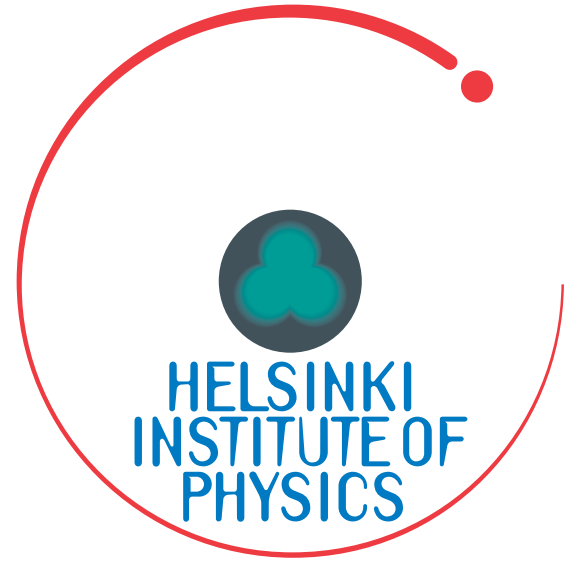




JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO



**ALICE**  
A JOURNEY OF DISCOVERY



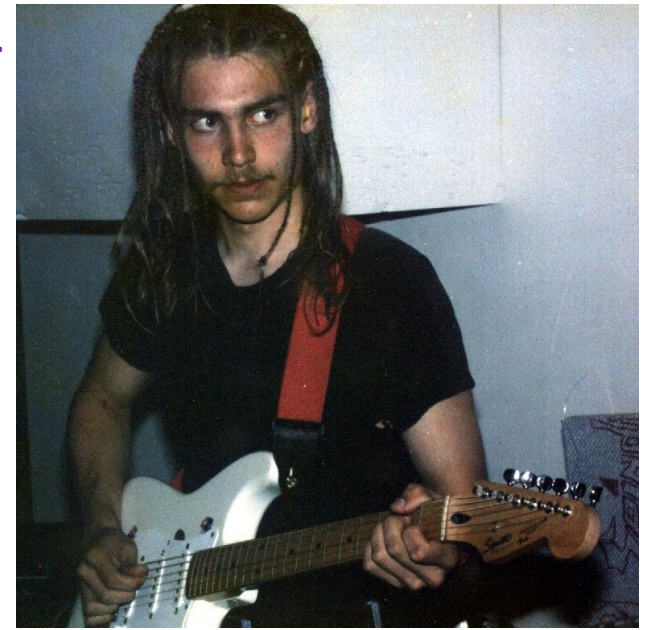
# Vahva vuorovaikutus osana Standardimallia

9.6.2022  
Sami Räsänen

# Minun lyhyt työhistoria:

- 1994: Ylioppilas Varkaudessa
- 1995: Jyväskylän yliopisto, haave opettajuudesta (fys-mat-kem)
- 2001: Maisteri, teoreettinen fysiikka
- 2005: Tohtori, teoreettinen fysiikka
- 2006: Pedagoginen pätevyys, matematiikan opettaja JAMK
- 2007, syksy: yliopisto-VTT tutkimusyhteistyö
- 2008: Tutkijatohtori ALICE-kokeessa, “teoretikko → kokeilija”
- **2010-2011: CERN**
- 2019: Kokeellisen hiukkasfysiikan dosentti (Helsinki)
- 2019: Suomen ALICE-projektin johtaminen
- 2020: Yliopistonlehtori, Jyväskylä
- 2022: Kvarkkiaineen huippututkimusyksikkö käynnistyy Jyväskylässä, siellä osaprojektin vetäminen

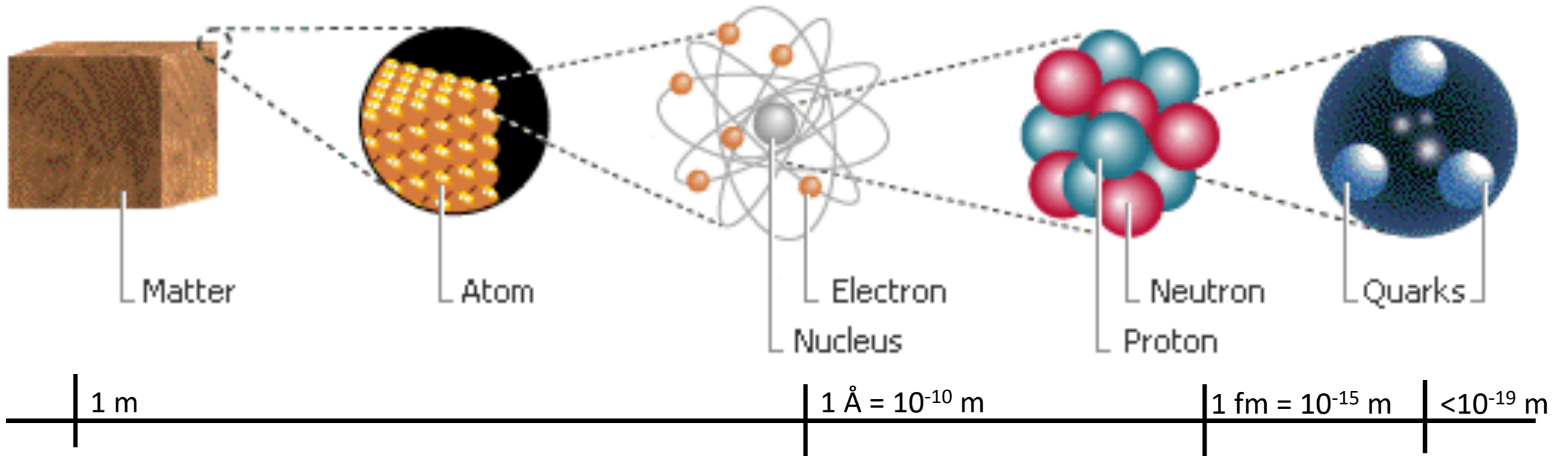
1994



Wappu  
2015

# Hiukkasfysiikan peruskysymykset:

- Mitkä ovat luonnon perusrakenteet?
- Mitä vuorovaikutuksia on olemassa?



# Miksi mahdollisimman suuri törmäysenergia?

## Ts., miksi kiihdyttimet ovat niin julmetun suuria? (LHC 27 km)

Suuri energia  $\longleftrightarrow$  Nähdään pieniä yksityiskohtia  
deBroglie'n aallonpituus:

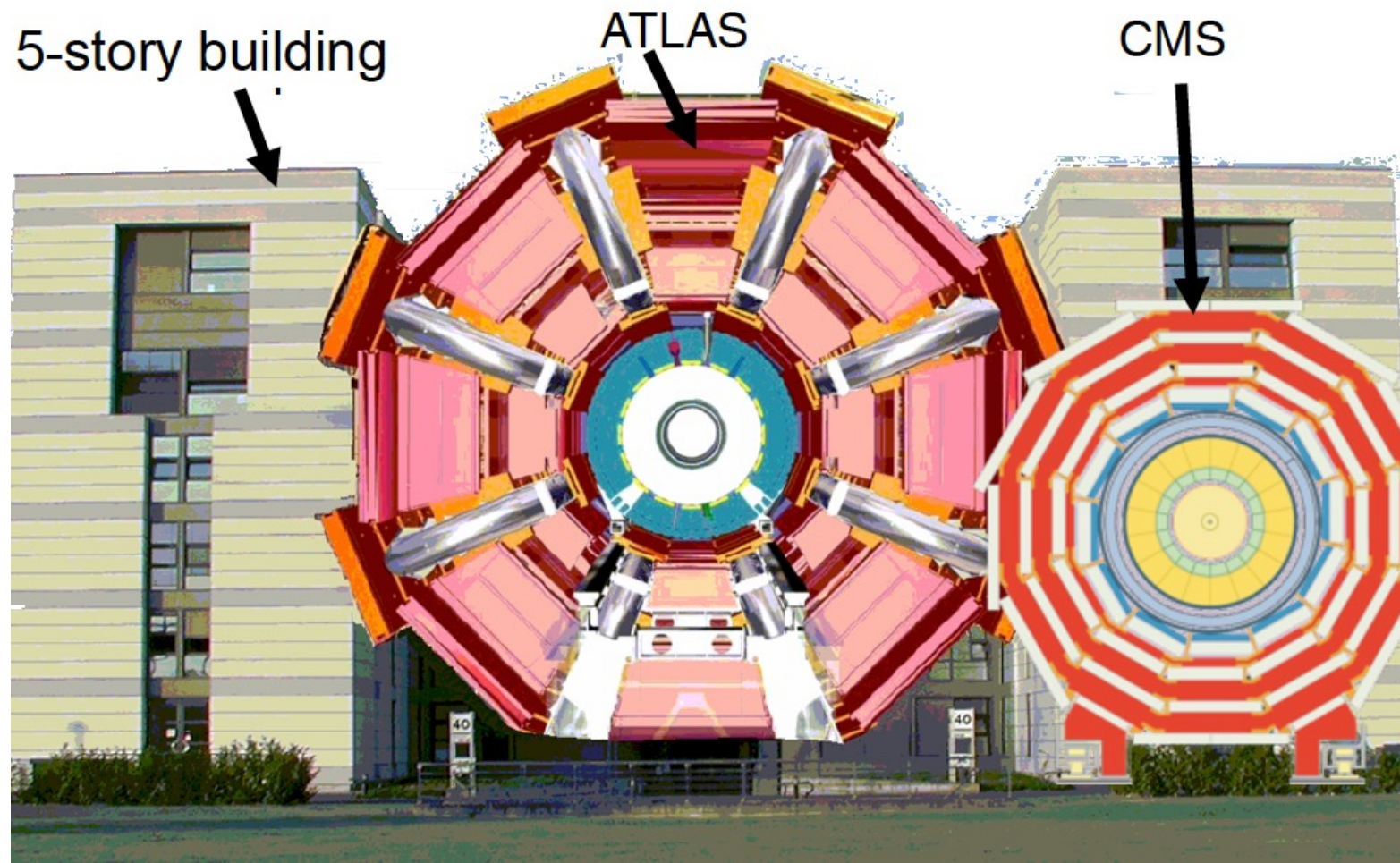
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc^2}{Ev} \approx \frac{hc}{E}, \text{ kun } v \rightarrow c$$

$$\approx \frac{1.97 \times 10^{-22} \text{ TeV} \cdot \text{m}}{E} \approx 10^{-23} \text{ m LHC : ssa,}$$

missä energia 14 TeV.

