



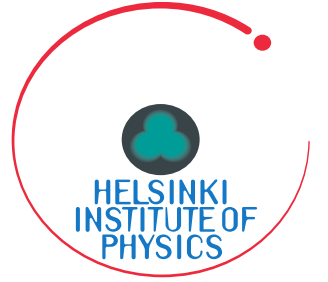
Centre of Excellence  
in Quark Matter



**ALICE**



UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ



# ALICE -luento

Maxim Virta

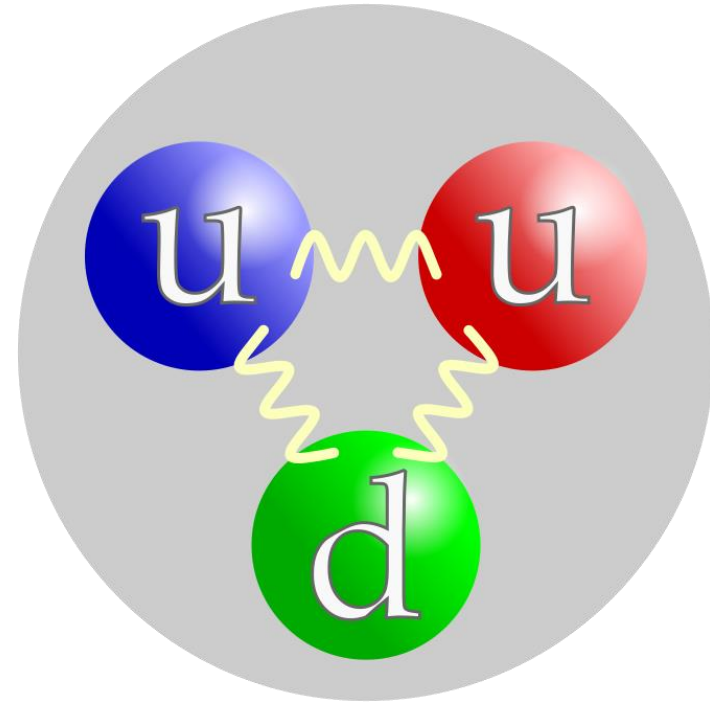
Finnish High School Programme  
CERN, 01.11.2024

# Kuka, mistä, miksi?

- 2014-2017 Järvenpään lukio
- 2017-2022 Helsingin yliopisto, filosofian maisteri
  - Teoreettisen fysiikan opinnot
  - Kesätyö Jyväskylän ALICE-ryhmässä
- 2022 → Jyväskylän yliopisto, väitöskirjatutkija
  - ALICE-ryhmä
  - Korrelaatio- ja virtaussuureet kvarkki-gluoniplasmassa

# Sisältö

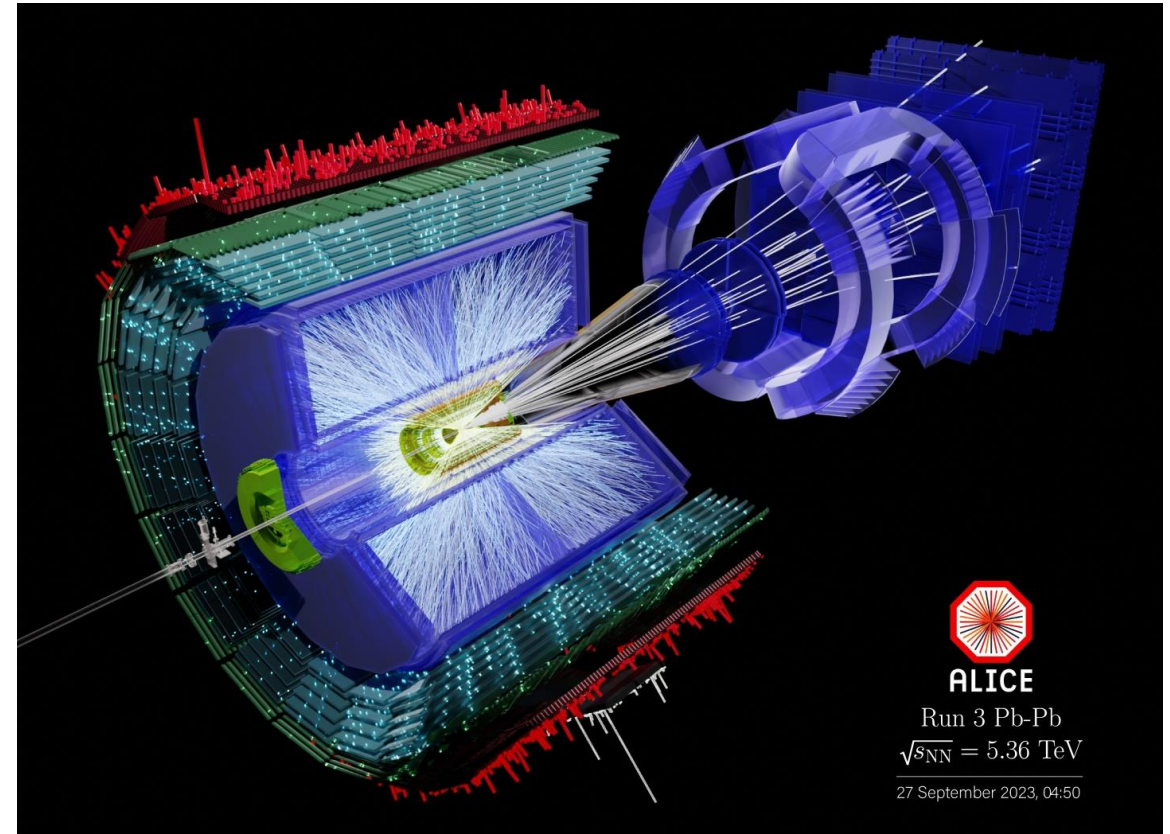
1. Mikä on ALICE?
2. Standardimalli ja kvarkki-gluoniplasma
3. Tämänhetkinen tutkimus
4. Laitteisto



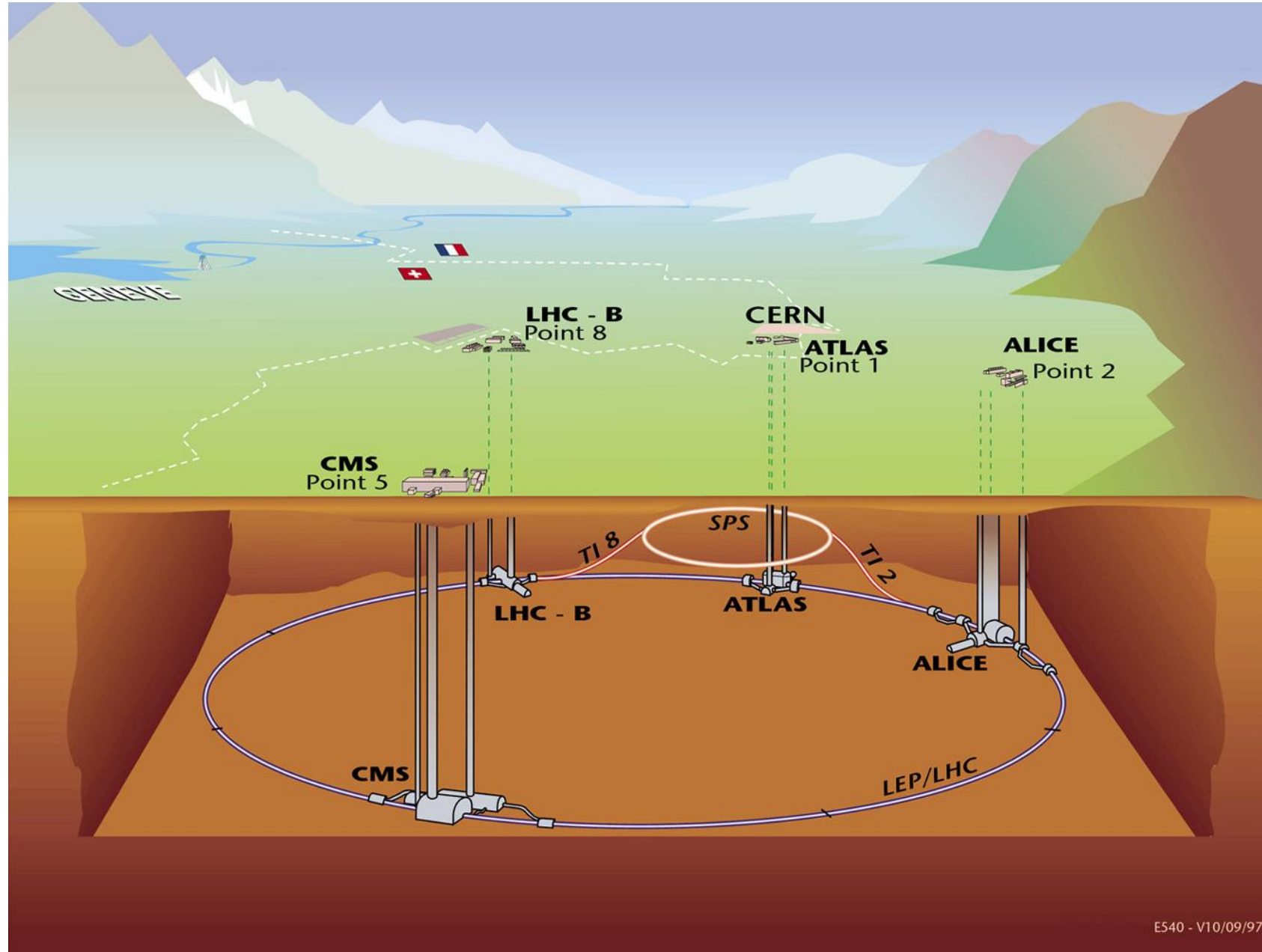
# A Large Ion Collider Experiment

## Keskitty tutkimaan:

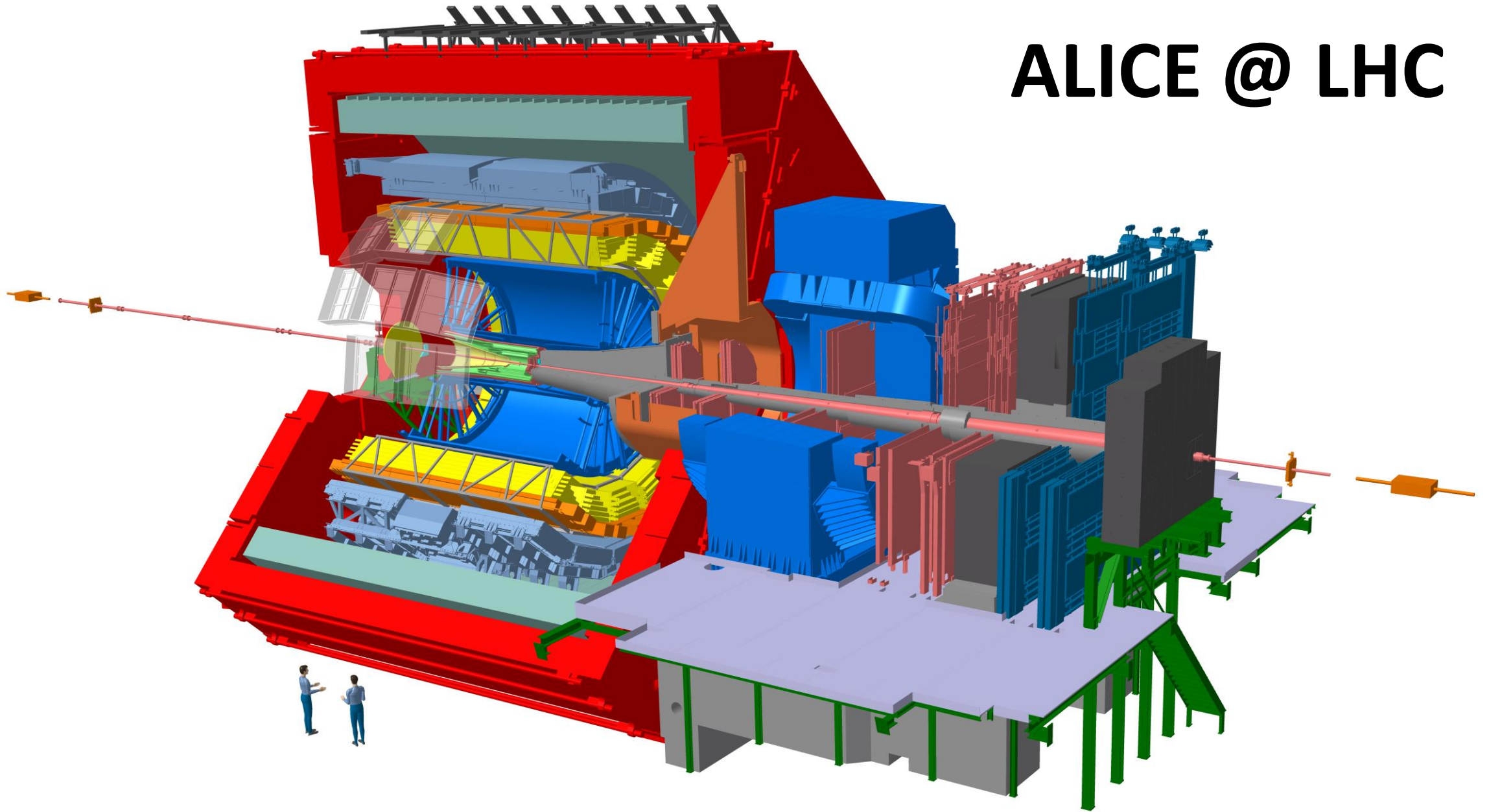
- PbPb törmäykset
- pp törmäykset
- kvarkki-gluoniplasma (QGP)
- suurenergiset hiukkassuihkut (jet)



