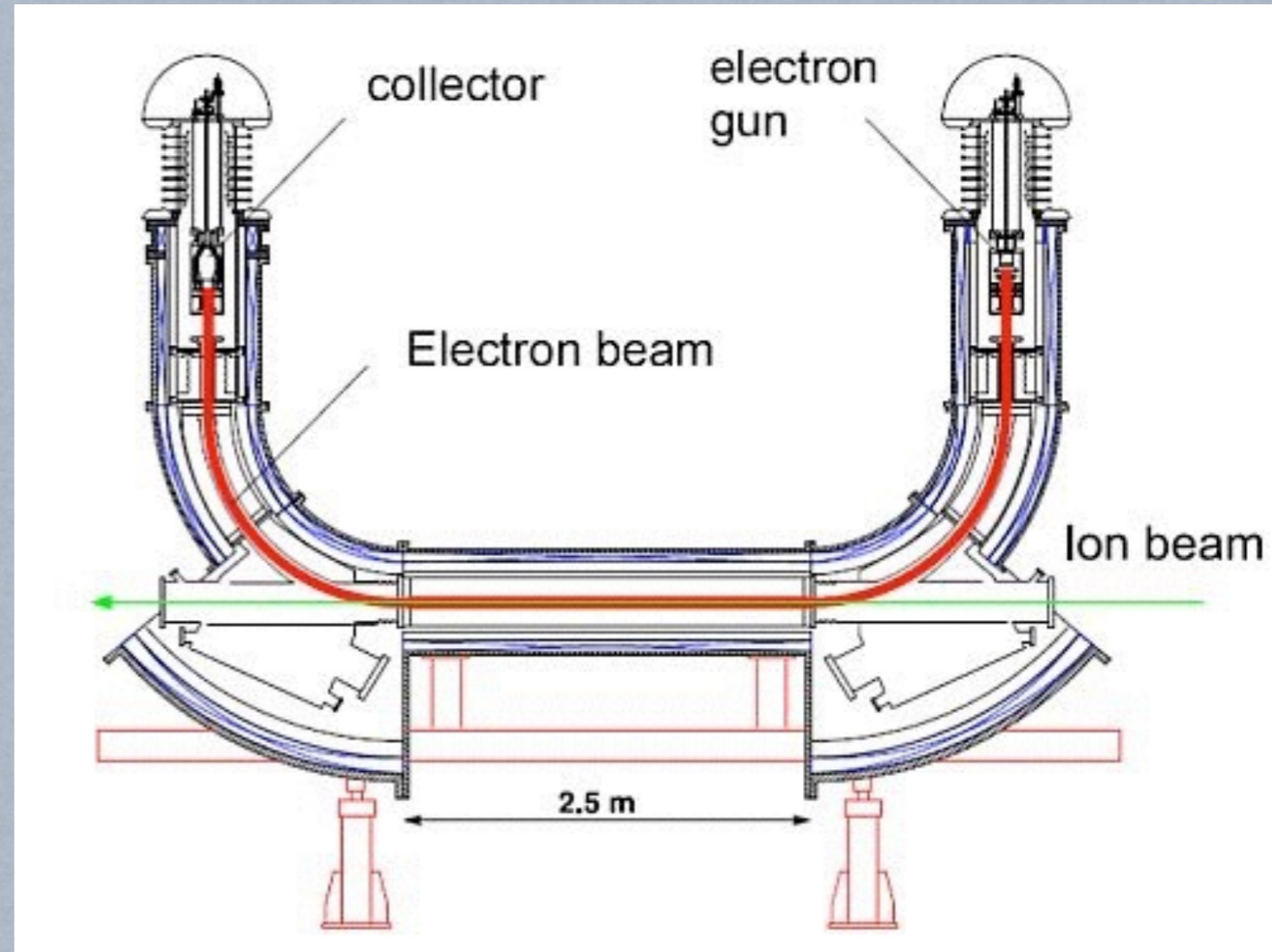
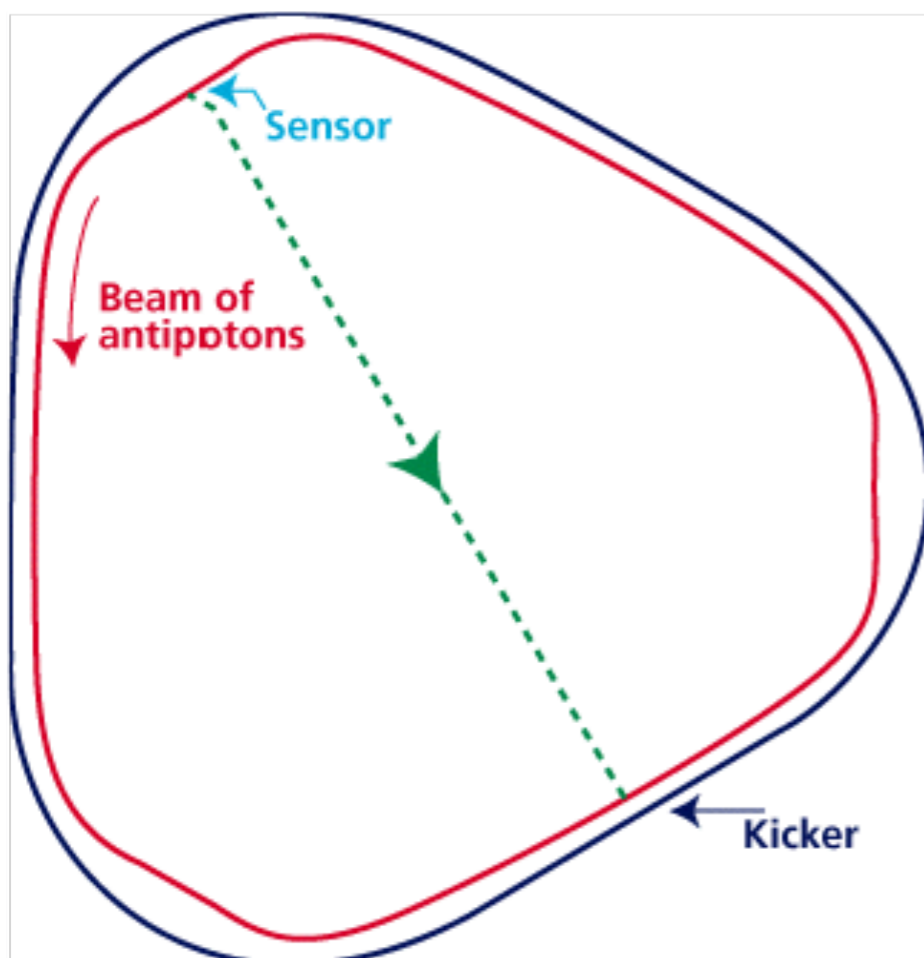


- 188 m szinkrotron
- Minden egyben: befogás, lassítás, hűtés, kibocsátás



## Sztochasztikus hűtés

- Szeretnénk a transzverz sebességtől megszabadulni
- Nyaláb tulajdonságainak mérése egyik oldalon, korrigálás a túloldalon

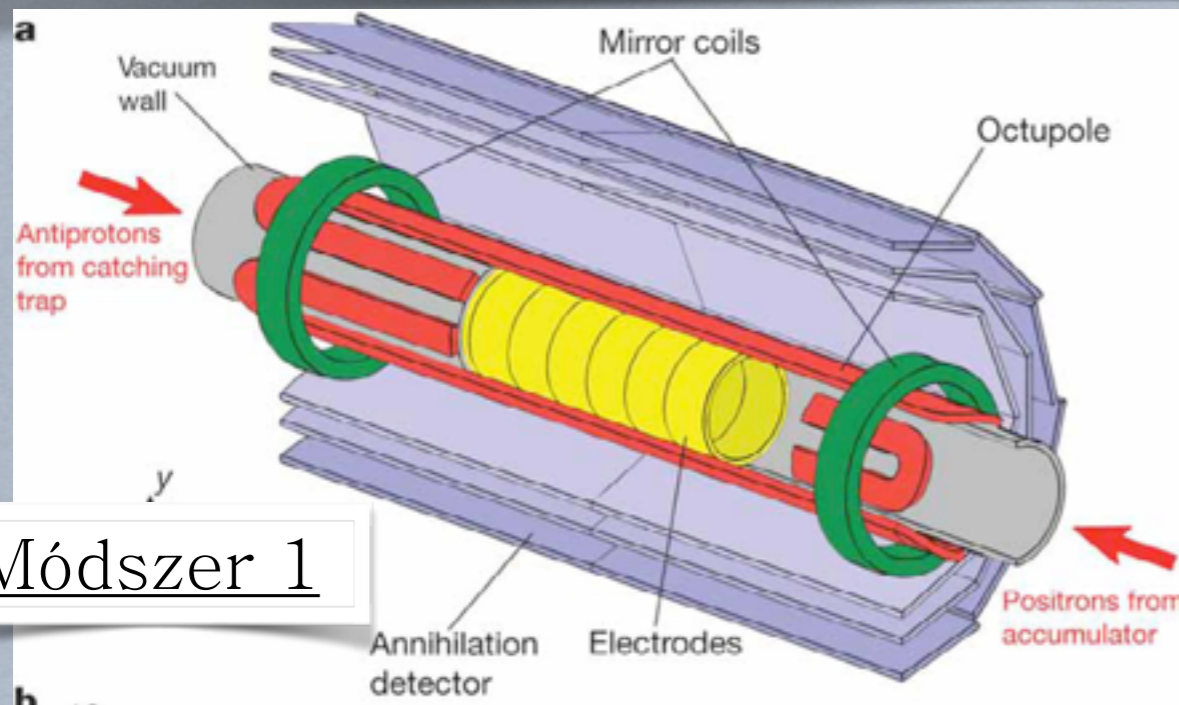


## Elektron hűtés

- Elektront könnyű manipulálni. Egy jól lehűtött elektron nyaláb együtt haladva az antiprotonokkal csökkenti a nyaláb nem kívánt transzverz sebességét

# Antihidrogén szintézise

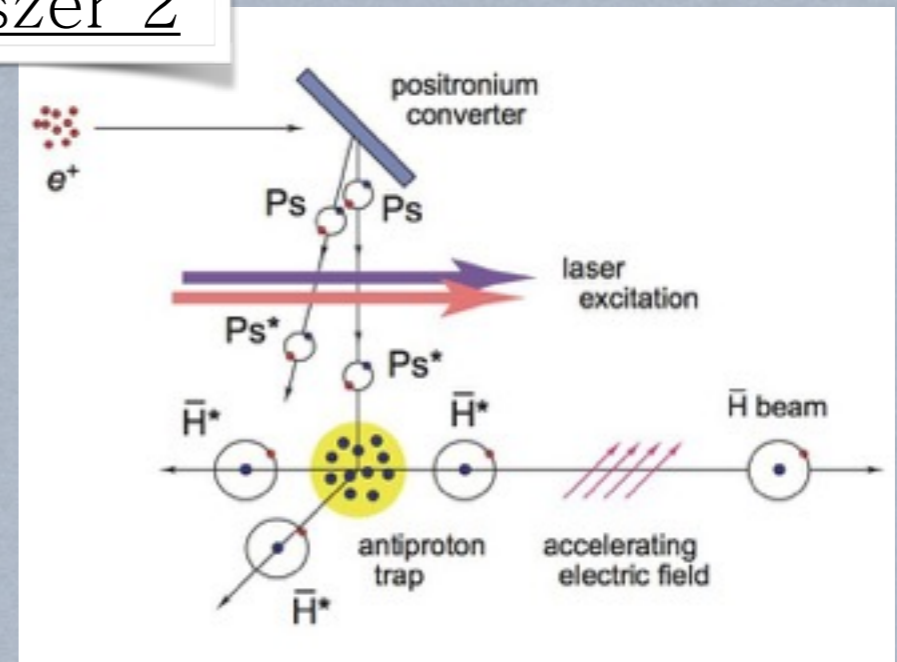
- Cél : semleges alapállapotú antihidrogén lézerspektroszkópiája, ejtési kísérletek
- színekép összehasonlítása a hidrogén jól ismert színeképével (lézerspektroszkópia)



Módszer 1

- Elektron és pozitron RF EM terekkel csapdázása és hűtése külön, majd a két plazma 'összekeverése'
- Mágneses térrel csapdázni a semleges atomot (mágneses momentum alapján)

Módszer 2

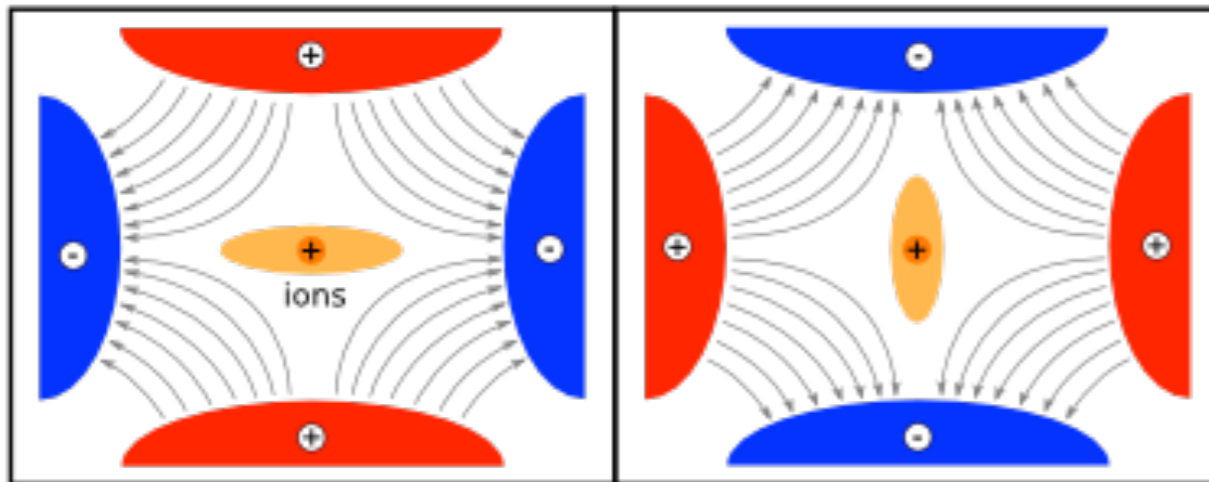
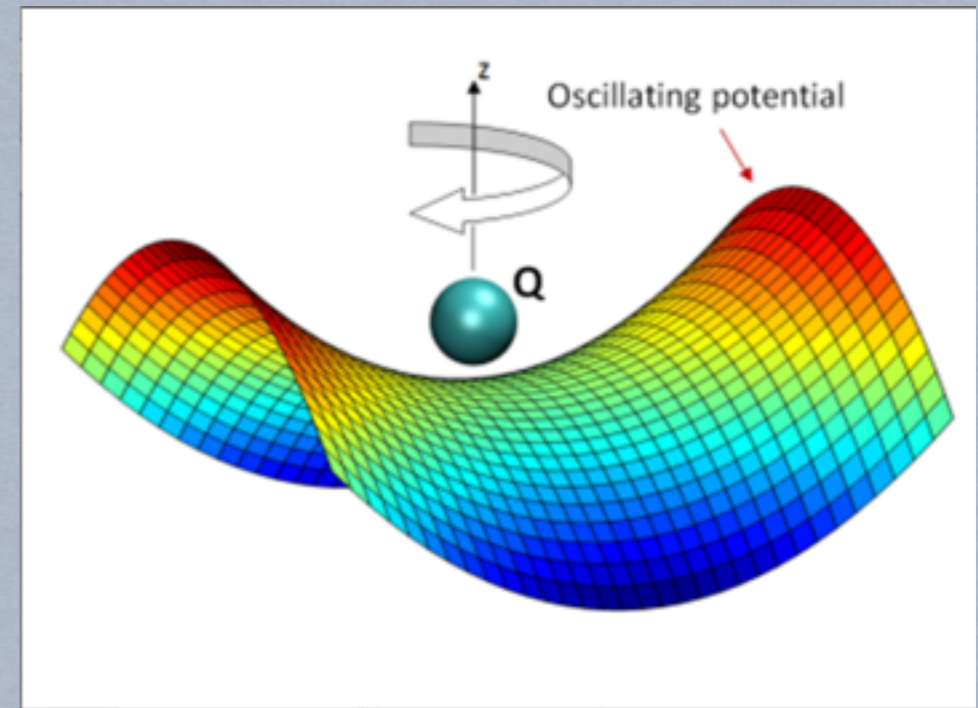