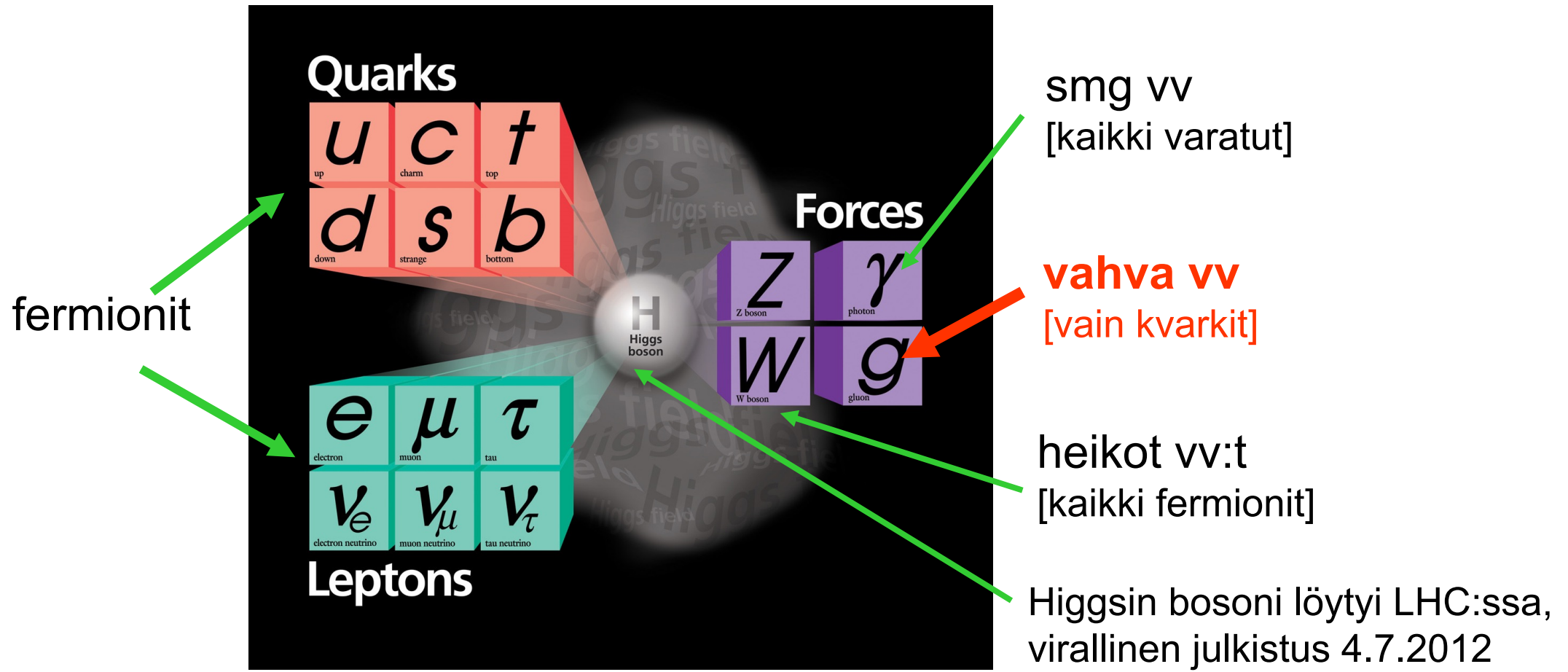
# Miksi ilmaisimet ovat niin julmetun suuria?

- Liikemäärän mittaaminen → ratojen pitää taipua riittävästi
- Energian mittaaminen kalorimetreillä → absorboituminen vaatii massaa



# Hiukkasfysiikan Standardimalli (SM)

= kokeellisesti hyvin testattu teoria, joka kuvaa kaikkia tunnettuja alkeishituja + 3 perusvuorovaikutusta



# Kuinka Higgsin hiukkanen havaittiin?

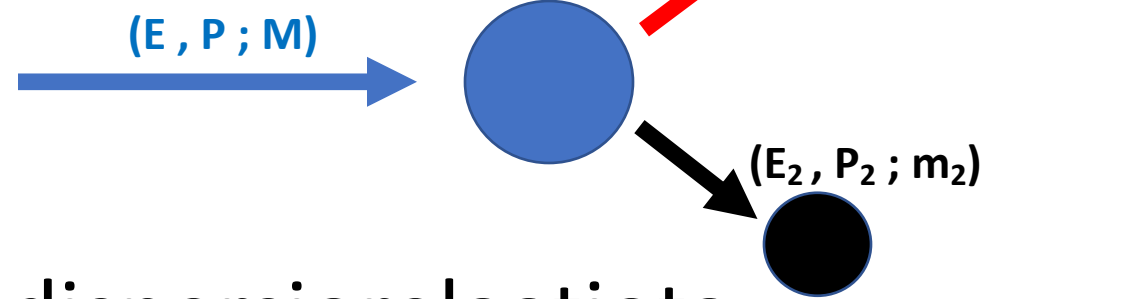
Elinaika lyhyt, lentää  $<10^{-13}$  m.

- Ei voida koskaan havaita suoraan ilmaisimessa
- Higgs täytyy rakentaa sen hajoamistuotteista

Energia ja liikemäärä säilyvät

$$E = E_1 + E_2$$

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$



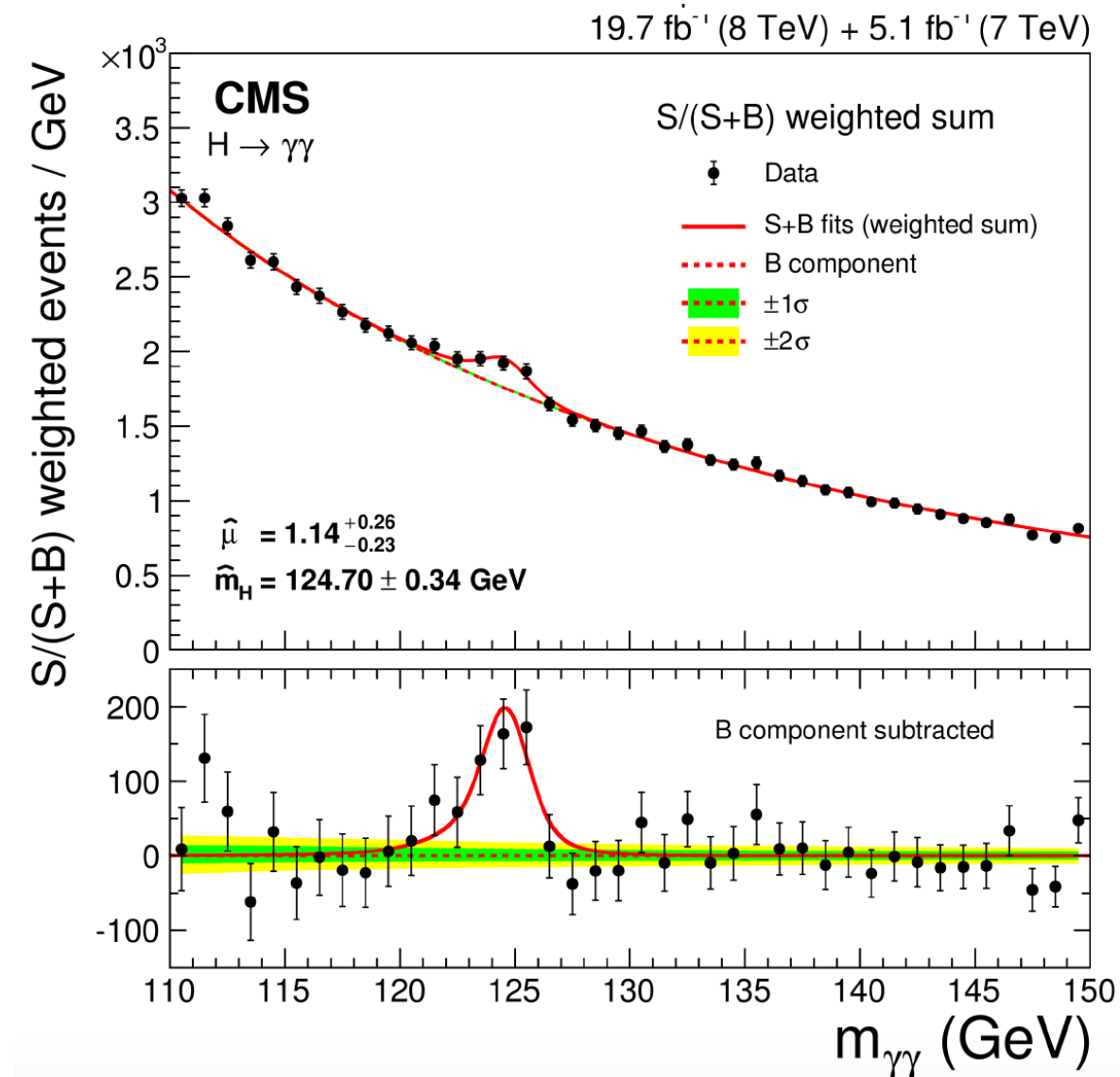
Sovelletaan relativistista dispersiorelaatiota

$$\begin{aligned} Mc^2 &= \sqrt{E^2 - c^2 \vec{p}^2} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - c^2 (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2} \\ &= \sqrt{2E_1E_2 - 2c^2 |\vec{p}_1| |\vec{p}_2| \cos\theta + m_1^2 c^4 + m_2^2 c^4} \\ &\approx \sqrt{2E_1E_2 (1 - \cos\theta)}, \text{ where } \theta \angle (\vec{p}_1, \vec{p}_2) \end{aligned}$$