# LHC = Large Hadron Collider @ CERN

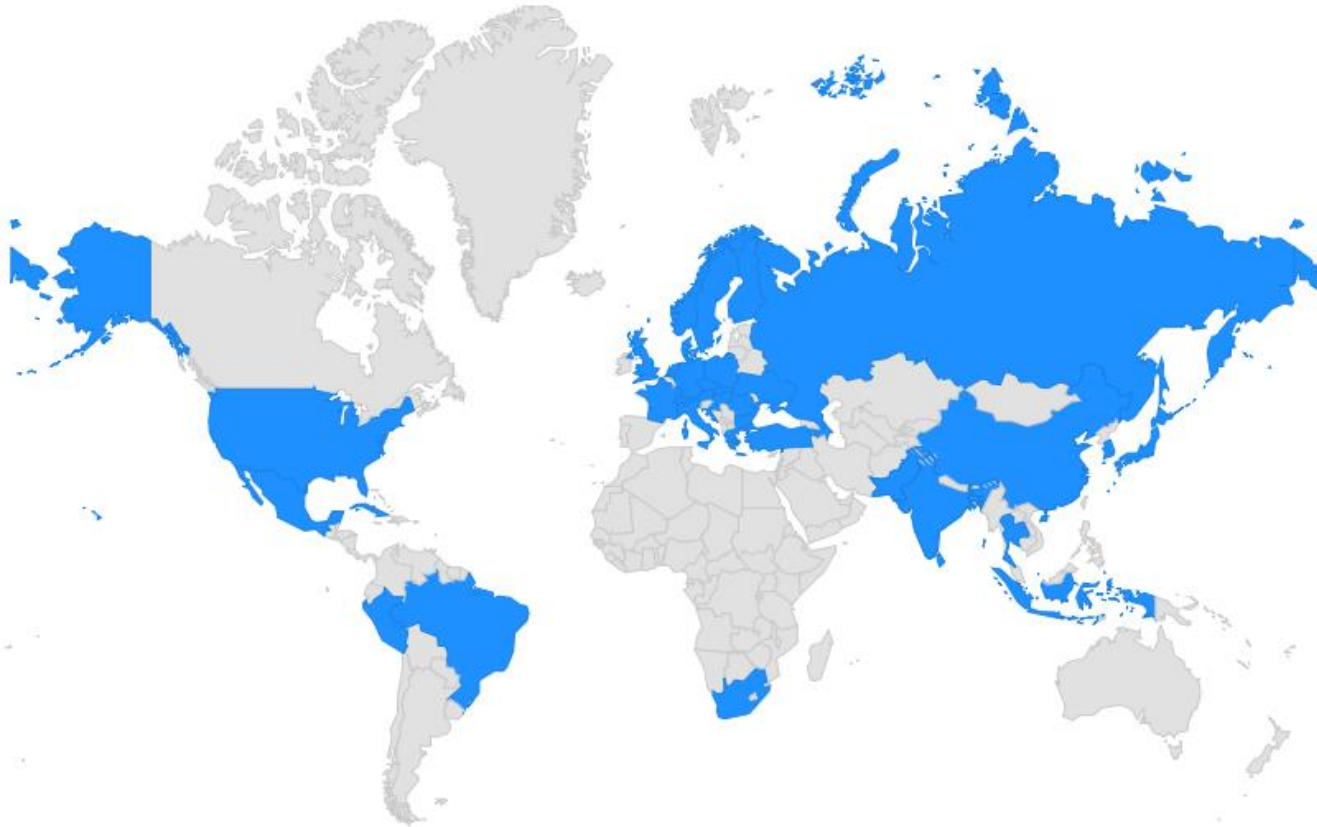


# ALICE @ LHC





40 maata, 170 instituuttia, 1971 jäsentä



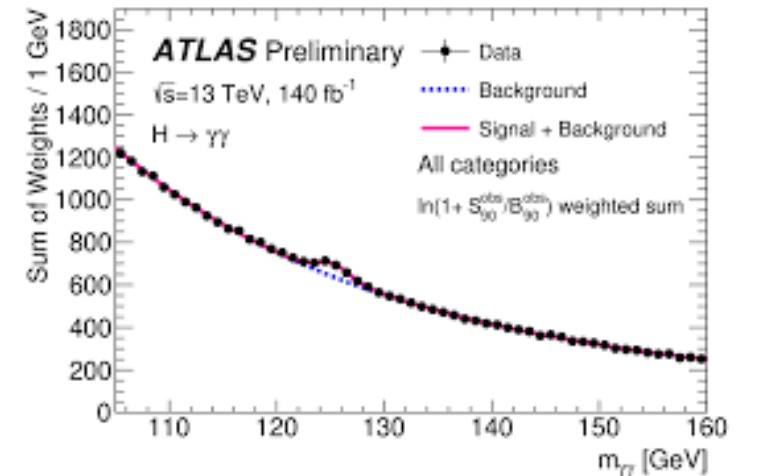
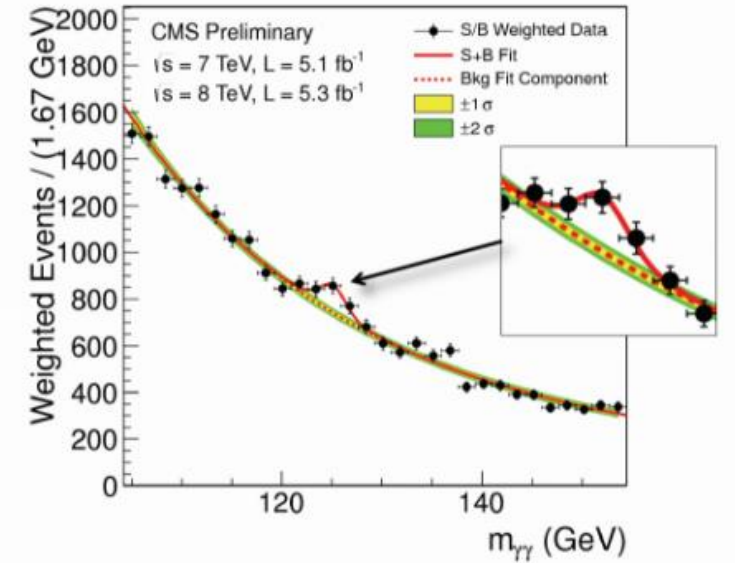
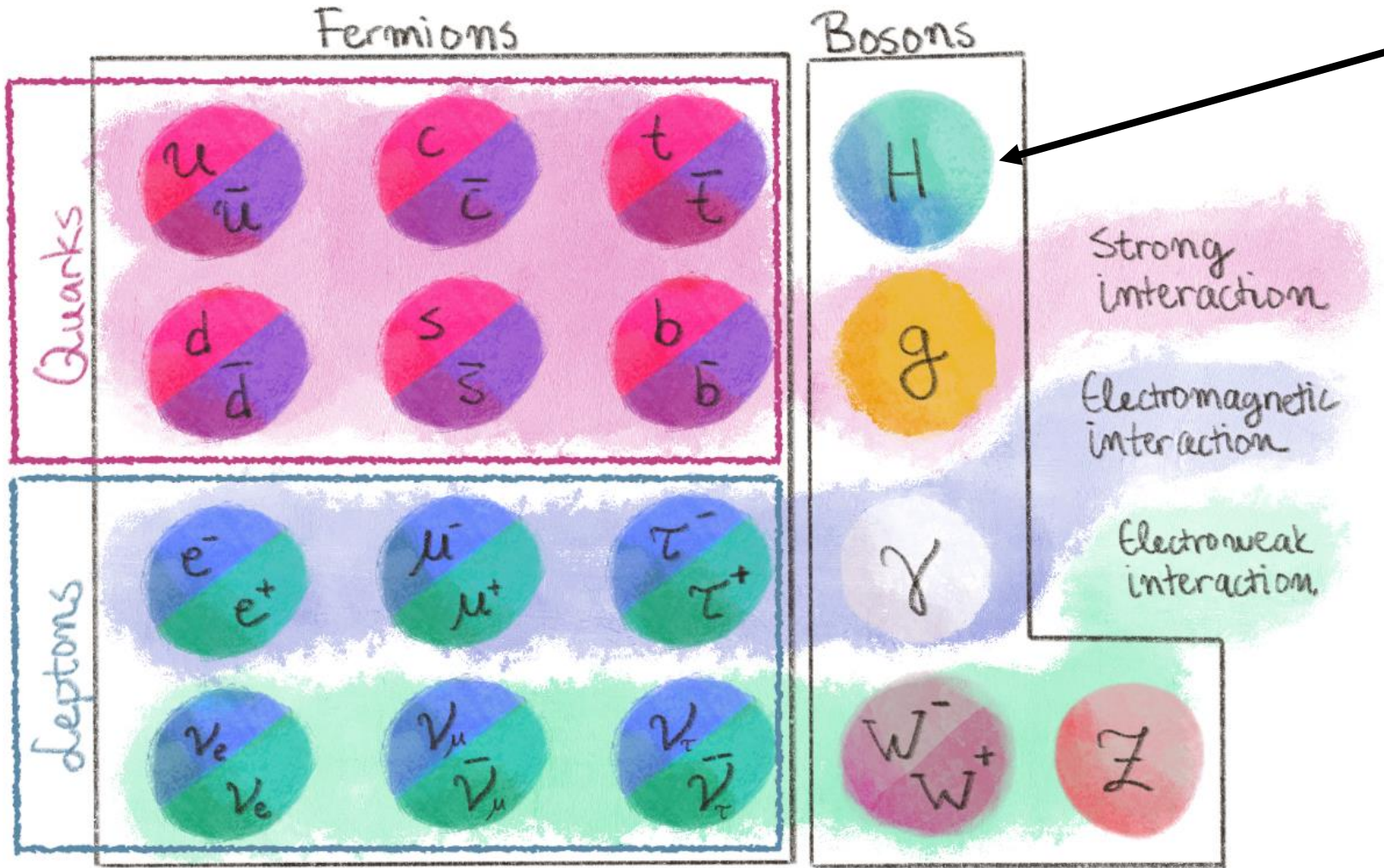
PhD celebration, 27.6.2023



## Jyväskylän ALICE:

- 3 senioria
- 3 post docia
- 4 väitöskirjatutkijaa

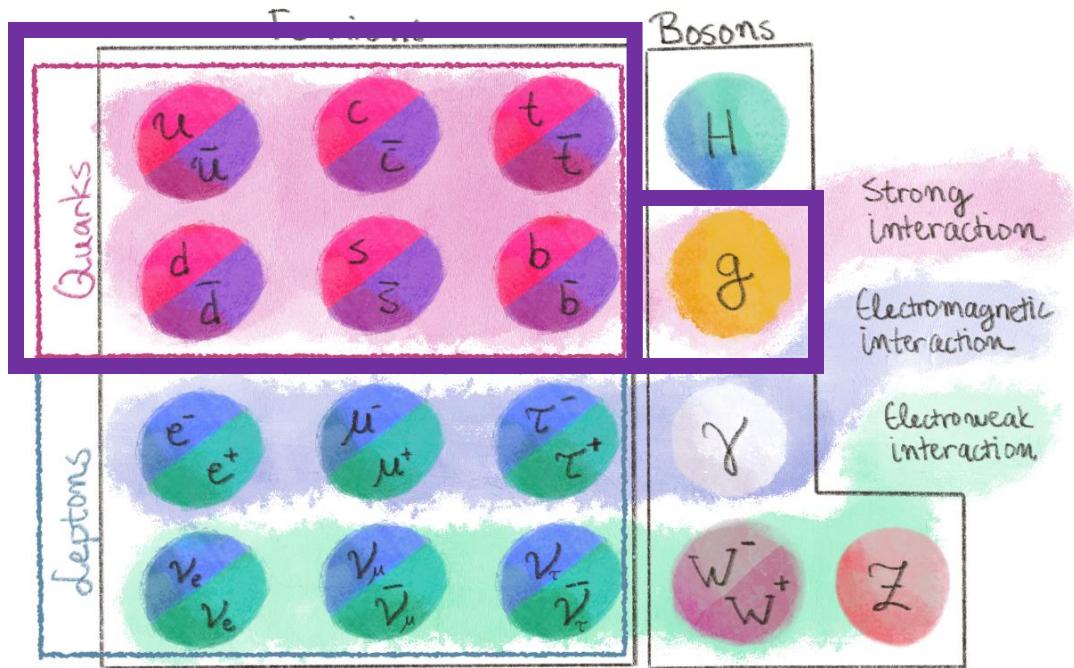
# Standardimallin alkeishiukkaset:



2012, LHC

Kuva: Heidi Rytkönen





## Suomen yliopistoista:

- Hiukkasfysiikka keskittyy Helsingin ja Jyväskylän yliopistoihin, vaikka erityisesti instrumentaatiota on muuallakin.
- Helsinki osallistuu CMS-kokeeseen ja teoria painottuu sähköheikkoon ja BSM = beyond Standard Model fysiikkaan.
- Jyväskylä osallistuu ALICE-kokeeseen ja tutkimus painottuu vahvaan vuorovaikutukseen.
- Ei raja-aitoja; myös QCD:ta HY ja sähkö-heikkoa JYU

## Seuraavassa keskitytään vahvaan vuorovaikutukseen:

- Huomaa: Higgs antaa massan alkeishiukkasille. Keveiden u ja d kvarkkien massat ovat n. 4-5 MeV
  - protonin = (uud) massasta alle 15 MeV, korkeintaan 1,5 %, on kvarkkien massaa.
  - suurin osa baryonisen aineen massasta on kvanttiväridynamiikan (QCD) sidosenergiaa
 Osoittautuu, että protoni on rakenteeltaan hyvin rikas objekti, paljon muuta kuin "pelkästään (uud)". Tästä lisää myöhemmin.

# “Normaaleissa” olosuhteissa kvarkit ovat kahliutuneet hadronien sisään:

Hadronit = **baryonit** + **mesonit**, tunnetaan yli 300 kpl

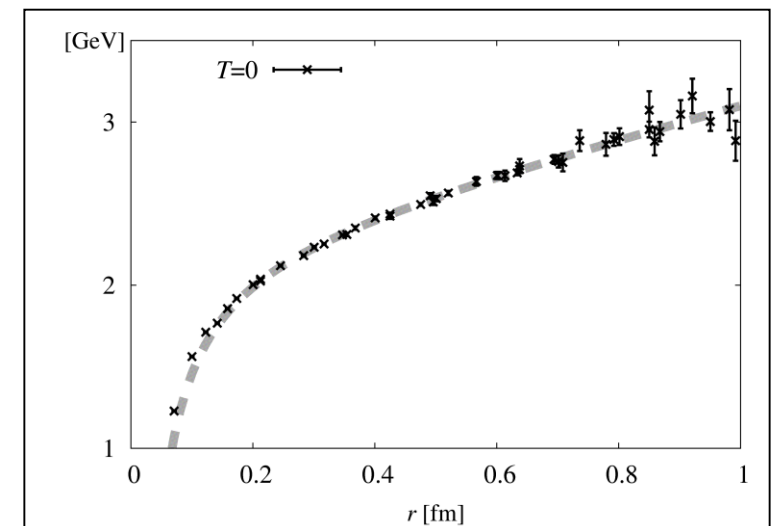
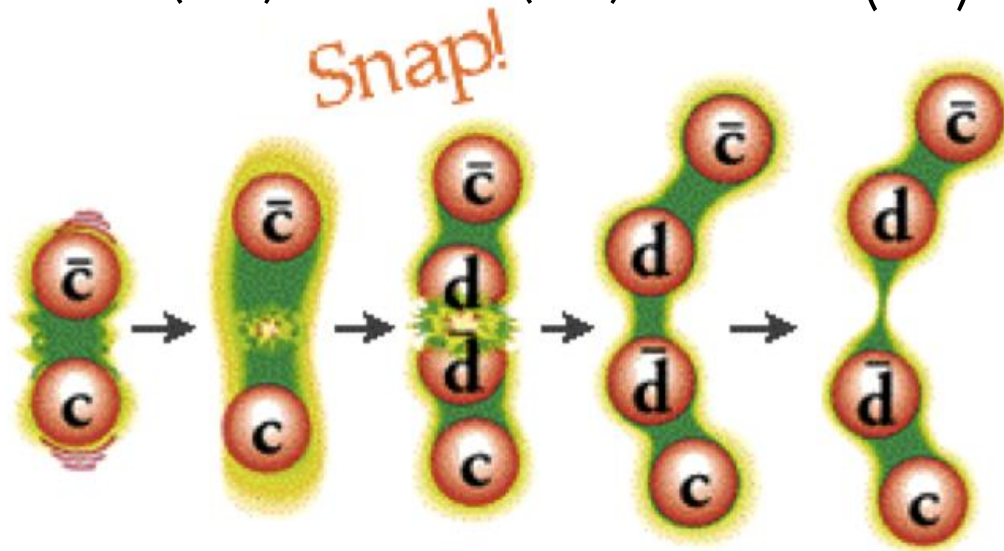
(Anti-) **Baryonit** = kolmen (anti-)kvarkin sidottuja tiloja, esimerkiksi

$$p = (uud), \quad n = (udd), \quad D^{++} = (uuu), \quad L = (uds), \quad W = (sss), \dots$$

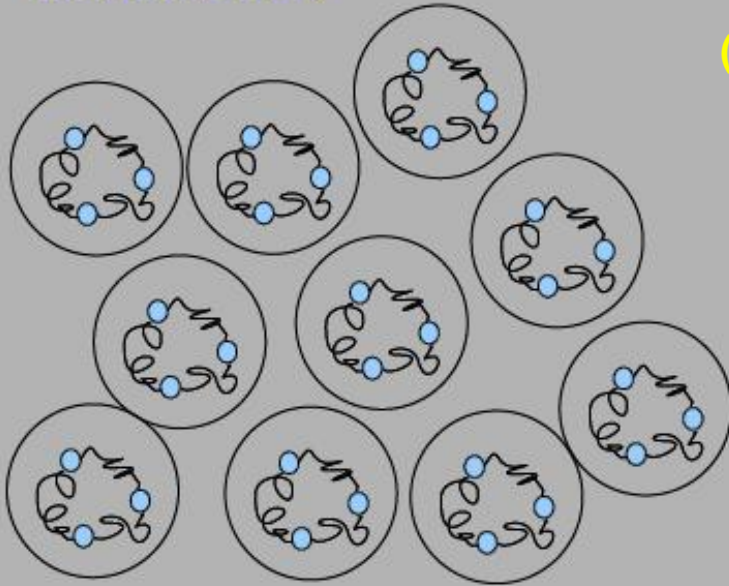
**Mesonit** = kvarkin ja anti-kvarkin sidottuja tiloja, esimerkiksi:

$$\rho^+ = (u\bar{d}), \quad \rho^- = (d\bar{u}), \quad K^+ = (u\bar{s}), \quad D^+ = (c\bar{d}), \quad D^0 = (c\bar{u}), \quad J/\psi = (c\bar{c}) \dots$$

Kahliutuminen  
skemaattisesti:

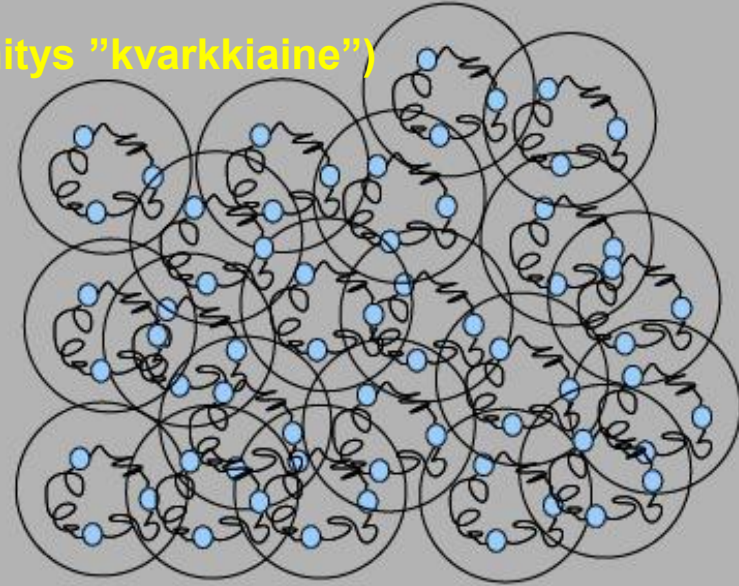


hadronikaasu



(Toisinaan nimitys "kvarkkiaine")

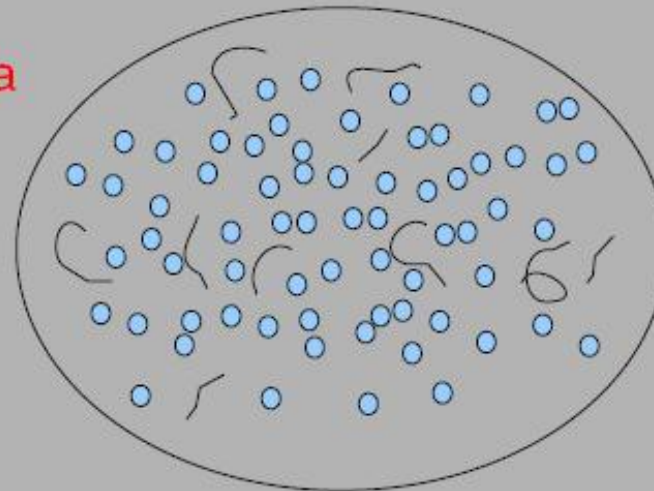
Puristus



Nukleonitiheys kultaytimessä  
 $n \sim 200 \text{ kpl} / [4/3 \pi (6.5 \text{ fm})^3]$   
 $\sim 0.17 \text{ kpl} / \text{fm}^3$

$n \sim 1 \text{ kpl} / \text{fm}^3$

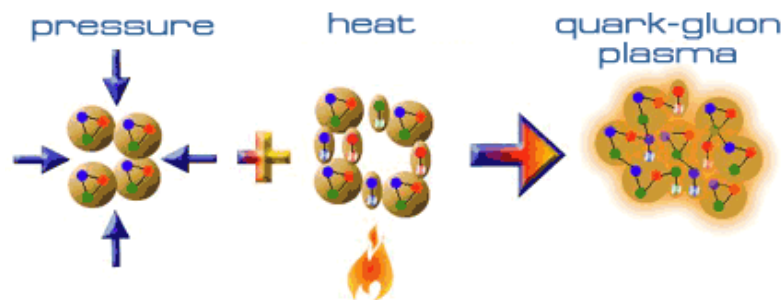
kvarkki-gluoniplasma



Nukleonit eivät ole  
"kovakuorisia biljardipalloja"

# Kvarkki-gluoniplasma = aineen 5. olomuoto

QCD ennustaa: olomuoto muuttuu, kun  $T > T_c \sim 2 \times 10^{12} \text{ K} \sim 150 \text{ MeV}$



