



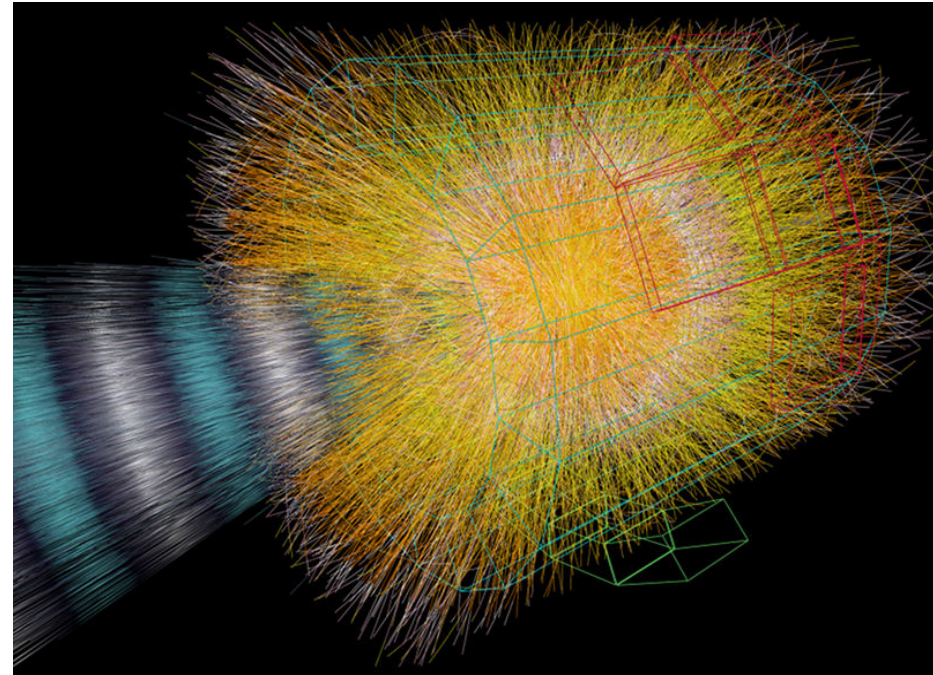
Schwerionen-Detektoren



Das ALICE Experiment als Beispiel für eine
“Teilchenidentifikationsmaschine”

Christian Lippmann, CERN

DPG Schule über Beschleuniger- und Hochenergiephysik
6. - 10. Juli 2009





Übersicht



- Unterschiede zwischen Hochenergie- und Schwerionenphysik am LHC
- Einführung in ALICE
- Ausgewählte Detektorelemente:
 - 1) Zeitprojektionskammer (TPC),
 - 2) Übergangsstrahlungsdetektor (TRD),
 - 3) Flugzeitdetektor (TOF).
- Zusammenfassung



Hochenergie- und Schwerionenphysik



Der Teilchenzoo



- Um 1935 war die Situation der Kern- und Elementarteilchenphysik recht übersichtlich. Man kannte
 - zwei schwere Teilchen, die Bestandteile der Atomkerne:
 - Protonen und Neutronen
 - zwei leichte Teilchen
 - Elektron und Neutrino (nur postuliert)
 - Und die jeweiligen Antiteilchen.
- Dann wurden in kosmischer Höhenstrahlung und später an Beschleunigern (nach 1959) eine ganze Schar neuer Teilchen entdeckt.
- Heute kennt man mehrere Hundert Elementarteilchen.



