



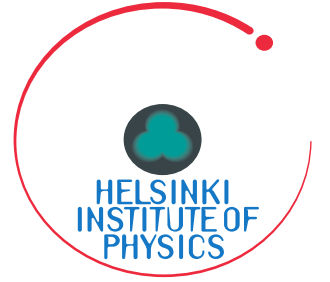
Centre of Excellence
in Quark Matter



ALICE



UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ



HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS

ALICE -luento

Maxim Virta

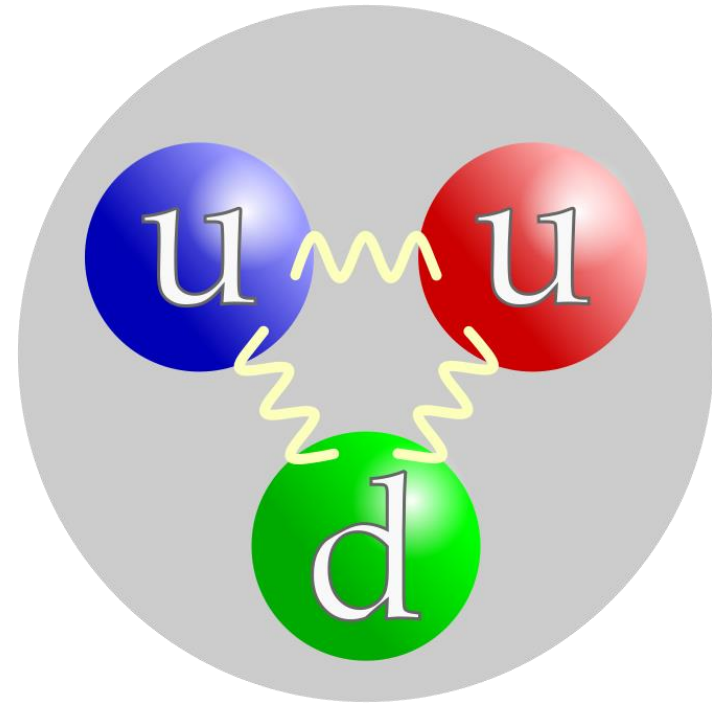
Finnish High School Programme
CERN, 17.10.2024

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 virtausobservaabelit kvarkki-gluoniplasmassa

Sisältö

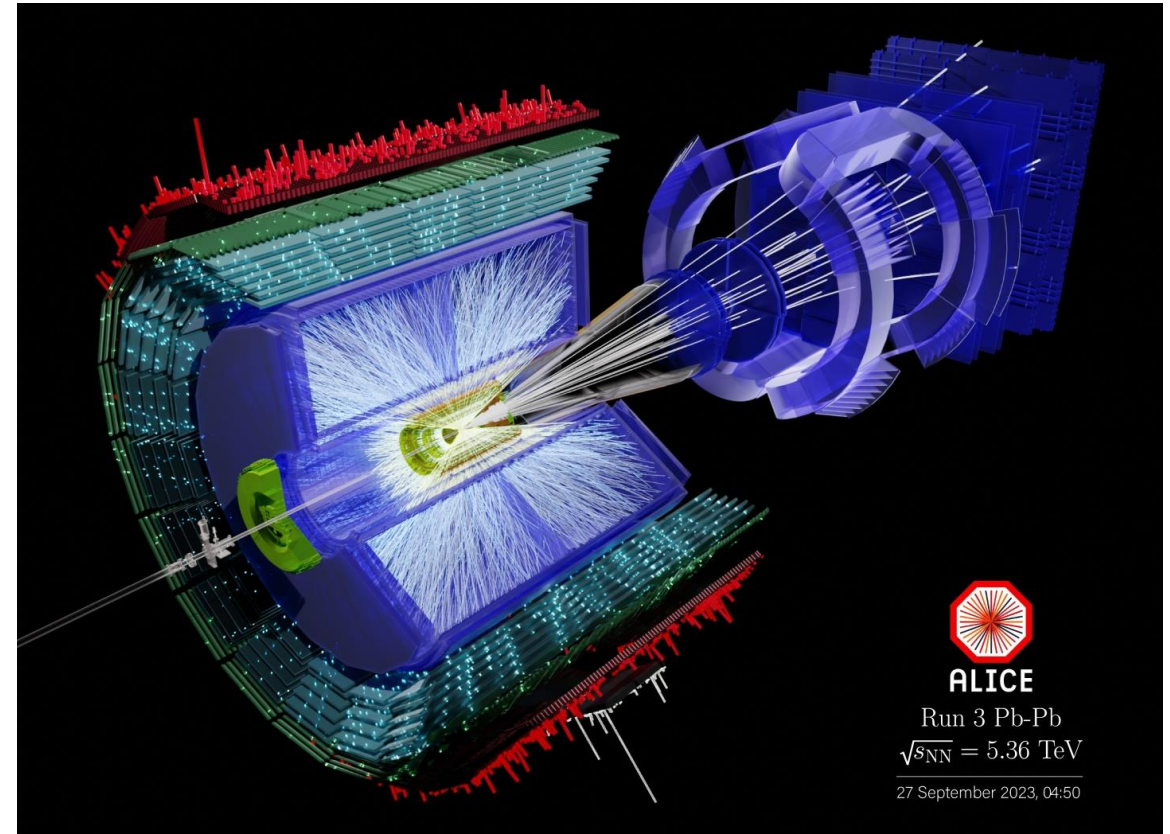
1. Mikä on ALICE?
2. Standardimalli ja kvarkki-gluoniplasma
3. Tämänhetkinen tutkimus
4. Laitteisto



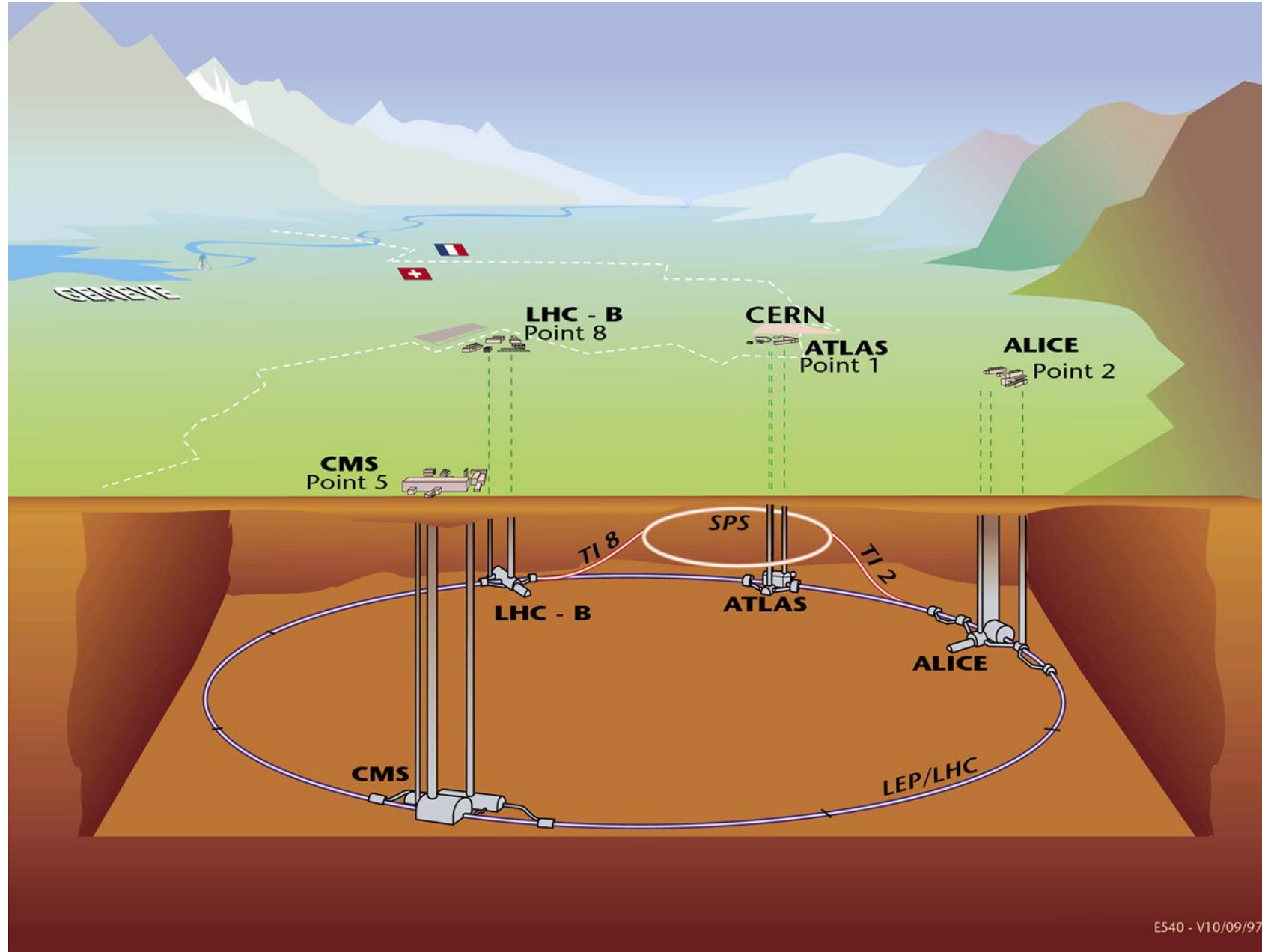
A Large Ion Collider Experiment

Keskittyy tutkimaan:

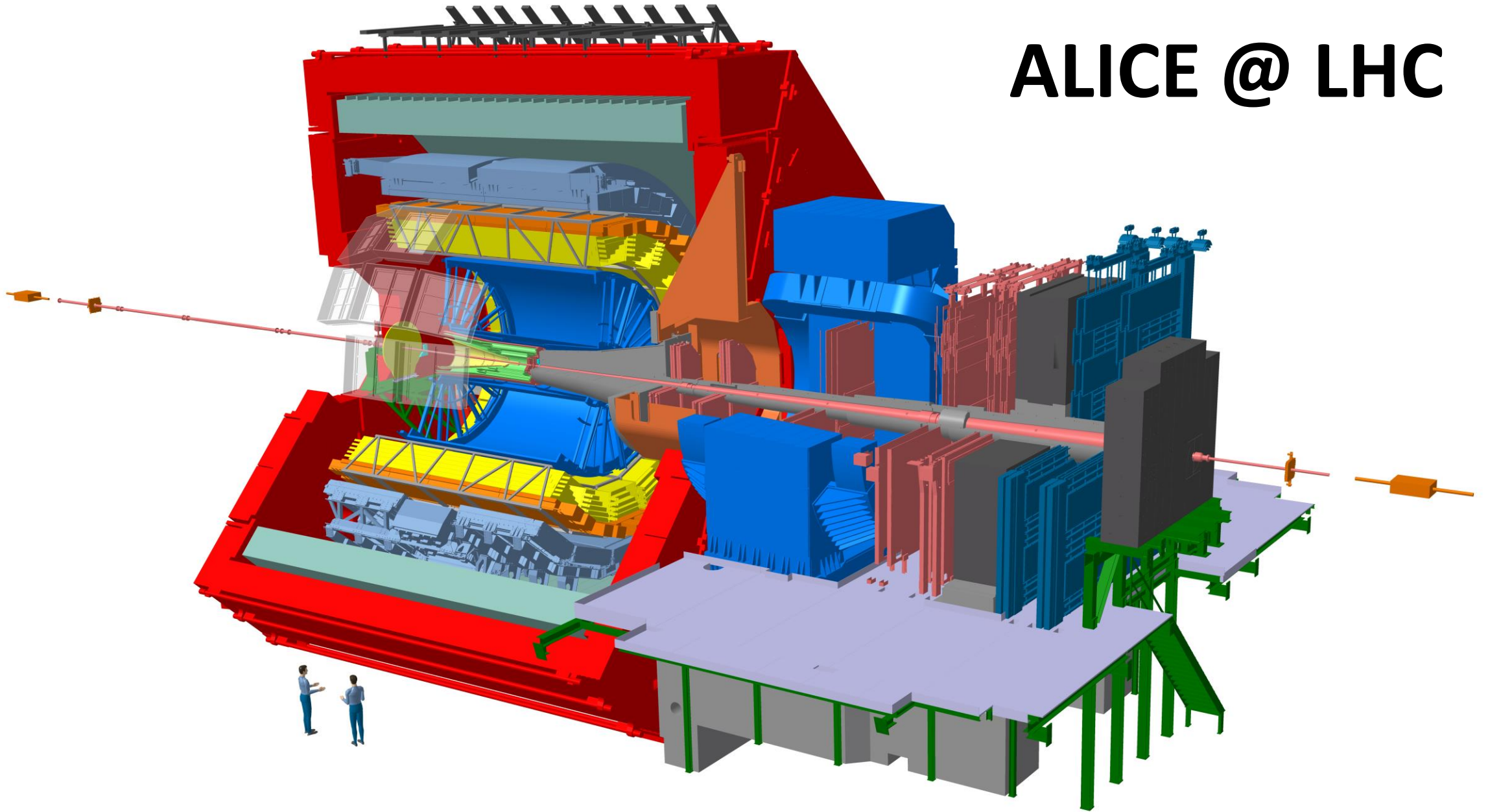
- PbPb törmäykset
- pp törmäykset
- kvarkki-gluoniplasma (QGP)
- suurenergiset hiukkassuihkut (jet)