missä viimeinen rivi pätee kun  $m_{1,2}/E_{1,2} \ll 1$



# Esimerkki: Higgs hajoaa kahteen fotoniin, $H \rightarrow \gamma + \gamma$

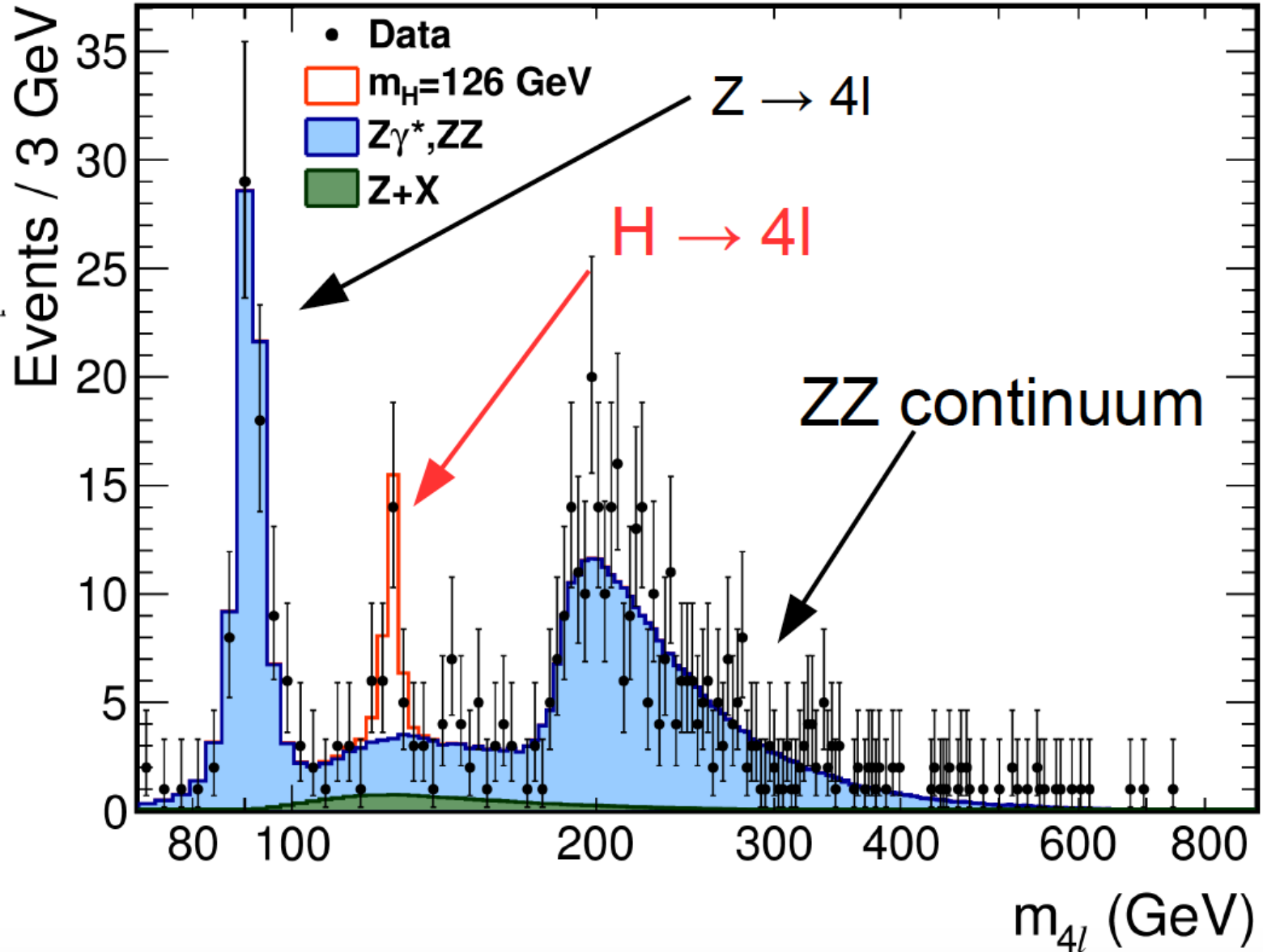


**Kaikki fotonit näyttävät samalta mittalaitteessa →**

1. Muodostetaan kaikki mahdolliset parit
2. Lasketaan jokaisen parin erikseen ja täytetään histogrammiin
3. Toistetaan sama miljardeissa ja miljardeissa törmäyksissä

Tämän hajoamiskanavan olemassaolo todistaa, että havaittu hiukkanen on bosoni.

Syy: fotonin spin = 1, joten kahden fotonin muodostan lopputilan spin on kokonaisluku



$H \rightarrow Z + Z$

$\rightarrow (\mu^+ + \mu^-) + (\mu^+ + \mu^-)$

Sama periaate, mutta  
4 hidun lopputila

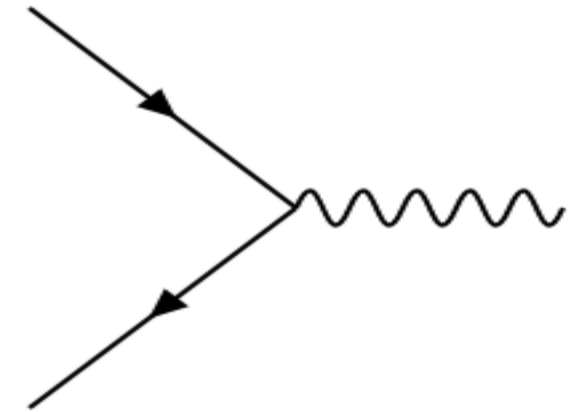
SM Higgs, koska

- tarkentui spin = 0
- useita hajoamiskanavia
- vuorovaikutuksen yhteys massaan

**Keskitytään jatkossa vahvaan vuorovaikutukseen,  
eli kvarkkien ja gluonien välisiin vuorovaikutuksiin**

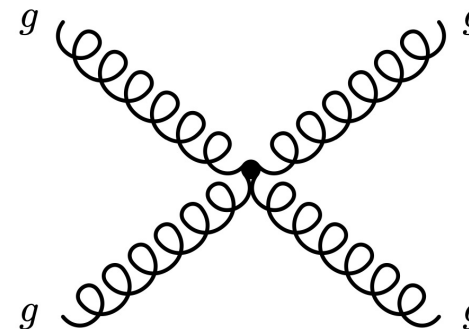
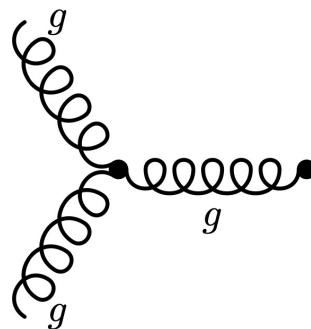
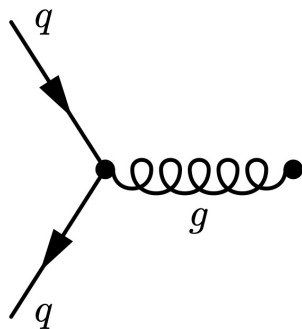
# Kvanttielektrodynamiikka – QED

- teoria sähkömagnetismista
- fotonilla ei ole sähkövarausta  
→ ei (suoria) itseisvuorovaikutuksia

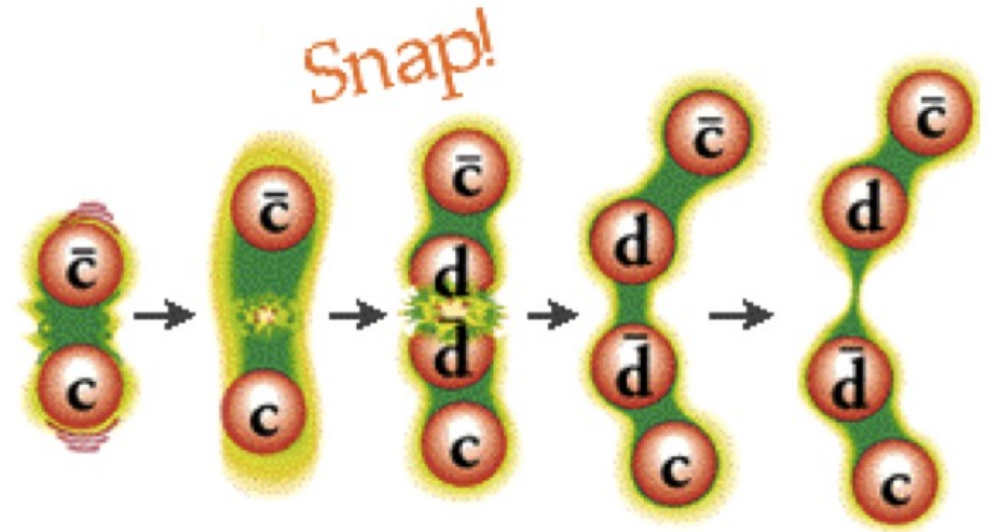
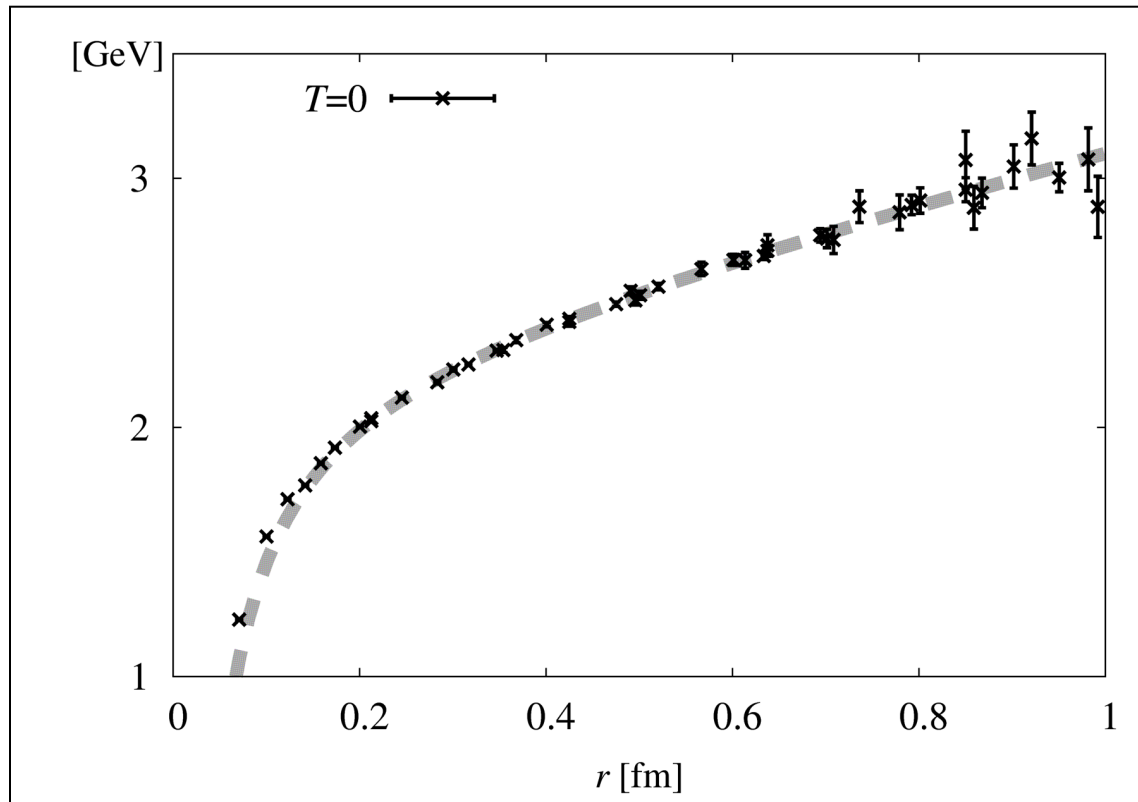


# Kvanttiväridynamiikka – QCD

- myös gluoneilla värivaraus → itseisvuorovaikutuksia!



