

Der Urknall im Labor Das ALICE Experiment



bmb+f - Förderschwerpunkt

ALICE

Großgeräte der physikalischen
Grundlagenforschung



Der Urknall im Labor

Das ALICE Experiment

- CERN und der LHC Beschleuniger
- Wozu Experimente am LHC
- Das ALICE Experiment
- Strangeness
- Ausblick



CERN, das Europäische Teilchenlabor

Conseil Européenne pour la Recherche Nucléaire

- Gegründet 1954, älter als EU
- Europäische Mitgliedstaaten
- Budget ca 1.200 MCHF/a, Deutschland 19%
- Non-member states ~100 MCHF/a
- Zur Zeit ca 2500 staff, 8000 externe ‚user‘
(ALICE: 1800 Mitglieder)



Large Hadron Collider (Large Heavy Ion Collider)





Der Large Hadron Collider (LHC)

- 27 km Ringbeschleuniger (früherer LEP-Tunnel)
- supraleitende Ablenkmagnete, 8 Tesla
 - ~200 000 mal Erdfeld
- 1.9 K: der kälteste und größte Kühltank der Welt
- 2 in 4 Punkten **kollidierende Teilchenstrahlen**
 - **Protonen von 6.5 TeV, oder**
 - **Bleiatomkerne von 2.5 TeV/Nukleon**
 - Strahlenergie begrenzt durch Ablenkfeld (für gegebenen Ring)
- Historie:
 - Idee 1984
 - 1991: Erster Magnet mit 10 Tesla, Proposal und Beschluss

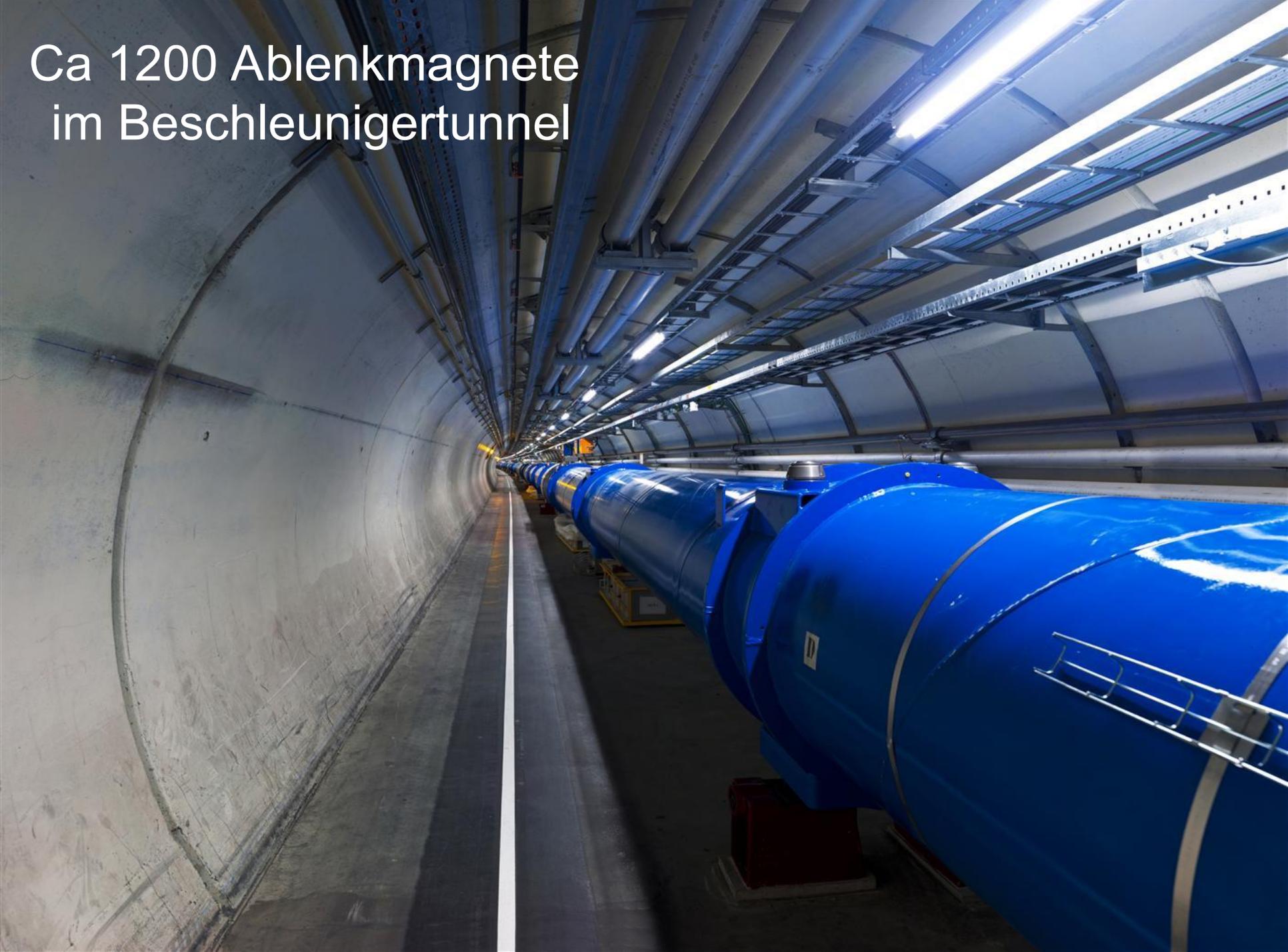


Erster Magnet installiert am 7. März 2005



18 m lang
35 t schwer

Ca 1200 Ablenkmagnete
im Beschleunigertunnel



Raum – Materie – Zeit

Energie ist der Schlüssel

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

Werner Heisenberg

kleine Strukturen – kleine Abstände

$$E = m \cdot c^2$$

Albert Einstein

neue und schwere Materie

$$\langle E \rangle \approx k_b \cdot T$$

Ludwig Boltzmann

hohe Temperaturen – frühes Universum



Materie bei extremen Bedingungen

- $E = 7000 m_0 c^2$ 'ultra-relativistisch' (2800 für Pb)
 $v = 99.99999991\% c$, d.h. $v = c - 10 \text{ km/h}$
- $T \sim 10^{13} \text{ K}$ (Sonne $1.4 \cdot 10^7$ im Zentrum)
- Dichte: ca. 50 ... 100 x Kerndichte ($3 \cdot 10^{14} \text{ t/m}^3$)
- Nukleonen 'schmelzen' zum **Quark-Gluon-Plasma**
- Bedingungen wie kurz nach dem Urknall ($\sim 1 \mu\text{s}$)

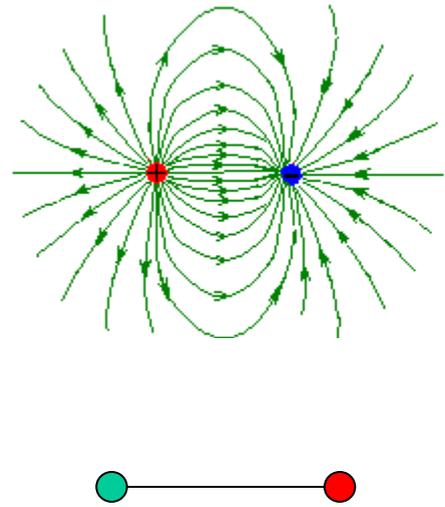
Die Welt des Kleinsten

	Größe [m]	Kraft	Ladungen	Austausch- teilchen	Theorie
Festkörper		Van der Waal's-Kraft			
Atome	10^{-10}	Elektro- Magnetisch	El. Ladung 1+1 (+,-)	Photon	Quanten- Elektro- Dynamik
Kerne	10^{-15}	'Kernkraft'			
Quarks	$<10^{-18}$	Starke WW	'Farbe' 3+3 (rgb)	Gluon	Quanten- Chromo- Dynamik

Was wissen wir über Quarks

(A) Abstandsgesetz

- Elektrische Kraft $\propto 1/R^2$
- Farbkraft \sim konstant
 - unabhängig vom Abstand
 - 'String' zwischen Quarks



(B) Neutrale Objekte

- Elektrisch: $\oplus + \ominus \rightarrow$ neutral
- Farbladung: 3 Farben, oder Farbe + Anti-Farbe \rightarrow neutral



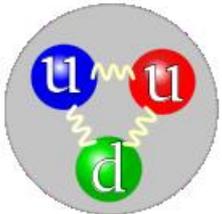
ALICE

Stabile Objekte aus Quarks

■ Farbneutral sind

- Mischung von 3 Farben:
Baryon, z.B. Proton, Neutron

- Farbe + Antifarbe: Meson, z.B. Pi-Meson

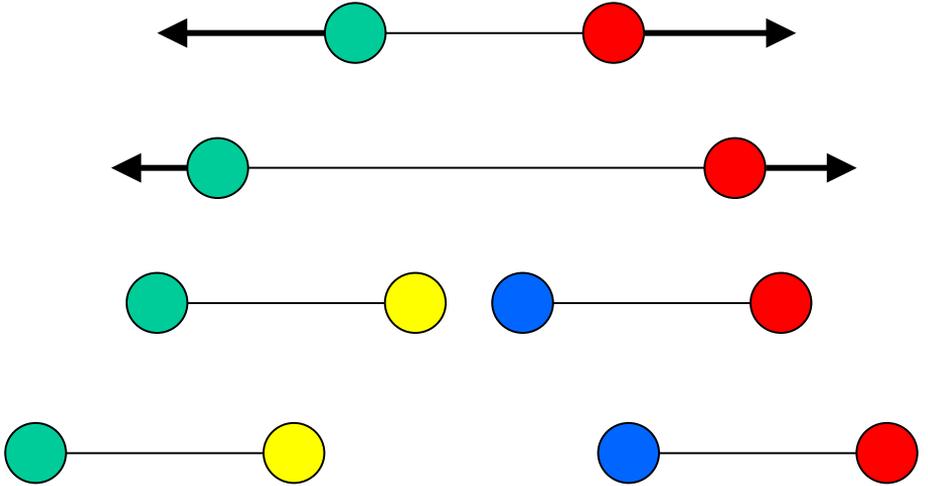


■ Quarks können nicht getrennt werden:

‘Confinement’

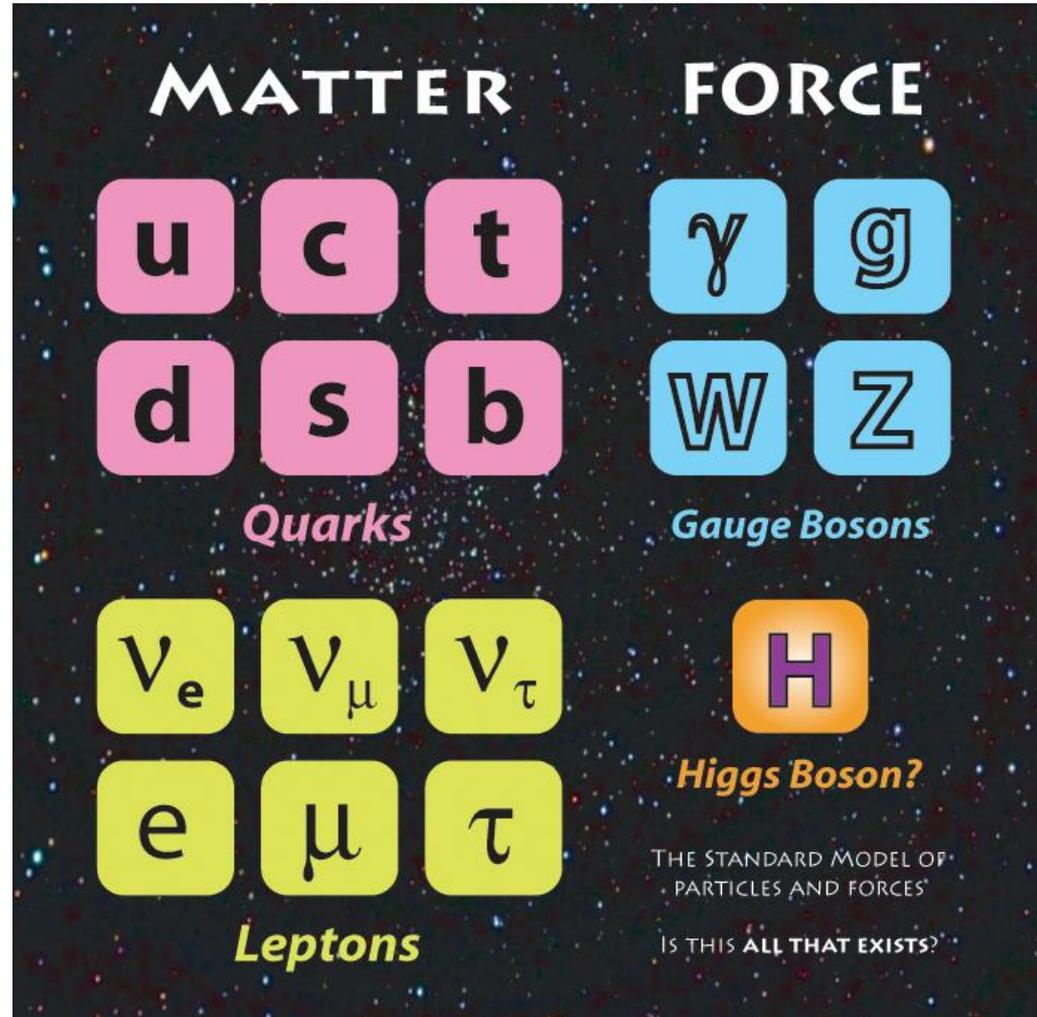
- Energieaufwand $\rightarrow \infty$
- ‘String reißt’ unter