LHC = Large Hadron Collider @ CERN

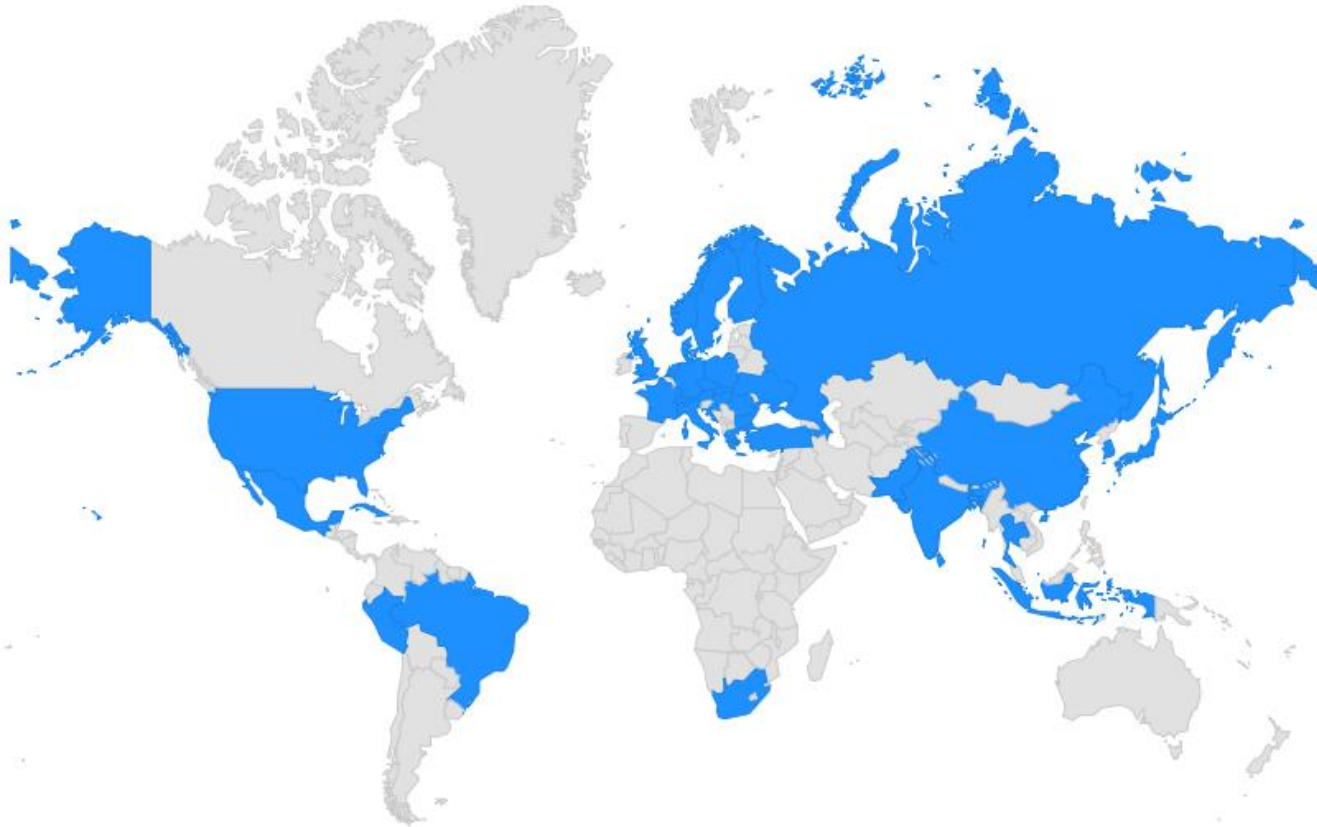


ALICE @ LHC





40 maata, 170 instituuttia, 1971 jäsentä



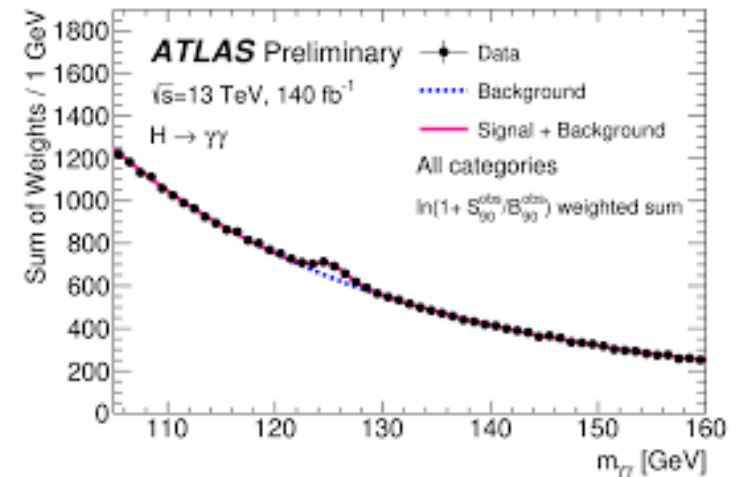
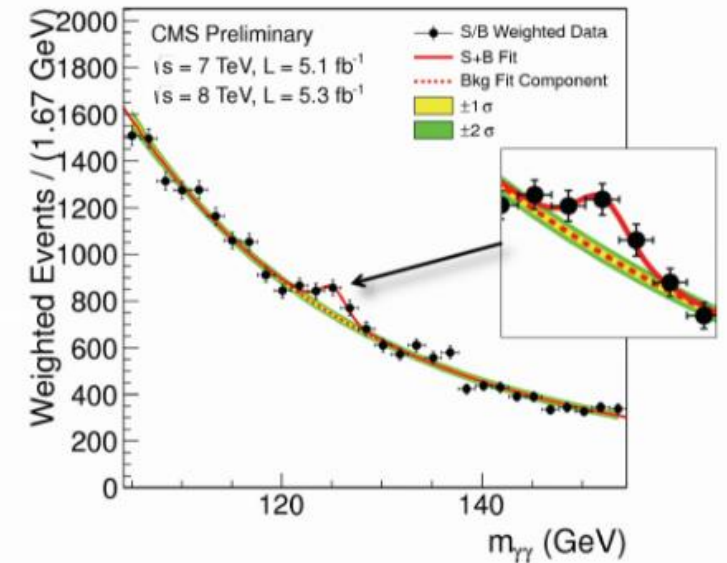
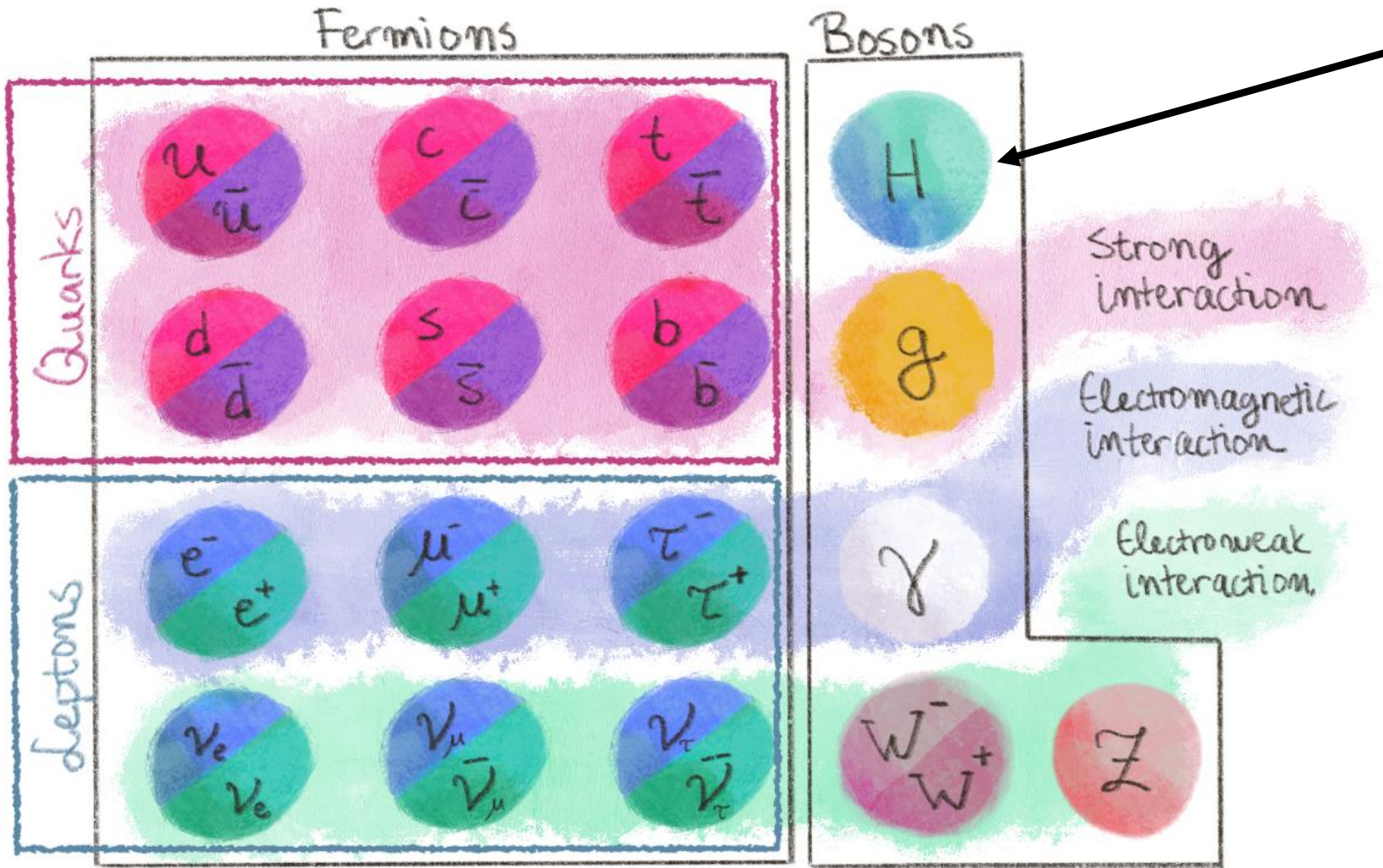
PhD celebration, 27.6.2023



Jyväskylän ALICE:

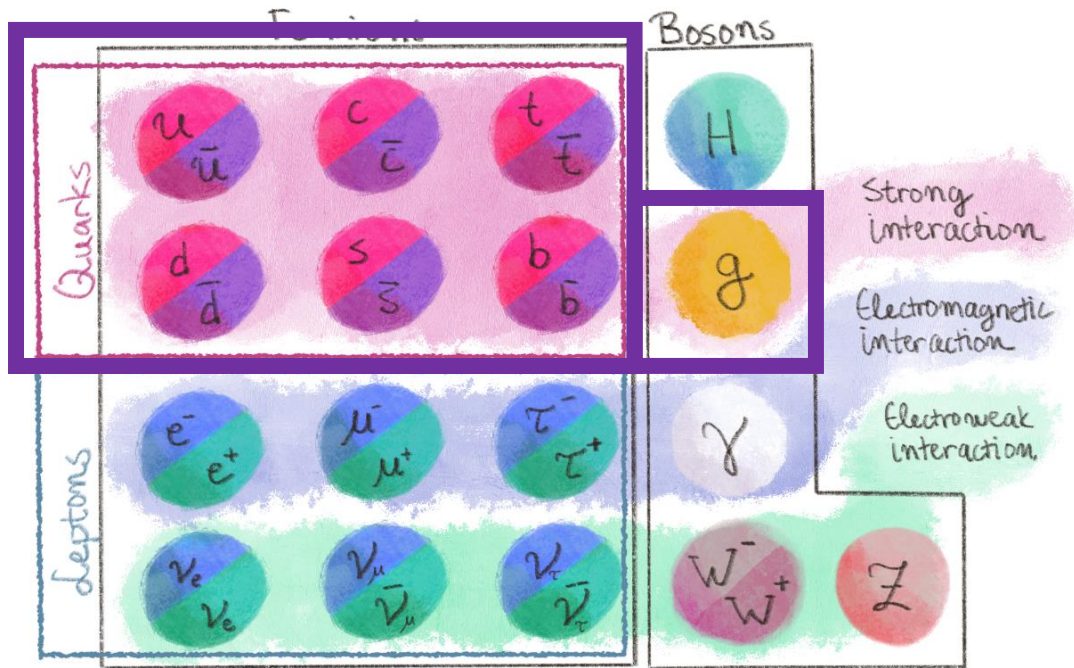
- 3 senioria
- 3 post docia
- 4 väitöskirjatutkijaa

Standardimallin alkeishiukkaset:



2012, LHC

Kuva: Heidi Rytönen



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

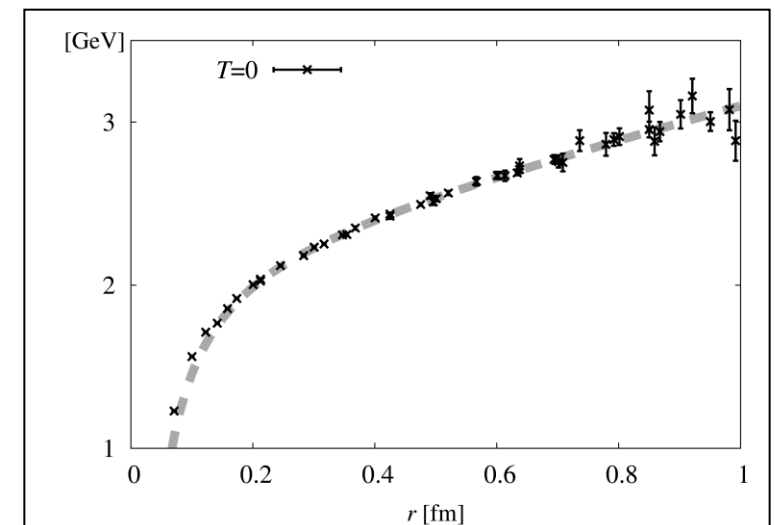
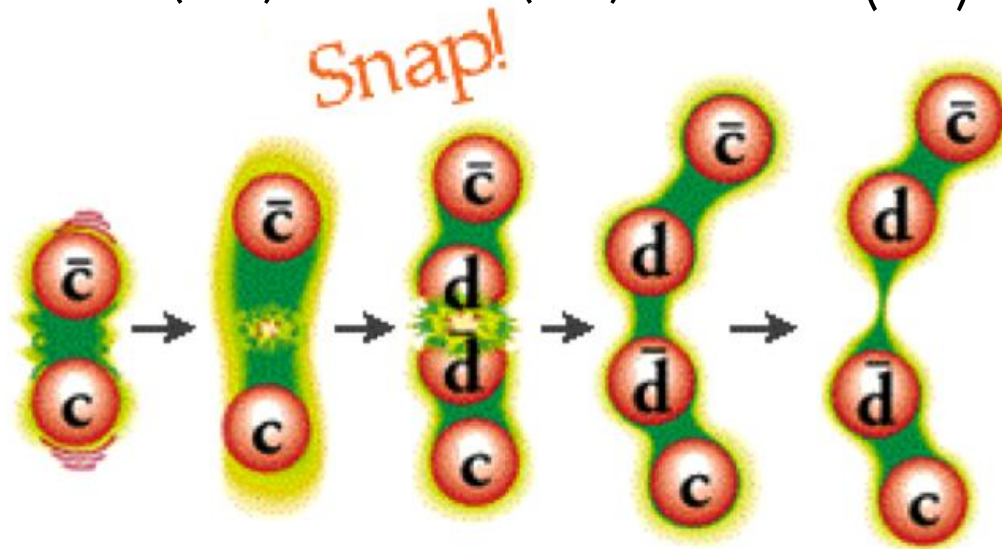
(Anti-) **Baryonit** = kolmen (anti-)kvarkin sidottuja tiloja, esimerkiksi

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

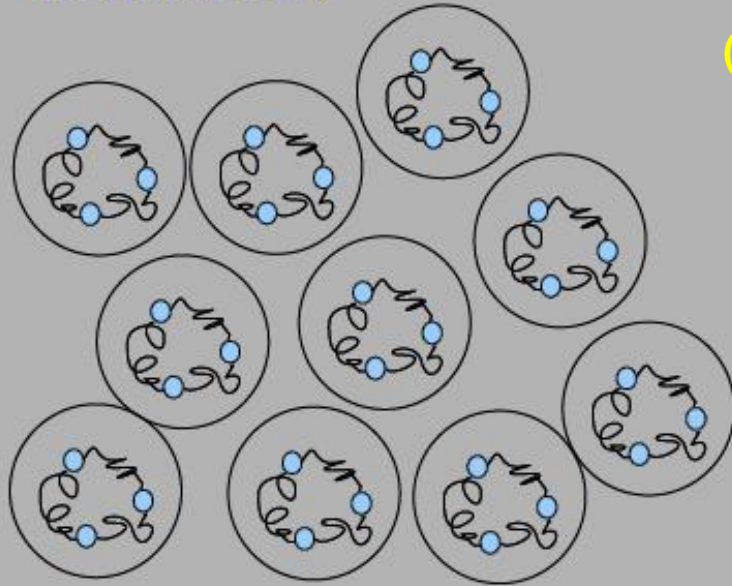
Mesonit = kvarkin ja anti-kvarkin sidottuja tiloja, esimerkiksi:

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

Kahliutuminen
skemaattisesti:

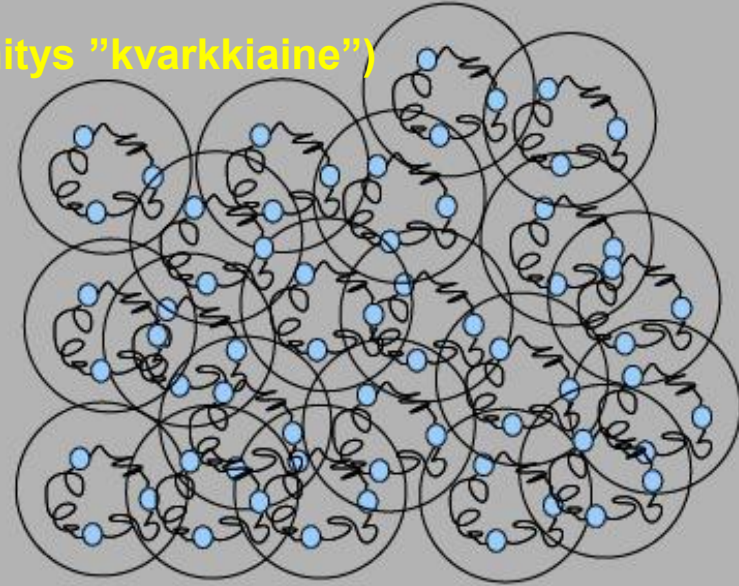


hadronikaasu



(Toisinaan nimitys "kvarkkiaine")

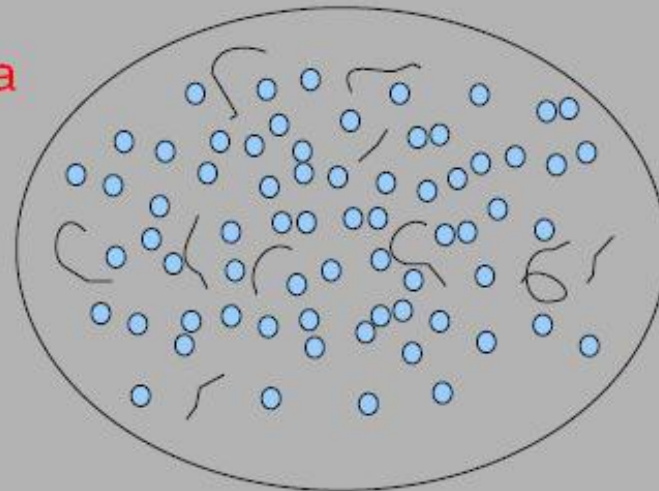
Puristus



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

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

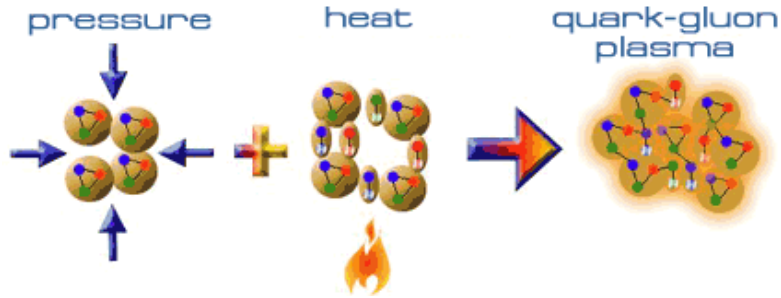
kvarkki-gluoniplasma



Nukleonit eivät ole
"kovakuorisia biljardipalloja"

Kvarkki-gluoniplasma = aineen 5. olomuoto

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



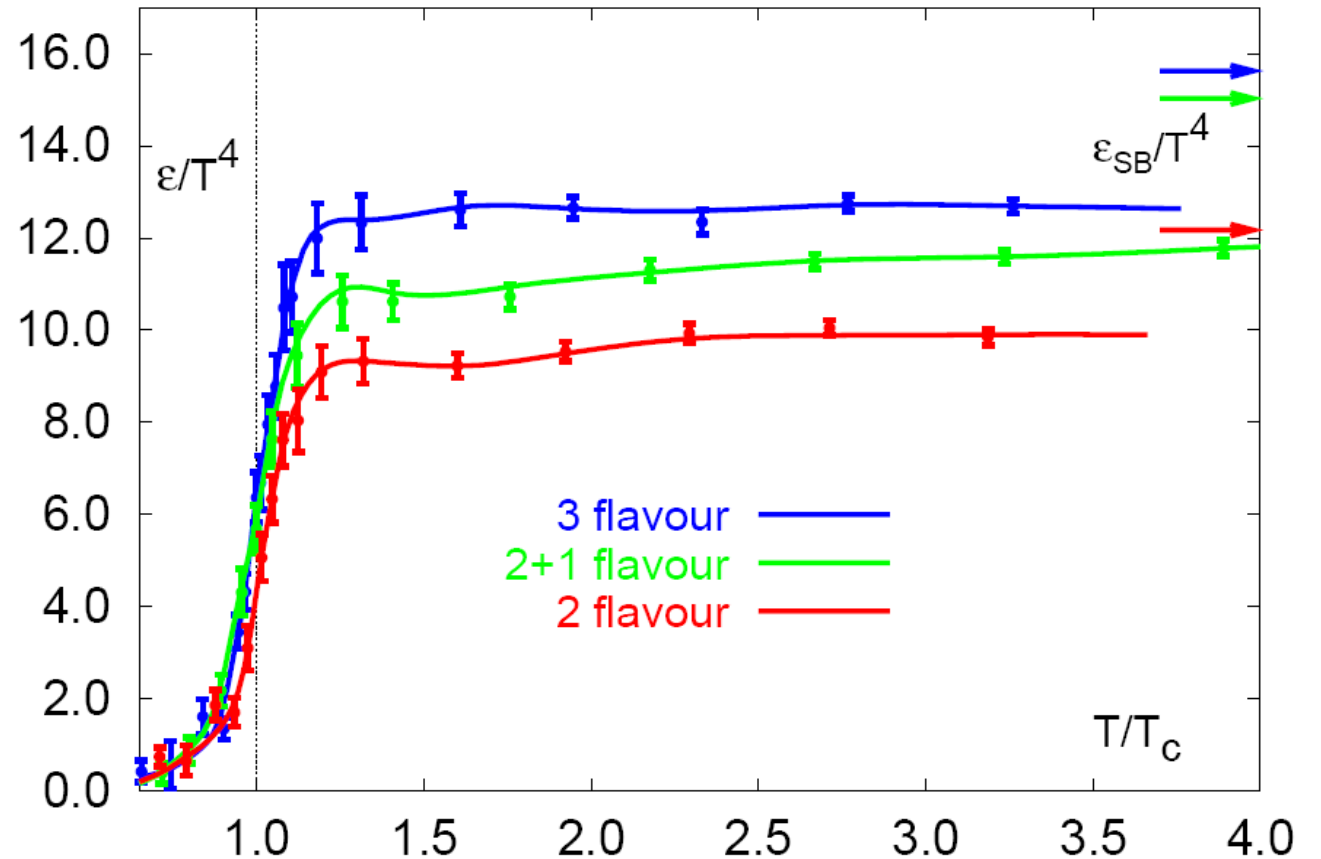
Relativistinen massattomien hiukkasten
ideaalikaasun energiatiheys