- pozitronium gyártása (elektron-pozitron pár)
- $Ps$  lézeres gerjesztése
- $Ps$  antiproton csapdába engedése

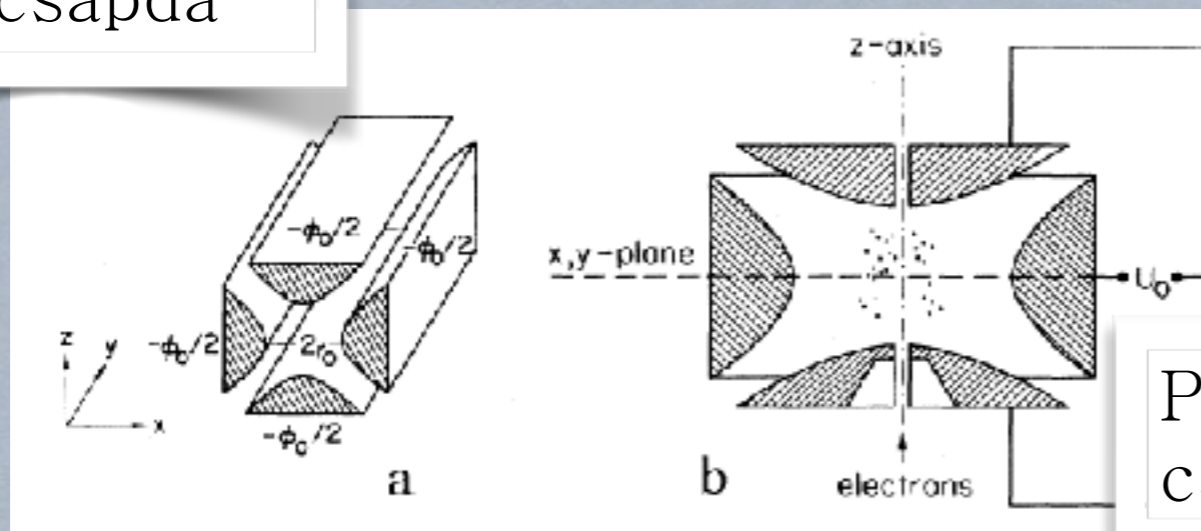


# Antiproton csapdák

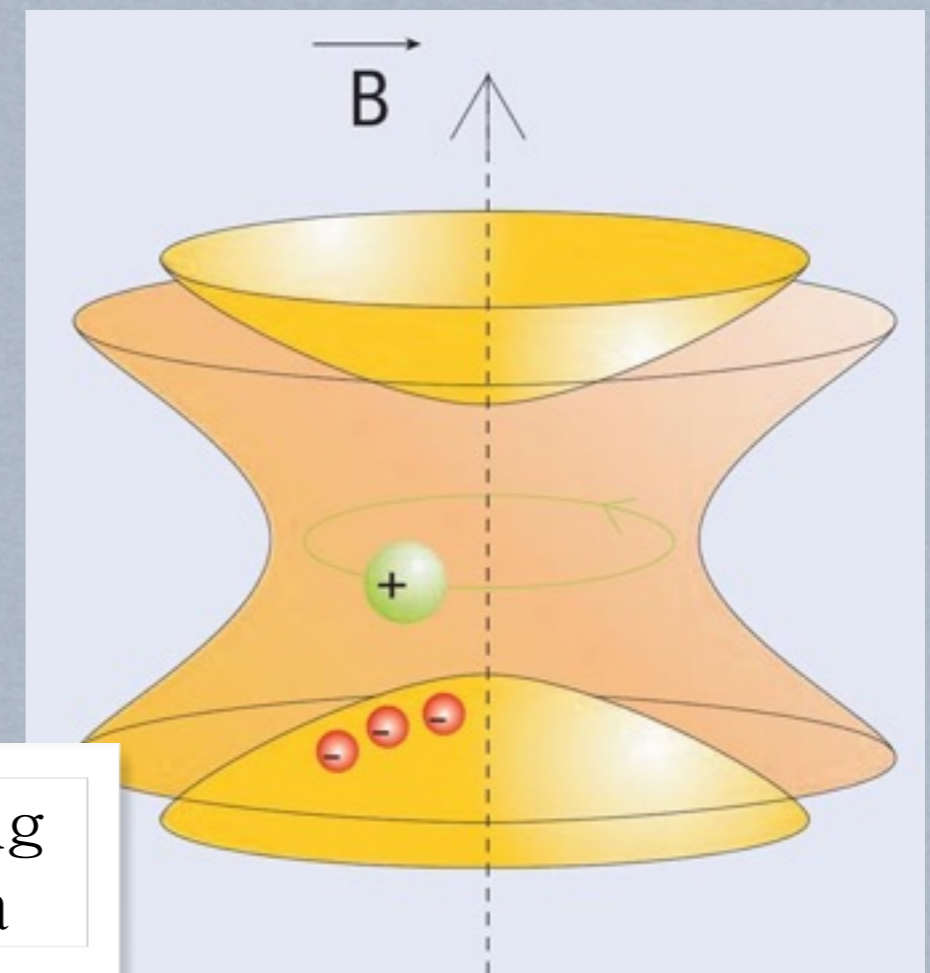
- Az ok egyszerű: a végzetes találkozás elkerülése az anyaggal



Paul csapda

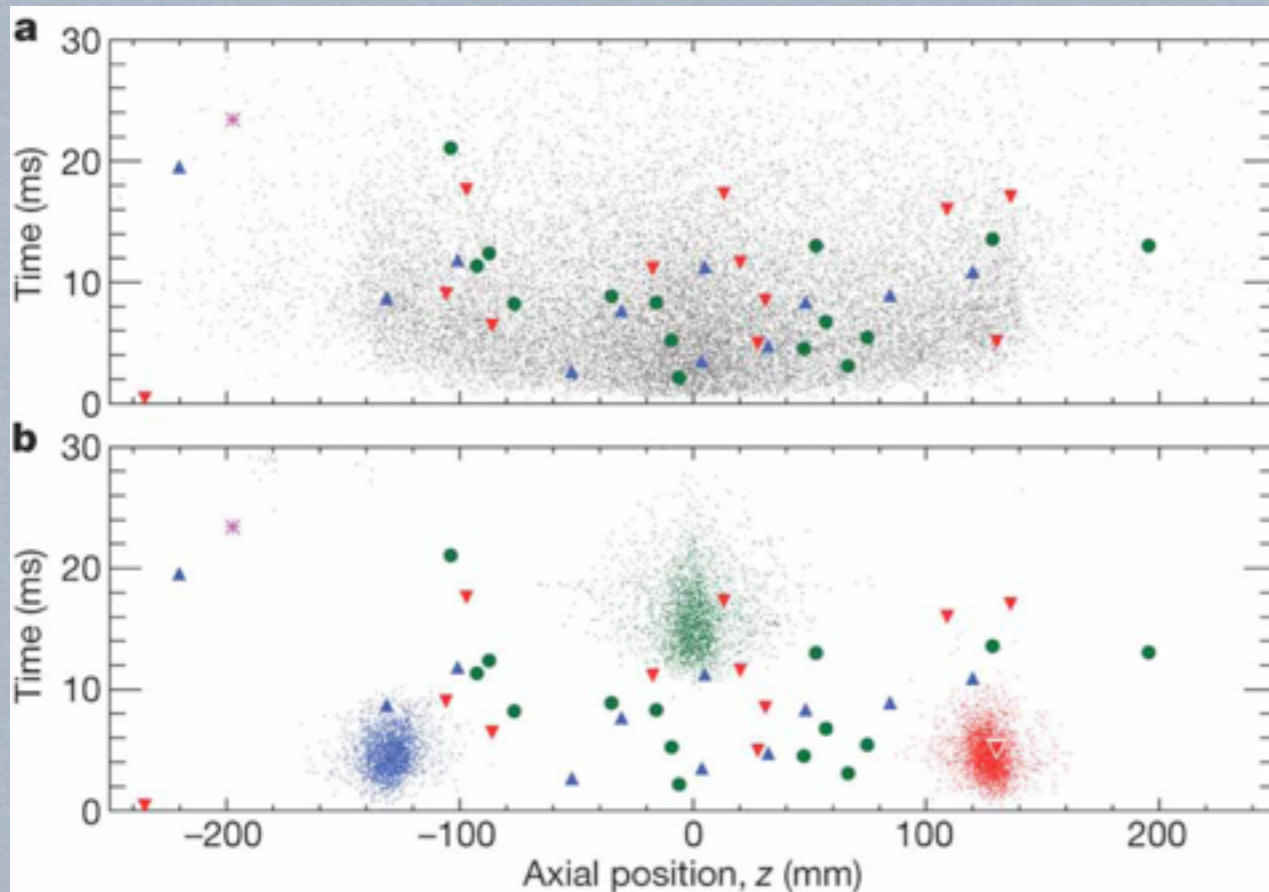



Penning csapda



## Jelenlegi kísérleti eredmények

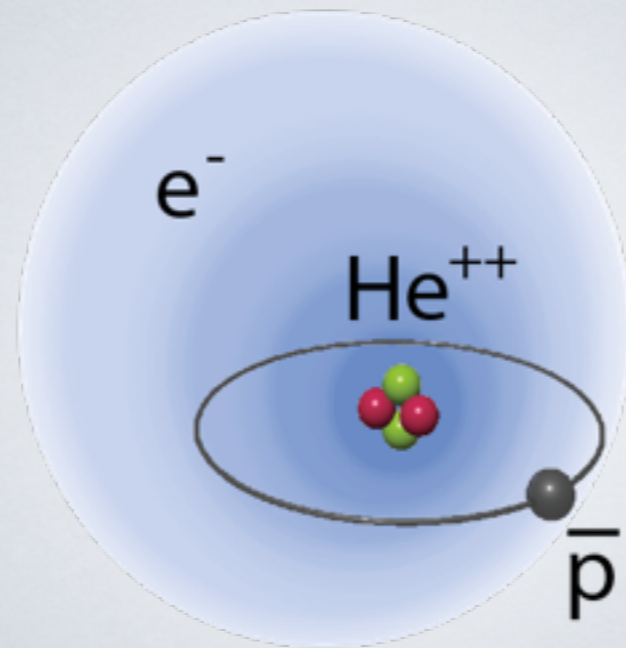
- Az ALPHA kísérlet sikeresen csapdázott 30–40 antihidrogént 17 percig (lent) Lézer spektroszkópia még nem történt
- Az antihidrogént le is ejtették a csapdában – az ejtési eredmények a gravitációs gyorsulásra egyelőre nem konkluzívek
- Egy másik kísérlet (AEgIS) kifejezetten arra gyárt egy antihidrogén nyalábot hogy megmérjék az eltérülését vízszintes hajítás után, egyelőre eredmény nélkül



- Antihidrogént gyártani NEHÉZ.
- Csapdázni vagy egy értelmes nyalábot formálni belőle még nehezebb
- Csak néhány atomot tudunk egyelőre a kívánt tulajdonságokkal előállítani
- VISZONT 

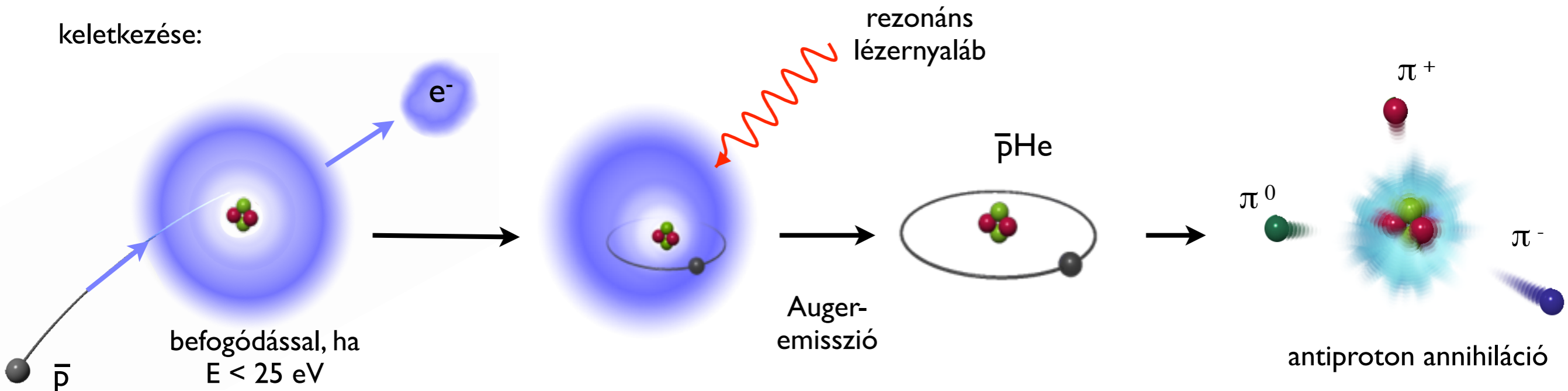
# Egy nagyon egzotikus atom: antiprotonos hélium

- Az antiprotonok 2-3%-a héliumban helyet cserél egy elektronnal és a hélium mag körül kezd keringeni!