Erzeugung eines Mesons



Vollendung oder Überwindung des **Standardmodells**

- Bis 1995 alles gefunden außer **Higgs**
- Das Higgs-Teilchen ist für die träge Masse zuständig
- 2012: **Higgs** mit Masse ~ 125 GeV am LHC
- Teilchen der **Dunklen Materie**? Bis jetzt noch nichts gefunden.





ALICE

Was tun wir bei ALICE?

- Kollisionen zwischen Bleikernen (416 Nukleonen Protonen und Neutronen)
- 5 TeV pro Nukleonpaar
 - 0.2 mJ = kinetische Energie einer Fliege im Flug
 - Auf winzigstem Raum: verhält sich zu einem Sandkorn wie ein Sandkorn zur Erde!
- Als **Wärme** bzw. **Temperatur: 10^{13} Grad**,
entspricht etwa 1 μ s nach dem Urknall
- 50.000 Kollisionen pro Sekunde, davon etwa 1000 ‚zentral‘
- Im Feuerball ‚schmelzen‘ die Nukleonen in Quarks und Gluonen zum

Quark-Gluon-Plasma

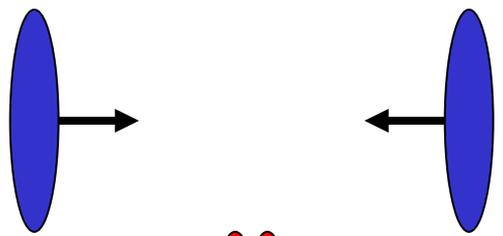
- zerfällt in ca 50.000 Teilchen, von denen ALICE etwa 5.000 sieht und einzeln misst



Szenario einer Schwerionenkollision

ALICE

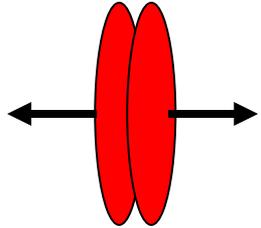
Vor dem Stoß



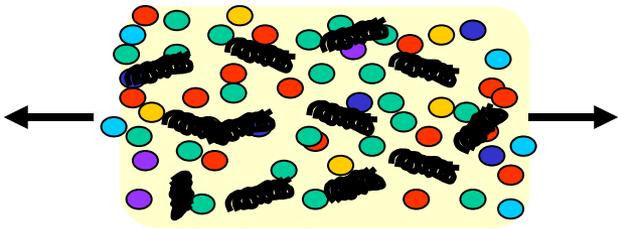
Normale Kernmaterie:

Dichte ca. 10^{18} t/m³

Durchdringung,
Hohe Teilchendichte
Hohe Energiedichte

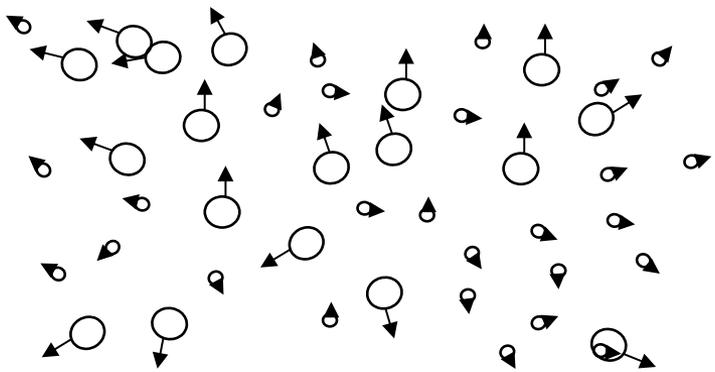


Feuerball



Quark-Gluon Plasma

Expansion
Hadronisierung
Entkopplung



**Nicht mehr
wechselwirkende
Elementarteilchen
→ zum Detektor**

↓ **Zeit**

Zentrale Kollision Pb-Pb

Bis zu 10.000 Teilchen im Detektor

Wir messen alles:

- Richtung
- Energie
- Teilchenart

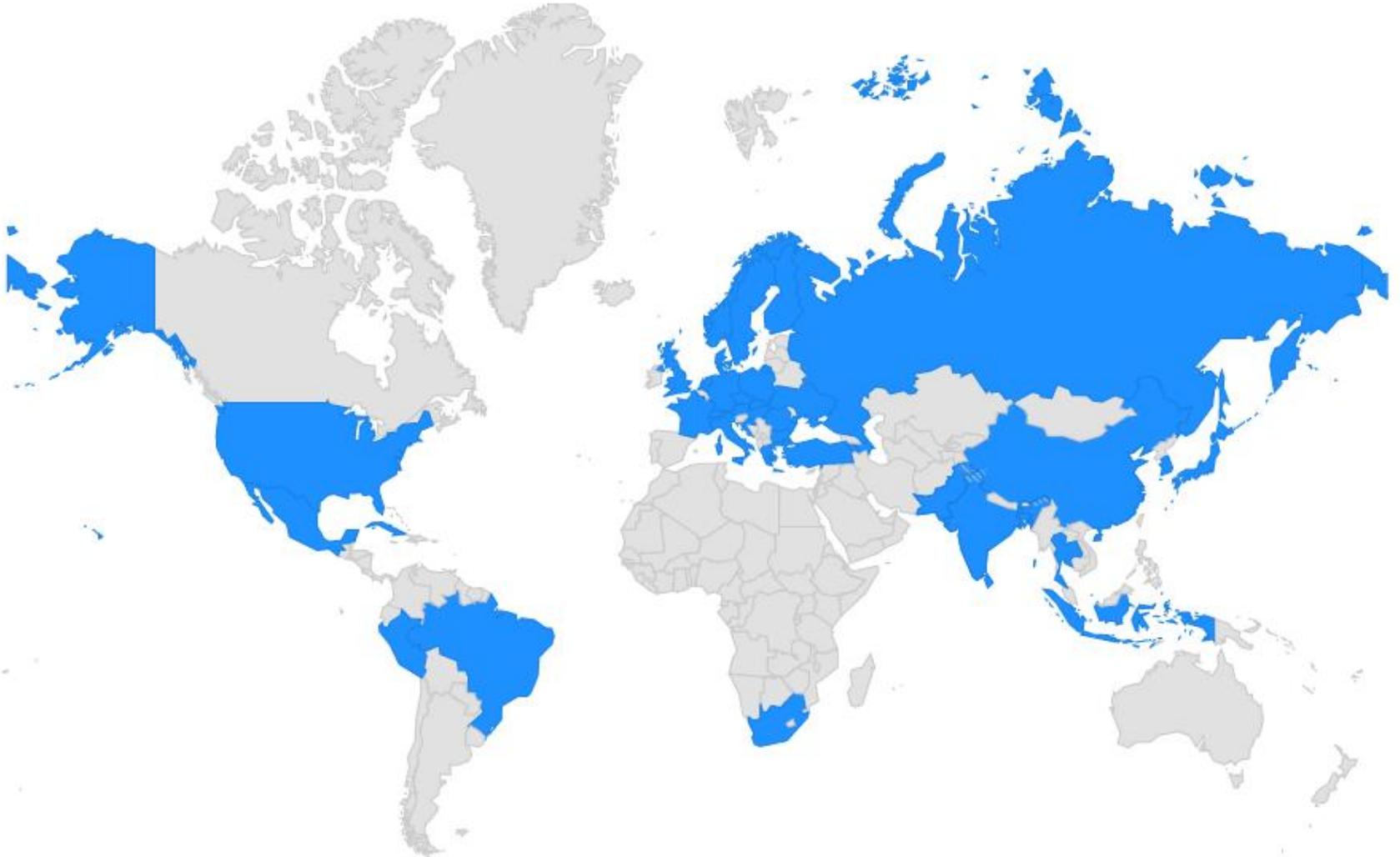
für alle Teilchen!