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

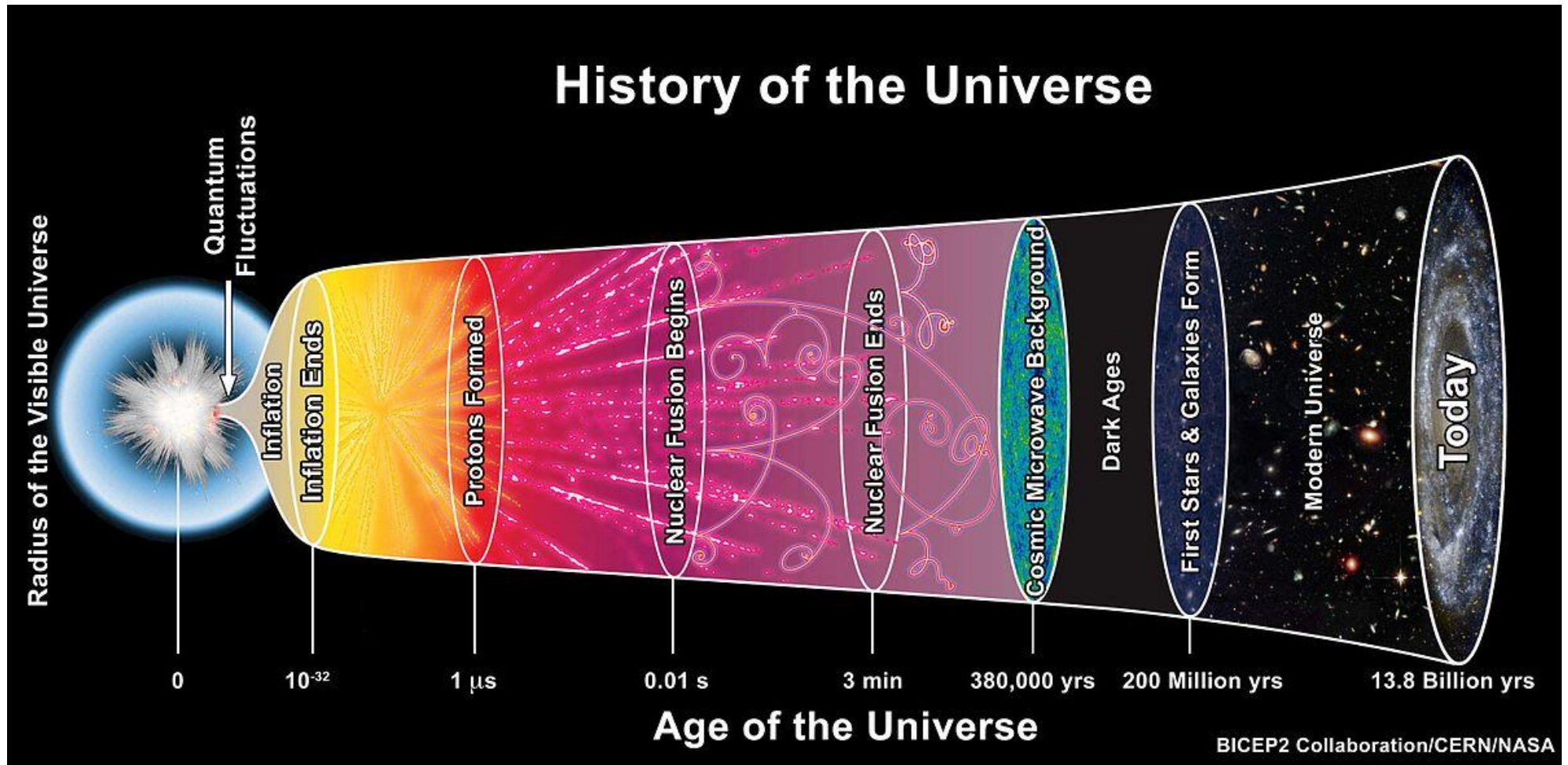
Paine

$$P = \varepsilon/3$$

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

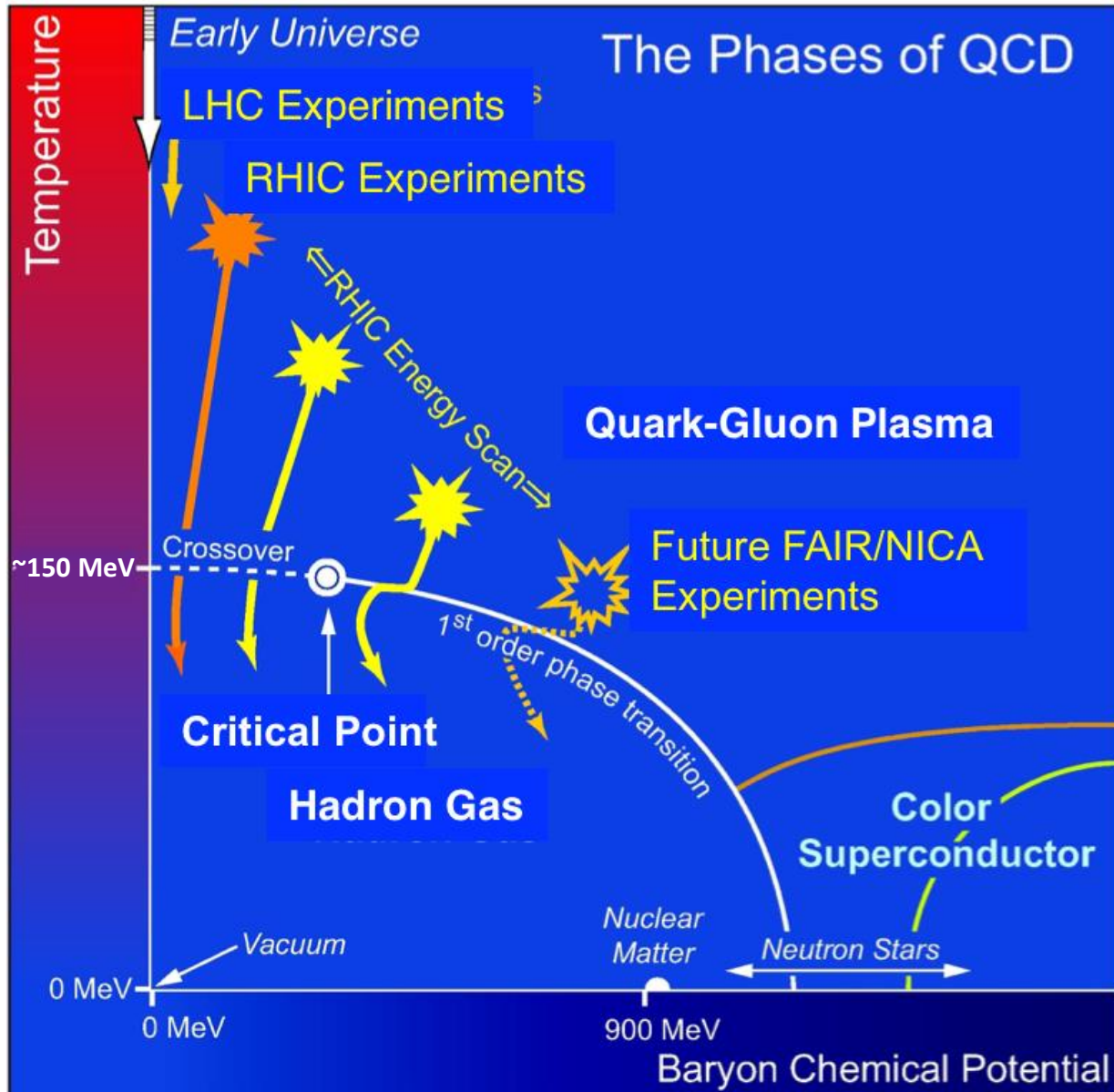


Raskasionitörmäytysten motivaatio



 QCD faasitransitio

Raskasionitörmäytysten motivaatio

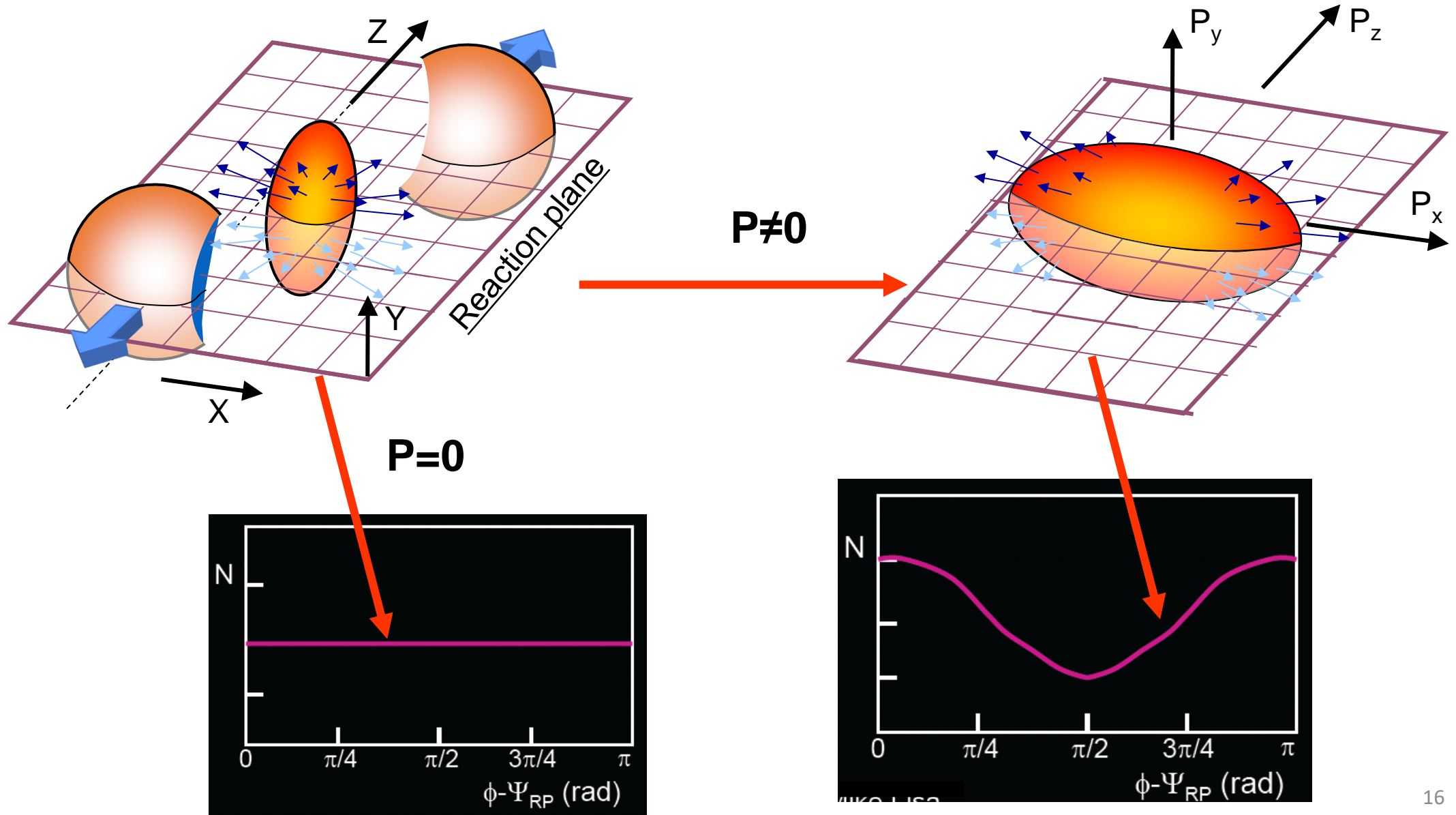


QGP – suurusluokat:

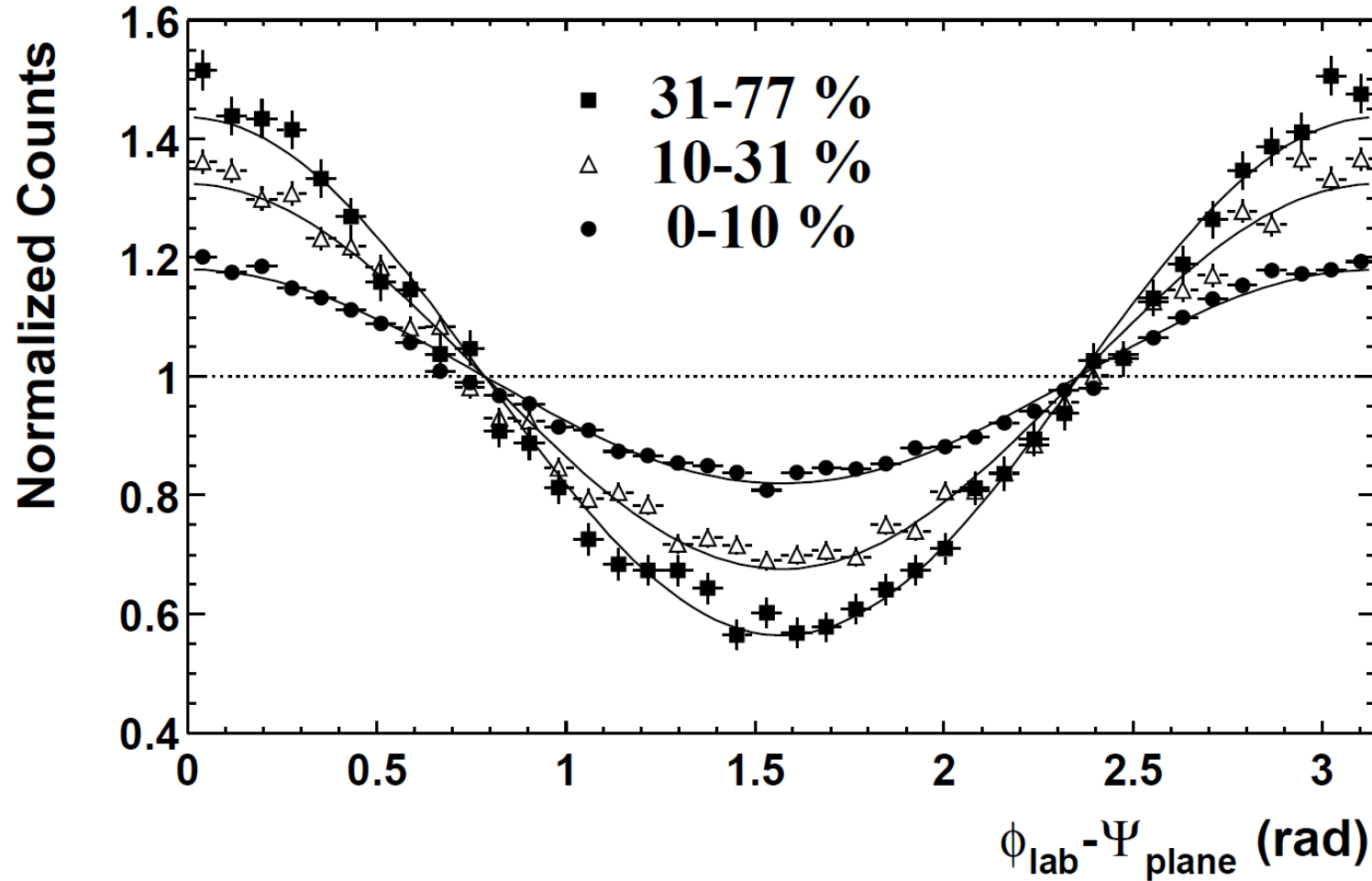
- Lämpötila $T_c \sim 150$ MeV $\sim 2000 \times 10^9$ K
- Tiheys ~ 1 nukleoni / fm^3
- Energiatiheys ~ 1 GeV / fm^3
- Aikainen maailmankaikkeus $\tau < 10$ μs

Miten tätä voidaan tutkia/havaita?

Onko syntynyt painetta?



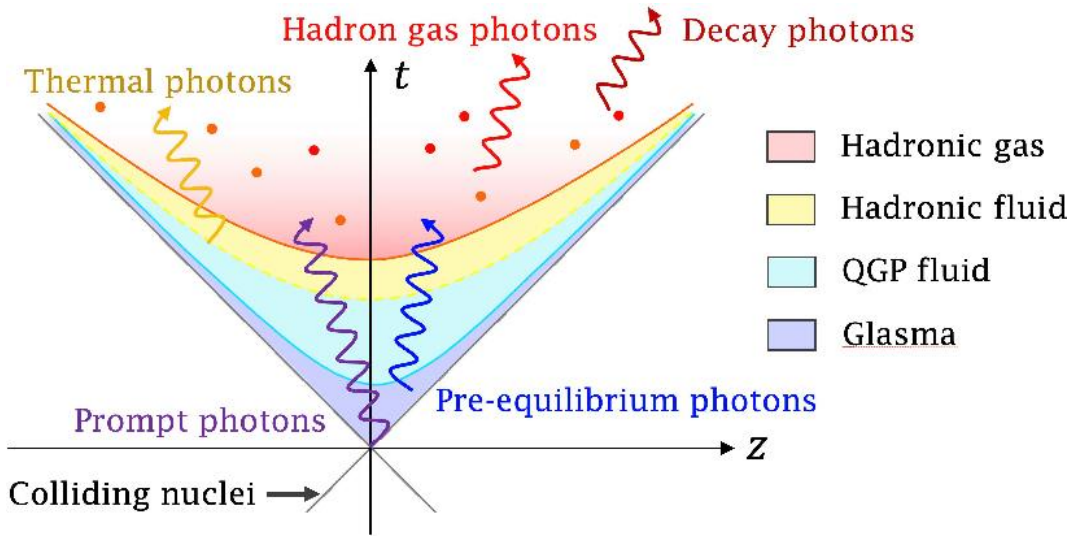
Onko syntynyt painetta? - Kyllä!