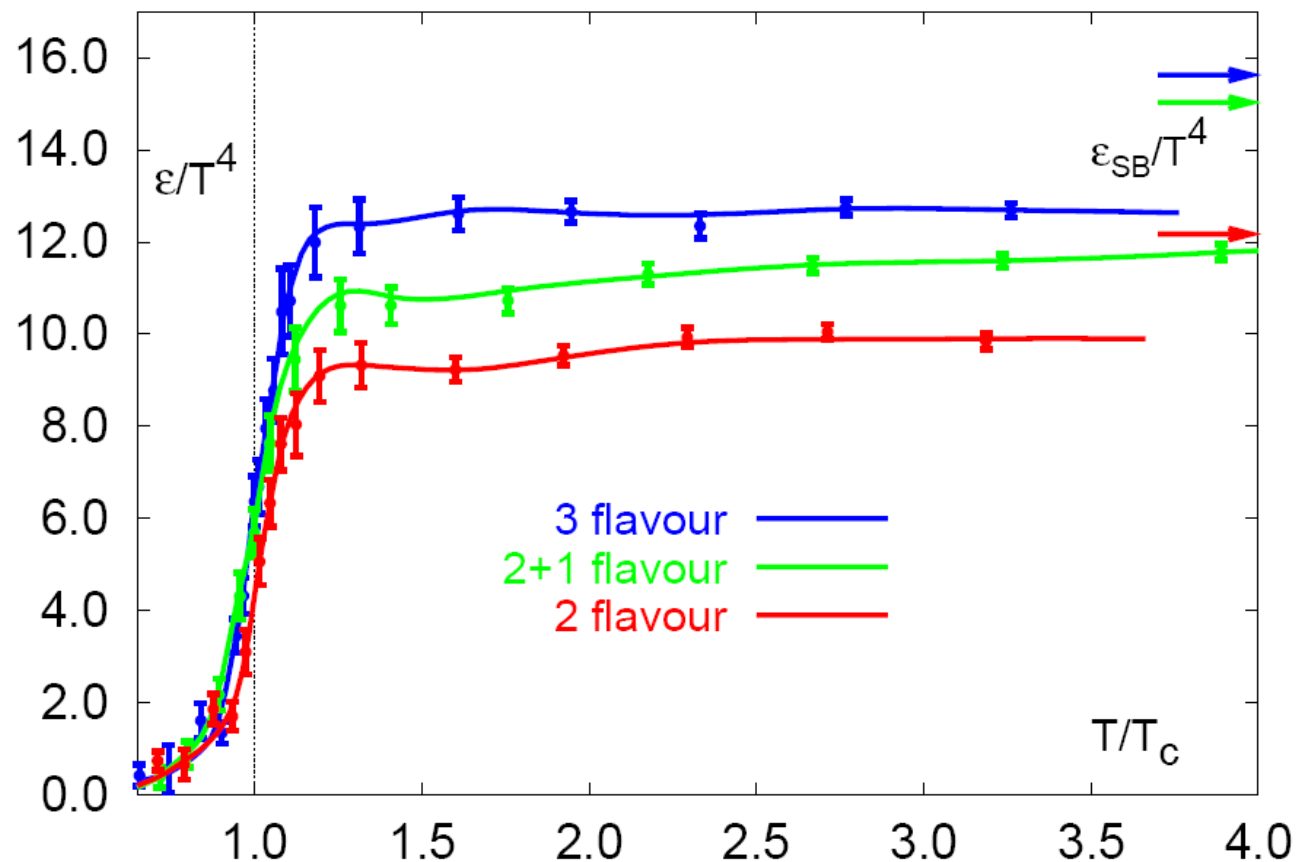
Relativistinen massattomien hiukkasten  
ideaalikaasun energiatiheys

$$\varepsilon \sim (\text{vap. ast. Lkm}) T^4$$

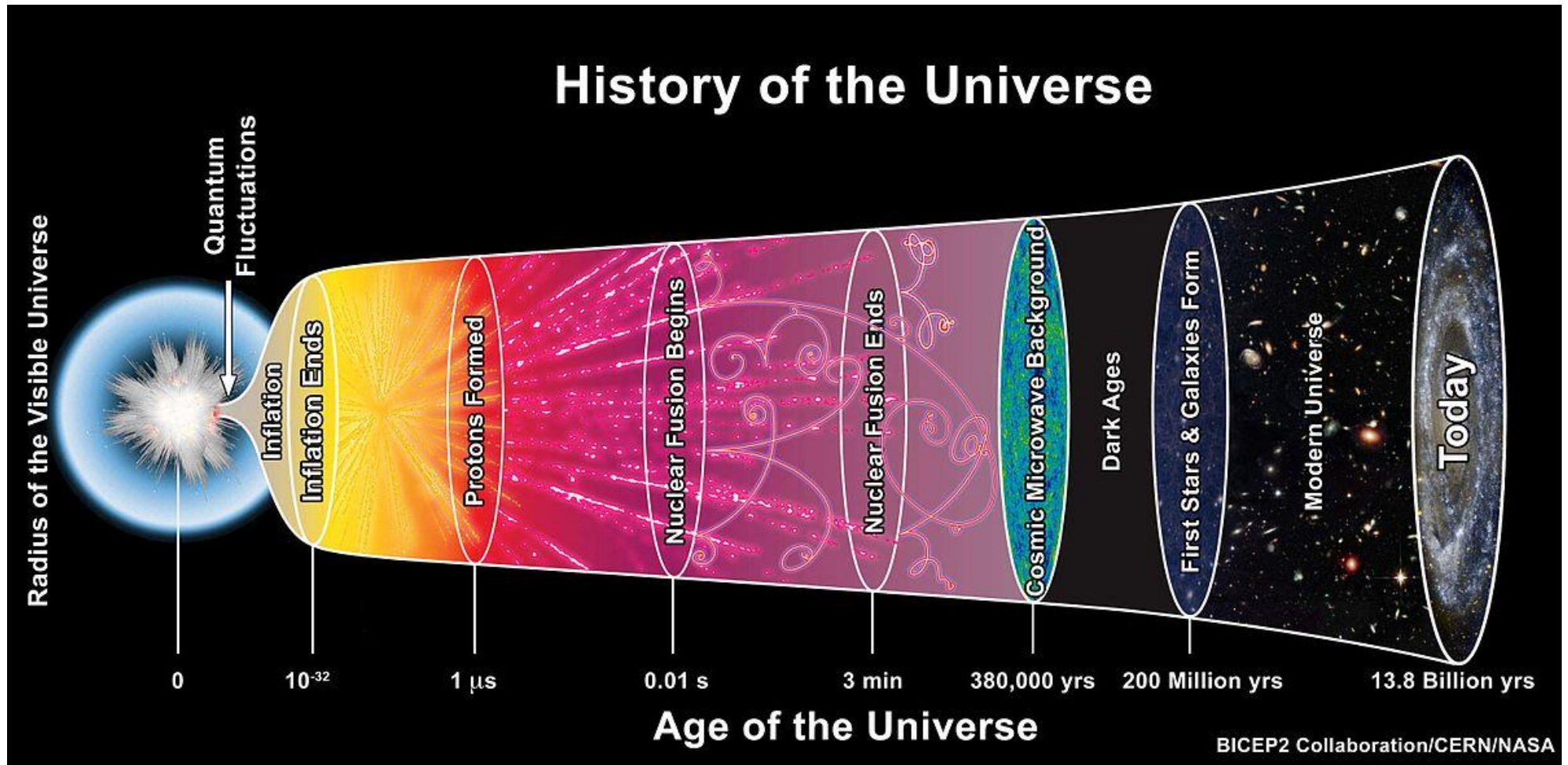
Paine

$$P = \varepsilon/3$$

Lisäksi aineen entropiatiheys:  $s \sim T^3$

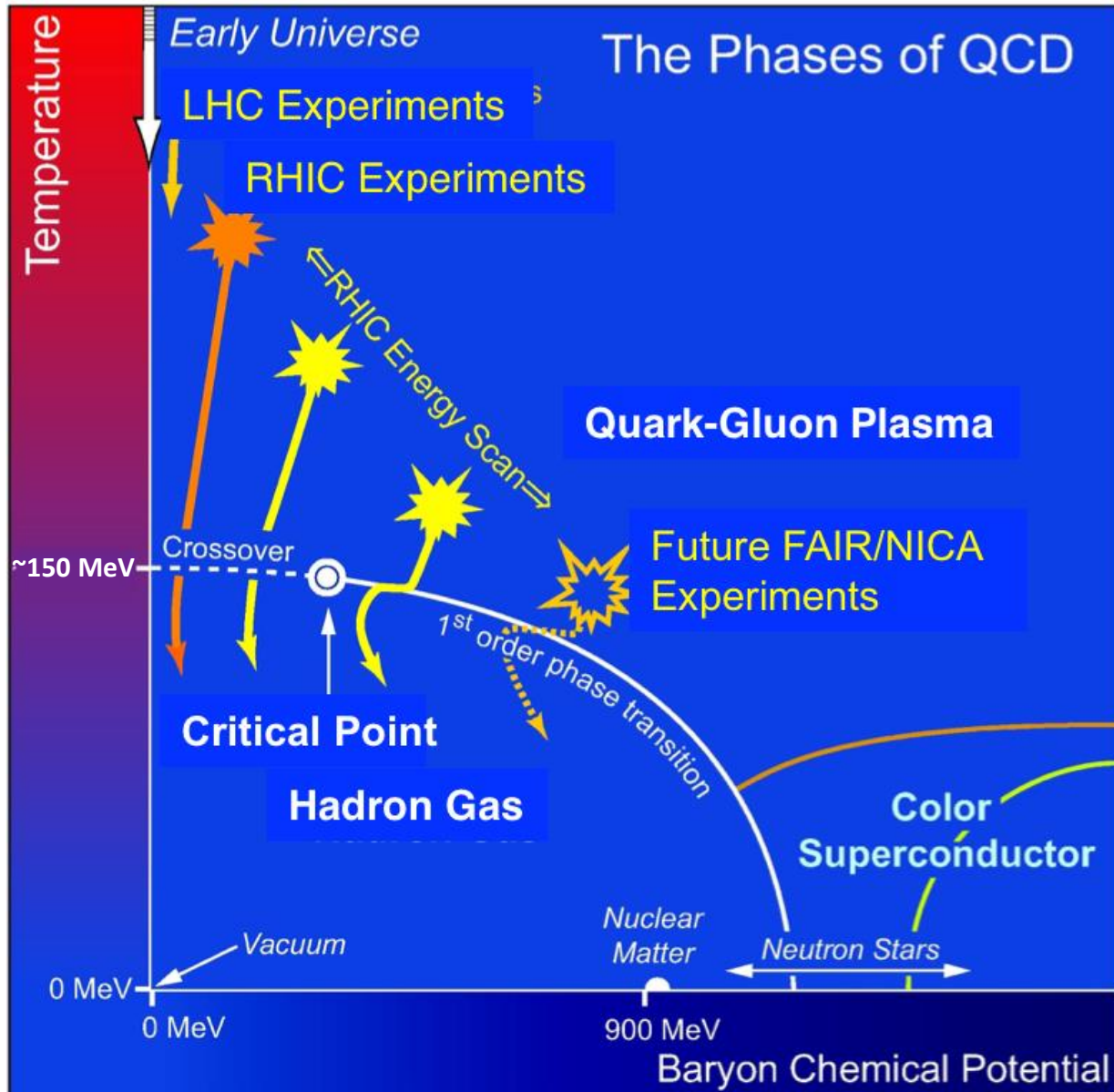


# Raskasionitörmäytysten motivaatio



 QCD faasitransitio

# Raskasionitörmäytysten motivaatio

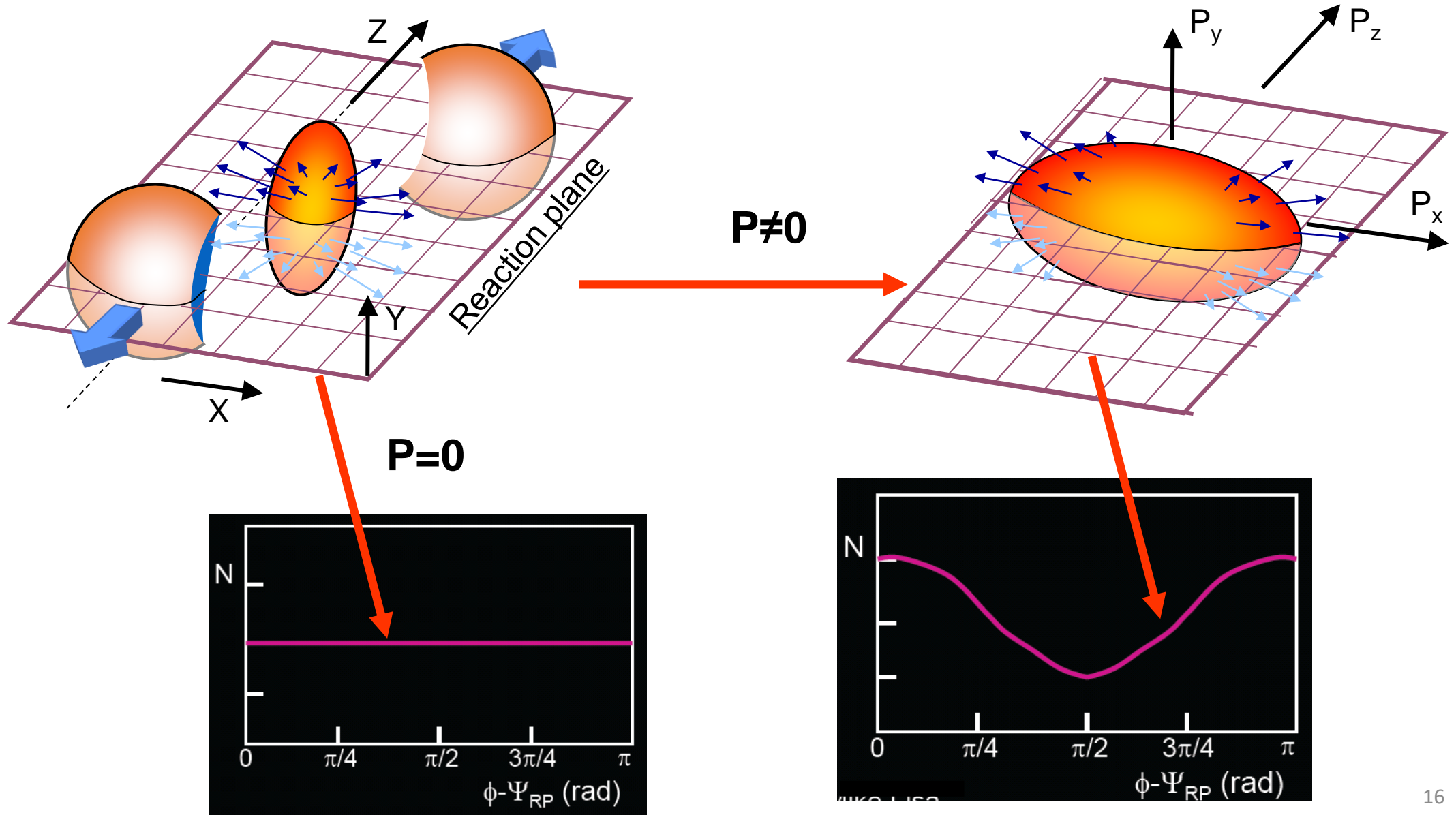


## QGP – suurusluokat:

- Lämpötila  $T_c \sim 150$  MeV  $\sim 2000 \times 10^9$  K
- Tiheys  $\sim 1$  nukleoni /  $\text{fm}^3$
- Energiatiheys  $\sim 1$  GeV /  $\text{fm}^3$
- Aikainen maailmankaikkeus  $\tau < 10 \mu\text{s}$

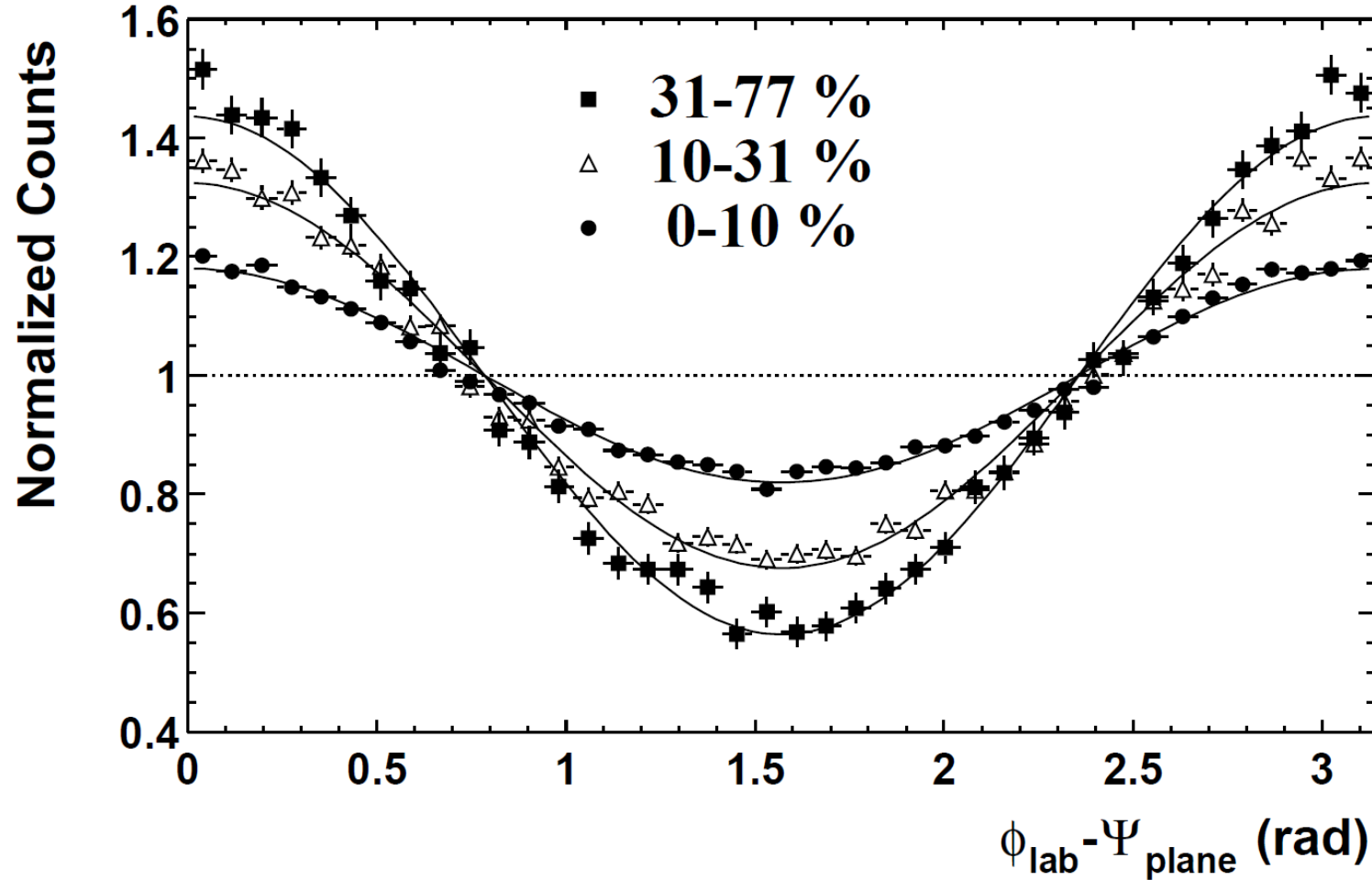
Miten tätä voidaan tutkia/havaita?

# Onko syntynyt painetta?





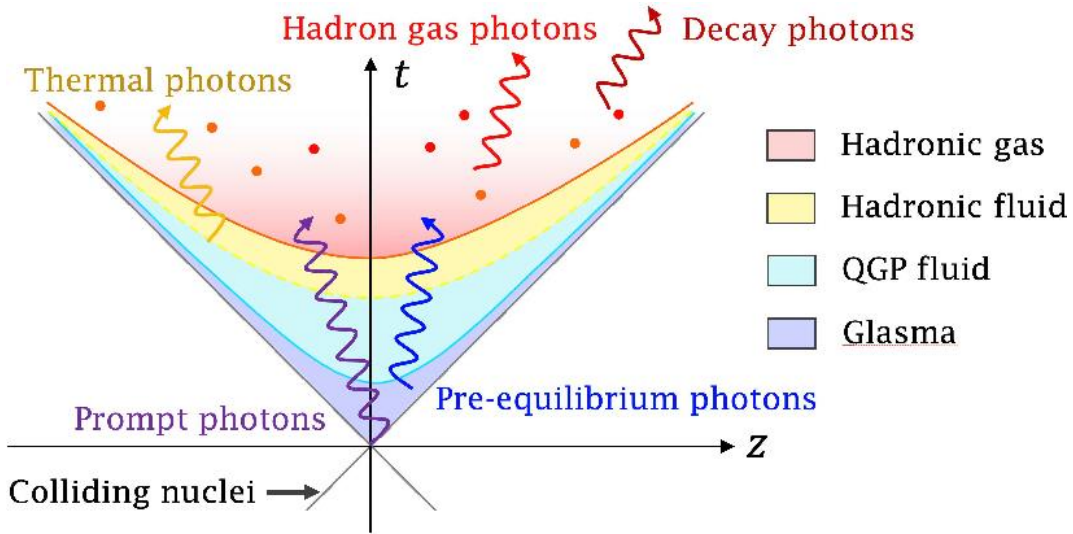
# Onko syntynyt painetta? - Kyllä!



