



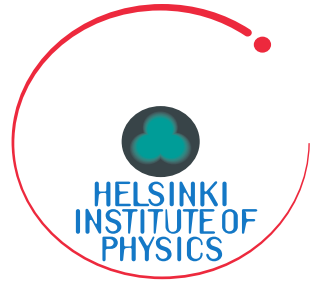
Centre of Excellence
in Quark Matter



ALICE



UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ



HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS

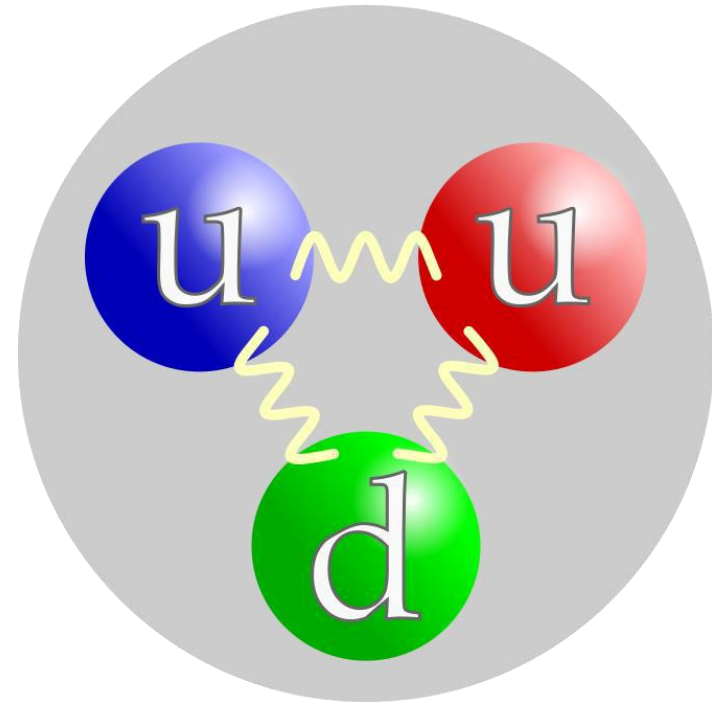
ALICE -luento

Maxim Virta

Finnish Teacher Programme
CERN, 4.6.2024

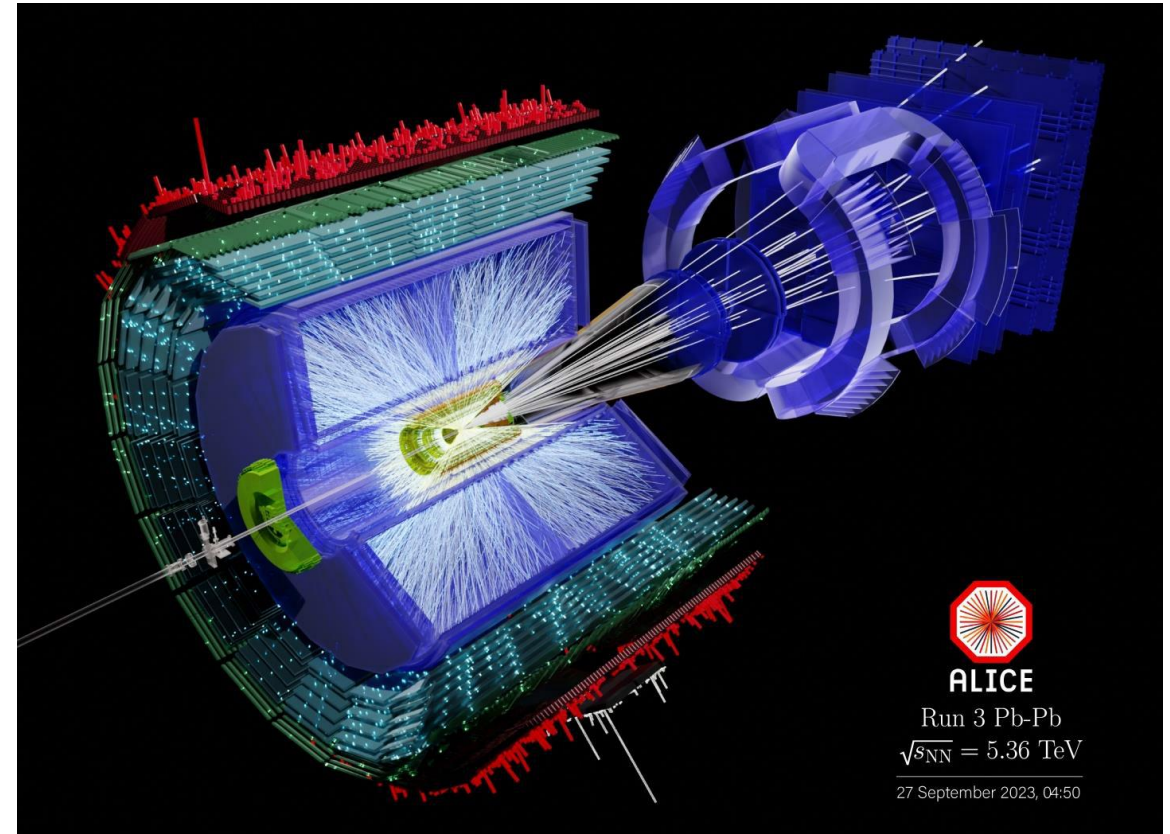
Sisältö

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

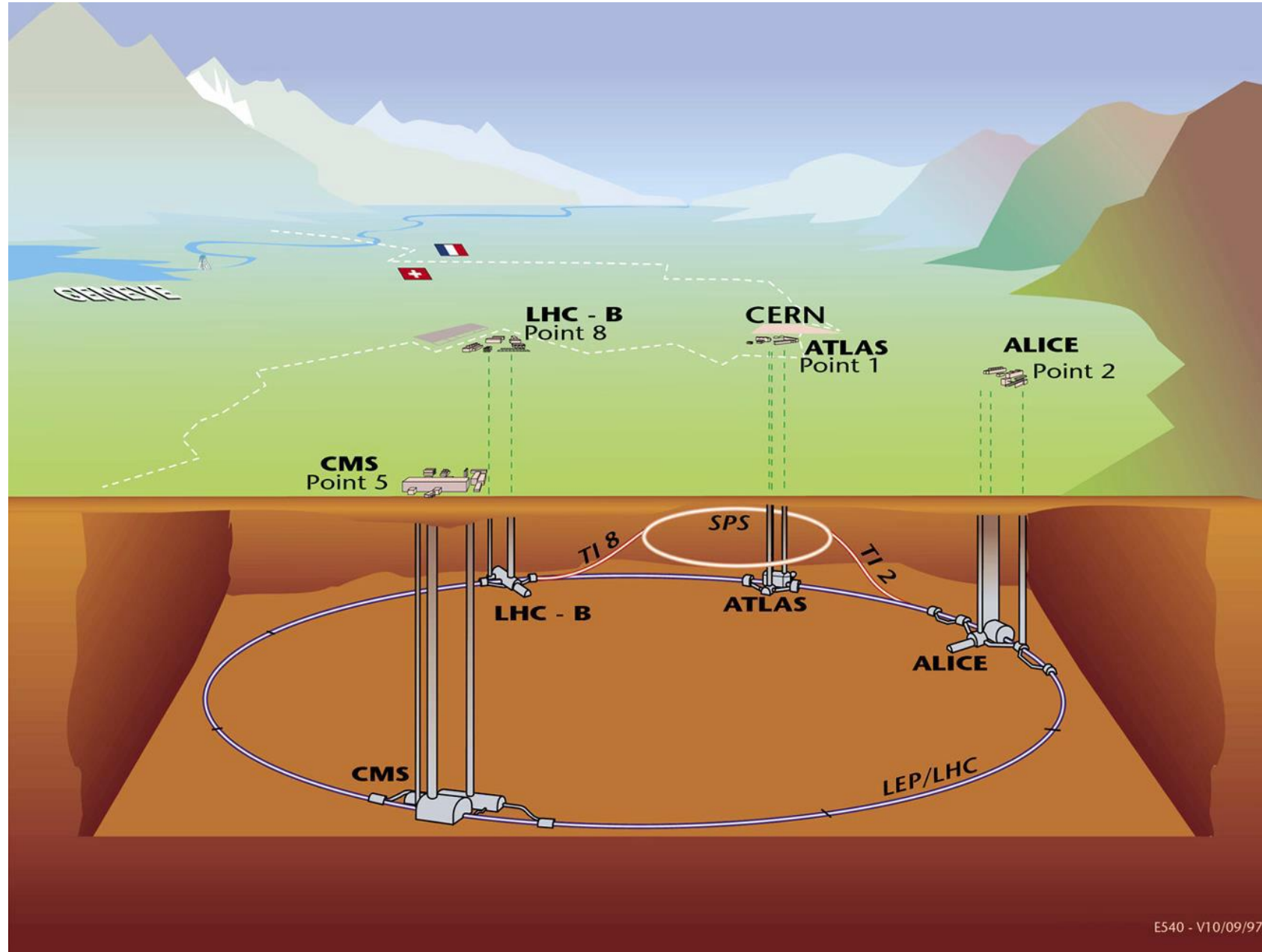


A Large Ion Collider Experiment

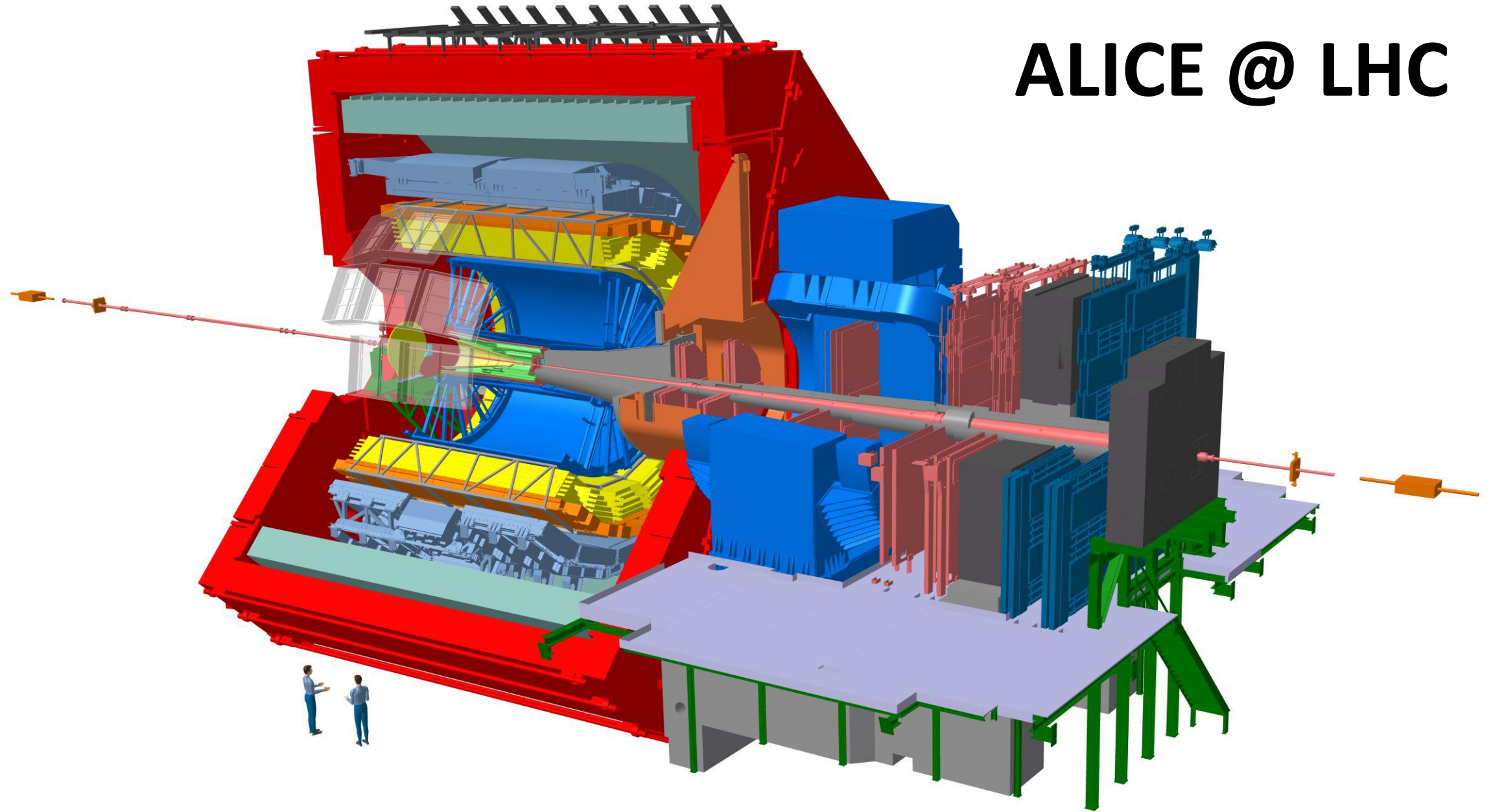
- ★ Keskittyy tutkimaan:
- ★ PbPb törmäykset
- ★ pp törmäykset
- ★ kvarkki-gluoniplasma (QGP)
- ★ suurenergiset hiukkassuihkut (jet)



LHC = Large Hadron Collider @ CERN



ALICE @ LHC





40 maata, 170 instituuttia, 1971 jäsentä



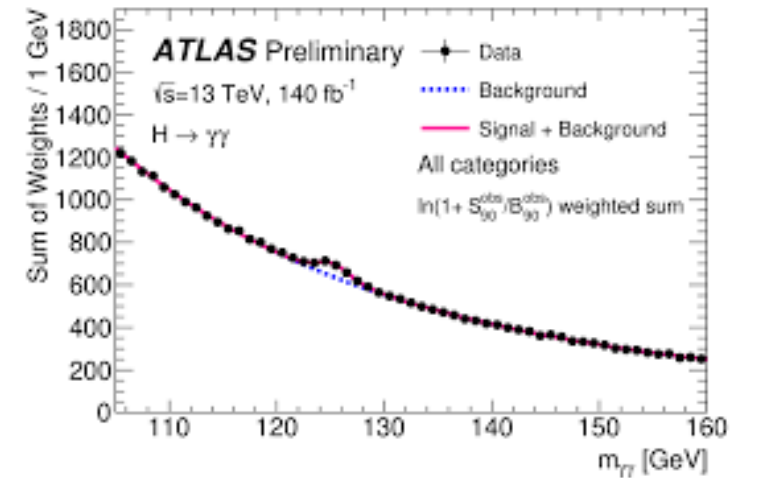
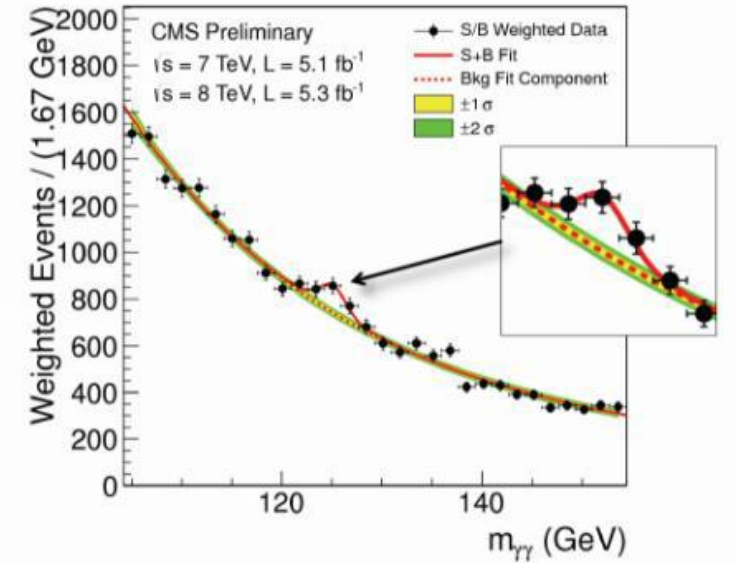
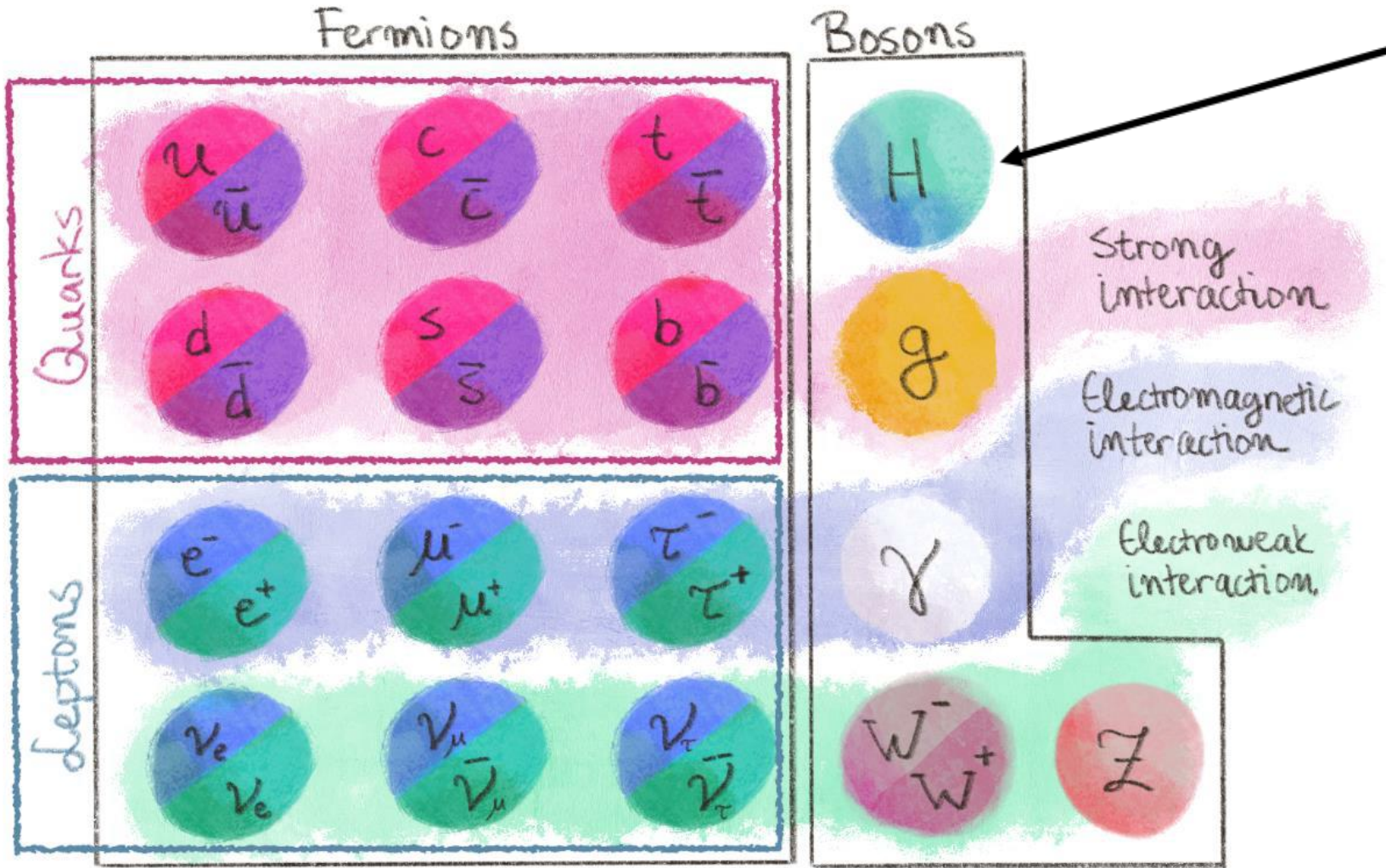
PhD celebration, 27.6.2023