Törmäyksen keskeisyys kasvaa
→ epäsymmetria pienenee

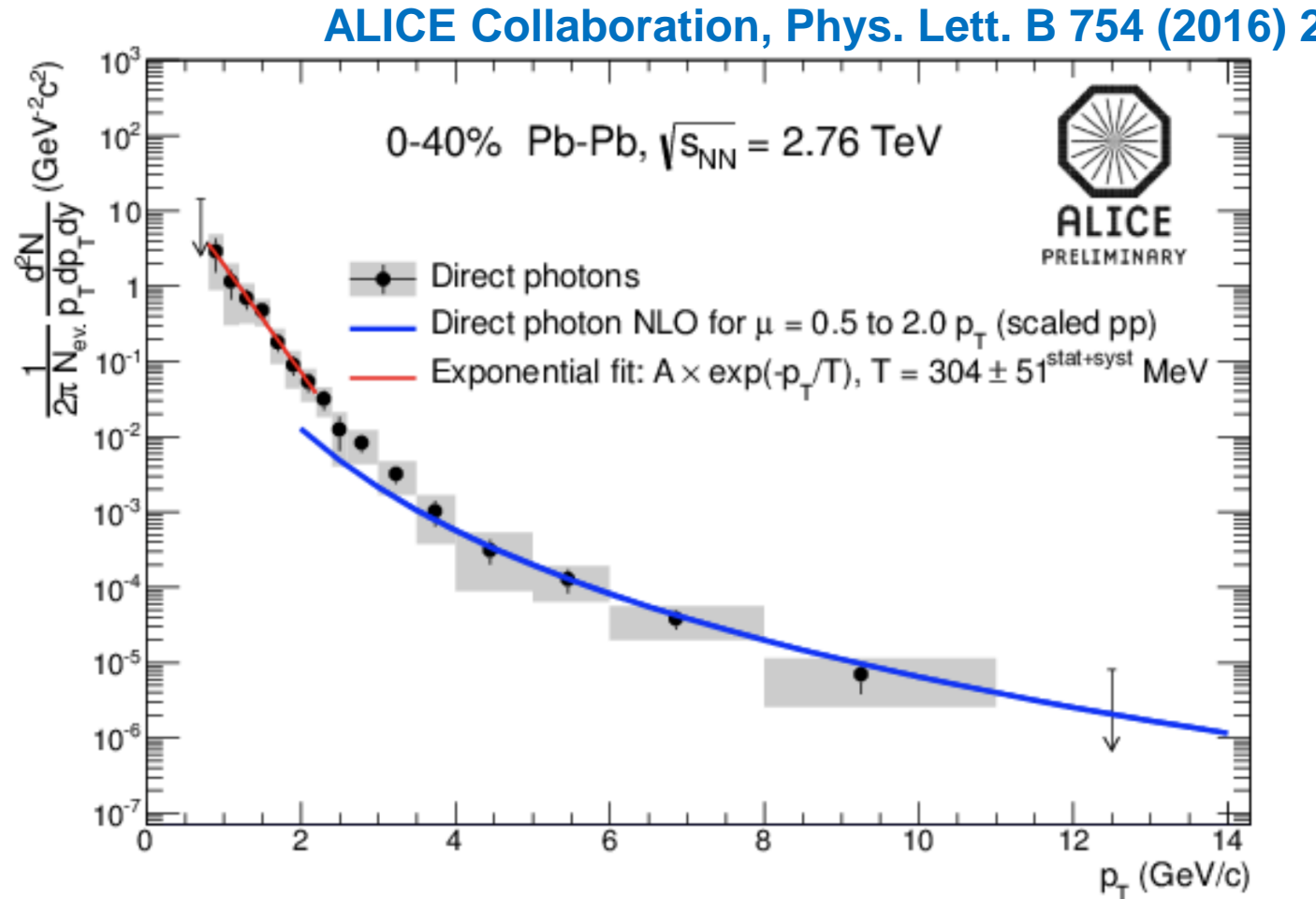
Selkeä, systemaattinen kulmaepäsymmetria havaittu

Onko aineella lämpötila? - Kyllä!

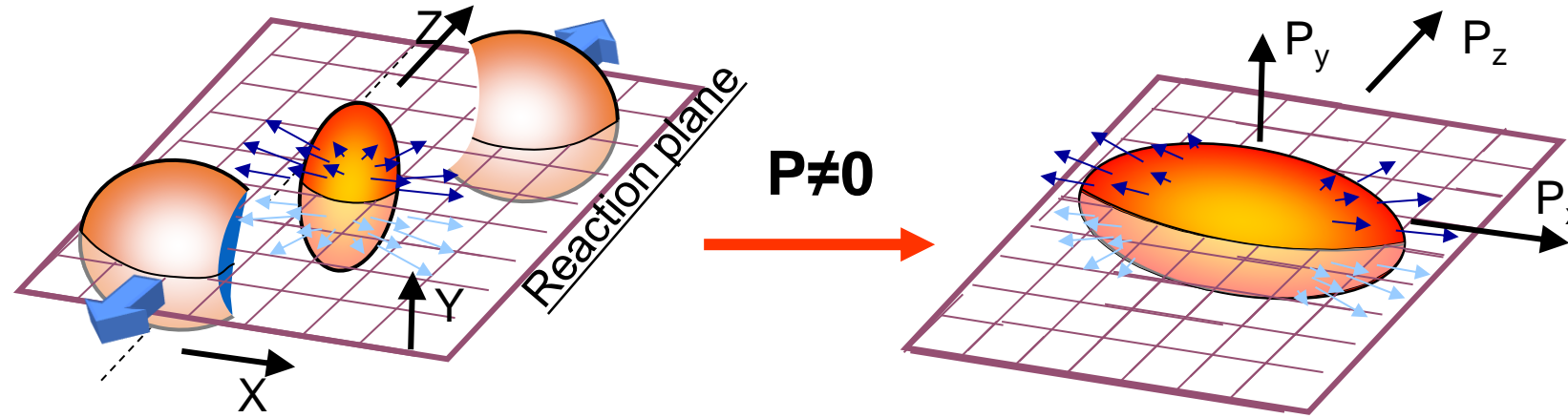


Fotonien vapaa matka
QCD-aineessa ~ 100 fm
→ karkaavat aineen sisältä
→ tietoa tulipallon keskustasta

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

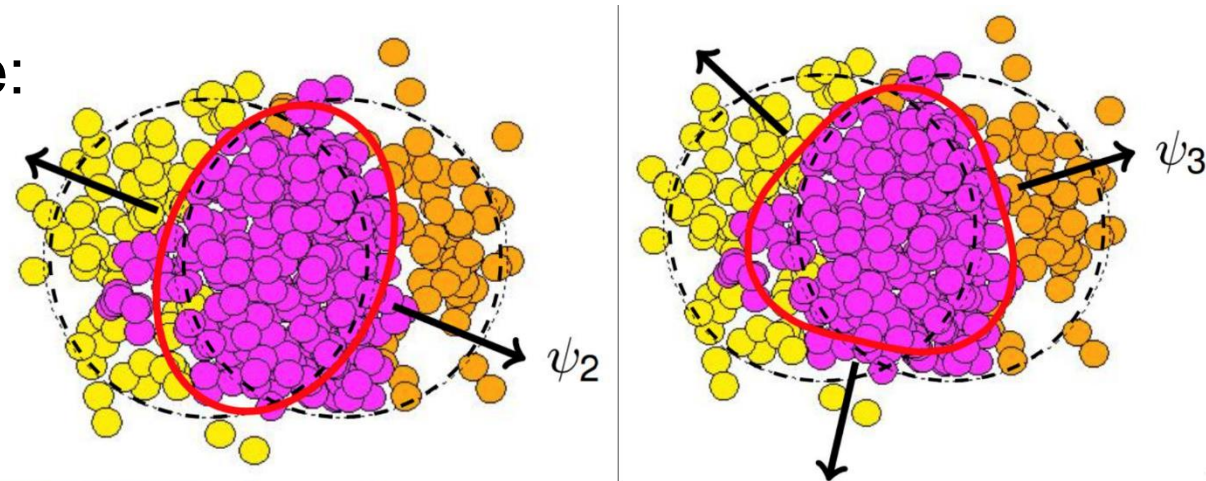


Kollektiivinen elliptinen virtaus törmäyksessä:



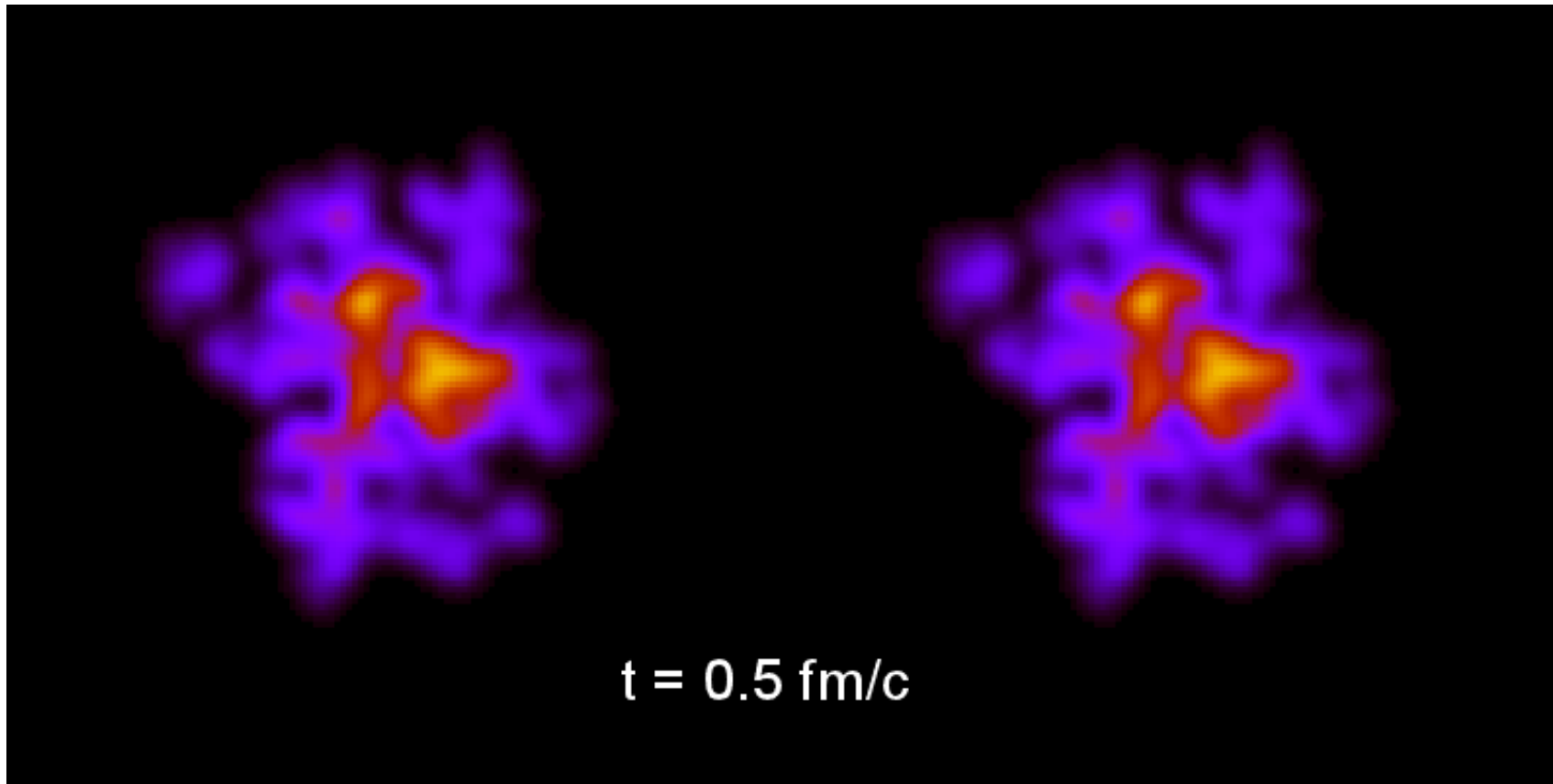
Fourier analyysi lopputilan hiukkasjakaumille:

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



Elliptinen virtaus $v_2 \Leftrightarrow$ törmäyksen geometria

Triangulaarinen virtaus $v_3 \Leftrightarrow$ alkutilan fluktuaatiot



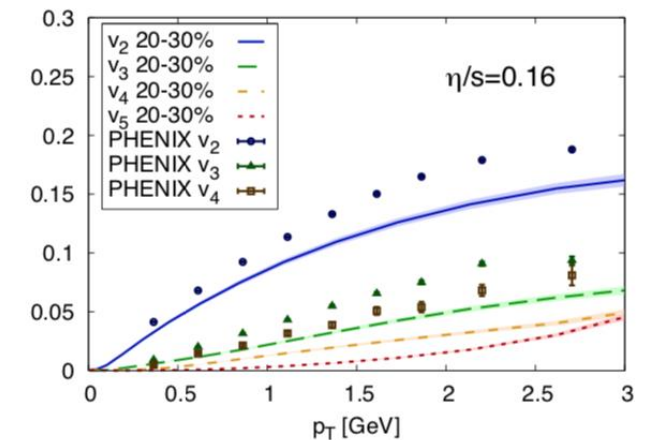
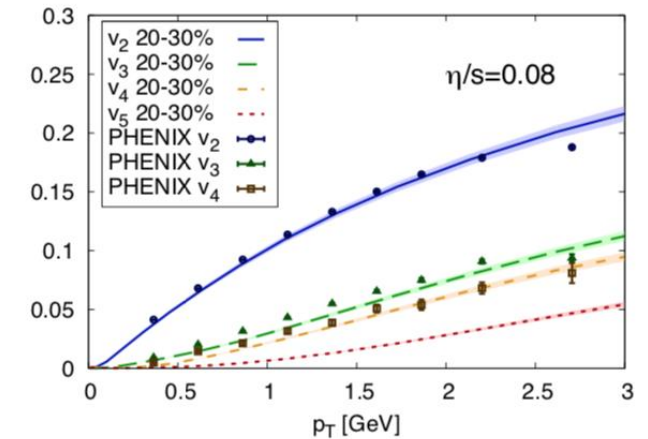
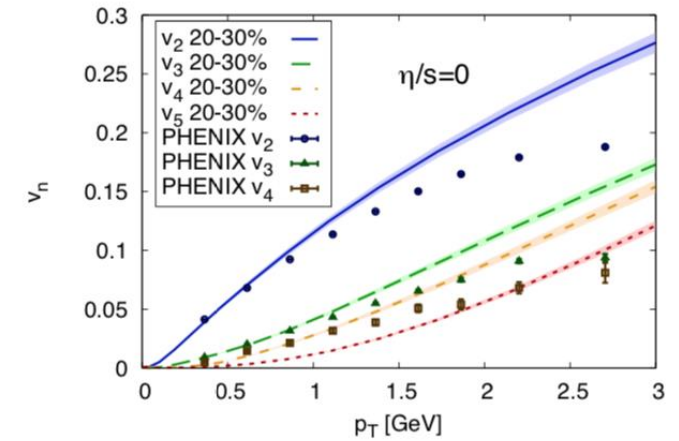
$\eta/s = 0$

$\eta/s > 0$

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

Viskositeetti vaimentaa fluktuaatioita

→ erityisesti suuremmat v_n :t pienenevät



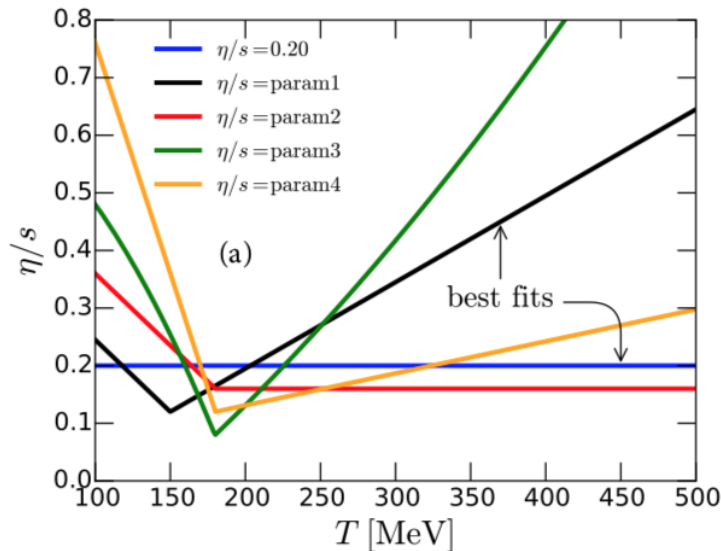
Korkeamman kertaluokan suureet ja korrelaatiot

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

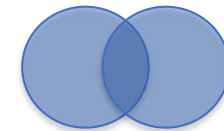
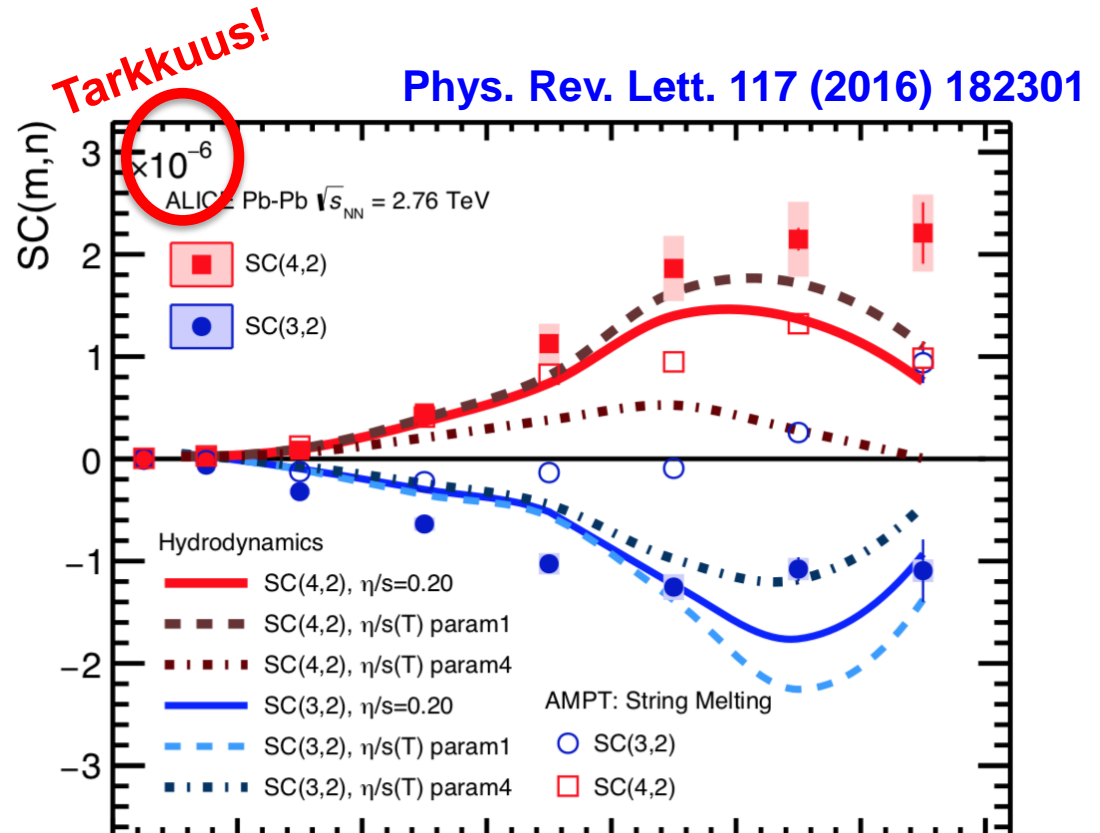
Symmetric cumulants:

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

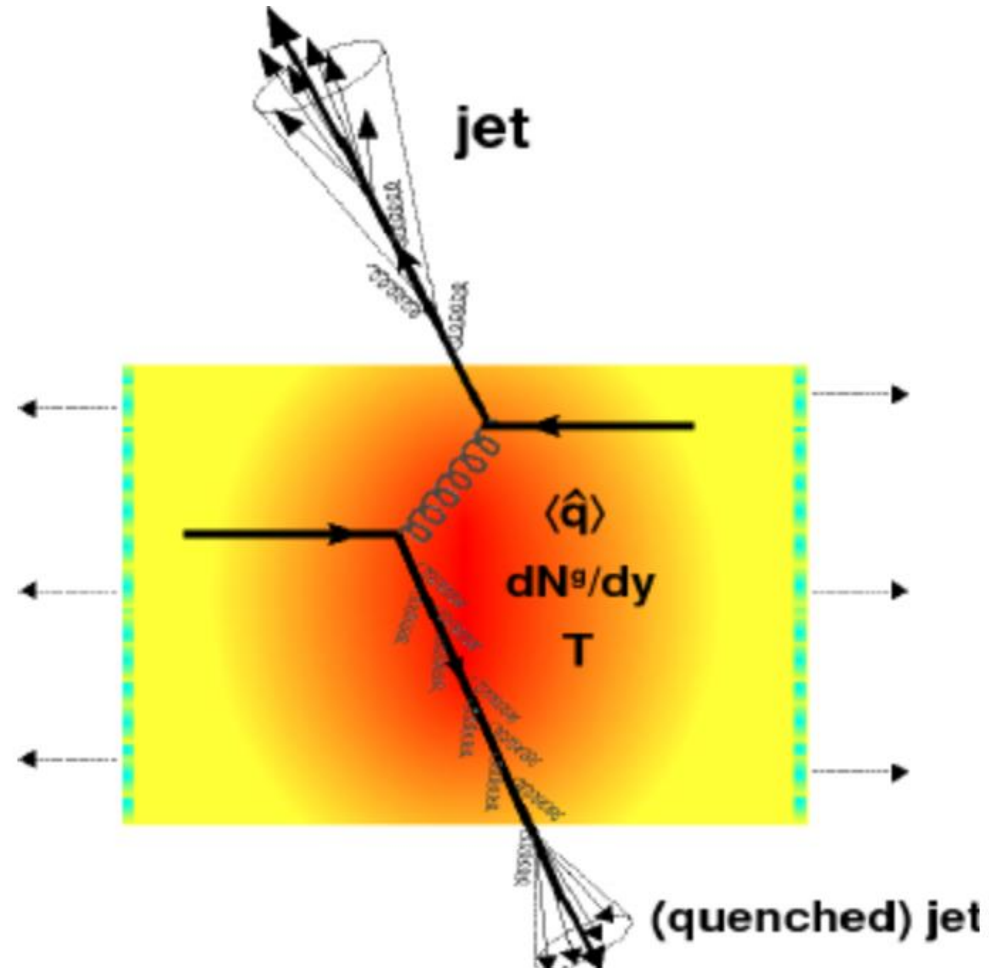
Hydrodynamiikan simulaatiot:



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



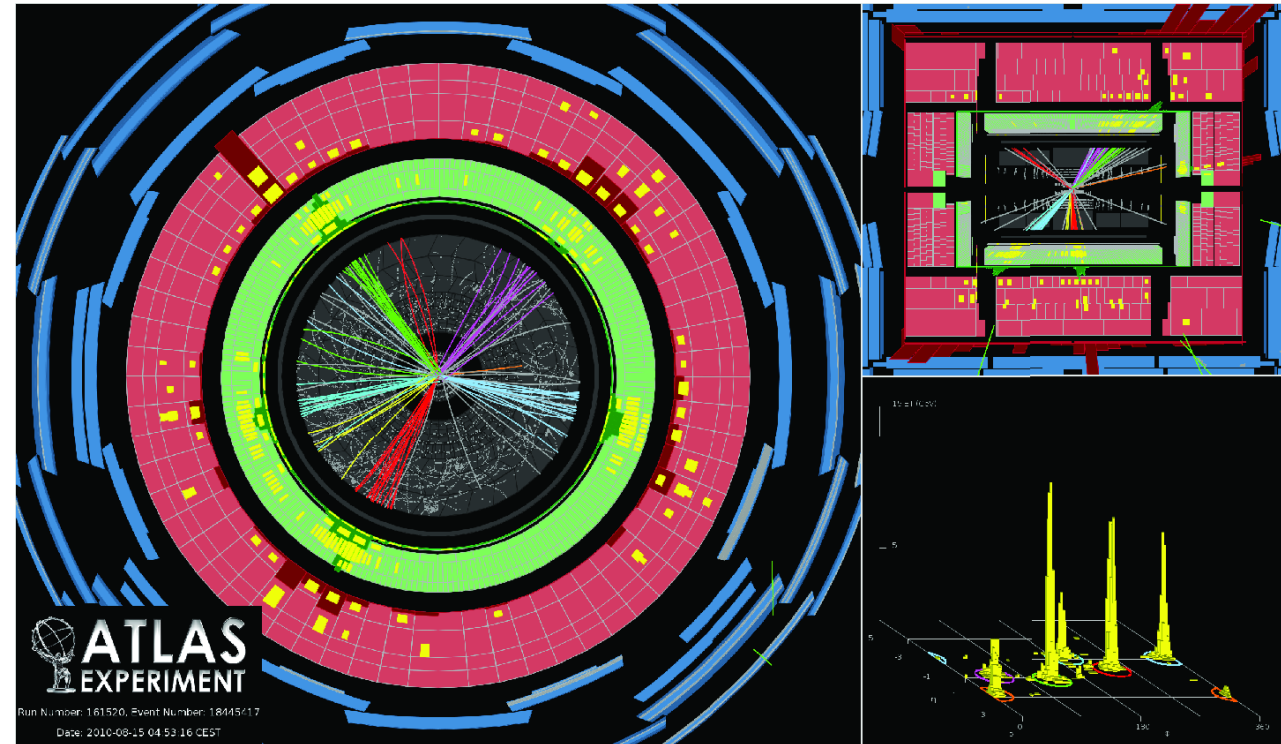
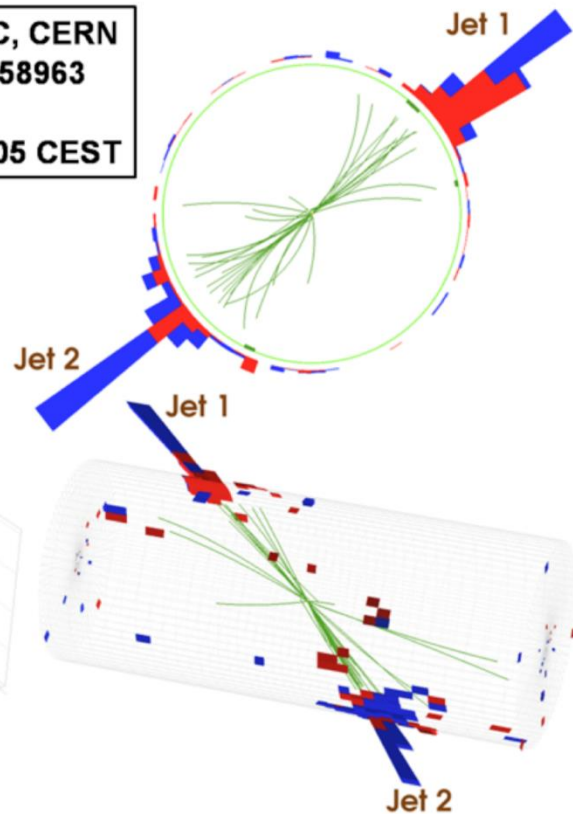
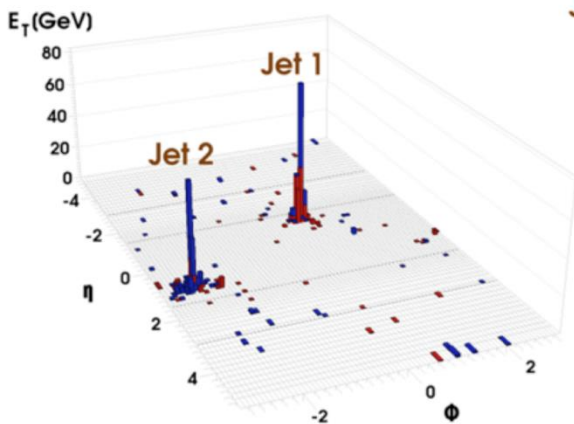
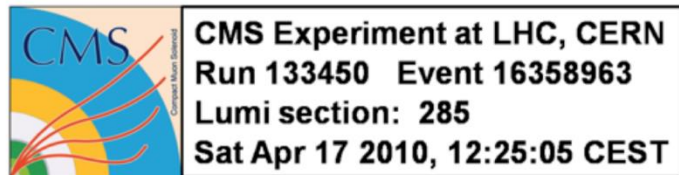
Jettien energiahäviöt aineessa – QGP:n tomografiaa:



Liikemäärän säilyminen: suurienerginen kvarkki tai gluoni hadronisoituu

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

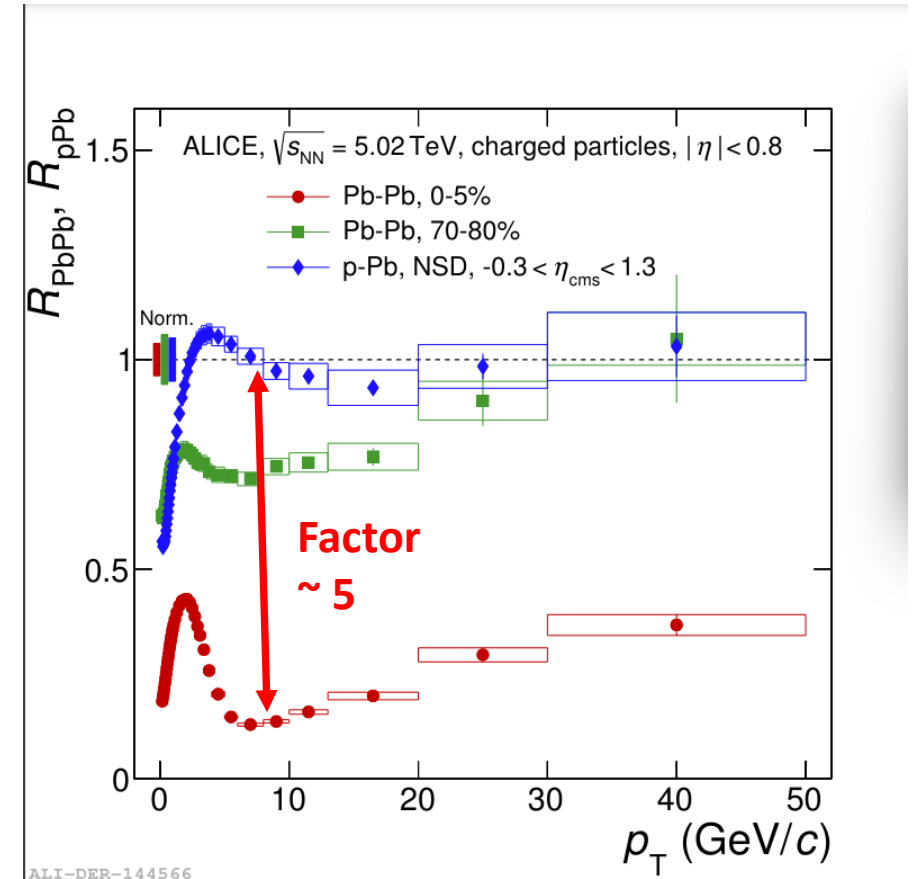
Jettejä rekonstruoidaan erilaisilla algoritmeilla, jotka päättävät mitkä lopputilan hiukkaset kuuluvat syntyneeseen "jettiin"



Ydinmodifikaatiokerroin, R_{AA}

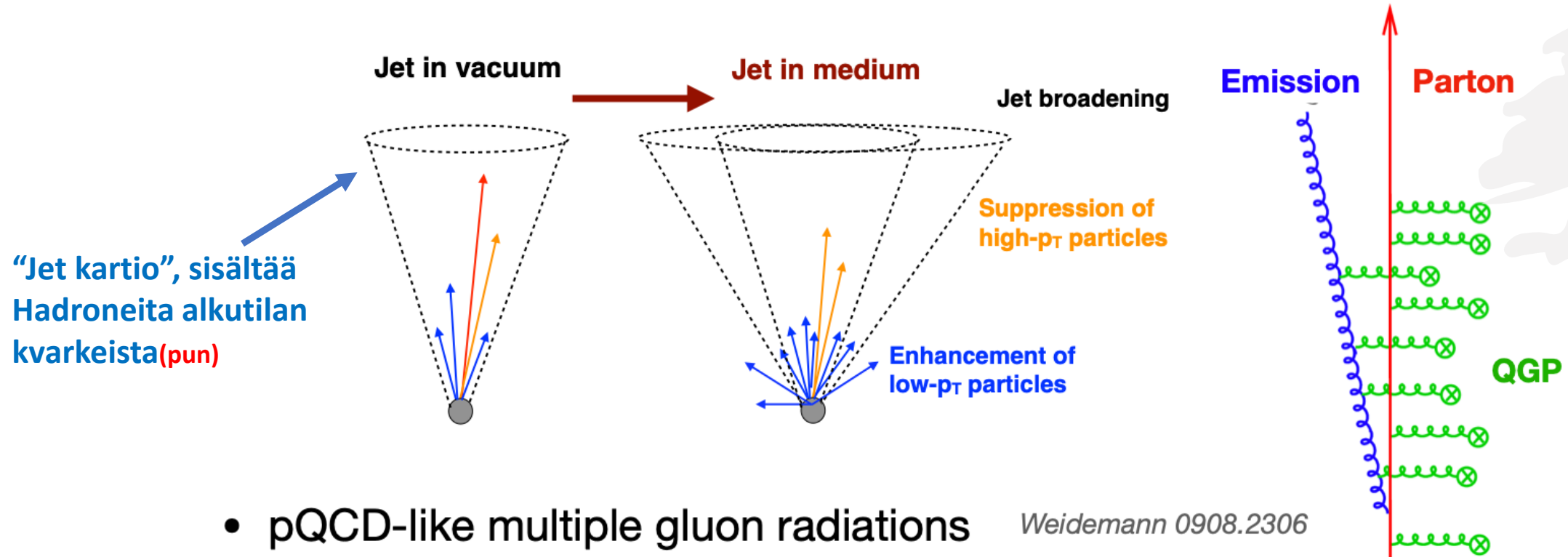
Ei ytimien vaikutusta

- 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



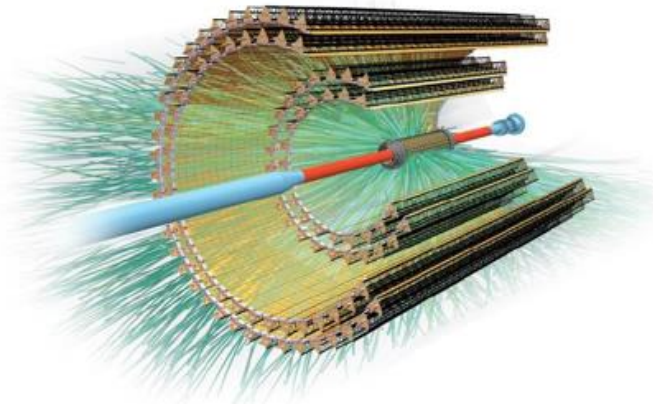
- pQCD-like multiple gluon radiations *Weidemann 0908.2306*
- medium induced scatterings (inelastic), *Zapp et al. JHEP 03 (2013) 080*
- AdS/CFT energy loss, *Liu et al. Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 182301*
- color coherence/decoherence, *Solano et al. JHEP 10 (2014) 019*
- modified partonic splitting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

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

Credit!

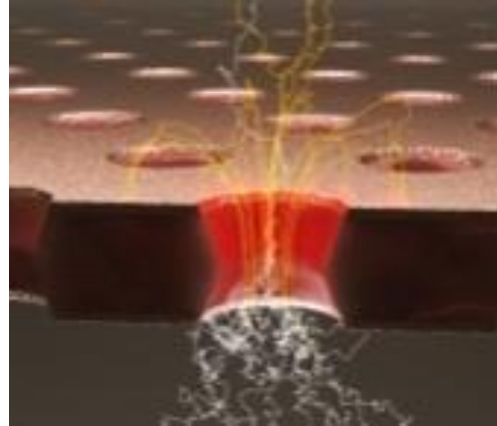
Millä tutkitaan?