Törmäyksen keskeisyys  
kasvaa  
→ epäsymmetria  
pienenee

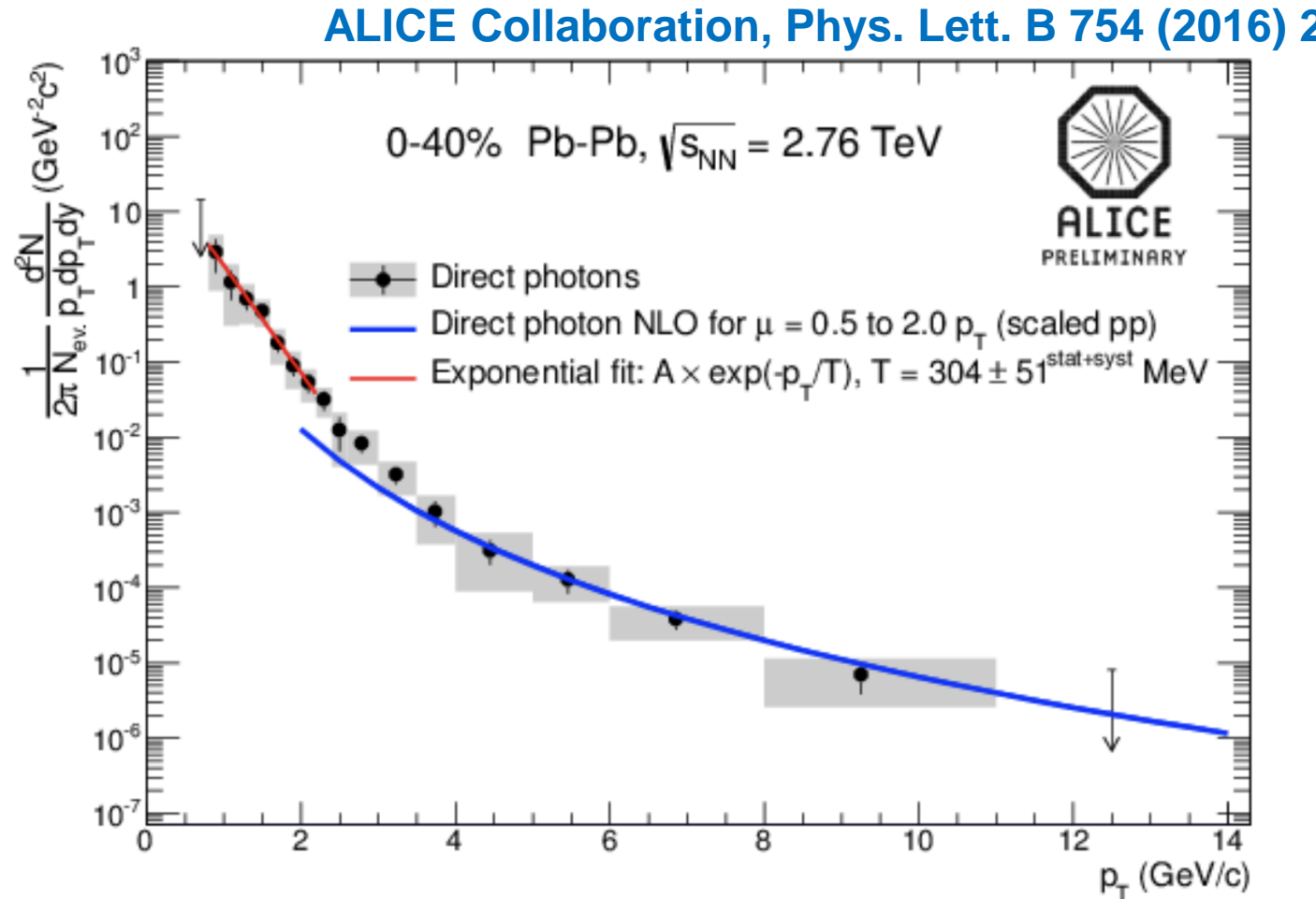
Selkeä, systemaattinen kulmaepäsymmetria havaittu

# Onko aineella lämpötila? - Kyllä!

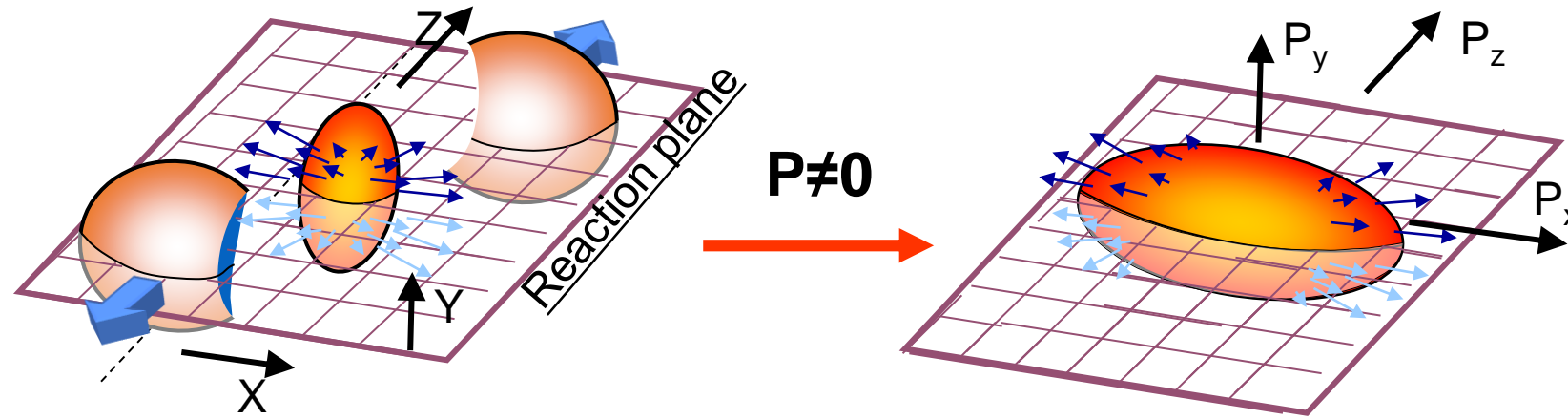


Fotonien vapaa matka  
QCD-aineessa  $\sim 100$  fm  
 → karkaavat aineen sisältä  
 → tietoa tulipallon keskustasta

Fotonien tuottotaajuus  $\sim e^{-E/T}$   
 → efektiivinen lämpötila  $T_{\text{eff}} \sim 300$  MeV  $\gg T_c \sim 150$  MeV

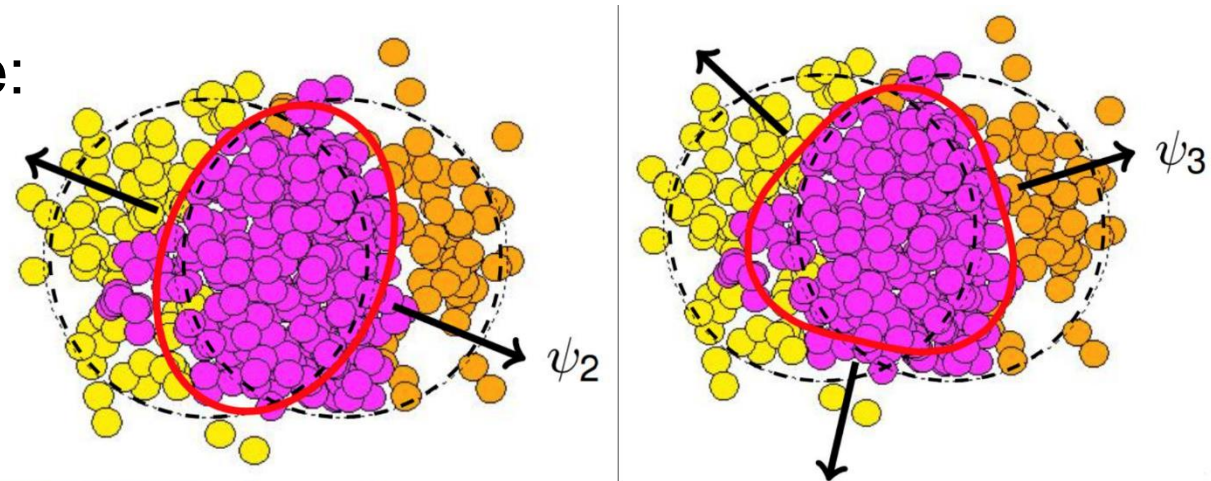


# Kollektiivinen elliptinen virtaus törmäyksessä:



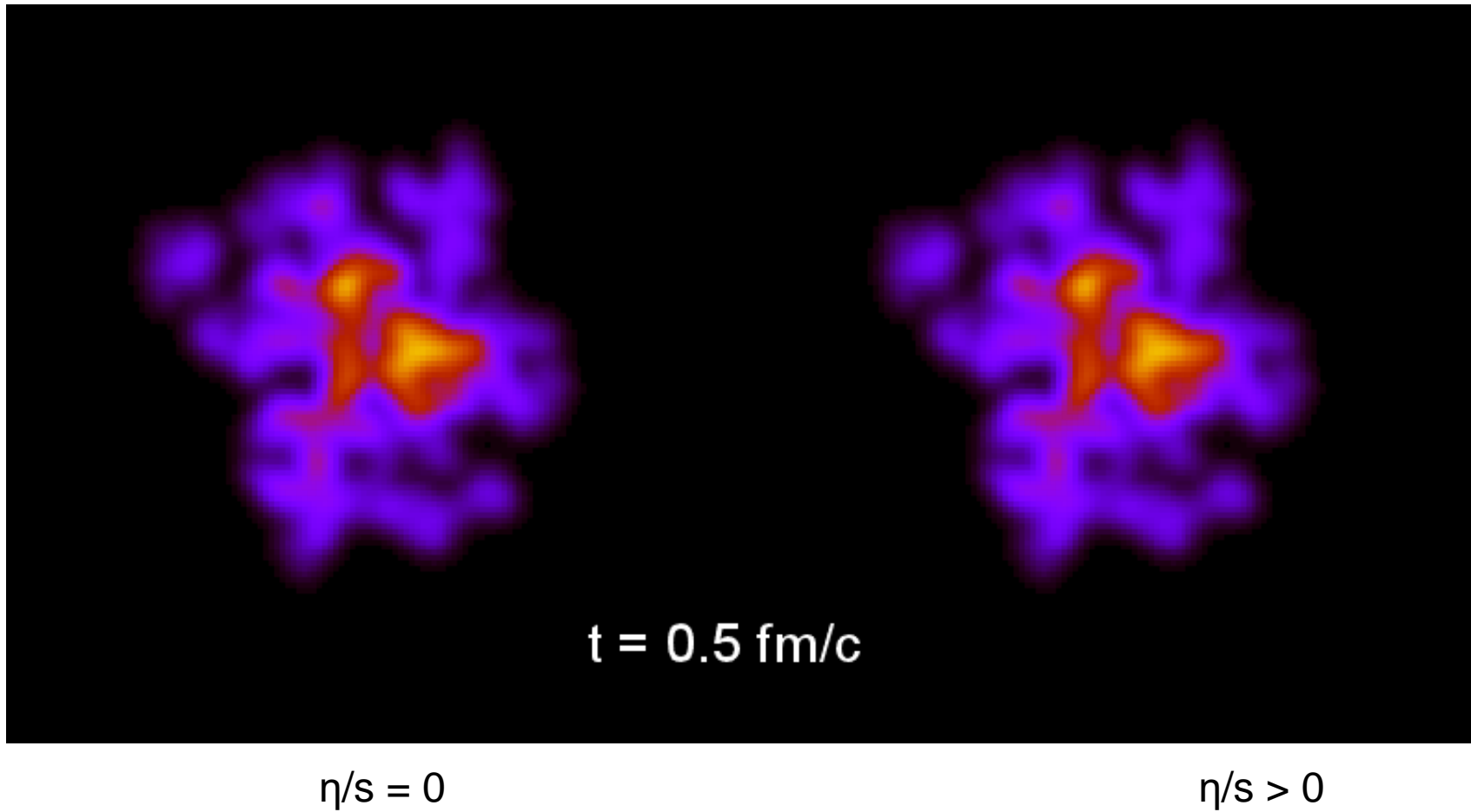
Fourier analyysi lopputilan hiukkasjakaumille:

$$\frac{dN}{d\phi} \sim 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos(n(\phi - \psi_n))$$



Elliptinen virtaus  $v_2 \Leftrightarrow$  törmäyksen geometria

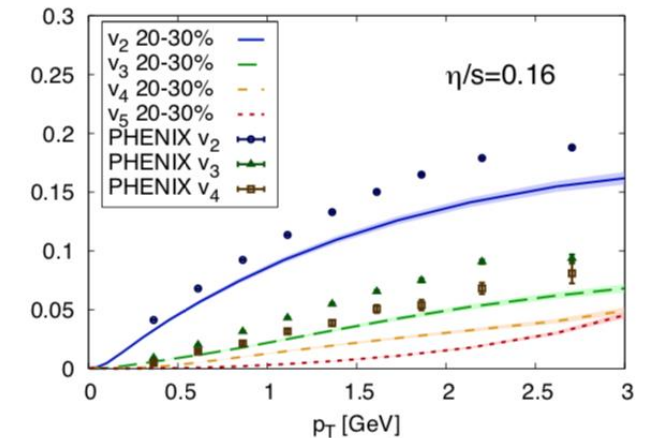
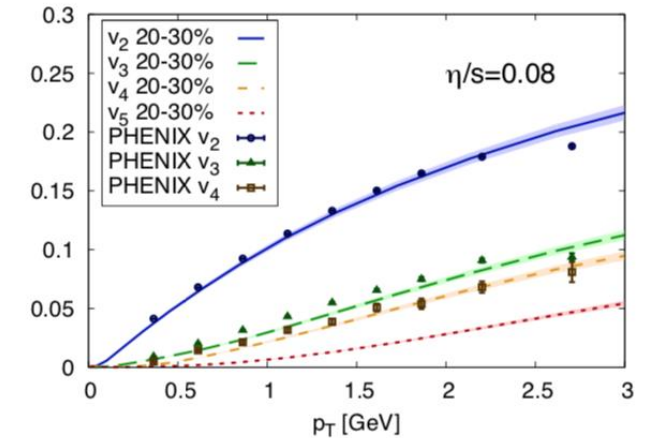
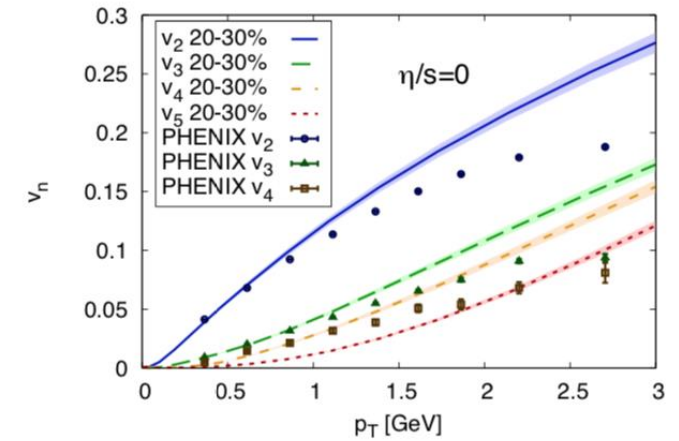
Triangulaarinen virtaus  $v_3 \Leftrightarrow$  alkutilan fluktuaatiot



**Simulation: Bjoern Schenke, results: Phys. Rev. C85 (2012) 024901**

Viskositeetti vaimentaa fluktuaatioita

→ erityisesti suuremmat  $v_n$ :t pienenevät



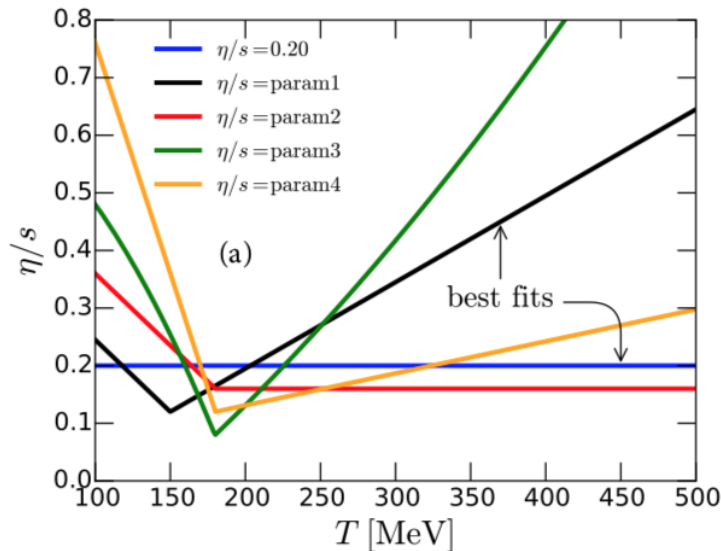
# Korkeamman kertaluokan suureet ja korrelaatiot

- Virtausta luonnehtivien Fourier-kertoimien ("flow coefficients") väliset korrelaatiot
- Erilaiset epälineaariset virtauskertoimet