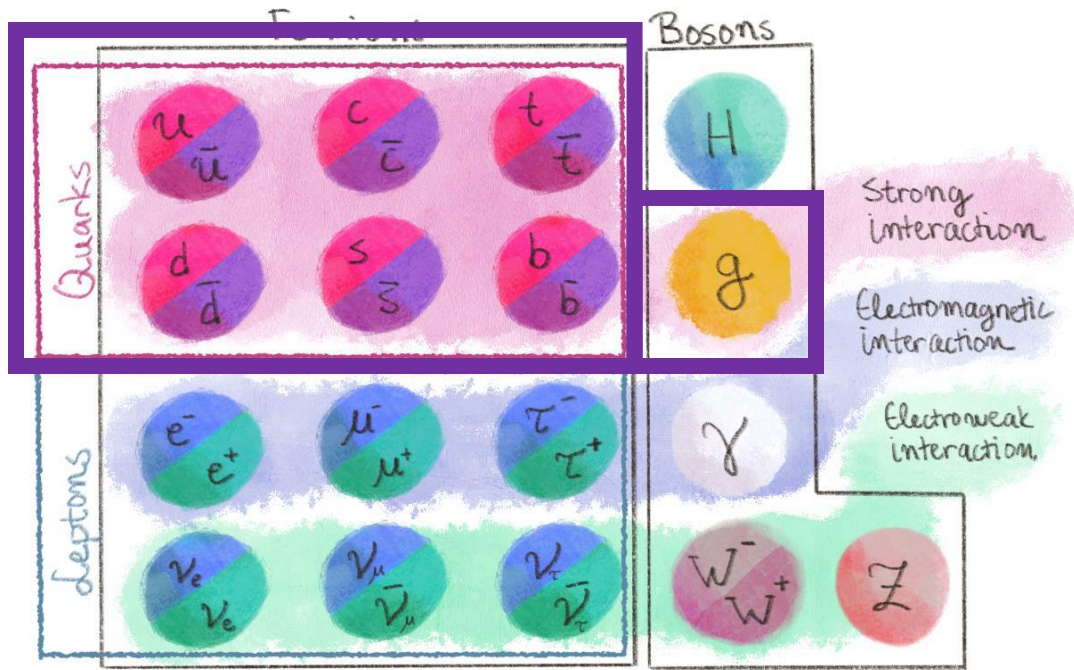
Jyväskylän ALICE:

- 3 senioria
- 3 post docia
- 4 väitöskirjatutkijaa

Standardimallin alkeishiukkaset:



2012, LHC



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:

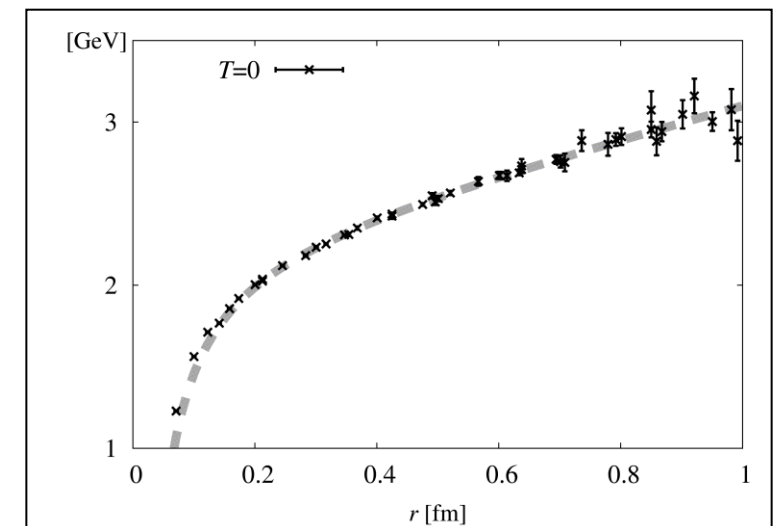
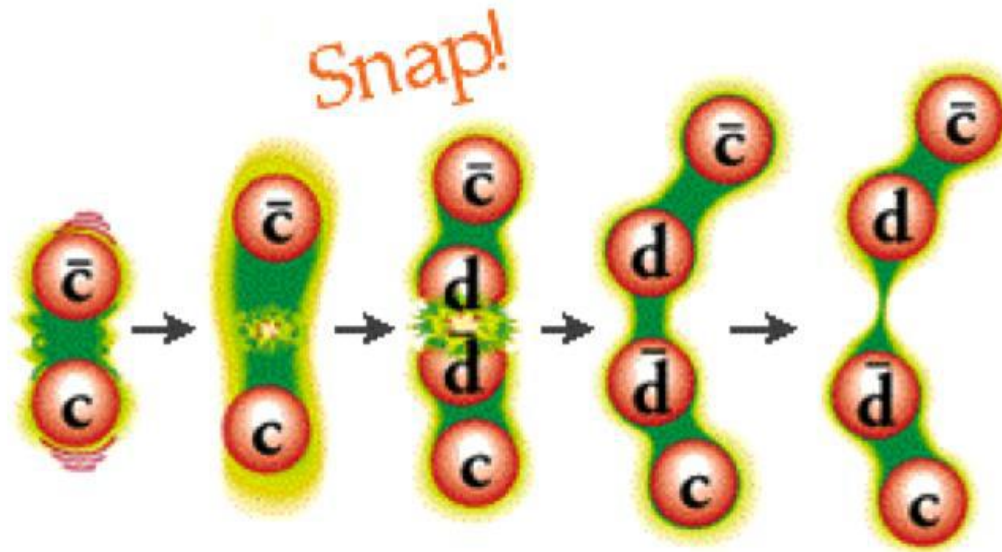
Hadronit = **baryonit** + **mesonit**, tunnetaan yli 300 kpl

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

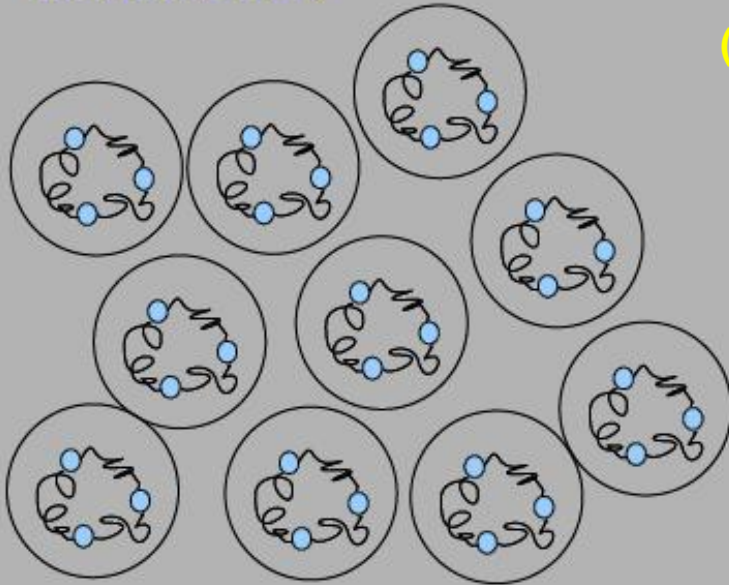
$$p = (uud), \quad n = (udd), \quad \Delta^{++} = (uuu), \quad \Lambda = (uds), \quad \Omega = (sss), \dots$$

Mesonit = kvarkin ja anti-kvarkin sidottuja tiloja, esimerkiksi: $\pi^- = (\bar{u}d)$, $\pi^+ = (u\bar{d})$, $K^- = (s\bar{u})$, $D^- = (c\bar{d})$, $D^0 = (c\bar{u})$, $J/\psi = (c\bar{c})$

Kahliutuminen
skemaattisesti:

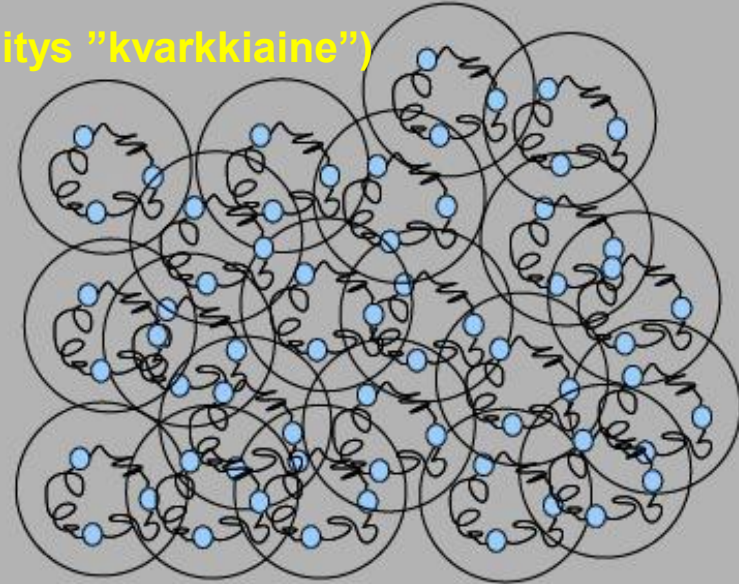


hadronikaasu



(Toisinaan nimitys "kvarkkivaine")

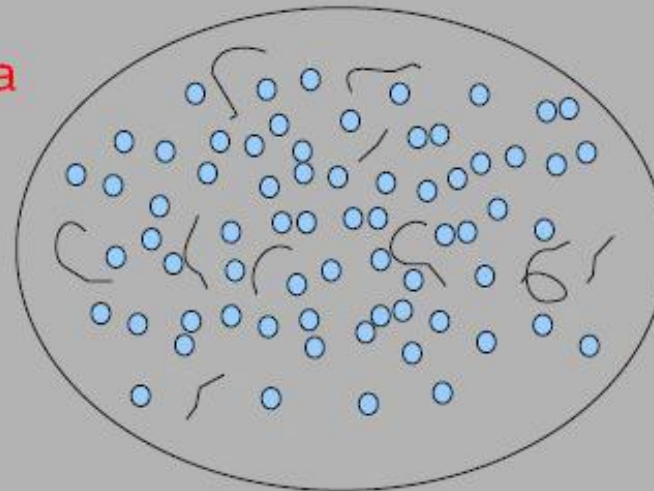
Puristus



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

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

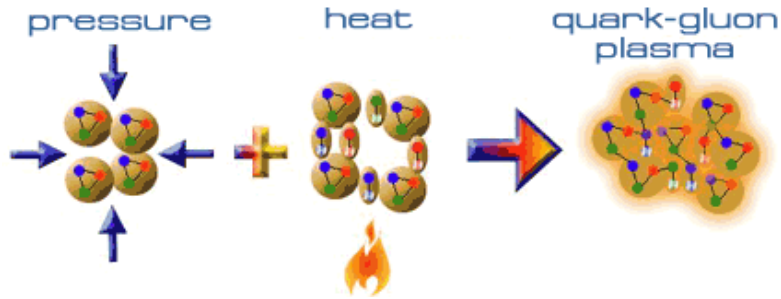
kvarkki-gluoniplasma



**Nukleonit eivät ole
"kovakuorisia biljardipalloja"**

Kvarkki-gluoniplasma = aineen 5. olomuoto

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



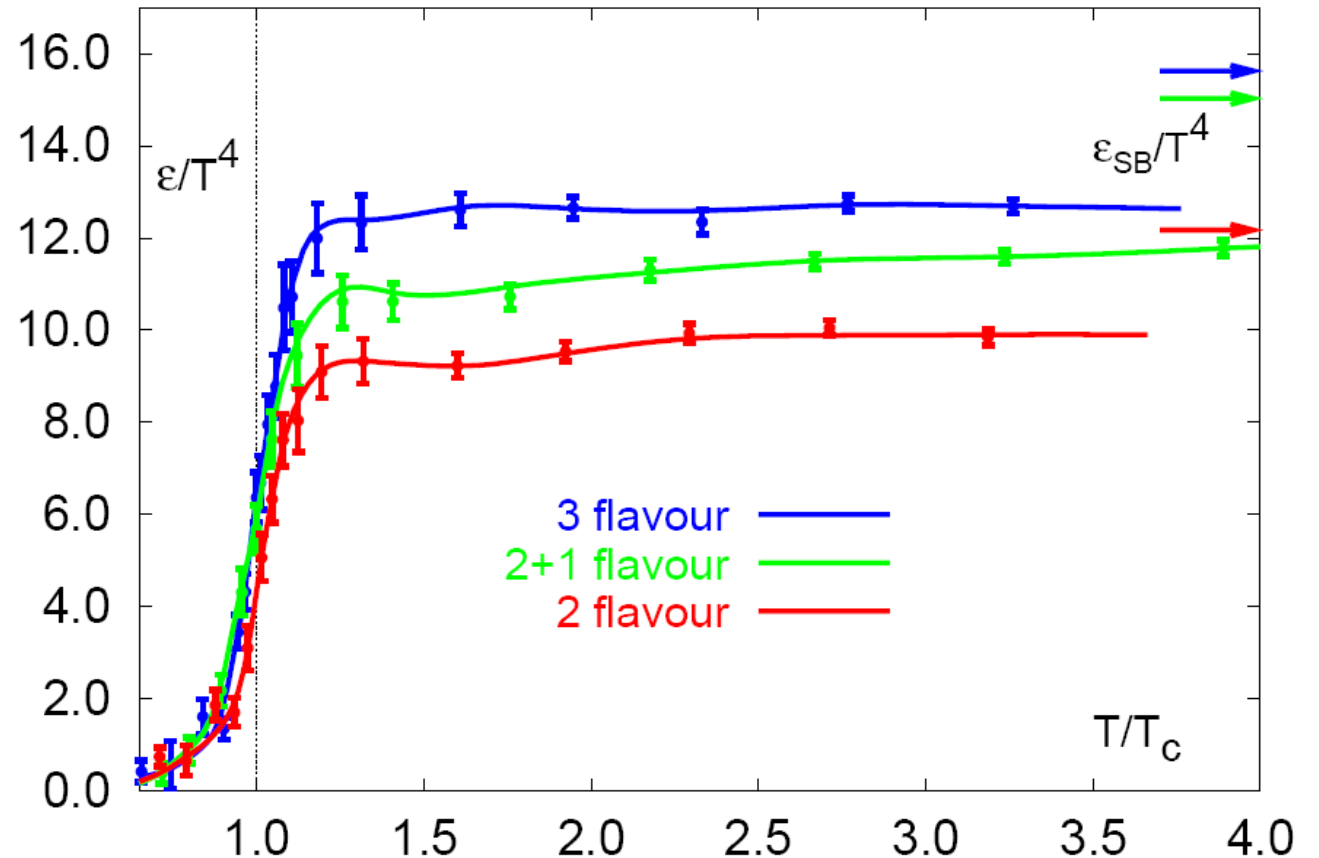
Relativistinen massattomien hiukkasten
ideaalikaasun energiatiheys