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



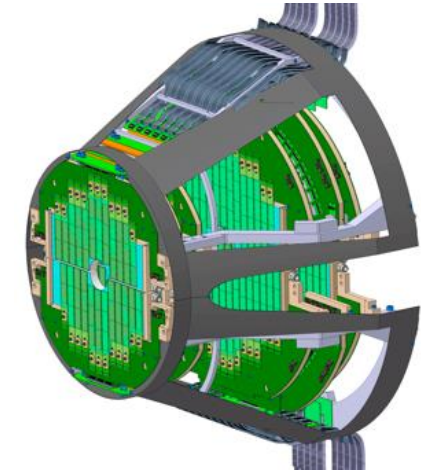
Uusi ITS3

- nopeampi
- vähemmän materiaalia
- parempi resoluutio



Uusi TPC readout:

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

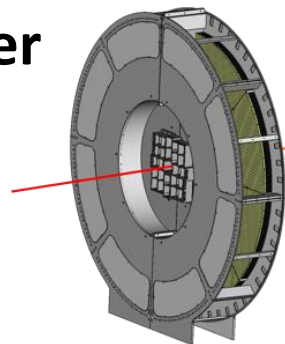


Lisätty MFT

- parempi muon seuranta
- kakkosverteksit @ forward

Fast Interaction Trigger

- keskeisyys
- online luminosity
- törmäysaika

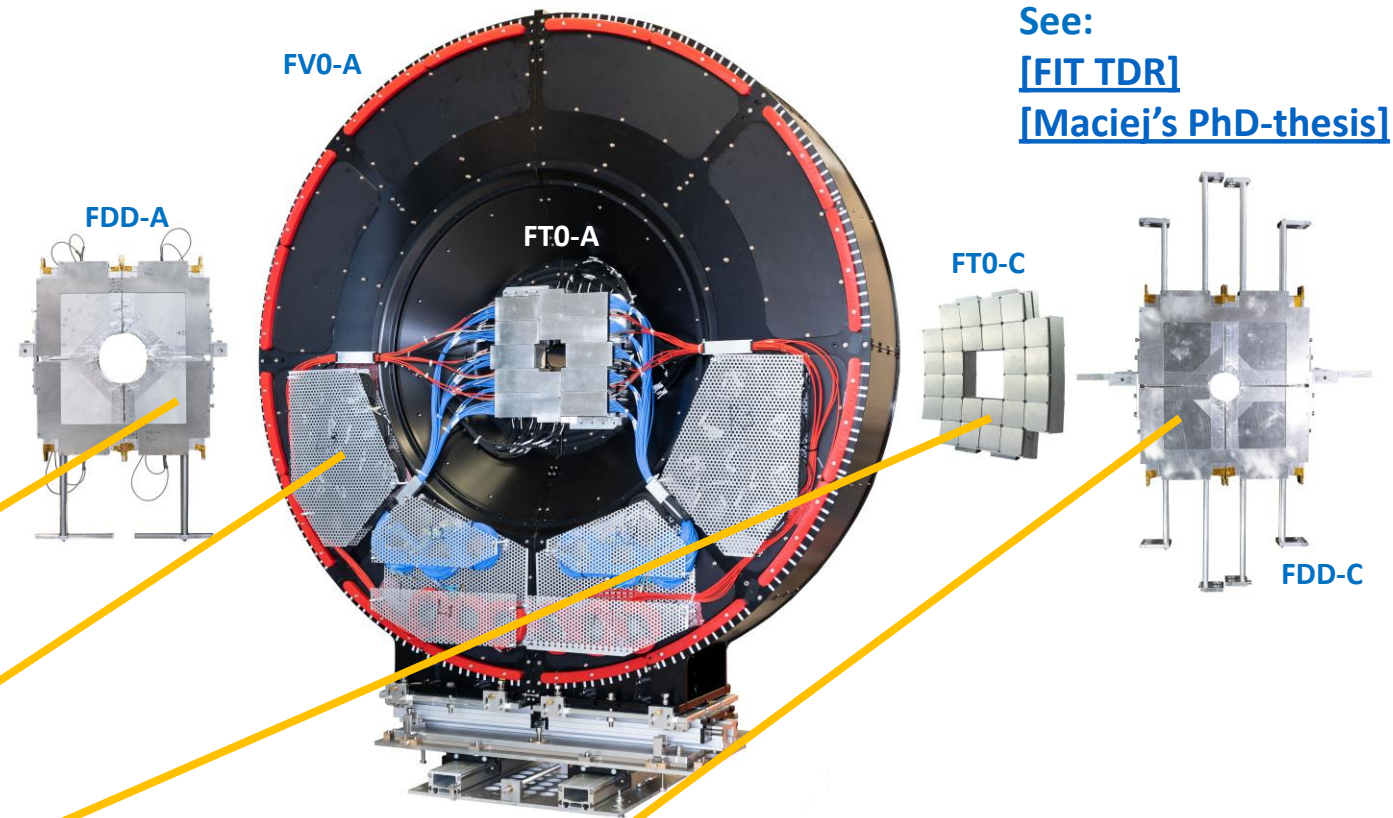
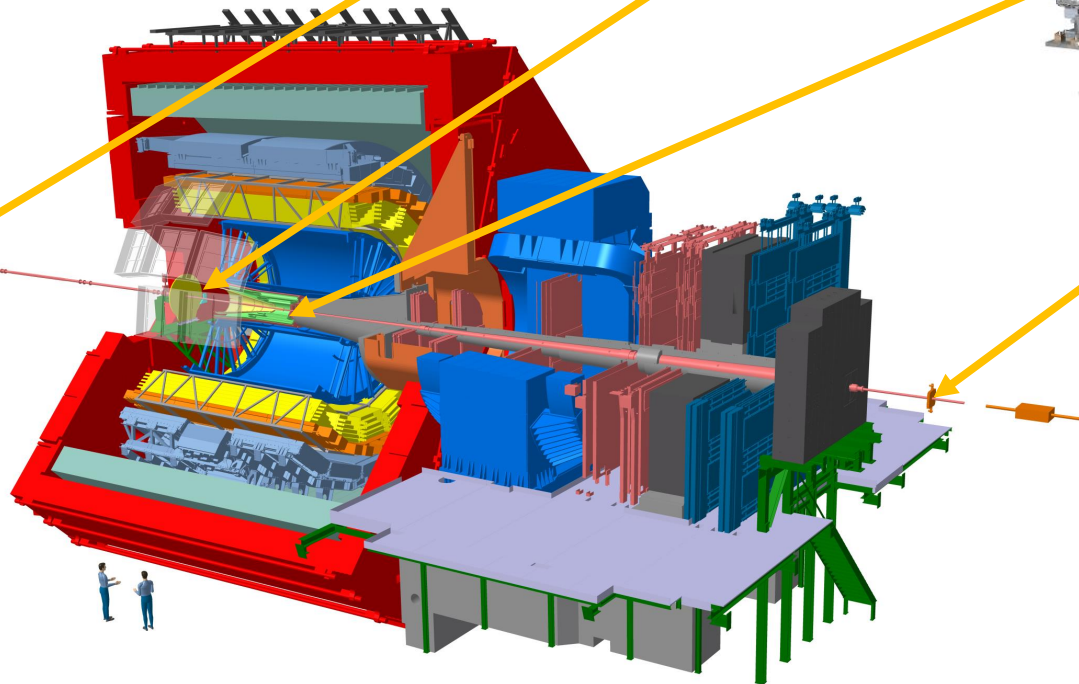


O²

- 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

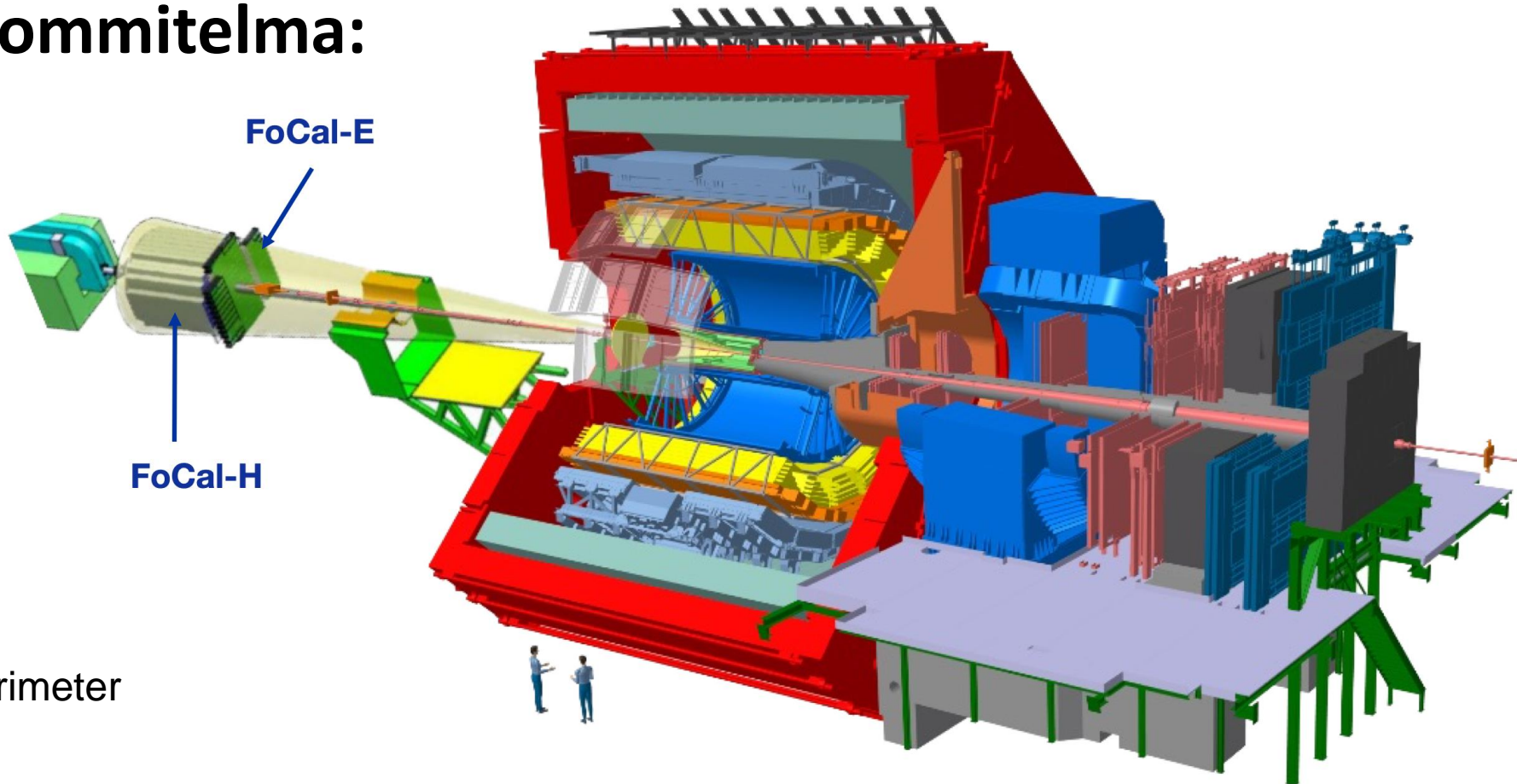


See:
[\[FIT TDR\]](#)
[\[Maciej's PhD-thesis\]](#)

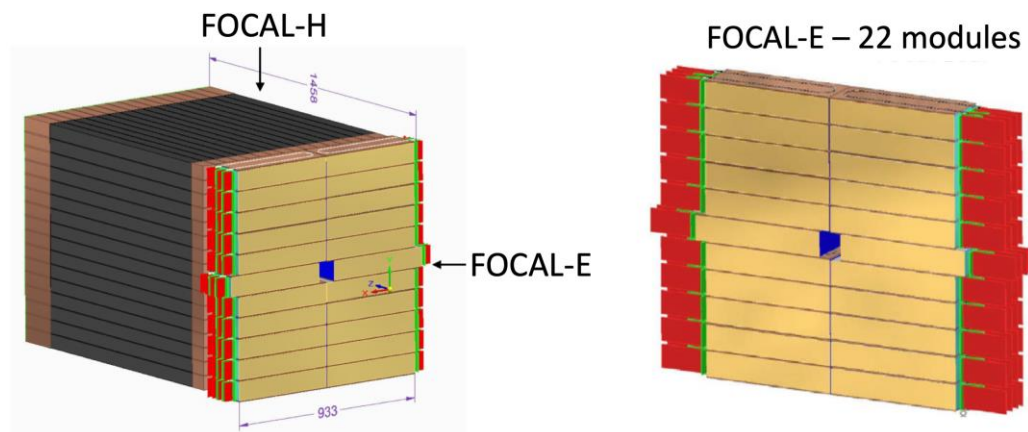
FIT toiminnallisuudet:

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

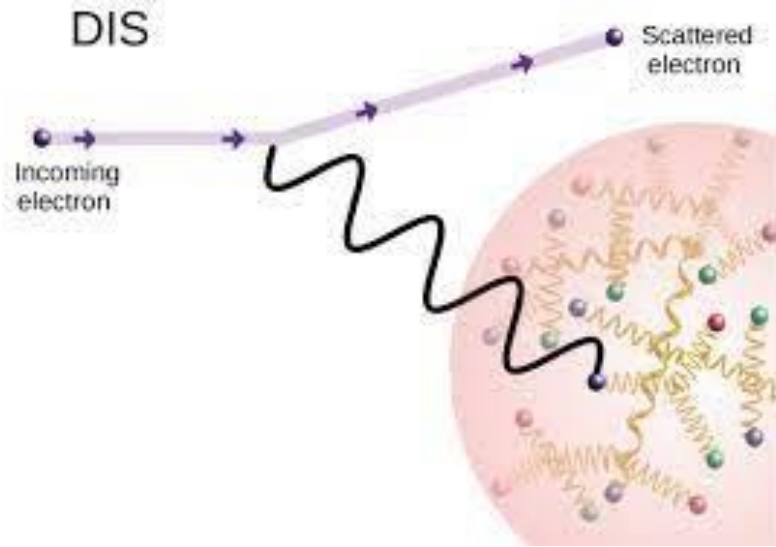
FoCal sommitelma:



Forward Calorimeter

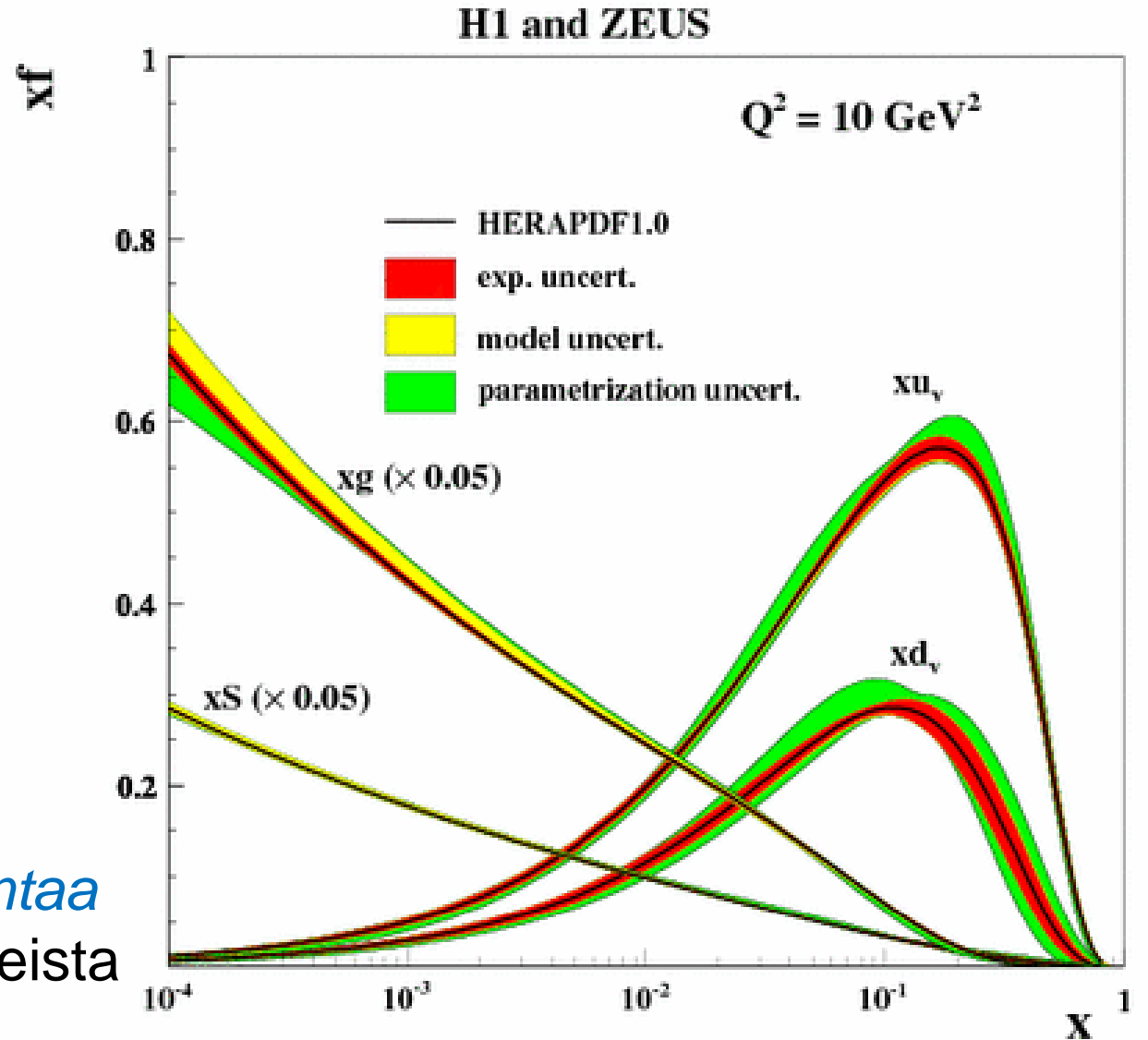


Protonissa on "liikaa gluoneja" → määrän on pakko satureitua. Kuinka havaitaan?