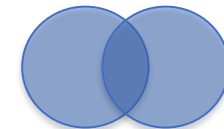
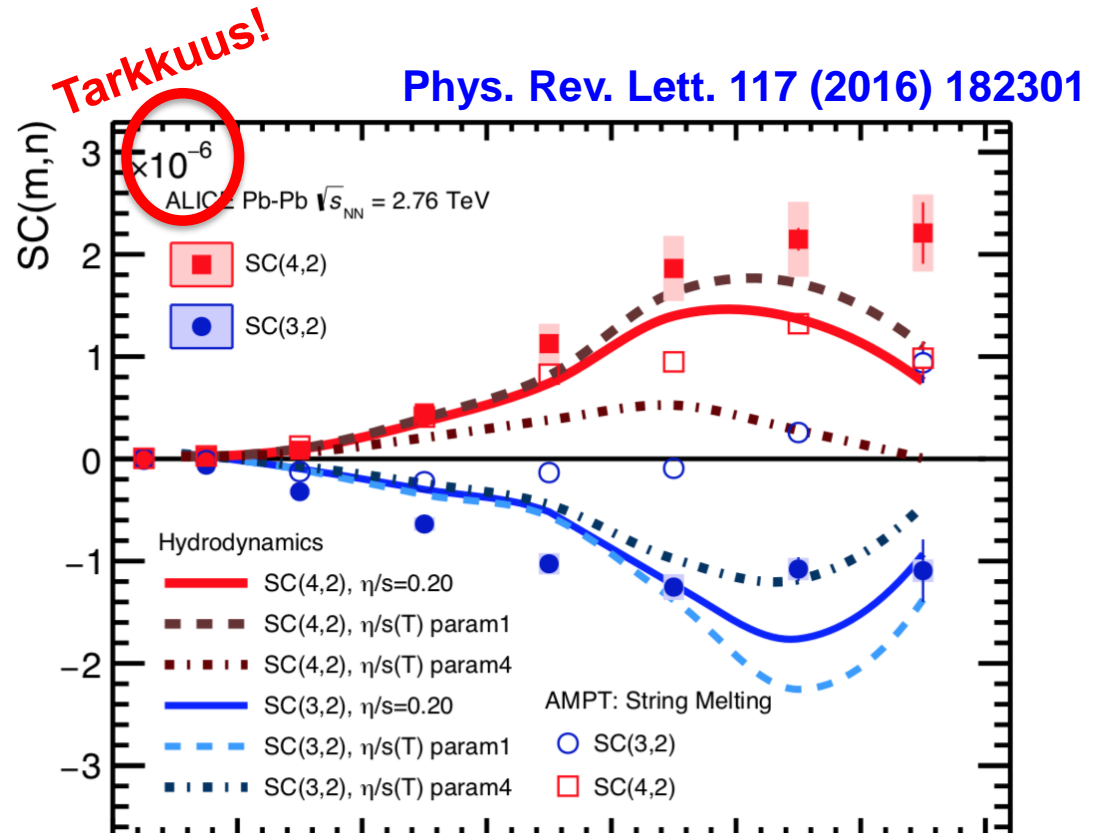
Symmetric cumulants:

$$SC(n, m) \equiv \langle v_n v_m \rangle - \langle v_n \rangle \langle v_m \rangle$$

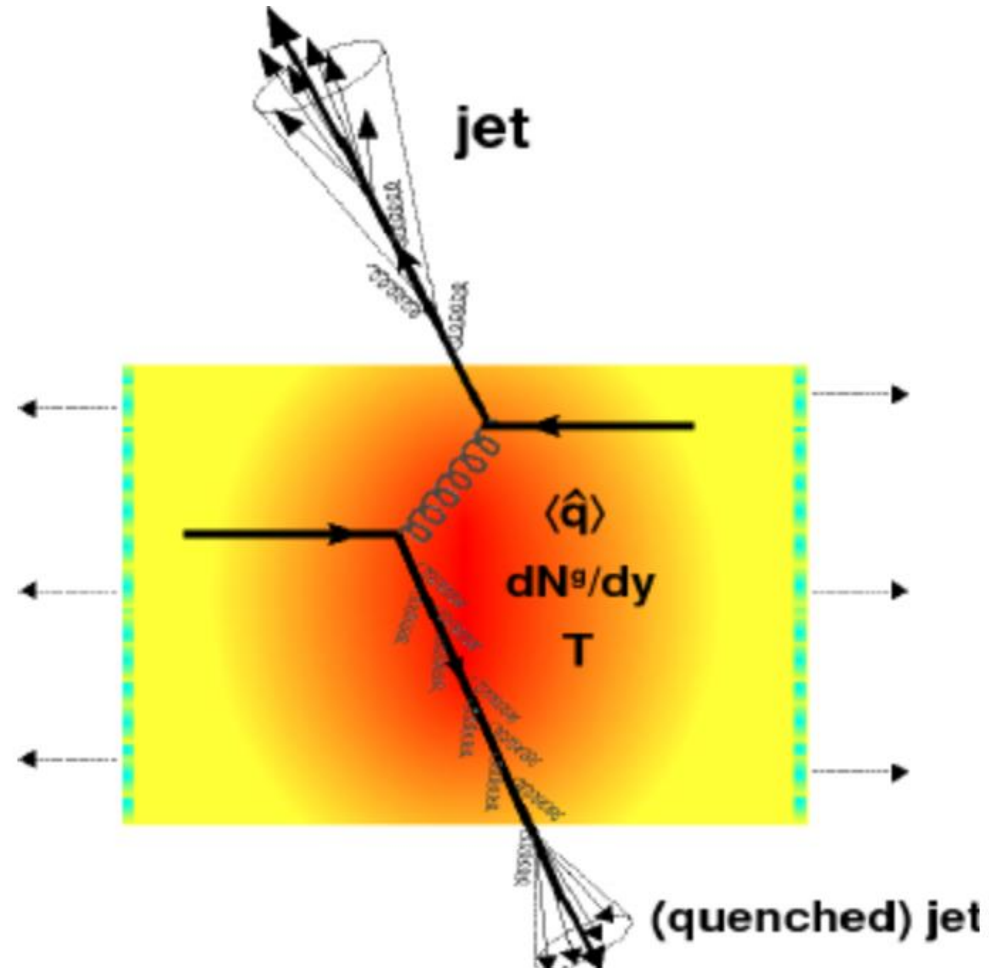
Hydrodynamiiikan simulaatiot:



Phys. Rev. C93 (2016) no. 2, 024907



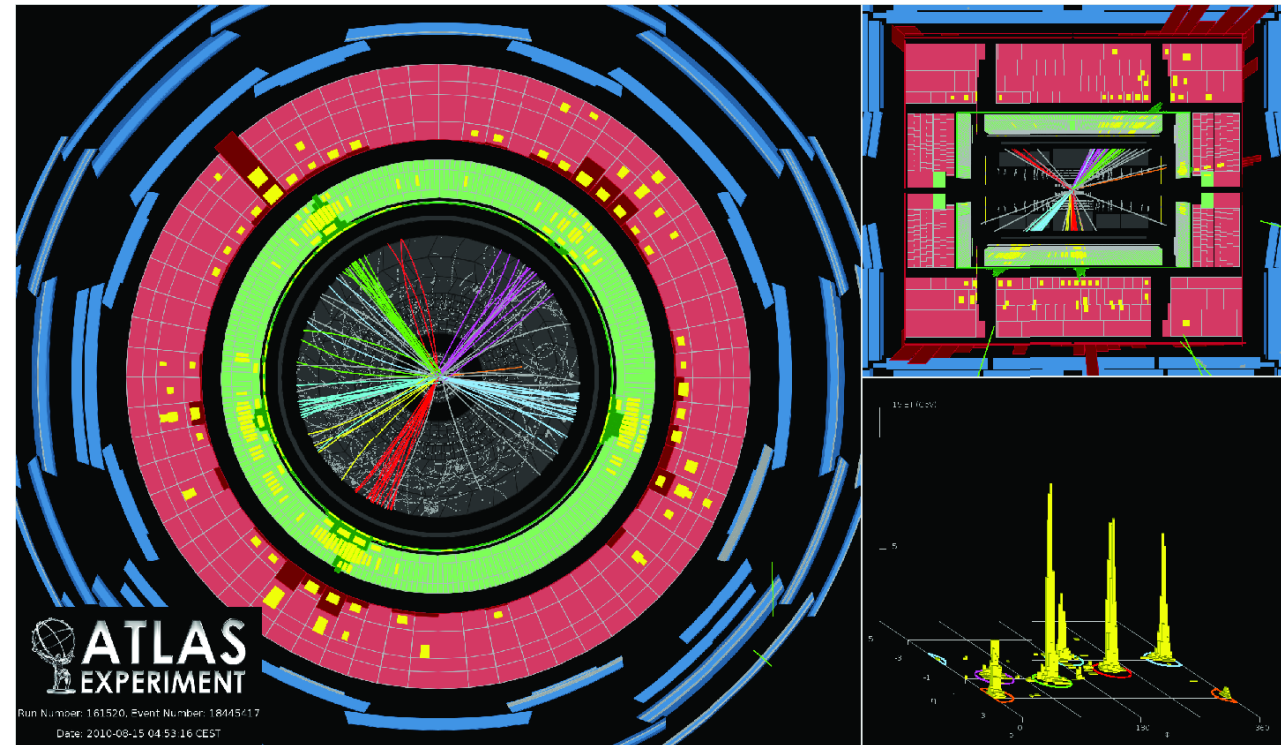
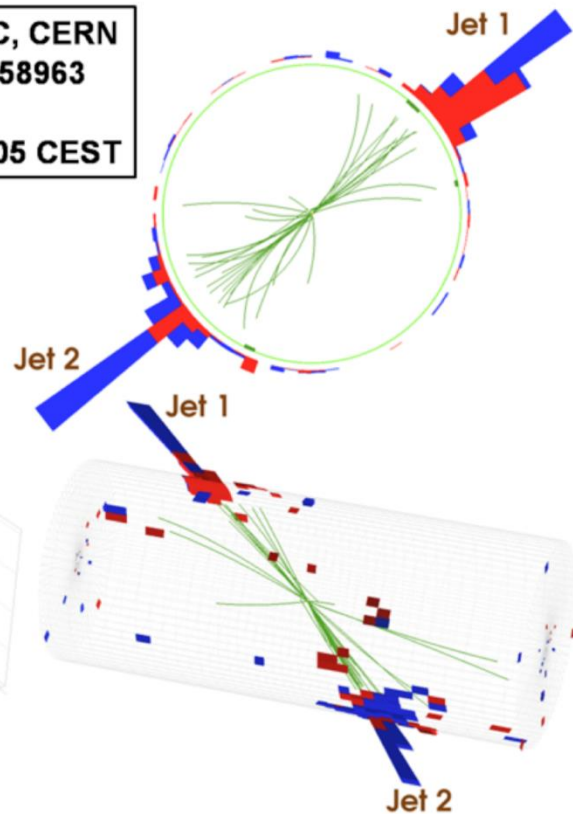
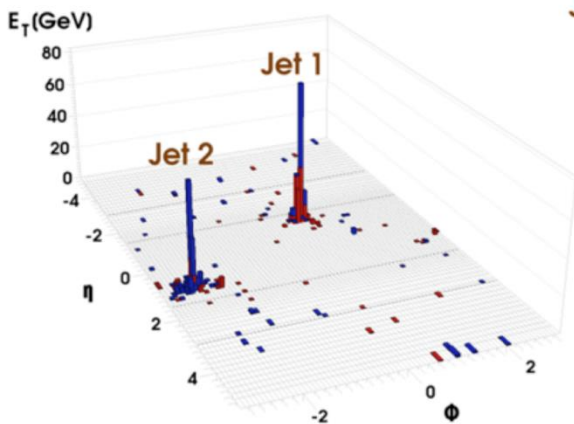
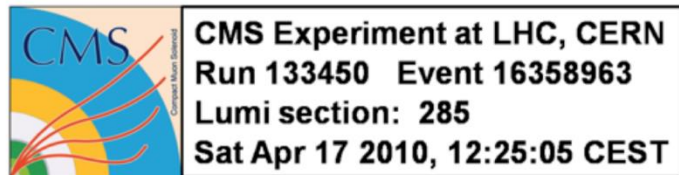
# Jettien energiahäviöt aineessa – QGP:n tomografiaa:



Liikemäärän säilyminen: suurienerginen kvarkki tai gluoni hadronisoituu

- syntyneiden hadronien täytyy kantaa alkuperäisen kvarkin tai gluonin liikemäärä
- mitataan kollimoitu hiukkassuihku, jota kutsutaan **jetiksi**

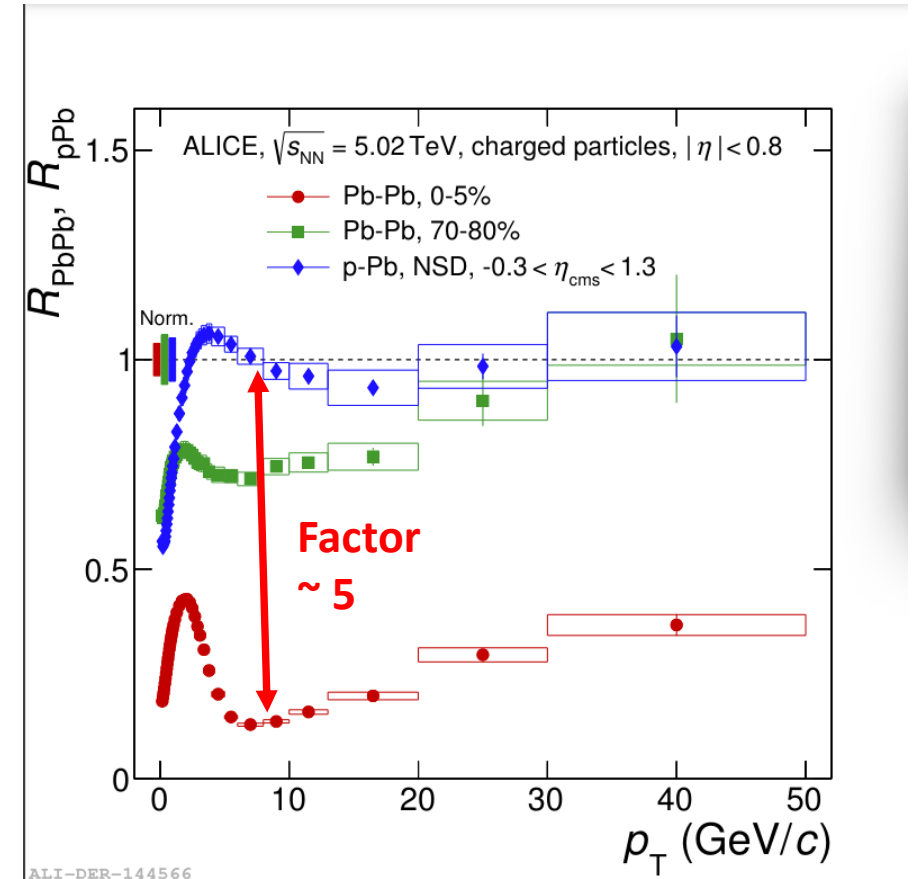
Jettejä rekonstruoidaan erilaisilla algoritmeilla, jotka päättävät mitkä lopputilan hiukkaset kuuluvat syntyneeseen "jettiin"



# Ydinmodifikaatiokerroin, $R_{AA}$

Ei ytimien vaikutusta

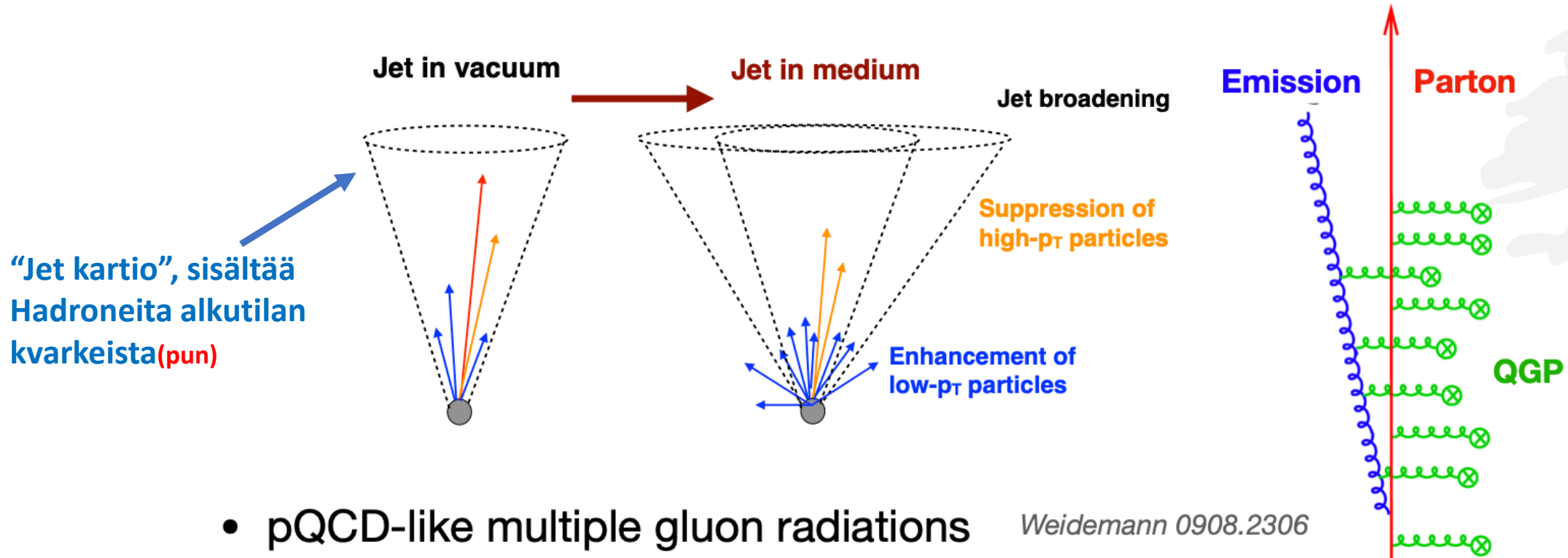
- Mikäli  $R_{AA} = 1$ , niin AA –törmäys vastaa yhtä monta pp –törmäystä
- Nähdään ettei pidä paikkansa, korkeen liikemäärän hadronit tukahtunut
  - energiahäviöitä väliaineessa



[JHEP11\(2018\)013](#)



# Mechanisms of energy loss



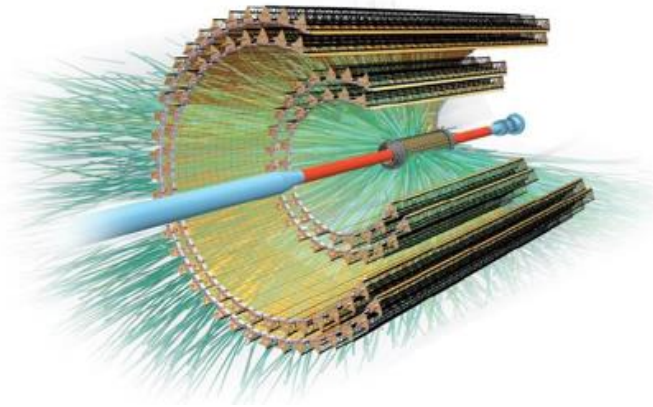
- pQCD-like multiple gluon radiations *Weidemann 0908.2306*
- medium induced scatterings (inelastic), *Zapp et al. JHEP 03 (2013) 080*
- AdS/CFT energy loss, *Liu et al. Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 182301*
- color coherence/decoherence, *Solano et al. JHEP 10 (2014) 019*
- modified partonic splitting functions etc...

*Qin, Wang,  
Int. J. Mod. Phys. E 24 (2015) 11, 1530014*

Credit!

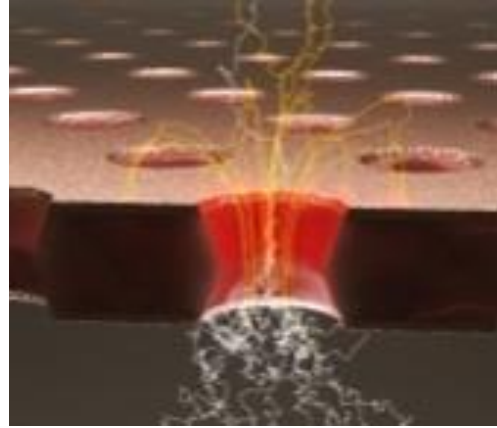
Millä tutkitaan?