<http://pdg.lbl.gov>

~ 180 Selected Particles

18



$\eta, W^\pm, Z^0, g, e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \pi^\pm, \pi^0, \eta, f_0(660), g(780),$
 $\omega(782), \eta'(958), f_0(980), a_0(980), \phi(1020), h_1(1170), b_1(1235),$
 $a_1(1260), f_2(1270), f_1(1285), \eta(1295), \pi(1300), a_2(1320),$
 $f_0(1370), f_1(1420), \omega(1420), \eta(1440), a_0(1450), g(1450),$
 $f_0(1500), f_2'(1525), \omega(1650), \omega_3(1670), \pi_2(1670), \phi(1680),$
 $g_3(1690), g(1700), f_0(1710), \pi(1800), \phi_3(1850), f_2(2010),$
 $a_4(2040), f_4(2050), f_2(2300), f_2(2340), K^\pm, K^0, K_S^0, K_L^0, K^*(892),$
 $K_1(1270), K_1(1400), K^*(1410), K_0^*(1430), K_2^*(1430), K^*(1680),$
 $K_2(1770), K_3^*(1780), K_2(1820), K_4^*(2045), D^\pm, D^0, D^*(2007),$
 $D^*(2010)^\pm, D_1(2420)^0, D_2^*(2460)^0, D_2^*(2460)^\pm, D_s^\pm, D_s^{*\pm},$
 $D_{s1}(2536)^\pm, D_{s3}(2573)^\pm, B^\pm, B^0, B^*, B_S^0, B_c^\pm, \eta_c(1S), J/\psi(1S),$
 $\chi_{c0}(1P), \chi_{c1}(1P), \chi_{c2}(1P), \psi(2S), \psi(3770), \psi(4040), \psi(4160),$
 $\psi(4415), \Upsilon(1S), \chi_{b0}(1P), \chi_{b1}(1P), \chi_{b2}(1P), \Upsilon(2S), \chi_{b0}(2P),$
 $\chi_{b2}(2P), \Upsilon(3S), \Upsilon(4S), \Upsilon(10860), \Upsilon(11020), p, n, N(1440),$
 $N(1520), N(1535), N(1650), N(1675), N(1680), N(1700), N(1710),$
 $N(1720), N(2190), N(2220), N(2250), N(2600), \Delta(1232), \Delta(1600),$
 $\Delta(1620), \Delta(1700), \Delta(1905), \Delta(1910), \Delta(1920), \Delta(1930), \Delta(1950),$
 $\Delta(2420), \Lambda, \Lambda(1405), \Lambda(1520), \Lambda(1600), \Lambda(1670), \Lambda(1690),$
 $\Lambda(1800), \Lambda(1810), \Lambda(1820), \Lambda(1830), \Lambda(1890), \Lambda(2100),$
 $\Lambda(2110), \Lambda(2350), \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Sigma(1385), \Sigma(1660), \Sigma(1670),$
 $\Sigma(1750), \Sigma(1775), \Sigma(1915), \Sigma(1940), \Sigma(2030), \Sigma(2250), \Xi^0, \Xi^-,$
 $\Xi(1530), \Xi(1690), \Xi(1820), \Xi(1950), \Xi(2030), \Omega^-, \Omega(2250)^-,$
 $\Lambda_c^+, \Lambda_c^0, \Sigma_c(2455), \Sigma_c(2520), \Xi_c^+, \Xi_c^0, \Xi_c'^+, \Xi_c'^0, \Xi_c(2645),$
 $\Xi_c(2780), \Xi_c(2815), \Omega_c^0, \Lambda_b^0, \Xi_b^0, \Xi_b^-, t\bar{t}$

Der Teilchenzoo (2)

- Von diesen hunderten Teilchen haben nur 14 eine “Lebensdauer” $c\tau > 0.5\text{mm}$, das heisst sie können in einem Detektor gemessen werden (c = Lichtgeschwindigkeit, τ = Lebensdauer).
- Von diesen 14 Teilchen sind die folgenden 8 am weitaus häufigsten:
 1. Elektron/Positron: e^- / e^+
 2. Muonen: μ^- / μ^+
 3. Photonen: γ
 4. Pionen: π^+ / π^-
 5. Geladene Kaonen: K^- / K^+
 6. Neutrale Kaonen: K^0
 7. (Anti-)protonen: p^+ / p^-
 8. (Anti-)neutronen: n
- In einem Hochenergiephysik- oder Schwerionenexperiment sollten alle diese Teilchen gemessen und identifiziert werden können.