Eine technische Herausforderung



The ALICE Collaboration

40 countries, 170 institutes, 2006 members



Der ALICE-Detektor

RICH

L3-Magnet

EMCAL

PHOS

TOF

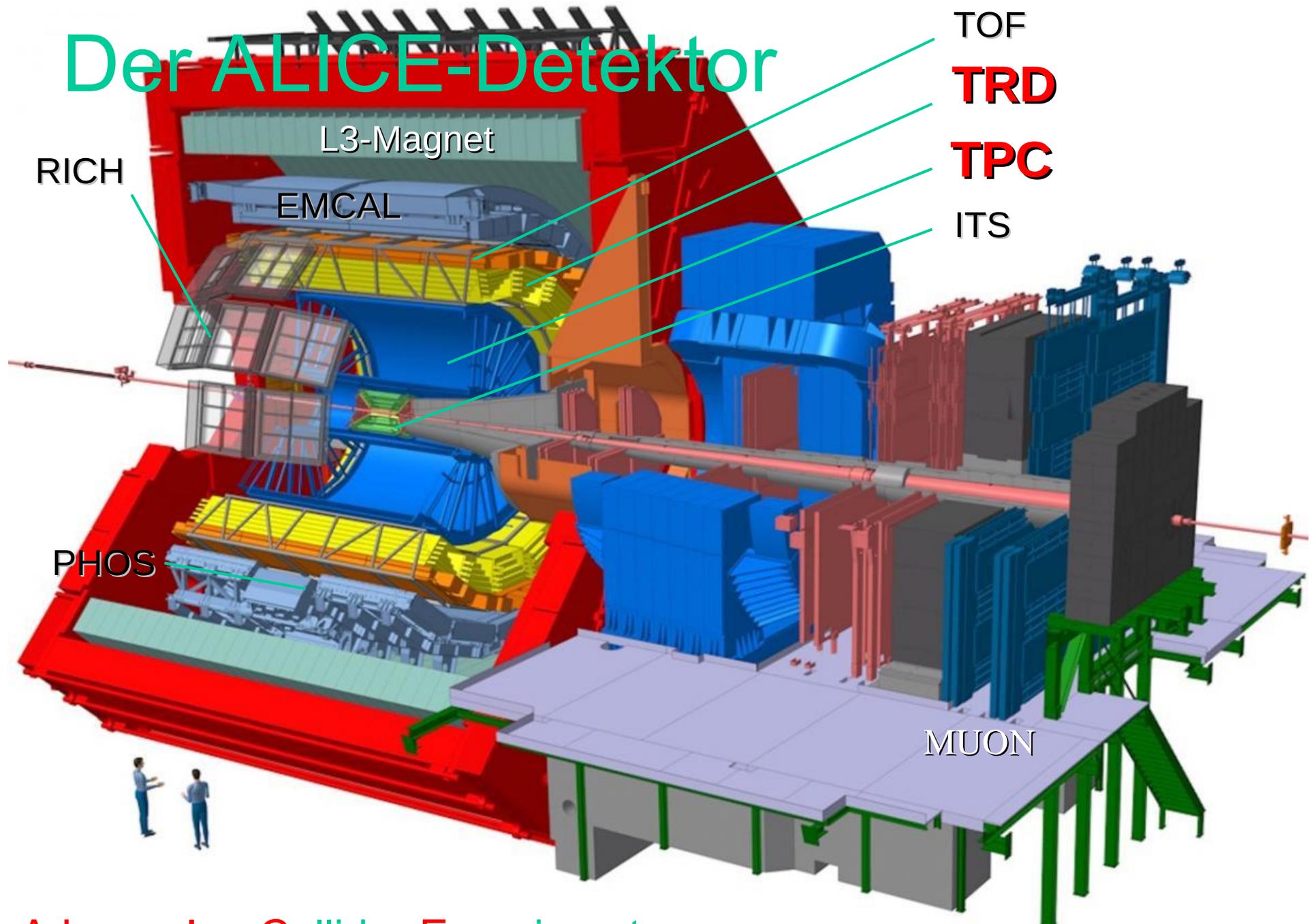
TRD

TPC

ITS

MUON

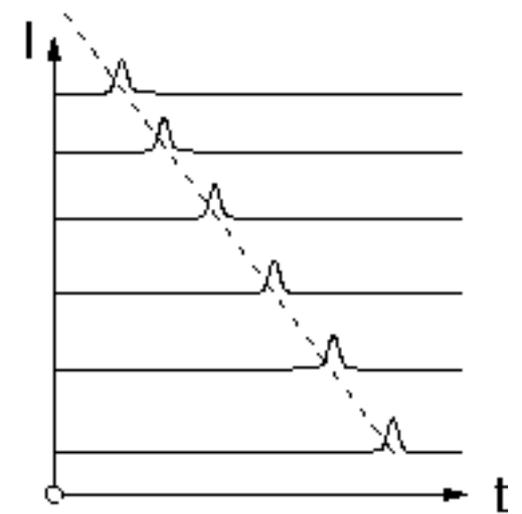
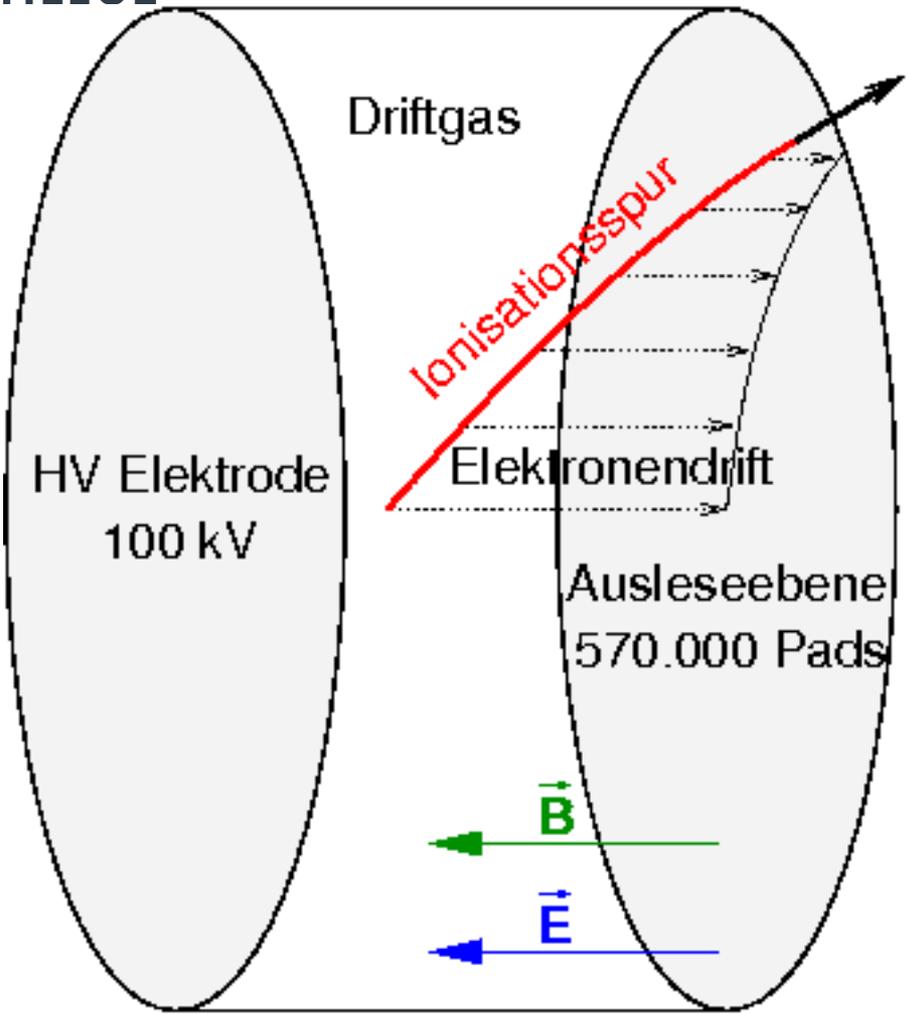
A Large Ion Collider Experiment





Time Projection Chamber, Prinzip

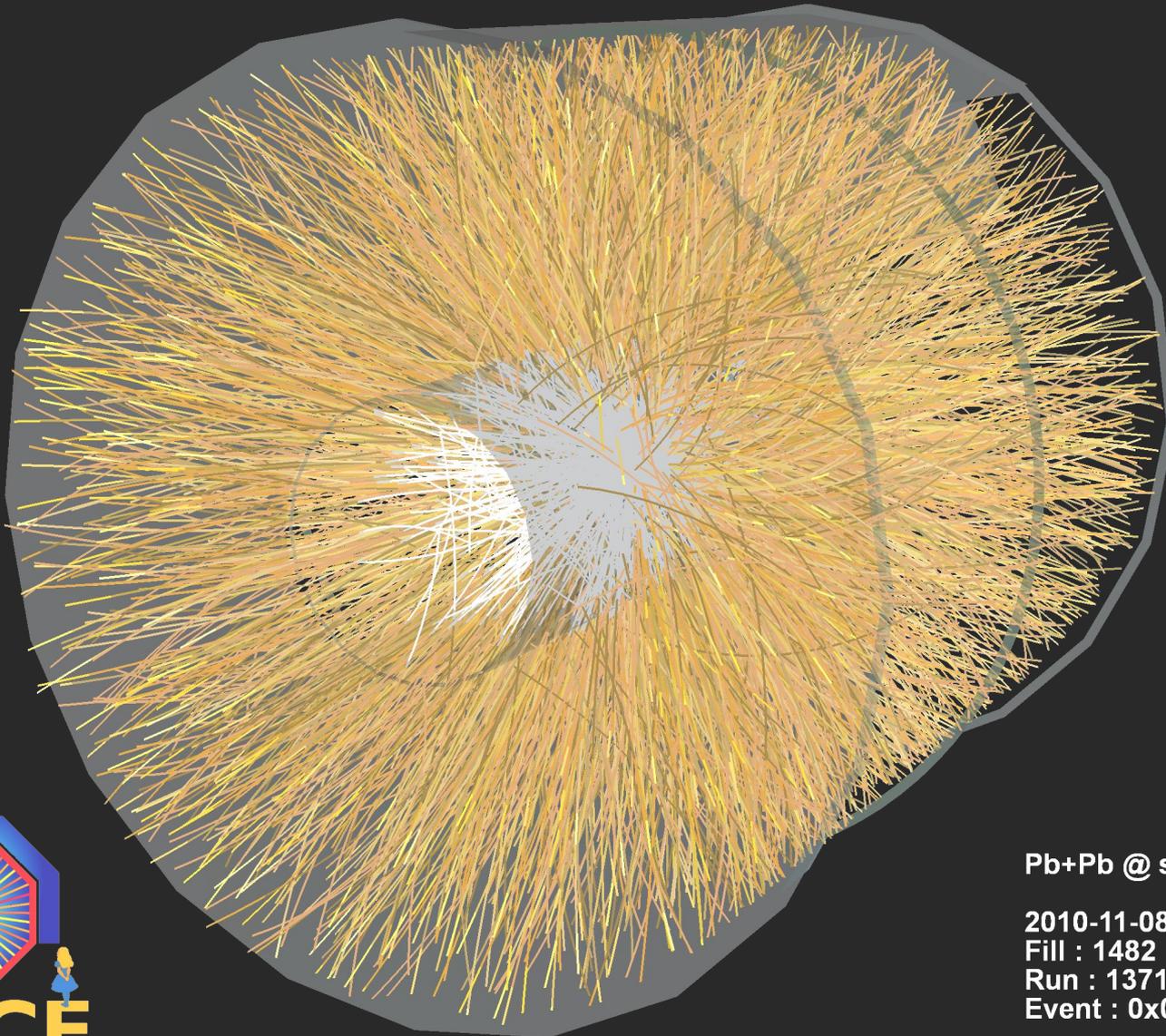
ALICE



- 3-dimensional
- Spurkrümmung → Energie
- Spurdichte → Teilchenidentifikation
- 1 Spurbild ~ 1 GB