- Amit kapunk az egy semleges anyag-antianyag hibrid atom egy **hélium atommaggal**, egy **elektronnal** és egy **antiprotonnal**
- Az egzotikus atom 4 mikroszekundumig életben marad – épp elég hosszú ideig ahhoz hogy lézerrel gerjesszük

# Antiprotonos hélium atomok lézeres vizsgálata



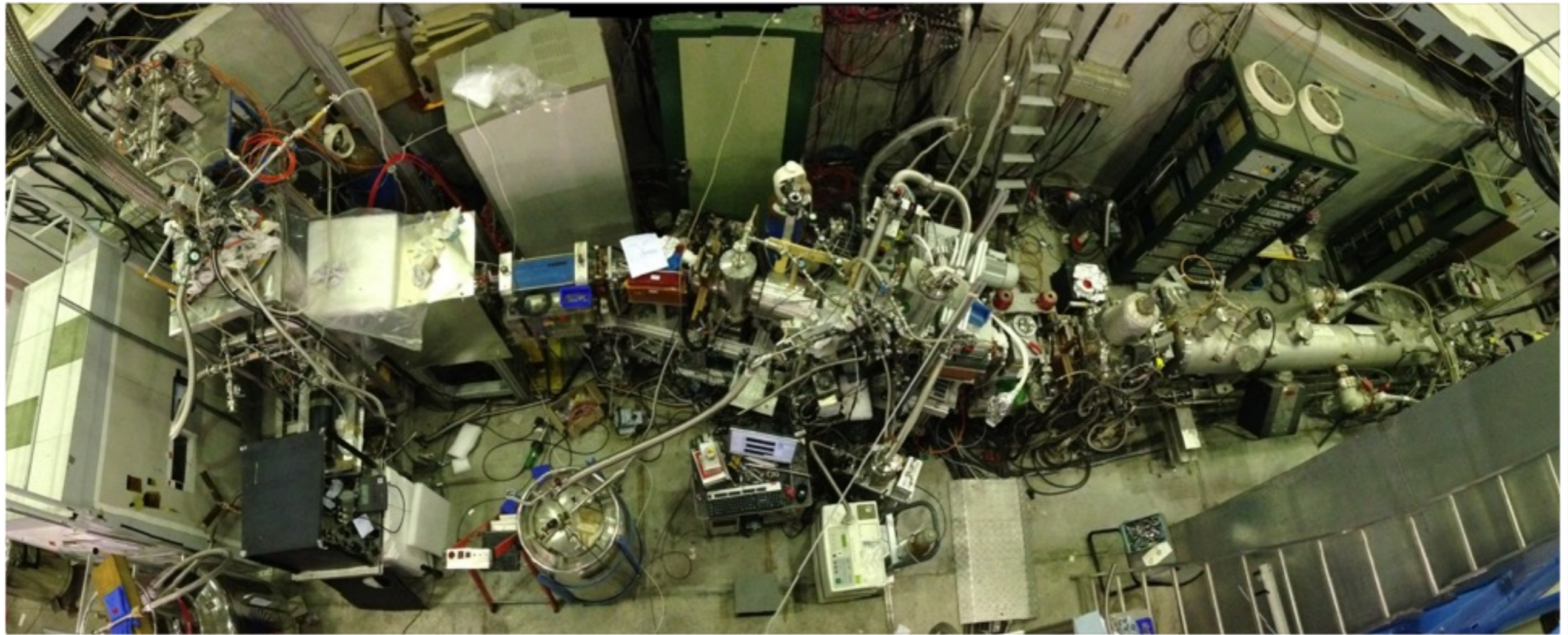
- Az atomok precíziós lézerspektroszkópiájával közvetett eredményt kapunk az antiproton–elektron tömegarányra, relativisztikus 3–test QED számolásokkal összevetve a kimért atomi átmeneteket

$$m_{\bar{p}}/m_e = 1836.1526736(23)$$

$$m_p/m_e = 1836.15267245(75)$$

# Az ASACUSA kísérlet

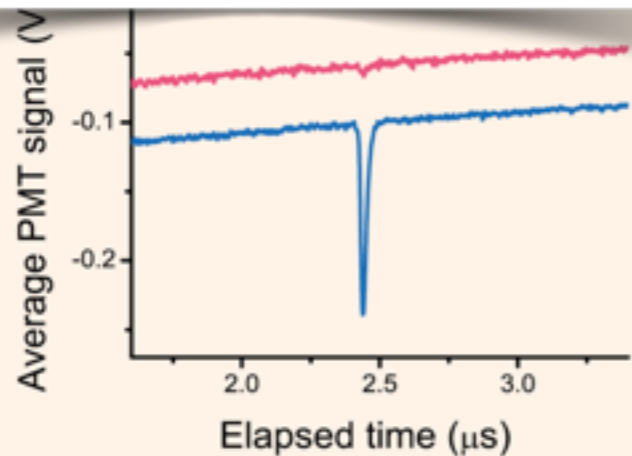
Atomic Spectroscopy and Collisions Using Slow Antiprotons



Mi kell egy ilyen kísérlethez?

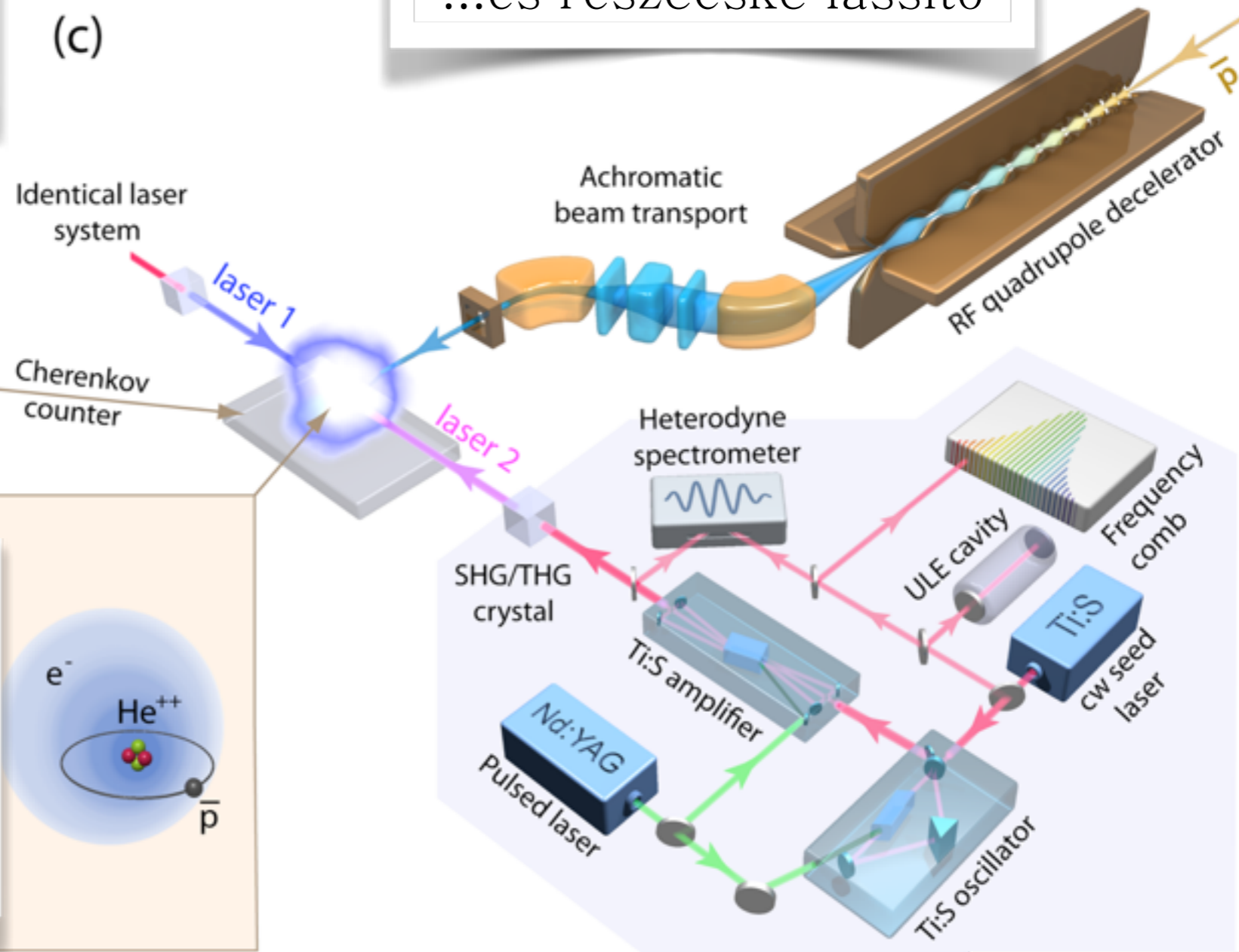
Részecskegyorsító...

Részecske detektorok  
+ elektronika



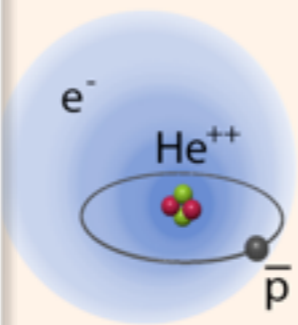
...és részecske lassító

(c)



(a)

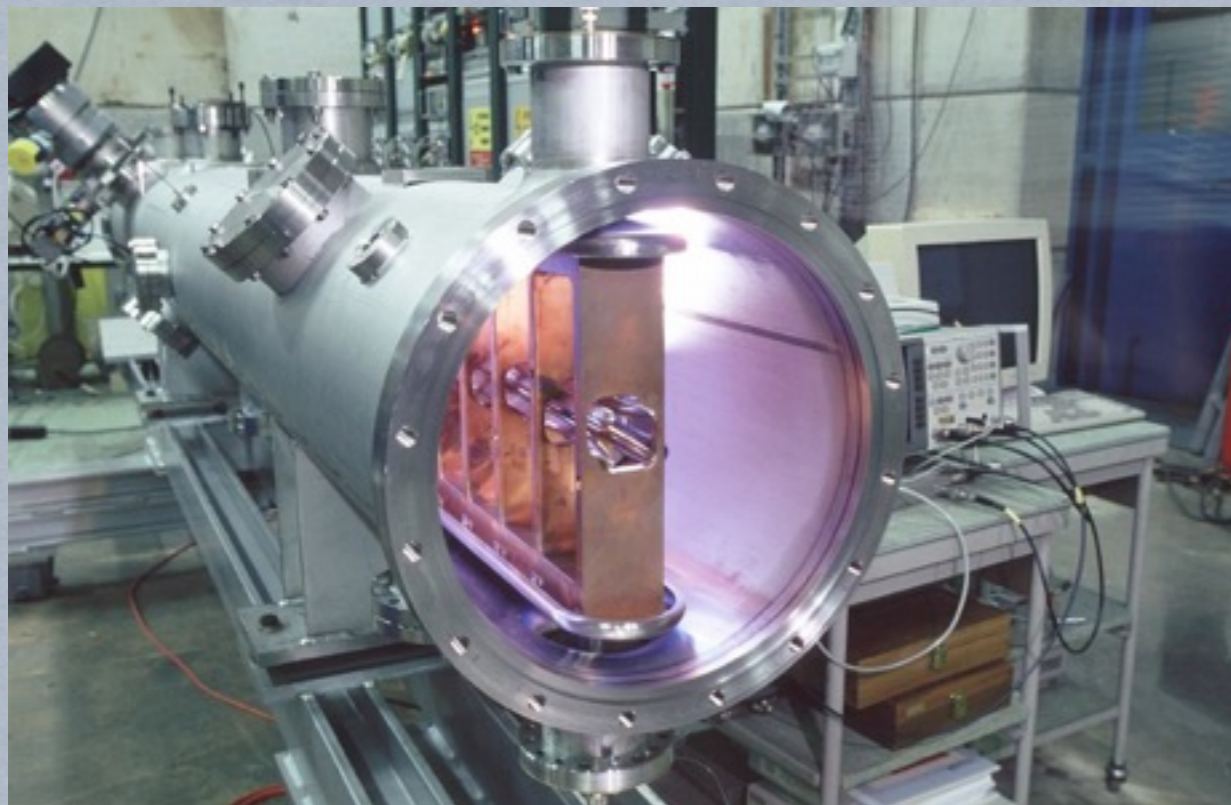
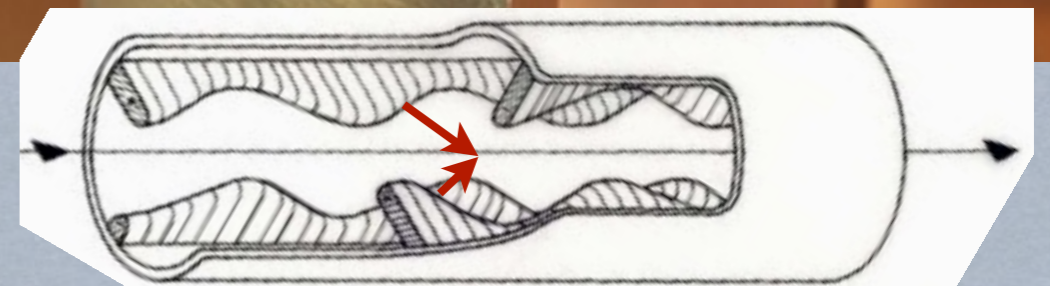
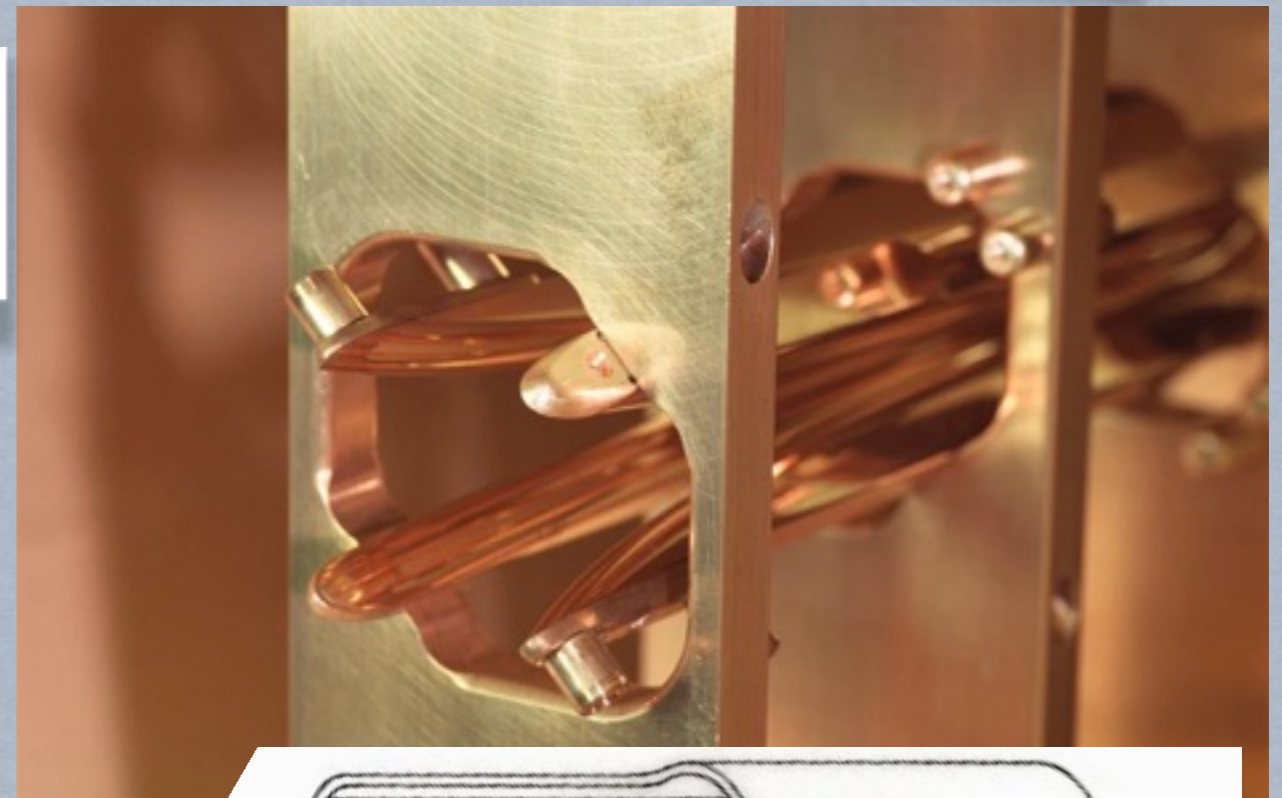
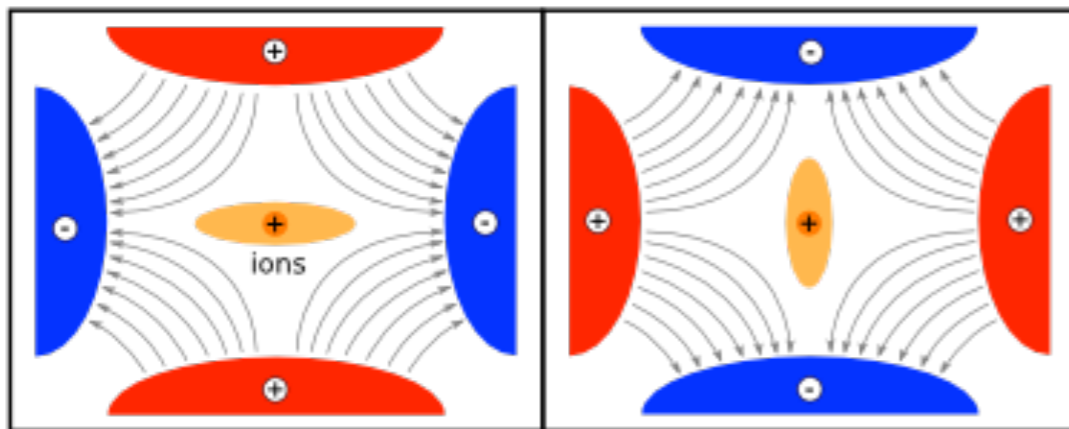
Kriogén (1.5 K  
hőmérsékletű)  
hélium gáz céltárgy