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

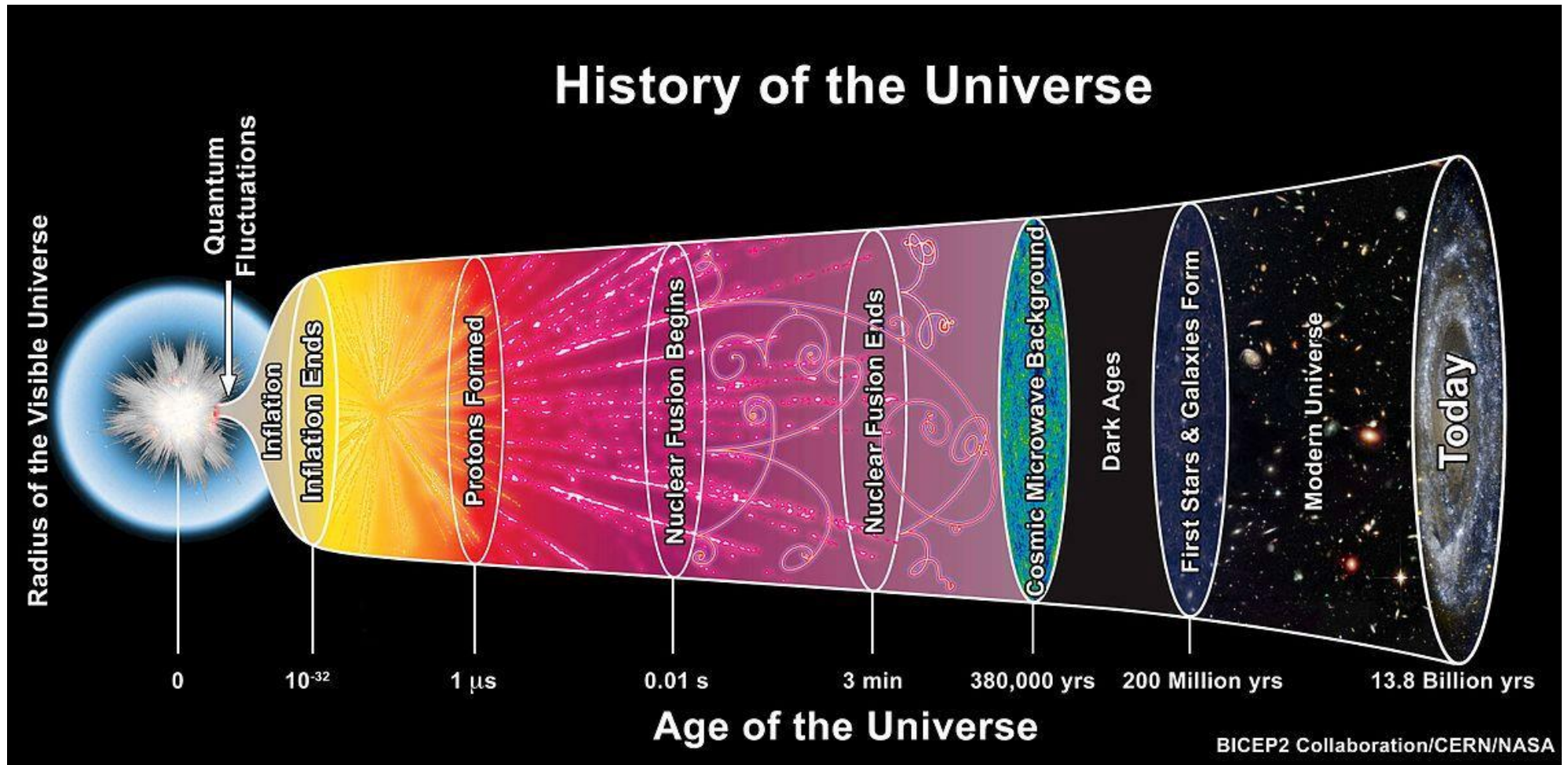
Paine

$$P = \epsilon/3$$

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

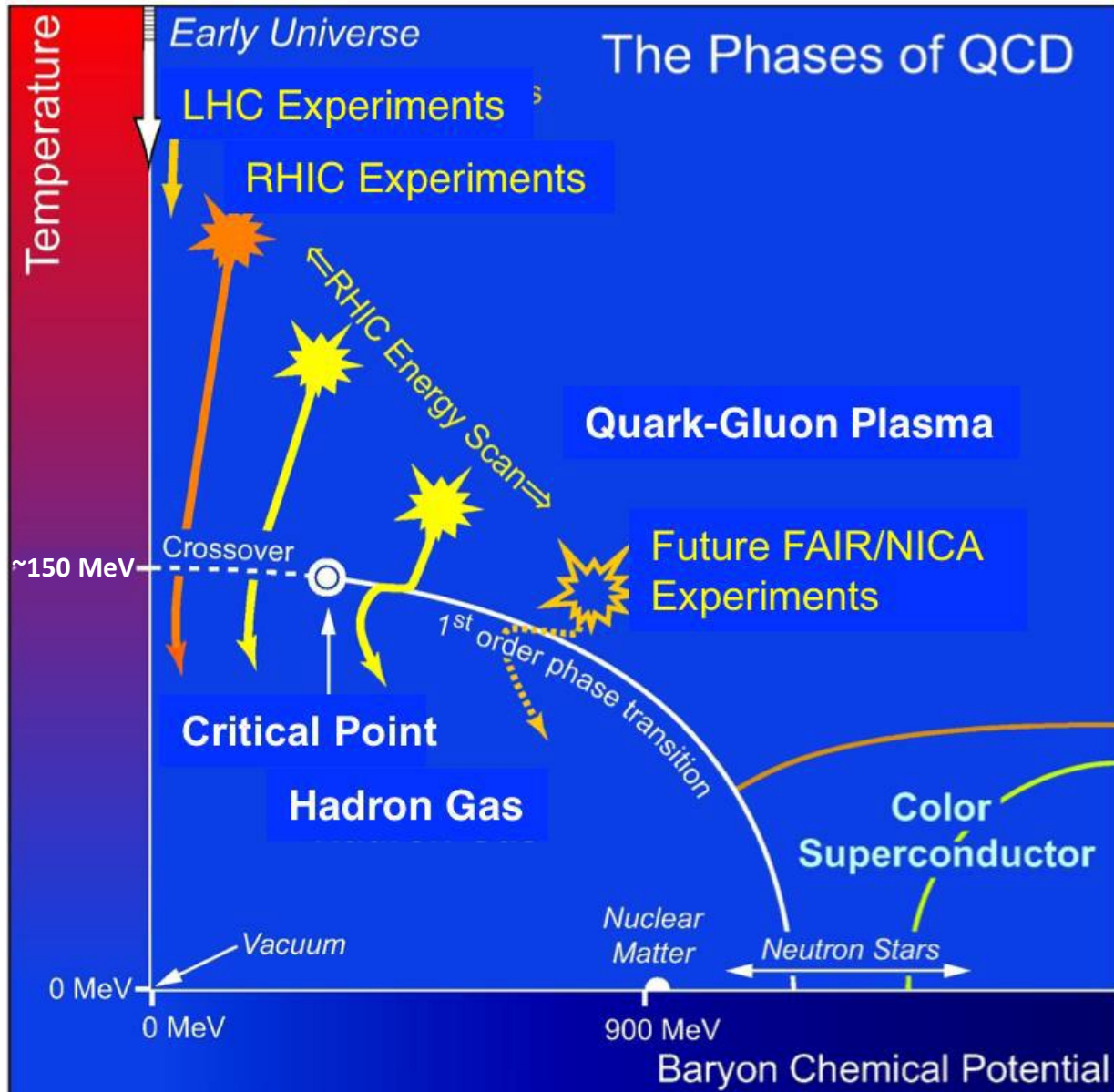


Raskasionitörmäytysten motivaatio



 QCD faasitransitio

Raskasionitörmäytysten motivaatio

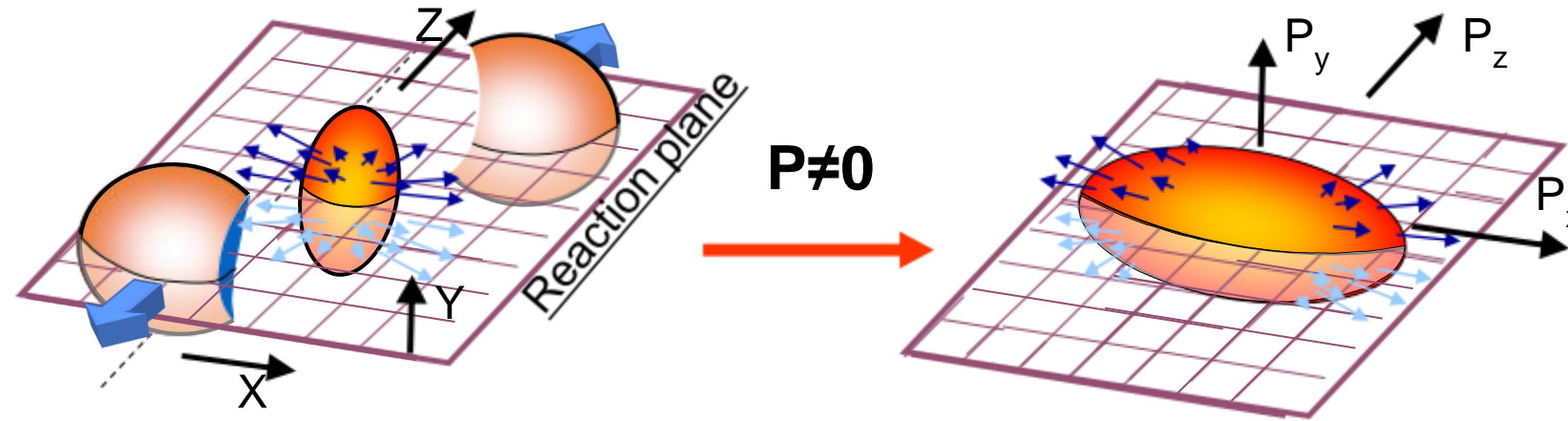


QGP – suurusluokat:

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

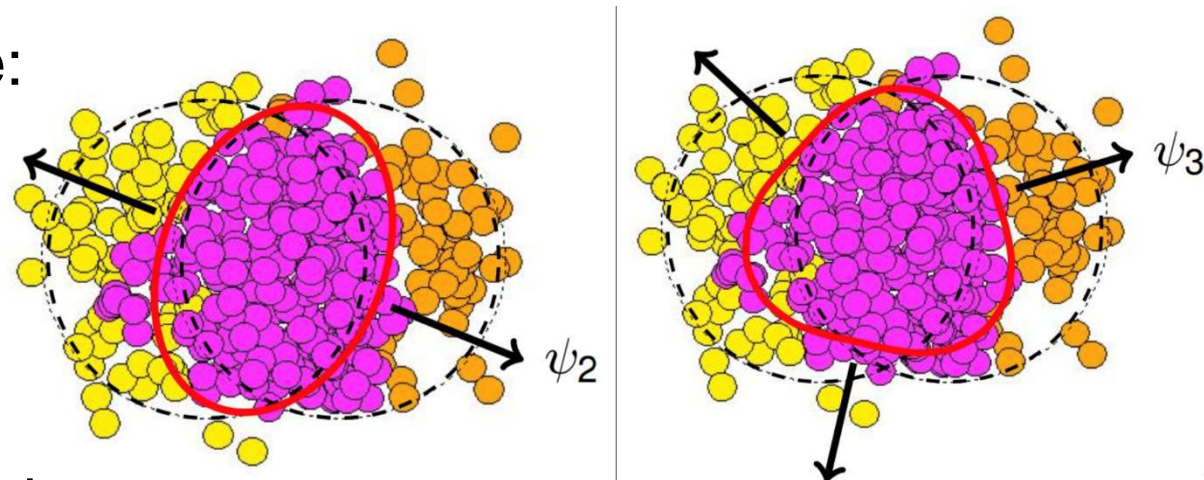
Miten tätä voidaan tutkia/havaita?

Kollektiivinen elliptinen virtaus törmäyksessä:



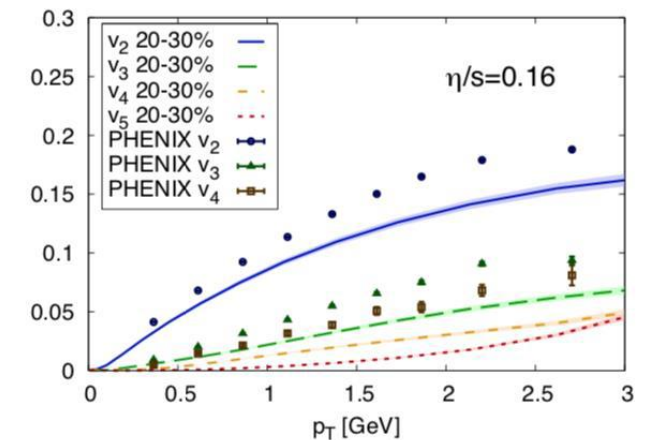
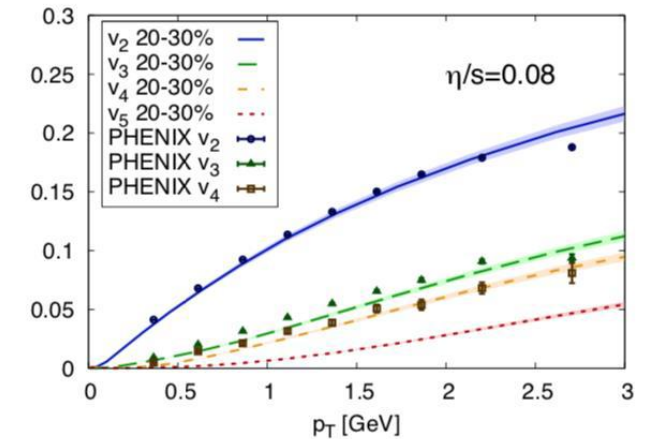
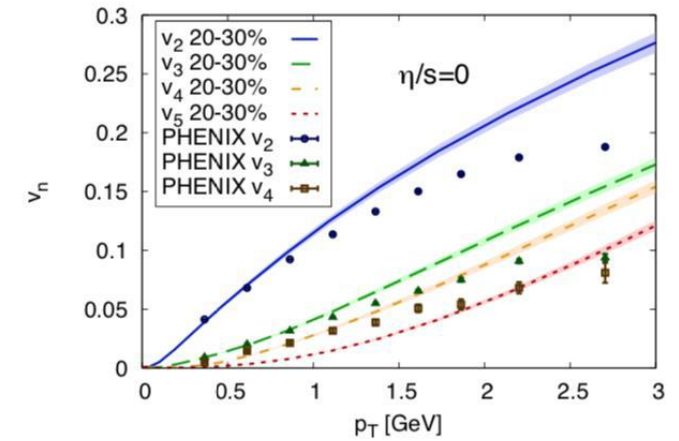
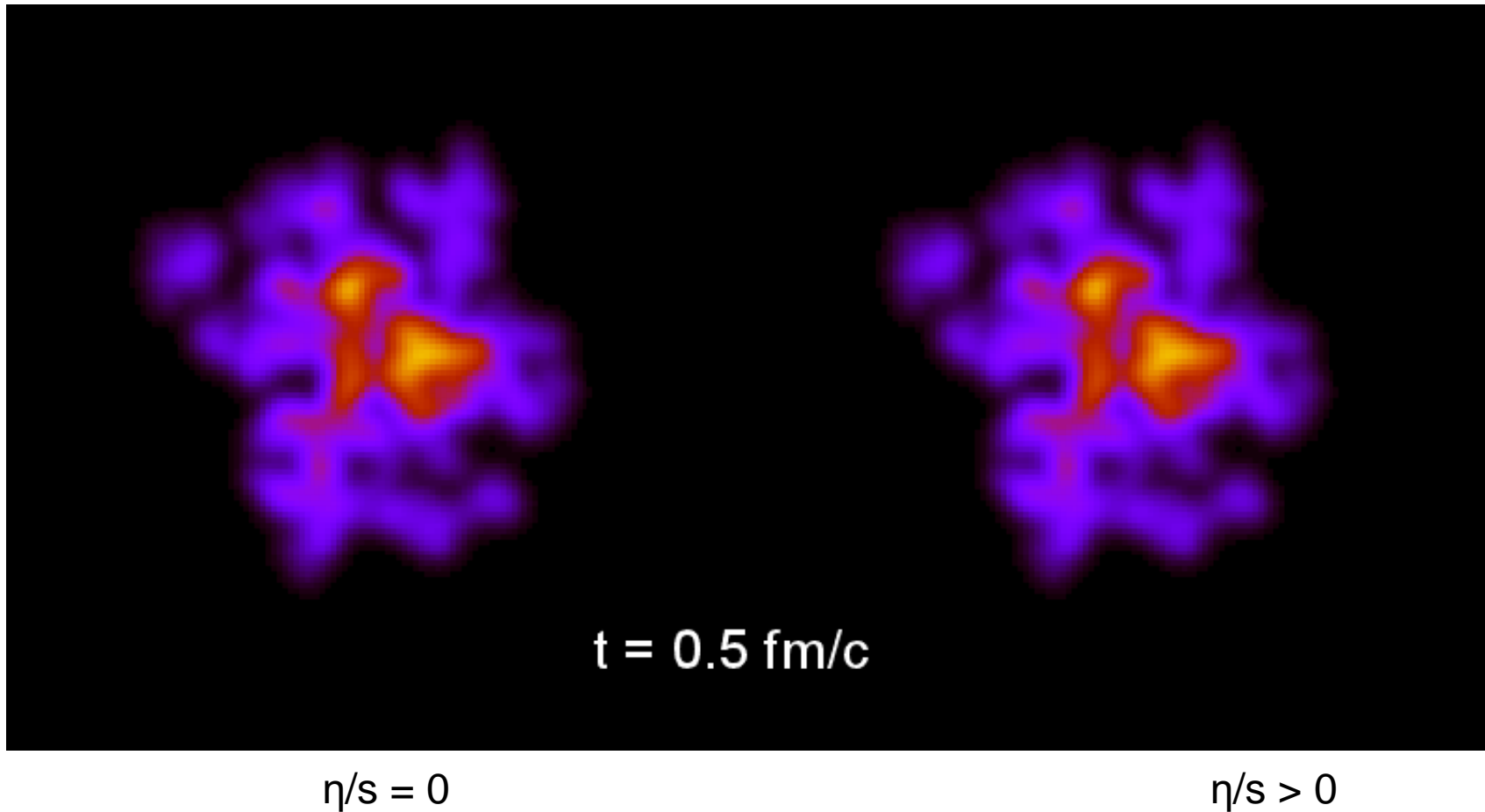
Fourier analyysi lopputilan hiukkasjakaumille:

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



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

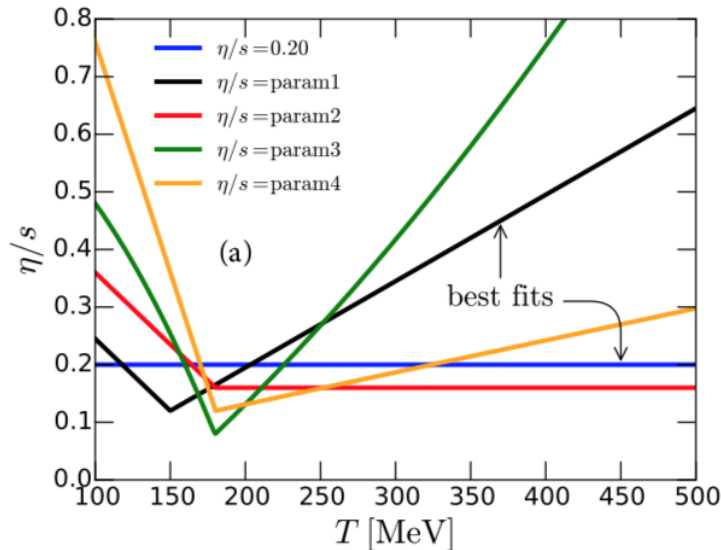
Korkeamman kertaluokan suureet ja korrelaatiot

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

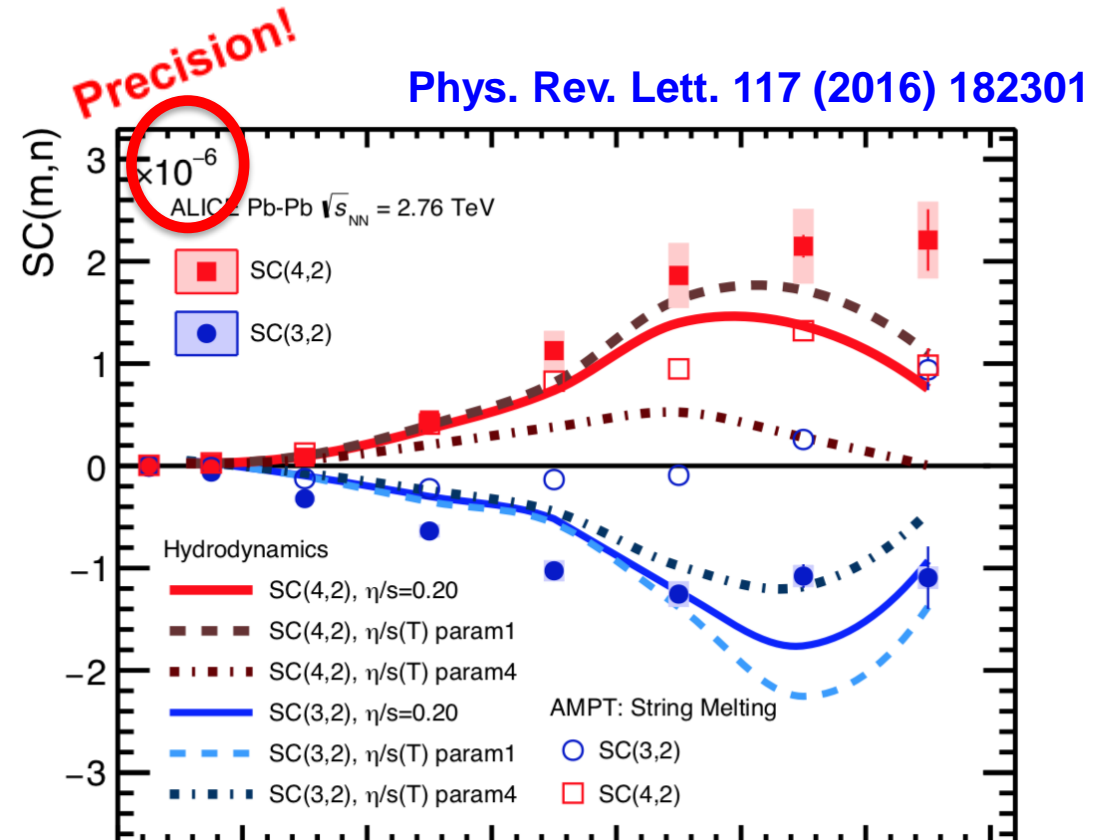
Symmetric cumulants:

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

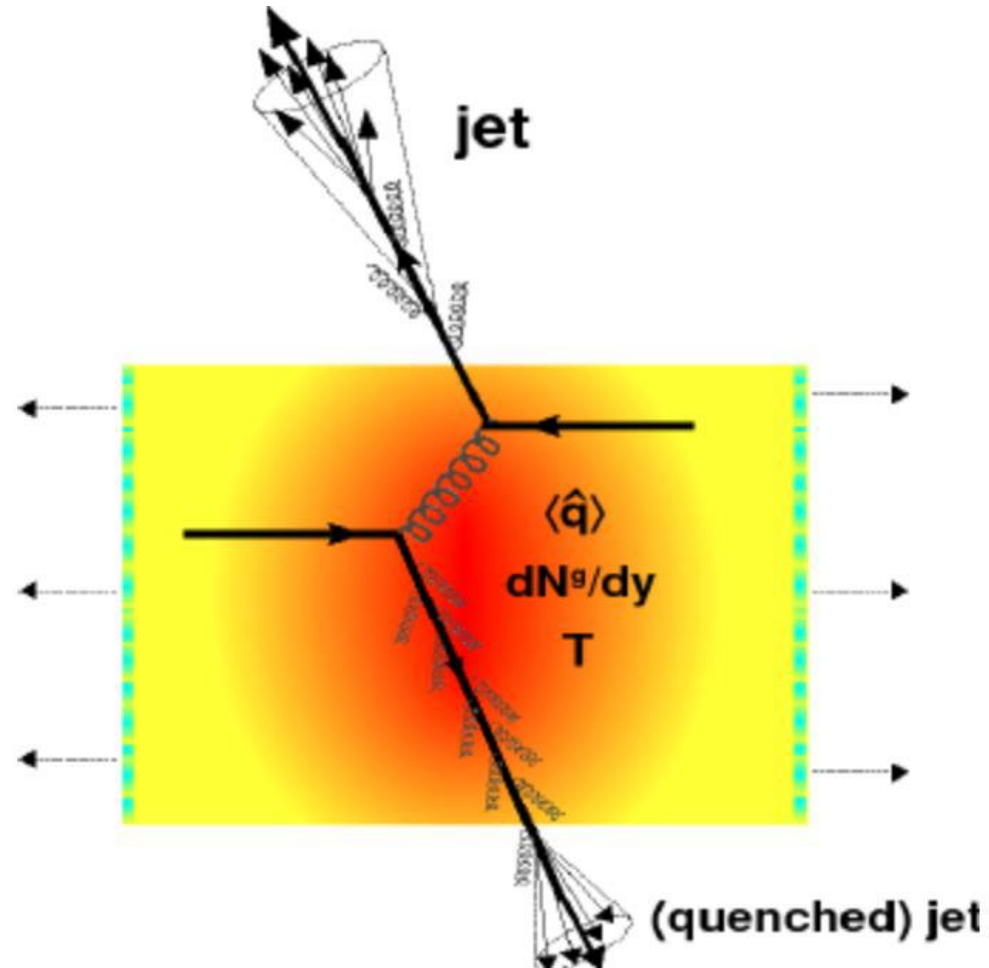
Hydrodynamiiikan simulaatiot:



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



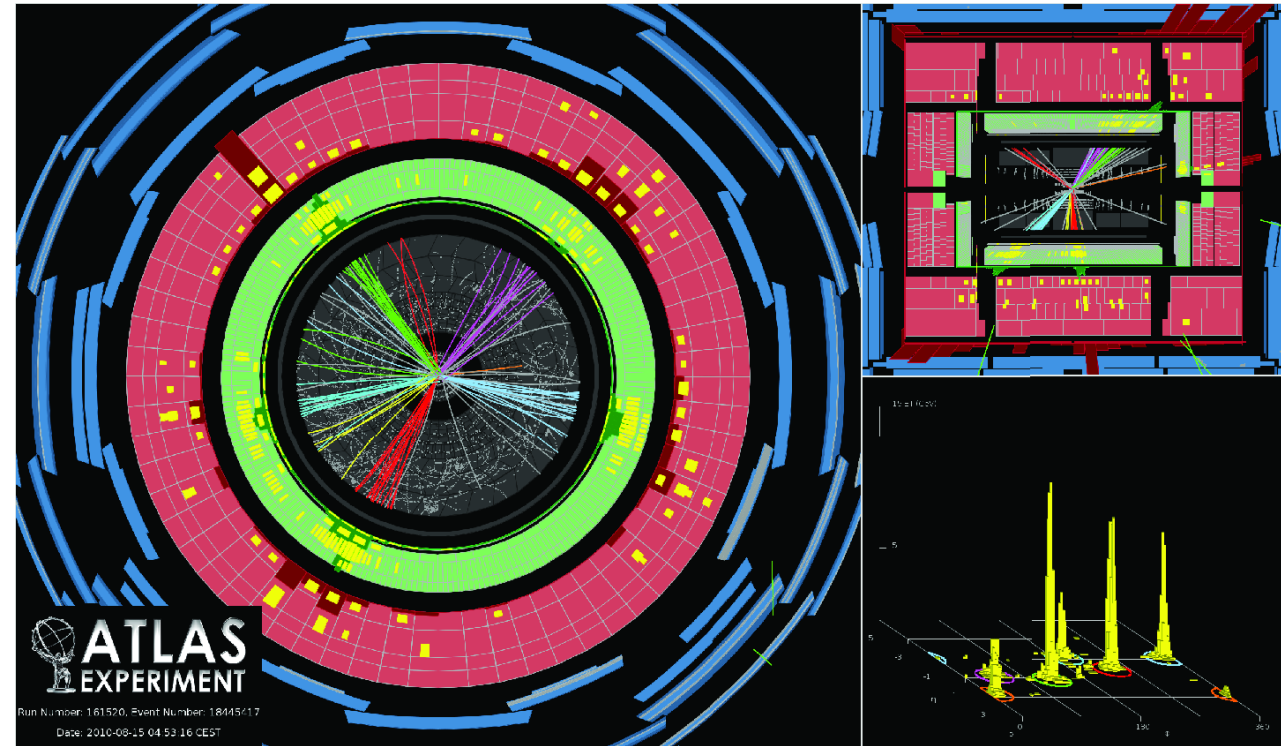
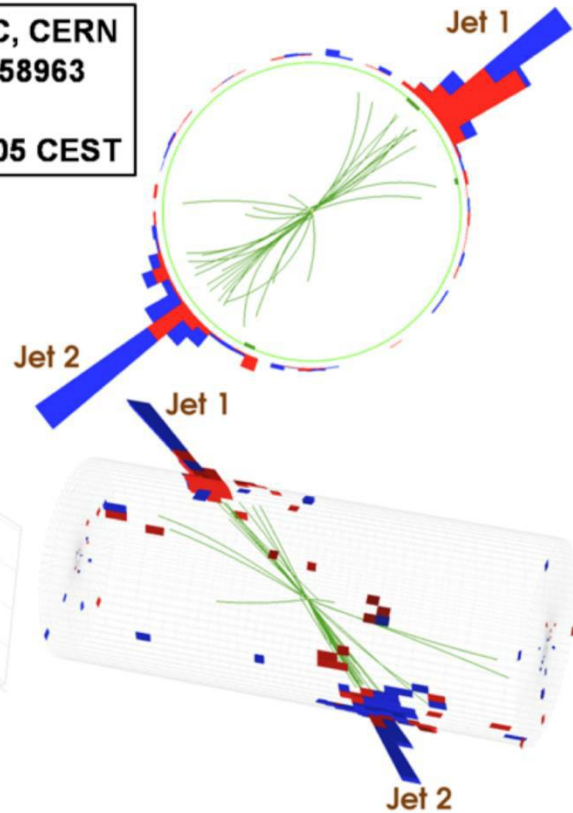
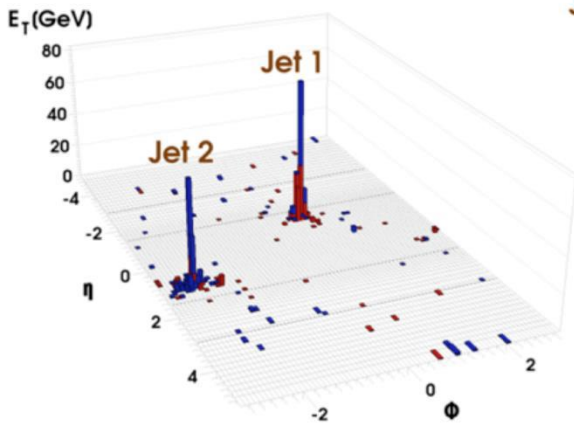
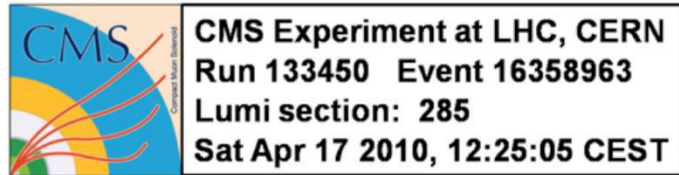
Jettien energiahäviöt aineessa – QGP:n tomografiaa:



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”

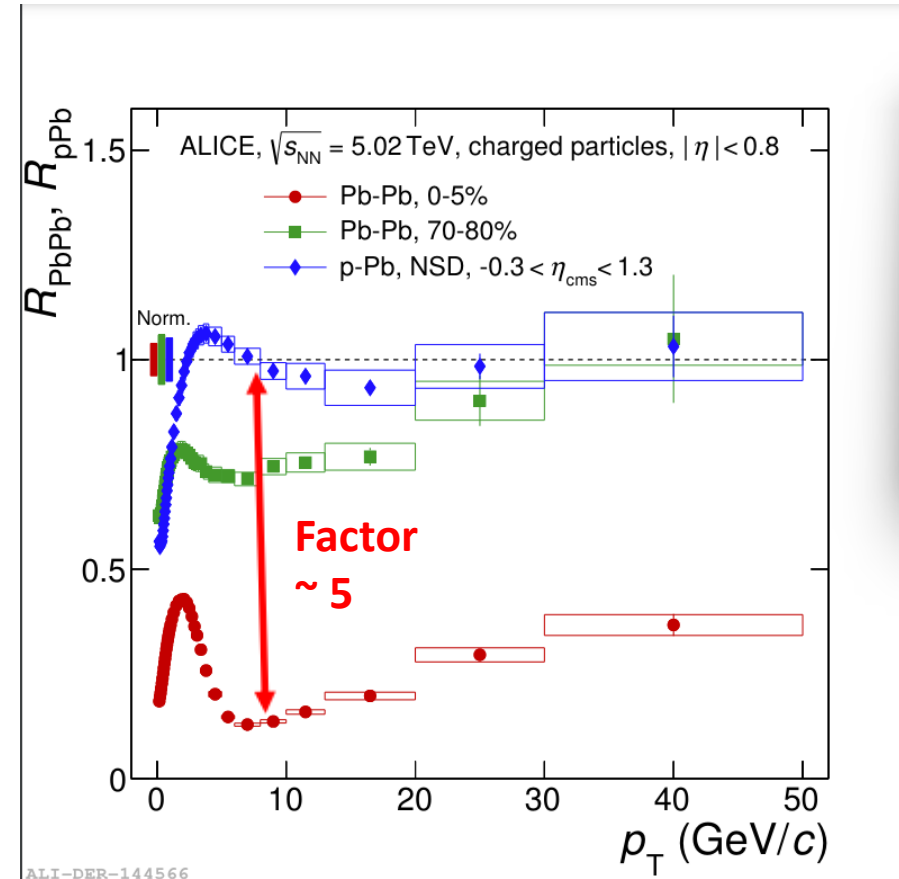


Ydinmodifikaatiokerroin, R_{AA}

Ei ytimien vaikutusta

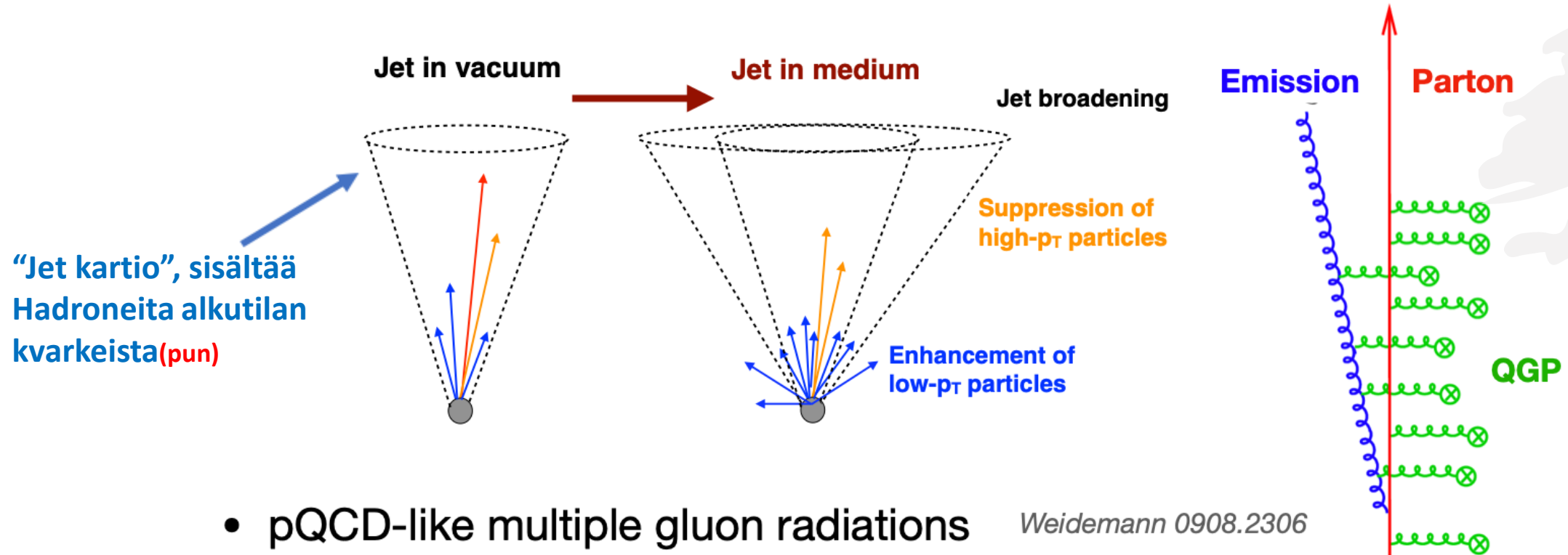


- Mikäli $R_{AA} = 1$, niin AA –törmäys vastaa yhtä monta pp –törmäystä
- Nähdään ettei pidä paikkansa, korkeen liikemäärän hadronit tukahtunut
□ energiahäviöitä väliaineessa



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

Mechanisms of energy loss



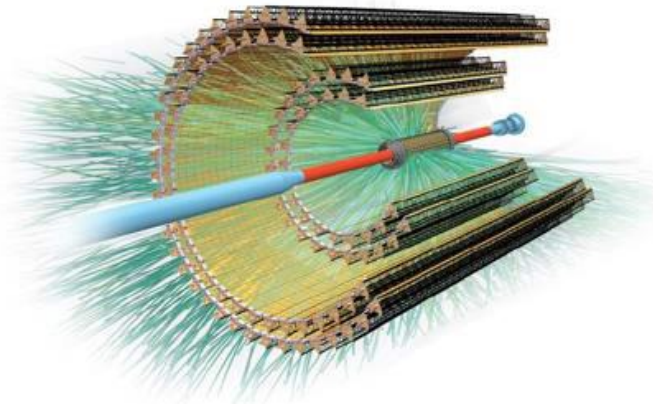
- pQCD-like multiple gluon radiations *Weidemann 0908.2306*
- medium induced scatterings (inelastic), *Zapp et al. JHEP 03 (2013) 080*
- AdS/CFT energy loss, *Liu et al. Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 182301*
- color coherence/decoherence, *Solano et al. JHEP 10 (2014) 019*
- modified partonic splitting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

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

Credit!

