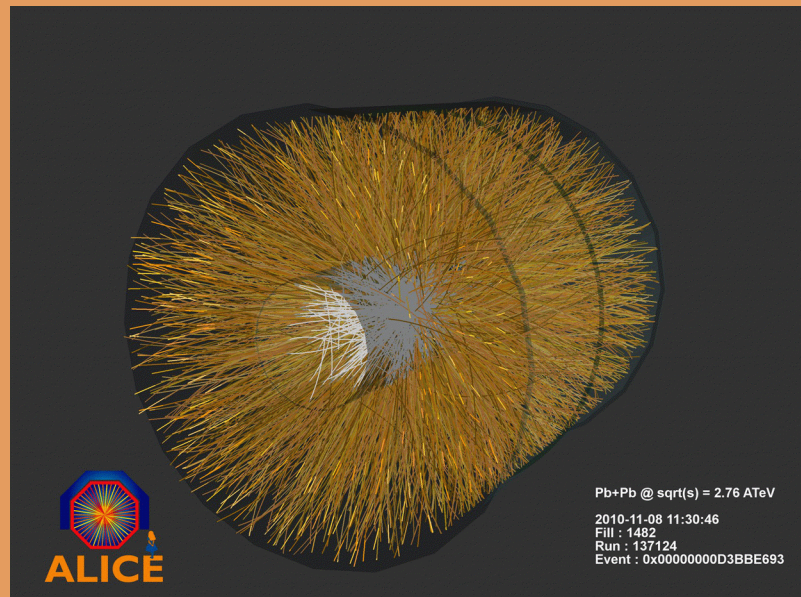


# ALICE im Land der Quarks und Gluonen - das Schwerionen Experiment am CERN

Dariusz Miskowiec, GSI-ALICE  
11-Nov-2015



# ALICE-Gruppe an der GSI

Juni 2014, Kleinwalsertal

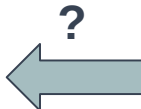


Sitzt an der GSI, ist Teil eines großen Experiments am CERN in Genf

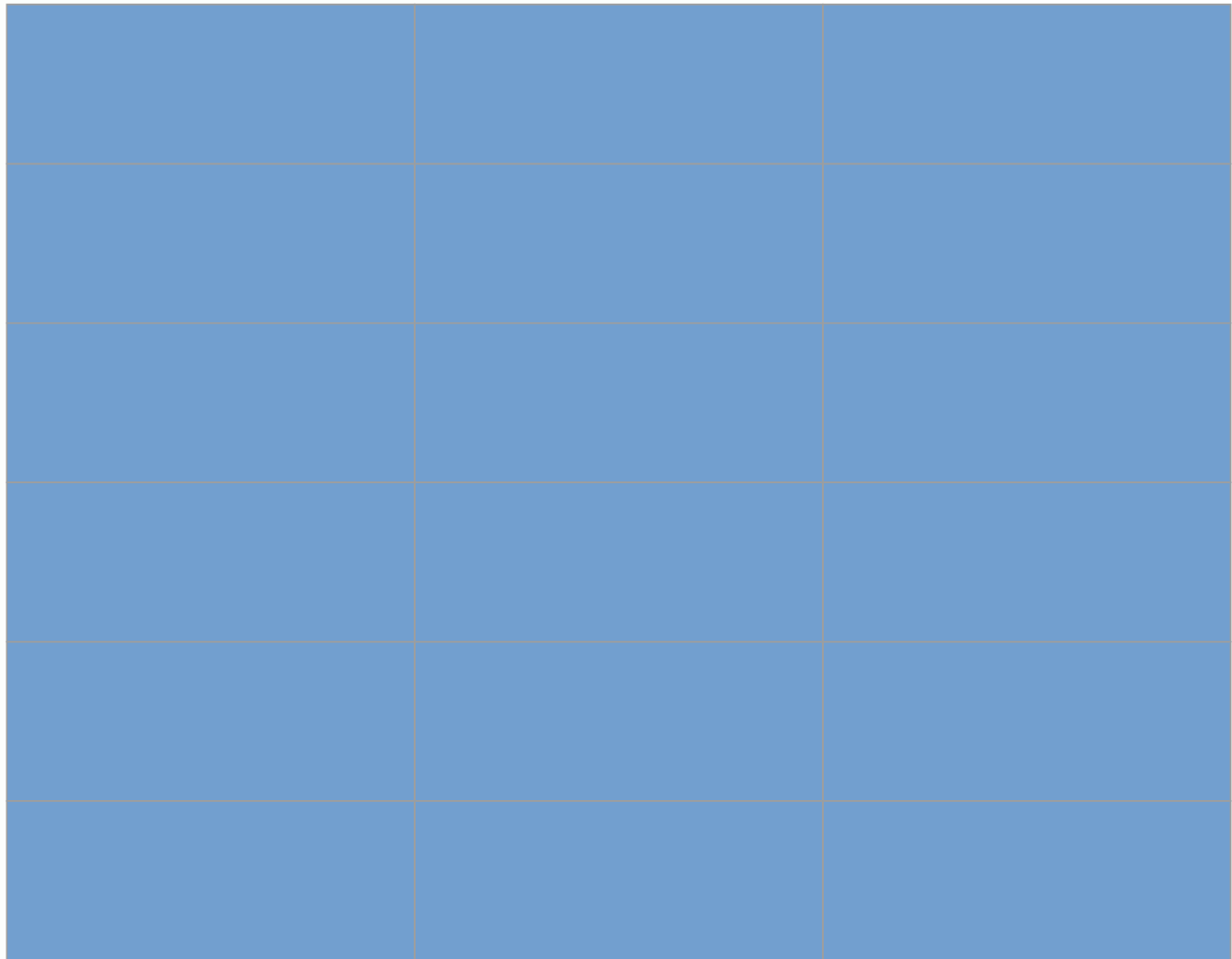
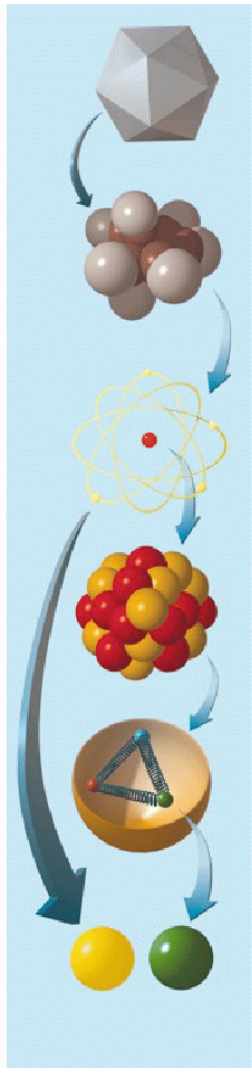


D. Miskowiec, 11-Nov-2015, Wissenschaft für

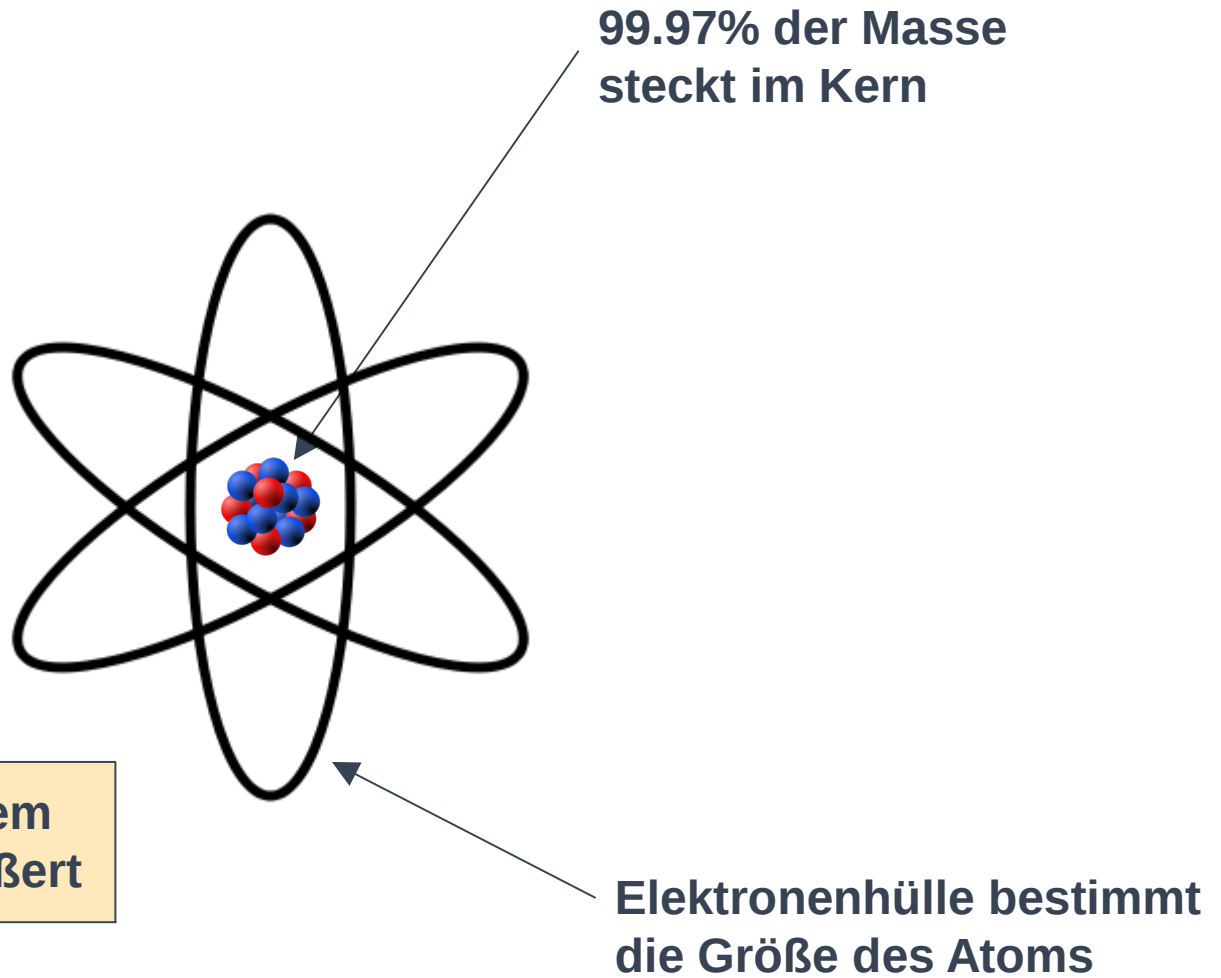
# Bestandteile der Materie



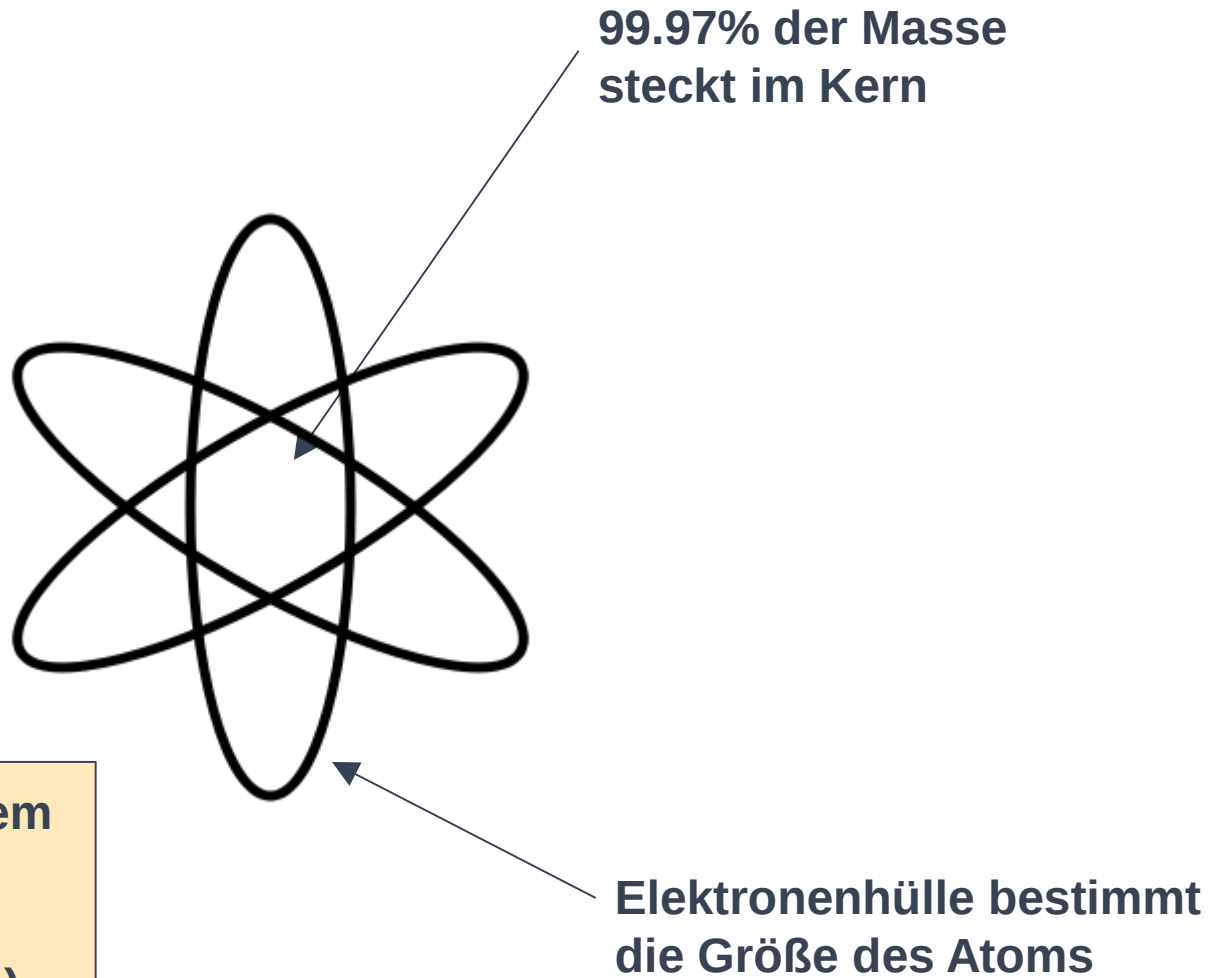
# Bestandteile der Materie



# Atom

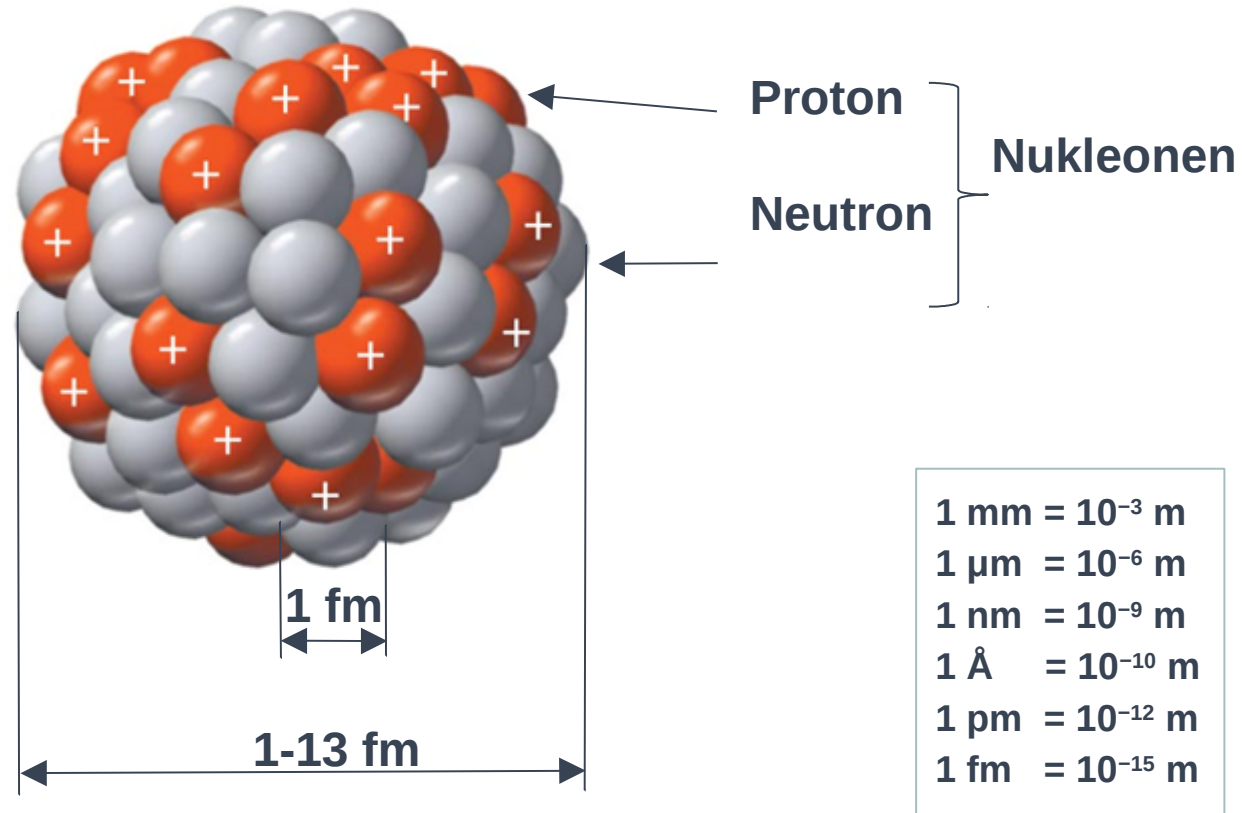


# Atom





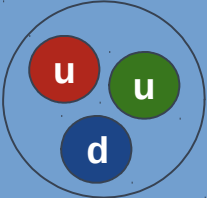
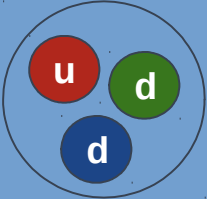
Der Atomkern auf dem Bild ist im richtigen Maßstab (10000 mal kleiner als das Atom)

# Atomkern



**Kerndichte = 300 000 000 000 kg per  $\text{cm}^3$**

# Proton und Neutron

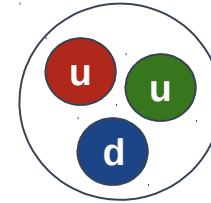
		elektrische Ladung	Farbladung
up-Quark		$+\frac{2}{3}$	rot, grün, blau
down-Quark		$-\frac{1}{3}$	rot, grün, blau
Proton		$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$	$r+g+b = \text{weiß}$
Neutron		$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$	$r+g+b = \text{weiß}$

Nur weiße Teilchen dürfen selbständig herumlaufen!



# Andere weiße Teilchen? Mesonen

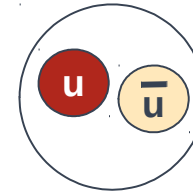
rot + grün + blau = weiß



Baryonen

aber auch

rot + anti-rot = weiß



Mesonen

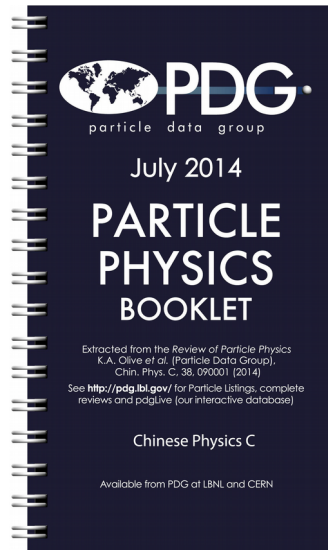
Übrigens: diese “Farben” haben mit Lichtwellenlängen nichts zu tun. Das rot + grün + blau = weiß passiert nur im (Menschen)auge



# Teilchenzoo

Bestandteile der Materie: Proton und Neutron (aus up- und down-Quarks), Elektron

Urknall, Teilchenkollisionen bei hohen Energien: mindestens 357 diverse Teilchen (aus 6 Quarks) + 6 Elektronverwandte



Particle Data Group (PDG)

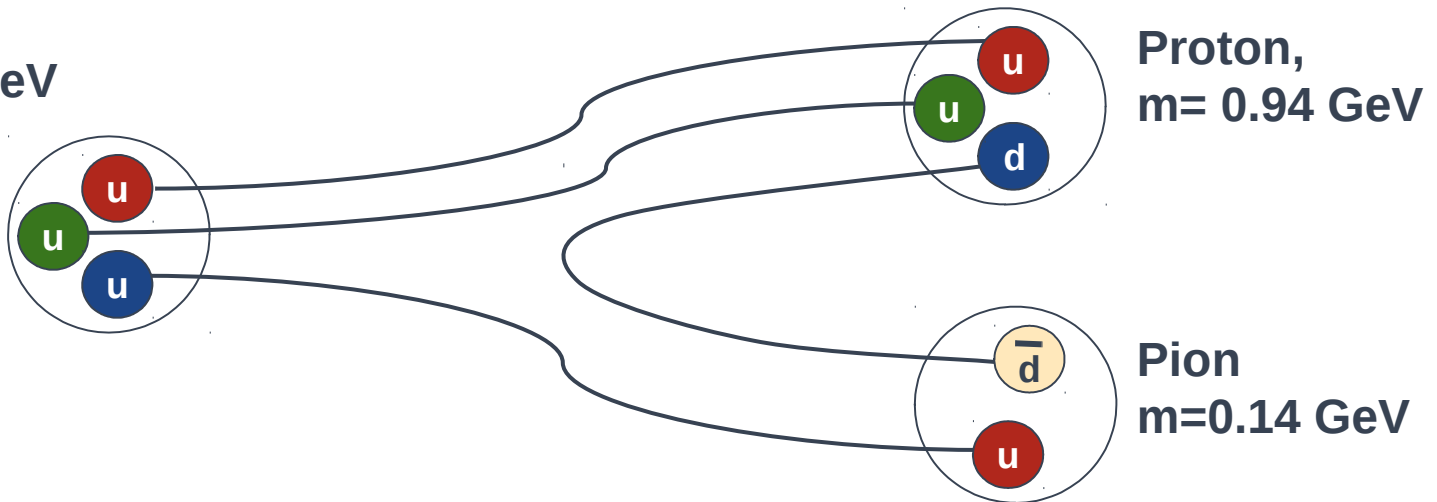


Wo sind die anderen 360 Teilchentypen? **Zerfall!**

# Zerfall

Beispiel: Delta++ zerfällt zu Proton+Pion

$\Delta^{++}$   
 $m = 1.23 \text{ GeV}$

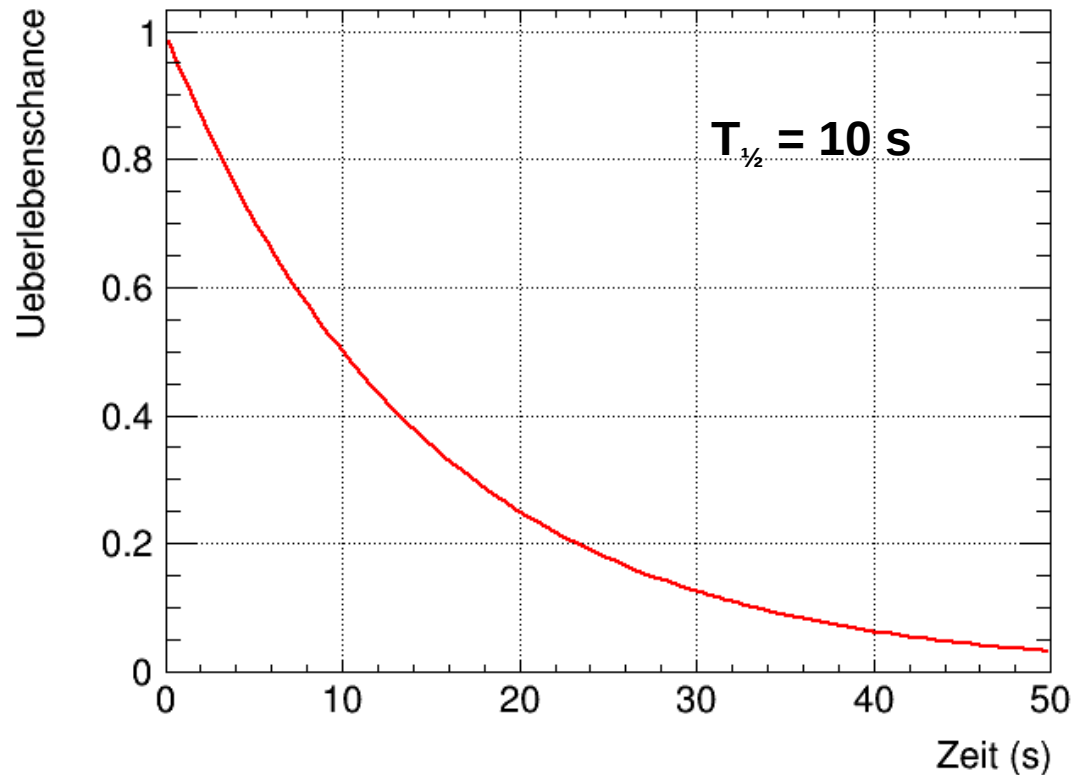


$$1.23 > 0.94 + 0.14$$

Schwere Teilchen zerfallen in leichtere Teilchen  
(wenn Erhaltungssätze es erlauben)

# Teilchenzerfall: statistisch

Zerfall passiert nicht nach einer bestimmten Zeit. Vielmehr ist die Zerfallswahrscheinlichkeit pro Zeiteinheit konstant. Z.B. ein Teilchen mit Halbwertszeit von 10 s hat 50%-Chancen die nächsten 10 s zu überleben.