# Gluonien itseisvuorovaikutusten takia merkittäviä eroja



“Normaaleissa” olosuhteissa kvarkit ovat kahliutuneet hadronien sisään:

**Hadronit** = **baryonit** + **mesonit**, tunnetaan useita satoja

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

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

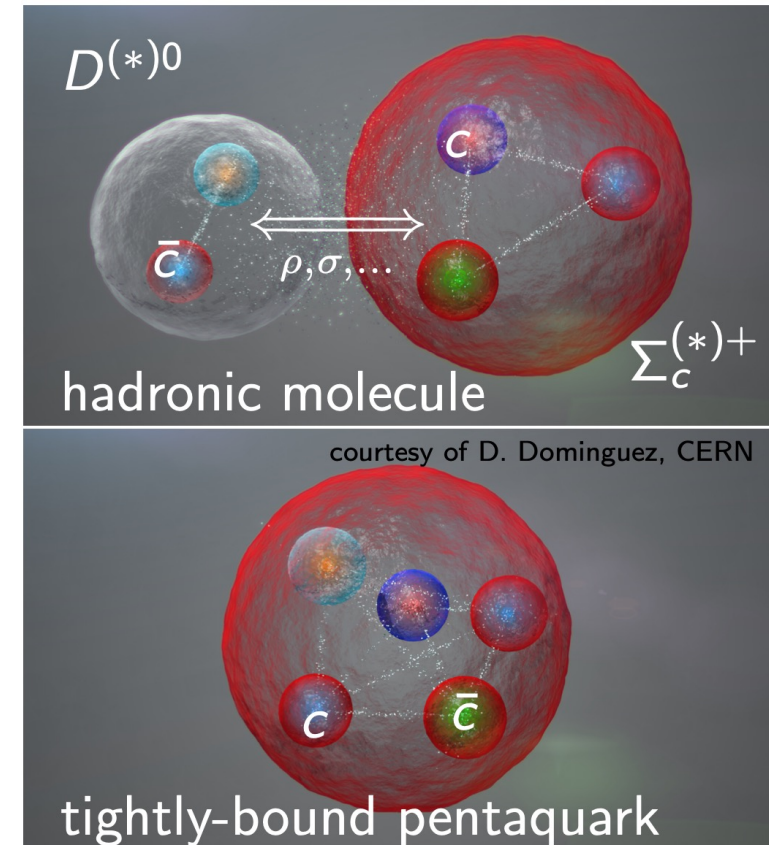
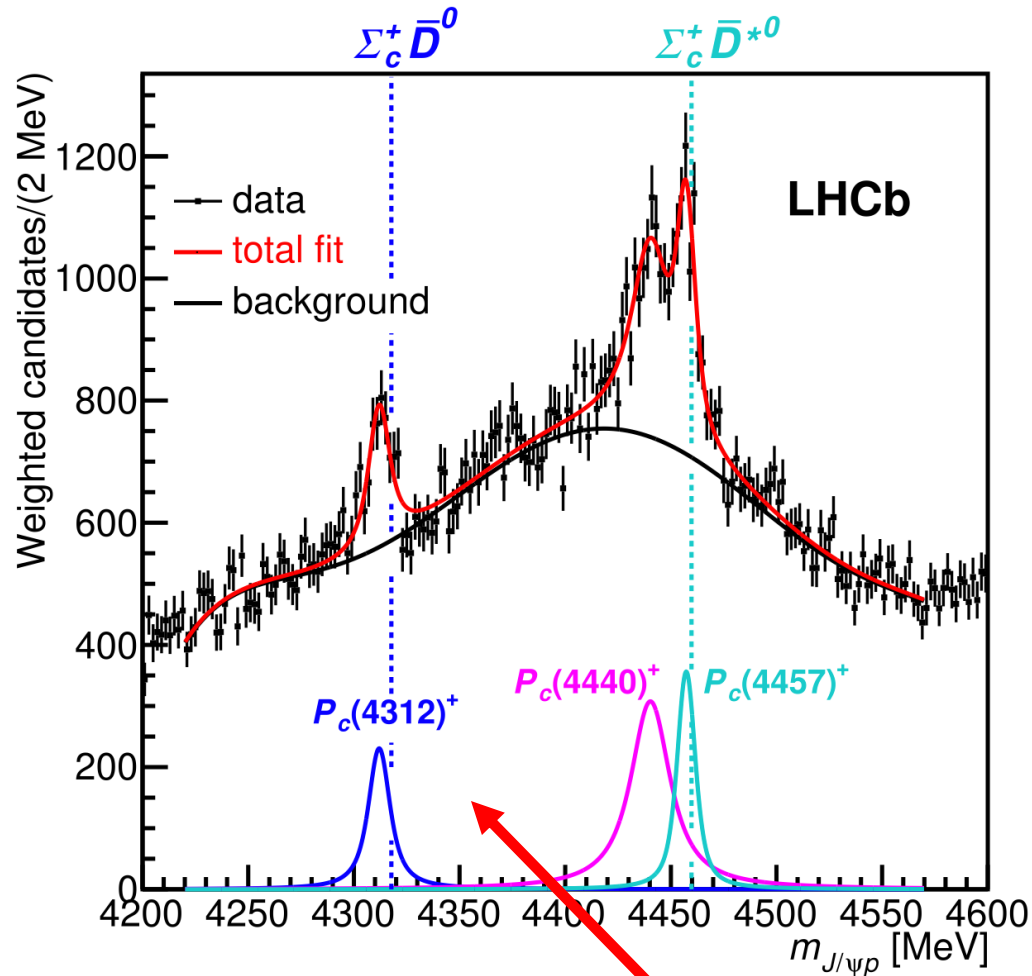
**Mesonit** = kvarkin ja anti-kvarkin sidottuja tiloja, esimerkiksi:

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

Onko muita? QCD ei kiellä 4, 5, ... kvarkin tilojen olemassaoloa.

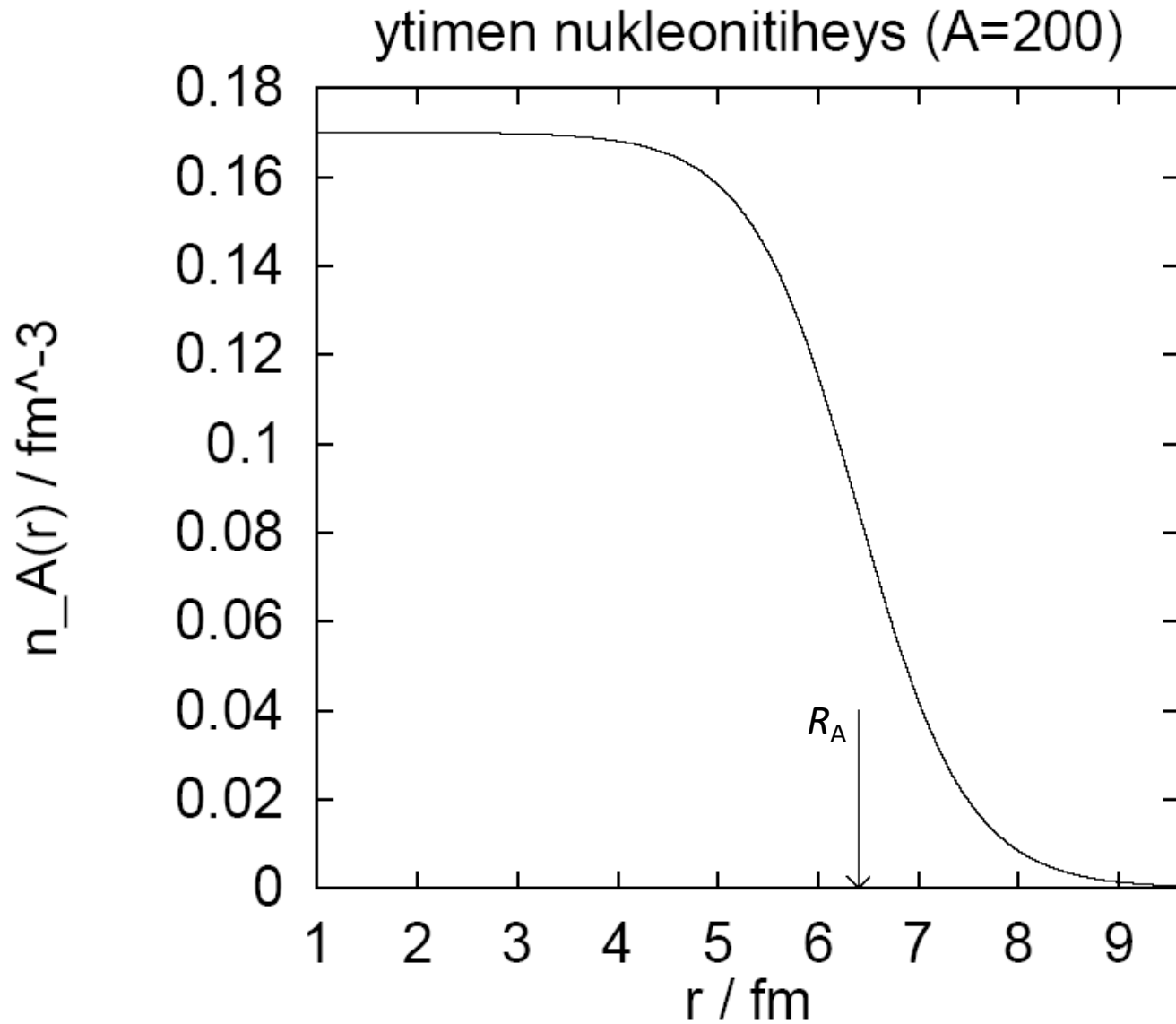
# LHC on löytänyt tähän mennessä (3/2022) yhteensä 64 uutta hadronia