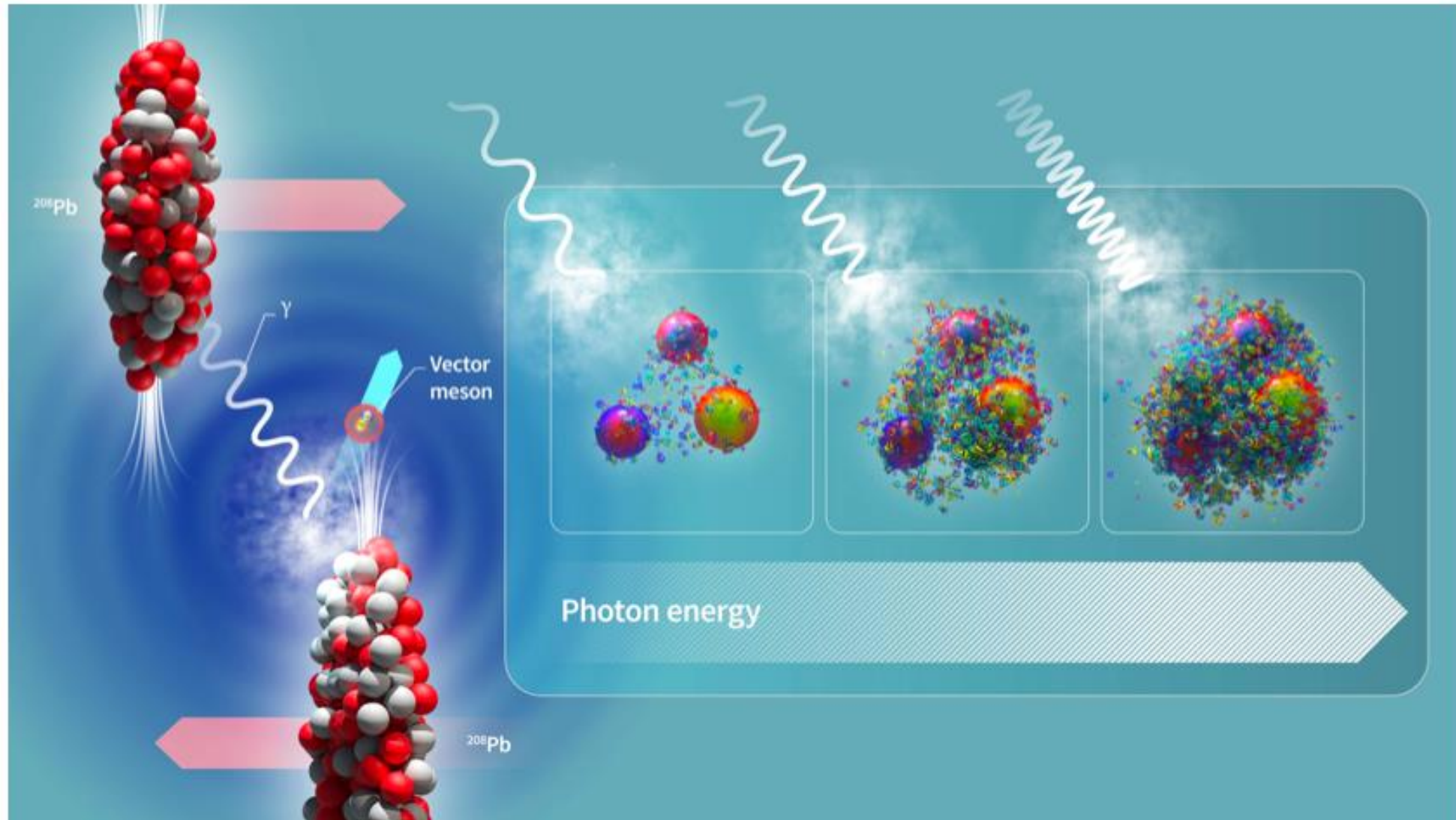


Syvä epäelastinen sironta, DIS
→ gluonien määrä kasvaa pienillä x

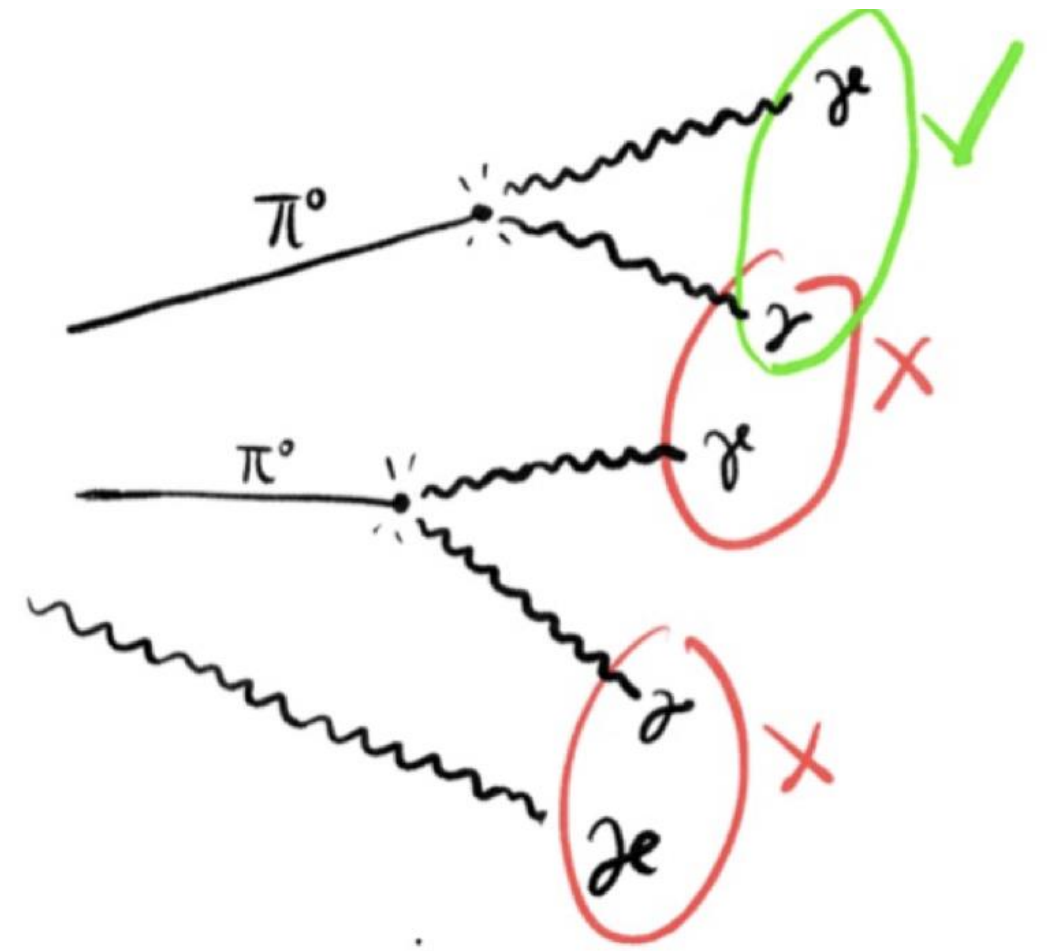
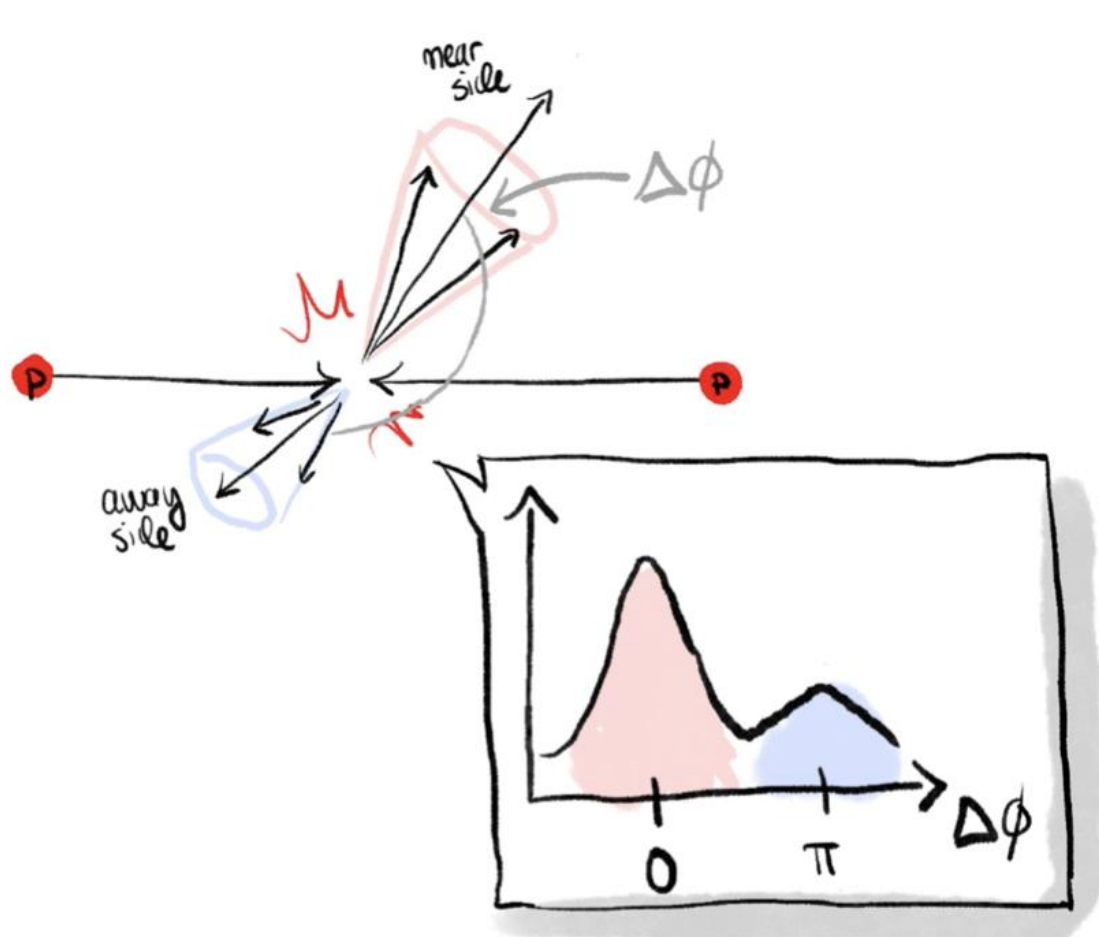
Iso kysymys QCD tutkimuksessa:
Kuinka satureituminen voitaisiin todentaa kokeellisesti? → yksi FoCal:n tavoitteista



Taiteellinen näkemys protonin sisällöstä:

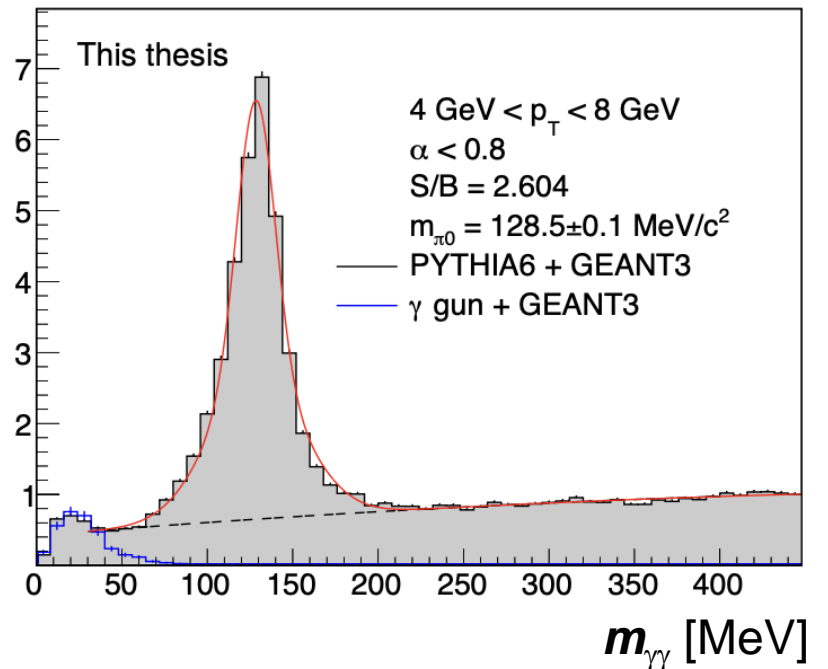
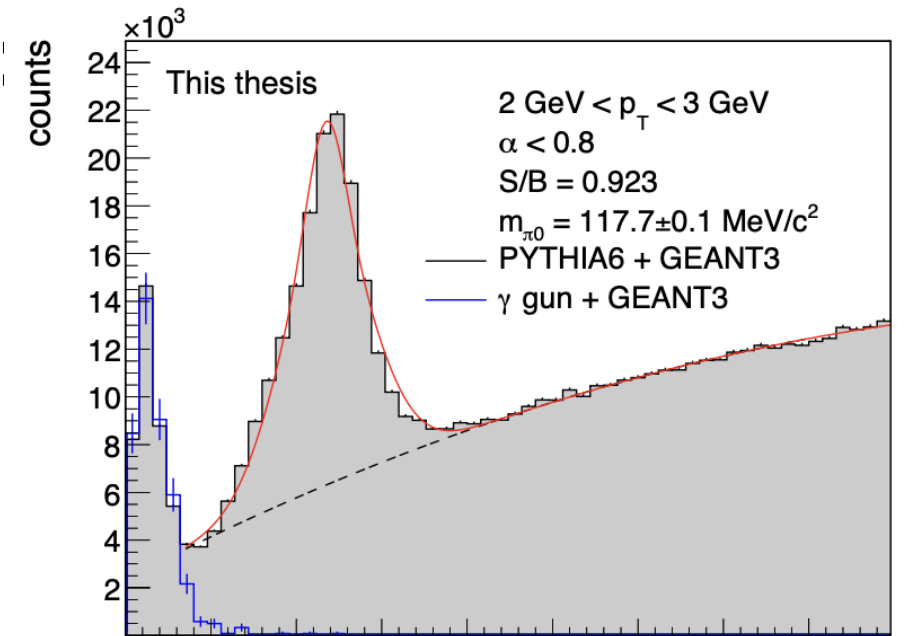
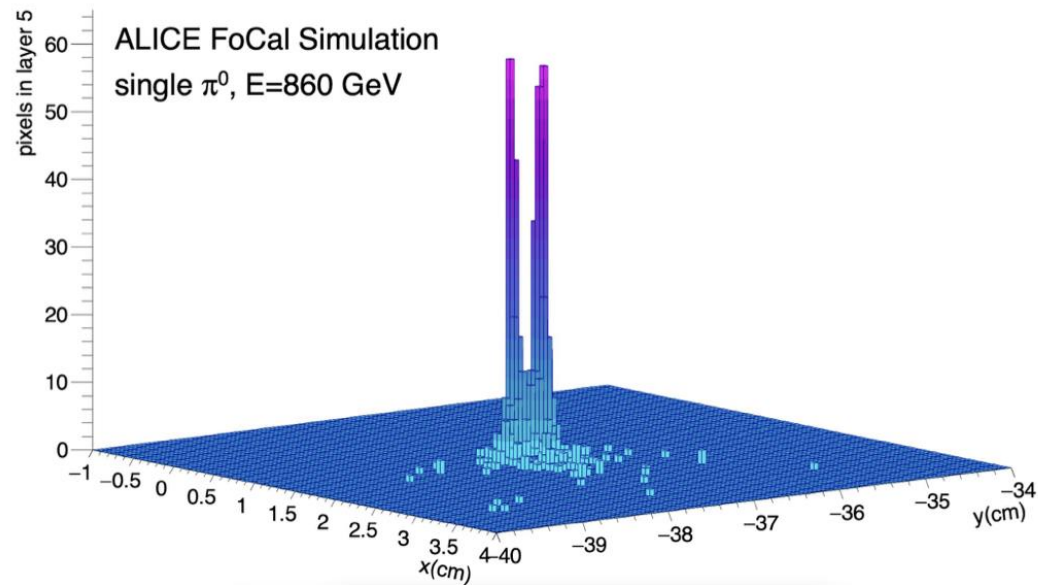
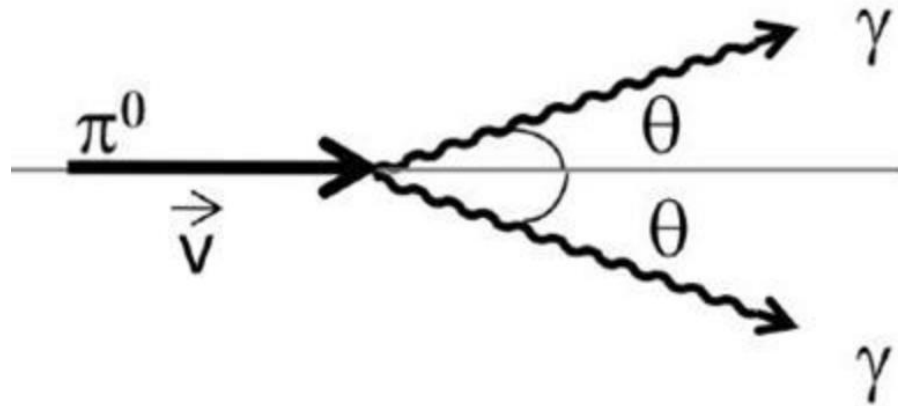


FoCal mahdollistaa neutraalien pionien korrelaatioiden mittaamisen. Ennuste: saturaatio \rightarrow korrelaatiot vaimenevat

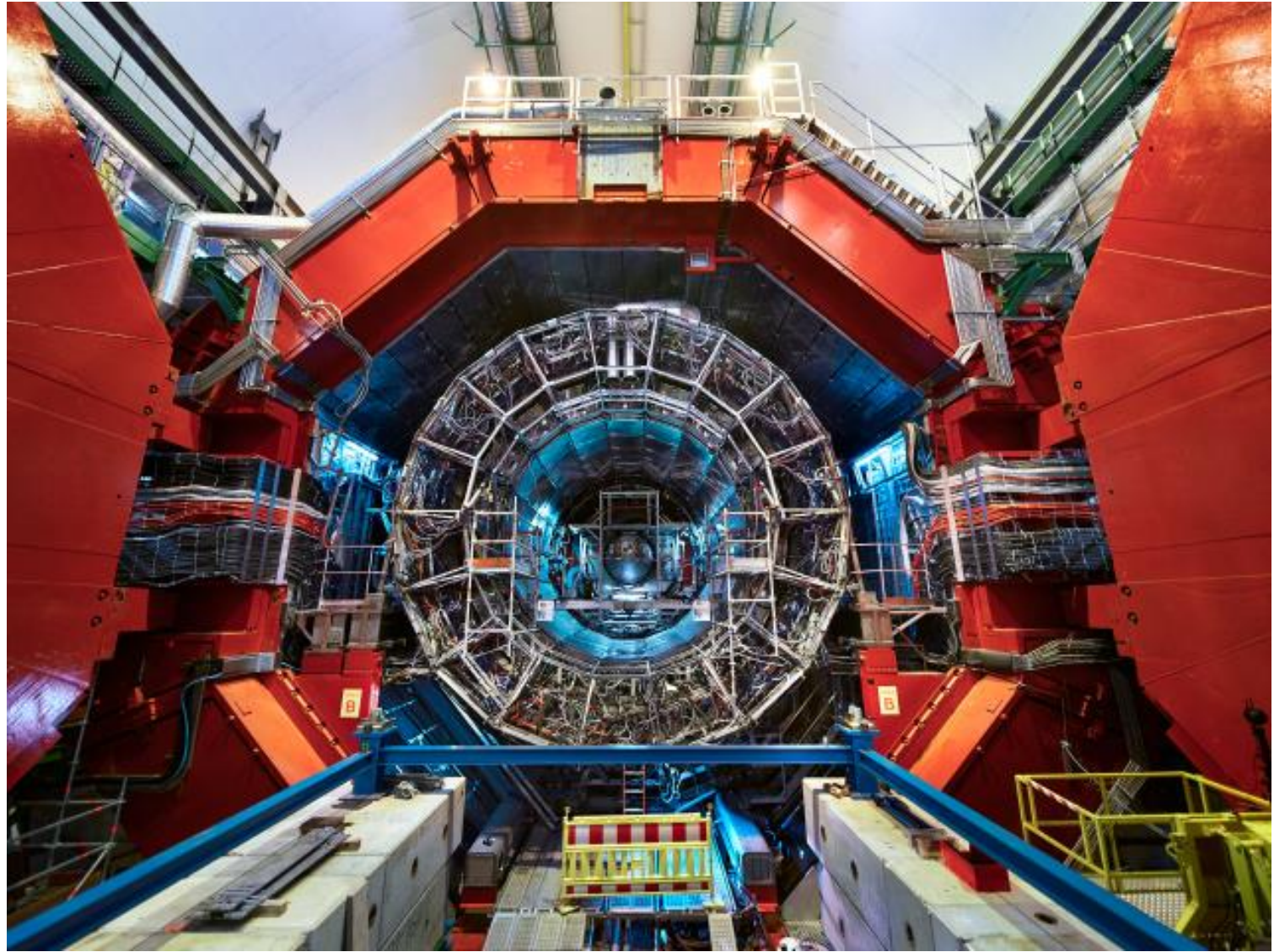


Neutraalien pionien havaitseminen

Täsmälleen sama tekniikka, kuin Higgsin havaitsemisessa!