Lézerek

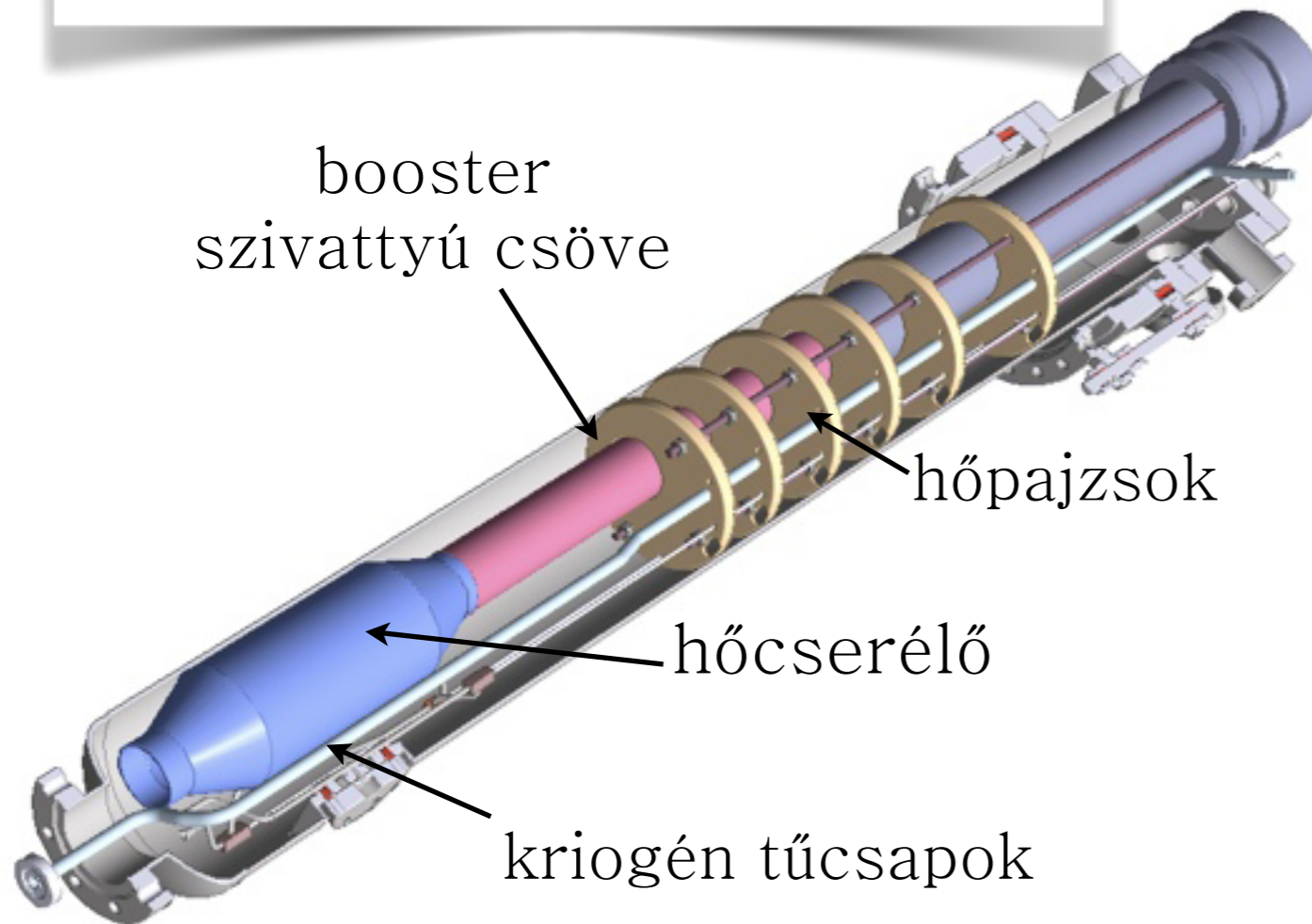
# Rádiófrekvenciás kvadrupól lassító

- Hogy az antiprotonok még lassabbak legyenek



- A lassító módus (202.5 MHz) egyben fókuszálja is a nyalábot
- A kezdeti 5.3 MeV-es antiproton nyalábot 50–100 keV-re lassítja,

# Kriosztát, 1.4–1.6 K



A konstrukció egy Joule –Thomson hőcserélőn alapul.  
– evaporatív hűtést érünk el egy erre alkalmas vákuumszivattyúval

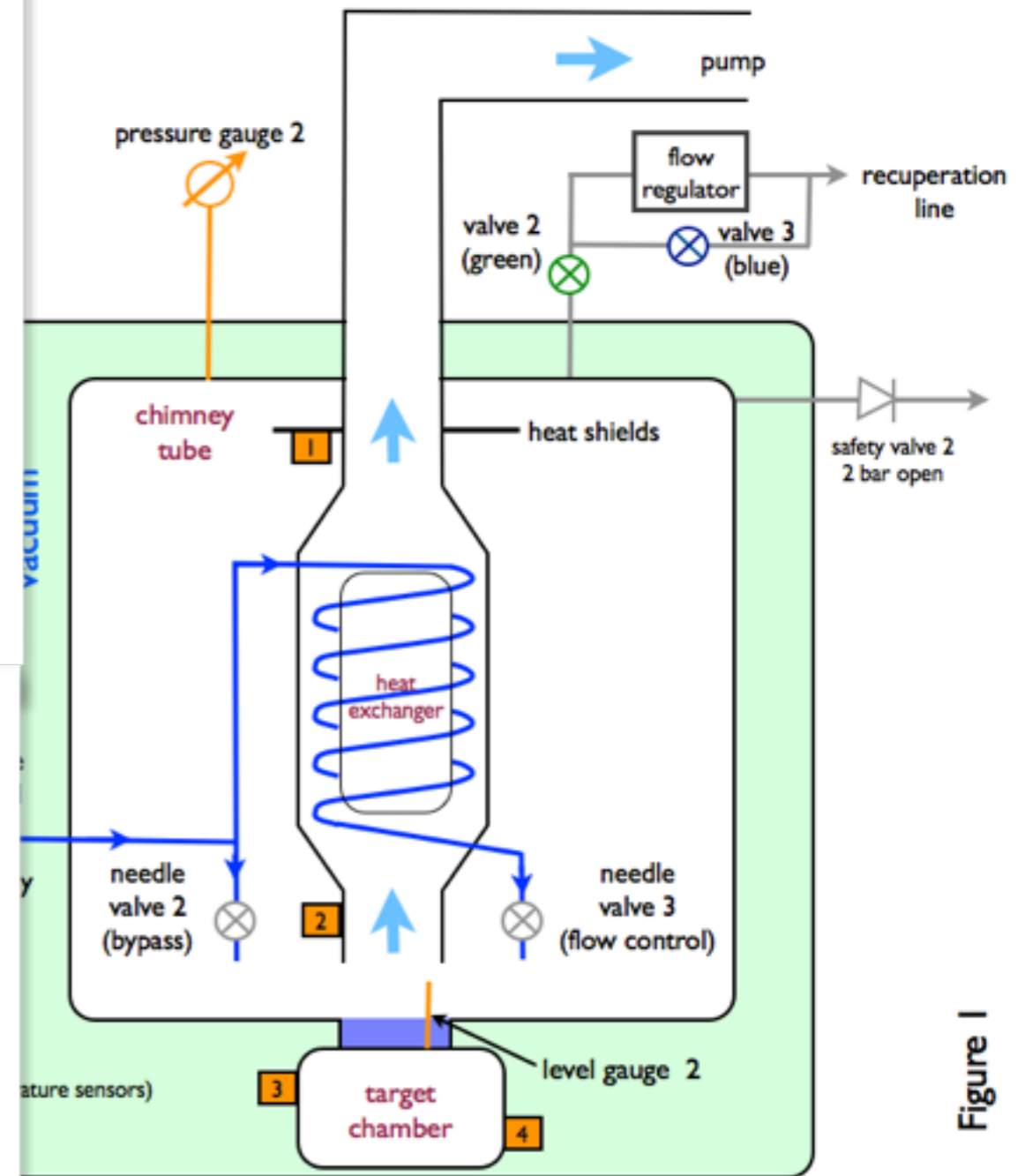
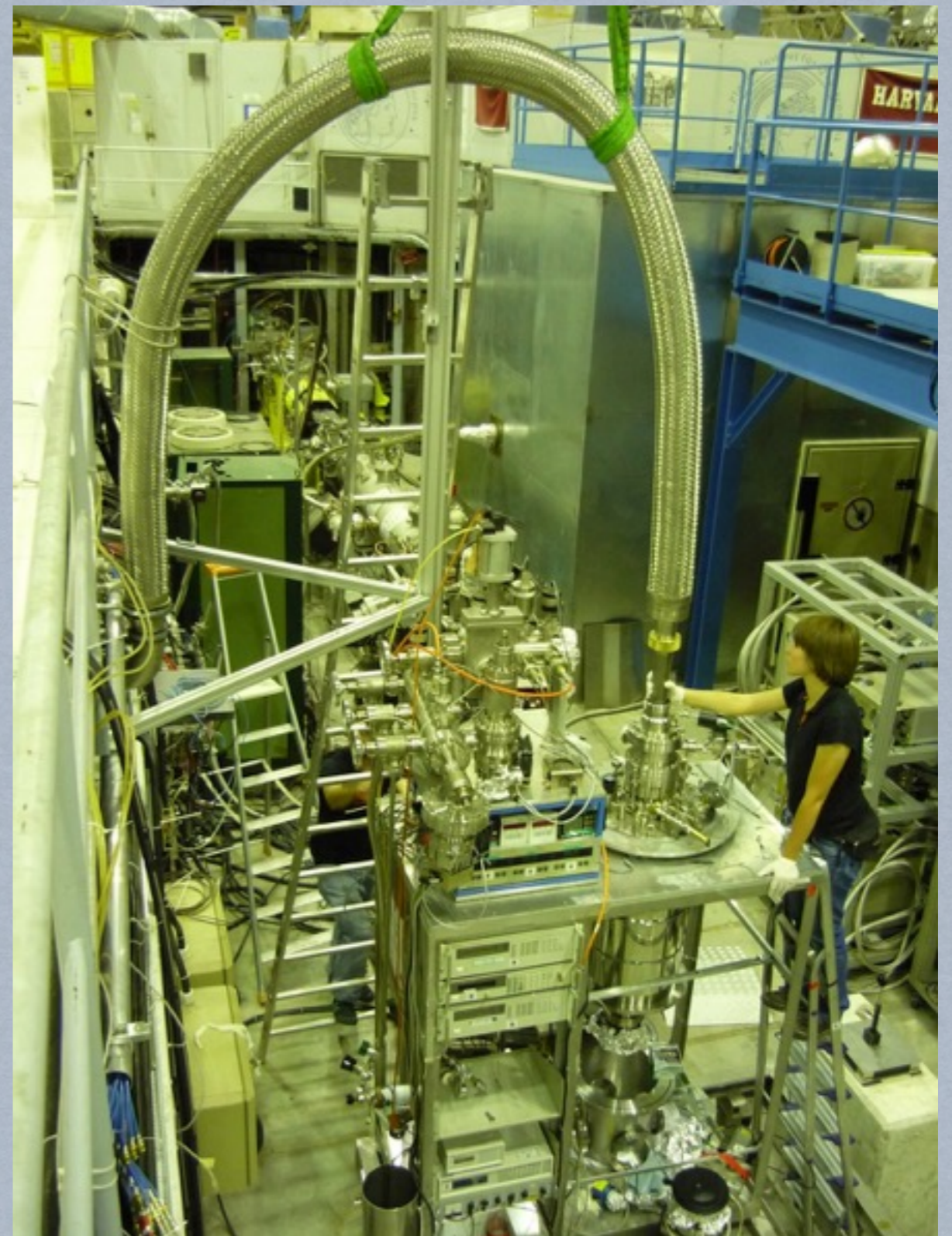
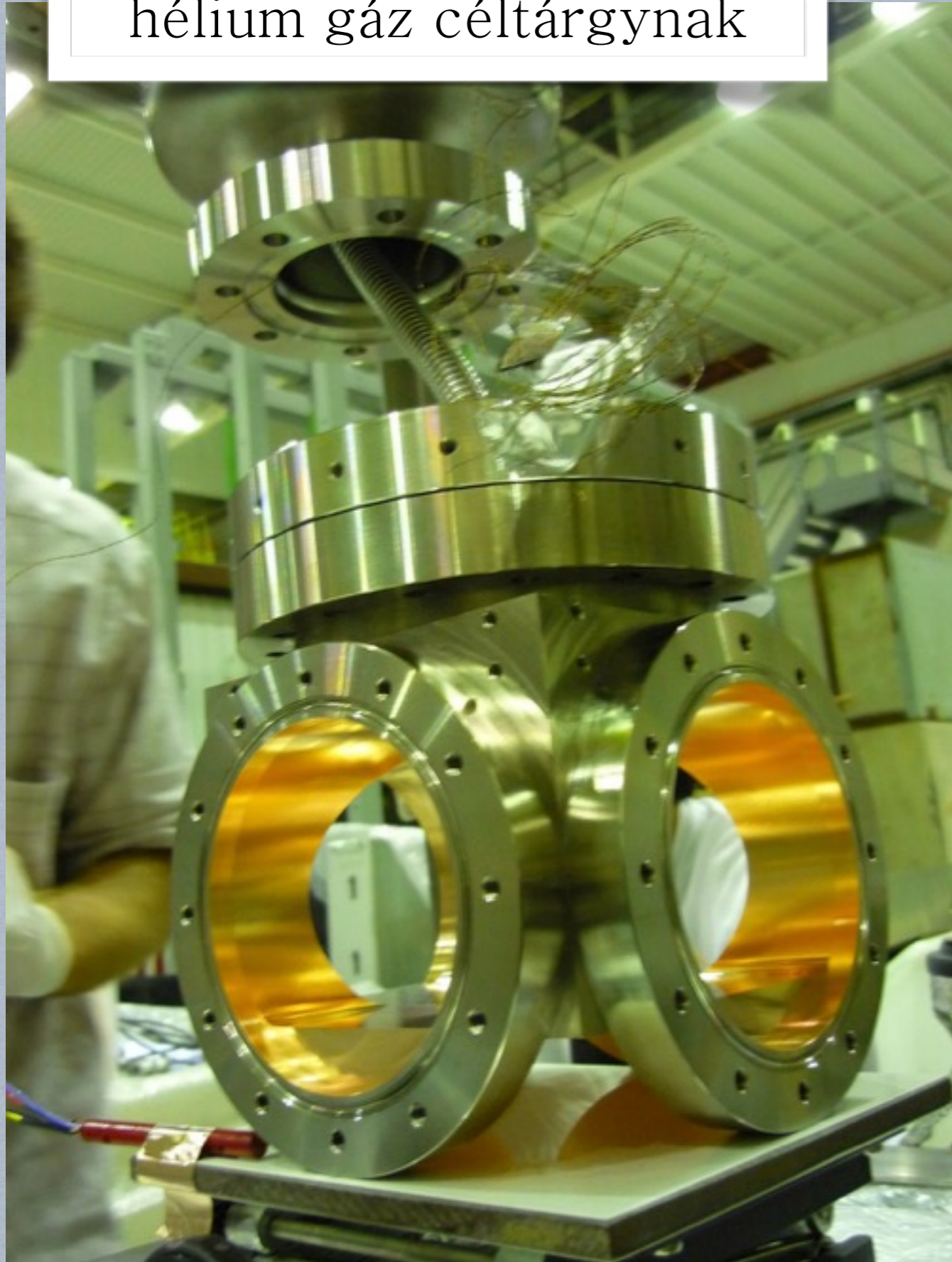