- jede Zeiteinheit ist unabhängig von anderen (kein Gedächtnis)
- es spielt absolut keine Rolle wie lange das Teilchen schon gelebt hat
- rein theoretisch kann das Teilchen auch unendlich lang leben

# Teilchenzerfall: statistisch

wie in Lotto, wo...

- die Nummer in einer Ziehung unabhängig von einander
- Ziehungen unabhängig von einander



- 1,2,3,4,5,6 hat gleiche Chancen wie jede andere Kombination
- die Zahlen der letzten Woche haben gleiche Chancen wie jede andere Kombination
- ... allerdings sollte man sie meiden, da zu viel Gesellschaft

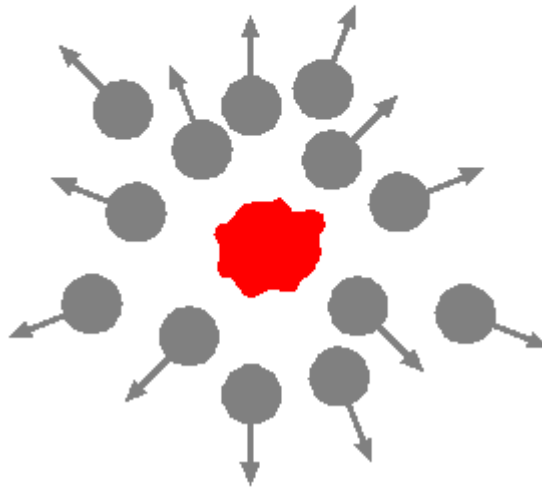
# Teilchenzoo

Woher wissen wir, dass es diese 300-400 Teilchenspezies gibt?  
Nur 3 davon sind in der Materie vorhanden.

# Teilchenproduktion



Kollision zweier Teilchen



neue Teilchen werden produziert

Auf diese Weise lässt sich das Teilchenzoo erforschen

# Nicht nur die Teile, auch Mechanismus

einzelnes Teilchen  
in Detail



hohe Teilchendichte,  
Wechselwirkungen



**Domäne der relativistischen Schwerionenphysik**

Hochenergie-Kollisionen zwischen zwei schweren (Gold, Blei, Uran) Kernen



# Quark-Gluon Plasma

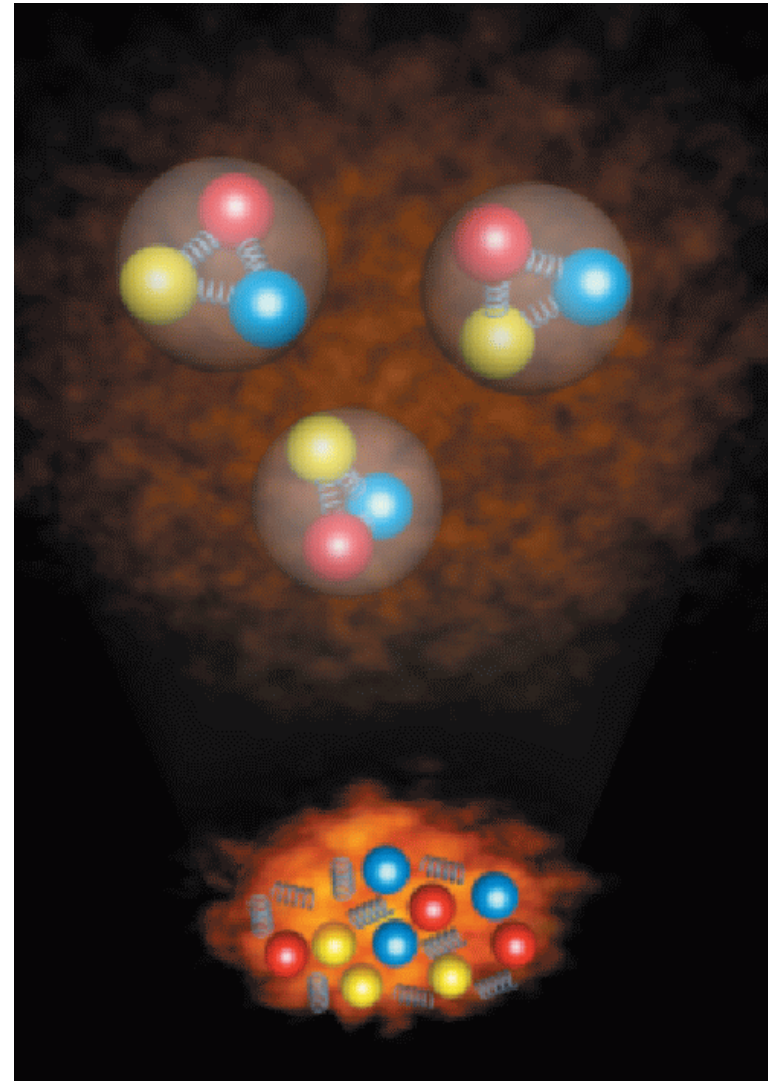
hohe Kollisionsenergien



hohe Dichten



Grenzen zwischen Nukleonen  
verschwinden



# Superdense Matter: Neutrons or Asymptotically Free Quarks?

J. C. Collins and M. J. Perry

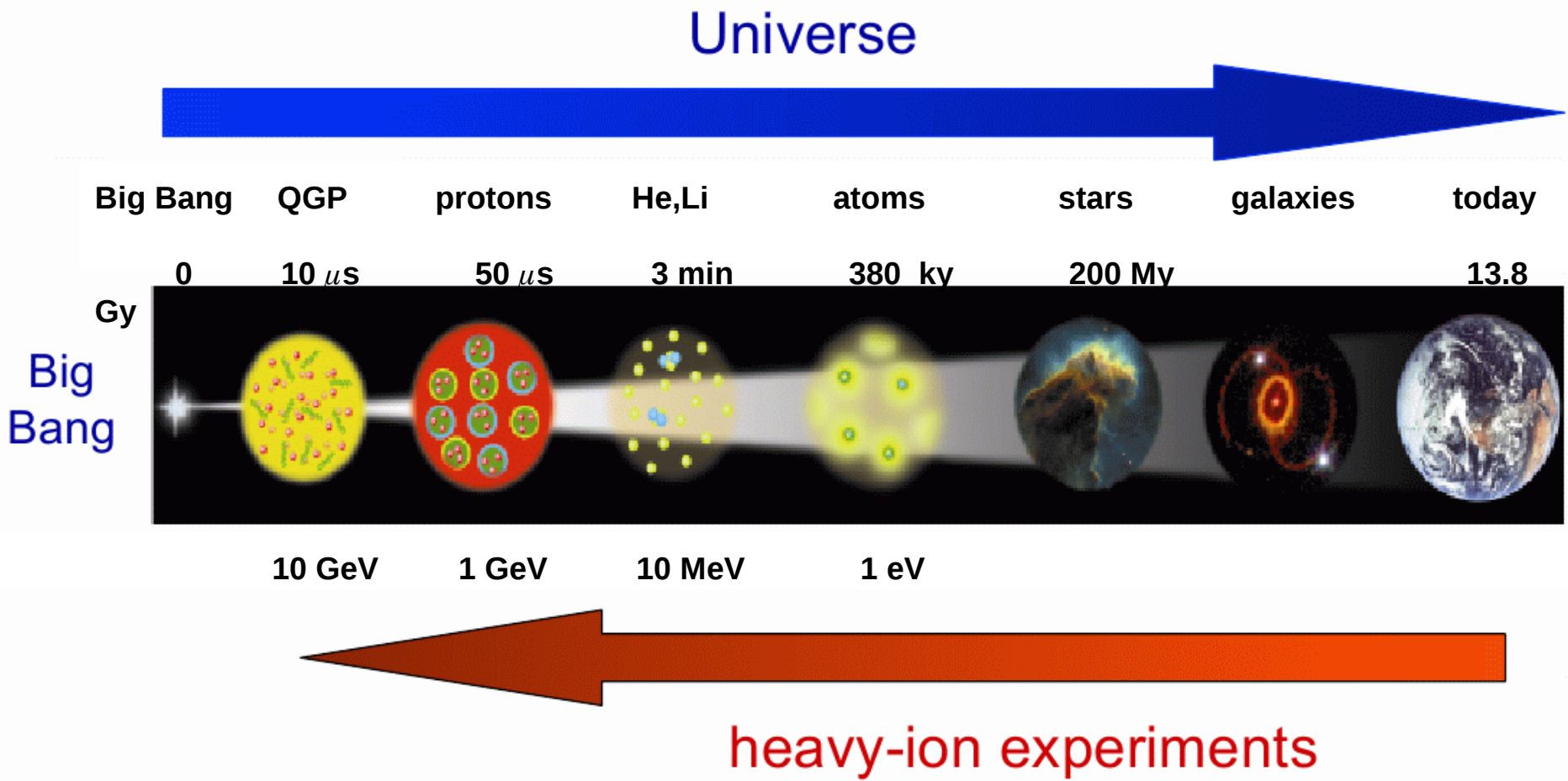
*Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge,  
Cambridge CB3 9EW, England*

(Received 6 January 1975)

We note the following: The quark model implies that superdense matter (found in neutron-star cores, exploding black holes, and the early big-bang universe) consists of quarks rather than of hadrons. Bjorken scaling implies that the quarks interact weakly. An asymptotically free gauge theory allows realistic calculations taking full account of strong interactions.

A neutron has a radius<sup>10</sup> of about 0.5–1 fm, and so has a density of about  $8 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ , whereas the central density of a neutron star<sup>1,2</sup> can be as much as  $10^{16} - 10^{17} \text{ g cm}^{-3}$ . In this case, one must expect the hadrons to overlap, and their individuality to be confused. Therefore, we suggest that matter at such high densities is a quark soup. In such a system, long-range interactions are screened because of many-body effects,<sup>11</sup> and hence no problems will arise for any peculiar infrared behavior of quark binding forces. At short

# Reise in die Vergangenheit

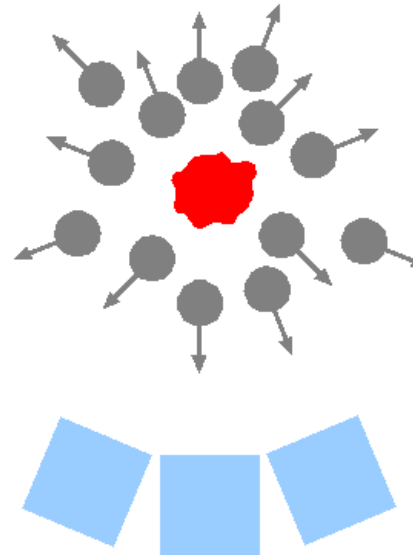


# Struktur dieses Vortrags

## 2) Beschleuniger

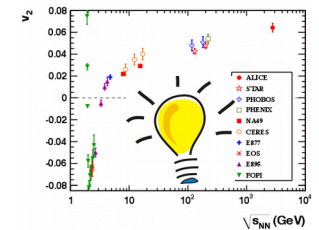


## 3) Kernreaktionen



## 4) Detektoren

## 5) Erkenntnisse



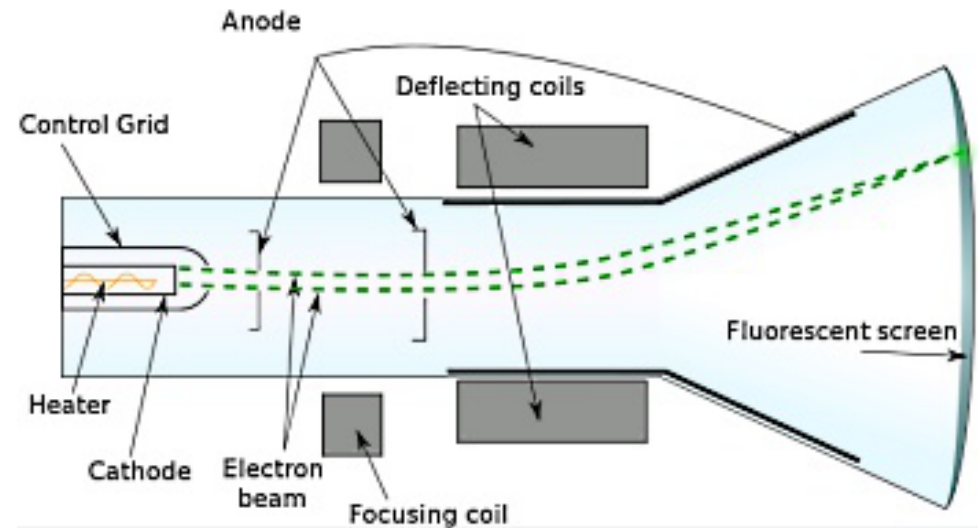
**Beschleuniger**

# Teilchenbeschleuniger

Nicht solche...



# Elektronenbeschleuniger



- Vakuum
- die Teilchen sind elektrisch geladen
- E-Field beschleunigt sie auf 20 keV
- B-Field lenkt sie in gewünschter Richtung



# Energieskala

1 keV =  $10^3$  eV

1 MeV =  $10^6$  eV

1 GeV =  $10^9$  eV

1 TeV =  $10^{12}$  eV

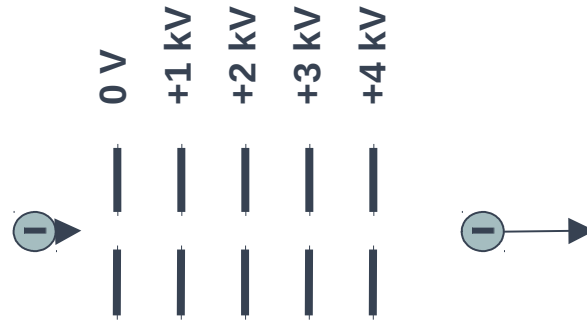
Fernseher

GSI

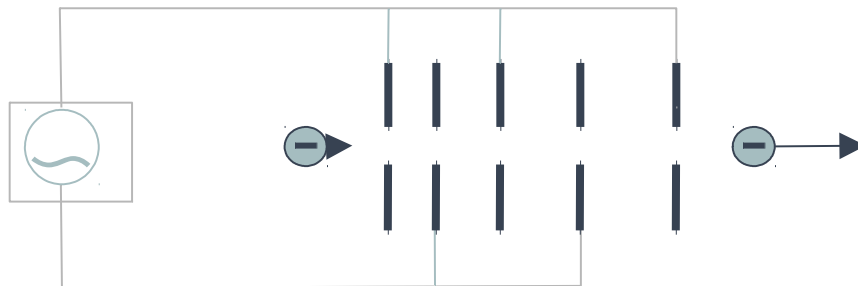
CERN



# Linearbeschleuniger

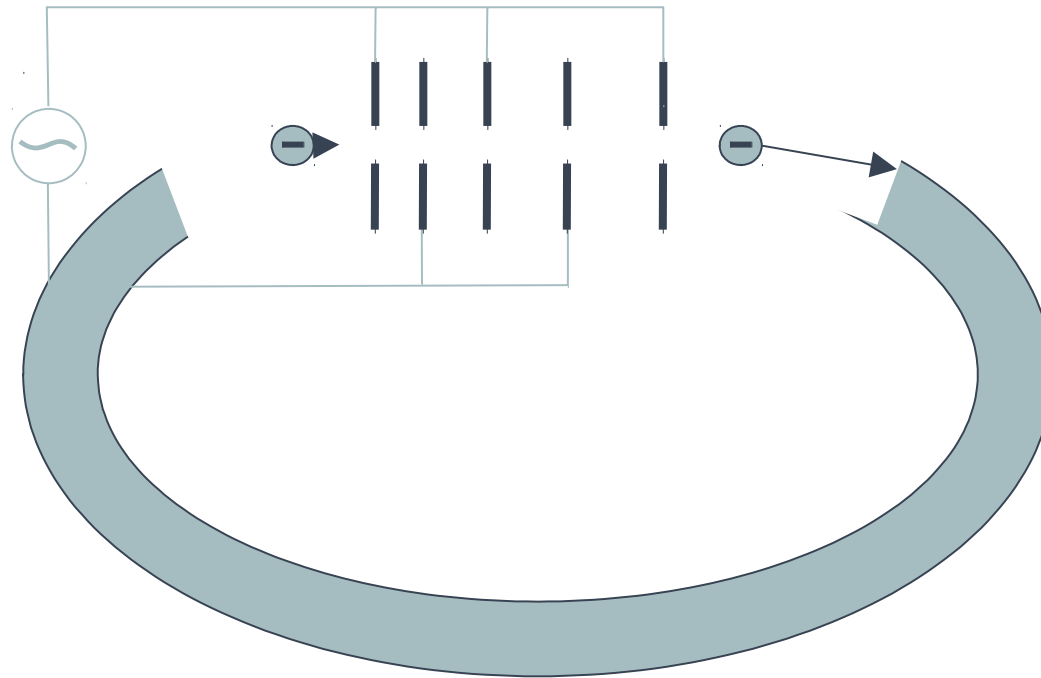


statische Spannung  
kontinuierlicher Strahl  
Energie bis 30 MeV



Wechselspannung  
gepulster Strahl  
Energie bis 50 GeV

# Ringbeschleuniger

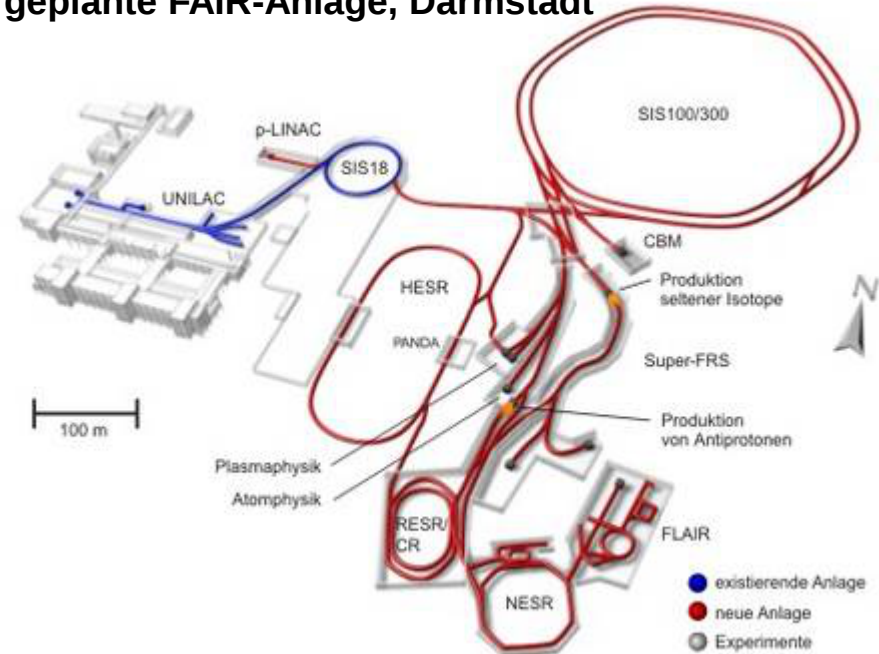


Wechselspannung  
gepulster Strahl  
Magnetfeld hält die  
Teilchen im Ring  
Energie bis 6.5 TeV