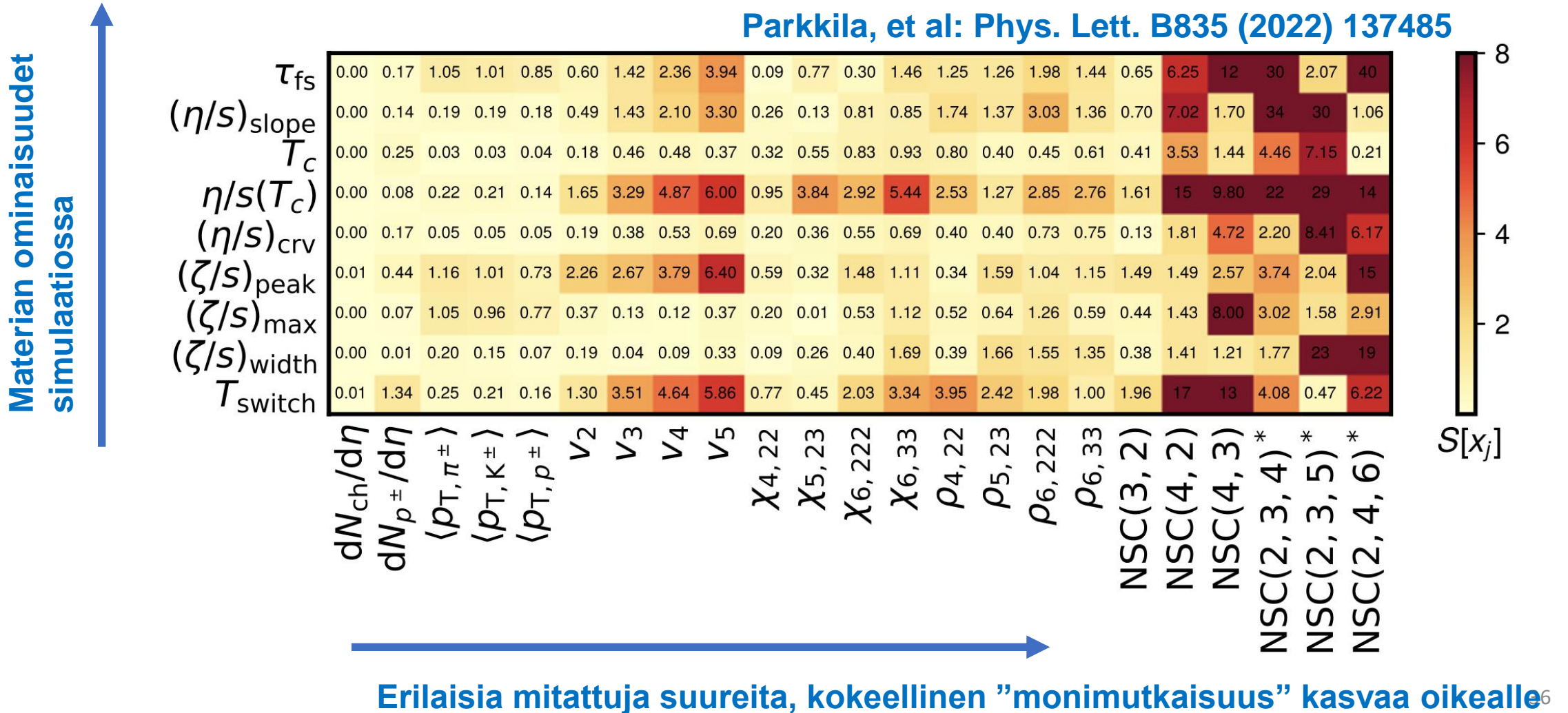
Kiitos!
Kysymyksiä?



BACKUP

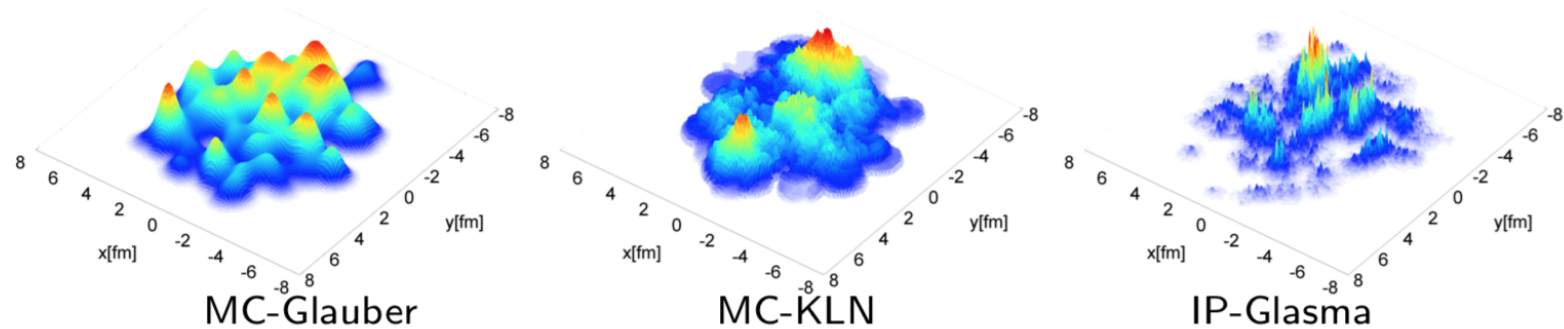
Bayesialainen analyysi kaikkea mitattua dataa vastaan

- Etsitään ideaalisia materiaalien ominaisuuksia "fittaamalla" → herkkyyskartta

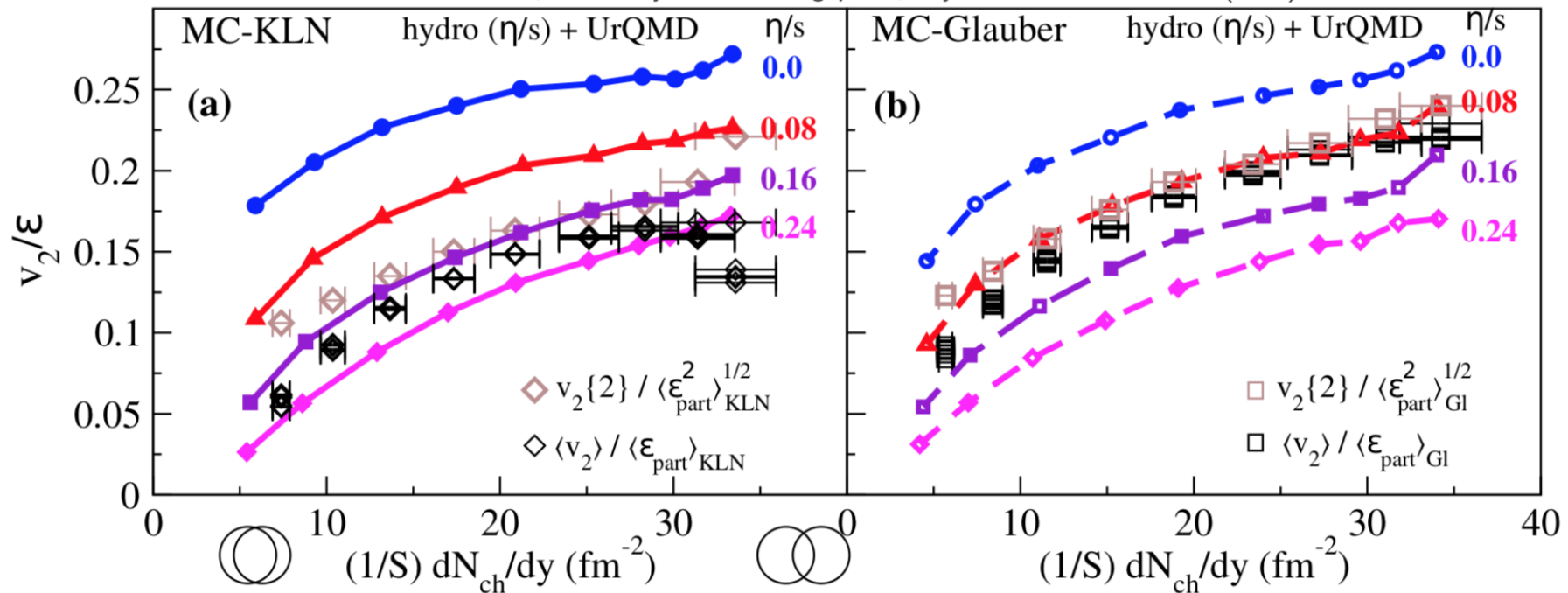


Ongelma: eri alkutilamallit suosivat eri arvoja juoksevuudelle $\frac{\eta}{s}$

→ 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

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

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

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

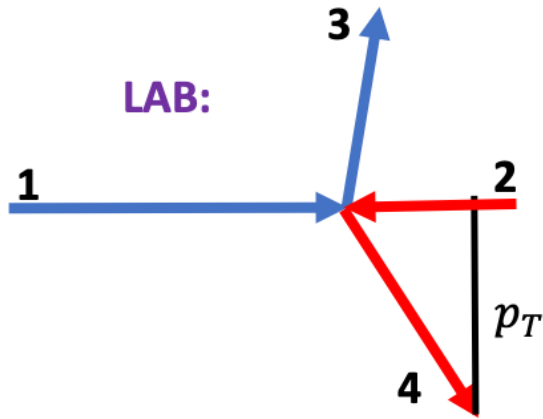
Together gives a lower bound for viscosity to entropy ratio

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

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:

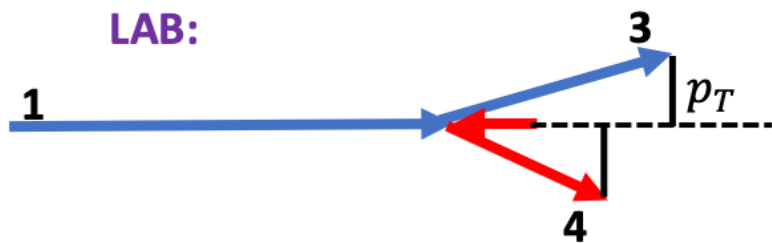


$$x_1 = \frac{p_T}{\sqrt{s}} (e^{\eta_3} + e^{\eta_4})$$

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

~sironakulmat

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



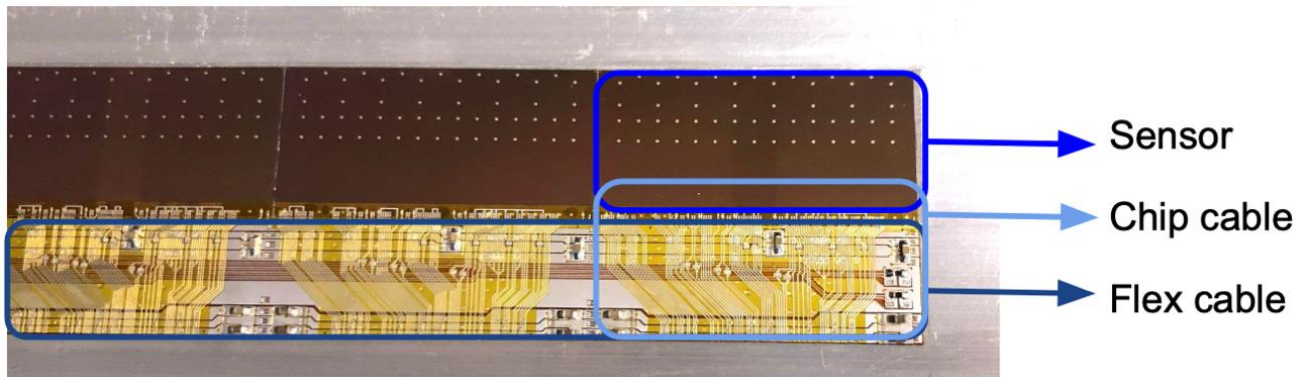
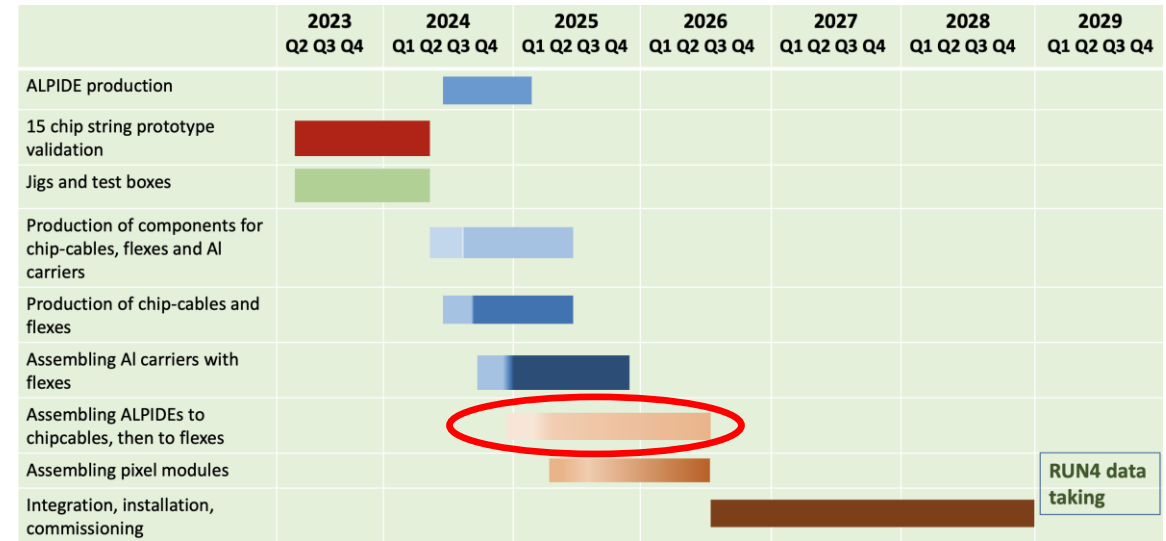
$$x_1 \approx \frac{2p_T}{\sqrt{s}} e^{+\eta} \gg 0$$

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

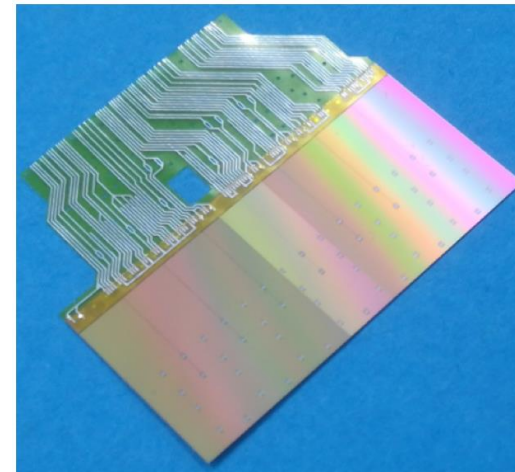
Target: high collision energy, low- p_T and large rapidity.

Finnish contribution to FoCal hardware

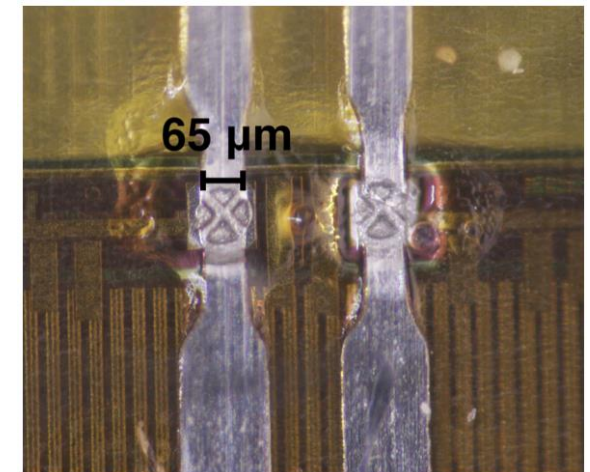
- FiRi 2023: new automatic bonding machine
→ machine operational in fall 2024
- FiRi combined CMS and ALICE pledges
 - wire bonding of CMS tracker elements
 - SpTAB bonding of the FoCal pixel layers
- FoCal production in Helsinki in 2026



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



ALPIDE = ALICE Pixel Detector



SpTAB bond