Figure 1



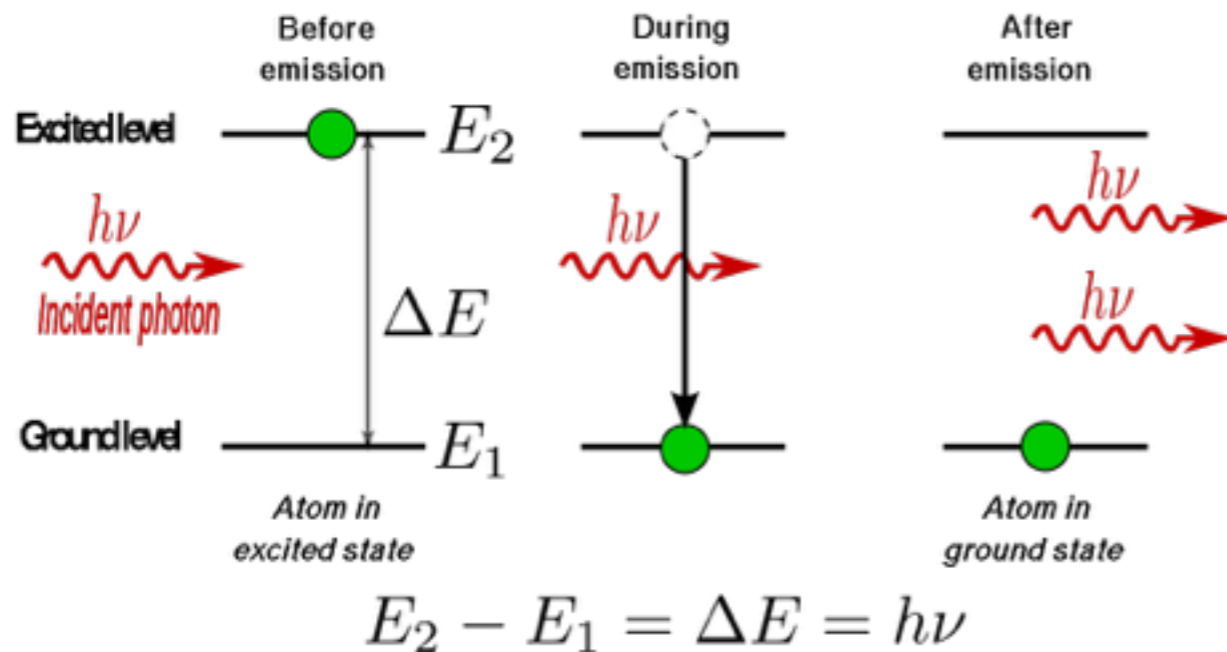
Kriogén réz kamra a  
hélium gáz céltárgynak



A kriosztát és a zóna  
kívülről

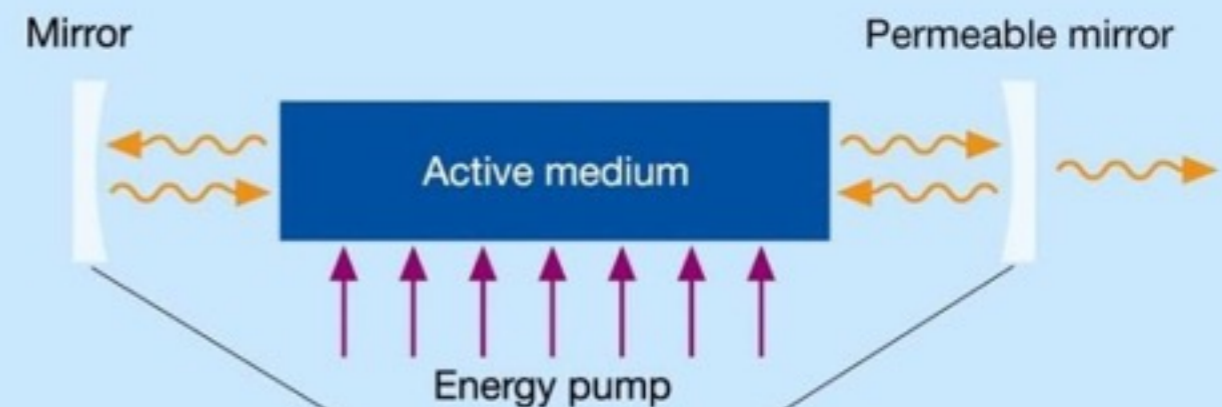
# Lézerek

- A lézer egy monokromatikus és koherens fényforrás, amiről érdemes lenne egy külön előadást tartani :)



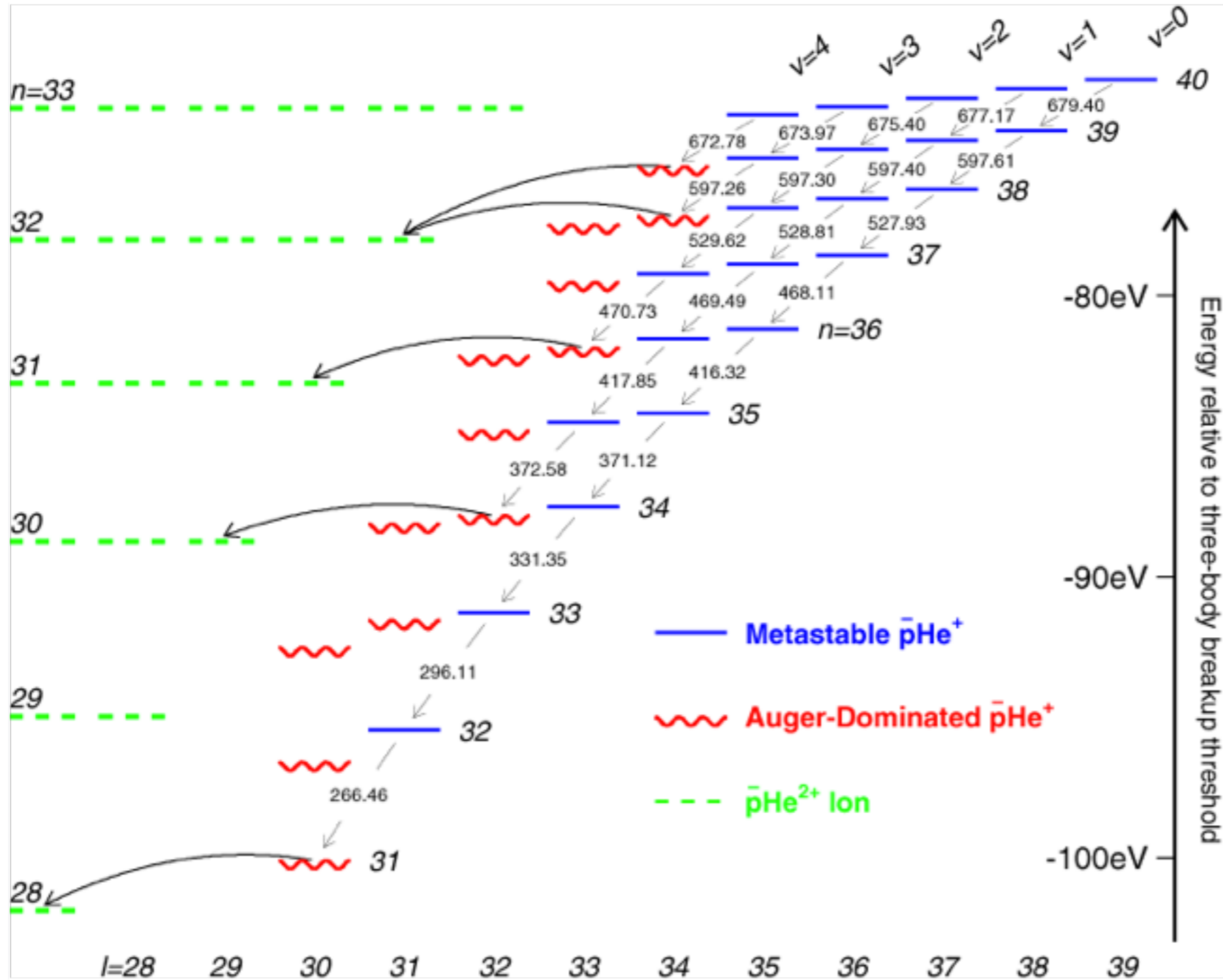
- Stimulált emisszió két energiaszint esetén – a jelenlevő (megfelelő frekvenciájú) foton arra ‘buzdítja’ a gerjesztett atomot, hogy vele azonos fázisban bocsásson ki egy foton
- A fotonok egy részét tükörpárral vezetük vissza az anyagba amely a lézerefényt kibocsátja, így biztosítjuk a stimulációt (lent)

- A valódi lézerért viszont még meg kell dolgozni: biztosítani kell hogy a gerjesztett szinten mindig több atom van (optikai pumpálás)
- Gyakorlatban például egy zöld lézerrel kell gerjeszteni egy titán-zafír kristályt hogy piros fényt bocsásson ki!



- Optikai rezgőüreg

# Antiprotonos hélium energiaszintjei



A legtöbb átmenet elérhető hagyományos lézerekkel,

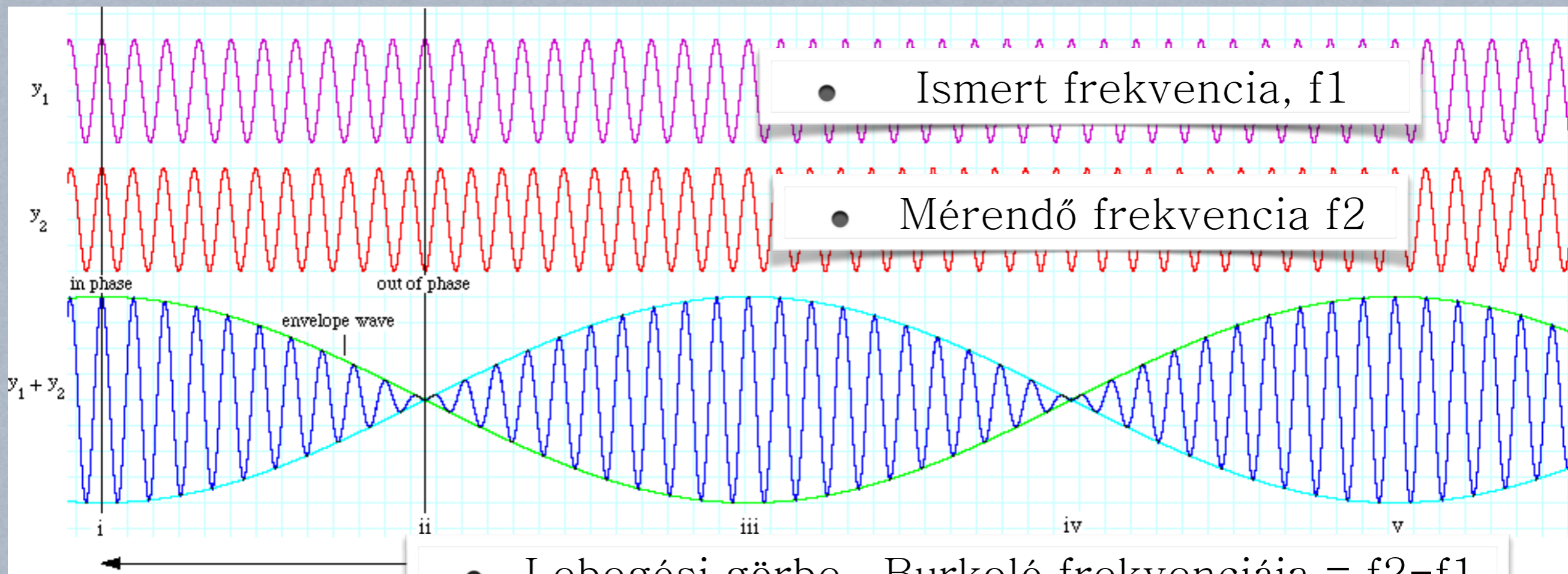
A precíz mérés legnagyobb ellensége viszont a Doppler-szélesedés: pár 100 MHz, ennek a kiküszöböléséhez sok fejlesztésre van szükség