## Mukana selkeitä todisteita “eksoottisista” tetra- ja pentakvarkkitiloista!

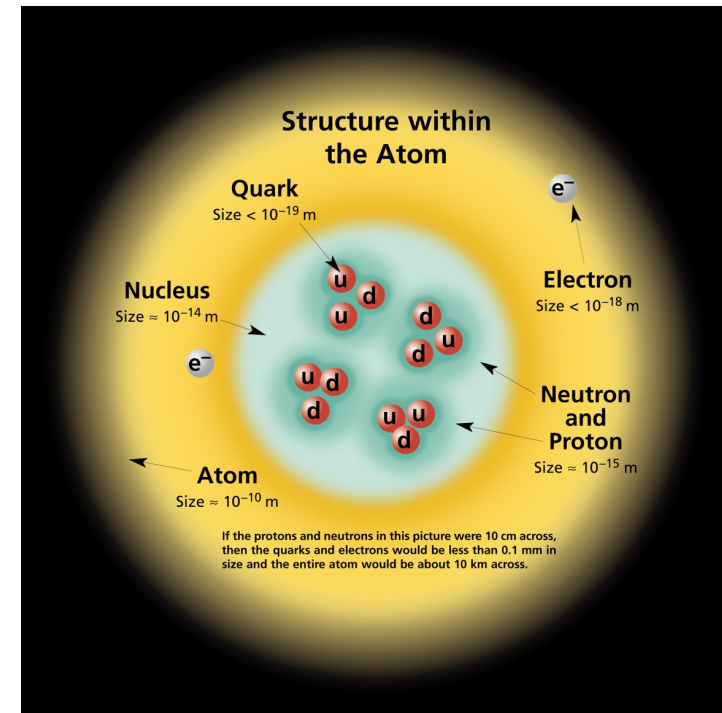


# Onko aine aina kahliutunut hadroneiksi?

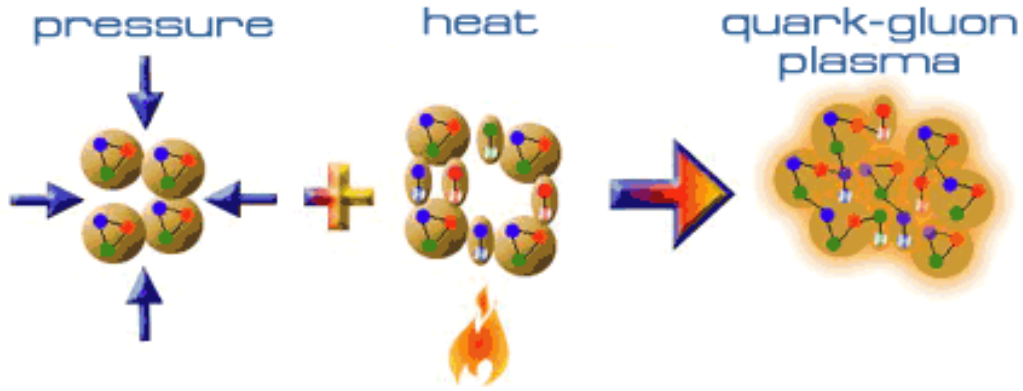




- Kultaytimen säde  $R_A \sim 6.5 \text{ fm}$
- tiheys  $n \sim 200 \text{ kpl} / (4/3\pi R_A^3) \sim 0,17 \text{ kpl/fm}^3$
  - nukleonien välinen etäisyys  $\sim n^{-1/3} \sim 1,8 \text{ fm}$
  - tiheässä, mutta eivät päällekkäin



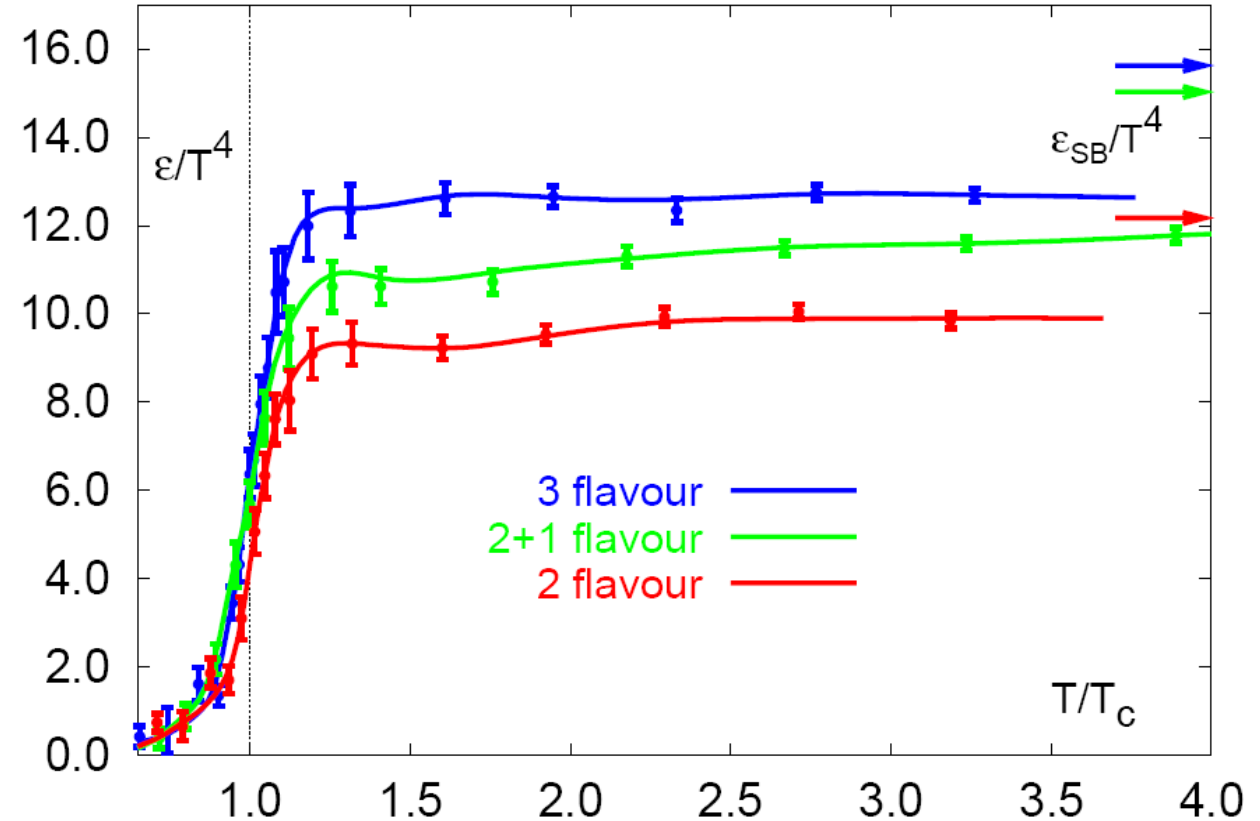
# QCD ennuste: hadronisessa aineessa olomuodonmuutos kun $T = T_c = 2 \times 10^{12}$ K



## Kansankielisesti:

“Hadroninen aine sulaa kvarkkien ja gluonien muodostamaksi plasmaksi”