# Parannellut ilmaisimet ALICE:ssa LHC:n toimintaan 2022 – 2032:



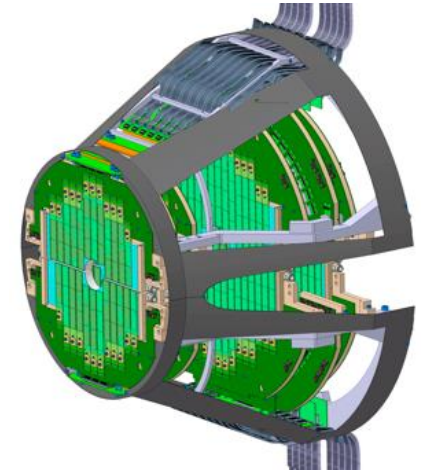
## Uusi ITS3

- nopeampi
- vähemmän materiaalia
- parempi resoluutio



## Uusi TPC readout:

- wire chambers → GEM's
- mahdollistaa PbPb @ 50 kHz

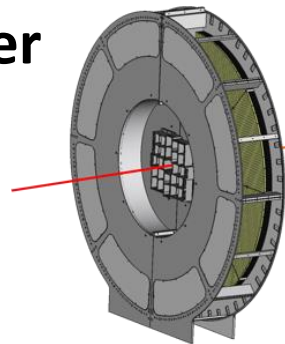


## Lisätty MFT

- parempi muon seuranta
- kakkosverteksit @ forward

## Fast Interaction Trigger

- keskeisyys
- online luminosity
- törmäysaika

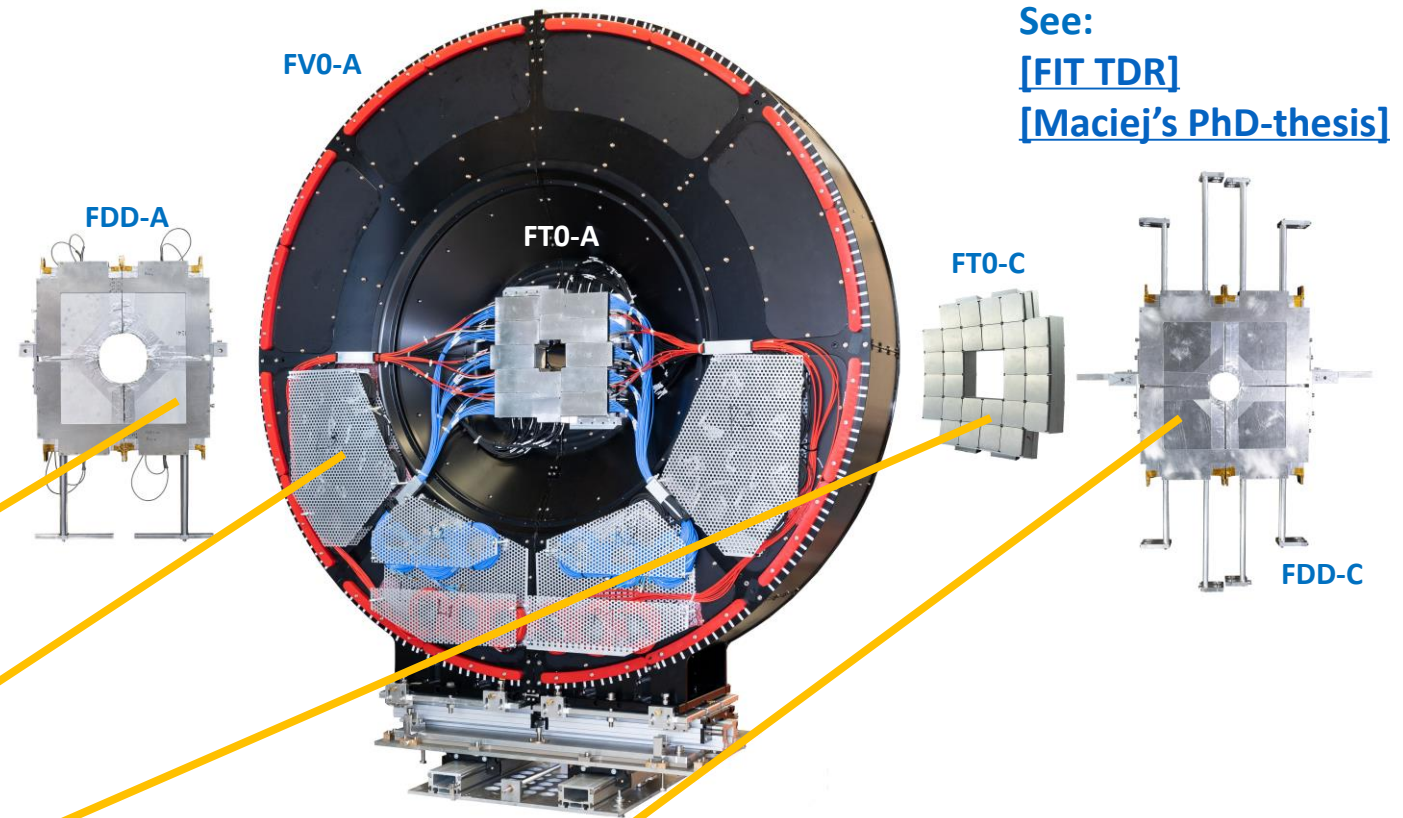


## O<sup>2</sup>

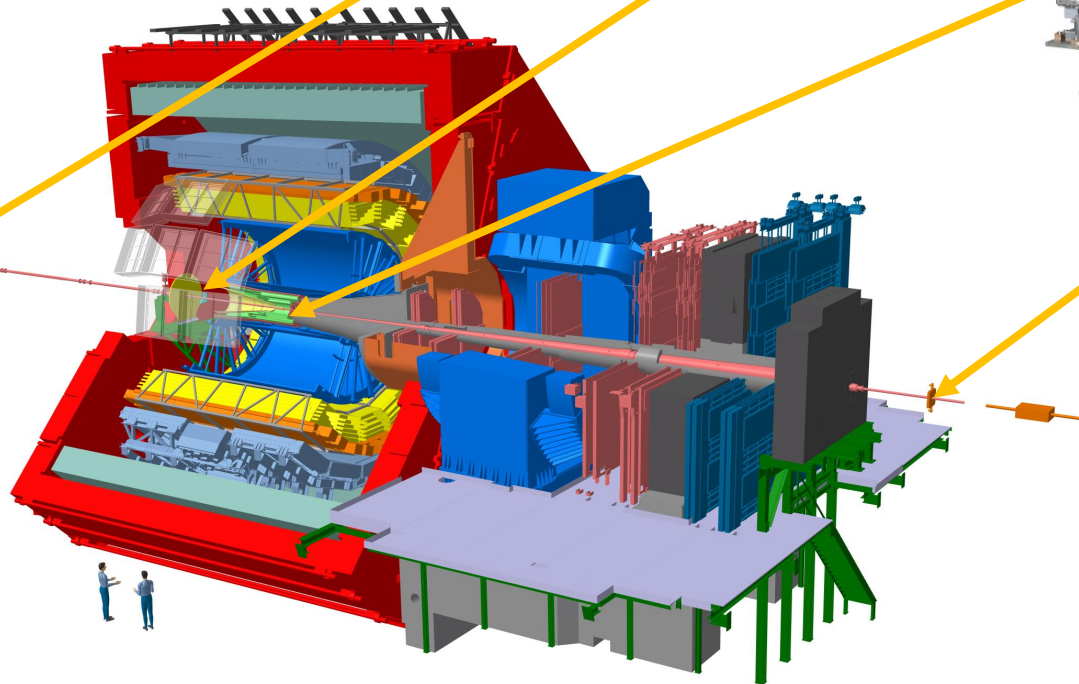
- integroitu Online – Offline datajärjestelmä
- nopea lukunopeus

# Fast Interaction Trigger (FIT)

- Suomen suurin kontribuutio ALICE2
- FIT operoi vuoteen 2032 asti, Run4
- [Video](#): No FIT, no ALICE



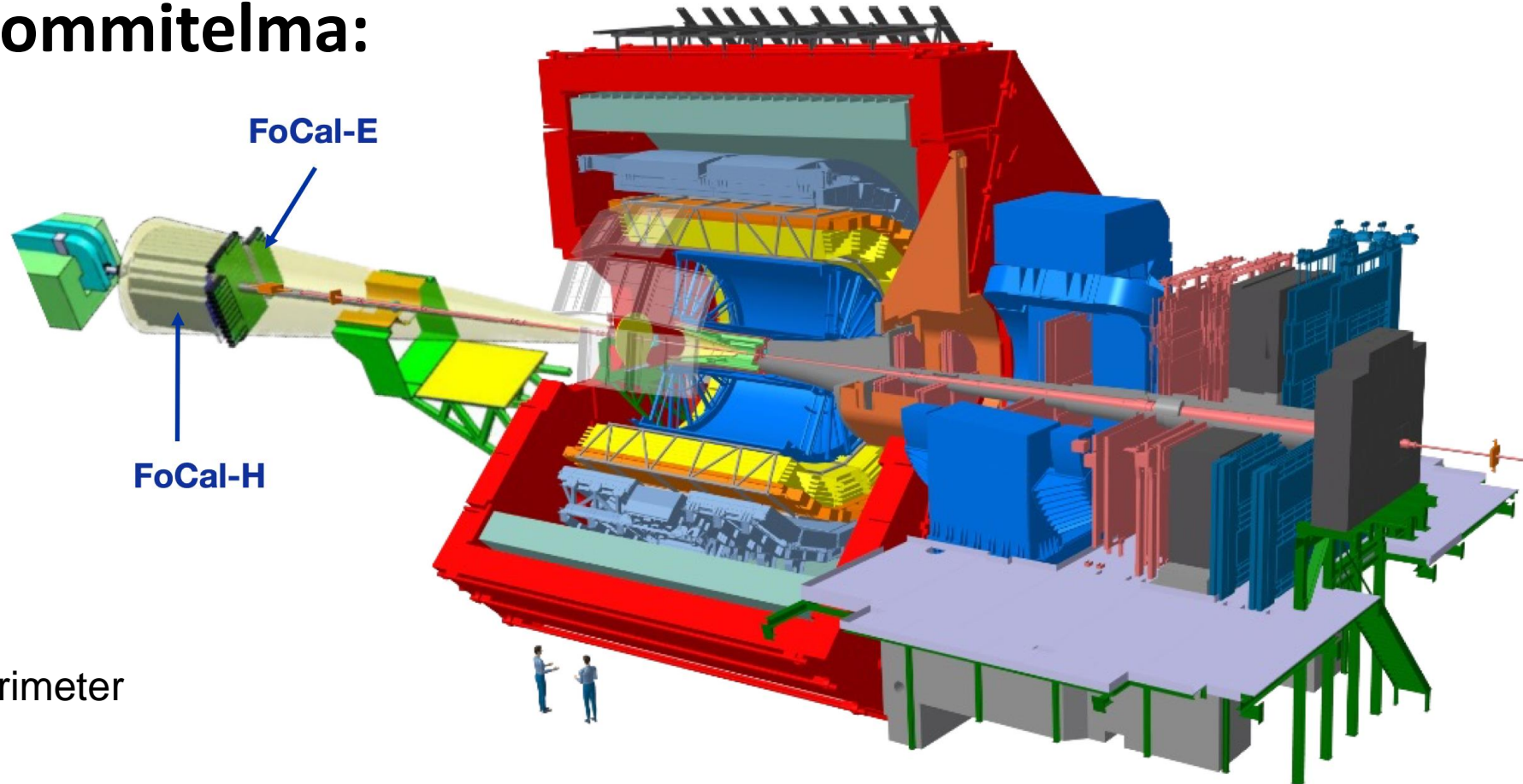
See:  
[\[FIT TDR\]](#)  
[\[Maciej's PhD-thesis\]](#)



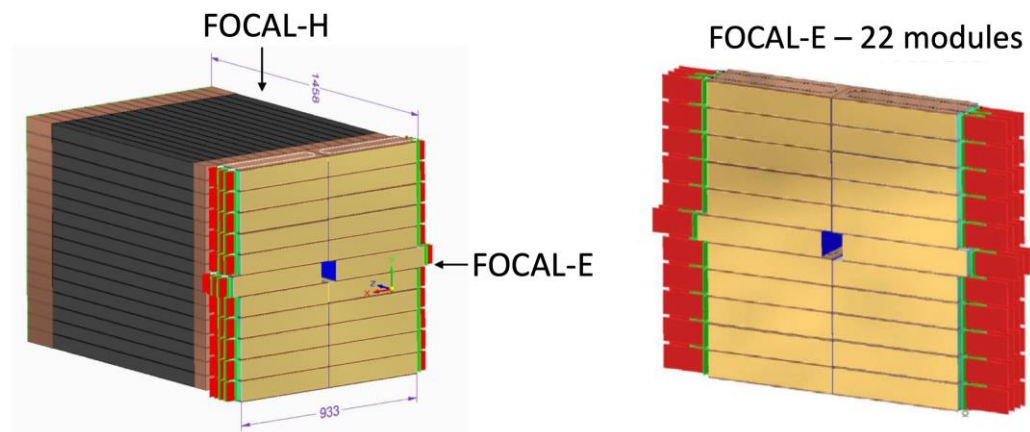
## FIT toiminnallisuudet:

- LHC Point 2 luminositeetti
- Pääasiallinen triggeri ALICE:ssa
- Verteksimitaus ja ajoittaminen
- Keskeisyys ja törmäystaso

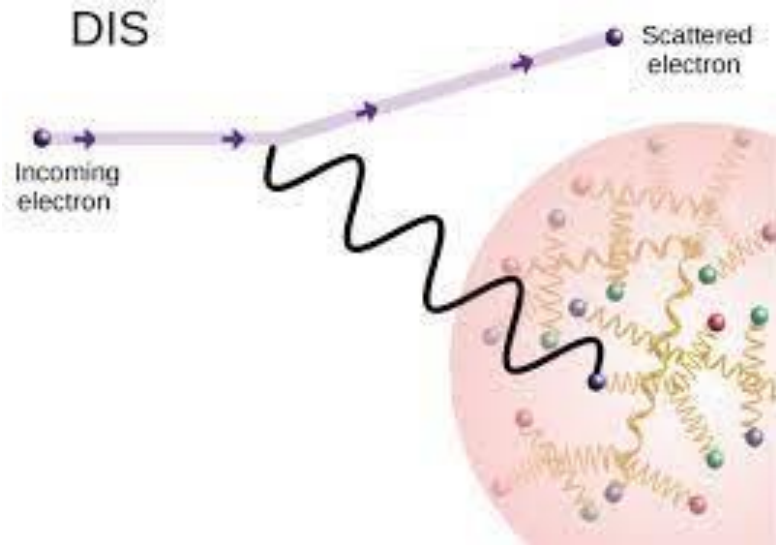
# FoCal sommitelma:



Forward Calorimeter

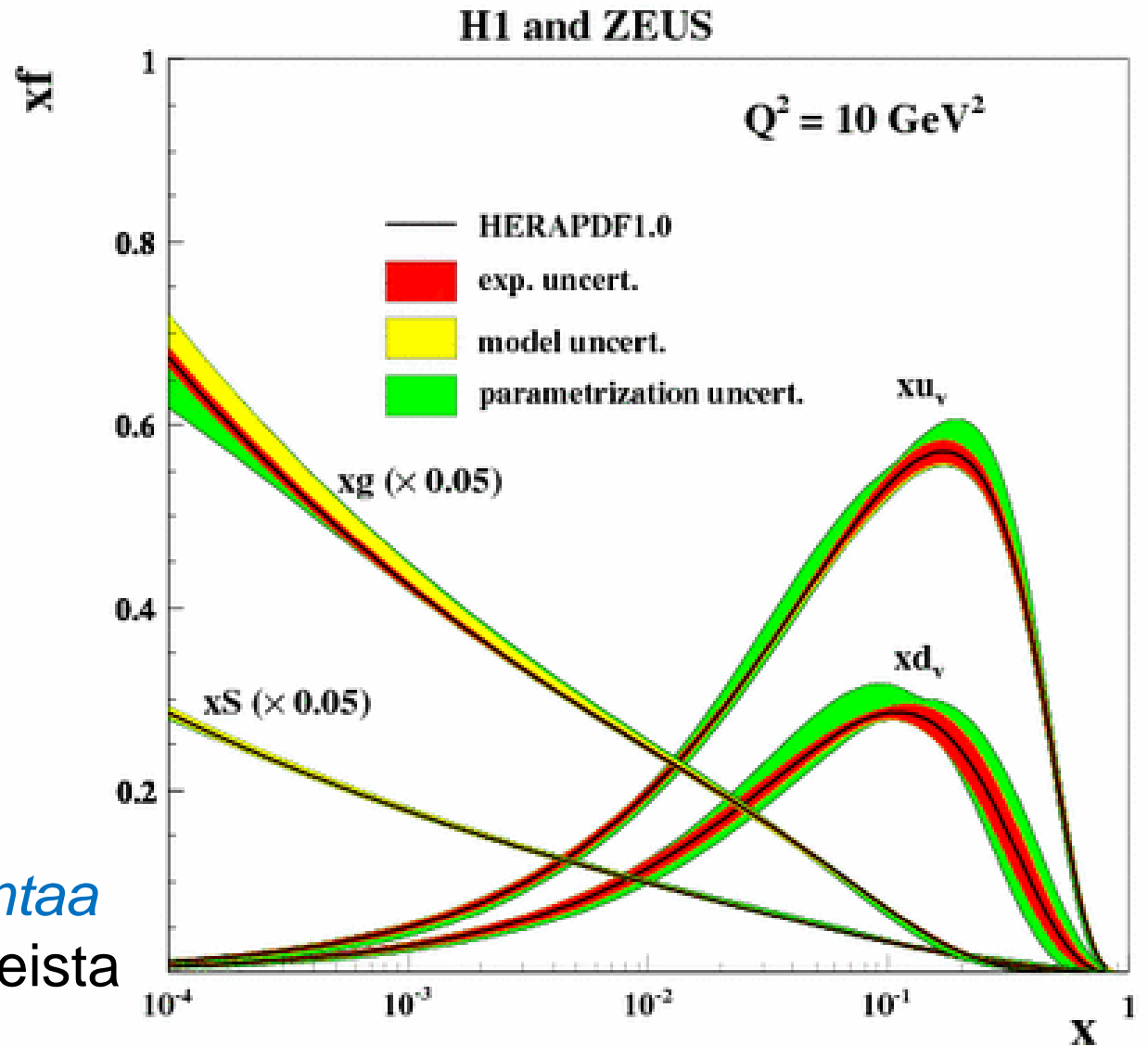


Protonissa on "liikaa gluoneja" → määrän on pakko saturoitua. Kuinka havaitaan?