Precíziós spektroszkópiánál a cél a pontosság  
növeléséhez:

- minél keskenyebb vonalszélességű lézerek használata, pontos frekvenciamérés
- minél hidegebb atom, hogy visszaszorítsa az ún. Doppler-szélesedést
- a Doppler-szélesedés esetleges kiküszöbölése spektroszkópiai módszerekkel

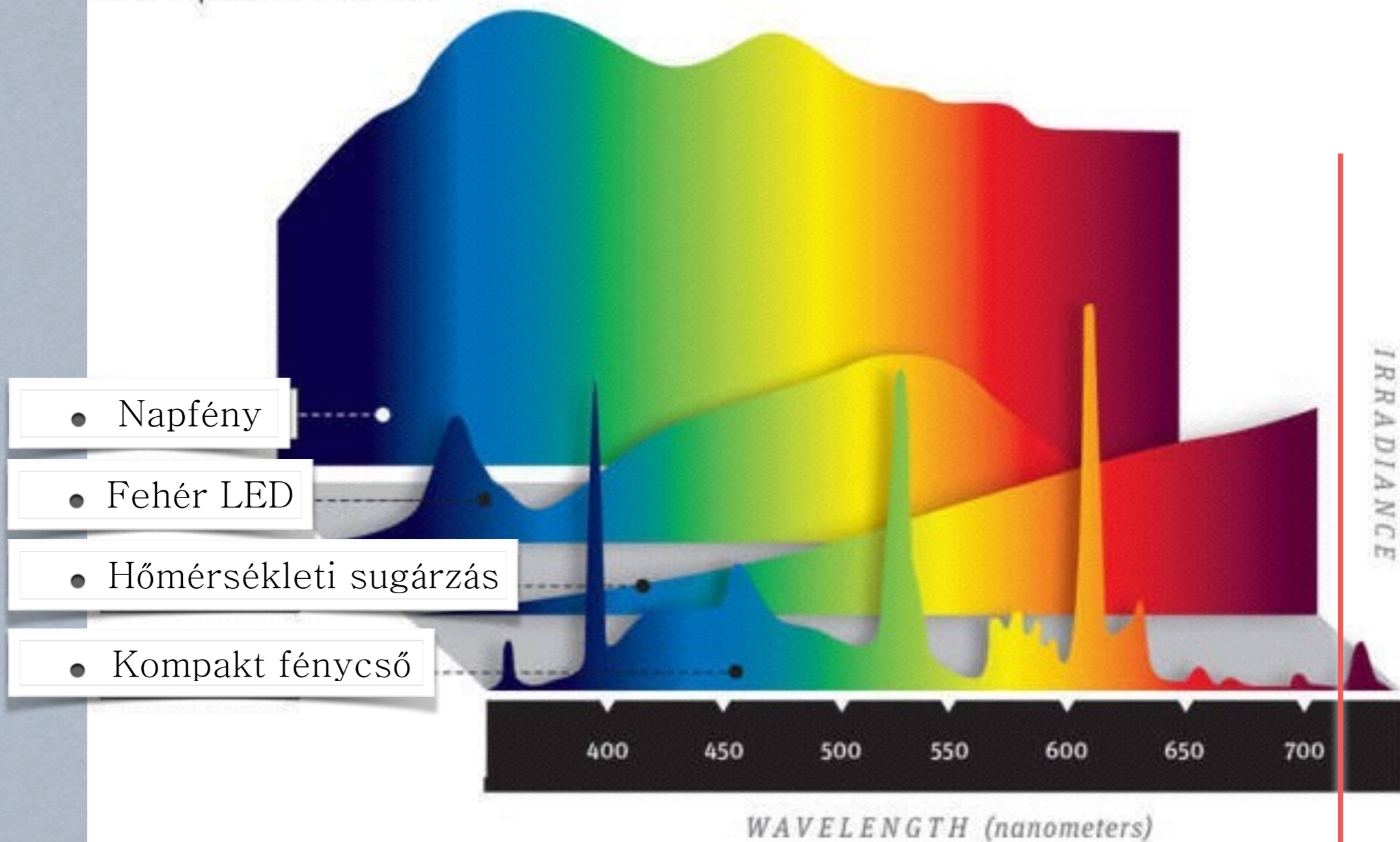
# Frekvenciszámlálás

- Optikai frekvenciák (piros  $\sim 400$  THz) 1000–5000–szer nagyobbak mint amit a leggyorsabb fotodetektorok



# Mit használjunk referenciának?

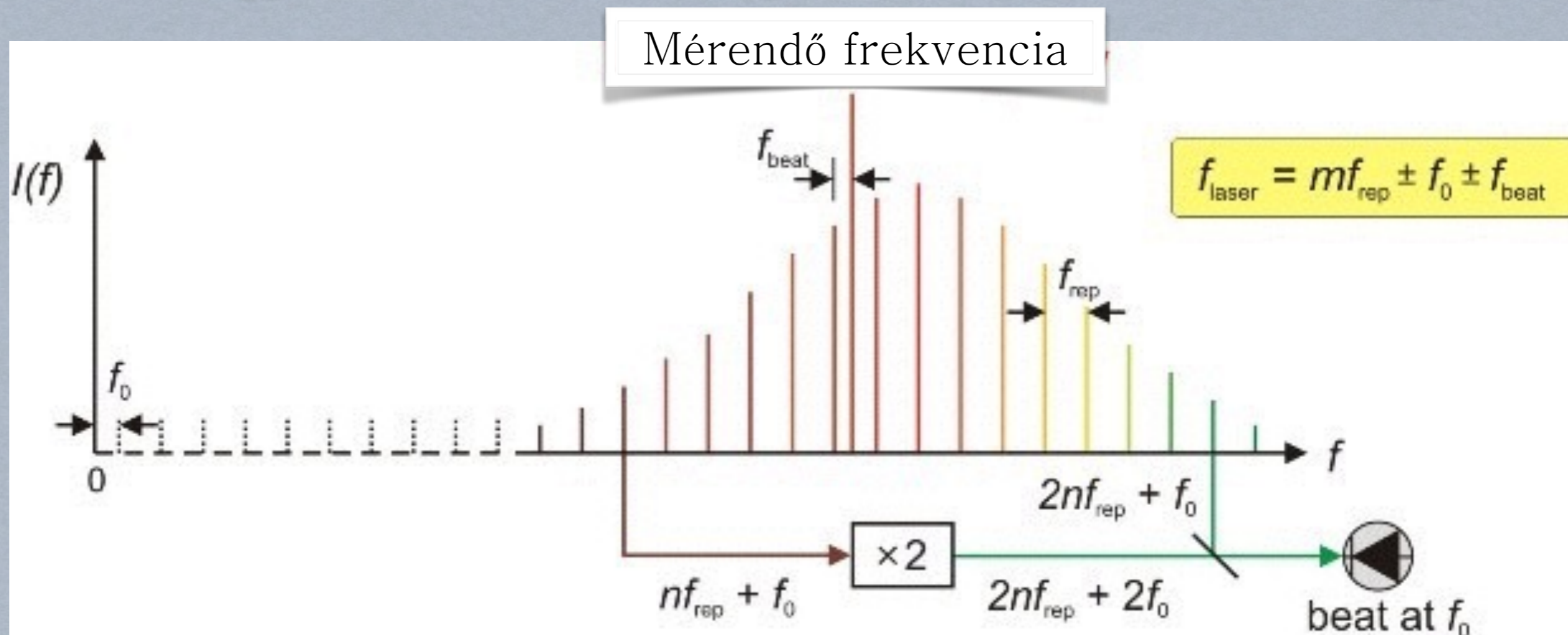
from: PopularMechanics.com



- Lézer frekvenciáját megmérni csak egy másik lézerrel lehet – kellene egy lézer ami ismert frekvenciákat tud előállítani, széles spektrumban

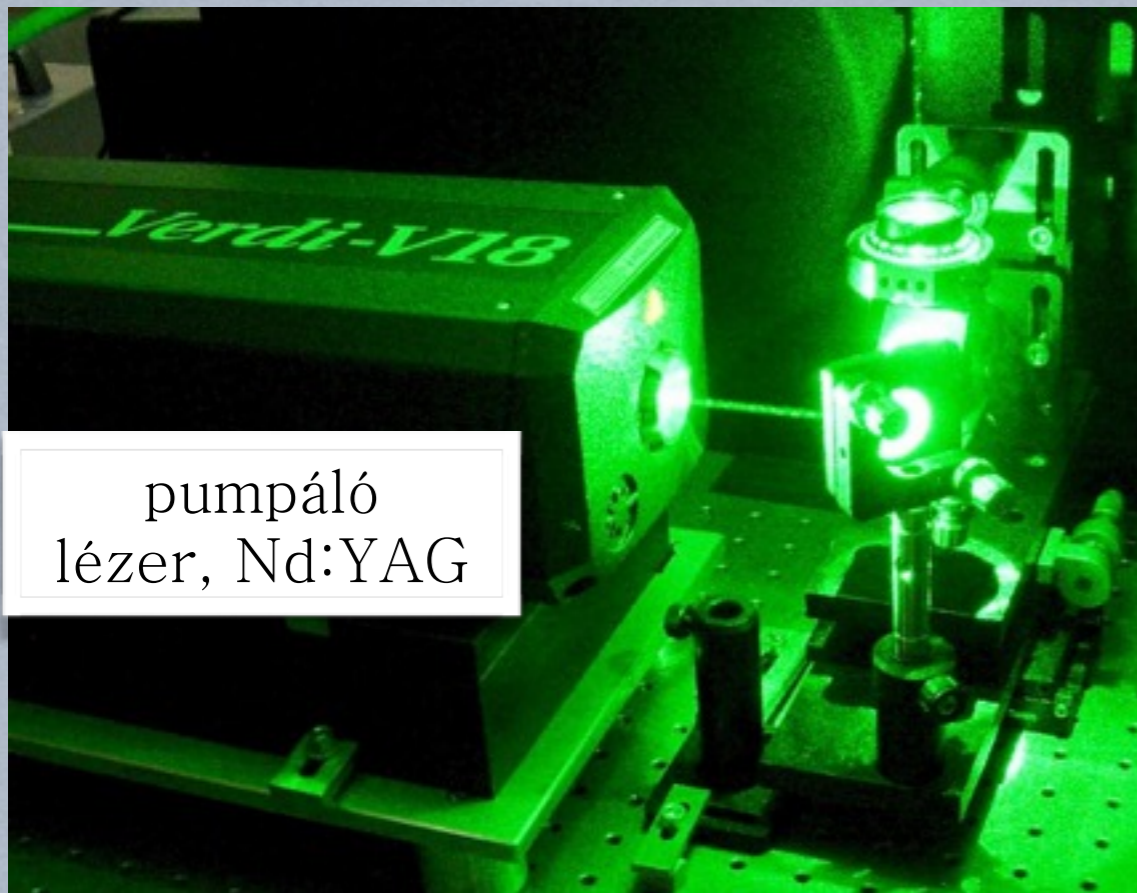
• Lézer

# Frekvenciafésű (Frequency comb)

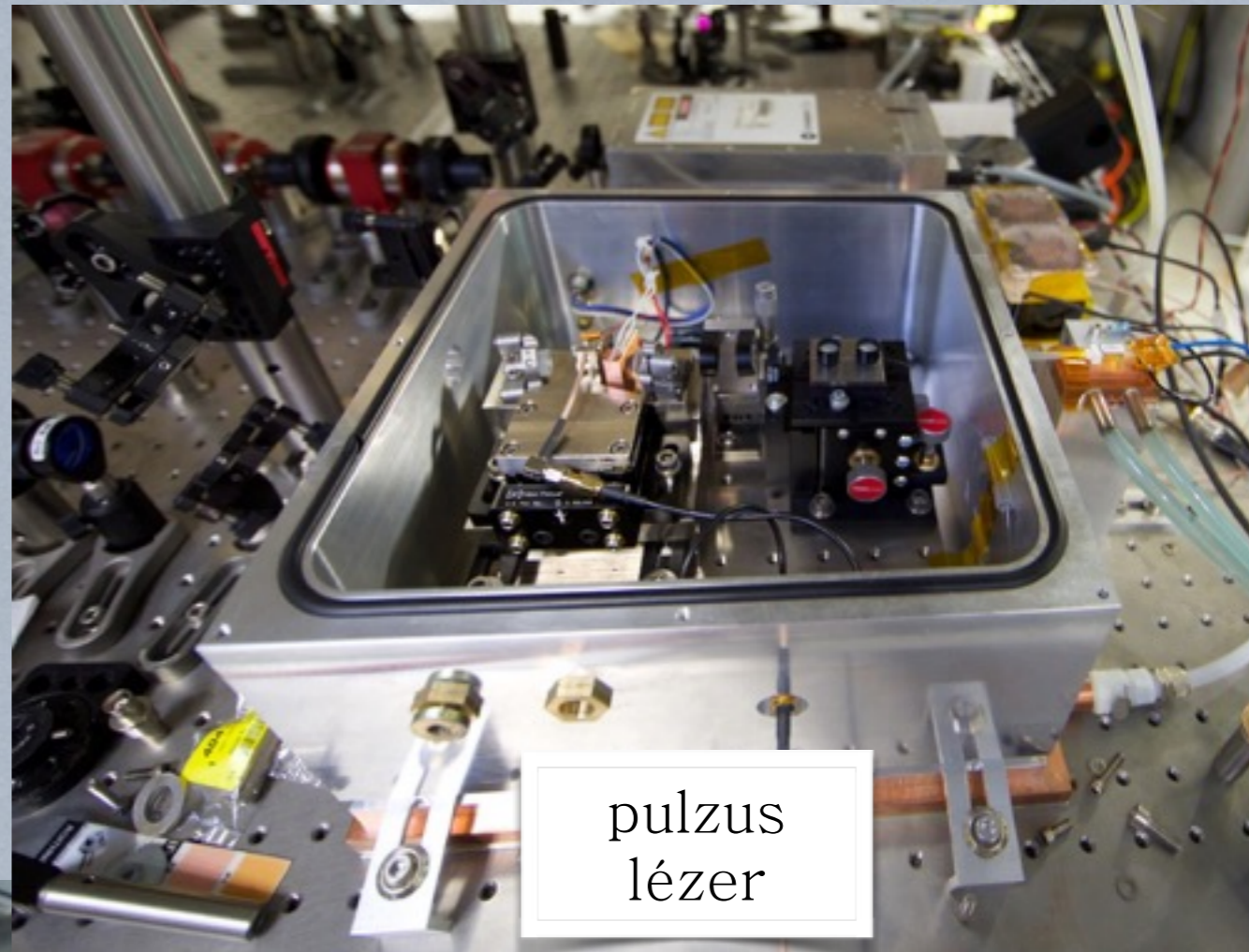


A frekvenciafésű egy fényforrás, amelynek spektruma nagyon pontos frekvenciaközű, vékony vonalakkból áll.