# Beschleuniger sind wie Pilze

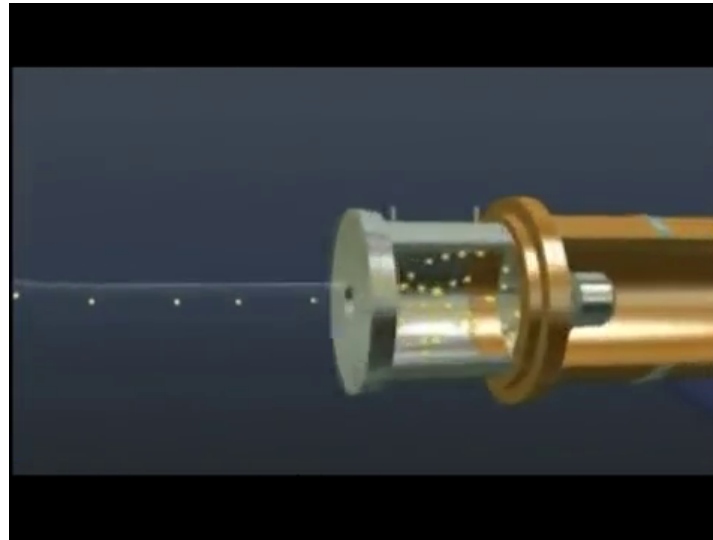


geplante FAIR-Anlage, Darmstadt



...kommen meistens in Gruppen, in unterschiedlichen Größen

# Large Hadron Collider - How it works



<https://www.youtube.com/watch?v=dw3KuNgD-jE>

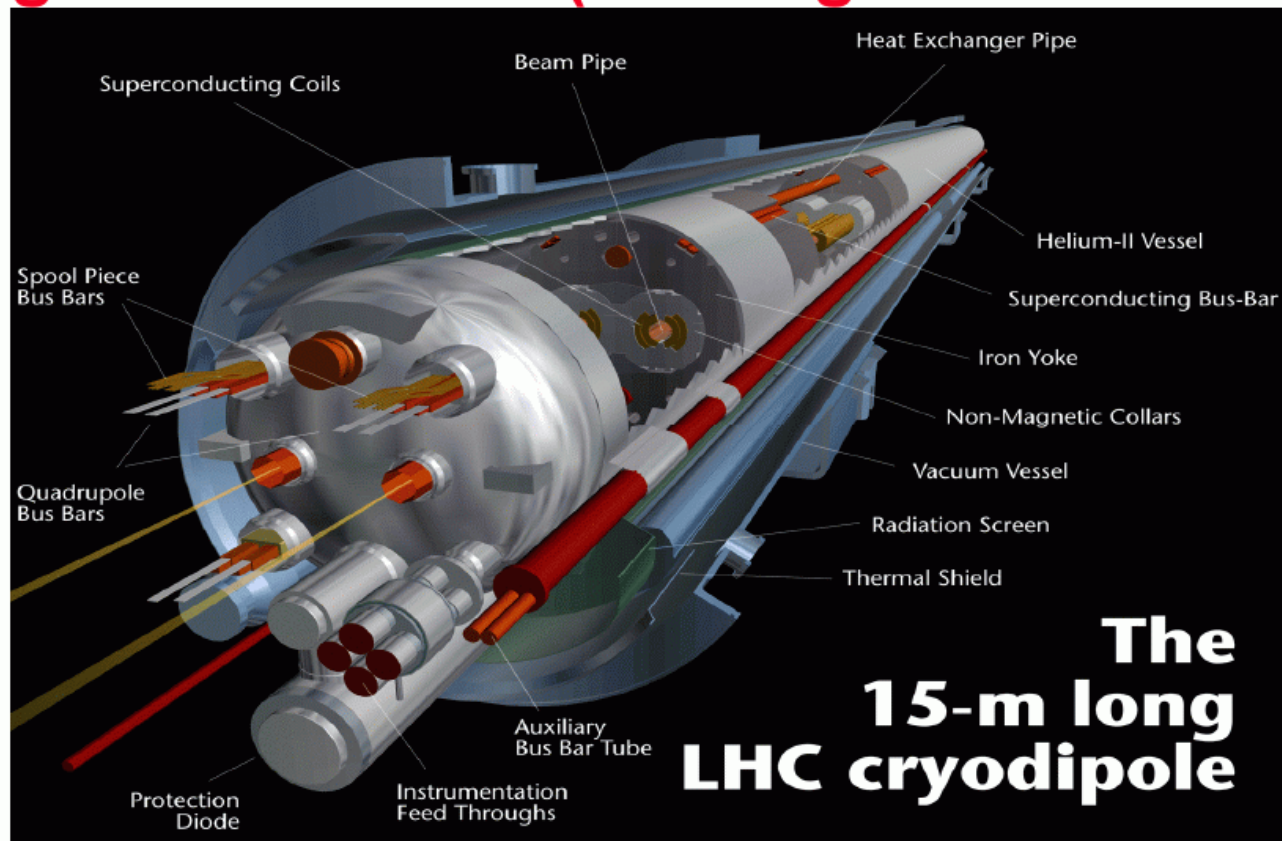
<http://www.gsi.de/~misko/alice/wiss/lhc-how-it-works-short.mp4>

# Large Hadron Collider (LHC)



- **1232 Dipolmagnete**

- **Magnetfeld: 8.33 T (Erdbagnetfeld = 50  $\mu$ T)**



- **Stromstärke: 11800 A**

- **Betriebstemperatur: 1.9 K**

# LHC Temperaturen

10 K	NbTi wird supraleitend (Dipolmagnete)
4.5 K	Betriebstemperatur der RF-Kavitäten (Beschleunigung)
4.2 K	Helium wird flüssig
2.7 K	Temperatur des Universums
2.2 K	Helium wird superflüssig
1.9 K	Helium im LHC
0.0 K =	- 273.15 °C

**supraleitend (keine Stromverluste) und superfluid (kein Pumpaufwand)**

# LHC-Energien

Energie eines Protons  
(wie eine Mücke)

**6.5 TeV**



Energie gespeichert im Strahl  
(wie ein Boeing 747 beim Landen)

**300 MJ**



Energie gespeichert in Magneten  
(wie ein Flugzeugträger bei 30 kn)

**11 GJ**





# LHC live

LHC page 1

<https://op-webtools.web.cern.ch/op-webtools/vistar/vistars.php?usr=LHC1>

# Your collider



<https://www.youtube.com/watch?v=1e1eLe1ihT0>

<http://www.gsi.de/~misko/alice/wiss/collider-short.mp4>

# Das erste Foto im WWW, 1992

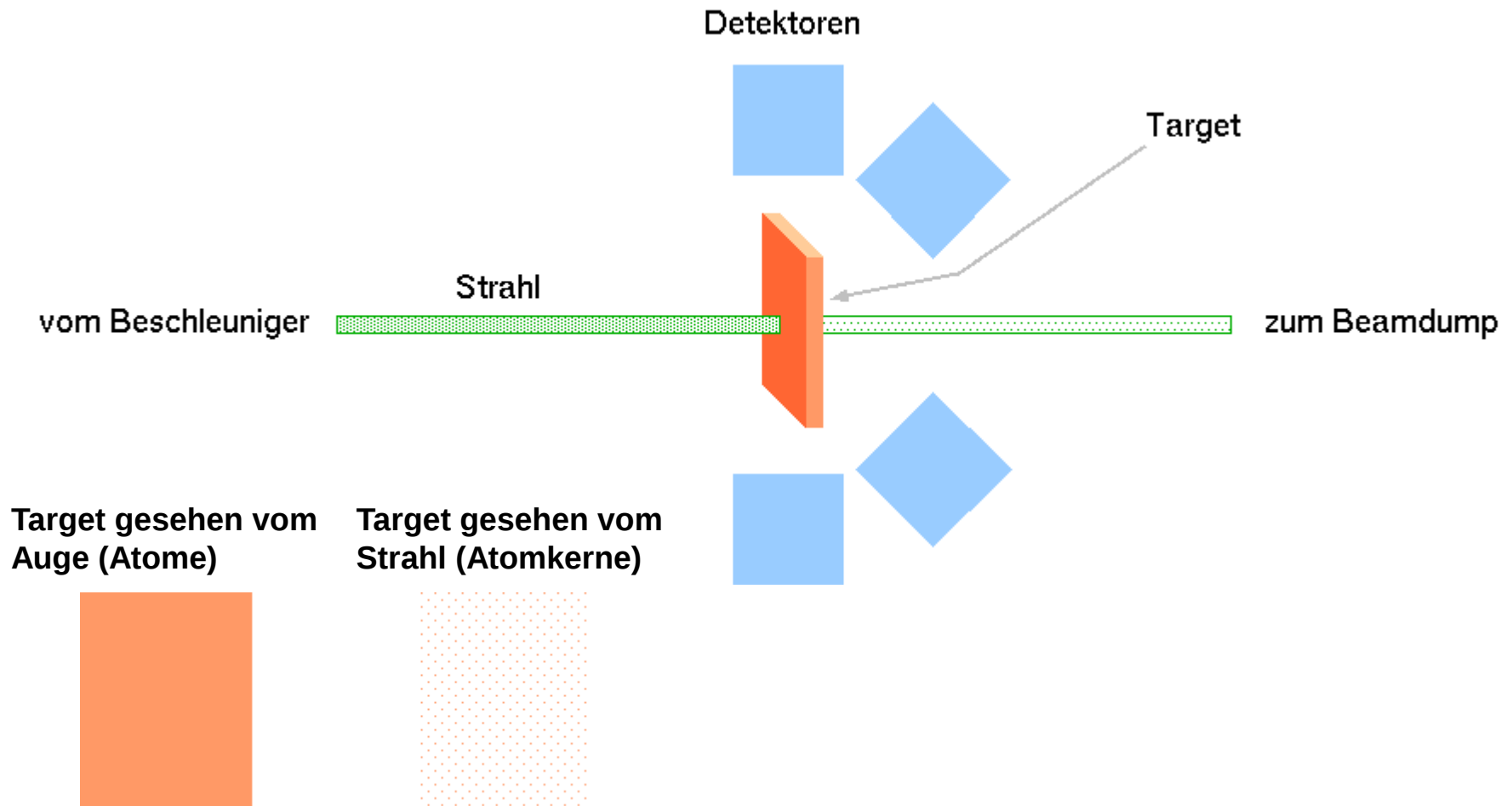


Angela Higney, Michele de Gennaro, Colette Marx-Neilsen, Lynn Veronneau

# Kernreaktionen

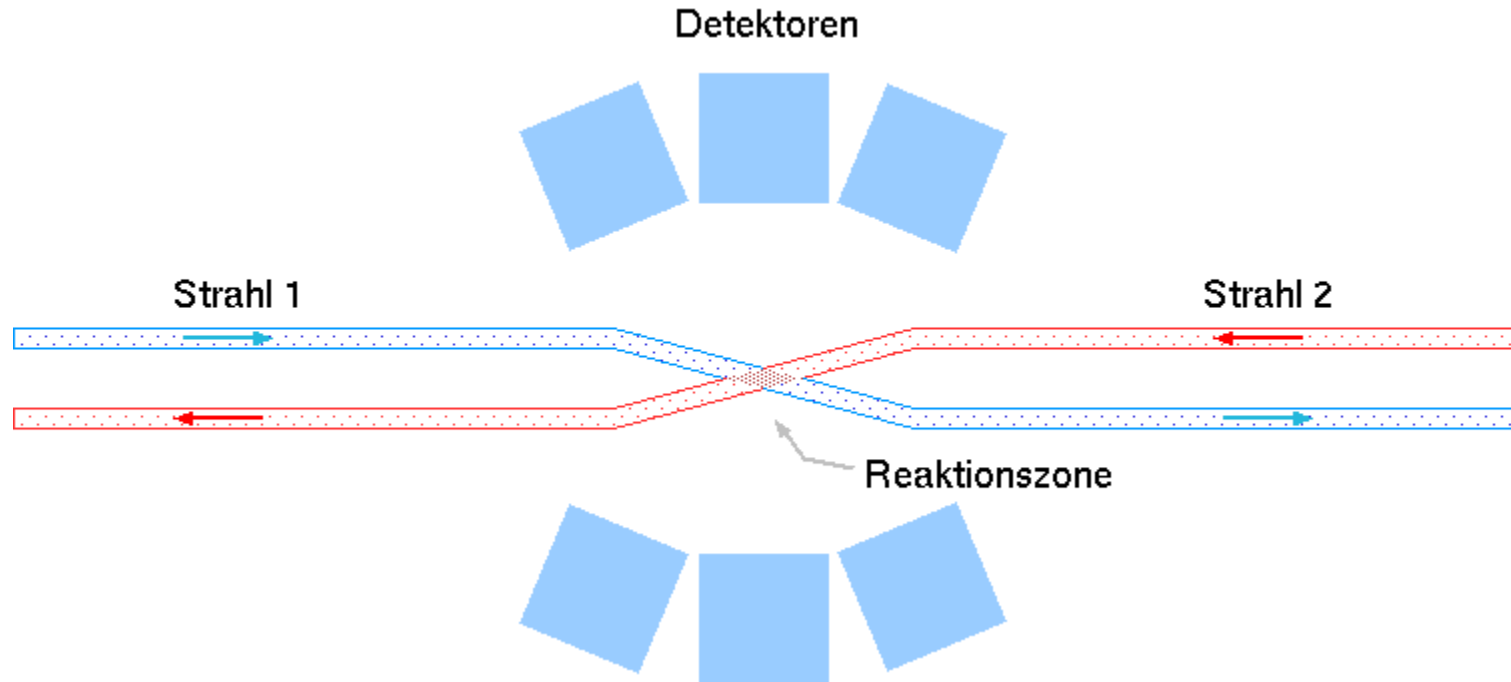
# Teilchen- und Kernphysik Experimente

Fixed Target Experimente (wie am GSI SIS-Beschleuniger)

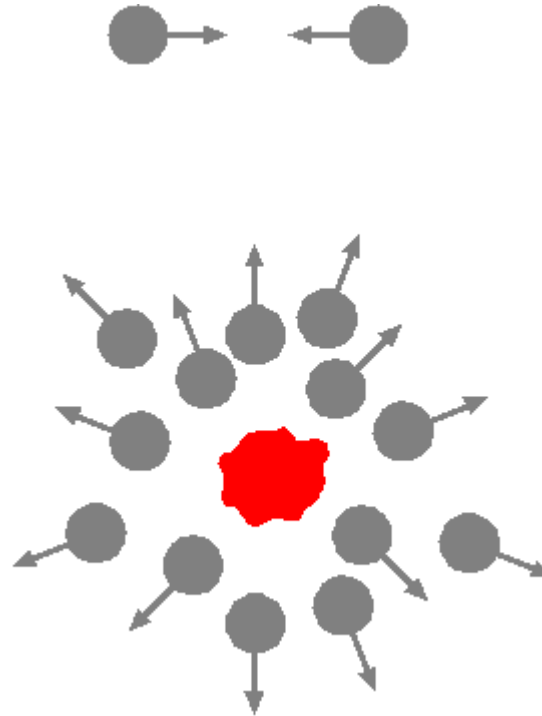


# Teilchen- und Kernphysik Experimente

Kollider Experimente (wie am CERN LHC-Beschleuniger)



# Teilchen- und Kernphysik Experimente



# Woher kommen die ganzen neuen Teilchen?

Energie (der Kollision) → Masse (neuer Teilchen)



# Energie, Impuls, Masse (eines Steins)

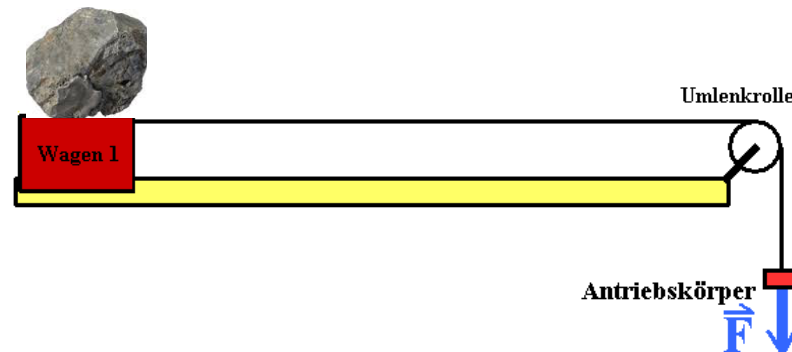
**Energie:** werfe den Stein in einen kalten See und messe den Anstieg der Wassertemperatur



**Impuls:** werfe den Stein gegen einen Hängesessel und messe die Geschwindigkeit des Sessels



**Masse:** wiege den Stein, oder messe seine Beschleunigung



# Energie, Impuls, Masse

bei einem ruhenden Objekt...

**Masse = Energie**

... und im Allgemeinen

$$\text{Energie}^2 = \text{Masse}^2 + \text{Impuls}^2$$

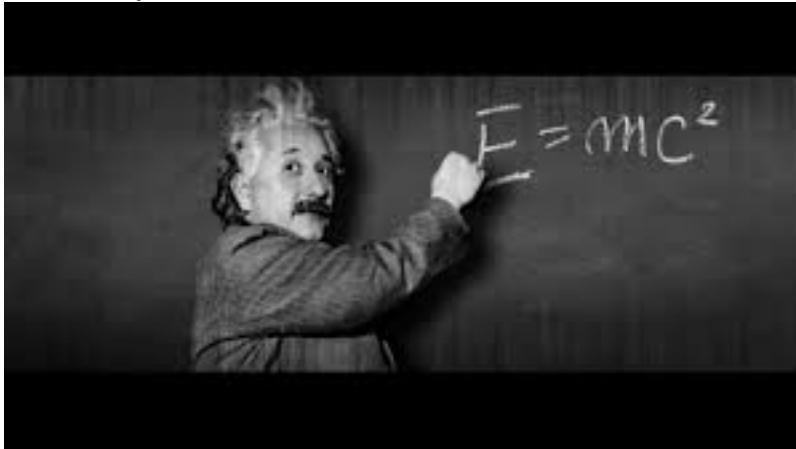
$$E^2 = m^2 + p^2$$

...und nur wenn  $p \ll m$

$$E \approx m + p^2/2m$$

# Masse und Energie

Spezielle Relativitätstheorie, Einstein



Alternativtheorie, Anonym



$$m_d = m_p + m_n - 2.2 \text{ MeV}$$

← Bindungsenergie

# Mengenrabatt

...beim Shoppen

...beim Babysitting

 <p><b>Prepaid-SIM-Karte</b></p>	 <p><b>Prepaid-SIM-Karte</b> 2x im Paket</p>	 <p><b>Prepaid-SIM-Karte</b> 3x im Paket</p>	 <p><b>Prepaid-SIM-Karte</b> 4x im Paket</p>
<p><b>Prepaid-SIM-Karte</b></p>	<p><b>Partner-SIM-Paket (2 Stück)</b></p>	<p><b>Familien-SIM-Paket (3 Stück)</b></p>	<p><b>Familien-SIM-Paket (4 Stück)</b></p>
<p>9,95 € †</p>	<p>19,90 € <b>14,90 € †</b></p>	<p>29,85 € <b>19,85 € †</b></p>	<p>39,80 € <b>24,80 € †</b></p>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Aktion: 0 ct/Min. Tchibo intern</li><li>• Faire 9 ct/Min. &amp; SMS</li><li>• Keine Vertragslaufzeit</li><li>• Keine Grundgebühr</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aktion: 0 ct/Min. Tchibo intern</li><li>• Faire 9 ct/Min. &amp; SMS</li><li>• Keine Vertragslaufzeit</li><li>• Keine Grundgebühr</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aktion: 0 ct/Min. Tchibo intern</li><li>• Faire 9 ct/Min. &amp; SMS</li><li>• Keine Vertragslaufzeit</li><li>• Keine Grundgebühr</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aktion: 0 ct/Min. Tchibo intern</li><li>• Faire 9 ct/Min. &amp; SMS</li><li>• Keine Vertragslaufzeit</li><li>• Keine Grundgebühr</li></ul>
<p>Zum Produkt &gt;</p>	<p>Zum Produkt &gt;</p>	<p>Zum Produkt &gt;</p>	<p>Zum Produkt &gt;</p>





heisse Suppe ist 1.00000000000002 mal schwerer - wahr, aber nicht messbar...

# Relativistische Effekte

Objektgeschwindigkeit vergleichbar mit Lichtgeschwindigkeit



Beschreibung mit spezieller Relativitätstheorie von Einstein



3 mm/s



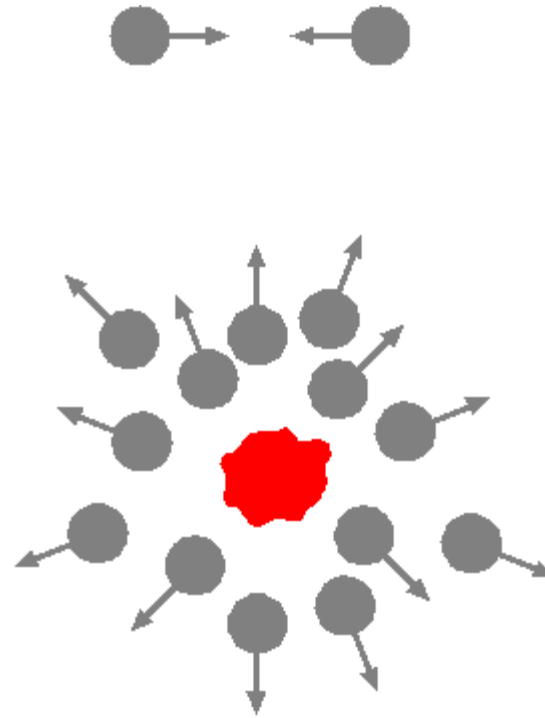
30 m/s



30 km/s

alle drei nichtrelativistisch (zu langsam)

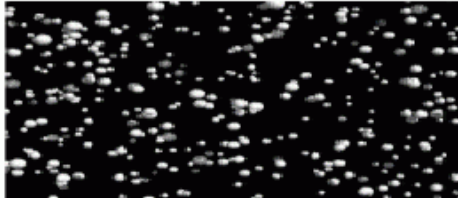
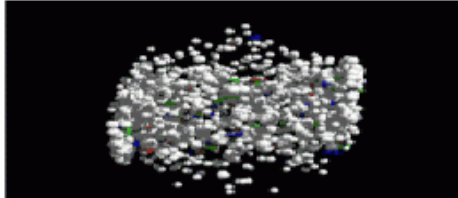
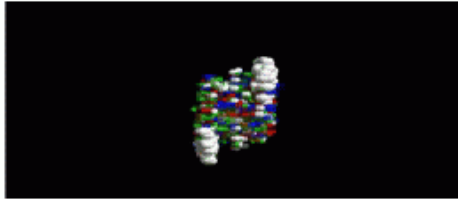
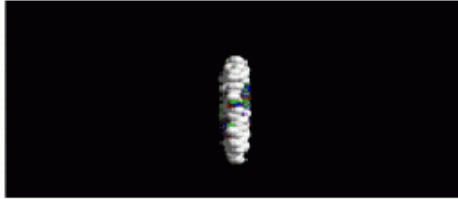
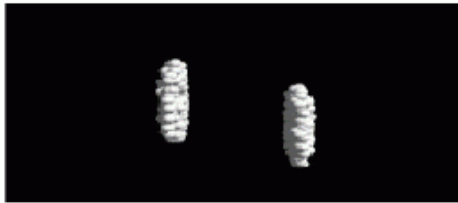
# Teilchenproduktion aus Energie



wahr und messbar

# Ablauf einer Kernkollision

UrQMD 160 GeV Au+Au



- before collision
- parton collisions
- thermalization
- hadronization
- chemical freezeout (number of particles frozen)
- kinetic freezeout (particle momenta frozen)

normal nuclear matter  
 $\rho_0 = 0.17 \text{ /fm}^3$   
 $\epsilon_0 = 0.16 \text{ GeV/fm}^3$