ALICE TPC: eine 500-Mpixel-Kamera mit 50 kHz

Eine zentrale Bleikollision in ALICE



Pb+Pb @ $\sqrt{s} = 2.76$ ATeV

2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x0000000D3BBE693



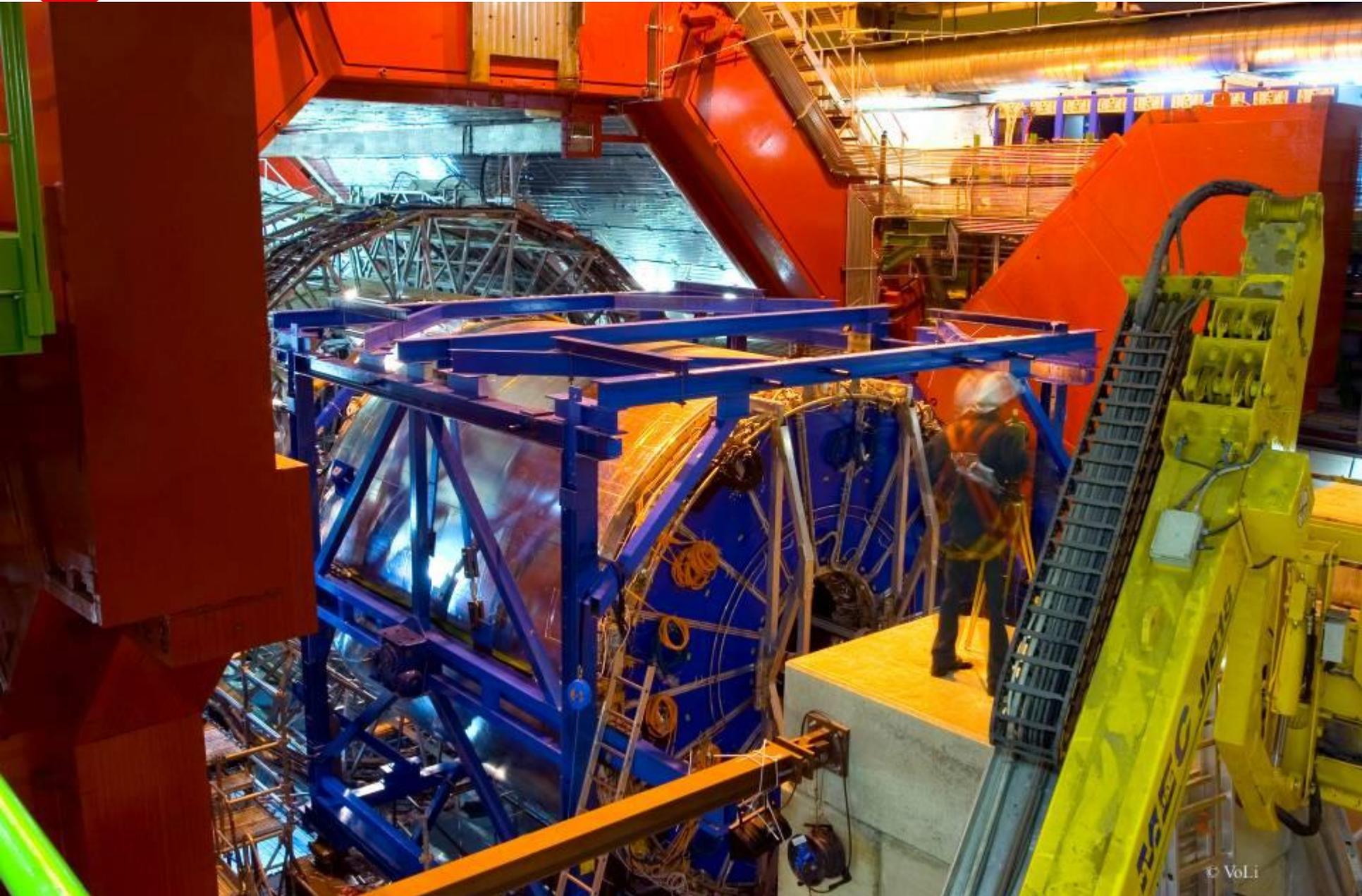
ALICE







ALICE Januar 2007



Offen für Wartung





Magnet geschlossen



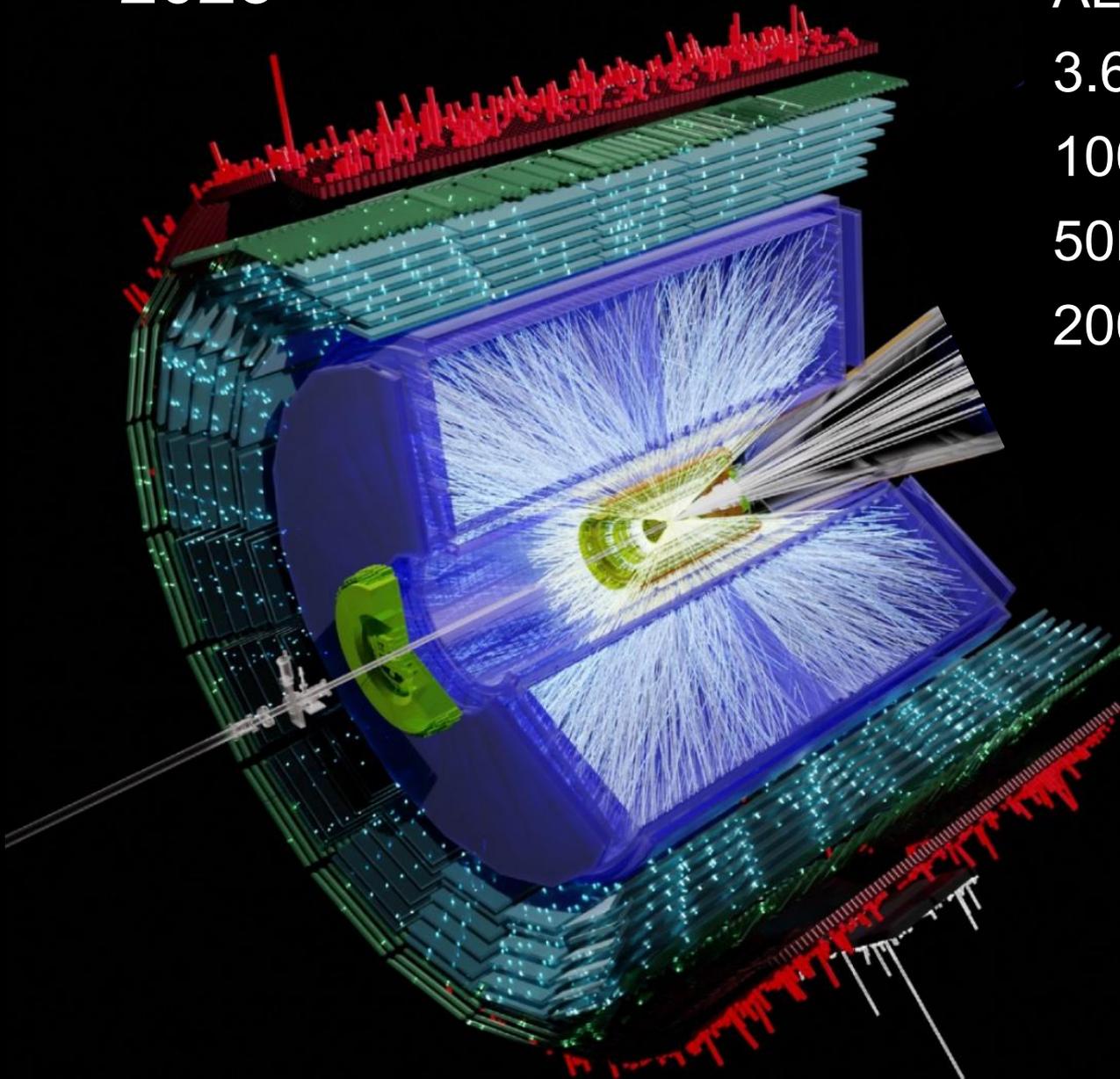
ALICE

Programm: Was lernen wir



2023

ALICE Datenaufnahme
3.6 TeraByte/s front-end
100 GigaByte/s to disk
50k CPUs
2000 GPUs



ALICE

Run 3 Pb-Pb

$\sqrt{s_{NN}} = 5.36 \text{ TeV}$

27 September 2023, 04:50



Signale zur Diagnose des Quark-Gluon-Plasmas

ALICE

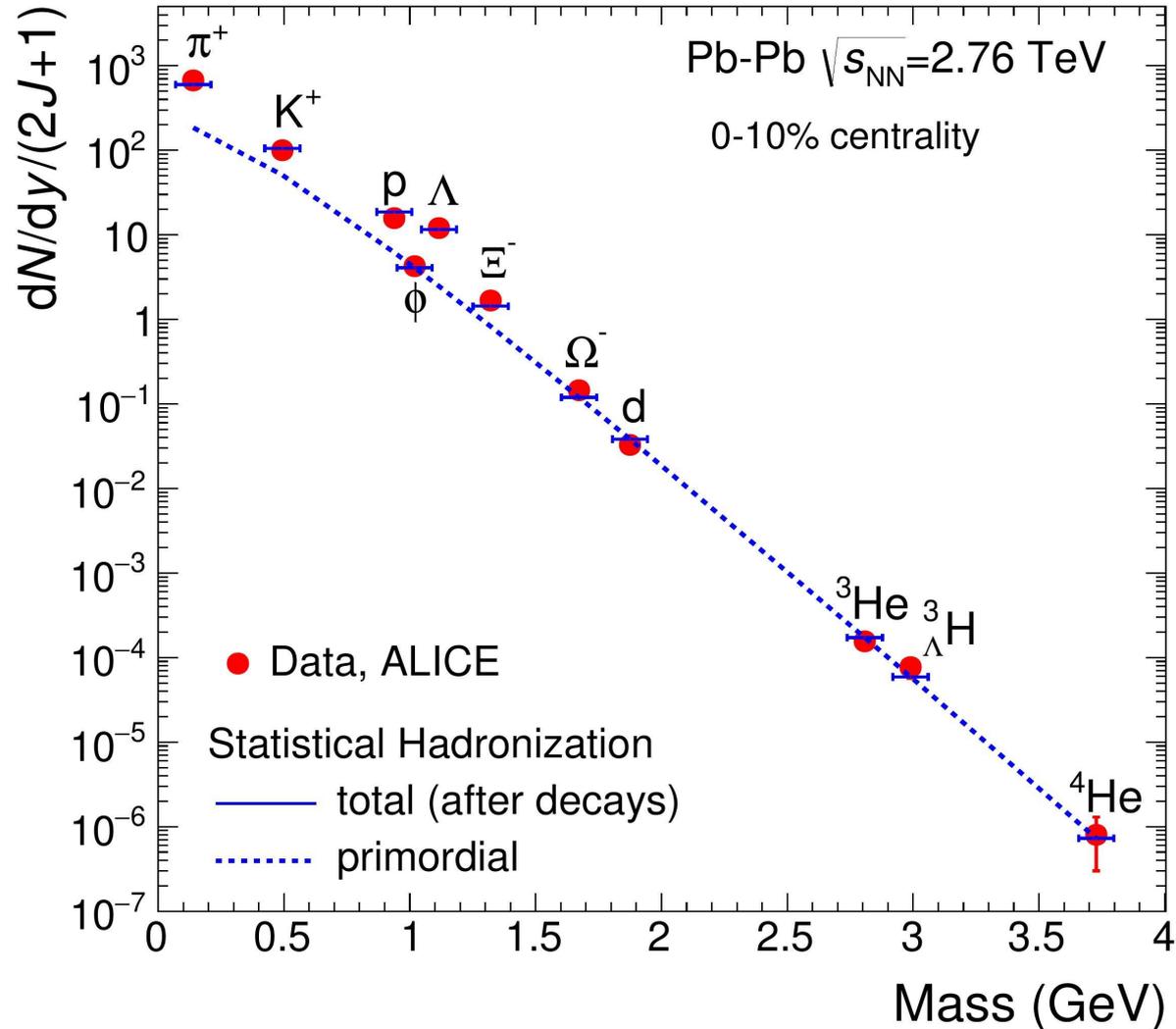
- Anzahl der erzeugten Teilchen (genauer: Teilchendichte dN/dy)
- Hanbury Brown-Twiss Effekt (Quantenmechanische Interferenz):
 - Größe des Feuerballs beim 'freeze-out'
 - Inelastizität der Kollision, Energiedichte
- Impulsspektrum der Hadronen
 - Temperatur bei der Hadronisierung
 - Hydrodynamische Eigenschaften: 'flow', **Viskosität extrem klein**
- Produktion schwerer Quarks (s) → Temperatur im QGP
- Jets
 - Energieverlust von Quarks im QGP
- ...

- alle Signale im Vergleich mit Proton-Proton-Kollisionen

Je höher die Temperatur, desto leichter werden schwere Teilchen erzeugt

Temperatur:
156 MeV
($1.83 \cdot 10^{12}$ K)

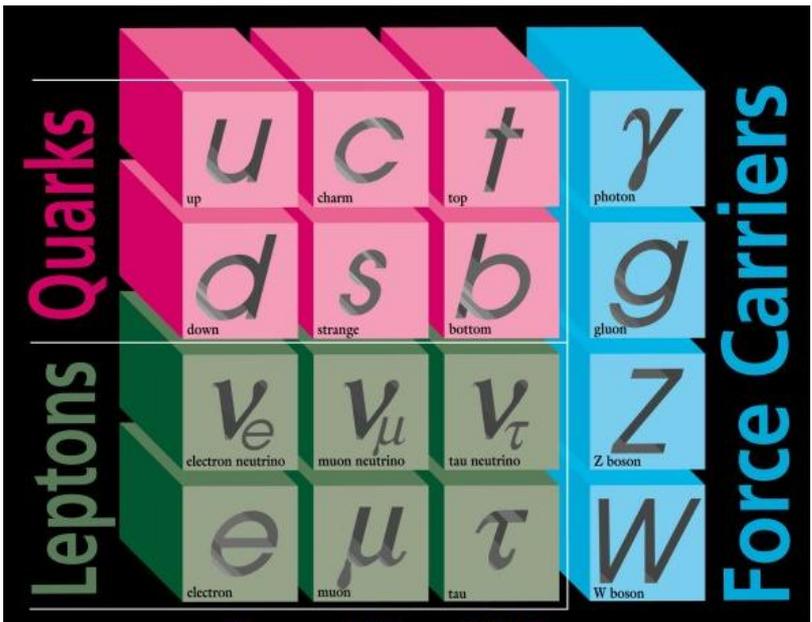
10^4 mal höher als
im Zentrum der Sonne





Strangeness und Quark-Gluon-Plasma

ALICE



Standardmodell

- Normale Materie: u, d, e, ν, γ
- Alle anderen Quarks nicht stabil \rightarrow nur kurzzeitig erzeugbar
- Am leichtesten: s-Quark
- Teilchen die s-Quarks enthalten heißen 'seltsam' (strange)
- Das s-Quark ist viel schwerer als u, d , aber leichter als die anderen
- Thermodynamik: je höher die Temperatur, desto schwerere Teilchen werden spontan erzeugt