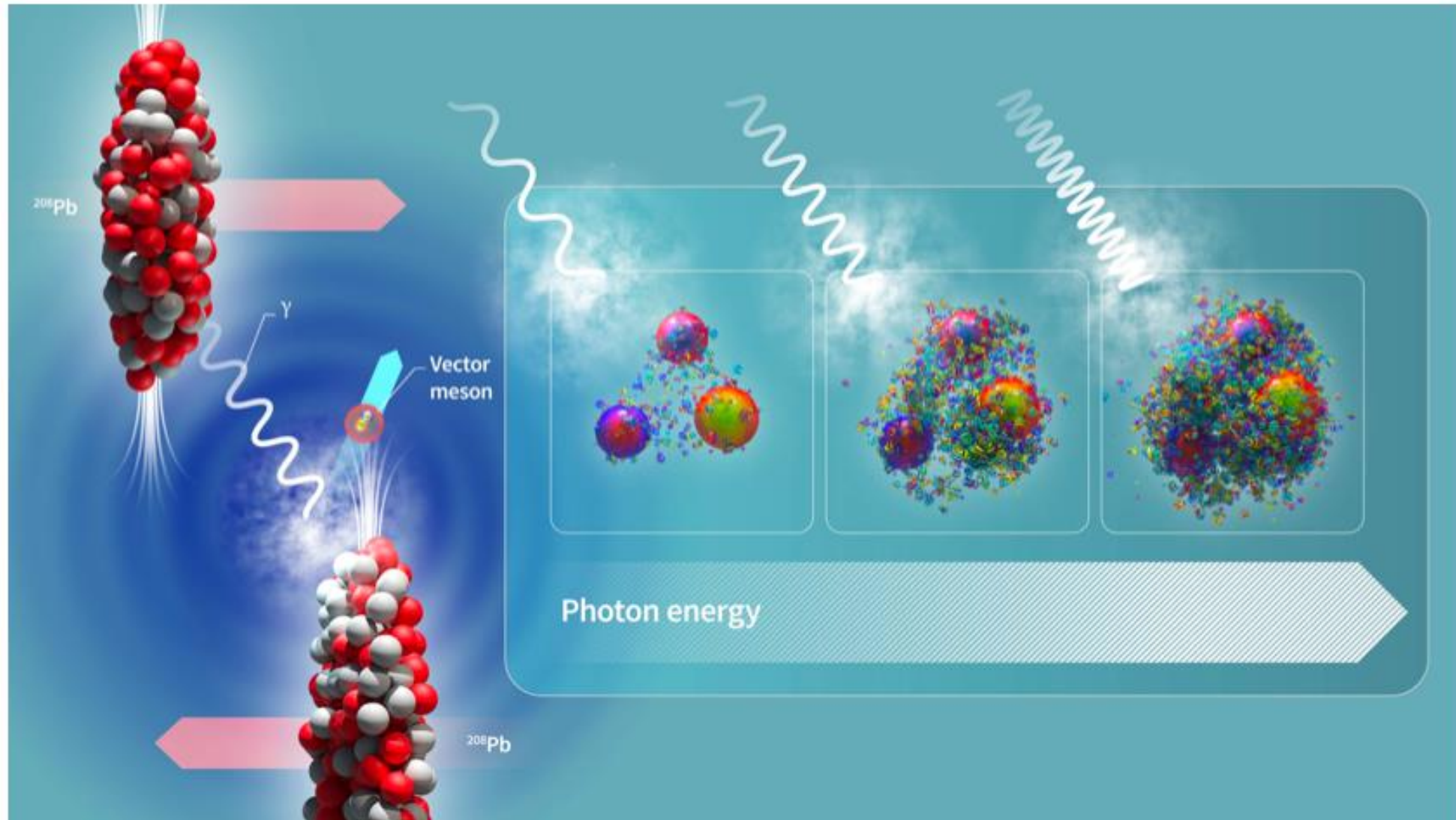


Syvä epäelastinen sironta, DIS  
→ gluonien määrä kasvaa pienillä  $x$

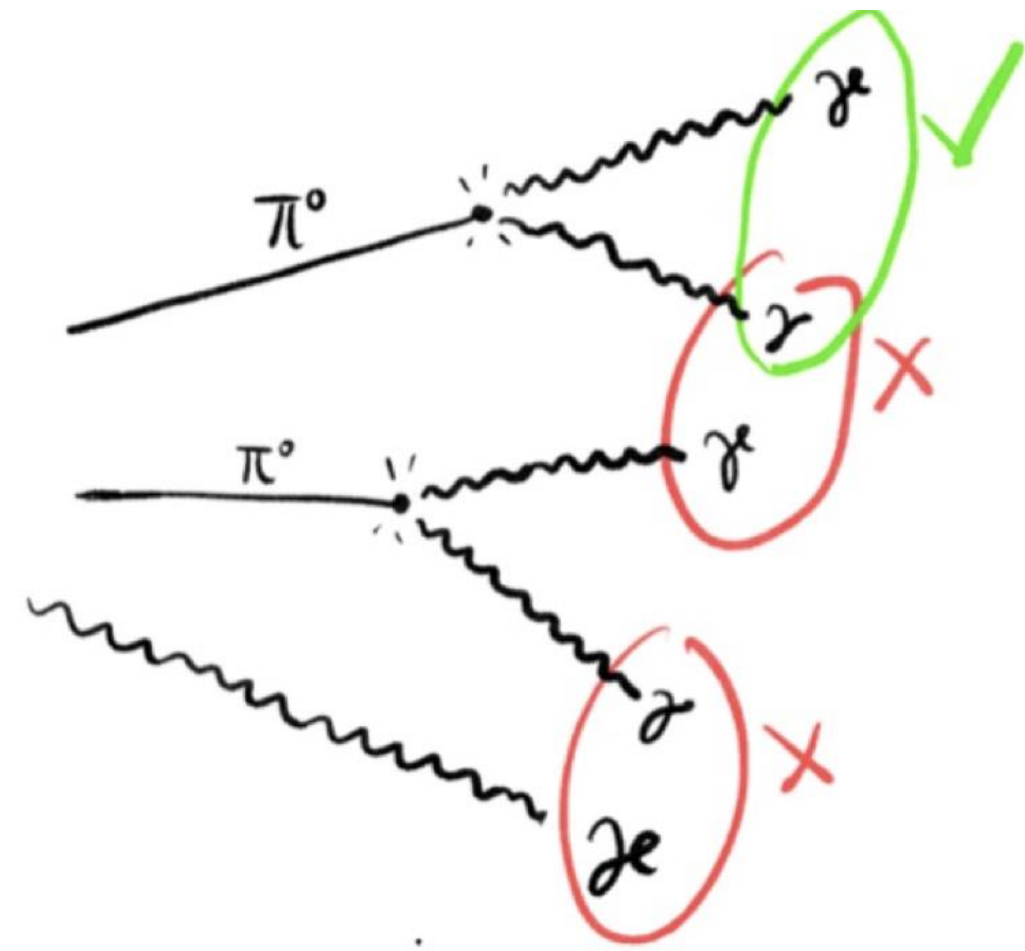
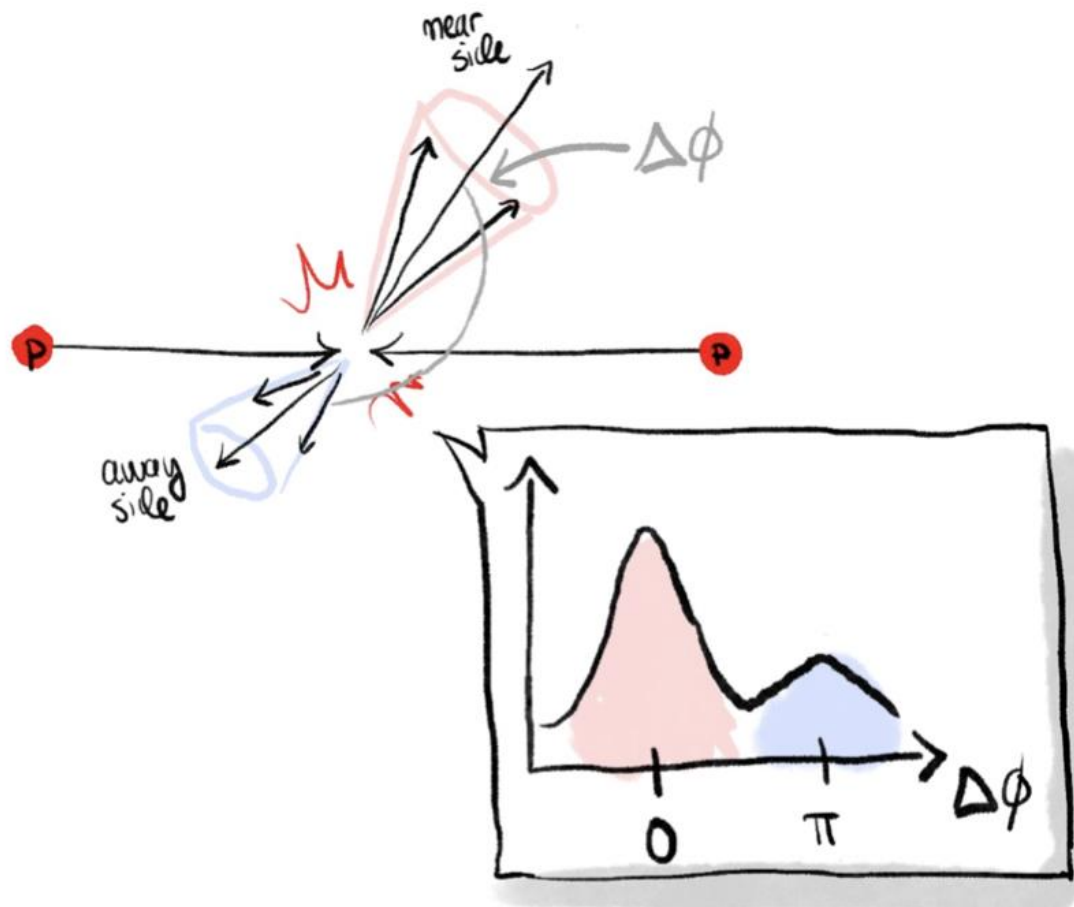
Iso kysymys QCD tutkimuksessa:  
*Kuinka saturoituminen voitaisiin todentaa kokeellisesti?* → yksi FoCal:n tavoitteista



# Taiteellinen näkemys protonin sisällöstä:



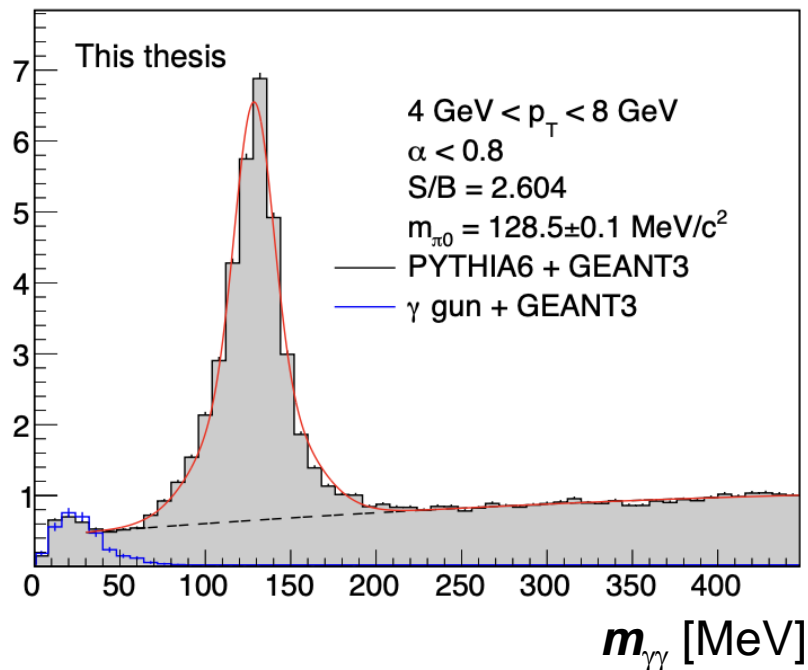
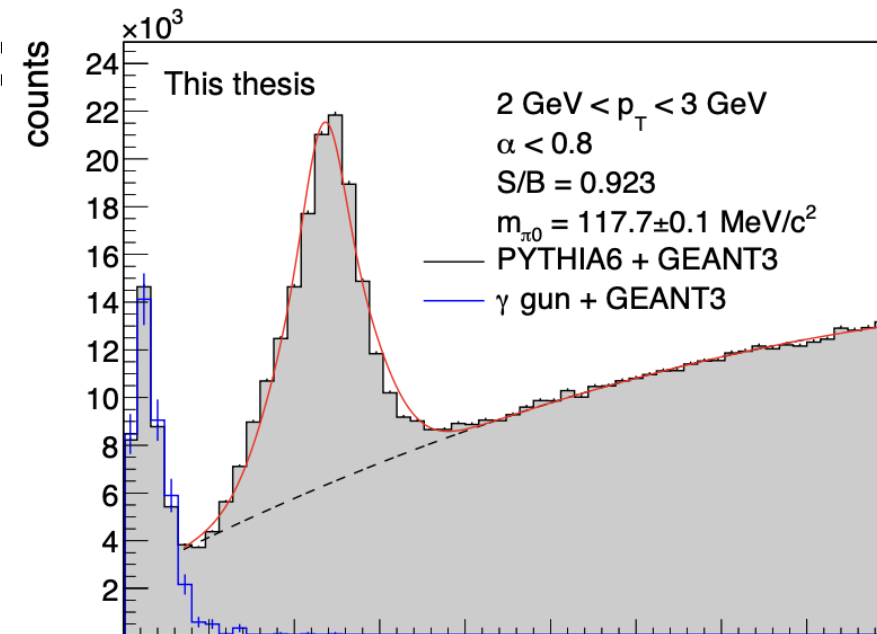
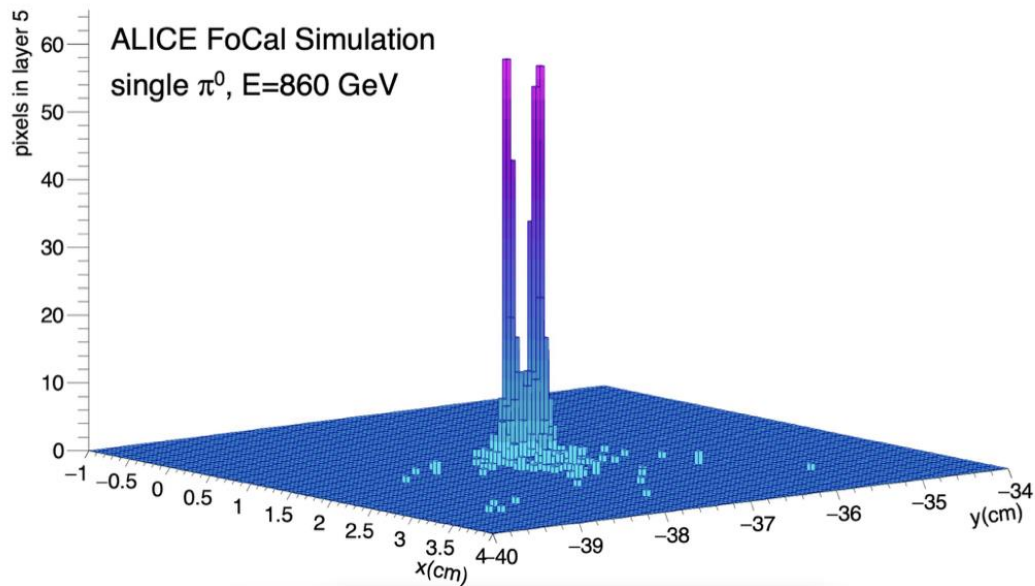
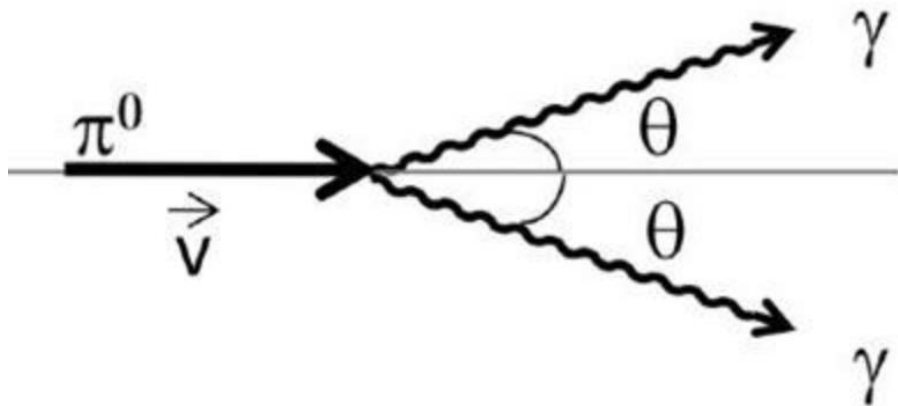
# FoCal mahdollistaa neutraalien pionien korrelaatioiden mittaamisen. Ennuste: saturaatio $\rightarrow$ korrelaatiot vaimenevat



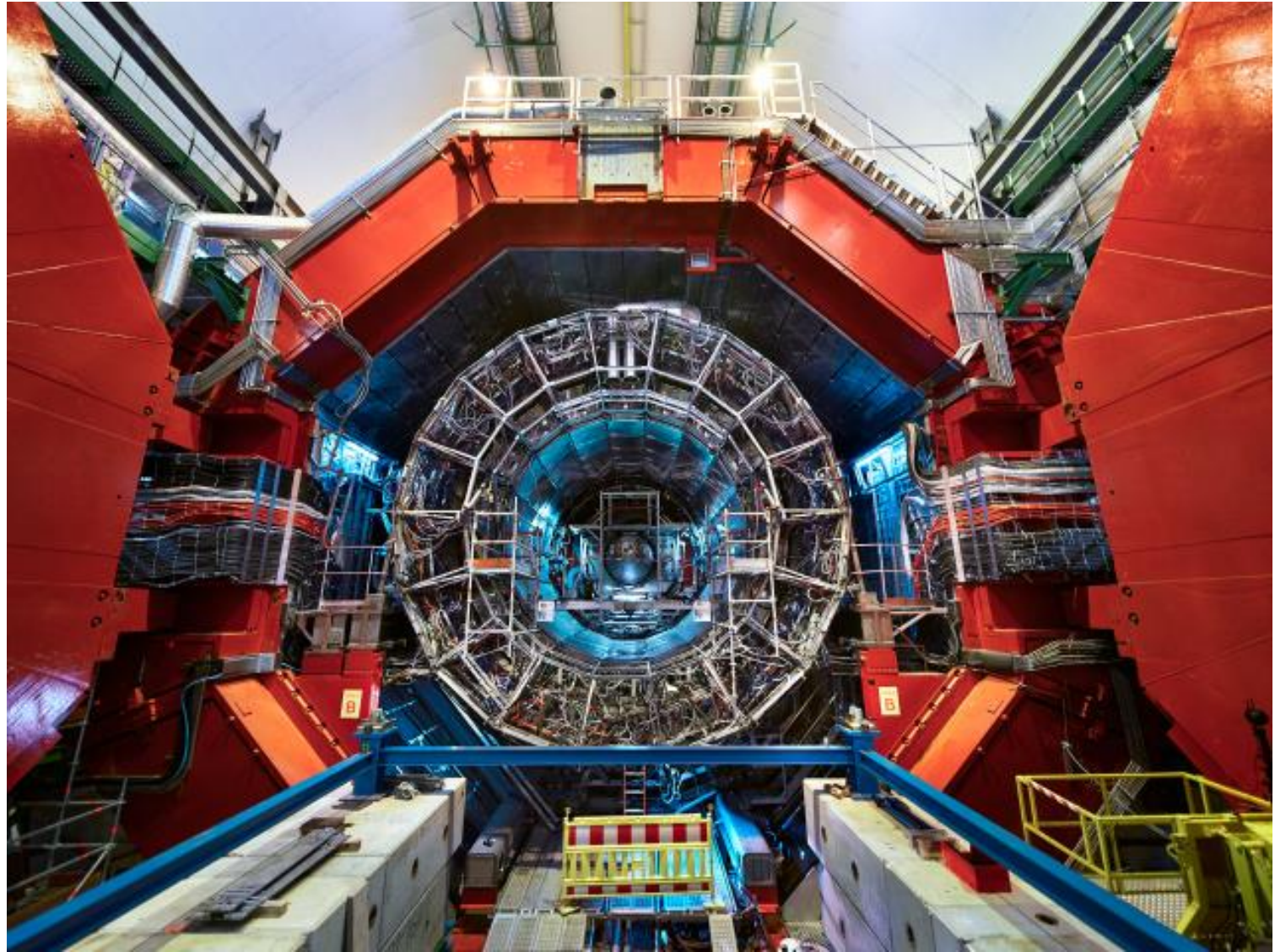


# Neutraalien pionien havaitseminen

Täsmälleen sama tekniikka, kuin Higgsin havaitsemisessa!