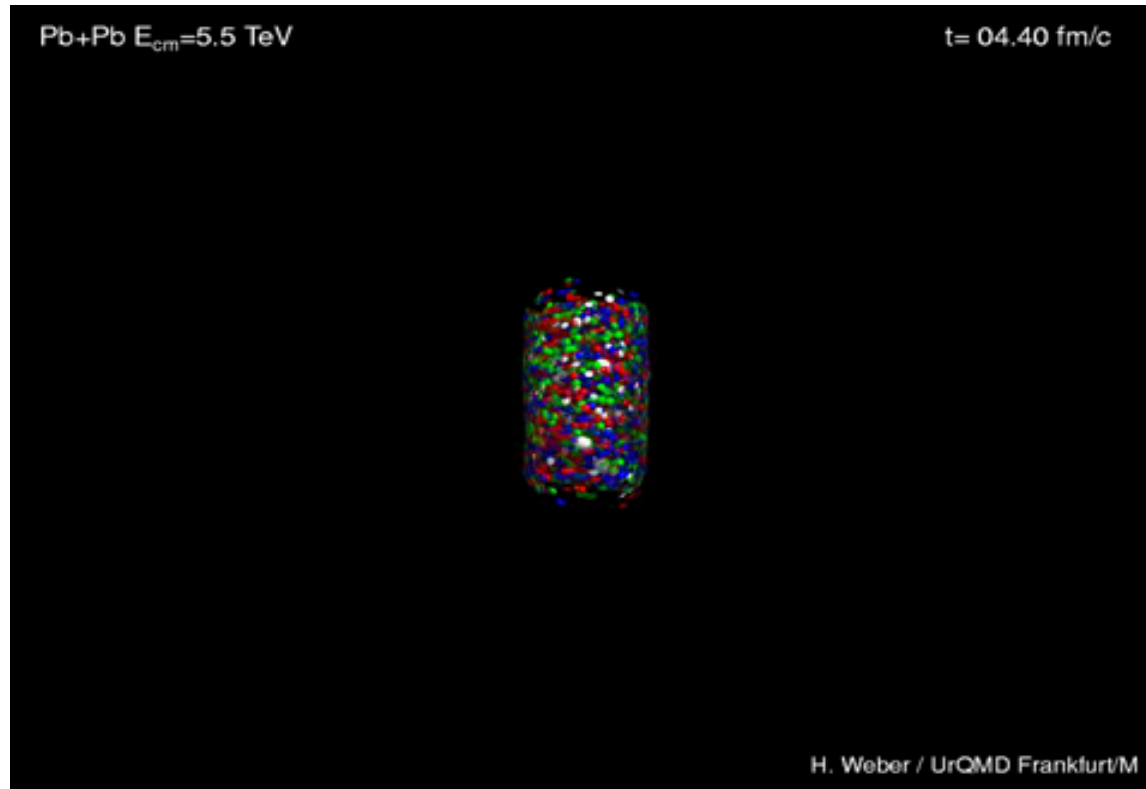
initial-state effects

quark-gluon plasma  
 $\epsilon > 0.5 \text{ GeV/fm}^3$





# Komputersimulation UrQMD



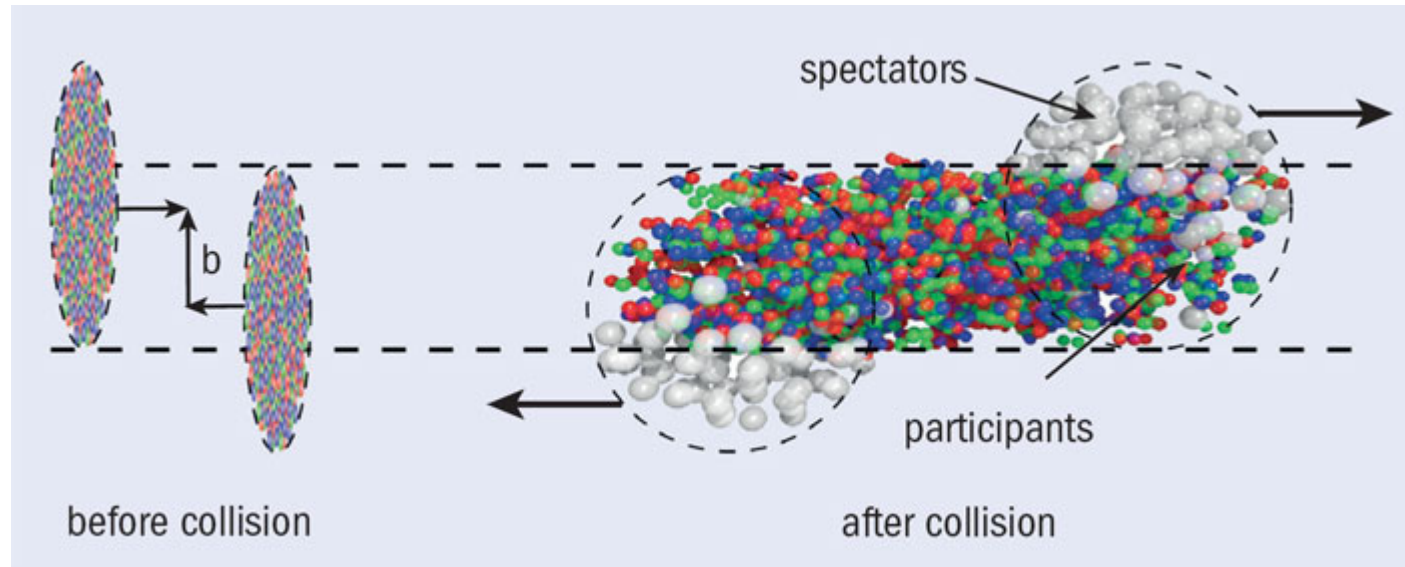
<https://youtu.be/CbhYxHSSqFE>

<http://www.gsi.de/~misko/alice/wiss/urqmd.mpg>

hadrons: white

quarks: red, green, blue

# Zentralität



zentrale Stöße (klein Stoßparameter  $b$ ) haben die höchste Anzahl der Teilchen -- sind aber selten

# Teilchendetektoren

# Detektortypen

geladenes Teilchen erzeugt Licht

- Szintillator
- Cherenkovstrahlung
- Übergangsstrahlung
- ...

Radiator + Lichtsensor

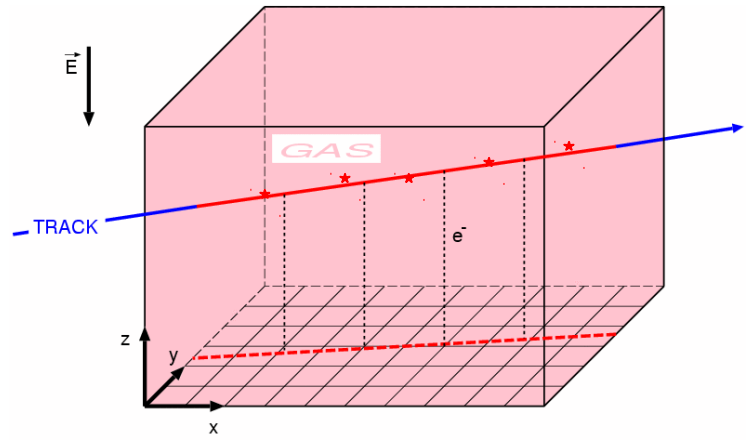


Licht → elektrisches Signal

- Fotovervielfacher (Abb.)
- Fotodiode
- Channelplate
- Drahtkammer
- ...

## Gasdetektoren

geladenes Teilchen ionisiert Gasatome

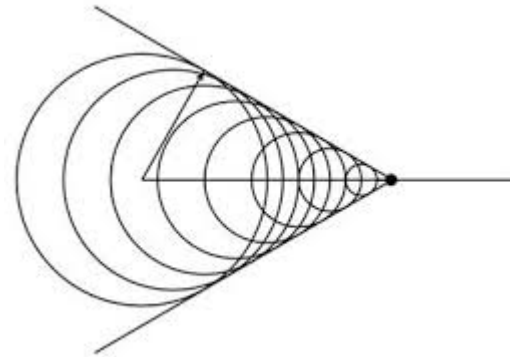


Elektronen wandern an die Anode → Signal



# Cherenkov Effekt

geladenes Teilchen, schneller als Licht, produziert Licht  
(analog zum Überschallknall)



Material	Lichtgeschwindigkeit
Vakuum	300 000 km/s
Wasser	225 000 km/s
Glas	200 000 km/s
Spezielles Brillenglas	160 000 km/s

# schlechter Start, gutes Ende



One Shilling Weekly

Telegraphic Address  
PHUSIS LESQUARE LONDON  
Telephone Number:  
WHITEHALL 8871

Publishing and Editorial Offices  
MACMILLAN & CO. LTD.  
ST. MARTIN'S STREET,  
LONDON W.C.2

RAG.AH/N.

29. 6. 37.

The Editor of "NATURE" presents his compliments to Mr. P. A. Cherencov and regrets he is unable to make use of the communication, returned herewith, entitled "VISIBLE RADIATION PRODUCED BY ELECTRONS MOVING IN A MEDIUM WITH VELOCITIES EXCEEDING THAT OF LIGHT".

## The Nobel Prize in Physics 1958



Pavel Alekseyevich Cherenkov

Prize share: 1/3



Il'ja Mikhailovich Frank

Prize share: 1/3

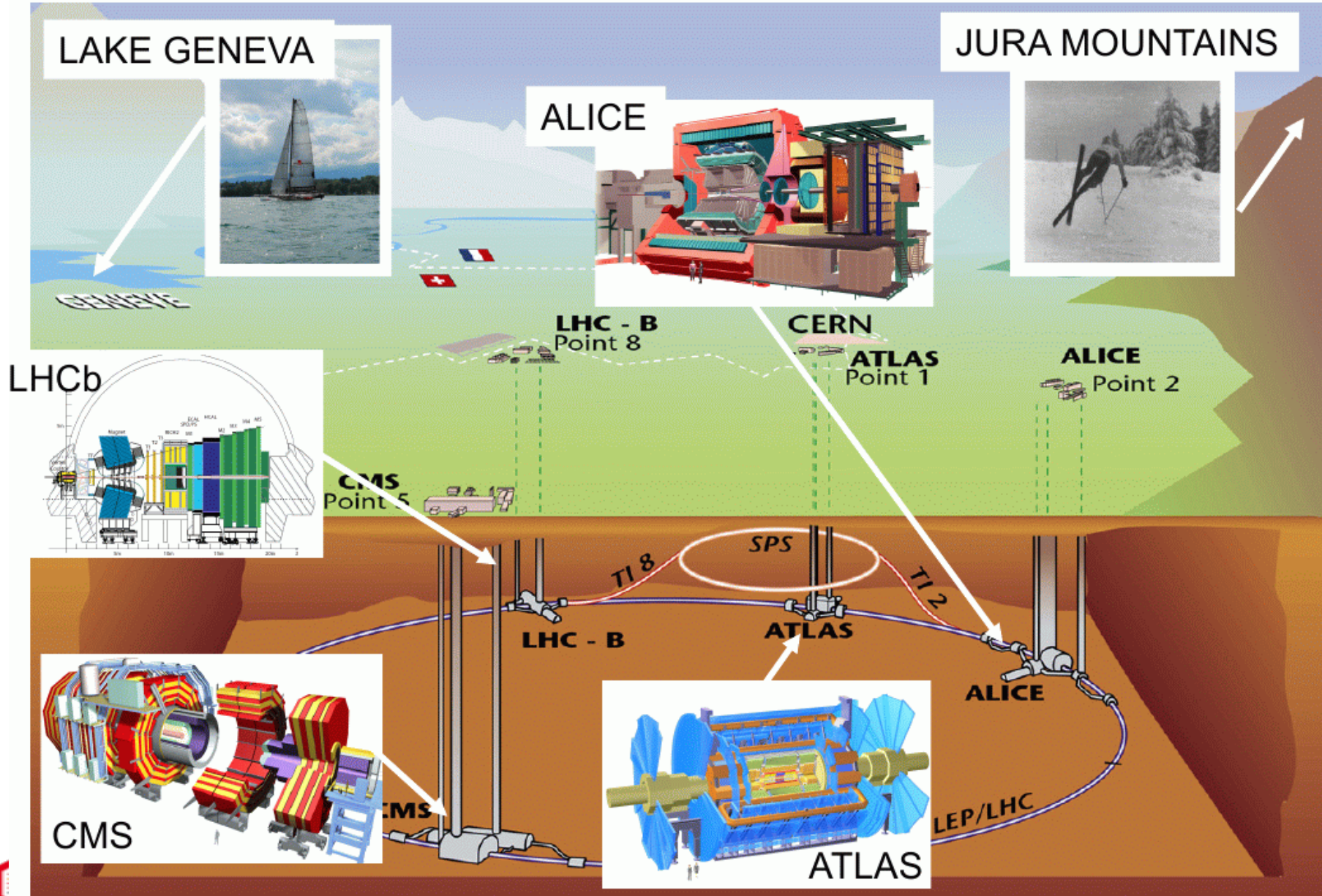


Igor Yevgenyevich Tamm

Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 1958 was awarded jointly to Pavel Alekseyevich Cherenkov, Il'ja Mikhailovich Frank and Igor Yevgenyevich Tamm "for the discovery and the interpretation of the Cherenkov effect".

# LHC-Experimente



# LHC-Experimente

ATLAS	A Toroidal LHC ApparatuS
CMS	Compact Muon Solenoid
ALICE	A Large Ion Collider Experiment
LHCb	Large Hadron Collider beauty experiment
TOTEM	Total Elastic and Diffractive Cross Section Measurement (am CMS)
LHCf	Large Hadron Collider forward (am ATLAS)
MOEDAL	Monopole and Exotics Detector at LHC (am LHCb)

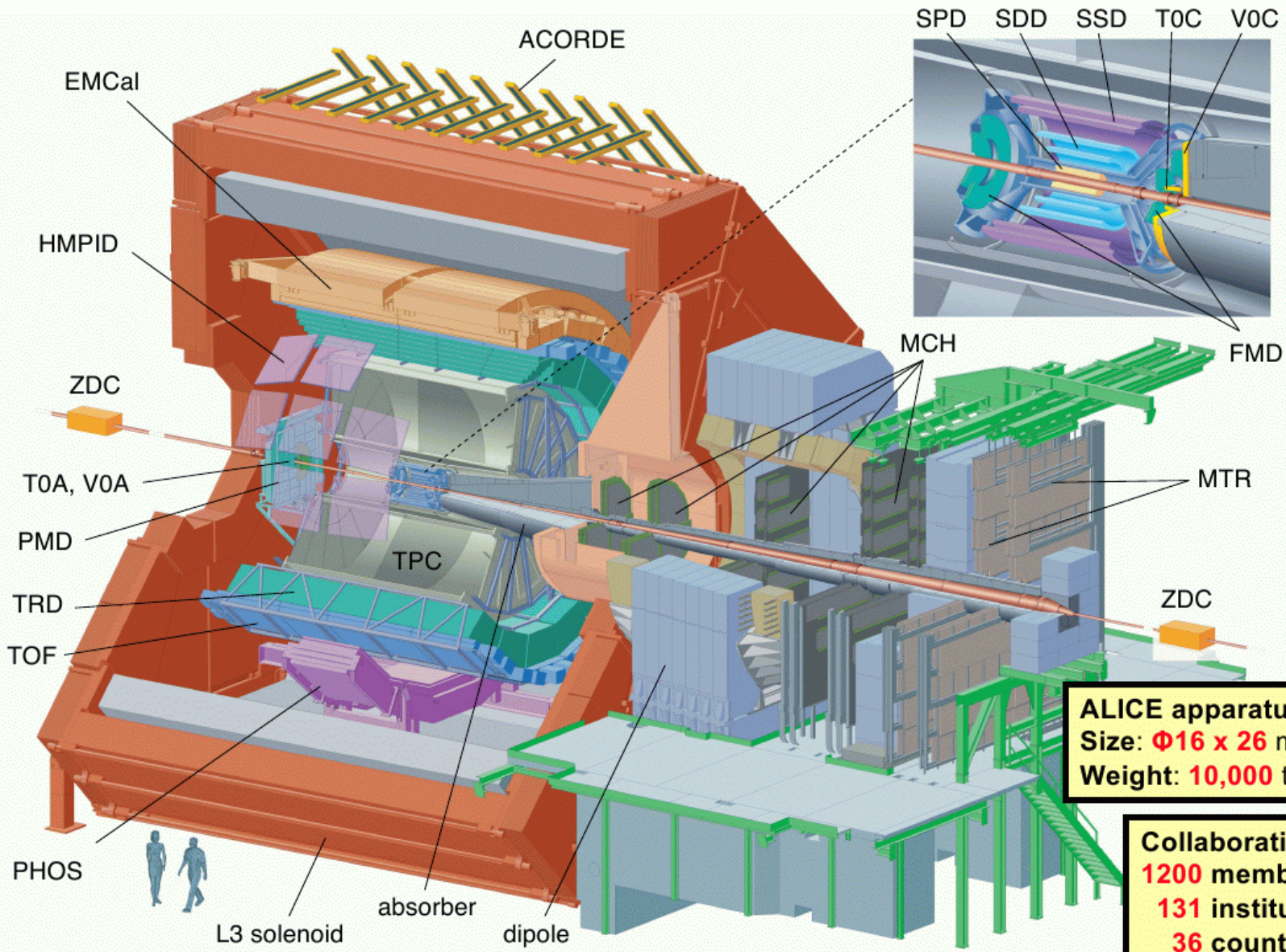


# LHC rap



<https://www.youtube.com/watch?v=j50ZssEojtM>  
<http://www.gsi.de/~misko/alice/wiss/lhc-rap-short.mp4>

# ALICE Experiment

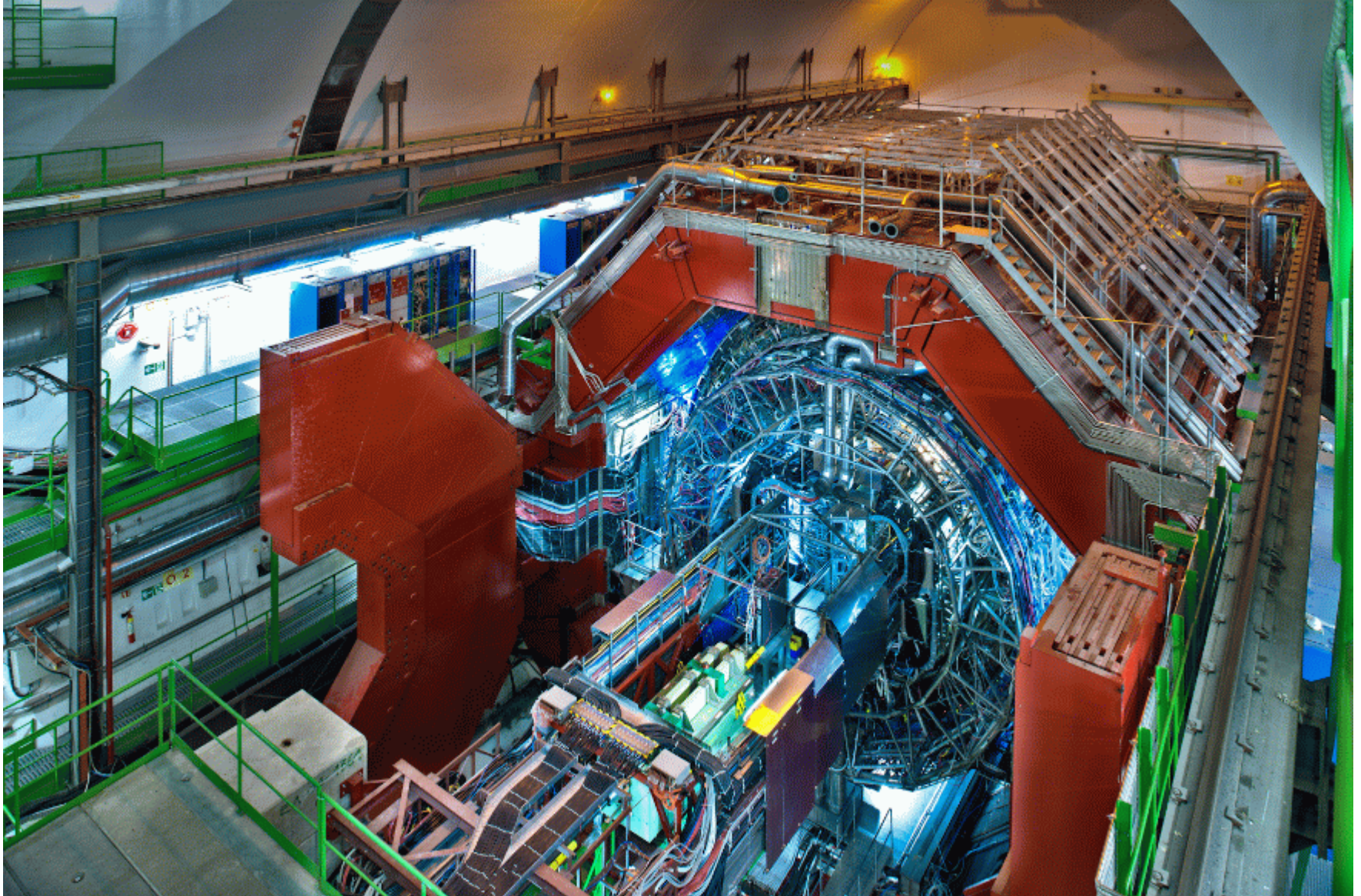


**ALICE apparatus:**  
**Size:  $\Phi 16 \times 26$  m**  
**Weight: 10,000 tons**

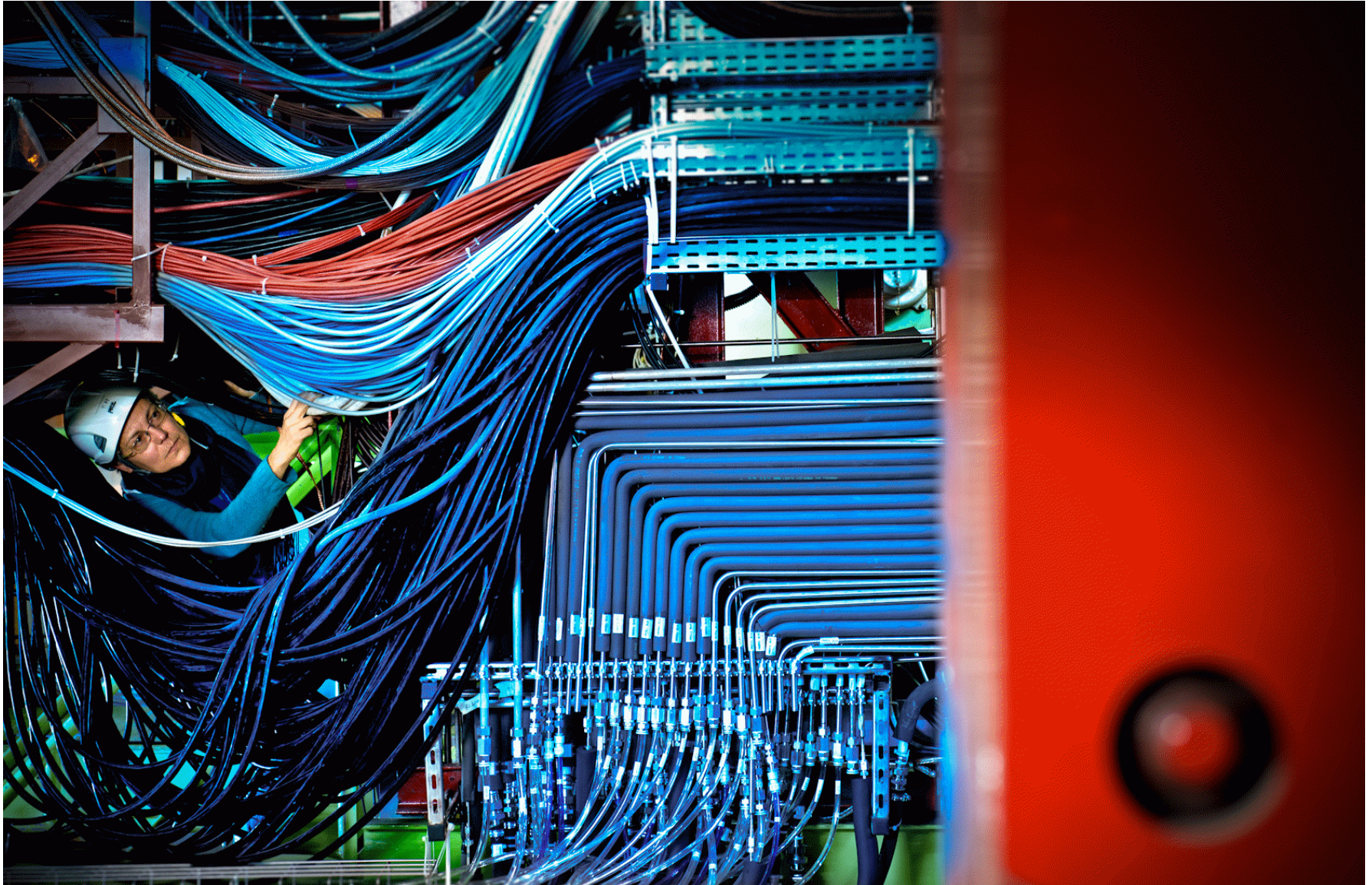
**Collaboration:**  
**1200 members**  
**131 institutes**  
**36 countries**