Im Quark-Gluon-Plasma sollten 'strange quarks' reichlich entstehen

Hadronisierung \rightarrow seltsame Teilchen



Danke für Ihre Aufmerksamkeit

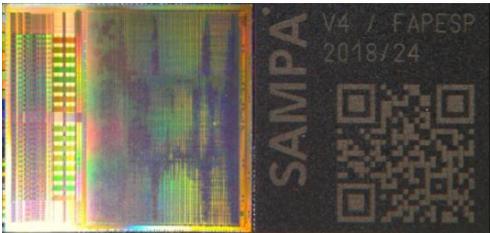
Backup, weitere Folien zur Ergänzung





ALICE

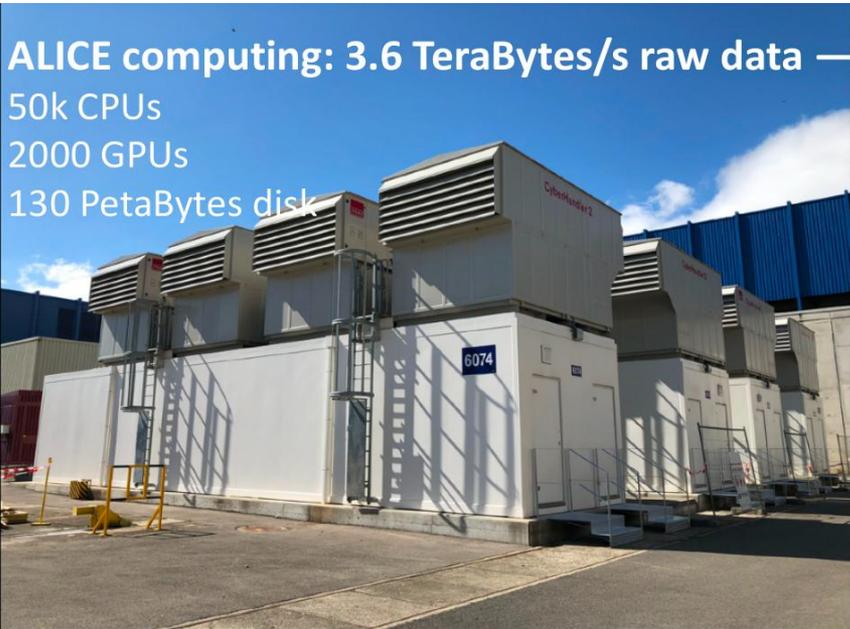
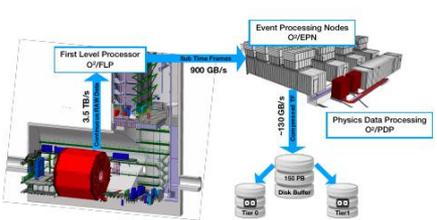
ALICE Data Acquisition since 2022



SAMPAs chip



common readout unit
(world's largest FPGA)

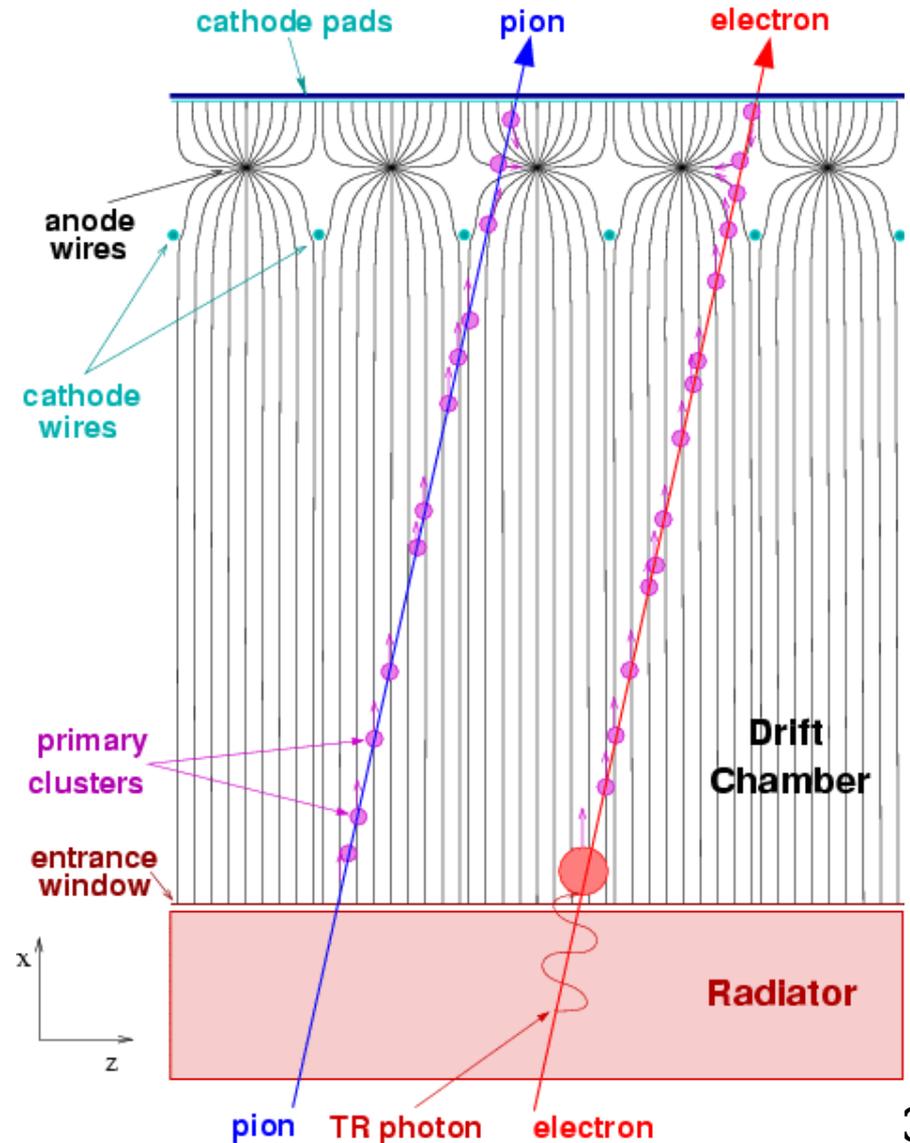


ALICE computing: 3.6 TeraBytes/s raw data → 100 GBytes/s to disk
50k CPUs
2000 GPUs
130 PetaBytes disk



Transition Radiation Detector = Übergangs-Strahlungs-Detektor

- Identifikation von schnellen Elektronen:
 - Nur sie erzeugen im Radiator Röntgenquanten
 - dadurch lokal erhöhte Energieabgabe im Gas (Xenon)
- 6 Lagen in ALICE
 - Fehlidentifikationen < 1%
- Radiator: viele Grenzflächen