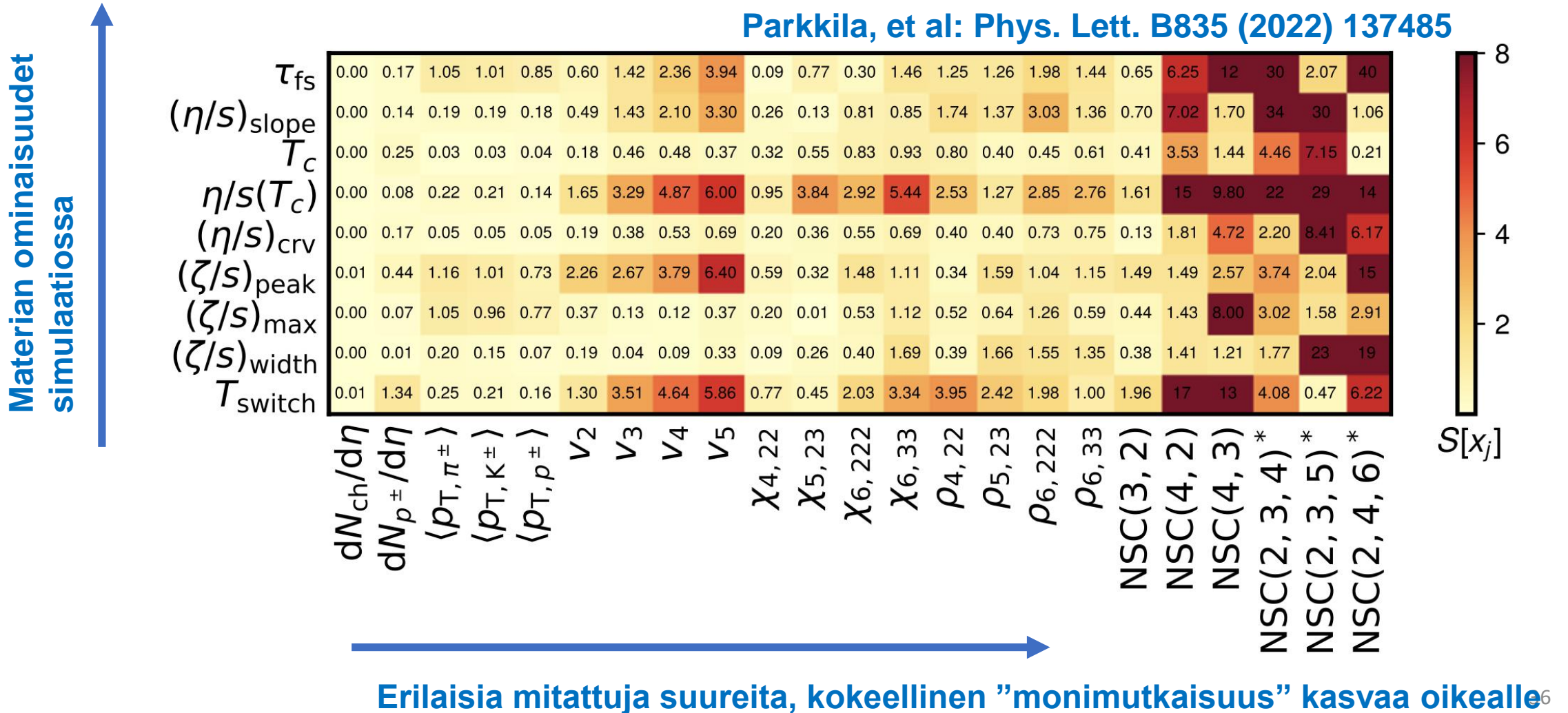
Kiitos!  
Kysymyksiä?



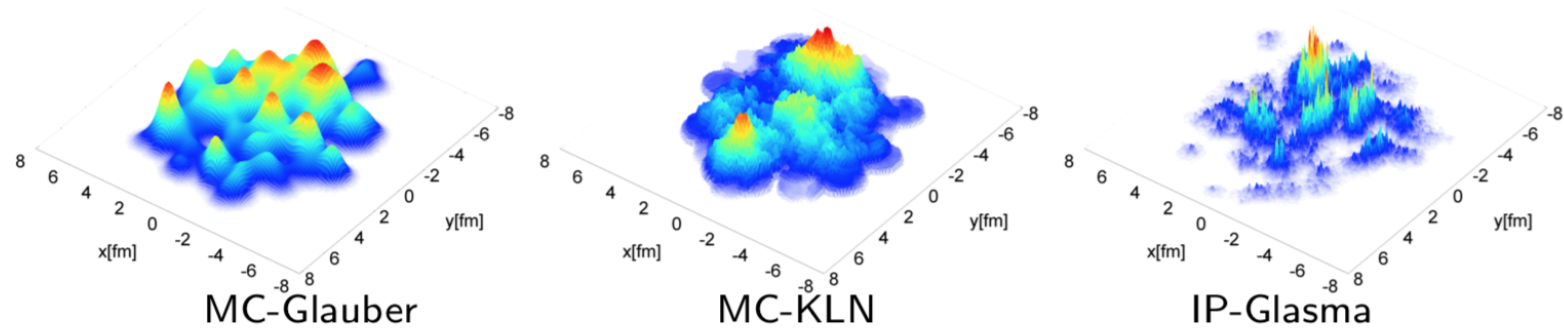
**BACKUP**

# Bayesialainen analyysi kaikkea mitattua dataa vastaan

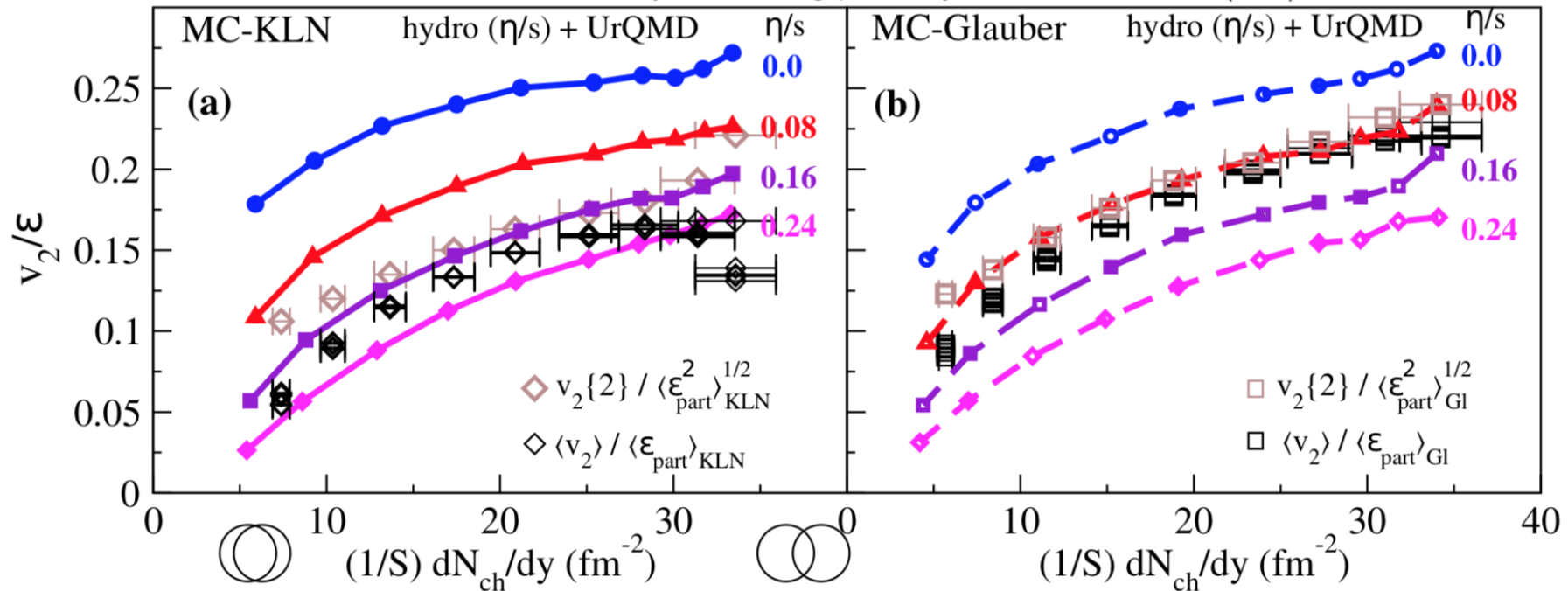
- Etsitään ideaalisia materiaalien ominaisuuksia "fittaamalla" → herkkyyskartta



Ongelma: eri alkutilamallit suosivat eri arvoja juoksevuudelle  $\frac{\eta}{s}$   
 → Ei ole mahdollista, sillä kyseessä on materiaalin ominaisuus



B. Schenke, P. Tribedy and R. Venugopalan, *Phys.Rev.Lett.* **108** 252301 (2012)



Kinetic theory

$$h \gg \frac{1}{3} n \langle p \rangle l$$

# Kaikilla aineilla on viskositeetti!

Danielewicz, Gyulassy, Phys.Rev. D31 (1985) 53  
W. A. Zajc, talk in "Strings to Things" workshop, 2008

Smallest meaningful mean free path from formation time

$$l \gtrsim \frac{1}{\langle p \rangle}$$

Relation between entropy and number densities (relativistic bose-gas):

$$s = \frac{e + P}{T} \sim \frac{4}{3} \frac{e}{T} \sim \frac{4}{3} \frac{\rho^2}{30} \frac{\rho^2}{z(3)} \frac{g_B}{\hbar^3} \frac{z(3)}{\rho^2} T^3 \sim 3.6n$$

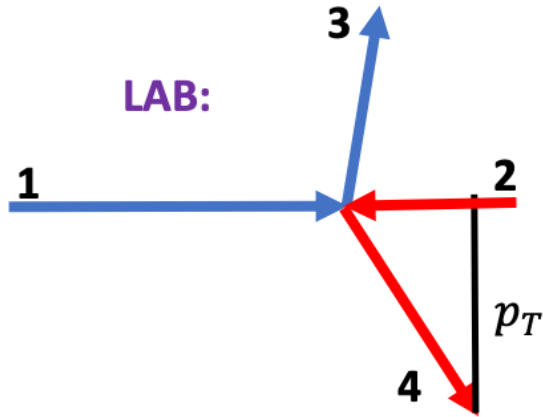
Together gives a lower bound for viscosity to entropy ratio

$$h^3 \frac{1}{3} \gtrsim \frac{s}{3.6} \quad \Rightarrow \quad \frac{h}{s} \gtrsim 0.1$$

Note: not very strict constraints to underlying microscopic theory!

# Reaching low- $x$ : kinematics of hard 2-to-2 partonic process

Conservation of energy and longitudinal momentum:

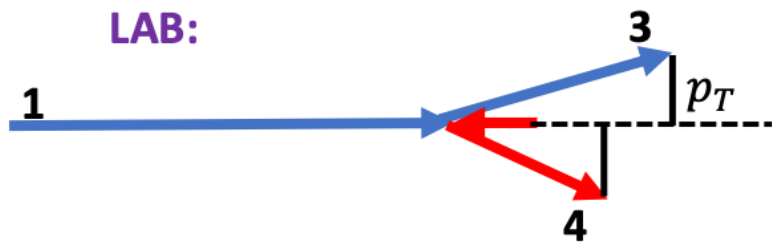


$$x_1 = \frac{p_T}{\sqrt{s}} (e^{\eta_3} + e^{\eta_4})$$

$$x_2 = \frac{p_T}{\sqrt{s}} (e^{-\eta_3} + e^{-\eta_4})$$

~sironakulmat

Rule of a thumb: when  $\eta_3 \approx \eta_4 \equiv \eta \gg 1$ , “large” and “small”  $x$



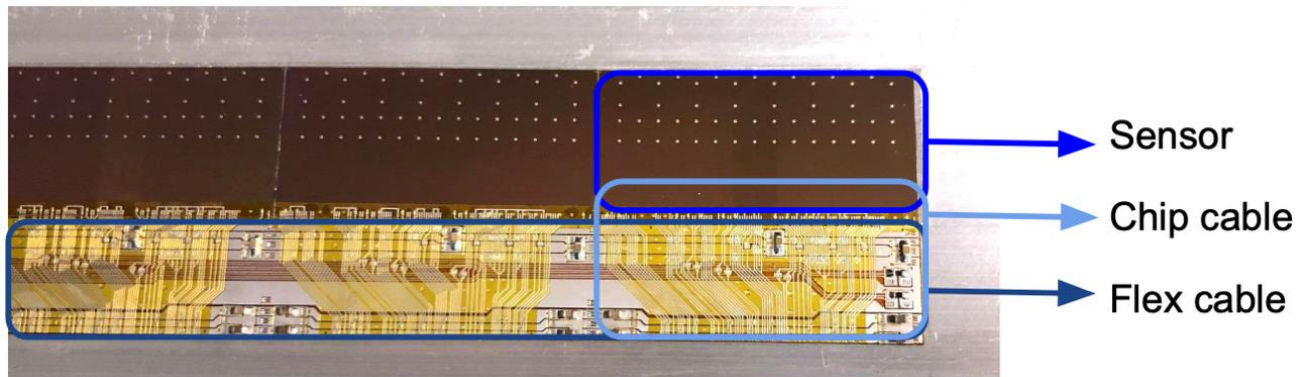
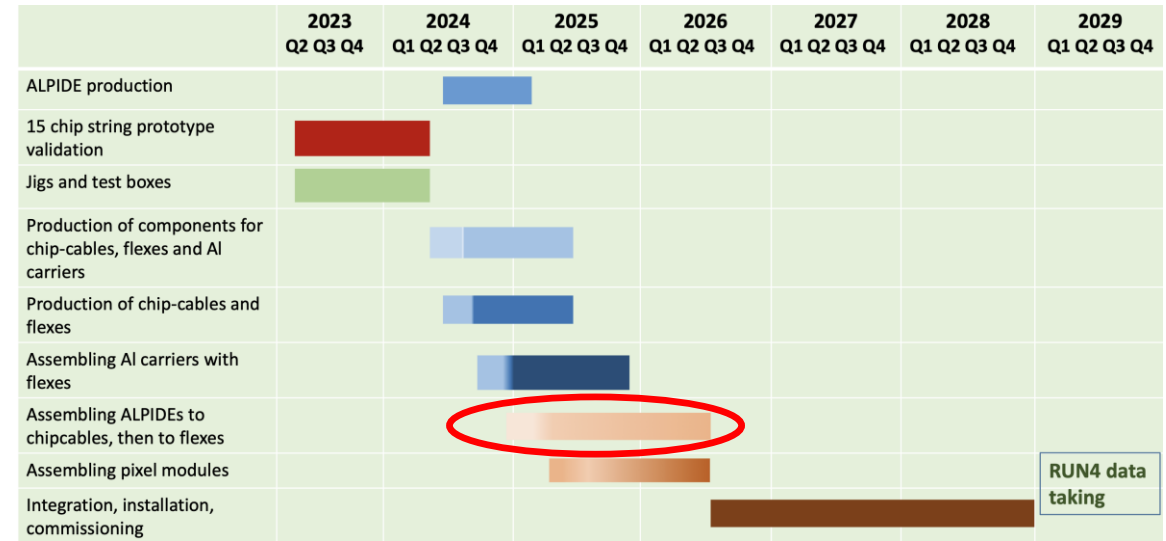
$$x_1 \approx \frac{2p_T}{\sqrt{s}} e^{+\eta} \gg 0$$

$$x_2 \approx \frac{2p_T}{\sqrt{s}} e^{-\eta} \ll 1$$

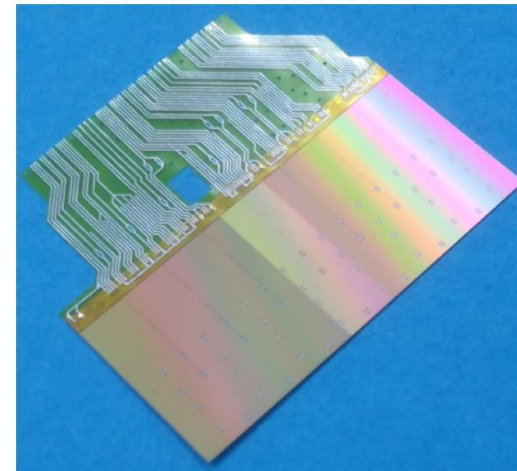
Target: high collision energy, low- $p_T$  and large rapidity.

# Finnish contribution to FoCal hardware

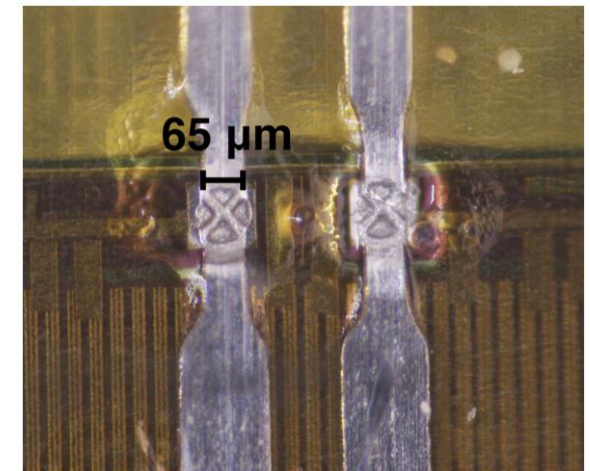
- FiRi 2023: new automatic bonding machine  
→ machine operational in fall 2024
- FiRi combined CMS and ALICE pledges
  - wire bonding of CMS tracker elements
  - SpTAB bonding of the FoCal pixel layers
- FoCal production in Helsinki in 2026



3/15 ALPIDE chips bonded to a flex cable, on top of an aluminium carrier



ALPIDE = ALICE Pixel Detector



SpTAB bond