# ALICE Experiment



# ALICE Experiment



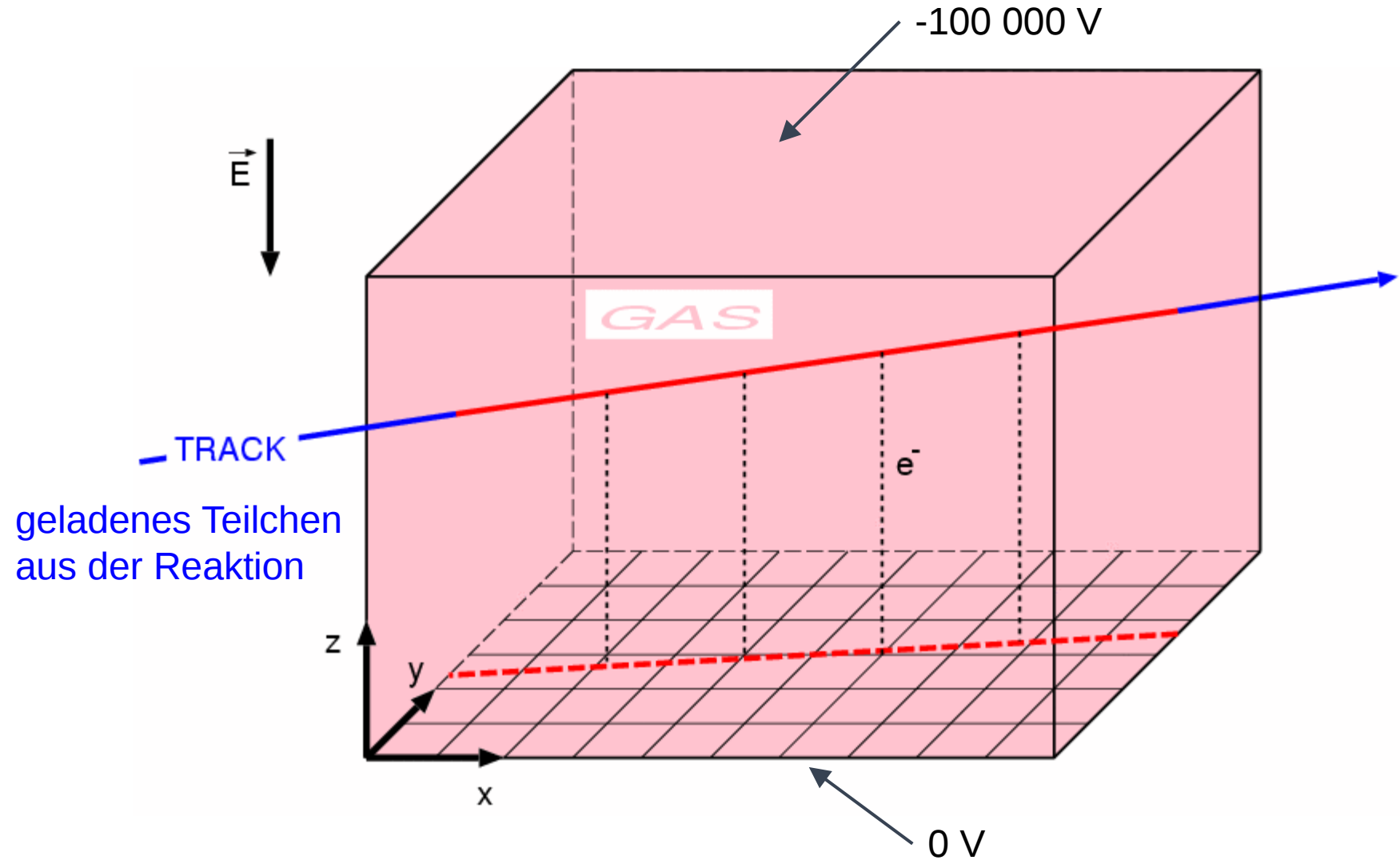
# ALICE TPC und TRD

starke Beteiligung deutscher Institute an den zwei größten Detektoren:

TPC: Time Projection Chamber

TRD: Transition Radiation Detektor

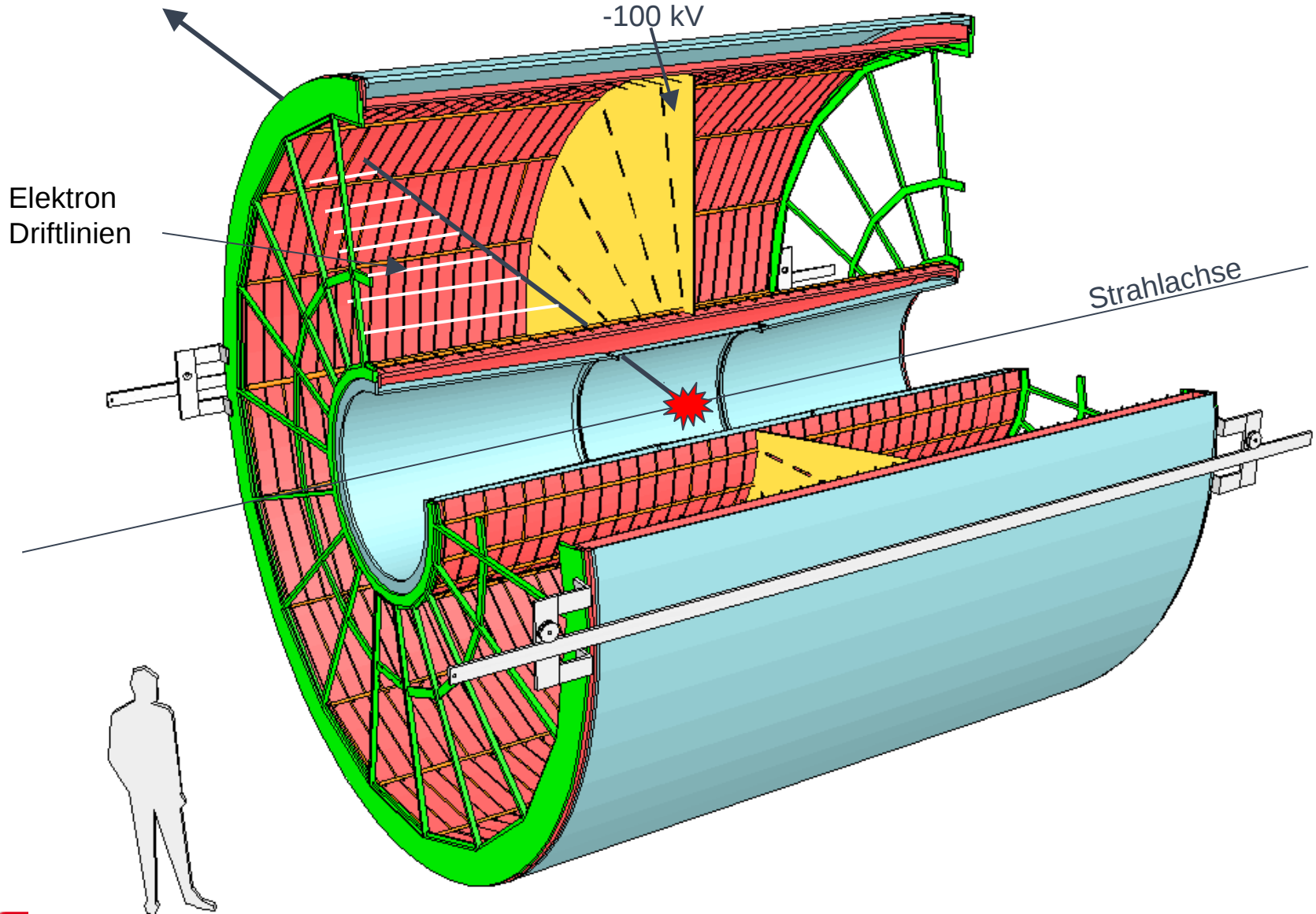
# Time Projection Chamber - Prinzip



# Katzen-TPC

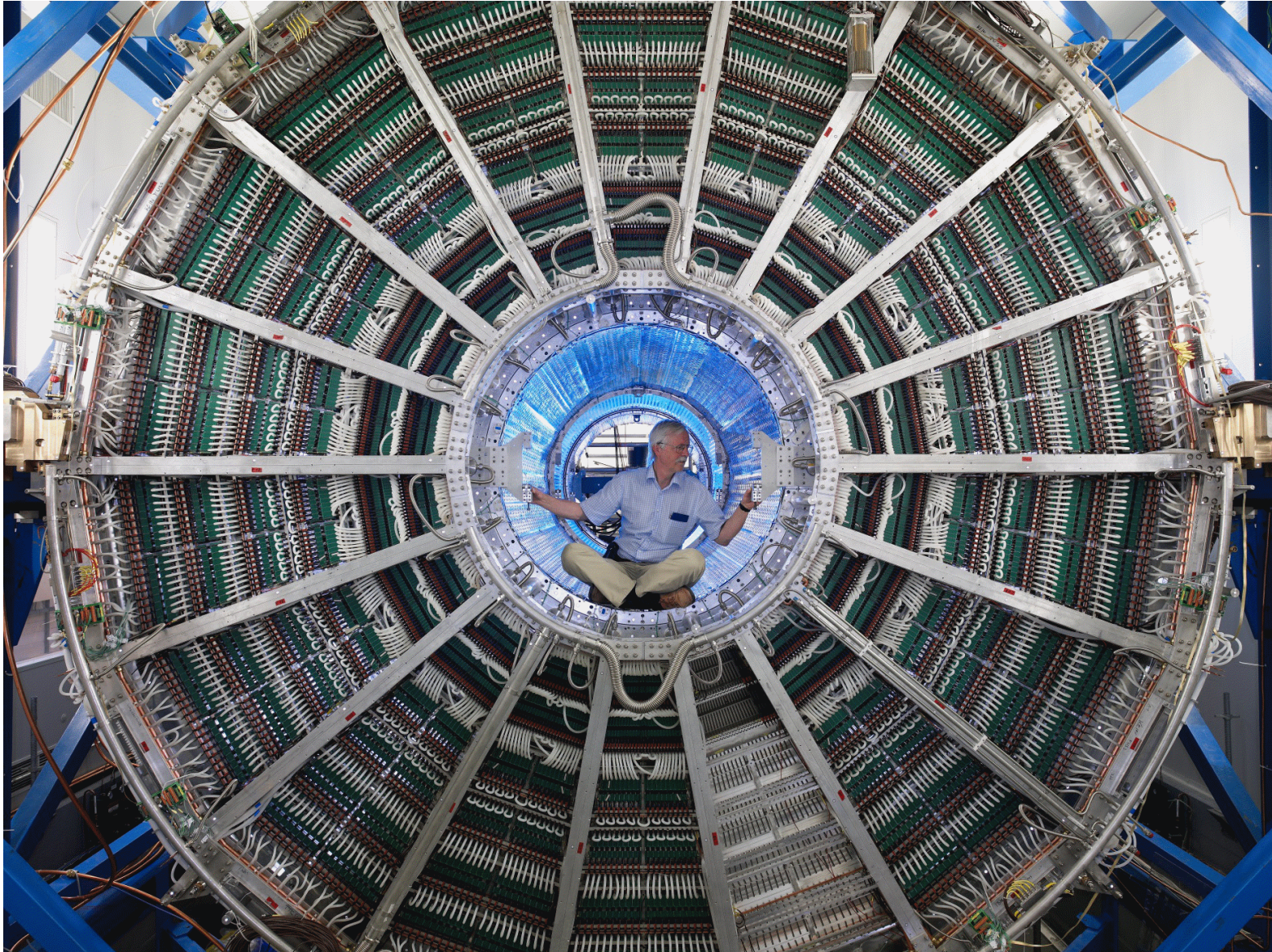


# ALICE Time Projection Chamber

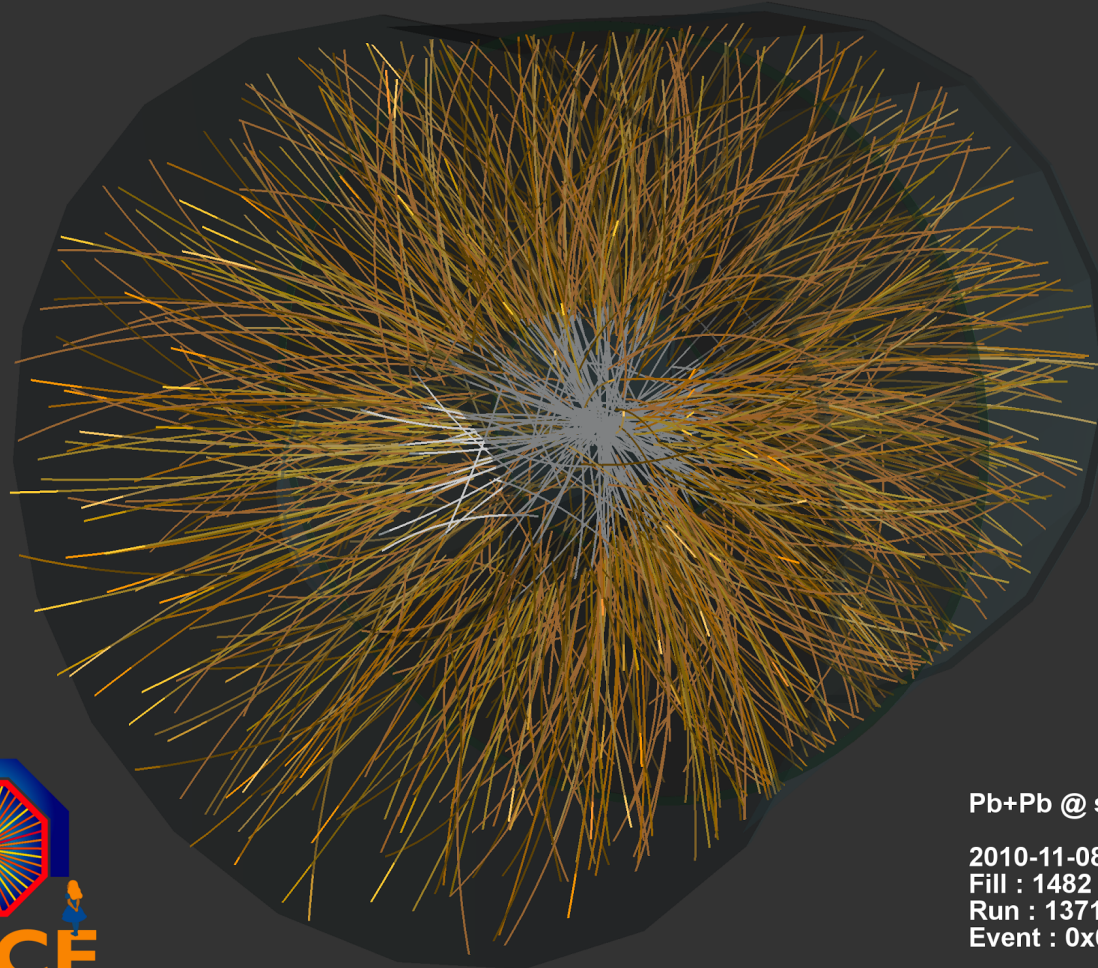




# ALICE Time Projection Chamber



# rekonstruierte Teilchenspuren



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

2010-11-08 11:36:37

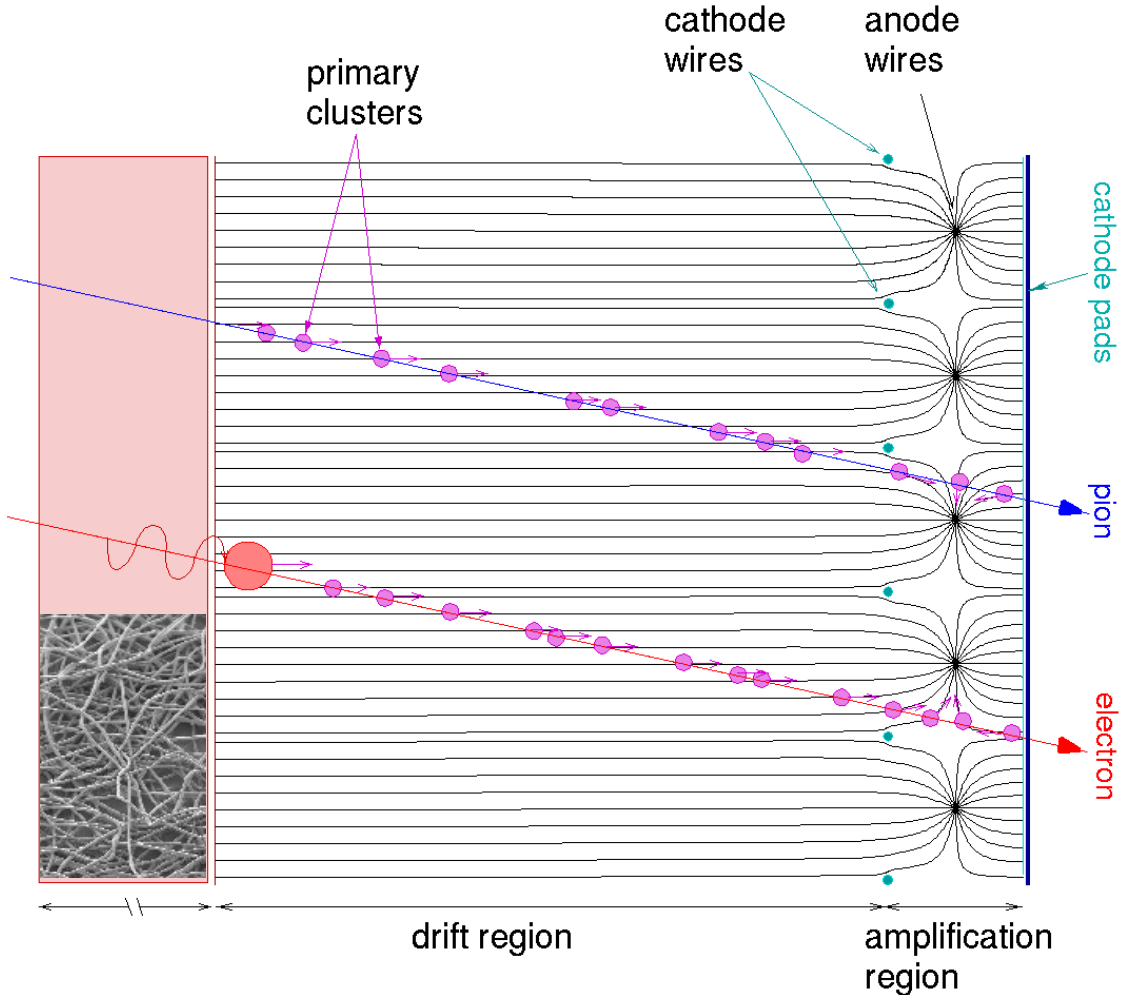
Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x000000009D4C1693



# ALICE Transition Radiation Detector



# erstes TRD Supermodul

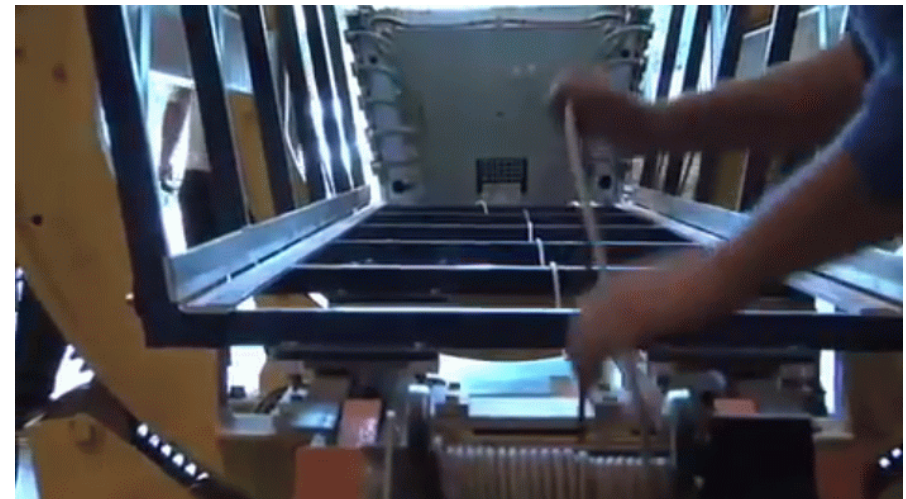


<http://www.gsi.de/~misko/alice/wiss/trd-assembly.mpg>

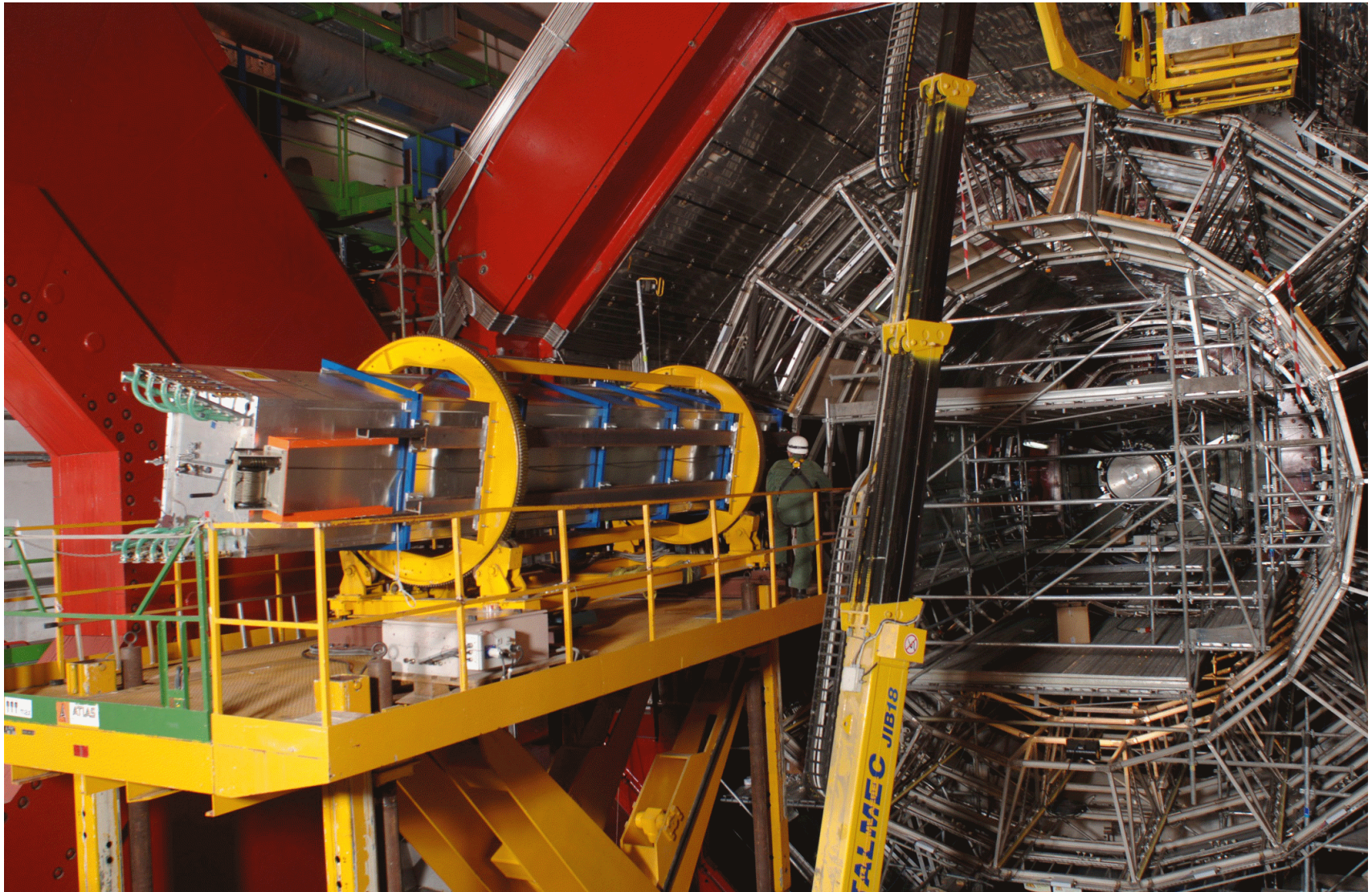
# TRD Transport nach Genf



<https://www.youtube.com/watch?v=JWhWDR1LP9s>



# ALICE Transition Radiation Detector



# Erste Kollision in ALICE, 23.11.2009

- Nov 23, 2009 first collisions seen with ITS



- Nov 28, 2009 first LHC physics paper submitted by ALICE, charged particle multiplicity