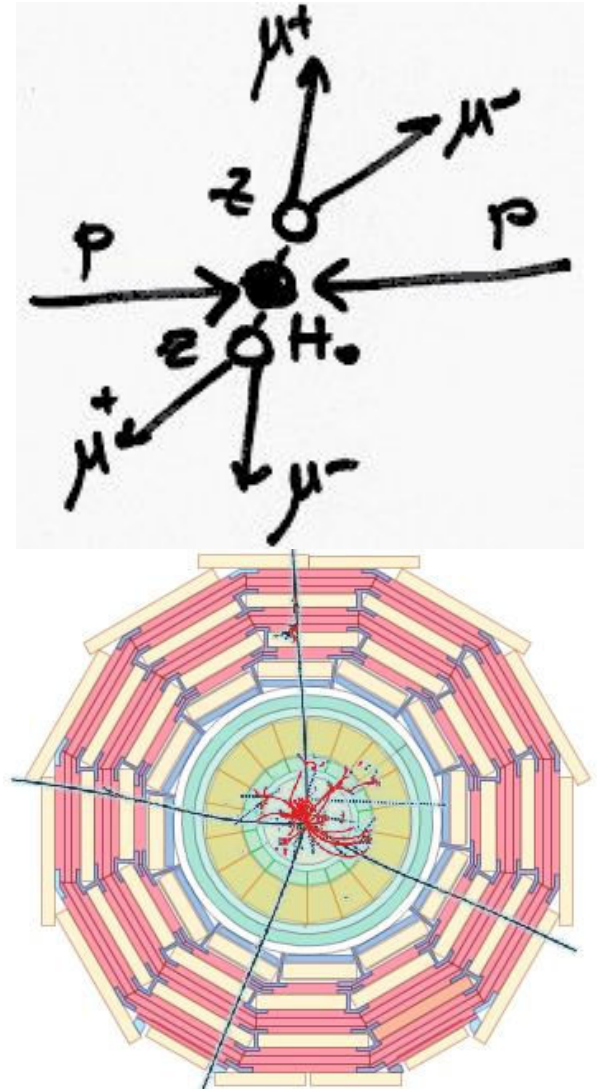
Experimente am LHC



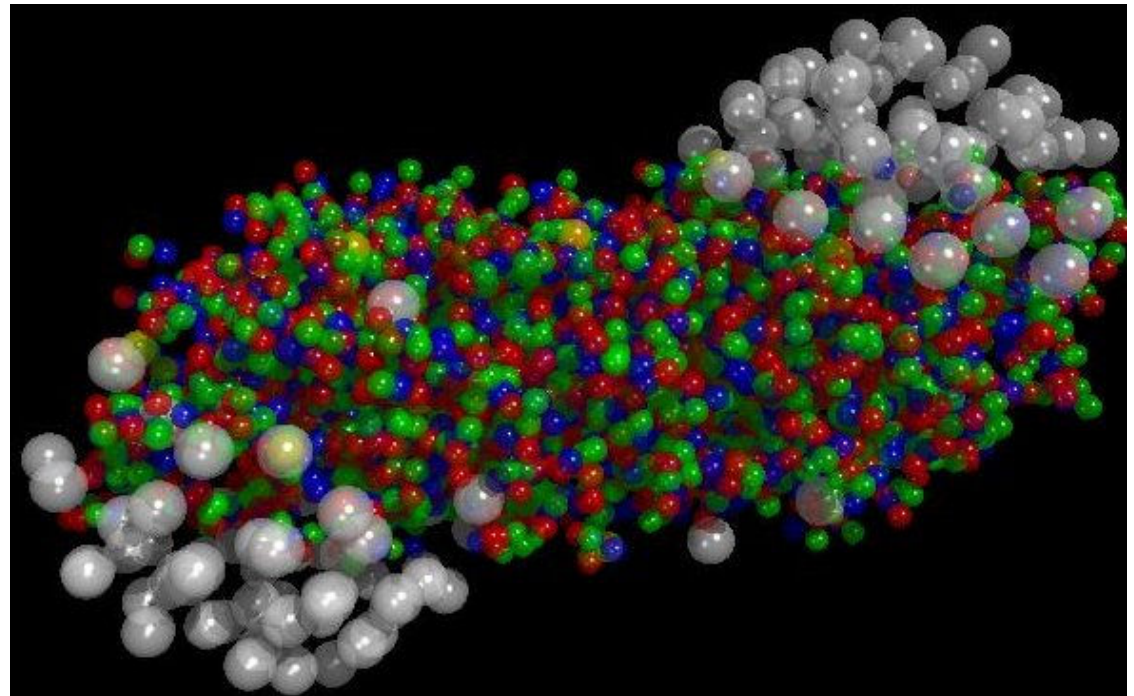
- Wir werden zwischen zwei Arten von Experimenten unterscheiden:
 - ATLAS und CMS sind **Hochenergiephysik-Experimente**
 - ALICE ist ein **Schwerionen-Experiment**
- Im Folgenden werden zunächst die Unterschiede (und Gemeinsamkeiten) dargestellt.