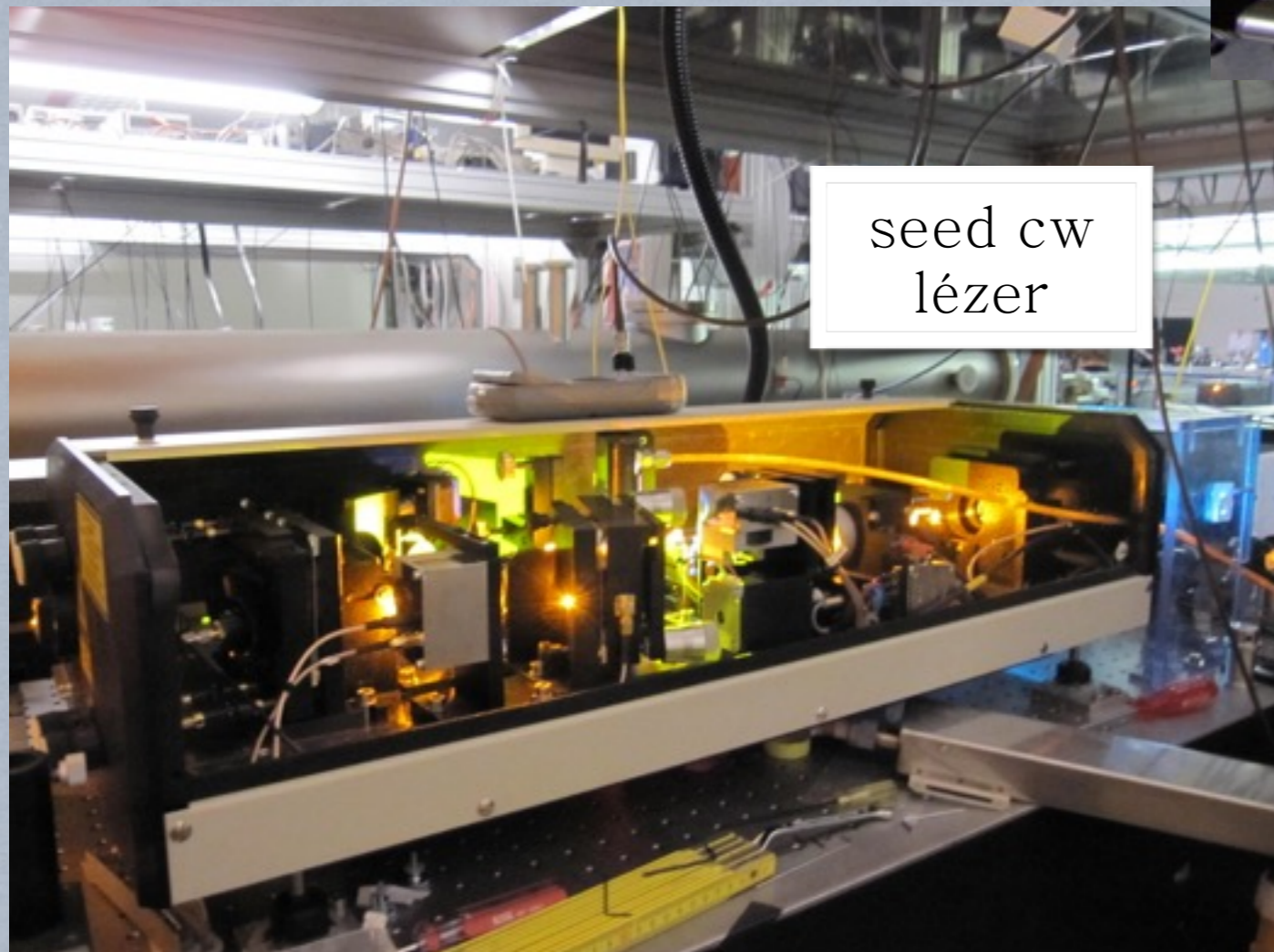
Ezzel a színekkel összeadva a mérendő lézerfényt, a legközelebbi vonallal 'lebegési görbe' jön létre, ebből megkapható a frekvenciakülönbség



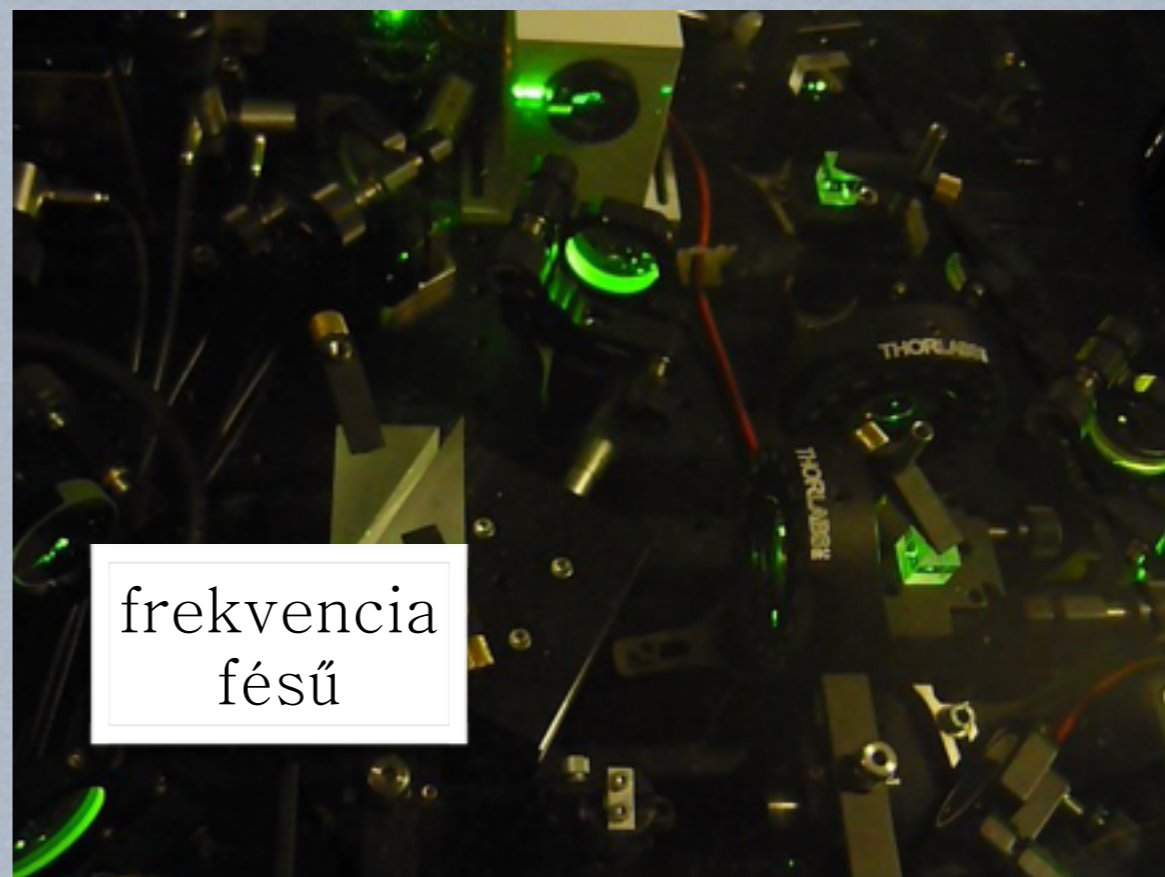
pumpáló  
lézer, Nd:YAG



pulzus  
lézer

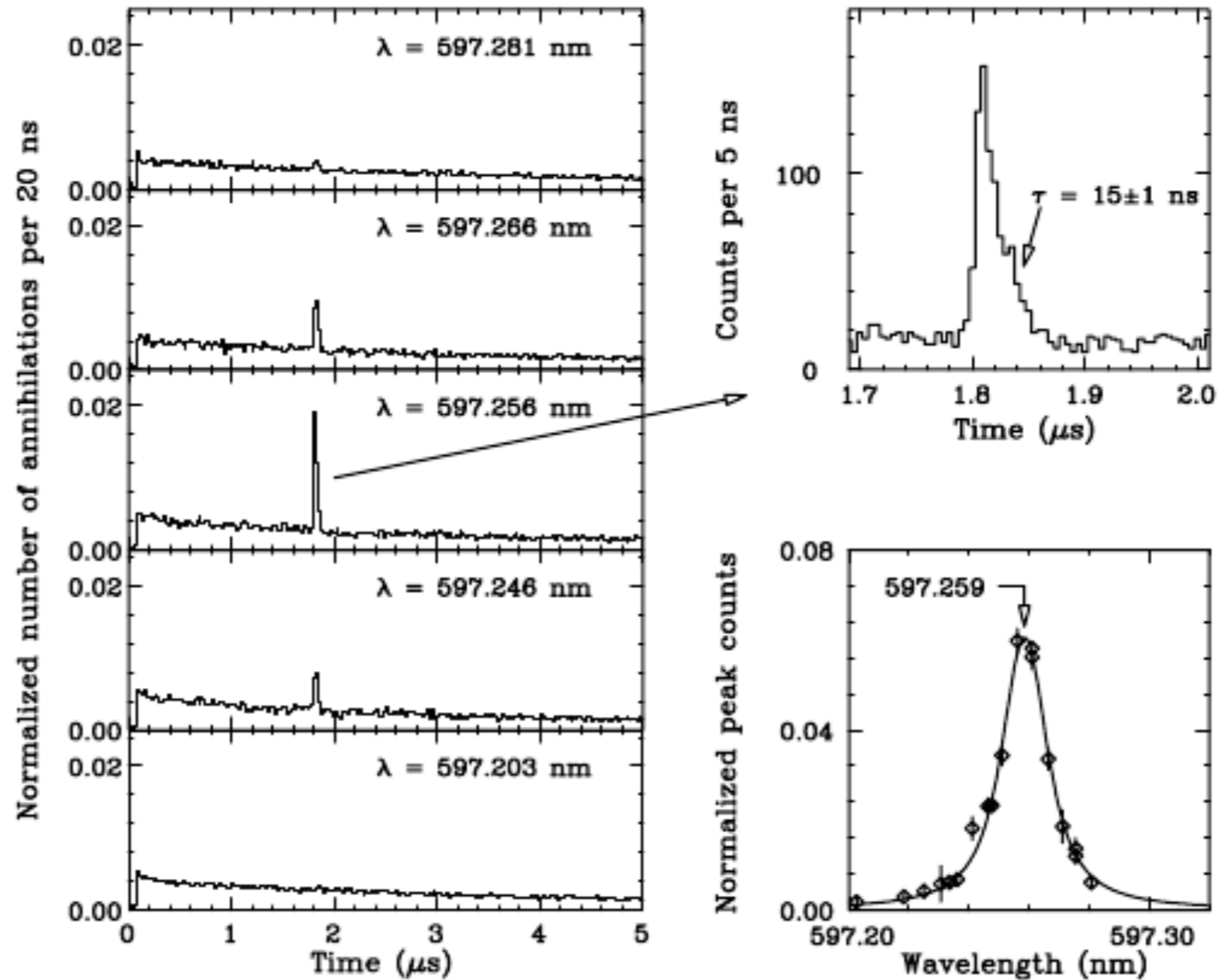


seed cw  
lézer



frekvencia  
fésű



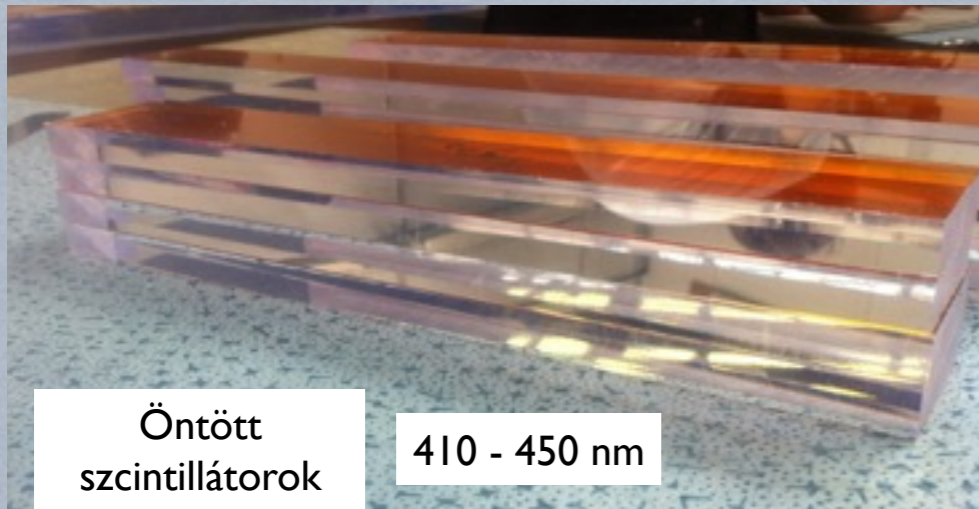
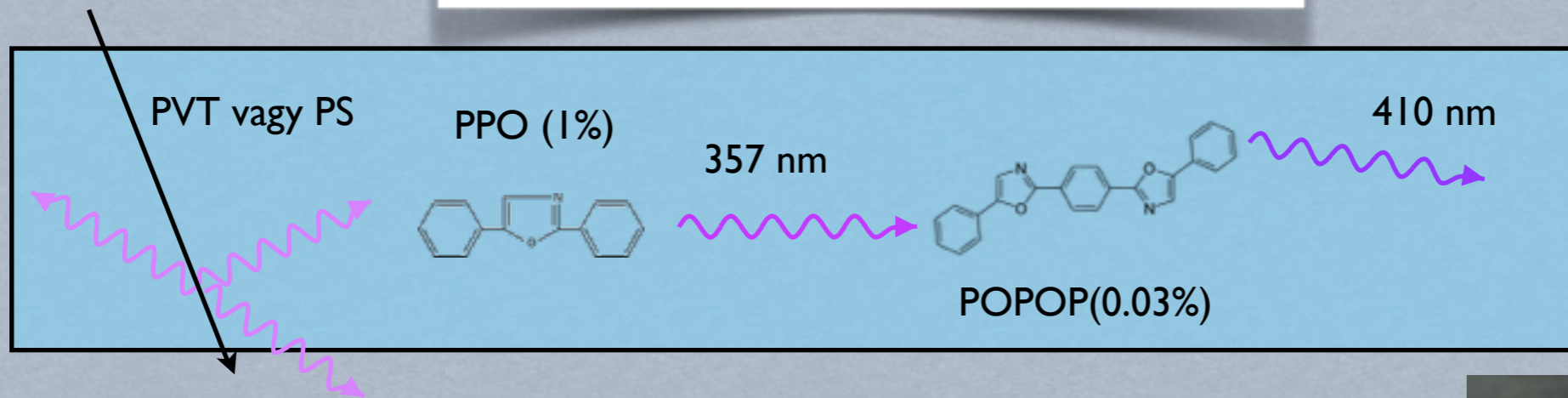