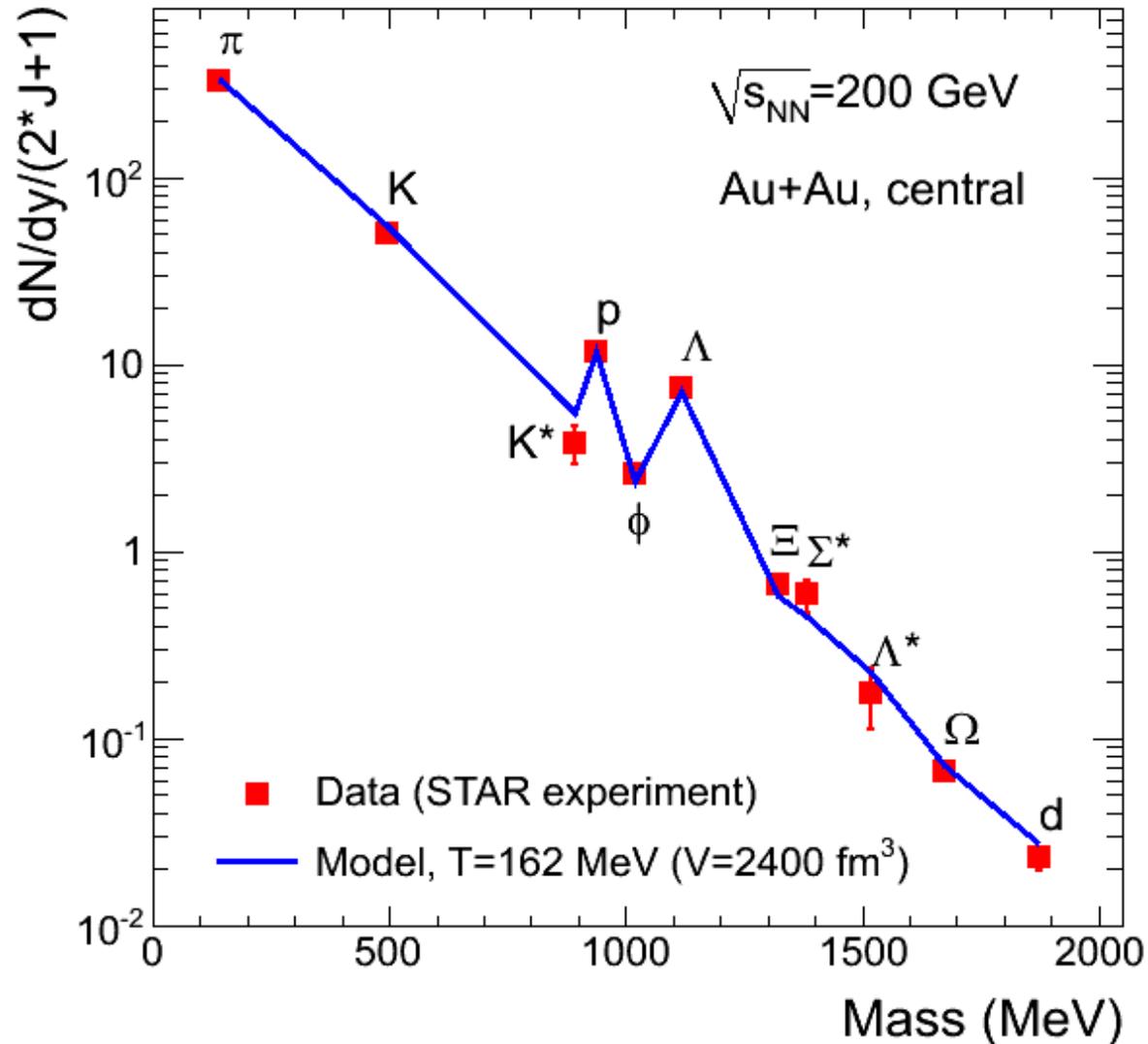




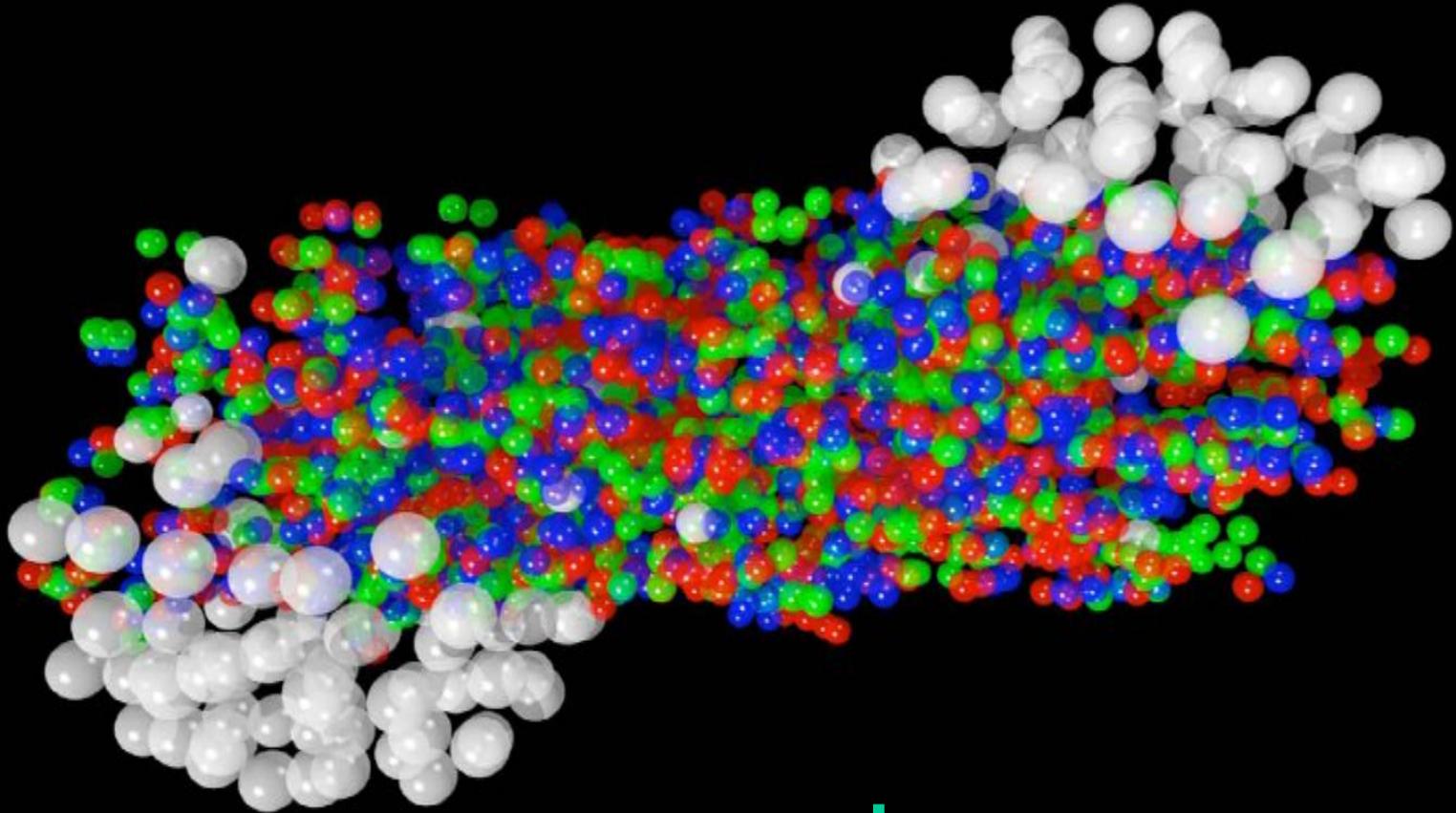
Einbau eines TRD Supermoduls



Je höher die Temperatur, desto leichter werden schwere Teilchen erzeugt



Zwei Kerne kurz nach der Kollision, Simulation



Hadronen

quarks



ALICE

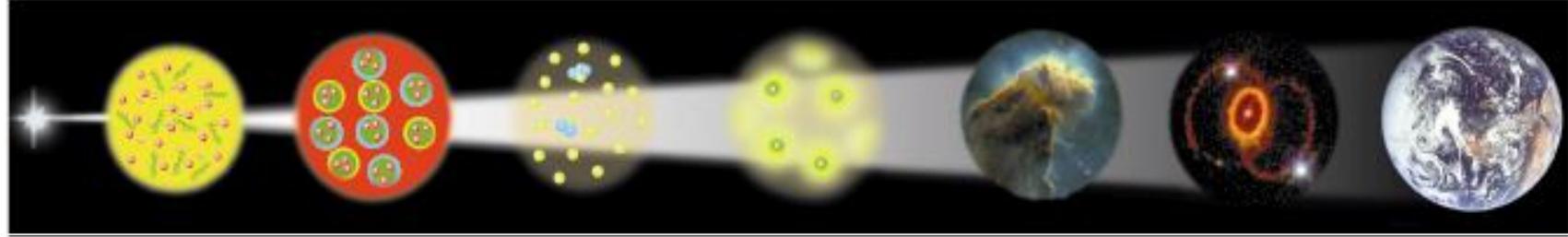
'Die Reise zum Urknall'