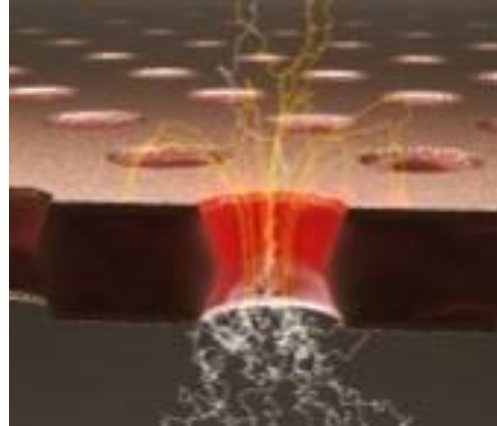
Millä tutkitaan?

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



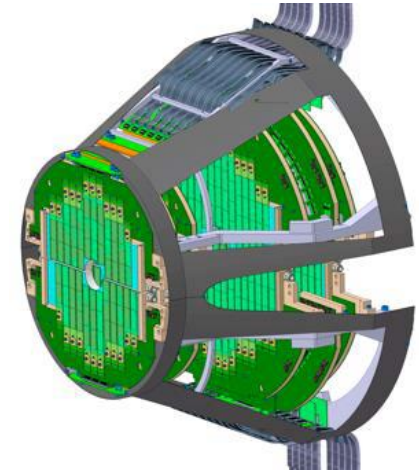
Uusi ITS3

- nopeampi
- vähemmän materiaalia
- parempi resoluutio



Uusi TPC readout:

- wire chambers \square GEM's
- mahdollistaa PbPb @ 50 kHz

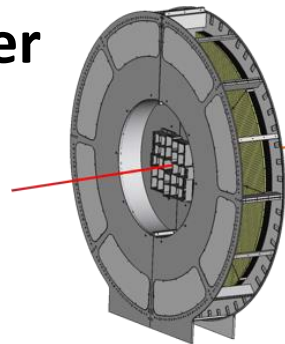


Lisätty MFT

- parempi muon seuranta
- kakkosverteksit @ forward

Fast Interaction Trigger

- keskeisyys
- online luminosity
- törmäysaika

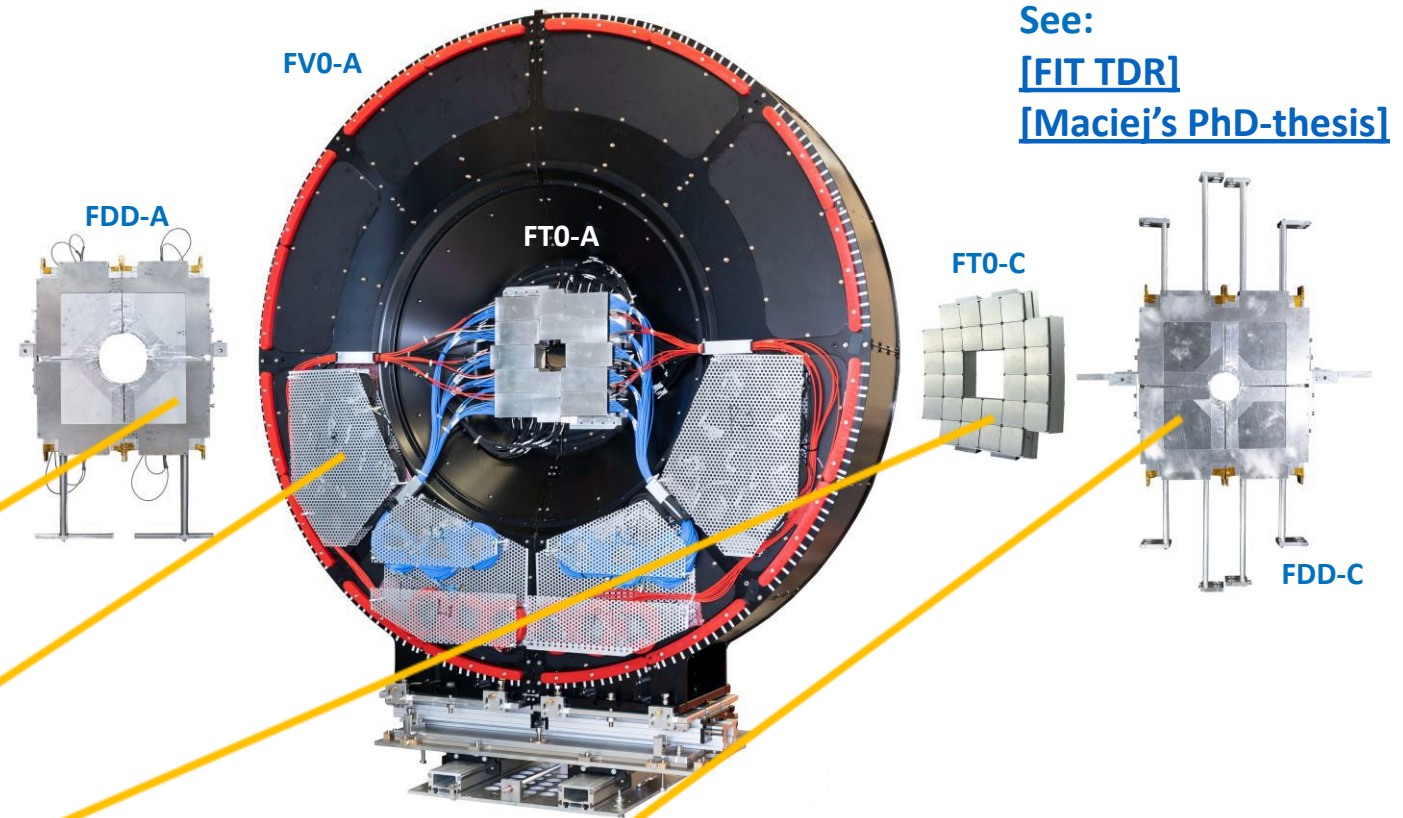


O²

- 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

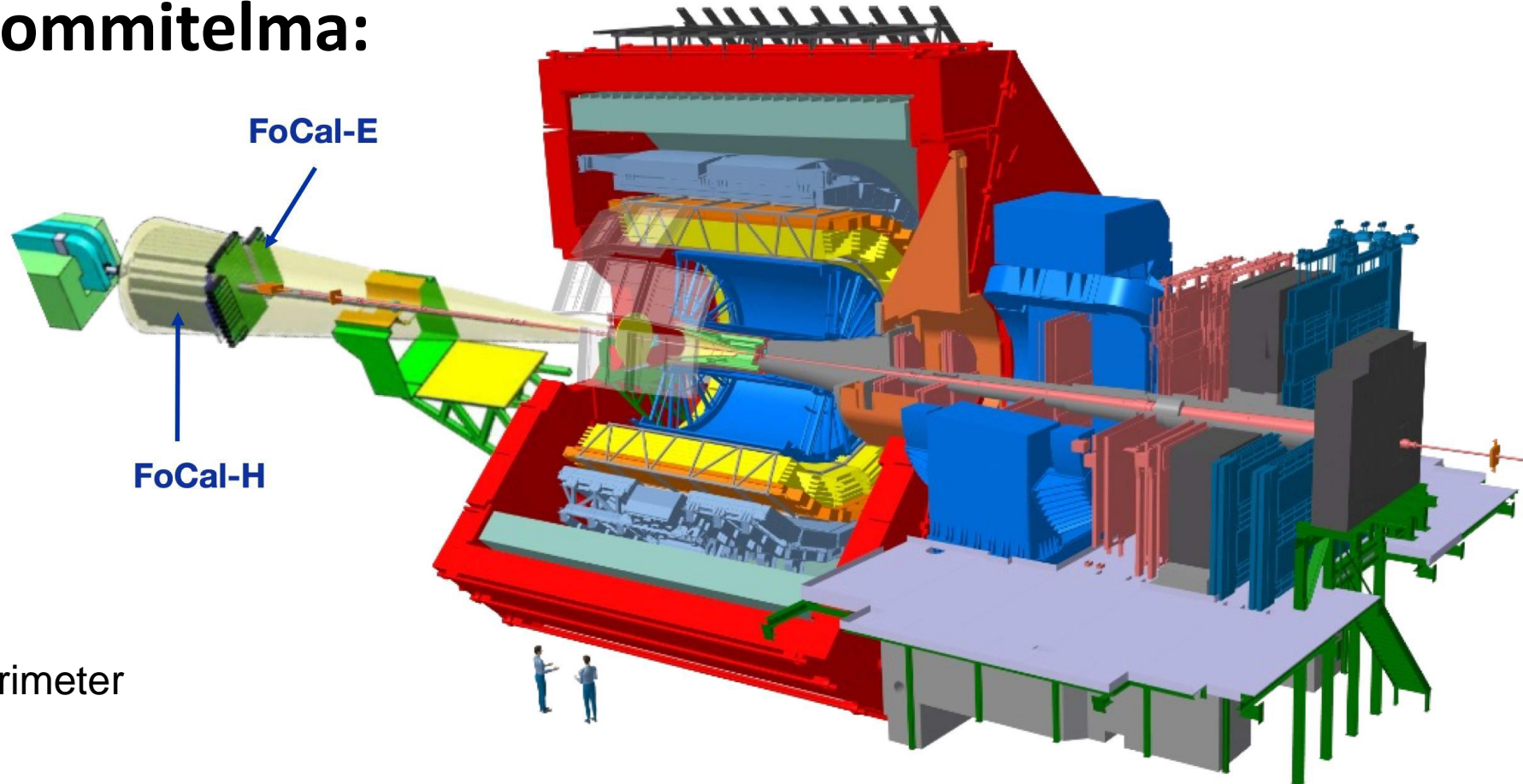


See:
[\[FIT TDR\]](#)
[\[Maciej's PhD-thesis\]](#)

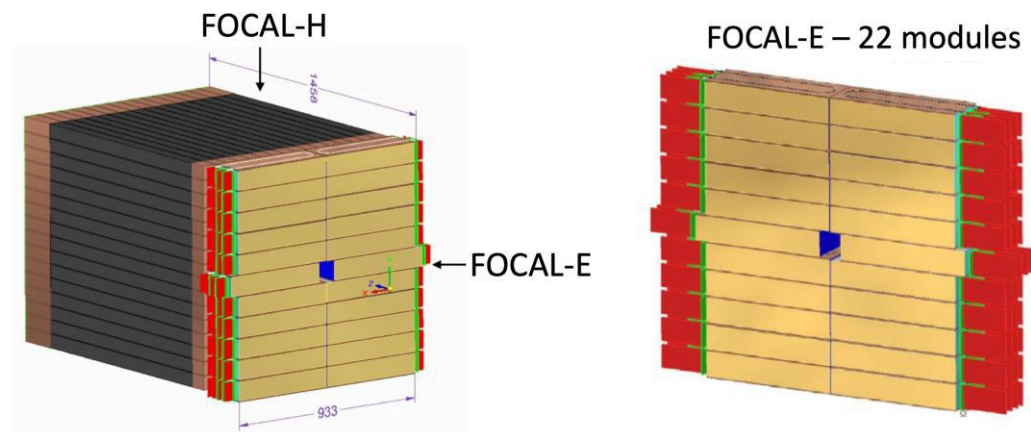
FIT toiminnallisuudet:

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

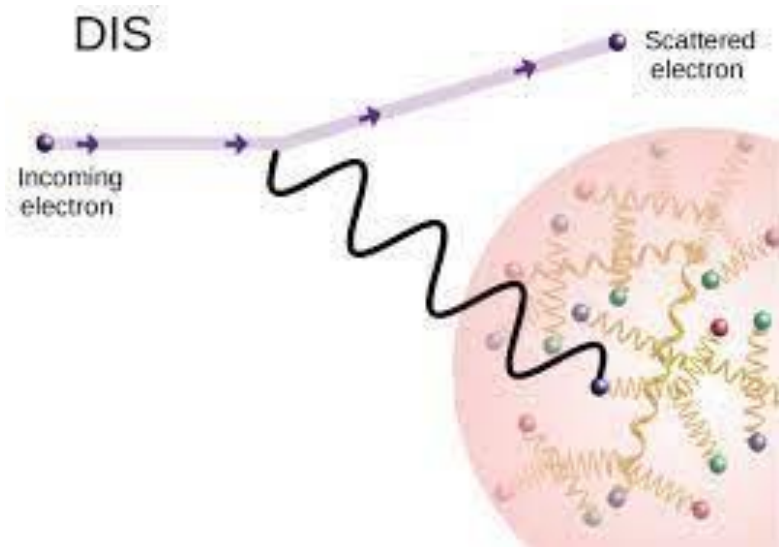
FoCal sommitelma:



Forward Calorimeter

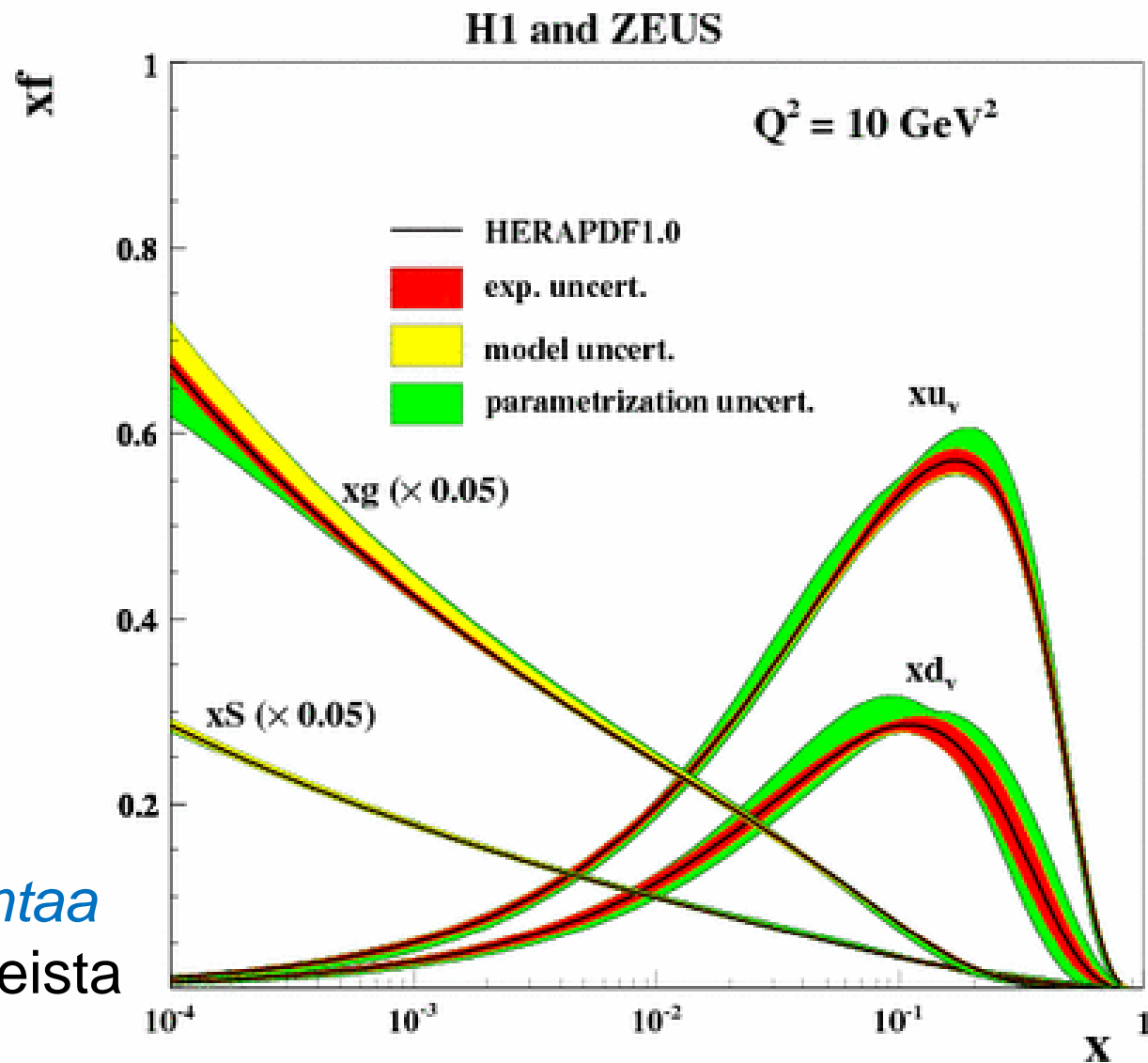


Protonissa on "liikaa gluoneja" □□ määrän on pakko satureitua. Kuinka havaitaan?