# ALICE Veröffentlichungen

erster LHC-Artikel von pp-Kollisionen (nach 5 Tagen)

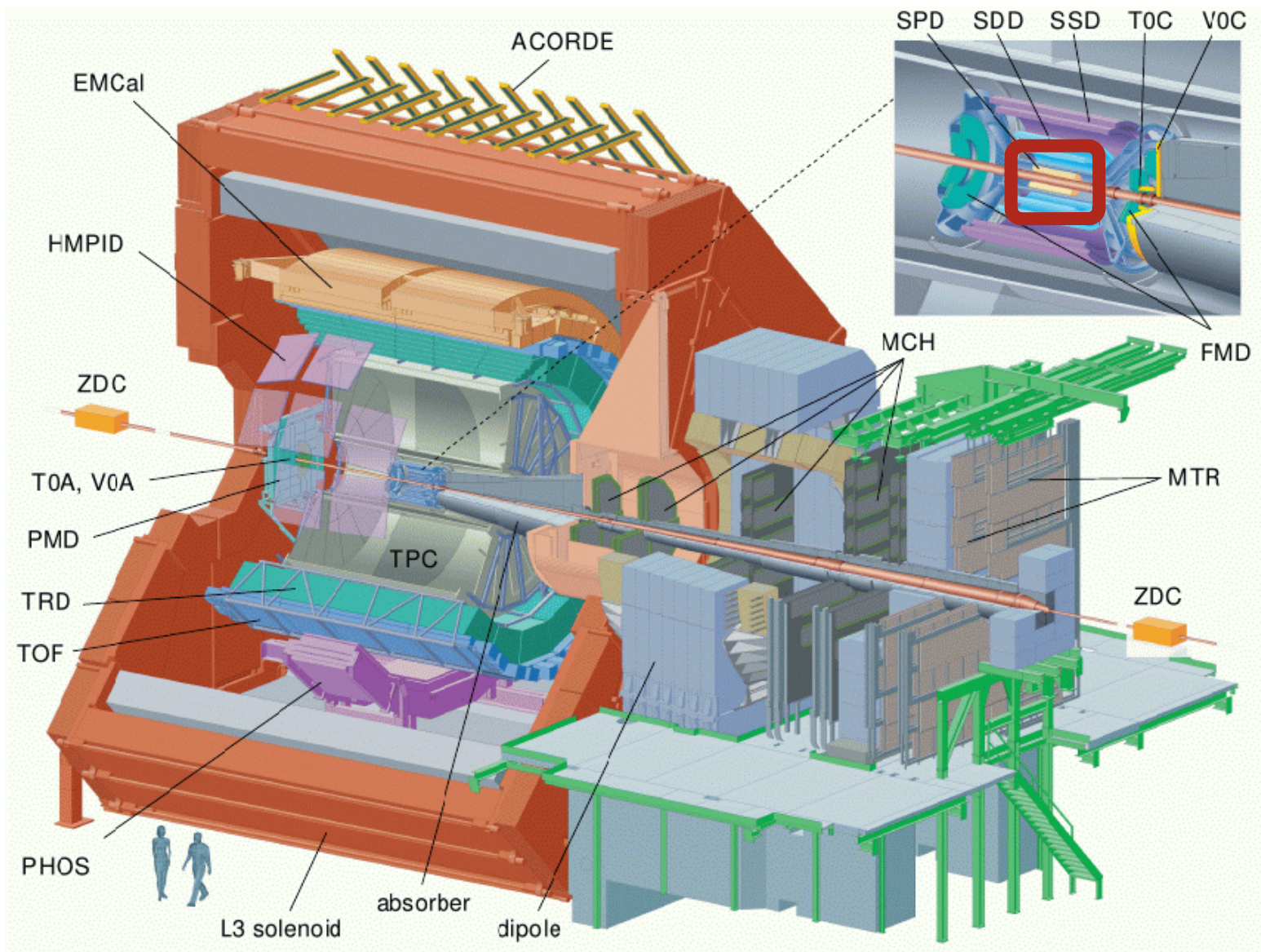
erste 2 LHC-Artikel von Pb-Pb-Kollisionen (nach 9 Tagen)

erste 2 LHC-Artikel von p-Pb-Kollisionen (nach 1 Monat)

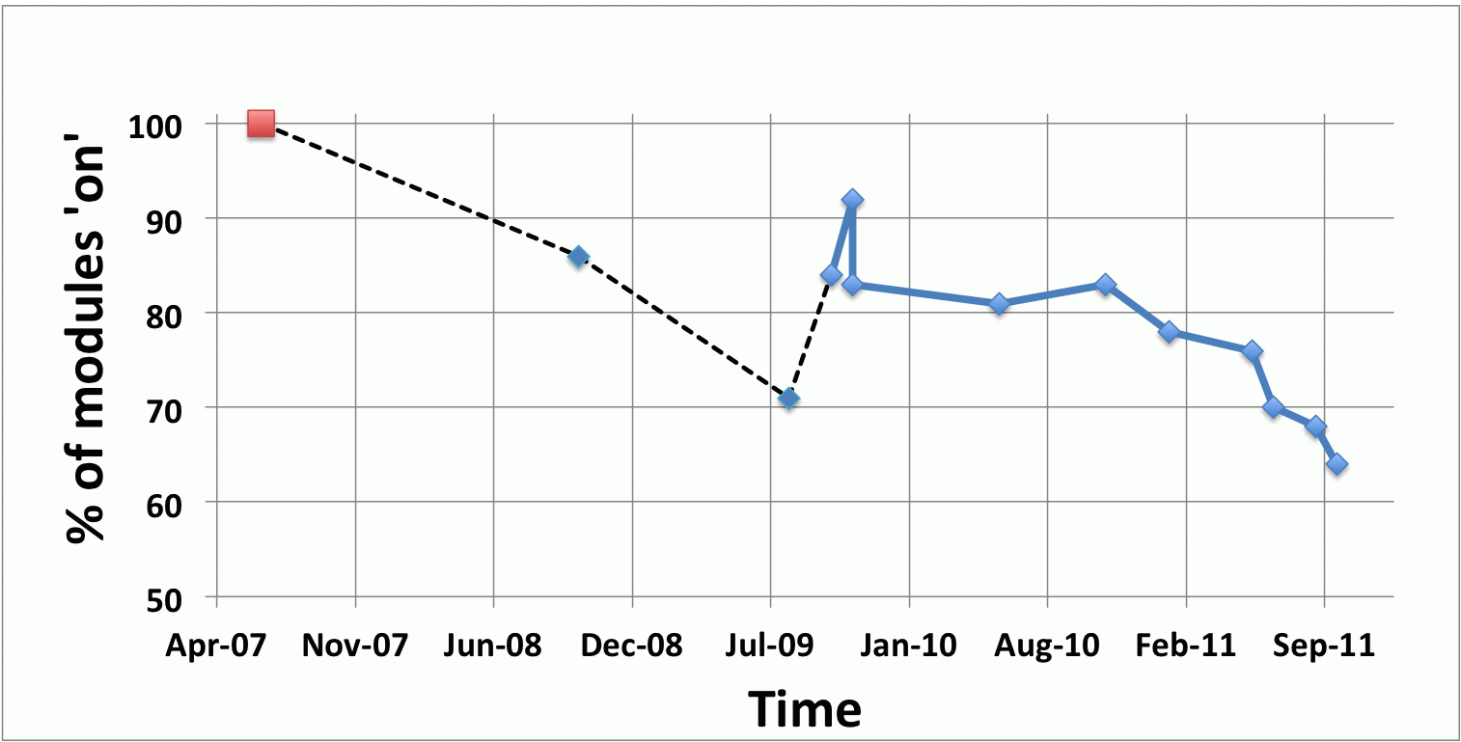
137 Artikel in 2009-2015



# Übliche Betriebsprobleme, z.B. SPD Kühlung



# Übliche Betriebsprobleme, z.B. SPD Kühlung



**immer mehr Module müssen abgeschaltet werden, da Filter in den Kühlwasserleitungen verstopft**



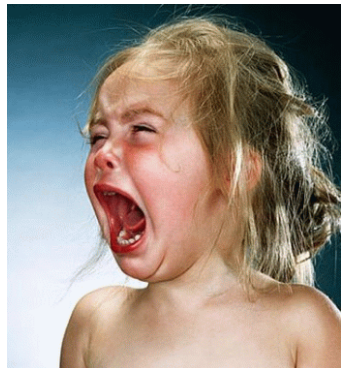
# Übliche Betriebsprobleme, z.B. SPD Kühlung

Lösungsmittel?



kein Erfolg

Ultraschall?

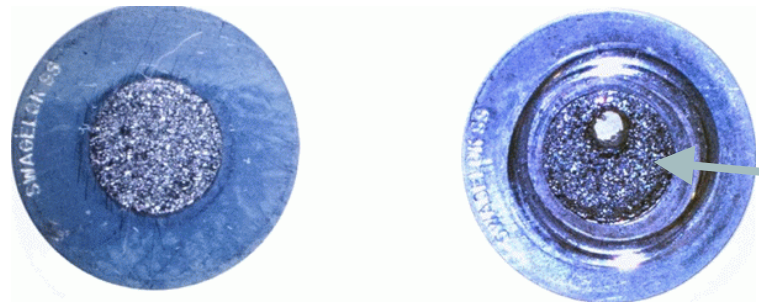


kein Erfolg

Durchbohren?



Jawohl!



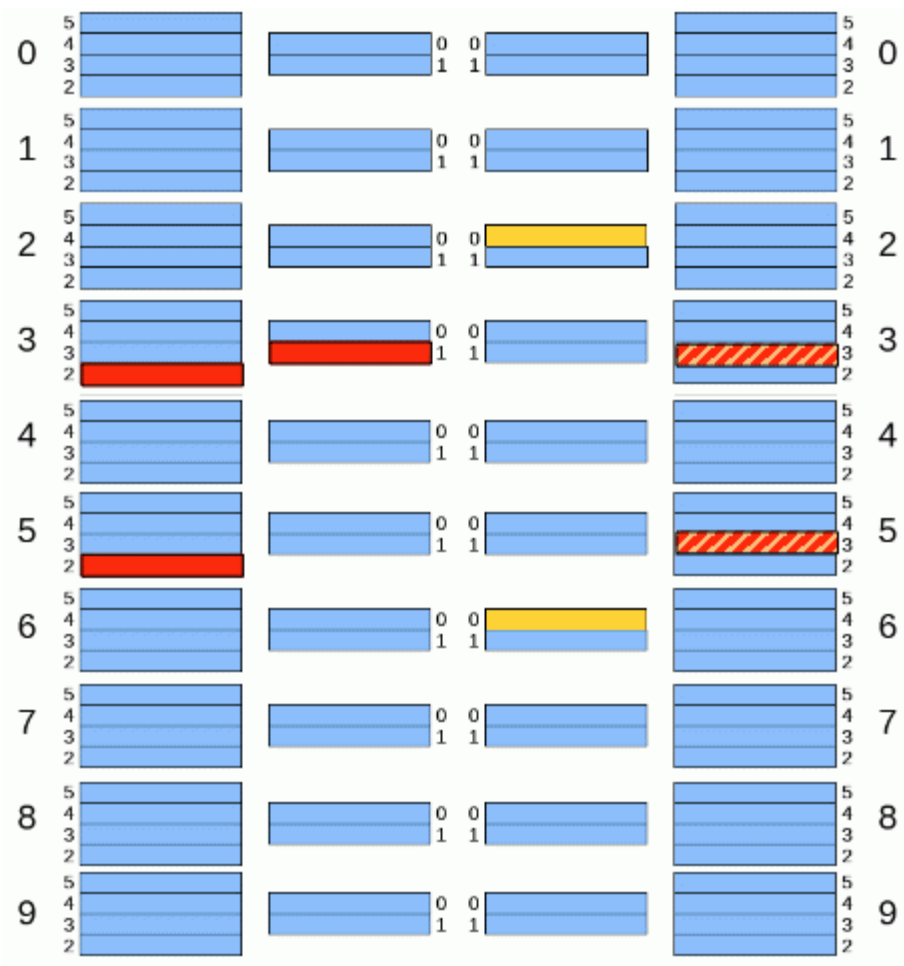
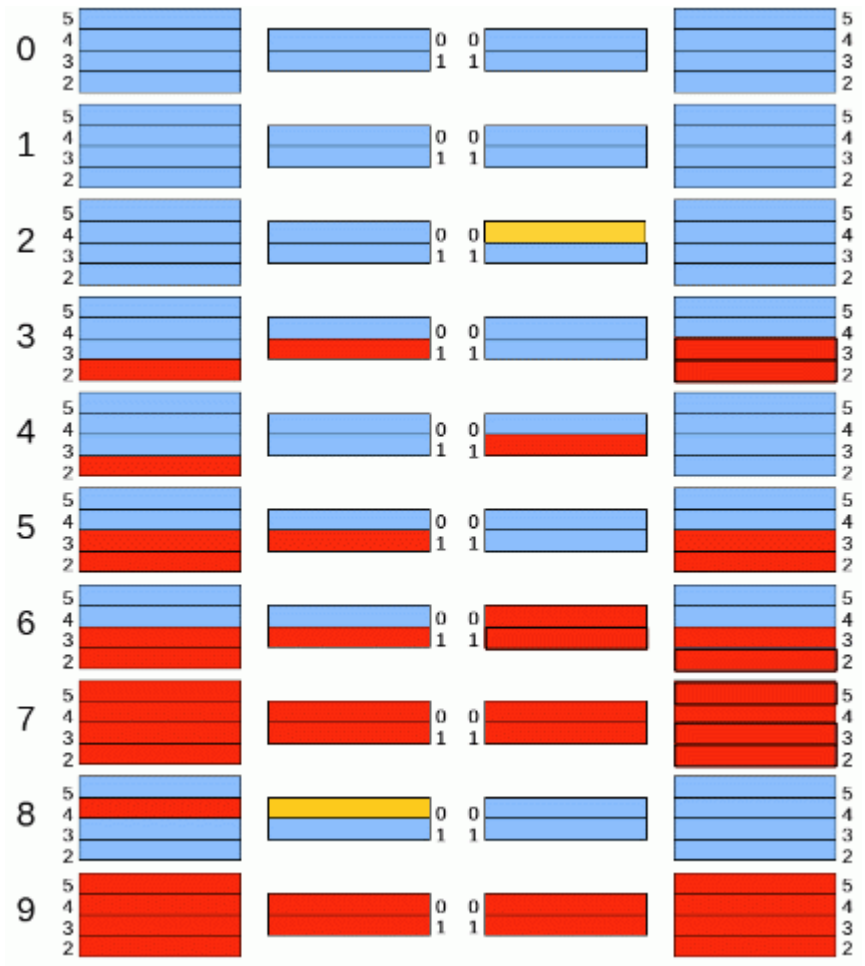
Reparatur am 15. Februar 2012

aufgebohrter Filter

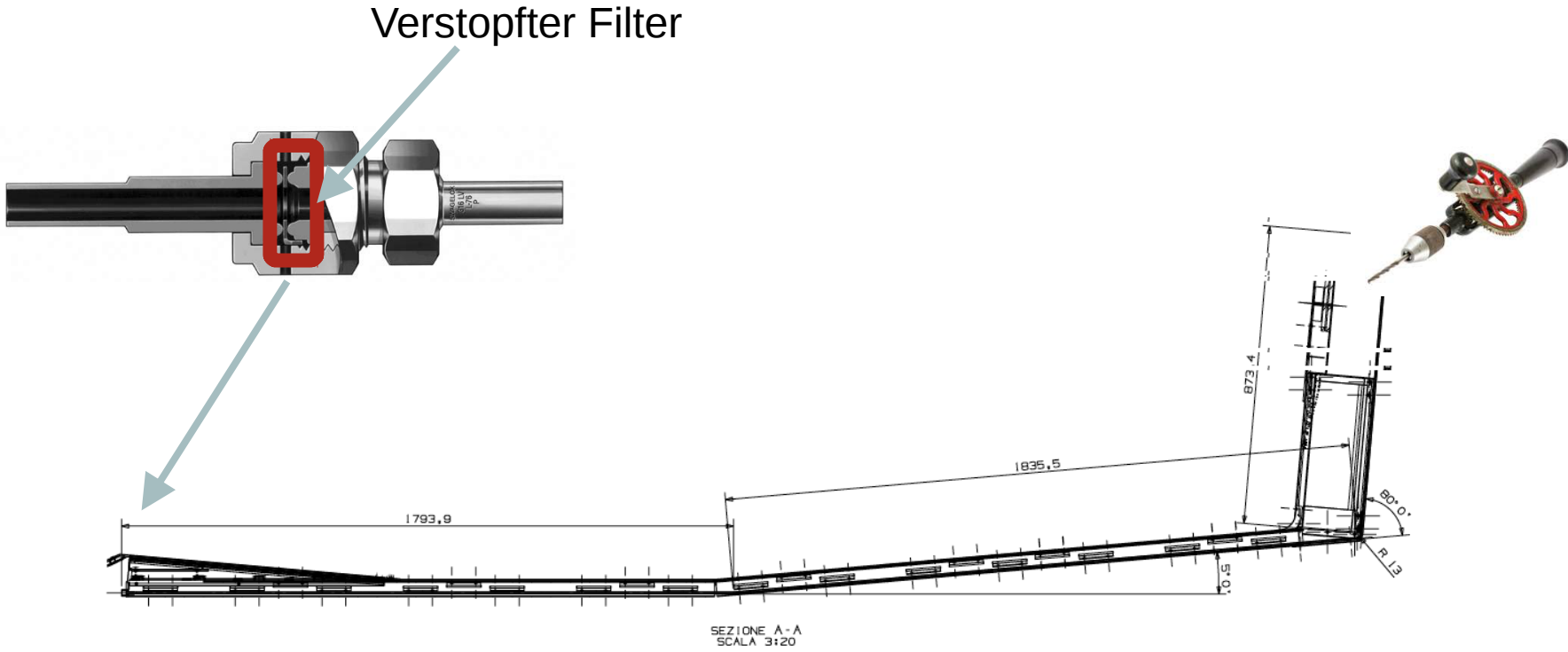
# Übliche Betriebsprobleme, z.B. SPD Kühlung

Module vor Reparatur

nach Reparatur



# Übliche Betriebsprobleme, z.B. SPD Kühlung



4.5 m Rohr mit Innendurchmesser 4 mm

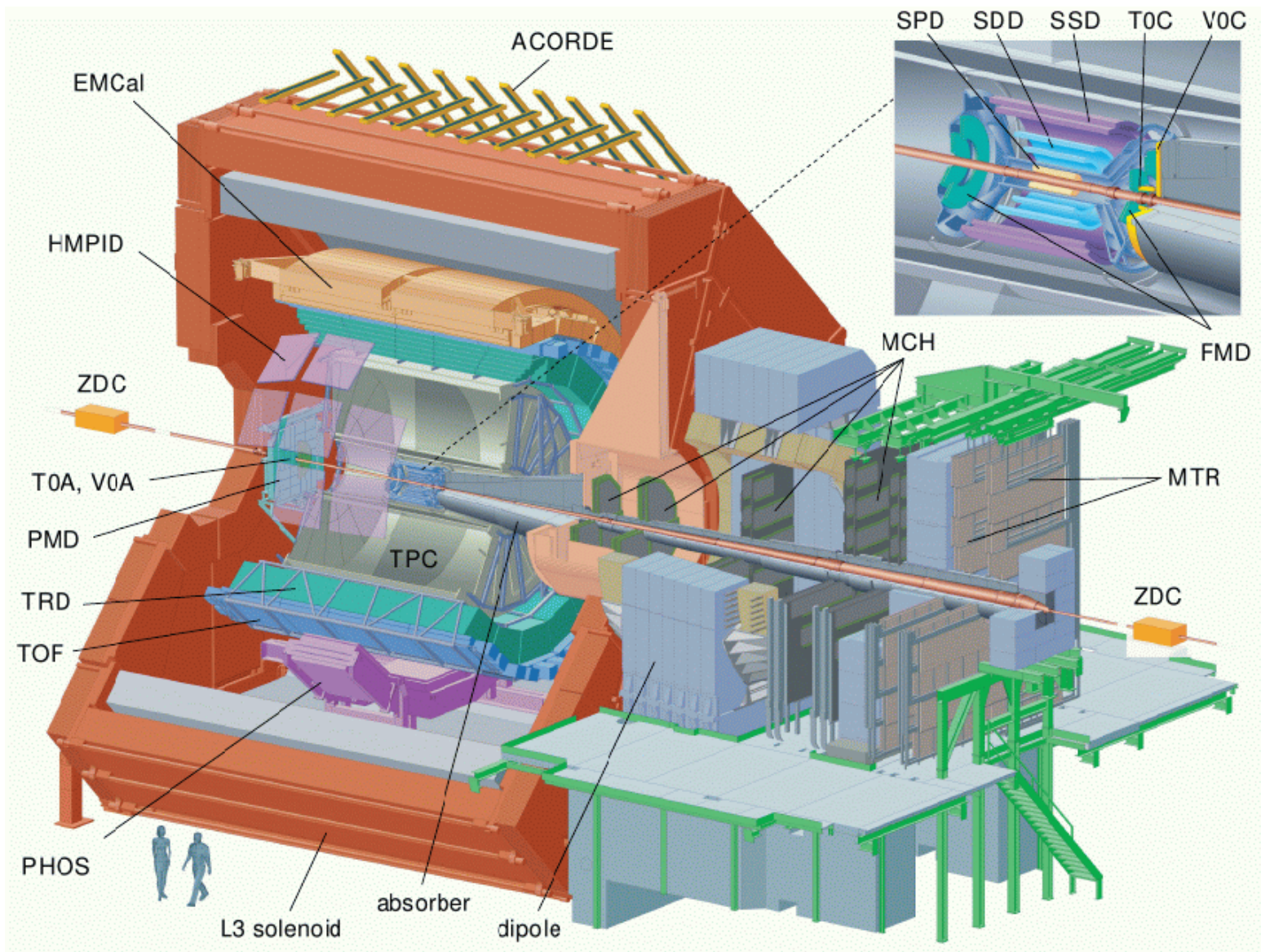


# Arbeiten am CERN

<http://www.gsi.de/~misko/alice/wiss/chilo-short.mp4>



# Arbeiten am CERN



# CERN: unkonventionelle Architektur





# CERN: angenehmes Arbeitsambiente



# CERN: angenehmes Arbeitsambiente



# CERN: Zutritt



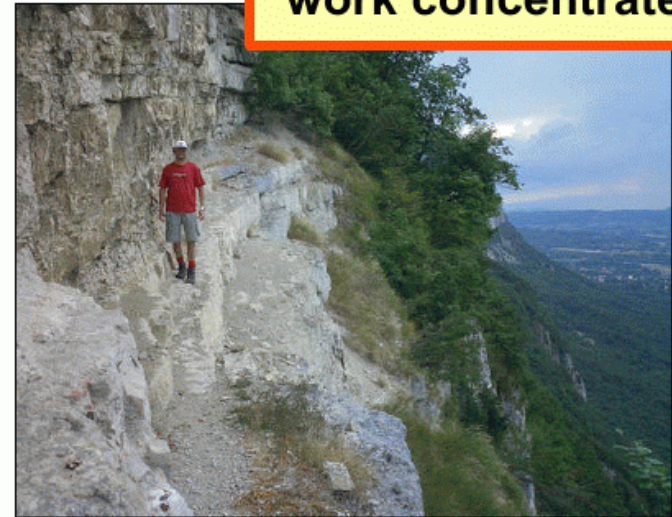
Zutritt verboten  
für alkoholisierte  
Personen

# CERN: Arbeitssicherheitsmaßnahmen

always wear safety equipment



work concentrated



handle properly the Unexpected



# CERN PR-Arbeit

<http://press.web.cern.ch/backgrounders/cern-answers-your-queries-about-23-september-2015>

## **CERN answers your queries about 23 September 2015**

Is the Large Hadron Collider dangerous?