- Erzeugung neuer Teilchen
 - Bestätigung fundamentaler Theorien
 - Man verwendet möglichst hohe Energien

 - Beispiel: Die Suche nach dem Higgs Teilchen am LHC
 - Zerfall beispielsweise in 4 Muonen
 - Diese müssen nachgewiesen werden
- ⇒ Der Detektor muss in allen Raumrichtungen Muonen nachweisen können.



- Kollision von vergleichsweise großen Objekten im Beschleuniger:
 - Schwerionen (beispielsweise Kerne von Bleiatomen)
- Kurzzeitig soll ein sehr hochenergetisches Plasma quasi-freier Quarks und Gluonen erzeugt werden.



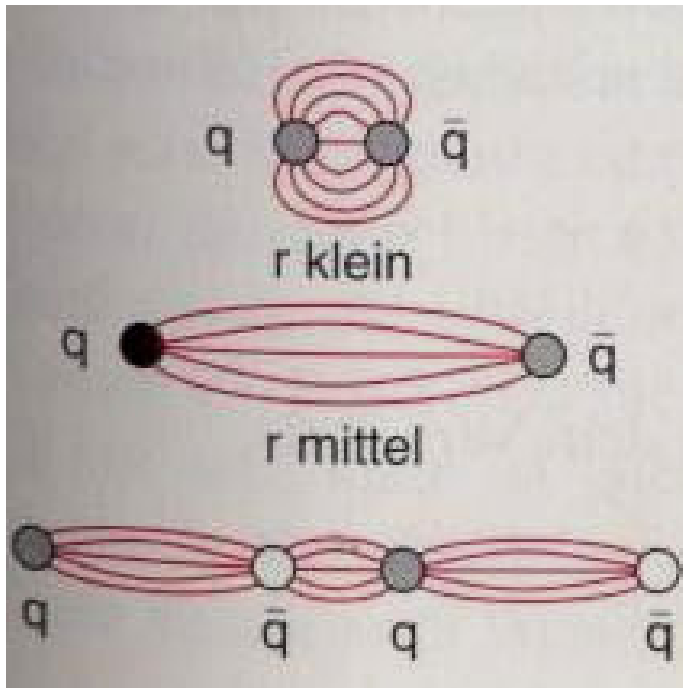
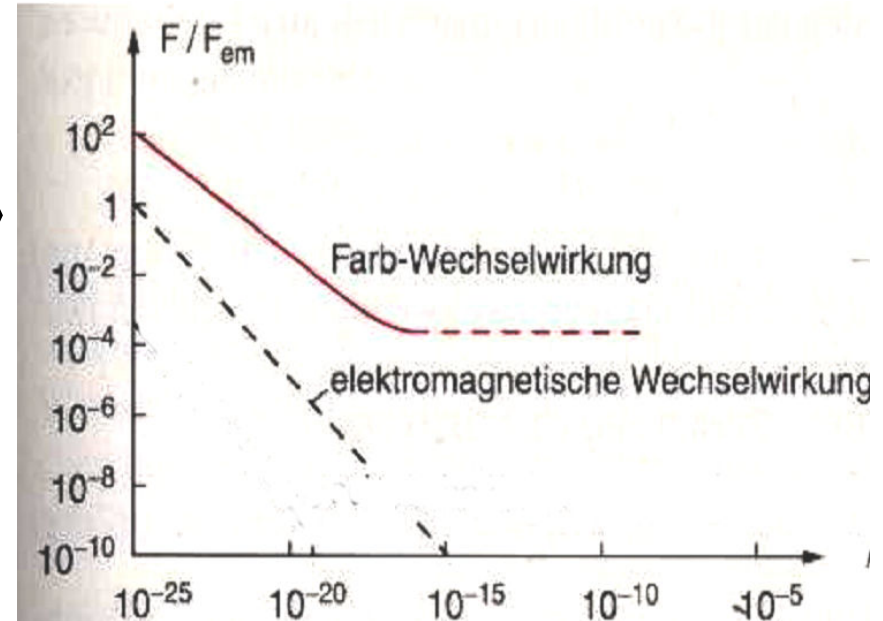


Ziele von Experimenten mit Schwerionen (2)