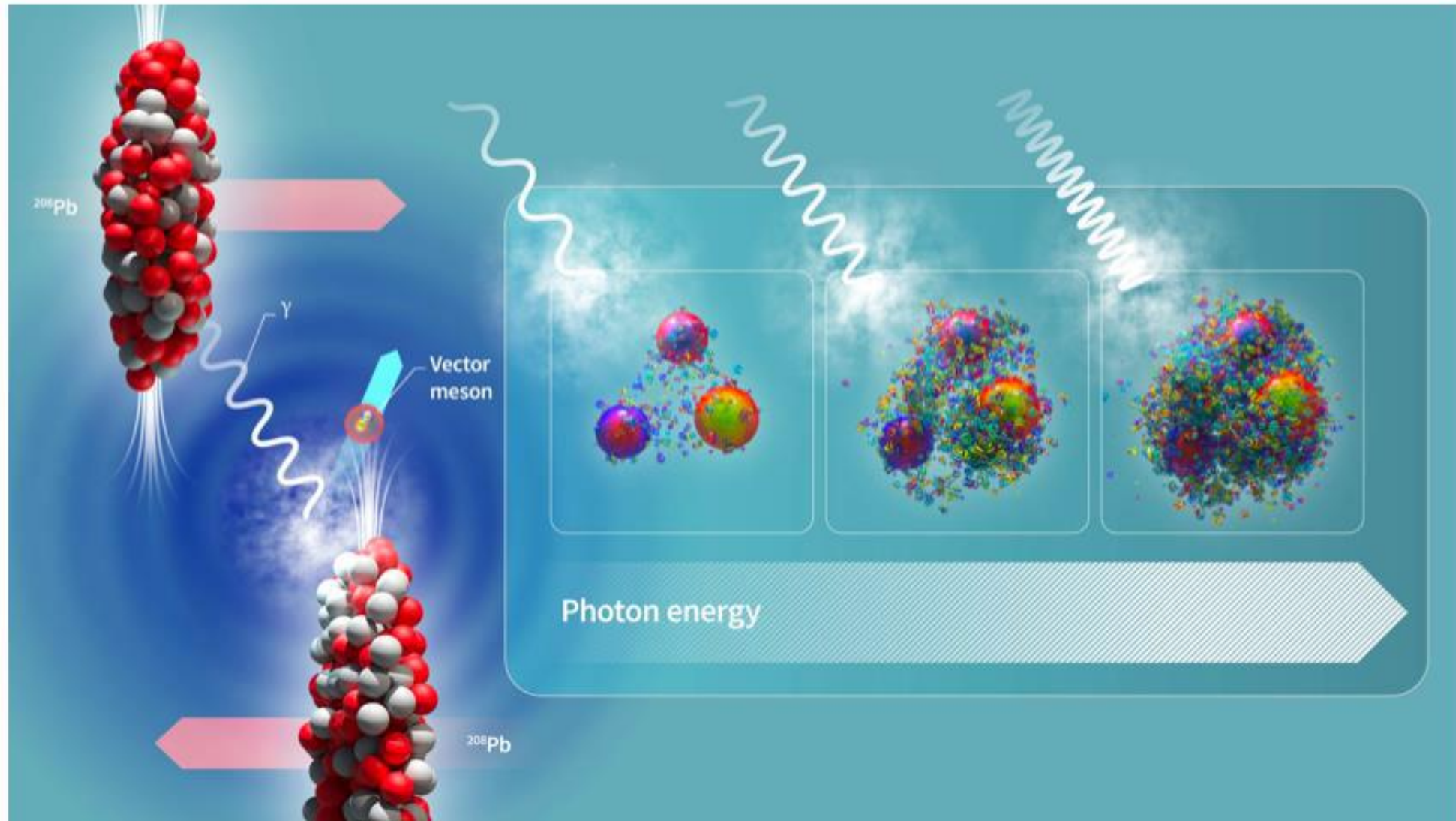


Syvä epäelastinen sironta, DIS
□ gluonien määrä kasvaa pienillä x

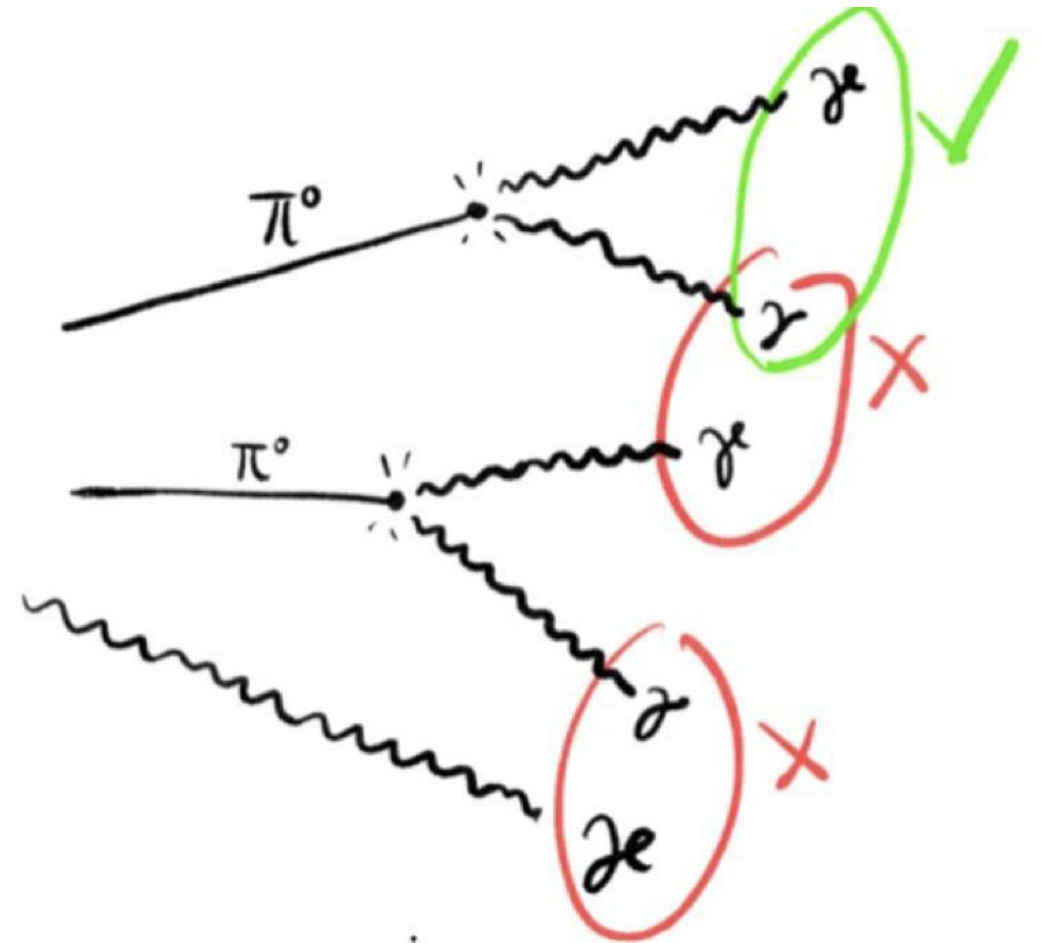
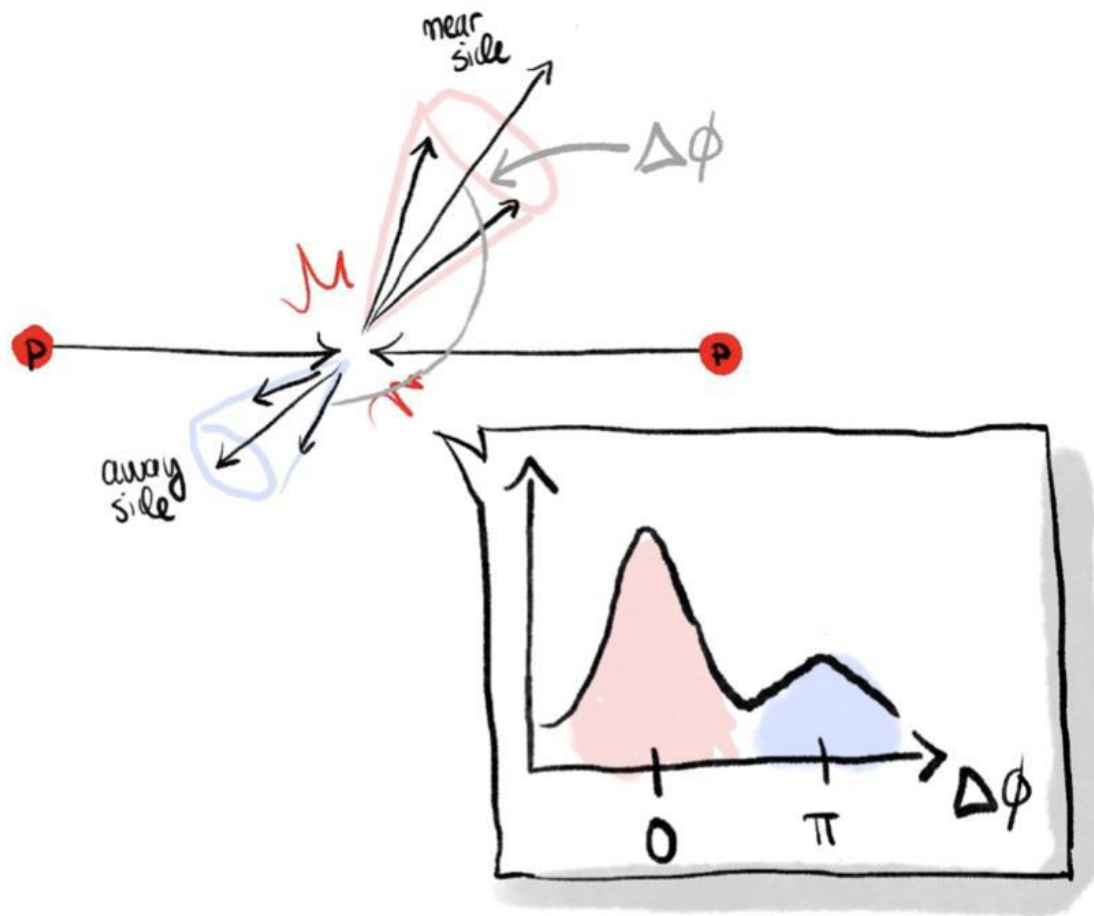
Iso kysymys QCD tutkimuksessa:
Kuinka satureituminen voitaisiin todentaa kokeellisesti? □□ yksi FoCal:n tavoitteista



Taiteellinen näkemys protonin sisällöstä:

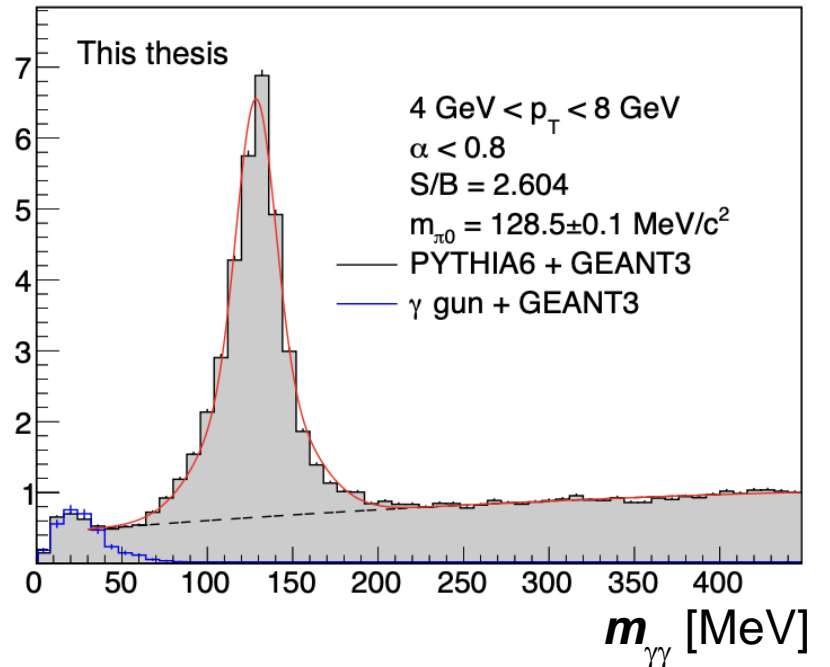
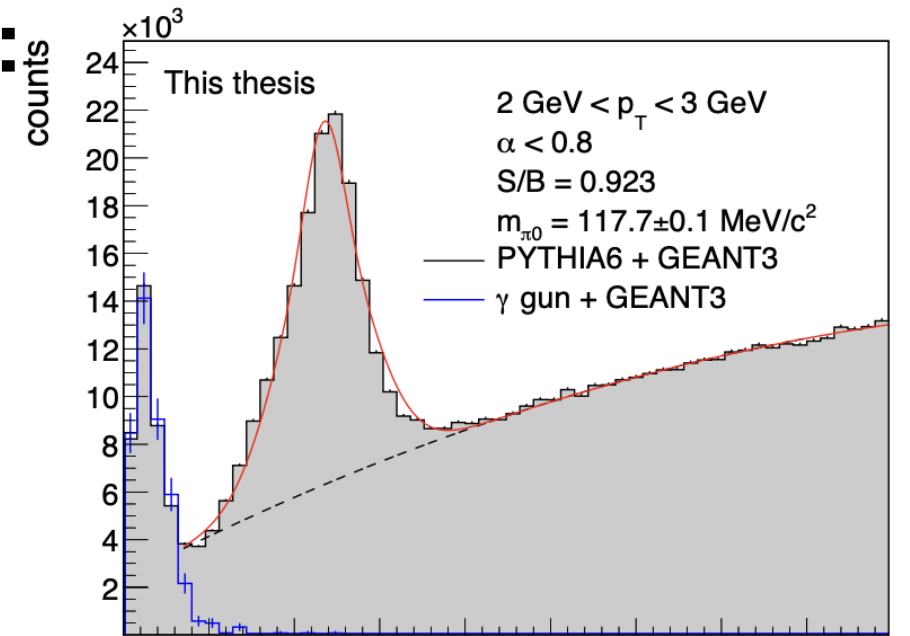
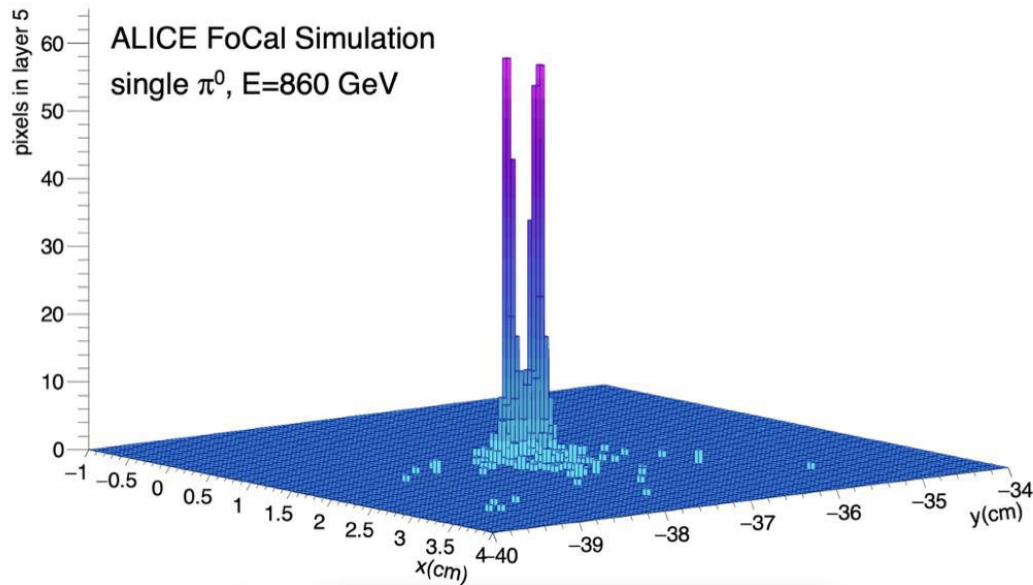
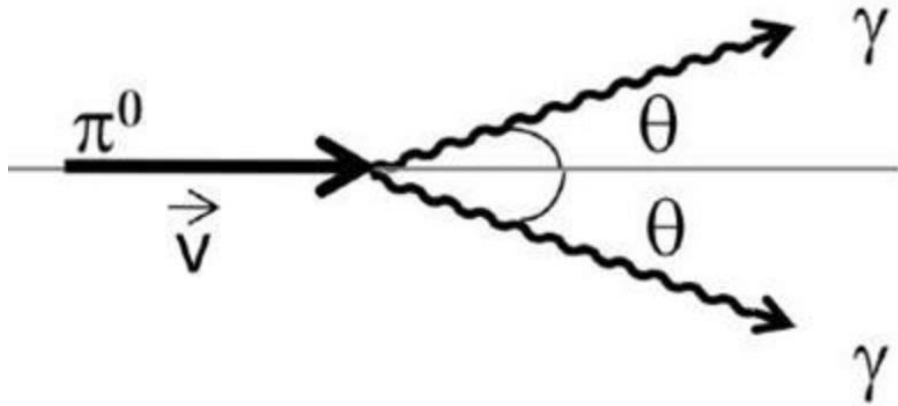