Natur



Quark-Gluon Plasma Nukleonen Kerne Atome Heute

Urknall



10^{-6} sec

10^{-4} sec

3 min

15 Mill. Jahre



Experiment

Im Inneren der TPC
vor Einbau der Auslese-Ebene



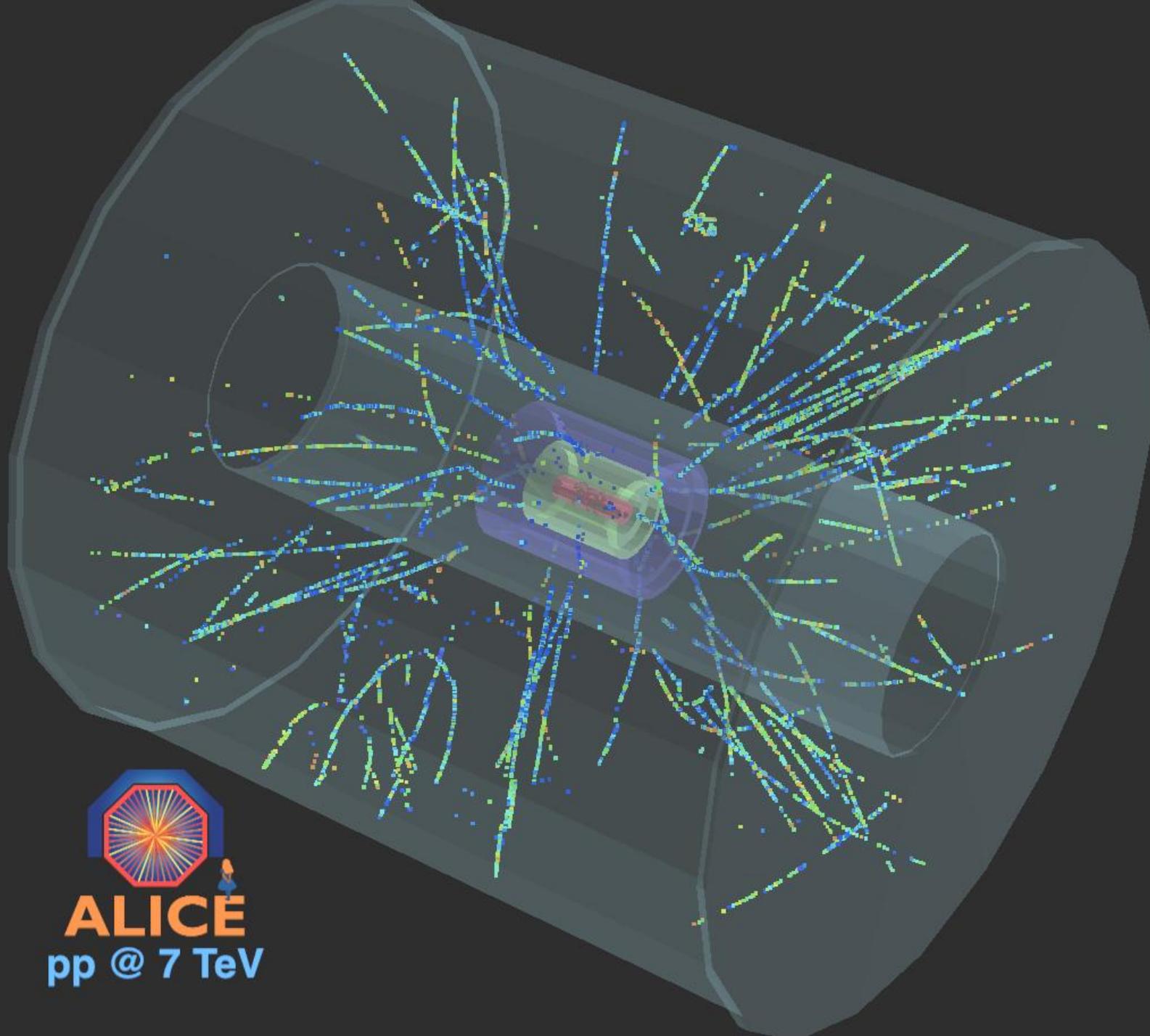


ALICE: Baustelle 2004



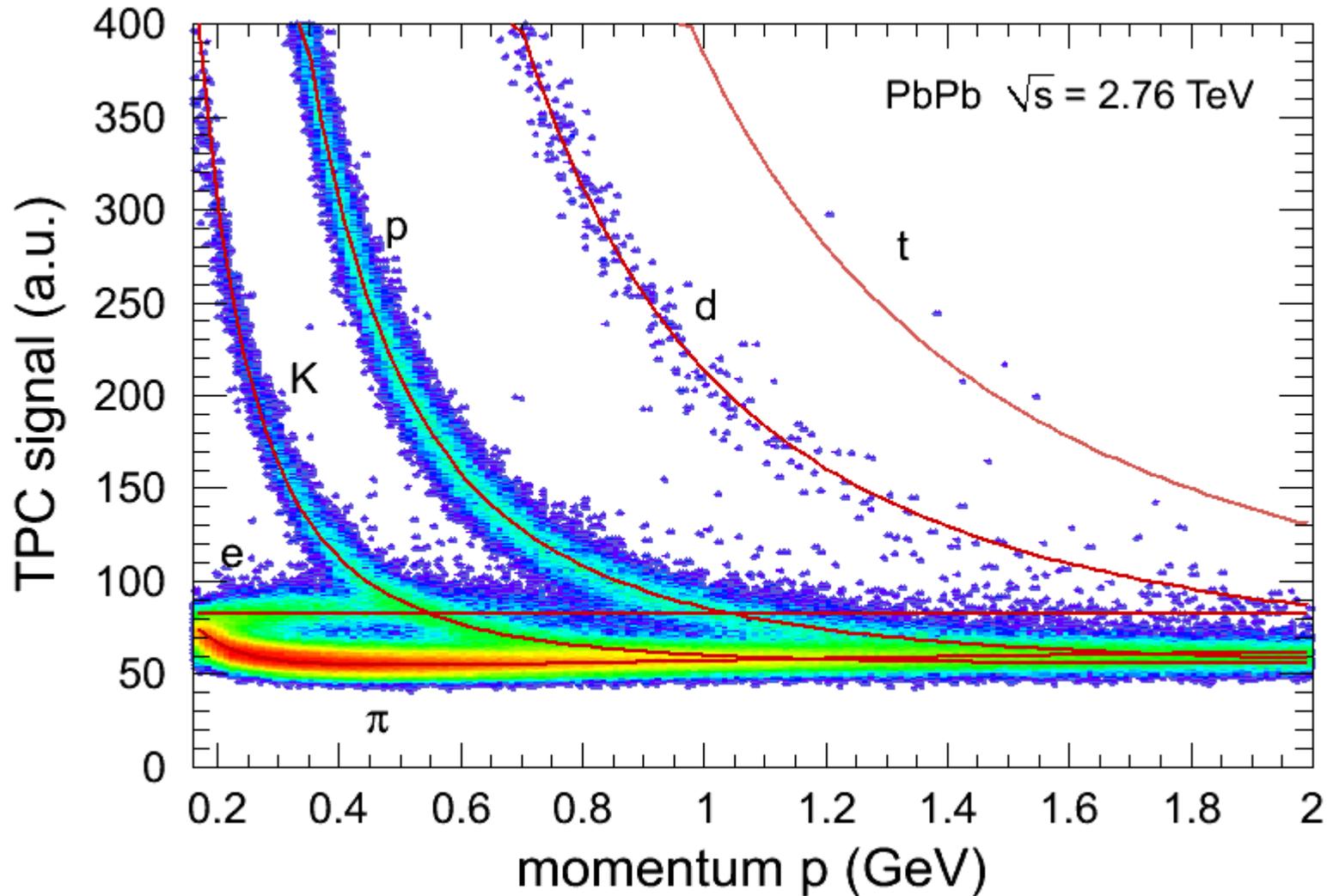


ALICE



ALICE
pp @ 7 TeV

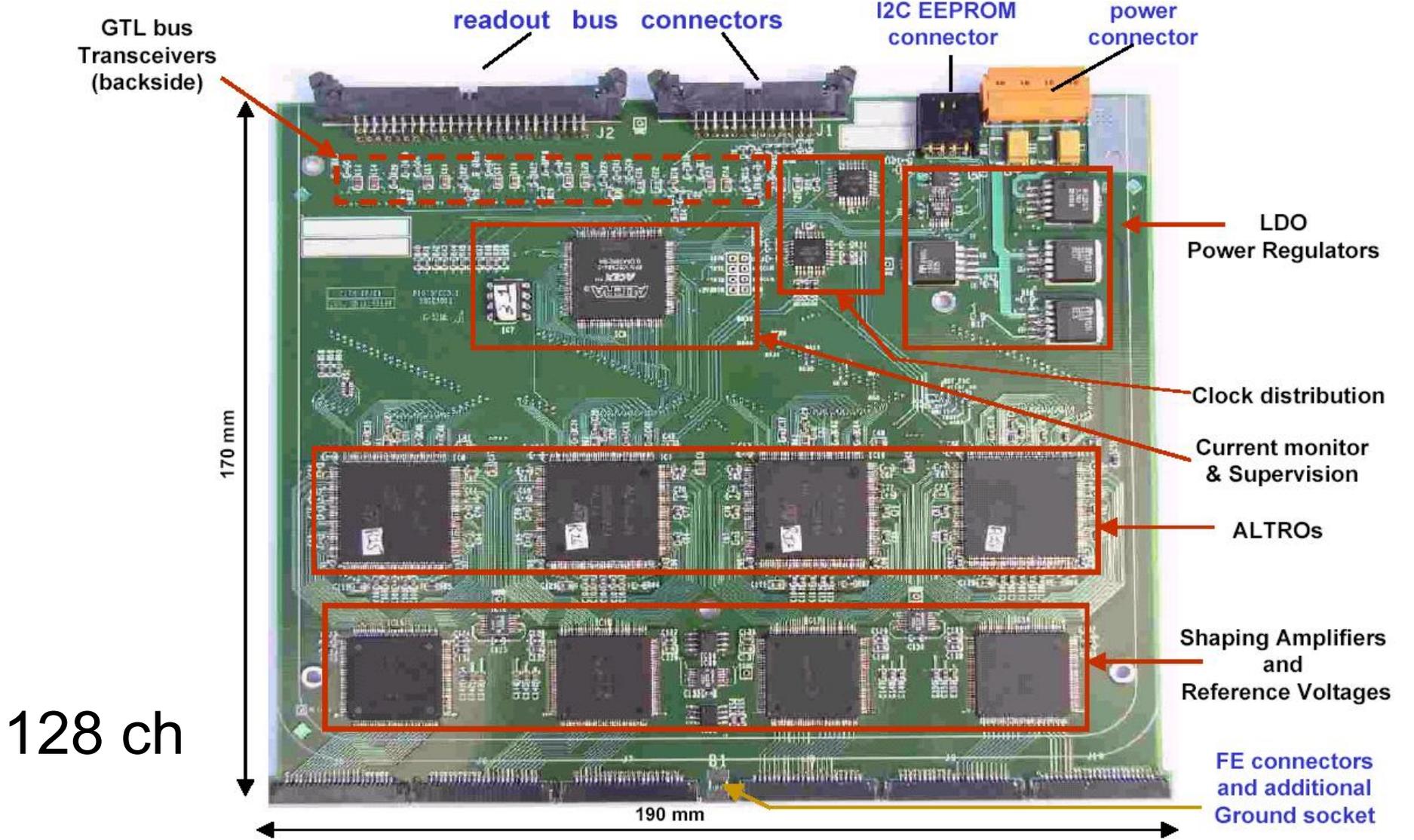
Teilchenidentifikation in der TPC



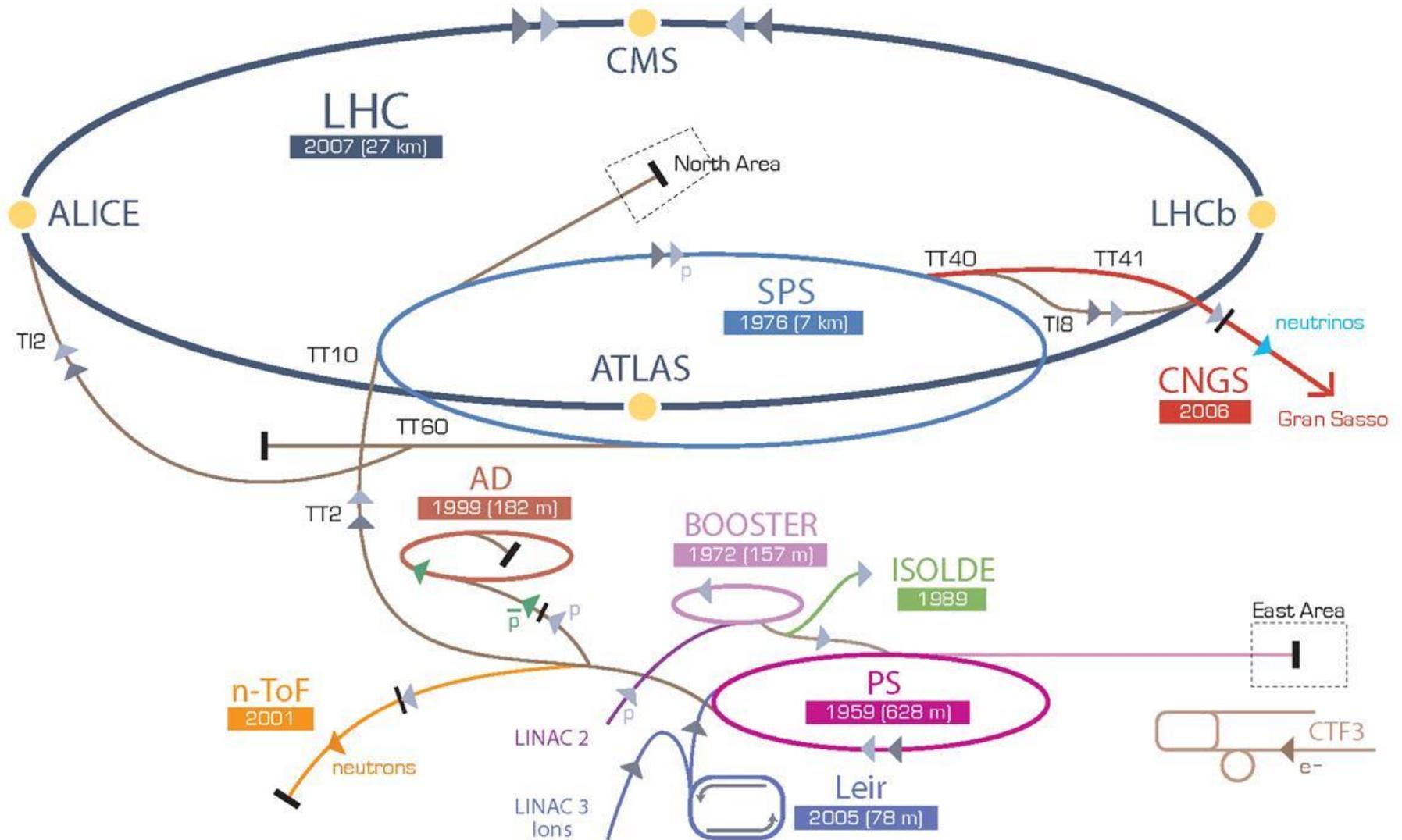


ca 4000 Front-End Cards