**Analogia:** sähkömagneettisessa plasmassa on vapaita sähkövarauksia, kvarkki-gluoniplasmassa on vapaita värivaraus



**Relativistinen ideaailkaasu:**  
(energiatiheys)  $\sim$  (vapaus-asteet)  $\times T^4$

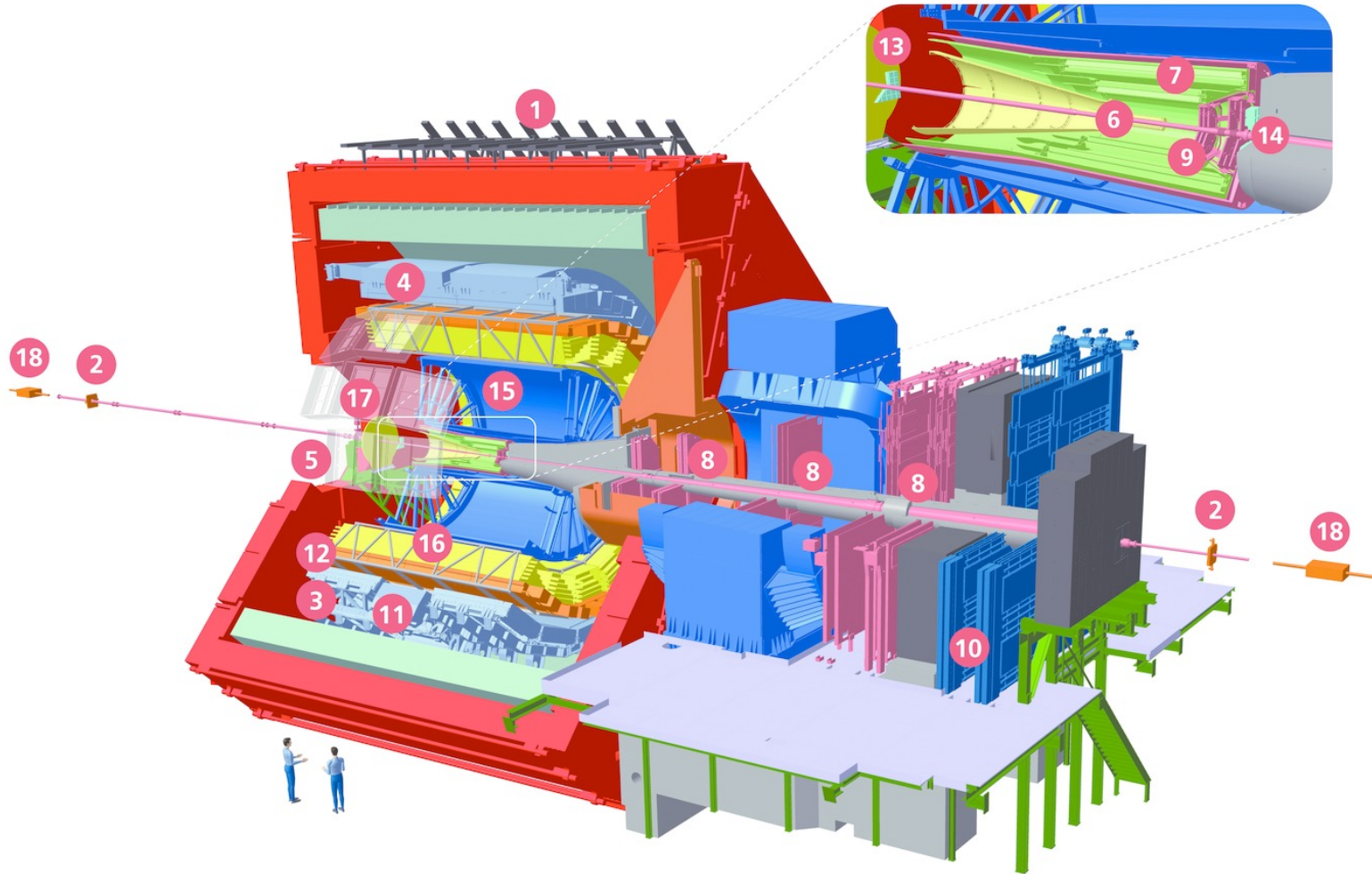
# **Voiko kvarkki-gluoniplasmaa (QGP) tutkia kokeellisesti?**

# Relativistiset raskas-ionitörmäykset

LHC:ssa lyijy – lyijy törmäyksiä noin 1 kk / ajovuosi

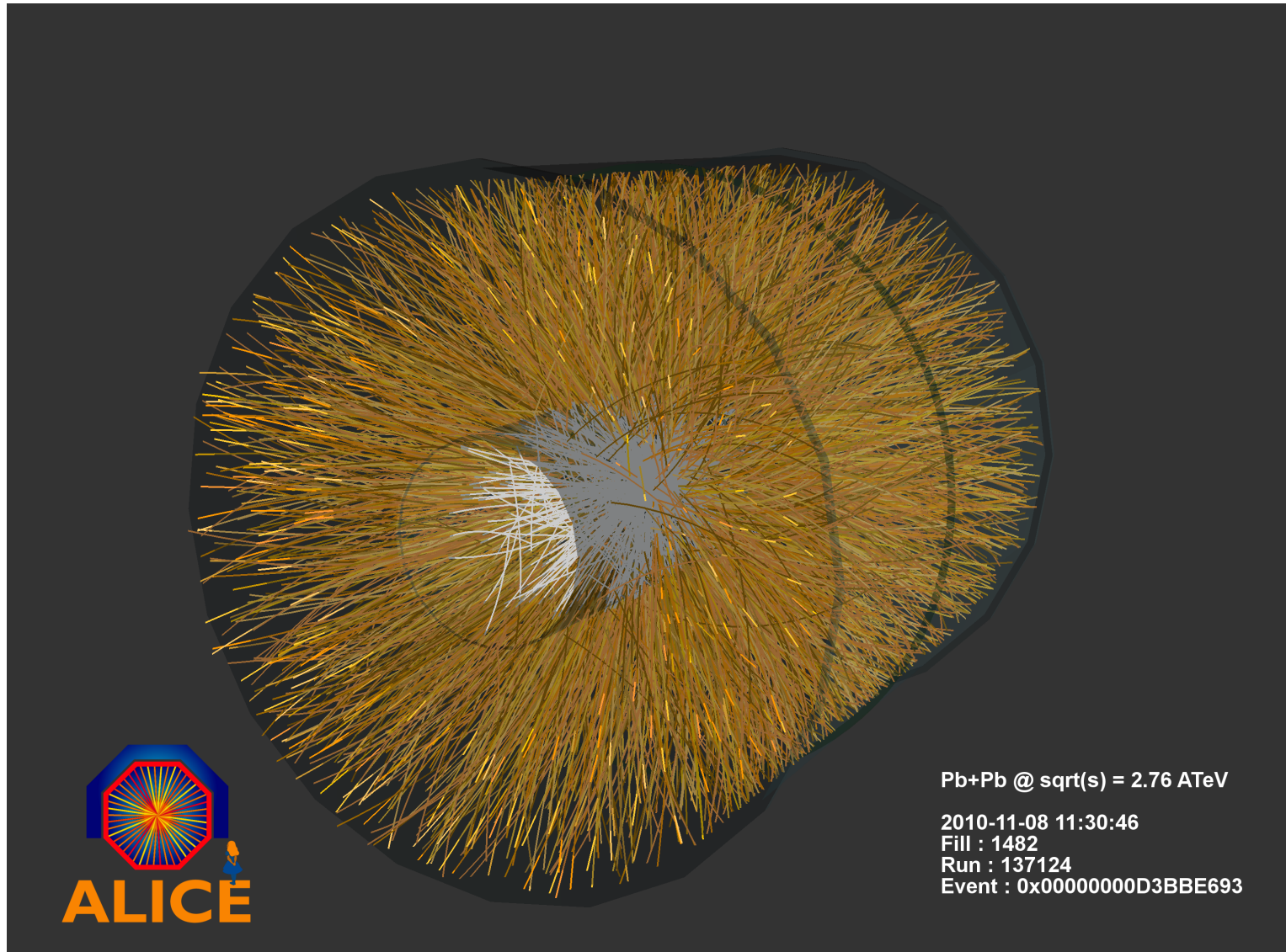


# A Large Ion Collider Experiment = ALICE @ LHC



- 1 ACORDE | ALICE Cosmic Rays Detector
- 2 AD | ALICE Diffractive Detector
- 3 DCal | Di-jet Calorimeter
- 4 EMCal | Electromagnetic Calorimeter
- 5 HMPID | High Momentum Particle Identification Detector
- 6 ITS-IB | Inner Tracking System - Inner Barrel
- 7 ITS-OB | Inner Tracking System - Outer Barrel
- 8 MCH | Muon Tracking Chambers
- 9 MFT | Muon Forward Tracker
- 10 MID | Muon Identifier
- 11 PHOS / CPV | Photon Spectrometer
- 12 TOF | Time Of Flight
- 13 T0+A | Tzero + A
- 14 T0+C | Tzero + C
- 15 TPC | Time Projection Chamber
- 16 TRD | Transition Radiation Detector
- 17 V0+ | Vzero + Detector
- 18 ZDC | Zero Degree Calorimeter

# Oikea mitattu raskasionitörmäys. Syntyikö QGP:ta?

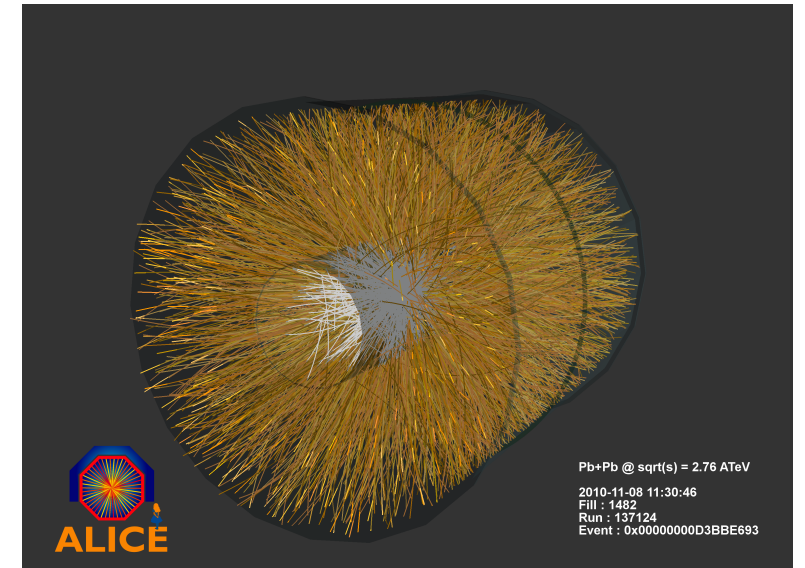


**Tärkeä opetus:**

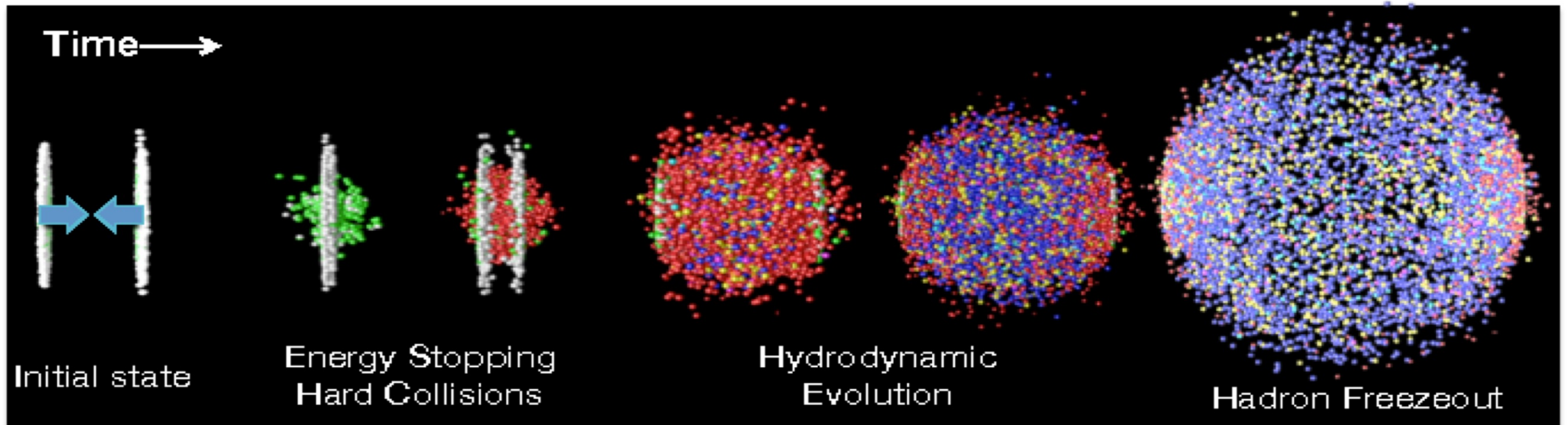
**Mittaus yksin ei kerro (juuri) mitään,  
ilman teoriaa et voi tulkita näkemääsi.**

**Kääntäen, ilman mittausta et voi todentaa  
ajatusmalliesi kuvaavan luontoa. (=ongelma säiemalleissa)**

(Keskeistä myös ”uuden fysiikan” etsimisessä mm. CMS ja ATLAS kokeissa.)