Is CERN planning anything for the end of September 2015?

Why is the Higgs boson referred to as the God particle?

Is CERN's aim to prove that God does not exist?

Why does CERN have a statue of Shiva?

What are the shapes in the CERN logo?

Will CERN open a door to another dimension?

What did Stephen Hawking say about Higgs potential destroying the Universe?

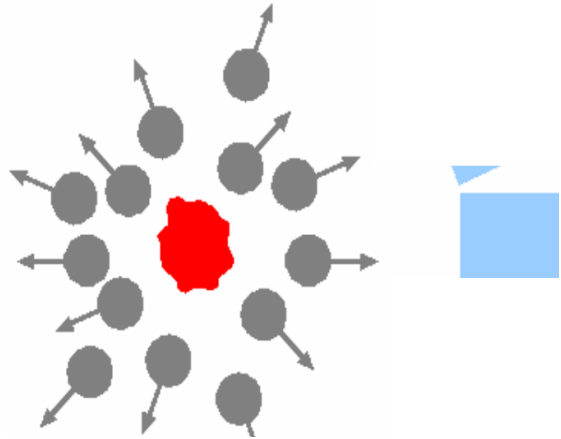
Why does CERN appear in Google Maps when I type certain keywords?

Can the LHC have an influence on weather patterns and natural phenomena?

Will CERN generate a black hole?

# QGP, Resultate

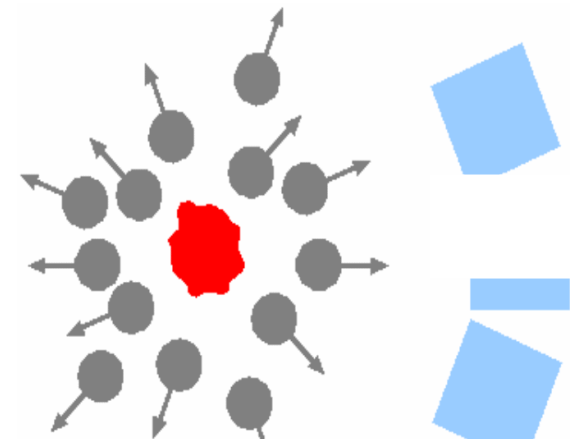
# 1. Größe der Teilchenquelle



1-Teilchen Analyse



Spektren, Temperatur

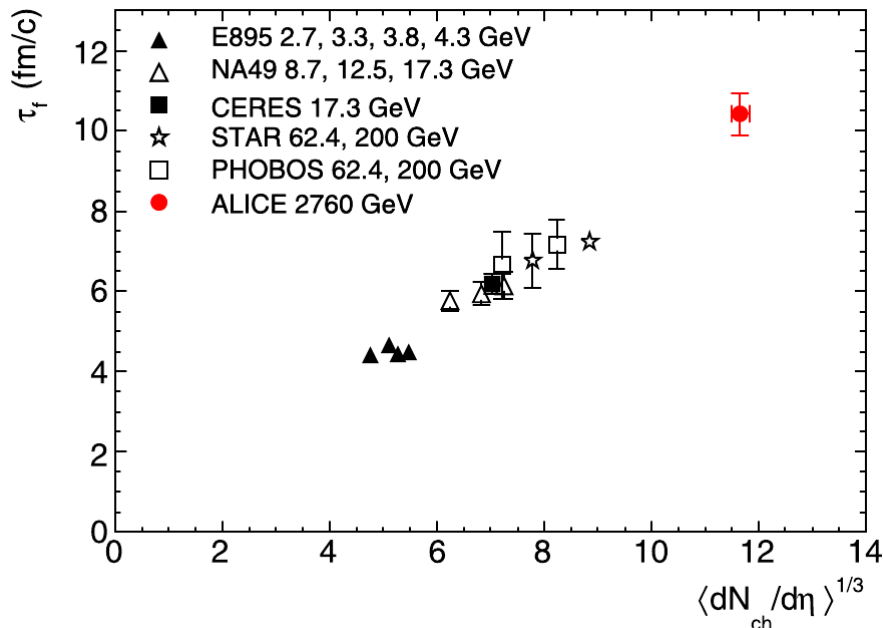


2-Teilchen Analyse

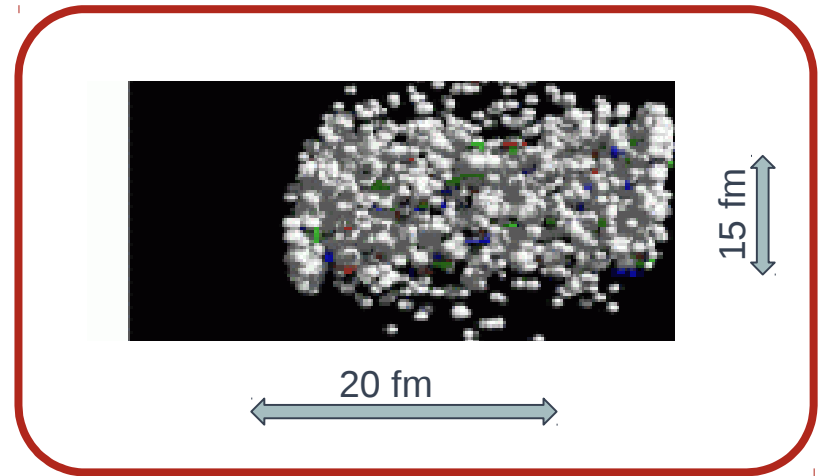


Ausdehnung der Teilchenquelle

# Größe der Teilchenquelle

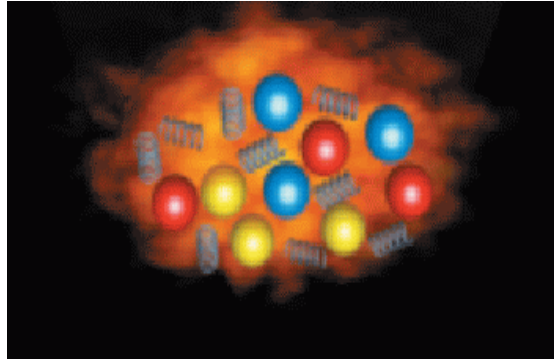


Expansionszeit  $\tau_f \sim 10$  fm/c  $\rightarrow$   
 Gesamtlänge entlang des Strahls  $\sim 20$  fm





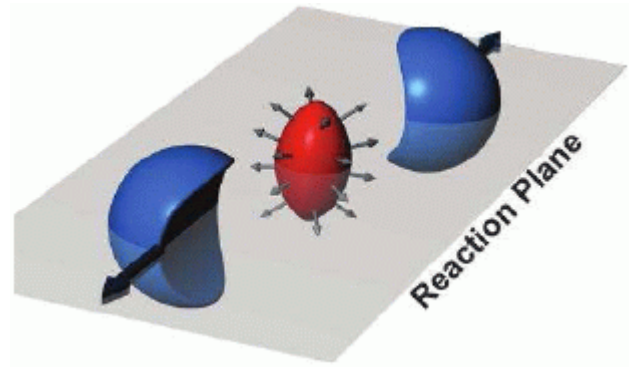
## 2. Quark-Gluon Plasma: gasförmig oder flüssig?



Situation Anfang 2000-er:

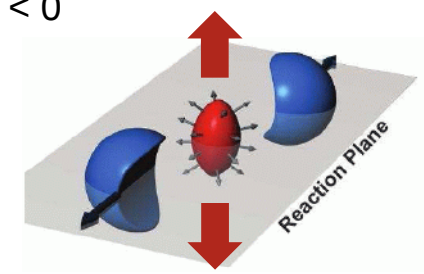
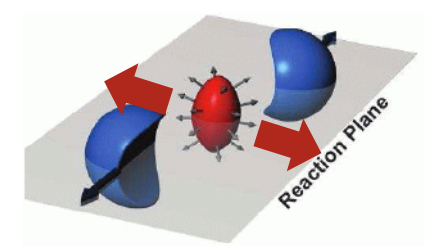
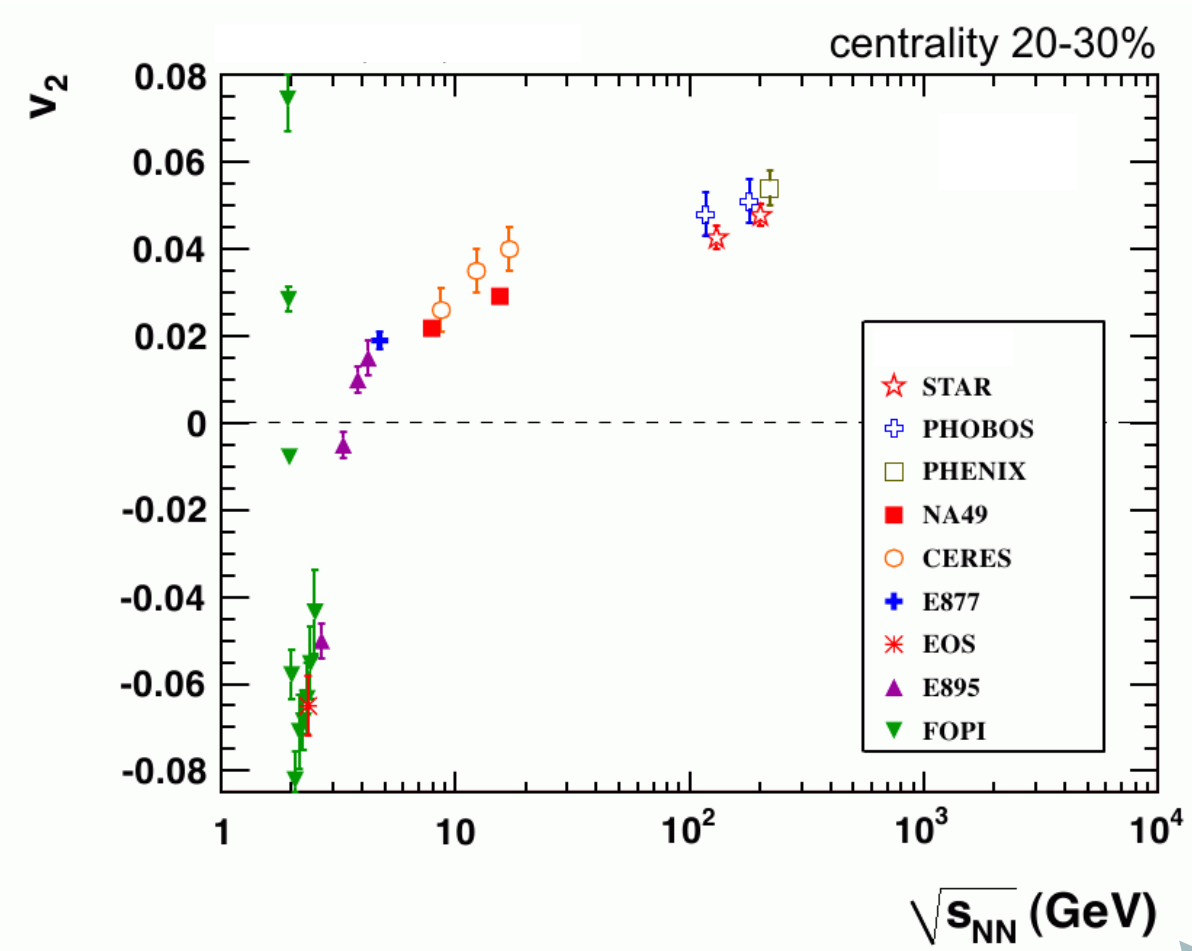
- Erwartung: QGP ist gasförmig (da Quarks frei)
- RHIC-Experimente (2000): doch flüssig
- Kommt das erwartete gasähnliche Verhalten bei höheren Energien, d.h. am LHC?

# Wie merkt man ob das System gasförmig oder flüssig ist?



- In nichtzentralen Kollisionen ist die heiße Zone Mandelförmig
- wenn Flüssigkeit → Teilchenemission bevorzugt in der Reaktionsebene
- wenn Gas → Teilchenemission isotrop

# Quark-Gluon Plasma: gasförmig oder flüssig?



gemessen am

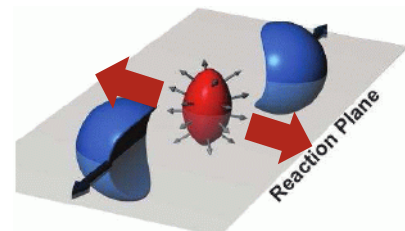
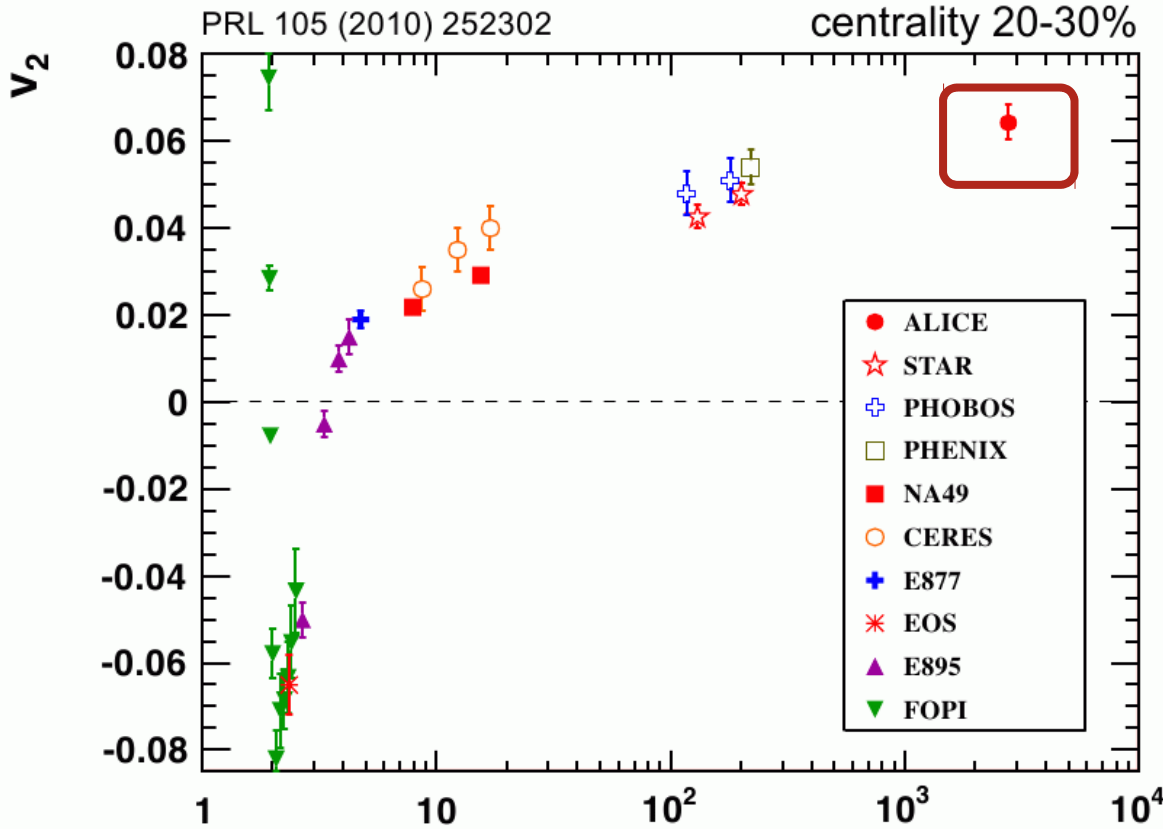
↑ SIS AGS SPS

↑ RHIC

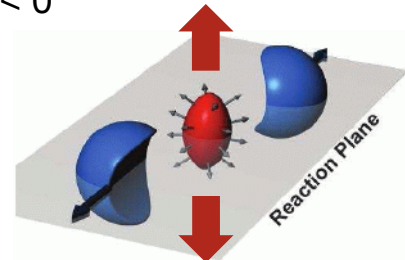
Strahlenergie



# Quark-Gluon Plasma: gasförmig oder flüssig?



$v_2 > 0$



$v_2 < 0$

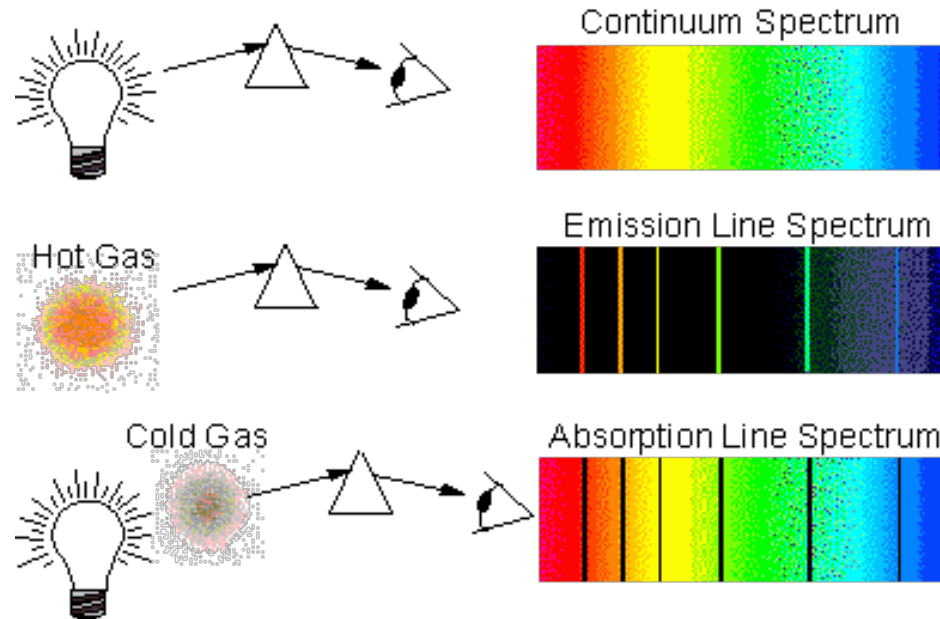
$\sqrt{s_{NN}}$  (GeV)

Strahlenergie



# 3. Ist die QGP überhaupt da?

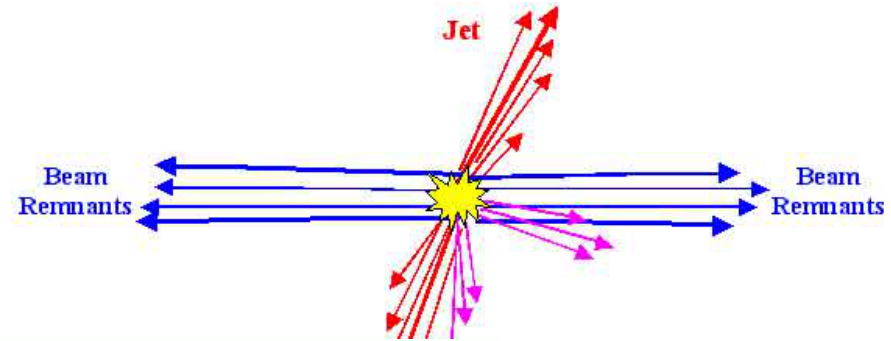
Wie untersucht man die Zusammensetzung eines Materials? Spektroskopie!