FoCal mahdollistaa neutraalien pionien korrelaatioiden mittaamisen. Ennuste: saturaatio $\pi\pi$ korrelaatiot vaimenevat

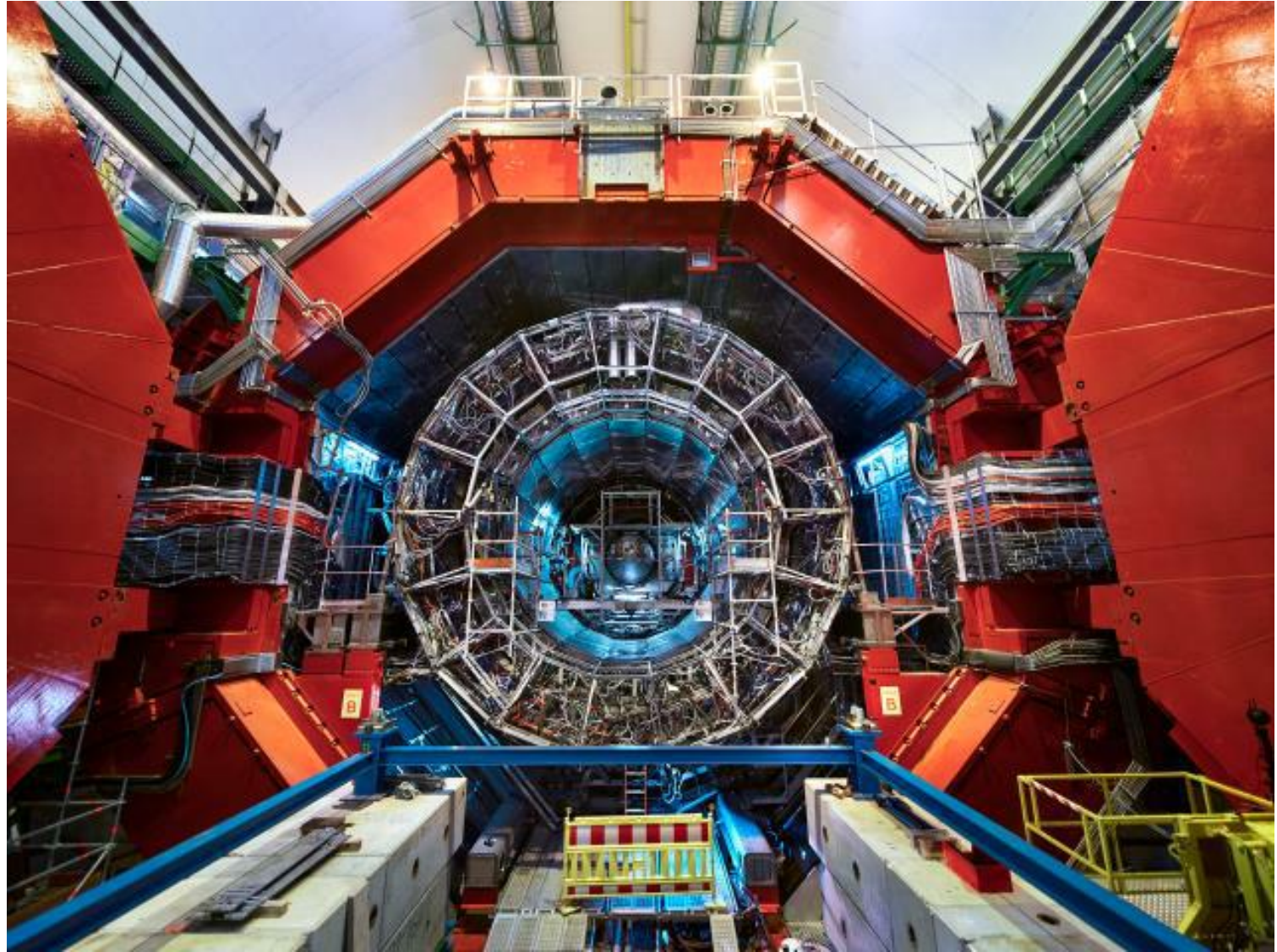


Neutraalien pionien havaitseminen:

Täsmälleen sama tekniikka, kuin Higgsin havaitsemisessa!



Kiiitos!
Kysymyksiä?

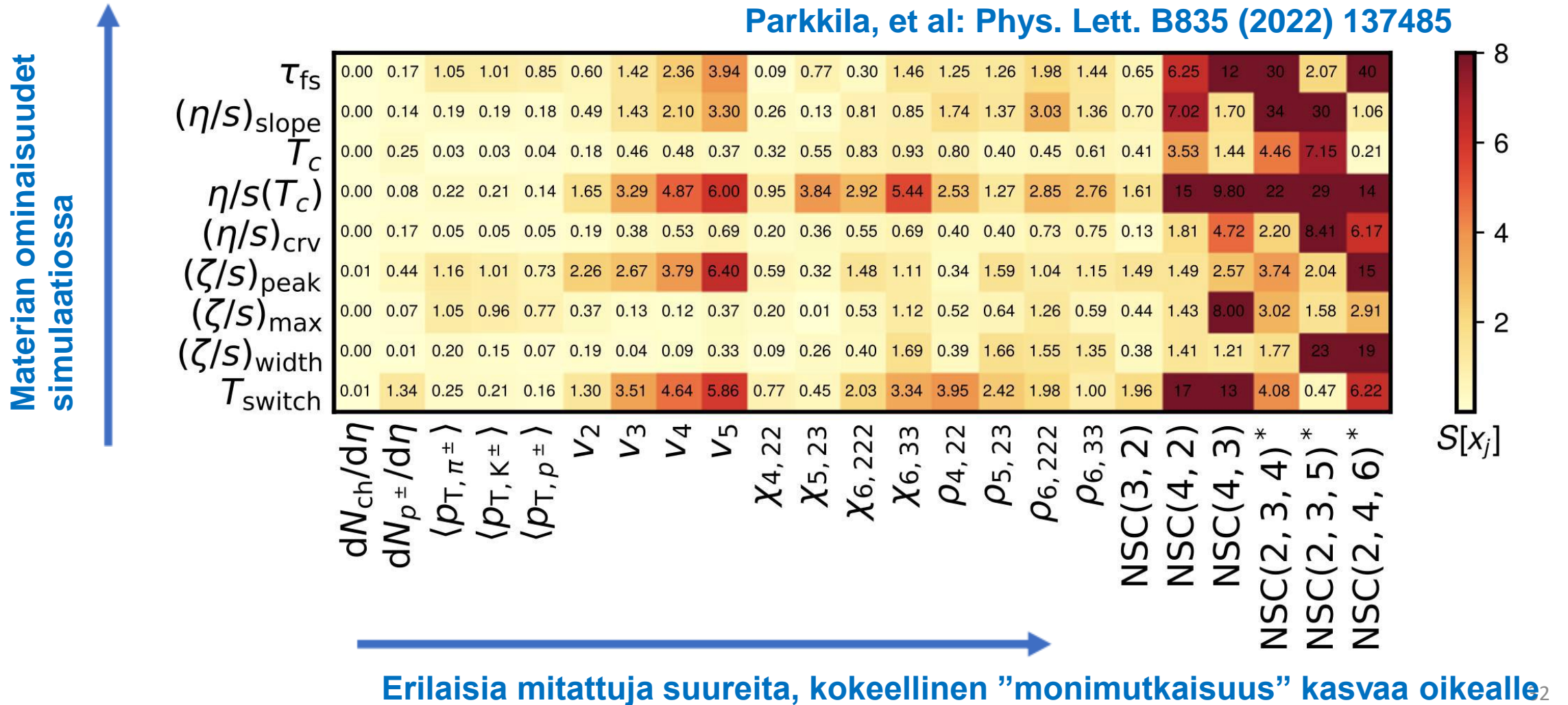


BACKUP

Bayesialainen analyysi kaikkea mitattua dataa vastaan

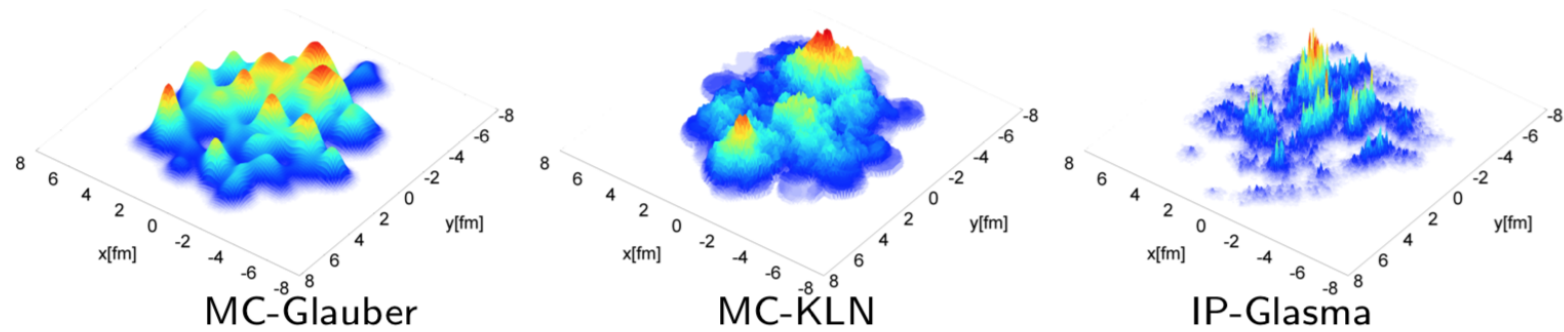
- Etsitään ideaalisia materiaalien ominaisuuksia "fittaamalla" $\square\square$ herkkyyskartta

Parkkila, et al: Phys. Lett. B835 (2022) 137485

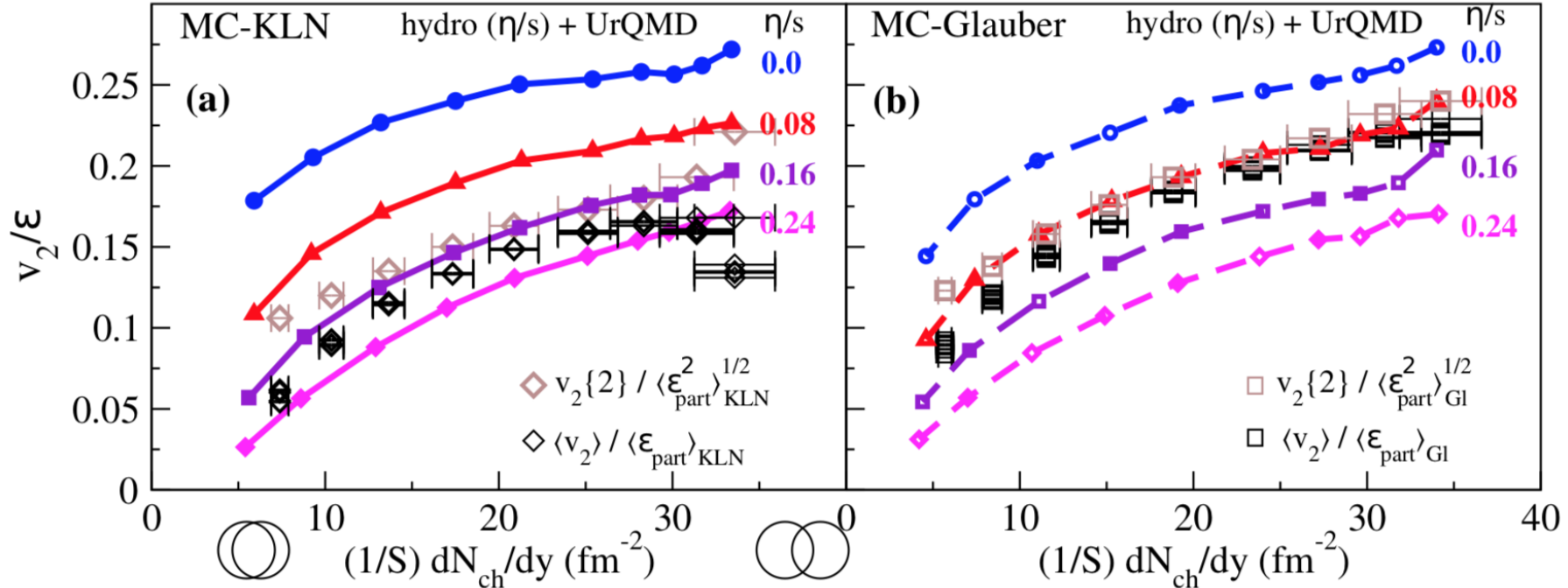


Ongelma: eri alkutilamallit suosivat eri arvoja juoksevuudelle $\frac{\eta}{s}$

□ Ei ole mahdollista, sillä kyseessä on materiaalin ominaisuus



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



Kinetic theory

$$\eta \approx \frac{1}{3} n \langle p \rangle \lambda$$

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

$$\lambda \geq \frac{1}{\langle p \rangle}$$

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

$$s = \frac{\varepsilon + P}{T} \sim \frac{4}{3} \frac{\varepsilon}{T} \sim \frac{4}{3} \frac{\pi^2}{30} \frac{\pi^2}{\zeta(3)} \left[g_B \frac{\zeta(3) T^3}{\pi^2} \right] \sim 3.6n$$

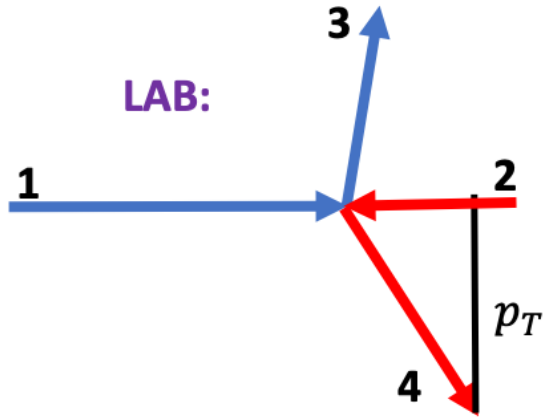
Together gives a lower bound for viscosity to entropy ratio

$$\eta \geq \frac{1}{3} \times \frac{s}{3.6} \quad \Rightarrow \quad \frac{\eta}{s} \geq 0.1 \approx 0.08 \approx \frac{1}{4\pi}$$

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:

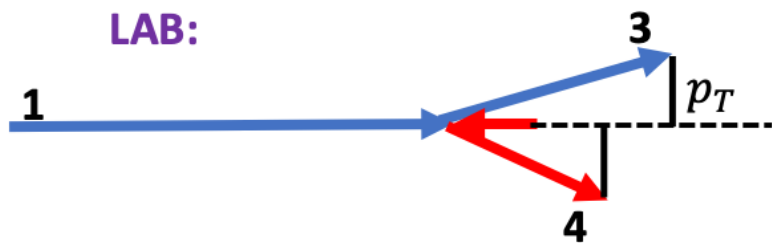


$$x_1 = \frac{p_T}{\sqrt{s}} (e^{\eta_3} + e^{\eta_4})$$

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

~sironakulmat

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



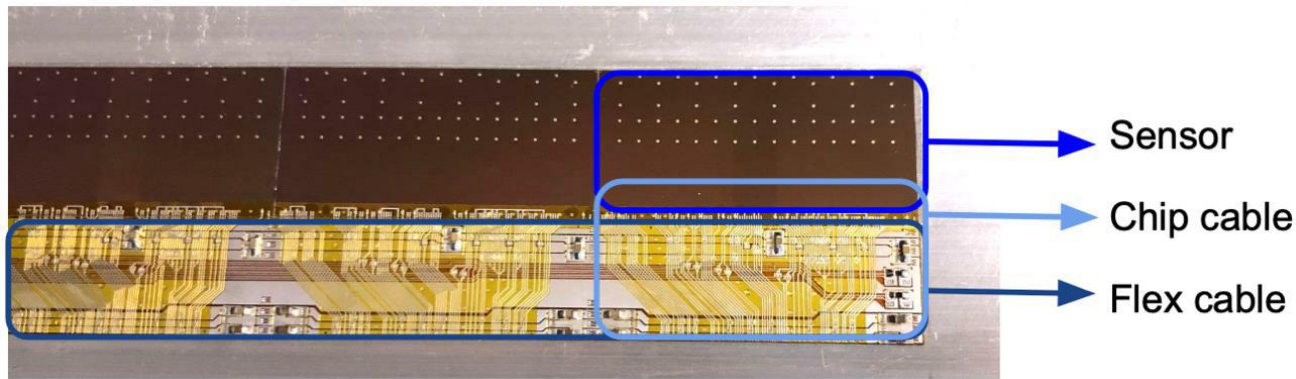
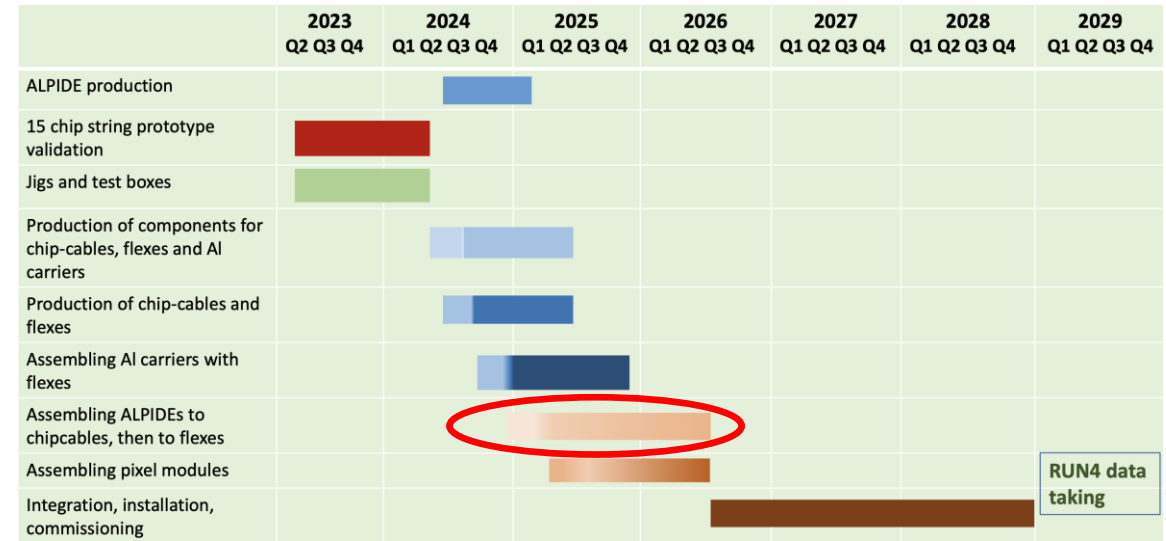
$$x_1 \approx \frac{2p_T}{\sqrt{s}} e^{+\eta} \gg 1$$

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

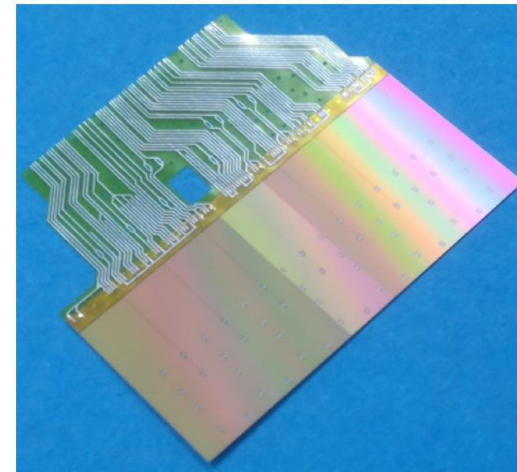
Target: high collision energy, low- p_T and large rapidity.