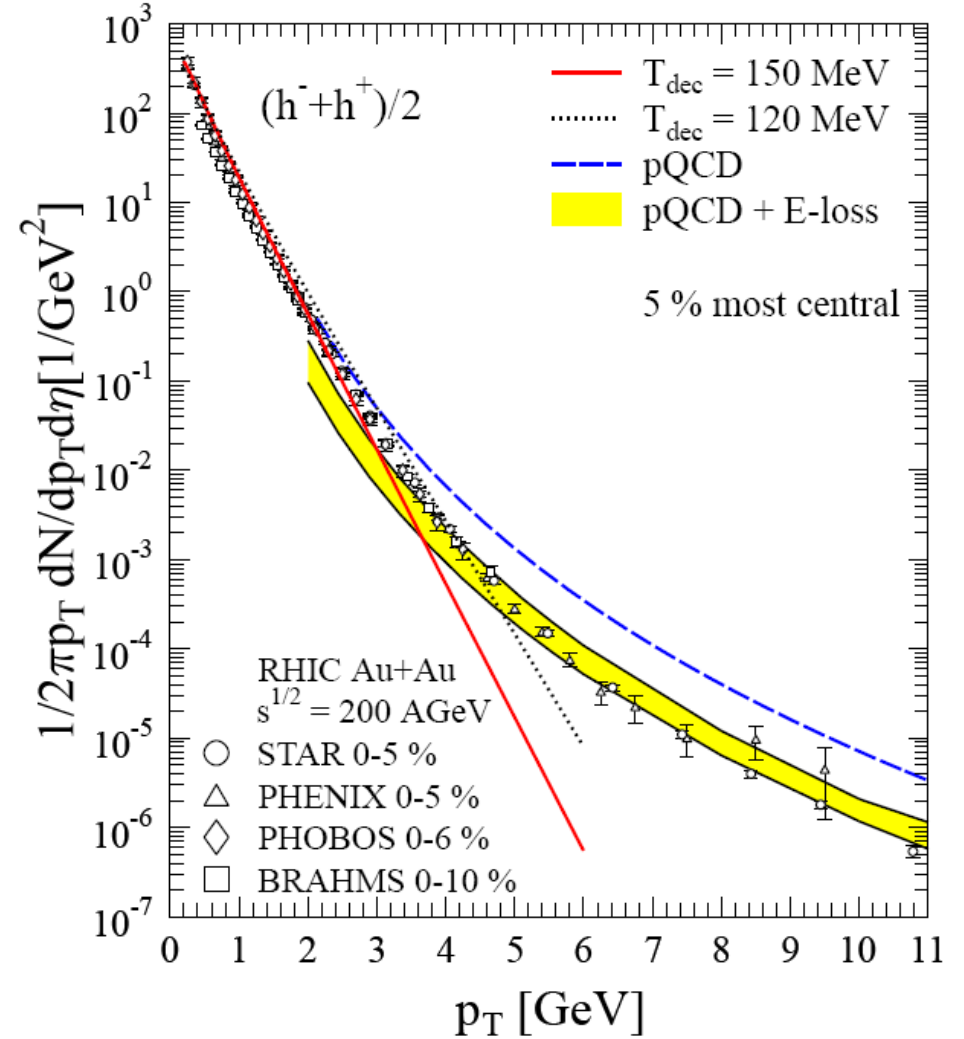
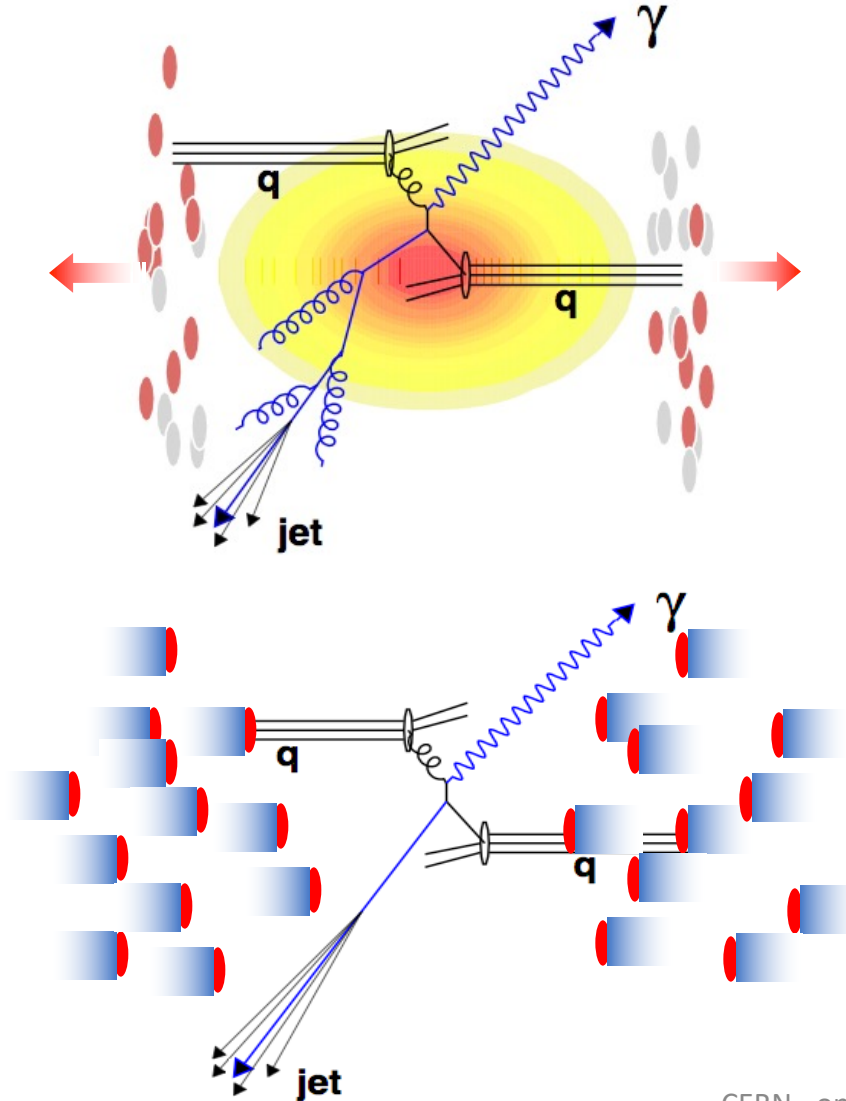
# Raskasionifysiikan standardimalli



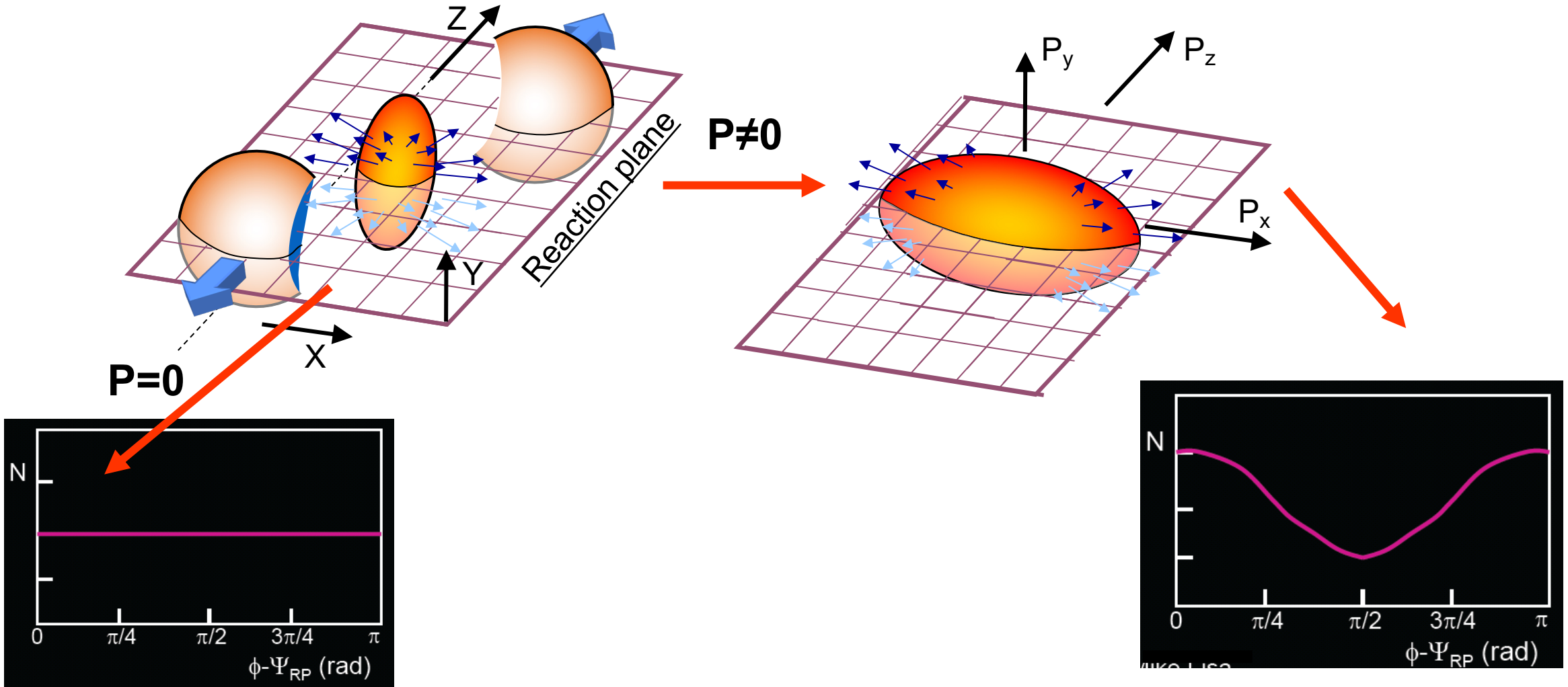
Plasman elinaika on erittäin lyhyt, kaikki ohi  $\sim(1-10) \times 10^{-23}$  s!