N. Morita et al, *Phys. Rev. Lett.* 72 (1994) 1180–1183.

Lézerrel indukált annihiláció, és az első így megmért rezonancia (20 éve). Az annihilációcó bomlástermékeinek (töltött pionokat) a megméréséhez részecskedetektorok kellene

# Szcintillátorok

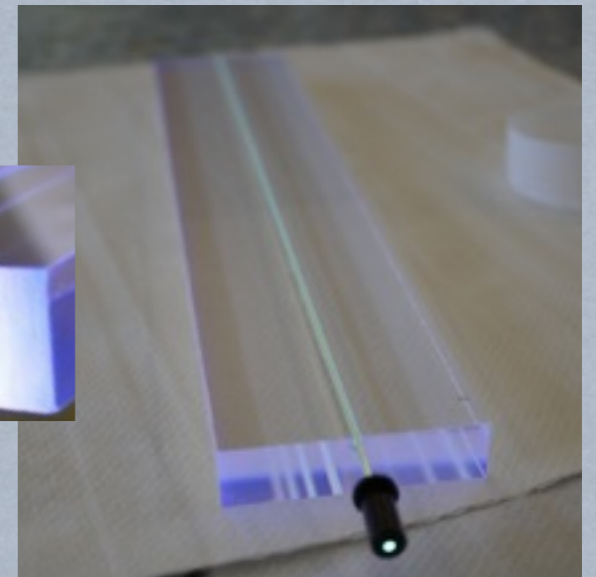
Ionizáló részecske



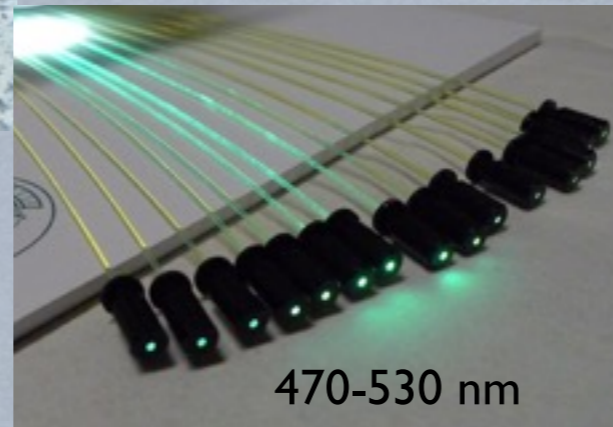
Öntött  
szcintillátorok

410 - 450 nm

$\sim 10^5$  foton / cm  
minimum ionizáló  
részecskékre

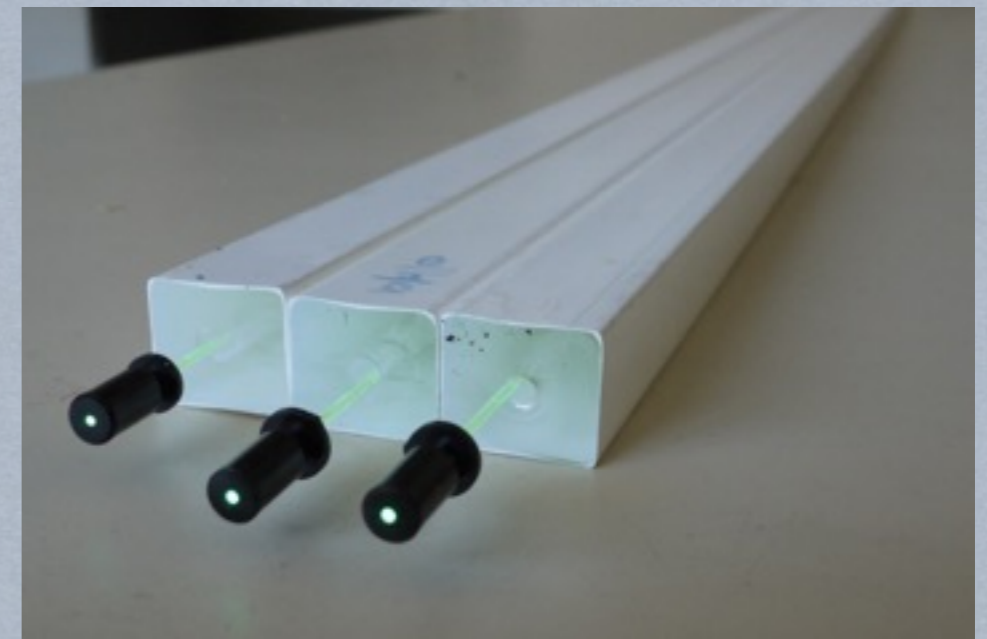


Extrudált  
szcintillátorok



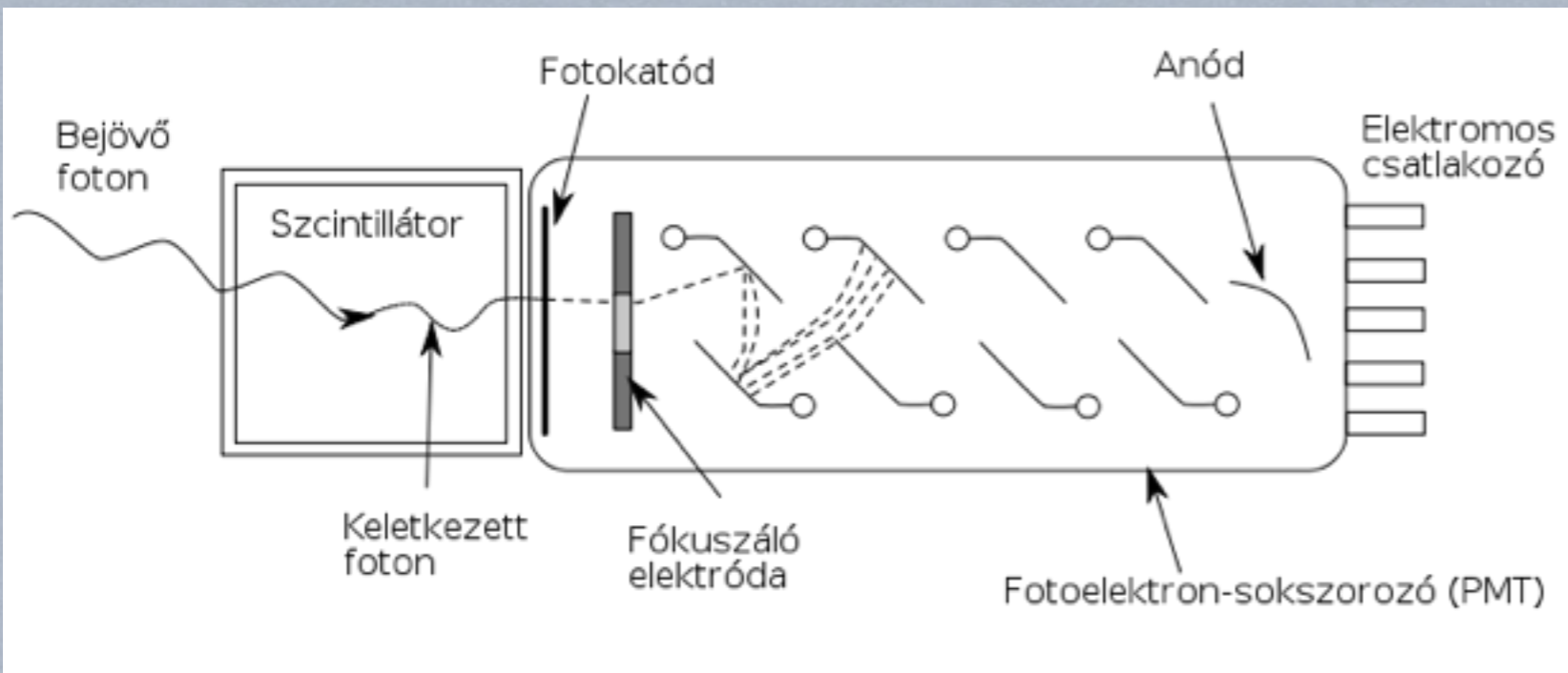
470-530 nm

Frekvenciatoló  
optikai szálak a  
szcintillációs fény  
kivezetésére

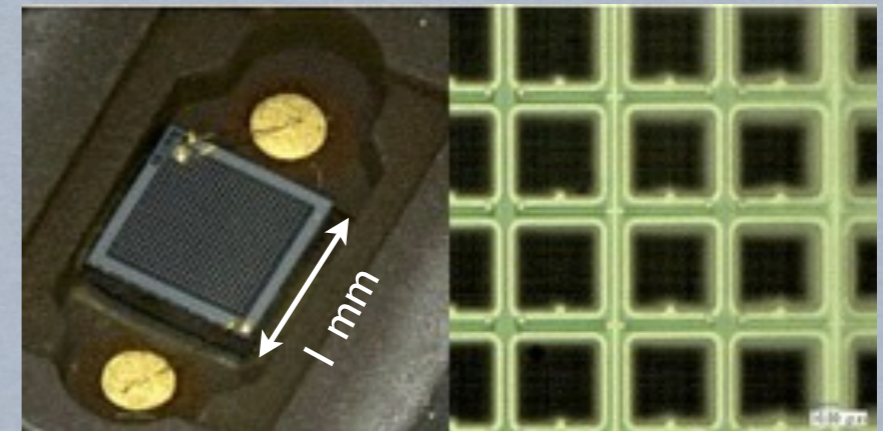


# Fotonszámlálók

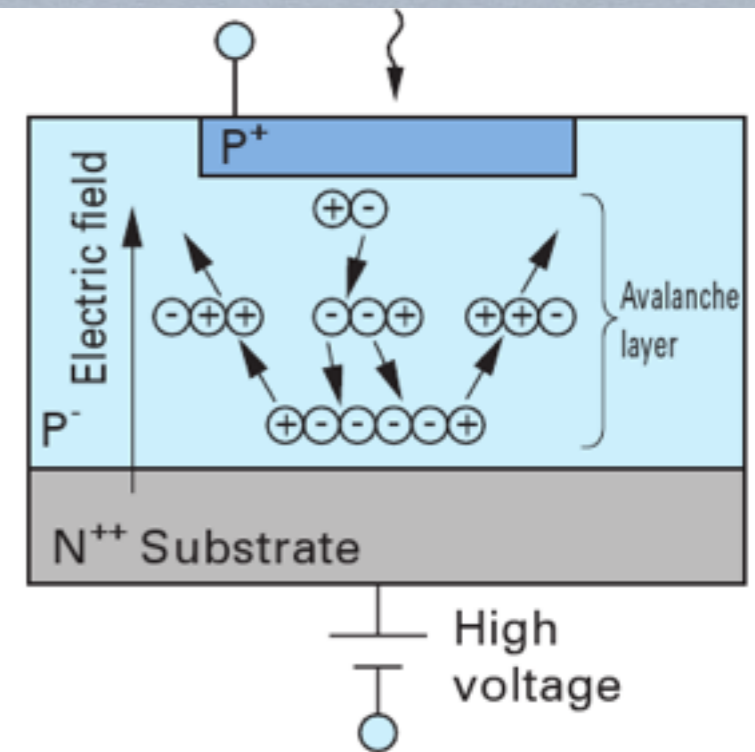
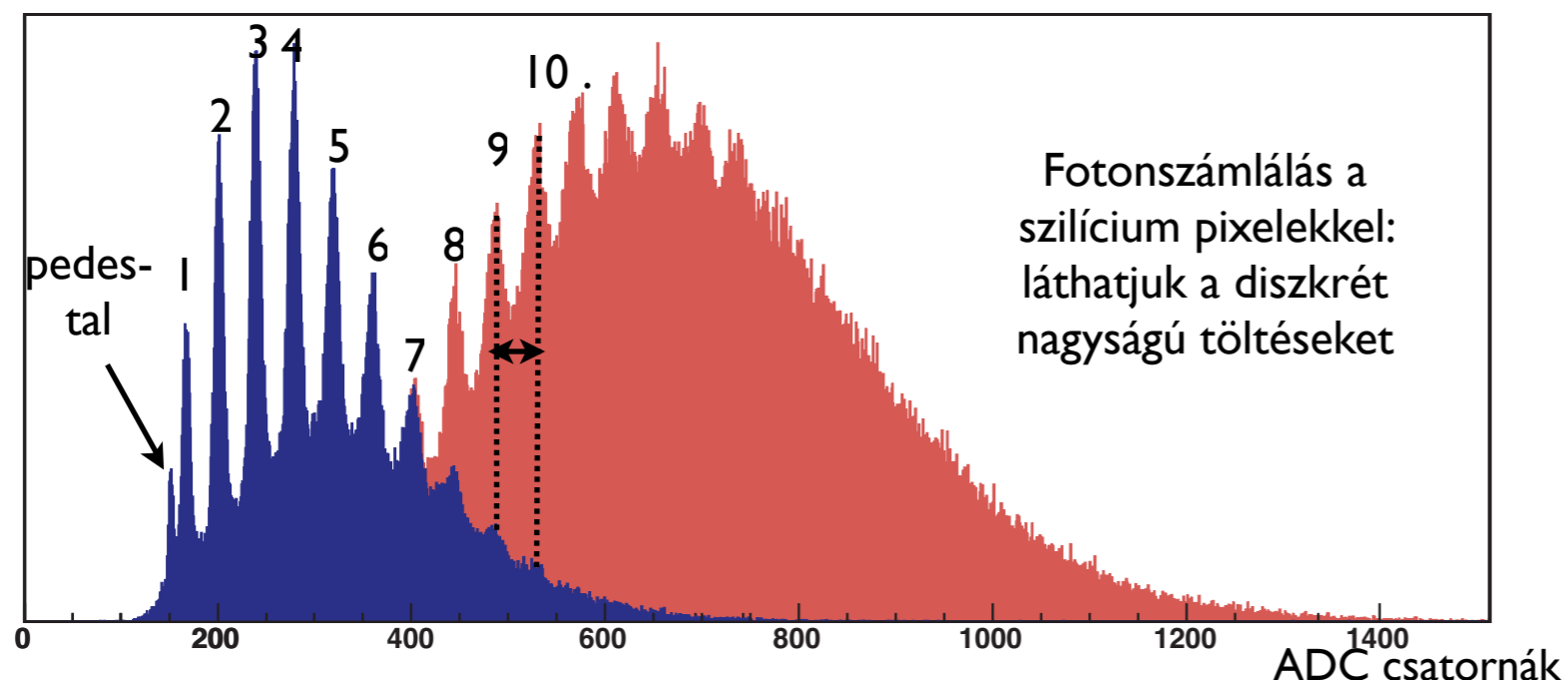
- Speciális fotoelektron-sokszorozók (gateable PMTs)



- Sokpixeles szilícium fotonszámlálók



- Egy pixel működése



# Konklúzió

- Egyelőre nincsen, a kérdés nyitott!
- Remélhetőleg egyszer találunk magyarázatot, vagy az atomokban, vagy a csillagokban

- Köszönöm a figyelmet! Kérdést szívesen fogadok most, és emailben is: [anna.soter@cern.ch](mailto:anna.soter@cern.ch)