Finnish contribution to FoCal hardware

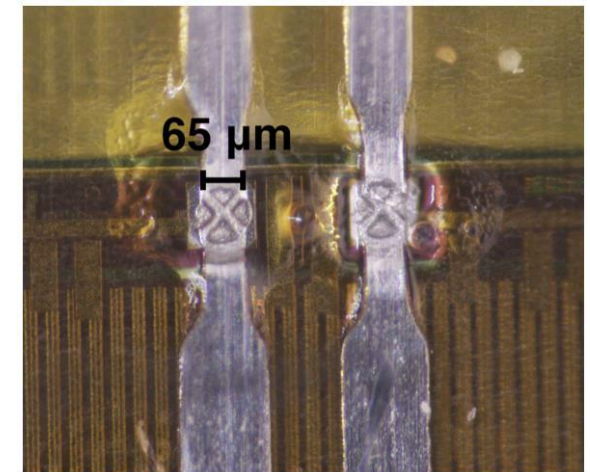
- FiRi 2023: new automatic bonding machine
 □ machine operational in fall 2024
- FiRi combined CMS and ALICE pledges
 - wire bonding of CMS tracker elements
 - SpTAB bonding of the FoCal pixel layers
- FoCal production in Helsinki in 2026



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

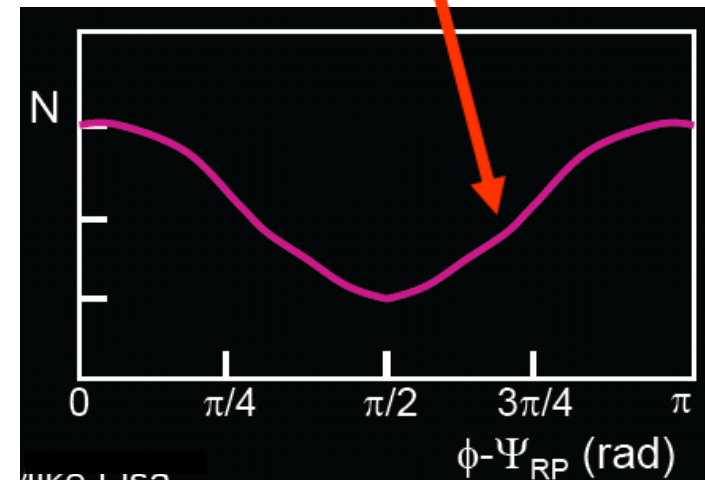
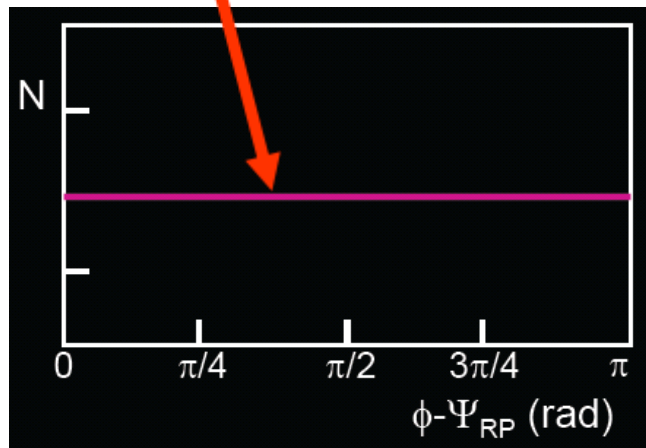
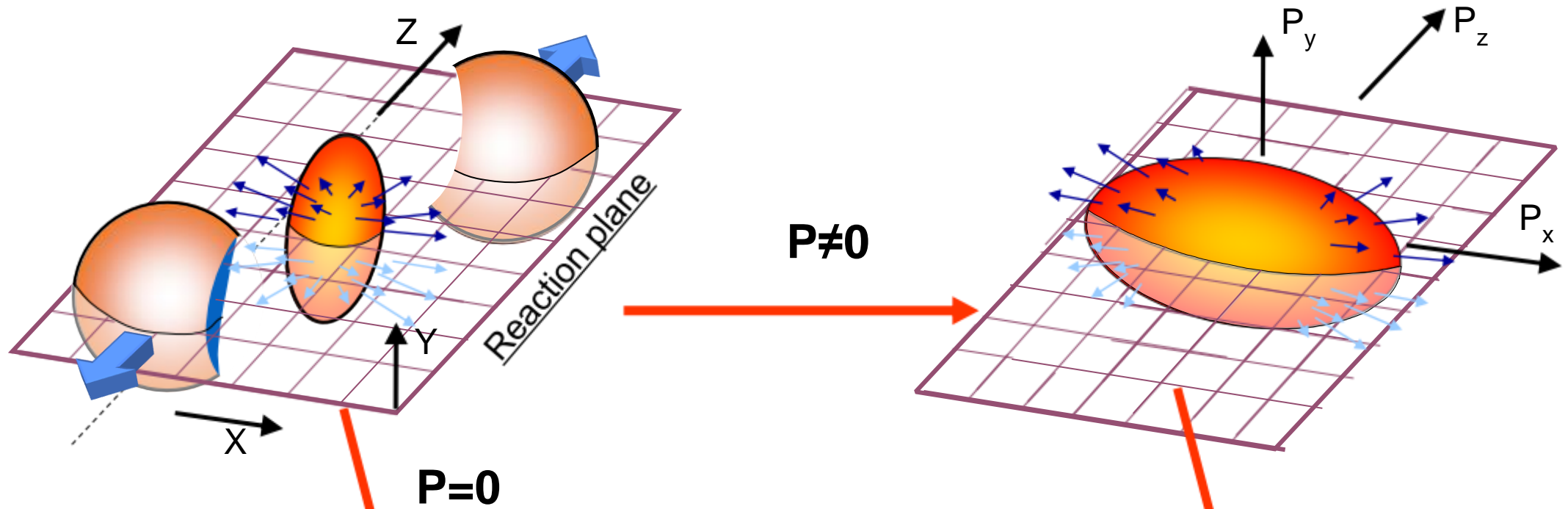


ALPIDE = ALICE Pixel Detector

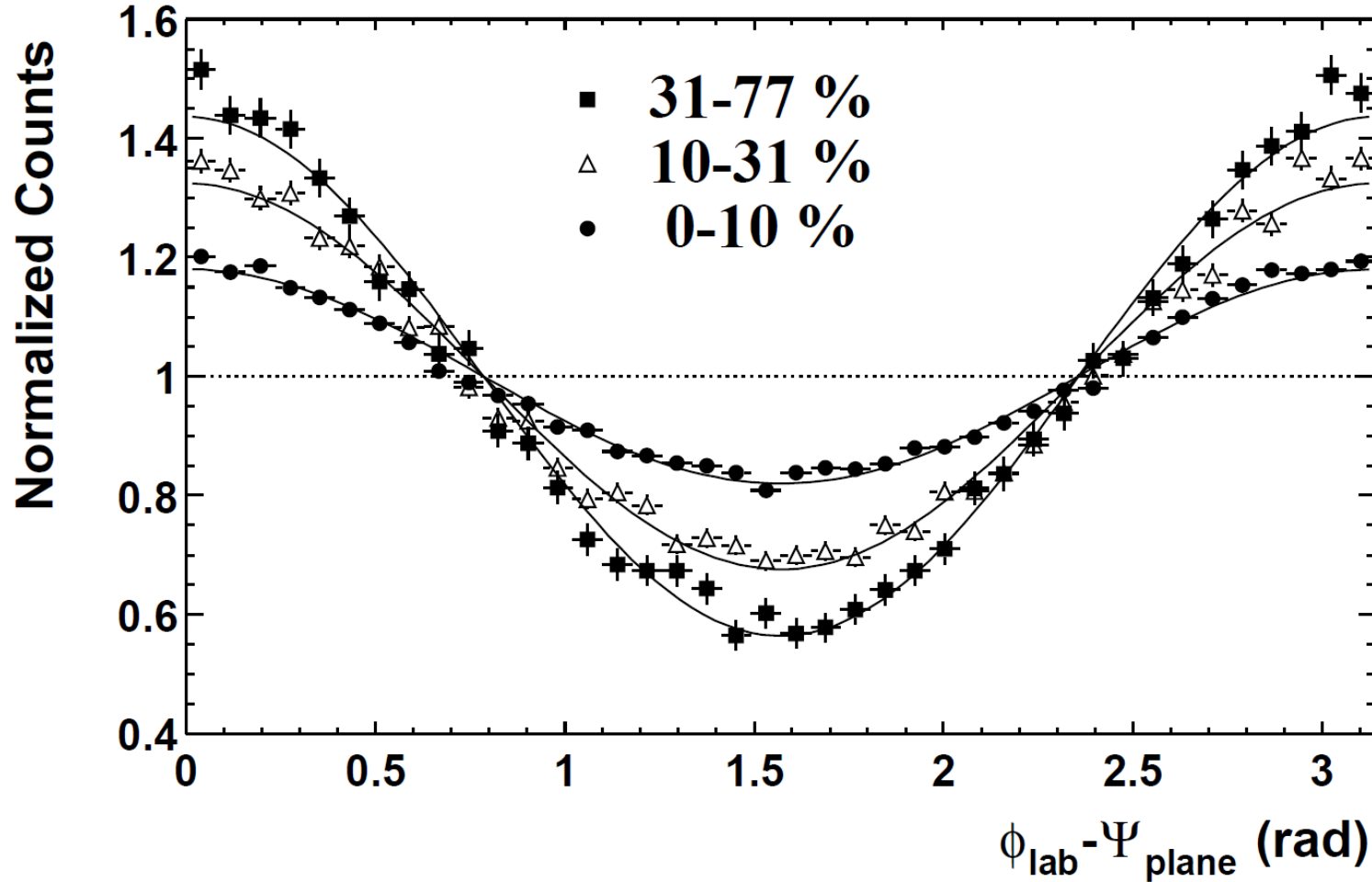


SpTAB bond

Onko syntynyt painetta?



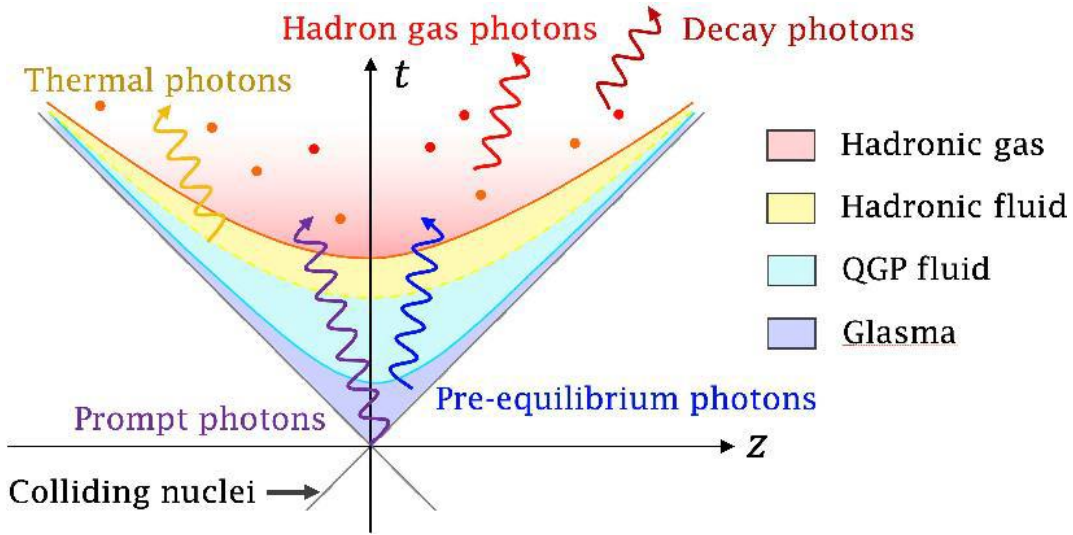
Onko syntynyt painetta? - Kyllä!



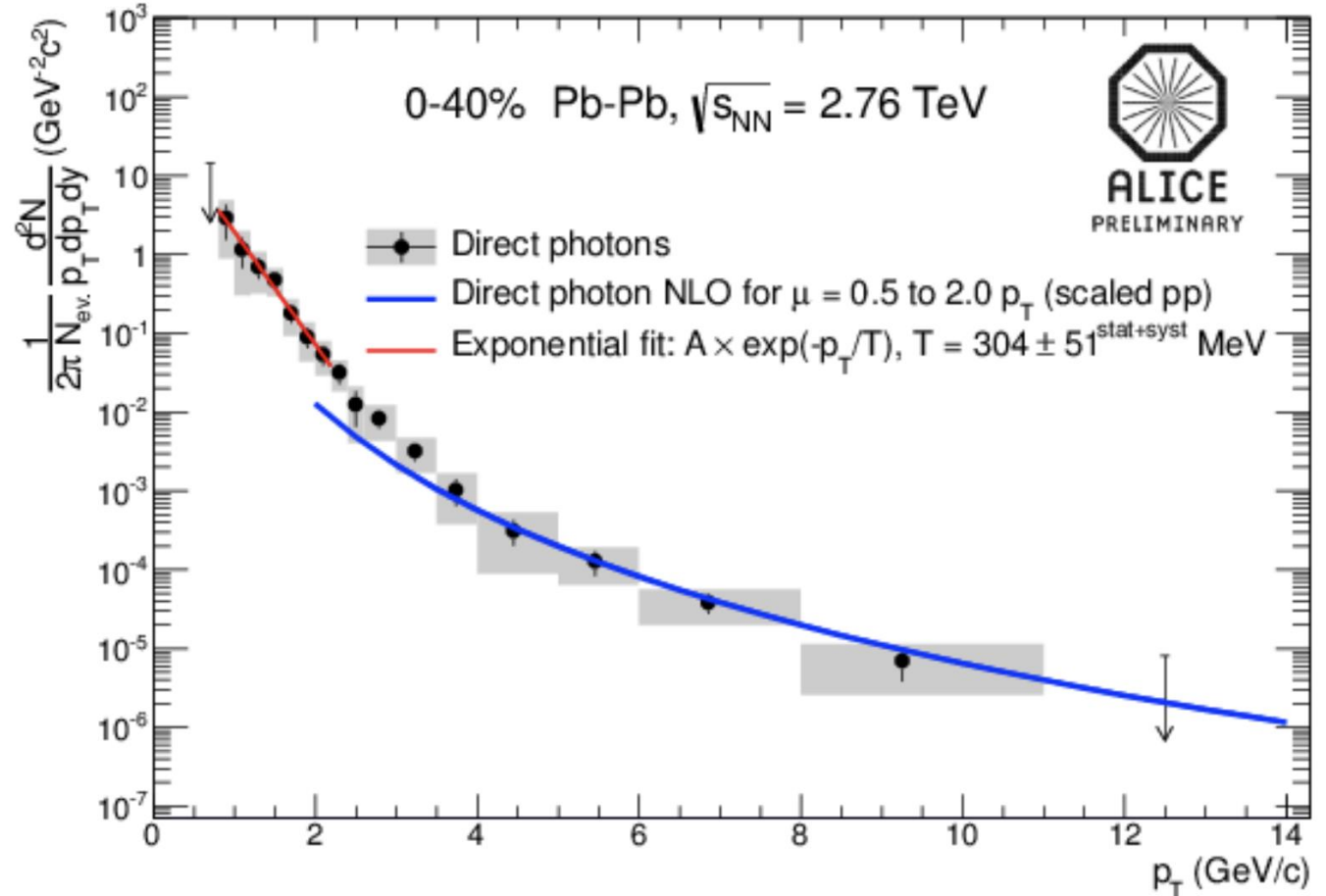
Törmäyksen keskeisyys kasvaa
epäsymmetria pienenee

Selkeä, systemaattinen kulmaepäsymmetria havaittu

Onko aineella lämpötila? - Kyllä!



ALICE Collaboration, Phys. Lett. B 754 (2016) 2



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