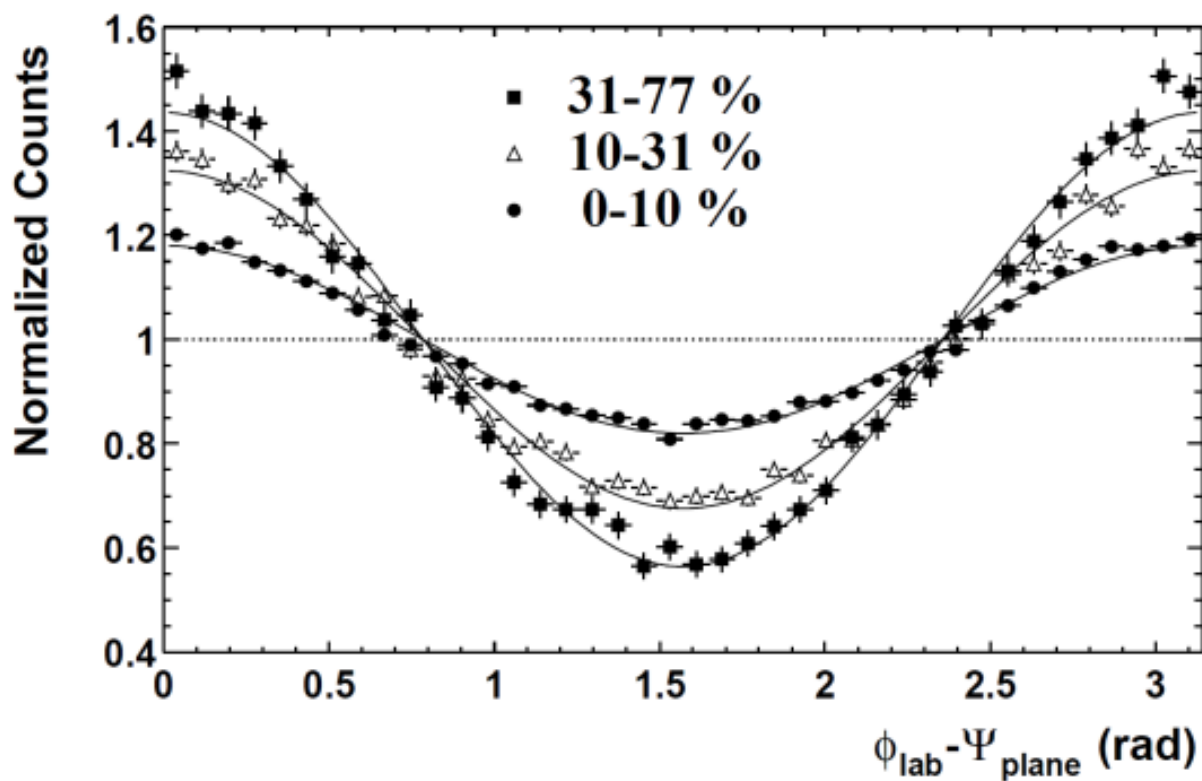
# 1. kysymys: onko syntynyt väliainetta? - Kyllä!



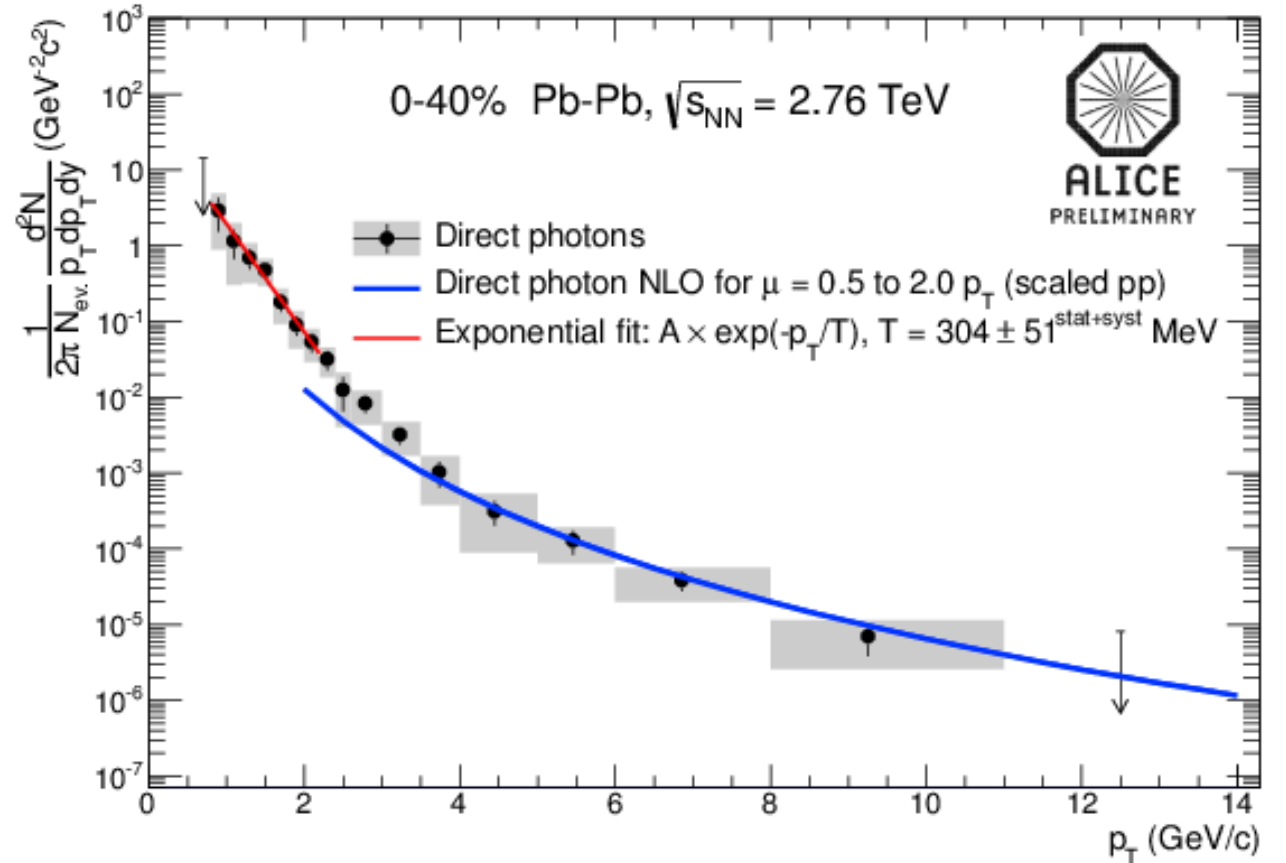
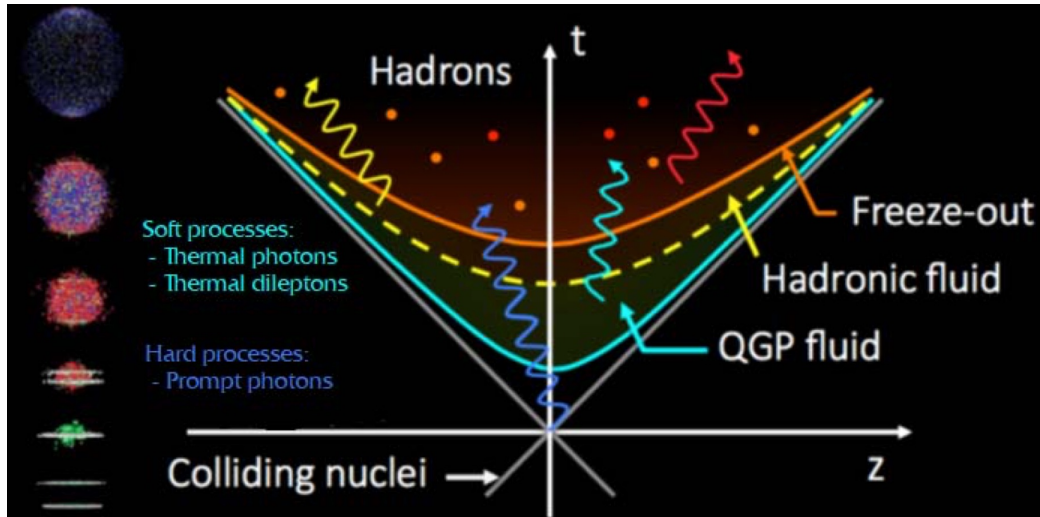
## 2. kysymys: onko systeemissä paine?



## 2. kysymys: onko systeemissä paine? - Kyllä!



# 3. kysymys: onko systeemillä lämpötila? - Kyllä!



Arvio keskimääräiselle lämpötilalle  $\langle T \rangle \sim 300 \text{ MeV} > T_c \sim 160 \text{ MeV}$

## Loppuajatuksia:

Yleinen tieteellinen konsensus: QGP syntyy Pb+Pb @ LHC

### Tämän päivän kysymys: mitä ovat QGP:n ominaisuudet?

- Kuinka suuri on virtausvastus (viskositeetti)?
- Kuinka energiahäviöt tapahtuvat aineessa (kuljetuskertoimet)?
- Termalisoituvatko raskaat kvarkit, kuinka ne virtaavat aineen mukana?
- Kuinka aine termalisoituu, ja kuinka nopeasti?
- Miten ylitiheä gluoninen systeemi kehittyy kohti termistä tasapainoa?
- Millainen täsmälleen on törmäyksen alkutila?
- Jne.

**Kiitos!**