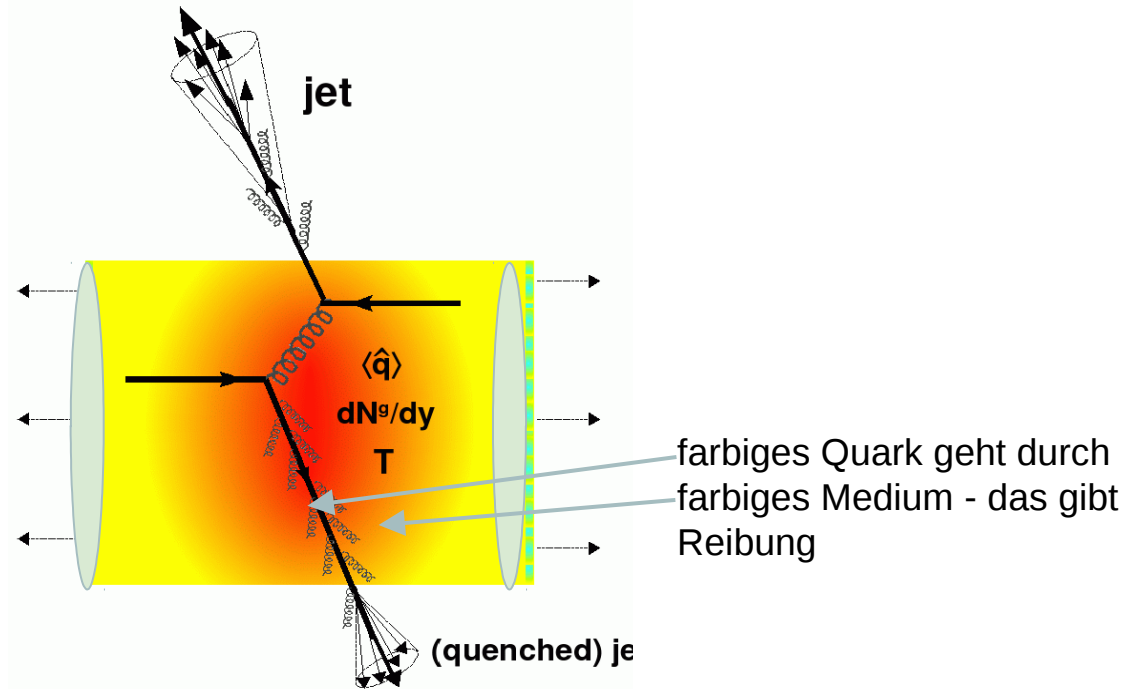
Gene Smith's Astronomy Tutorial

# QGP-Probe: Jets

in  $e+e^-$  und  $pp$  Stößen:



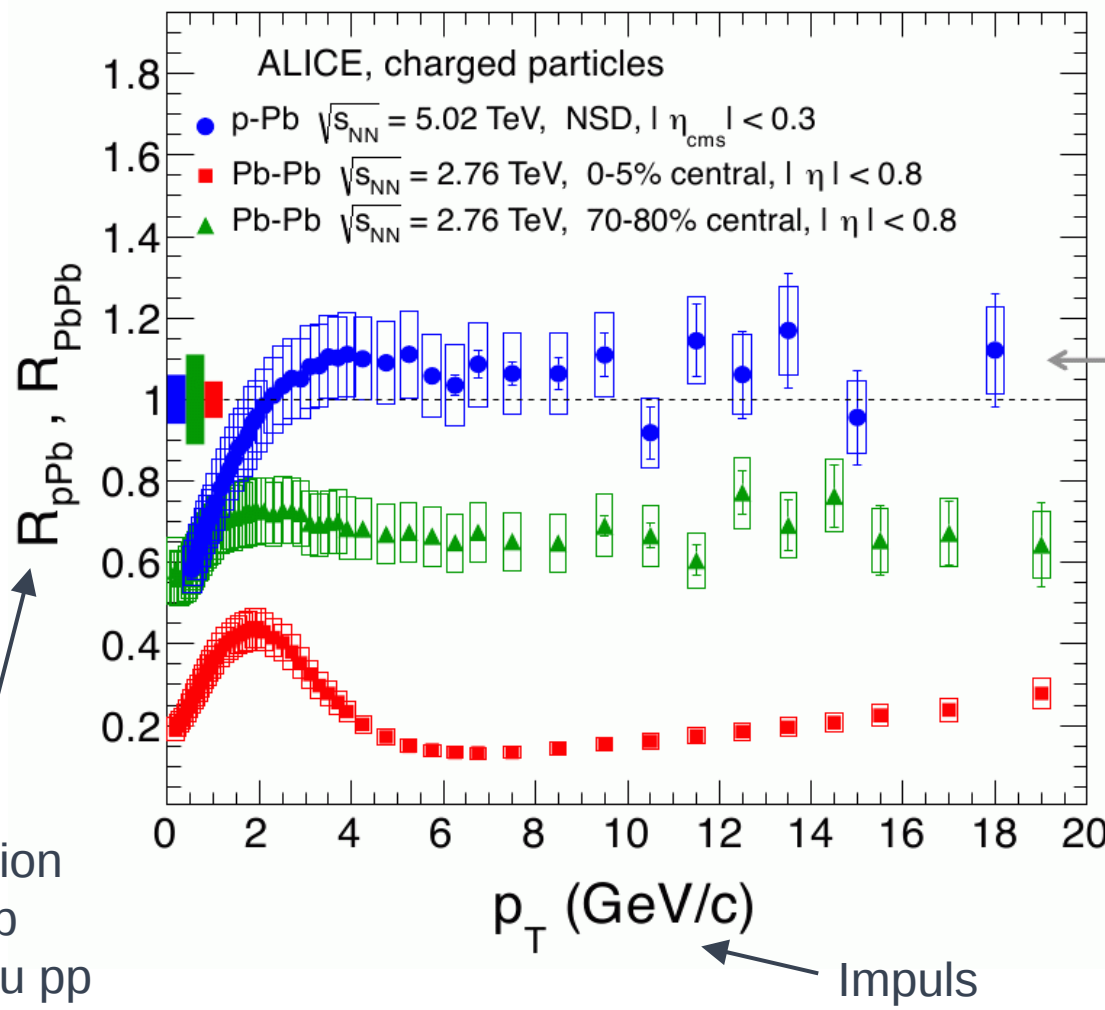
in Kern-Kern Stößen:



wie Absorptionsspektroskopie, aber die Glühbirne im Objekt drin

# Ist die QGP überhaupt da?

PRL 110 (2013) 082302



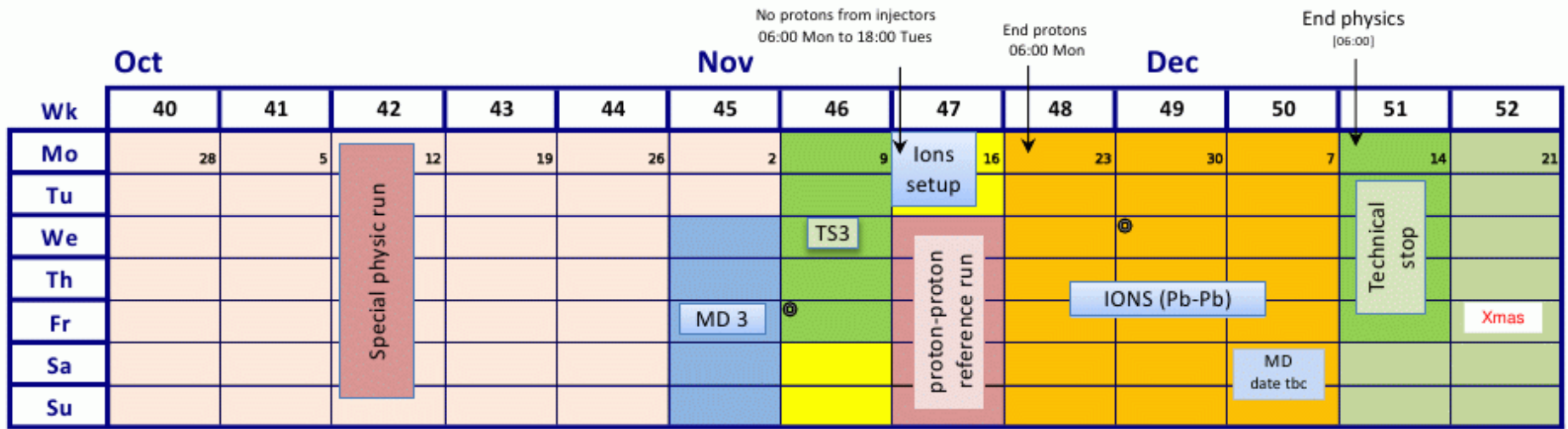
In zentralen Pb-Pb Stößen werden jets absorbiert → ja, QGP ist da



# Epiloque



# Nahe Zukunft



- Technical Stop
- Recommissioning with beam
- Scrubbing
- Machine development
- Special physics runs (indicative - schedule to be established)
- ⊙ Pb oven re-fill

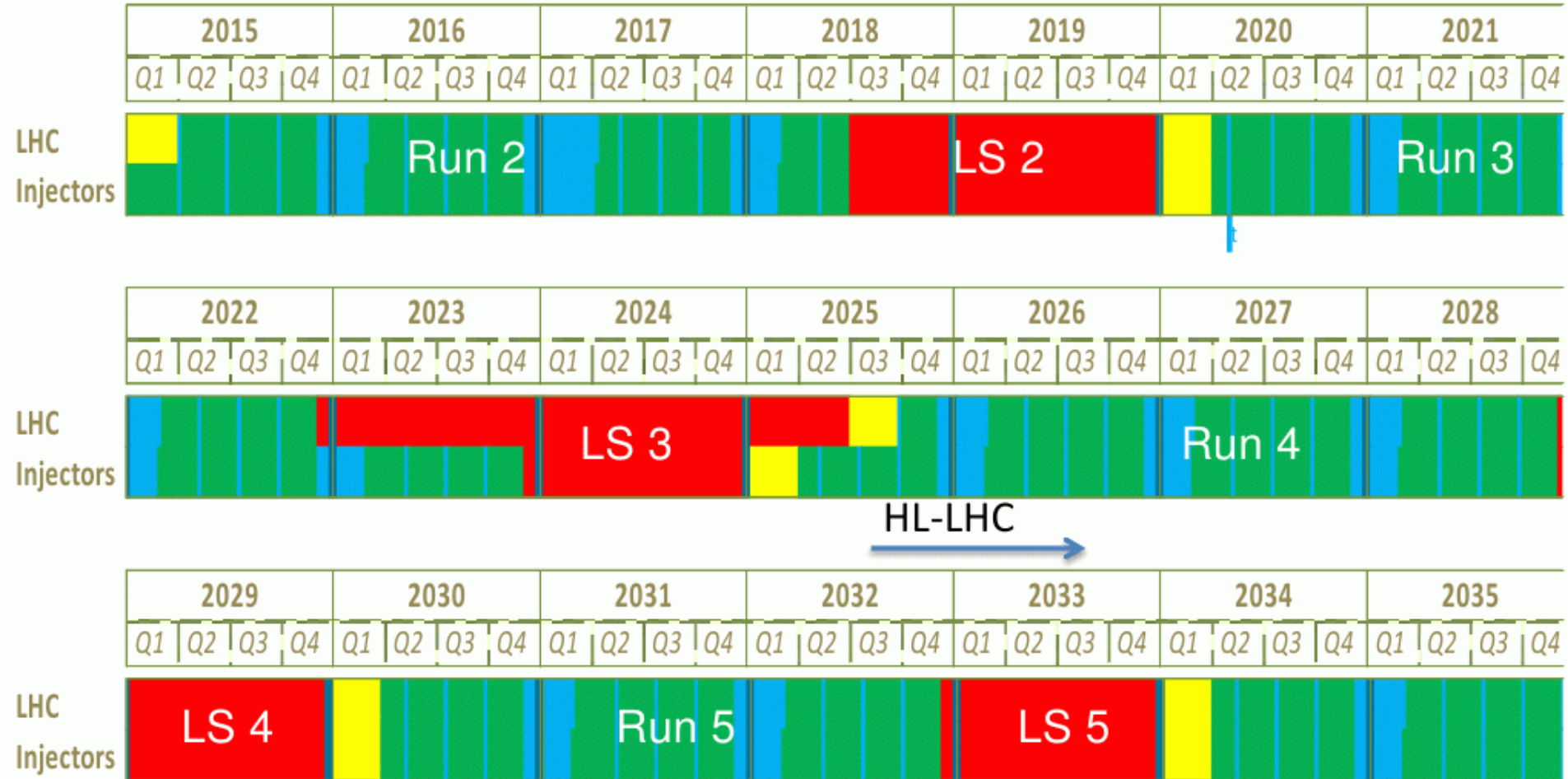
**dritte Pb-Pb Kampagne  
 am LHC (volle Energie)**



# fernere Zukunft

- ❖ 2014 LS1: completion of TRD, PHOS, and DCAL; consolidation
- ❖ 2015
- ❖ 2016 } **Run 2 (full energy)**
- ❖ 2017 }
- ❖ 2018 LS2: ALICE upgrade
- ❖ 2019 LS2
- ❖ 2020 } **Run 3 (full luminosity)**
- ❖ 2021 }
- ❖ 2022 }
- ❖ 2023 LS3
- ❖ 2024 LS3
- ❖ 2025 LS3

# fernere Zukunft



# ALICE Upgrade

upgrade after Run 2 (2018)

## detector objectives

- ☉ cope with 50 kHz Pb-Pb
- ☉ inspect **all** collision events
- ☉ improve or preserve the resolution

## physics objectives

- ☉ charm and beauty
- ☉ low-mass dileptons
- ☉ jets
- ☉ search for exotica

ALICE Upgrade Letter of Intent  
<http://cds.cern.ch/record/1475243>



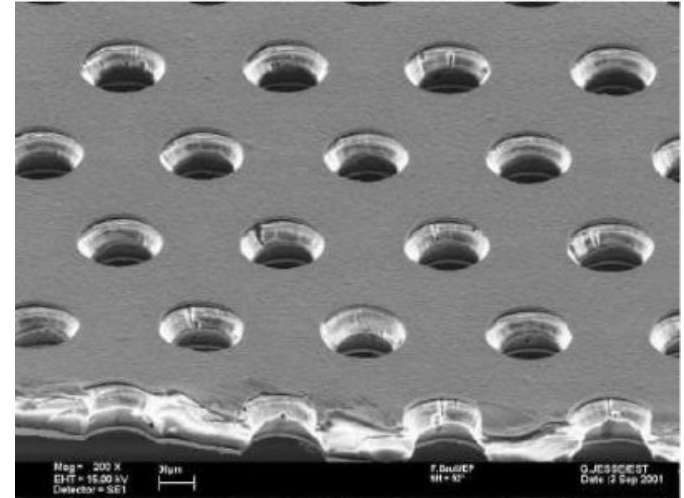
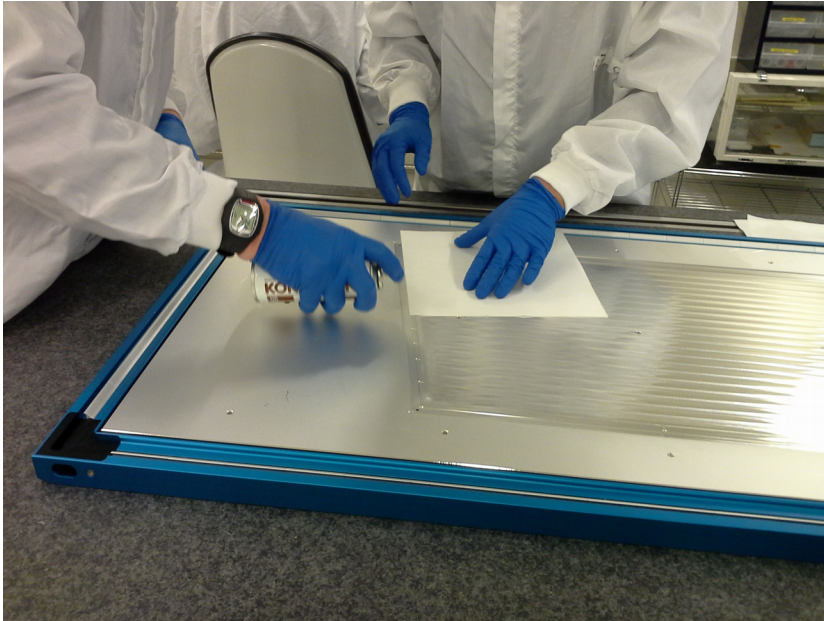
ALICE



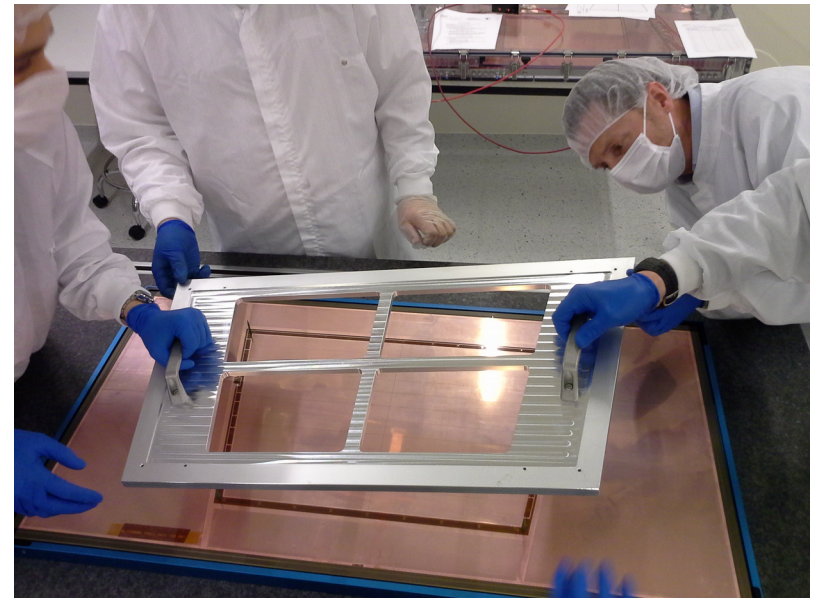
# ALICE upgrade

system	upgrade	scheduled installation
ITS	reduced material, improved resolution, topological trigger at L2	2018
TPC	faster gas, GEM readout, faster and continuous readout	2018
trigger/ readout	fast readout, replacing T0/V0/FMT with new detector FIT	2018
O <sup>2</sup>	new combined DAQ/HLT/offline system for high-rate and continuous readout	2018
MFT	Muon Forward Tracker, pixel Si, $-4 < \eta < -2.5$	2018
VHMPID	Very High Momentum PID, gas Cherenkov, $\pi/K/p$ separation in $5 < p < 25$ GeV/c	not scheduled
FoCal	Forward Calorimeter, WSi+Pb-scint, photon/electron/ $\pi^0$ /jet	after Run 3

# TPC upgrade



**GSI ist an dem ALICE TPC Upgrade Projekt stark beteiligt**



# Flying over ALICE







**Backup**

# LHC energies in Run 1 and 2

	proton	Pb	$\sqrt{s_{NN}}$ in pp	$\sqrt{s_{NN}}$ in Pb-Pb	$\sqrt{s_{NN}}$ in p-Pb
2010-2011	3.5 TeV	1.38 TeV	7.0 TeV	2.76 TeV	---
2012	4.0 TeV	---	8.0 TeV	---	5.02 TeV
2015	6.5 TeV	2.56 →	13 TeV	5.13 TeV	---
2015 reduced	6.37 TeV	2.51 TeV	12.7 TeV	5.02 TeV	---

# Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.  
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
<b><math>\bar{p}</math></b>	anti-proton	<b><math>\bar{u}\bar{u}\bar{d}</math></b>	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
<b><math>\Lambda</math></b>	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
<b><math>\Omega^-</math></b>	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2

## Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.  
There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

# FERMIONS

matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
$e$ electron	0.000511	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	$<0.0002$	0
$\mu$ muon	0.106	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	$<0.02$	0
$\tau$ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>u</b> up	0.003	2/3
<b>d</b> down	0.006	-1/3
<b>c</b> charm	1.3	2/3
<b>s</b> strange	0.1	-1/3
<b>t</b> top	175	2/3
<b>b</b> bottom	4.3	-1/3

# BOSONS

force carriers  
spin = 0, 1, 2, ...

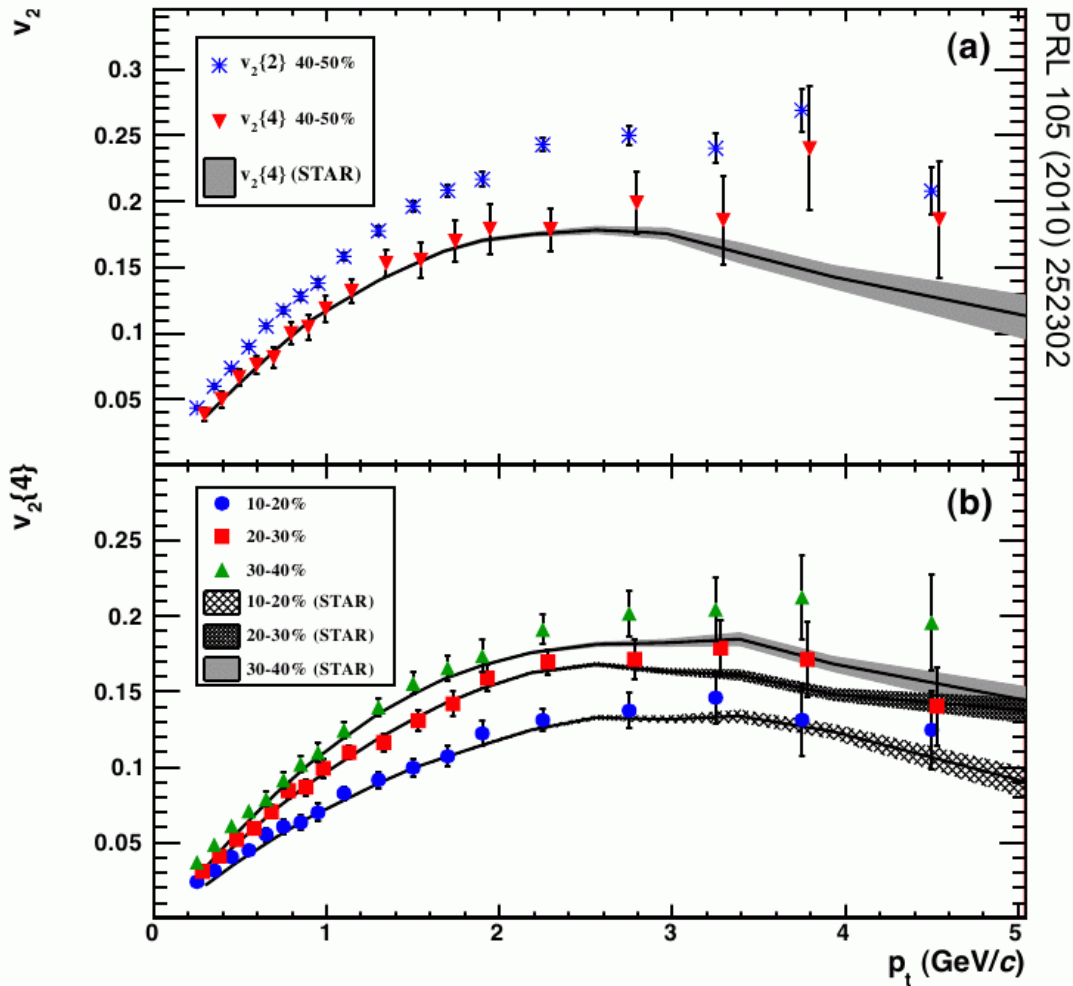
Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
$W^-$	80.4	-1
$W^+$	80.4	+1
$Z^0$	91.187	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>g</b> gluon	0	0

# elliptic flow



PRL 105 (2010) 252302

same  $p_T$  dependence as at RHIC (and below, down to  $\sqrt{s_{NN}}=40$  GeV!)  
 inclusive  $v_2$  at LHC higher only because  $\langle p_T \rangle$  higher