ALICE

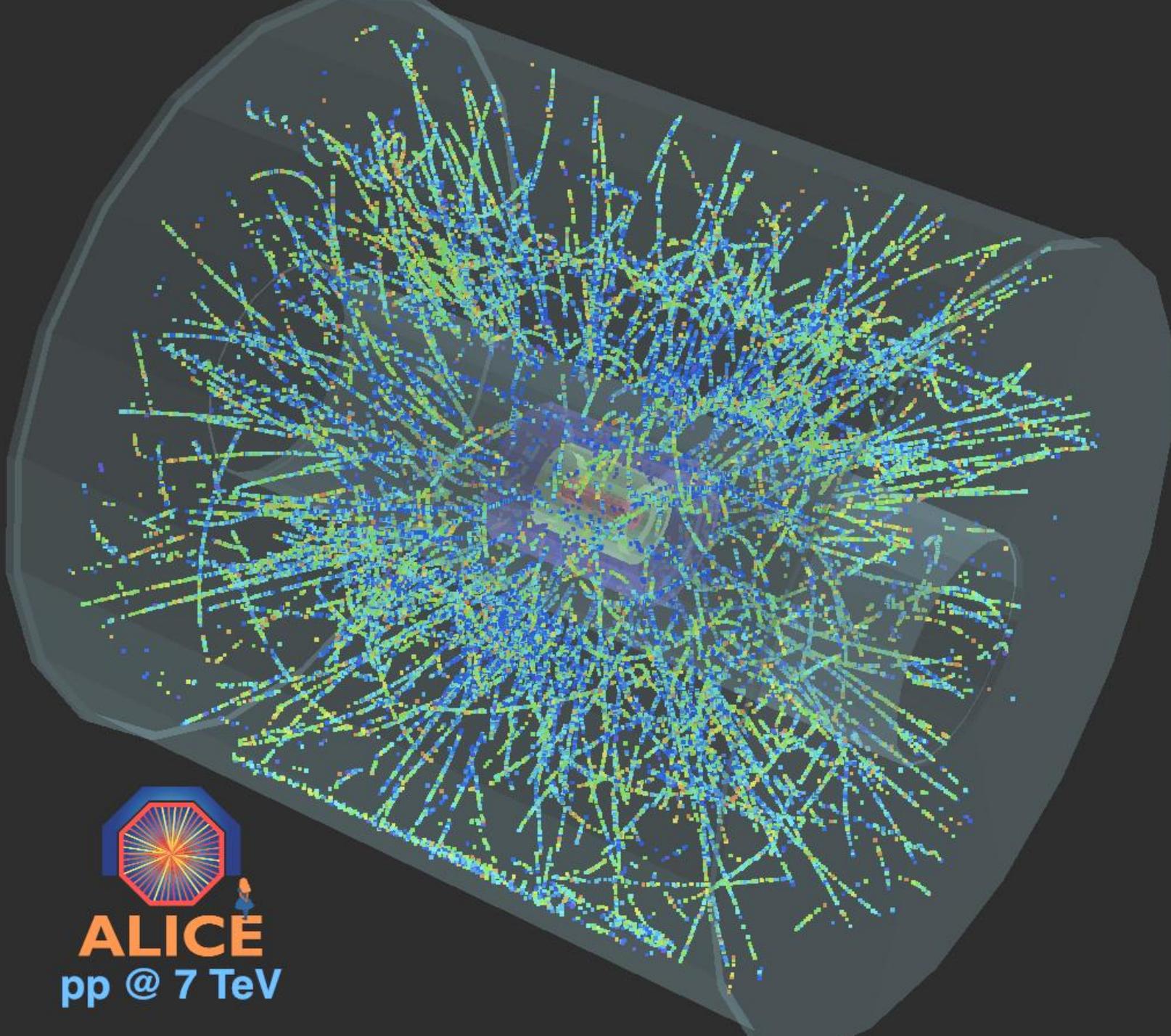


CERN Accelerator Complex





ALICE



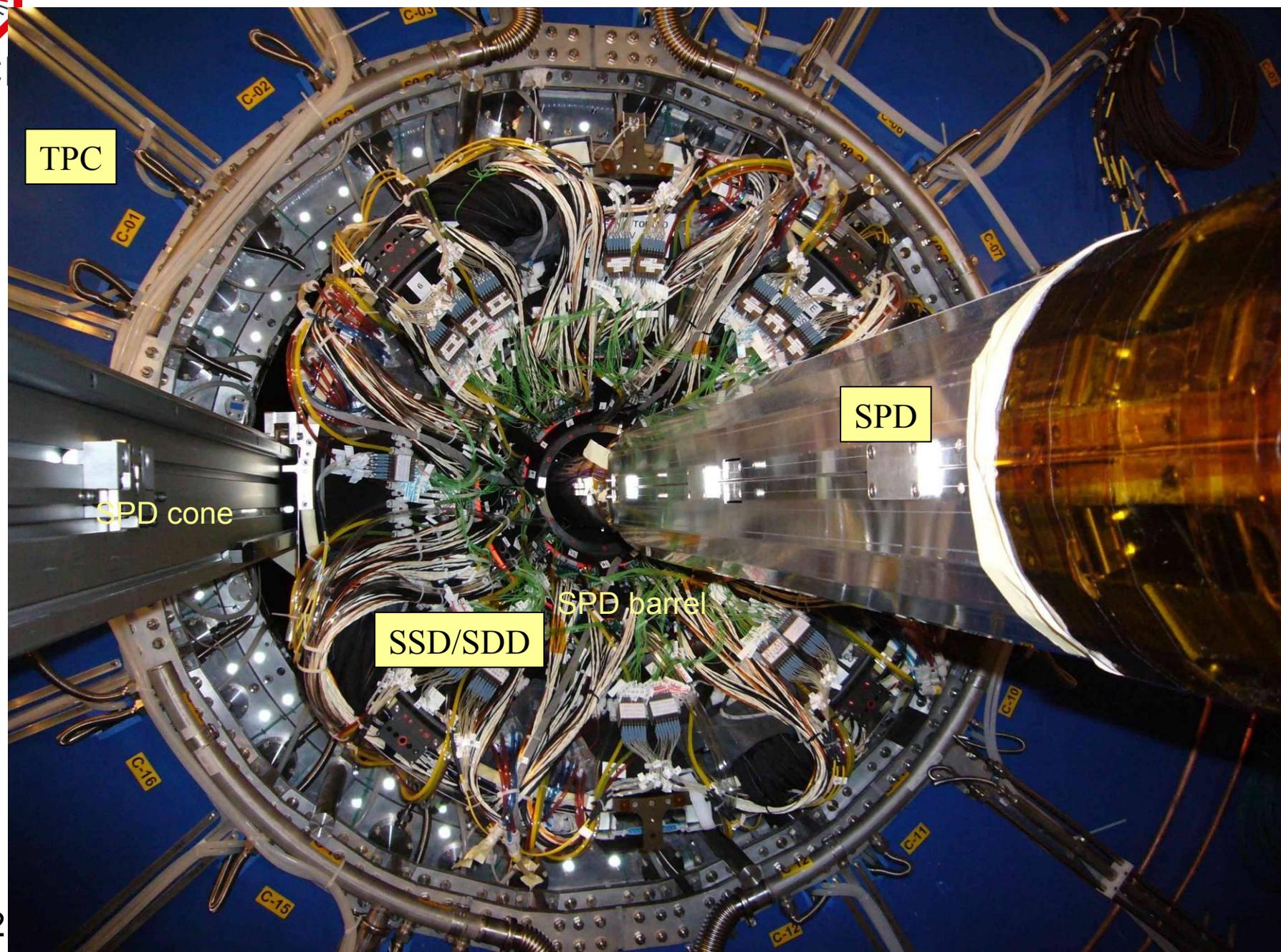
ALICE
pp @ 7 TeV

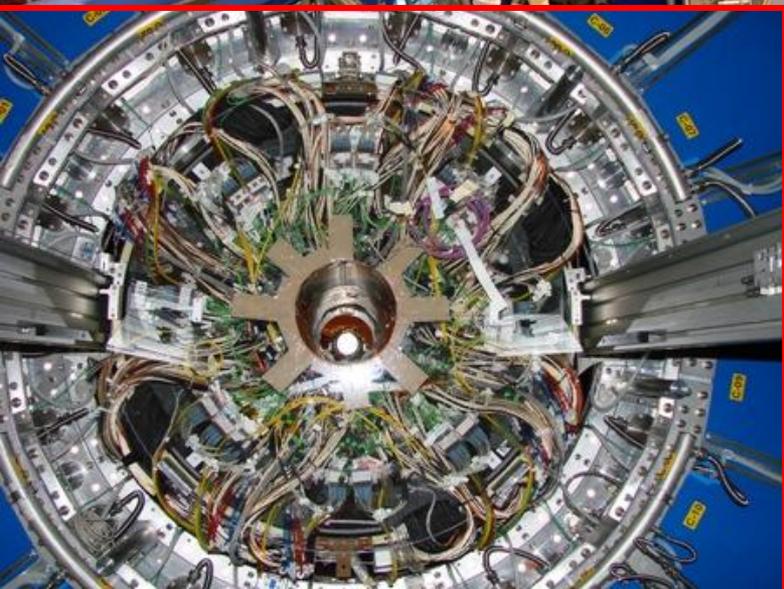
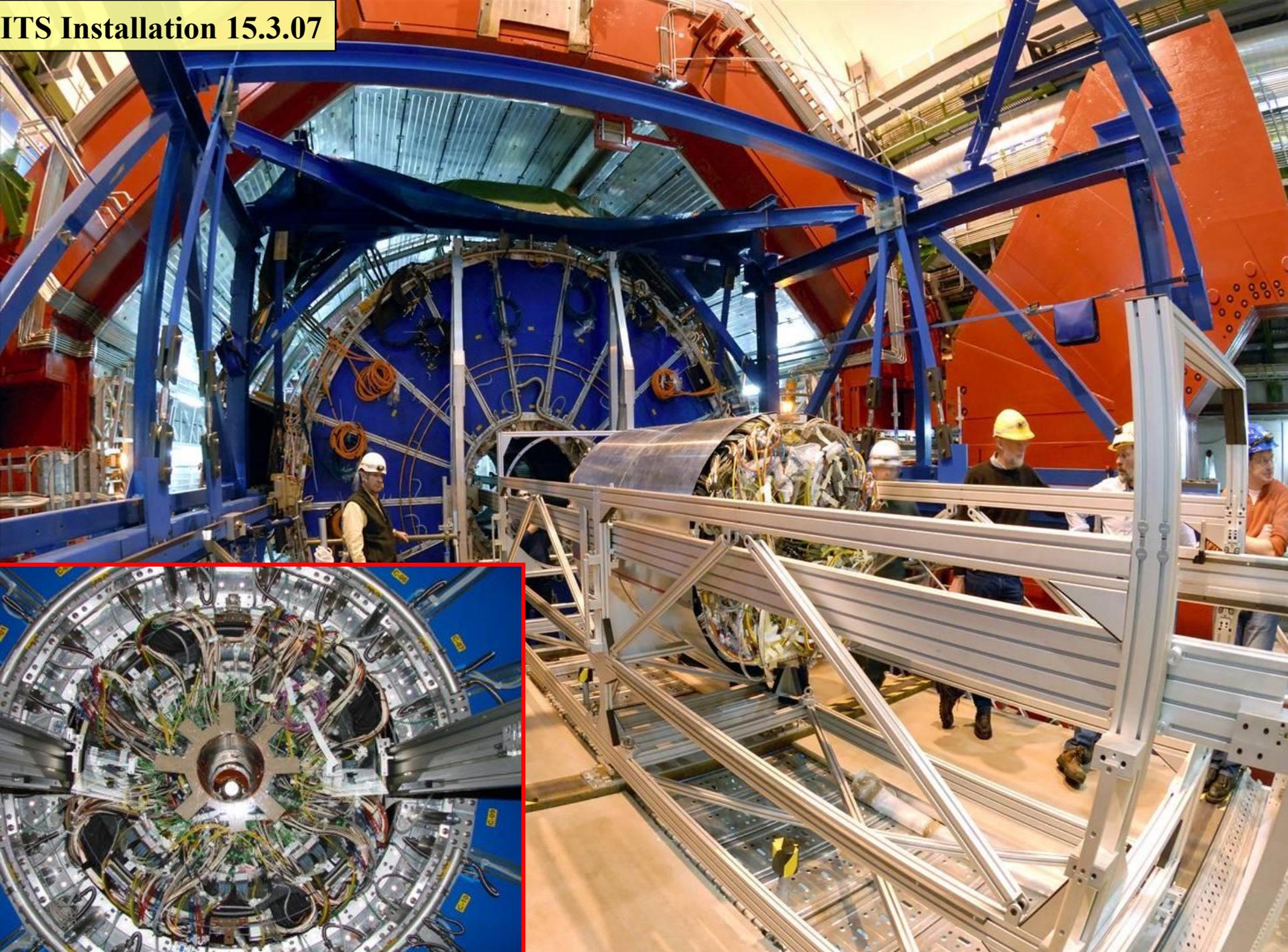
19.02.2024

Russian Dolls I: Moving of the ITS over the SPD



ALICE

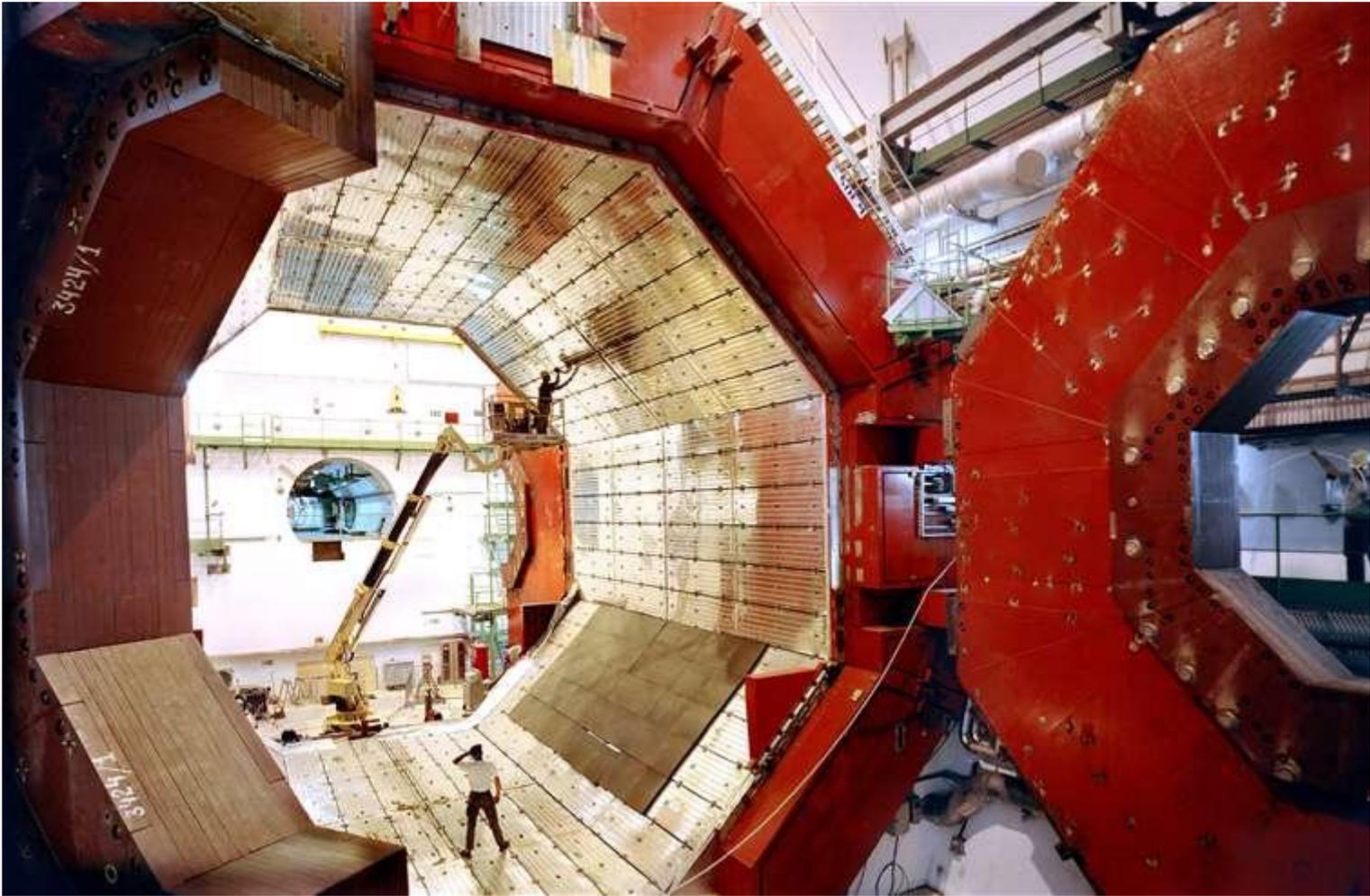








ALICE



The "L3" Magnet



L3 Magnet





ALICE

Readout Chamber Wire Geometry

gate wires
 cathodes
 anodes
 pads