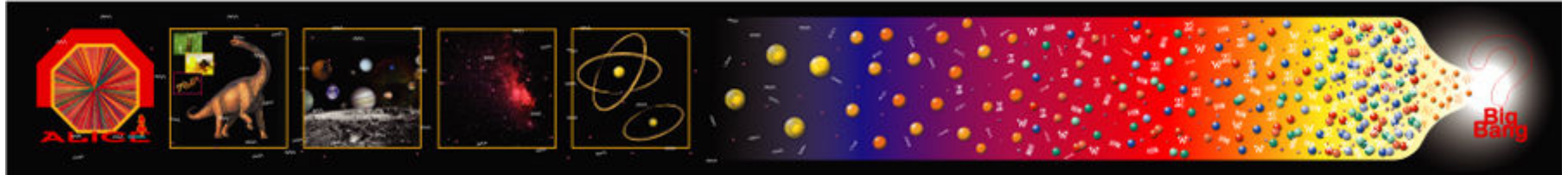


- Auf diese Weise sollen verschiedene grundlegende Fragen beantwortet werden, z.B.:
 - Was passiert, wenn man Materie auf das bis zu 100000fache der Temperatur im Innern der Sonne heizt?
 - Warum wiegen Protonen und Neutronen 100 mal so viel wie die Quarks aus denen sie bestehen?
 - Können Quarks in den Protonen und Neutronen befreit werden?

Mit zunehmendem Abstand bleibt die Kraft zwischen den Quarks konstant.

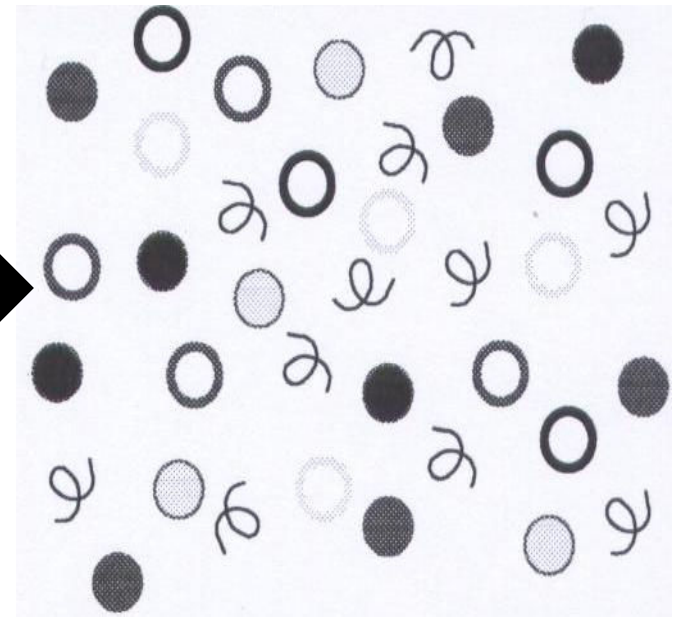
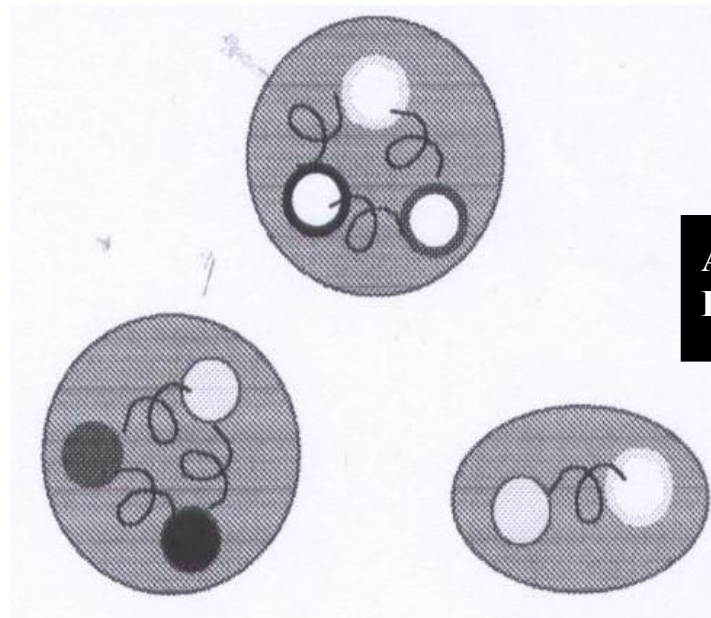


Versucht man zwei Quarks auseinanderzubringen, so muss man so viel Energie aufwenden, dass daraus irgendwann ein neues Quark-Antiquark Paar erzeugt wird



Quarks eingeschlossen in farbneutrale Hadronen

Freie Quarks und Gluonen im Quark-Gluonen-Plasma



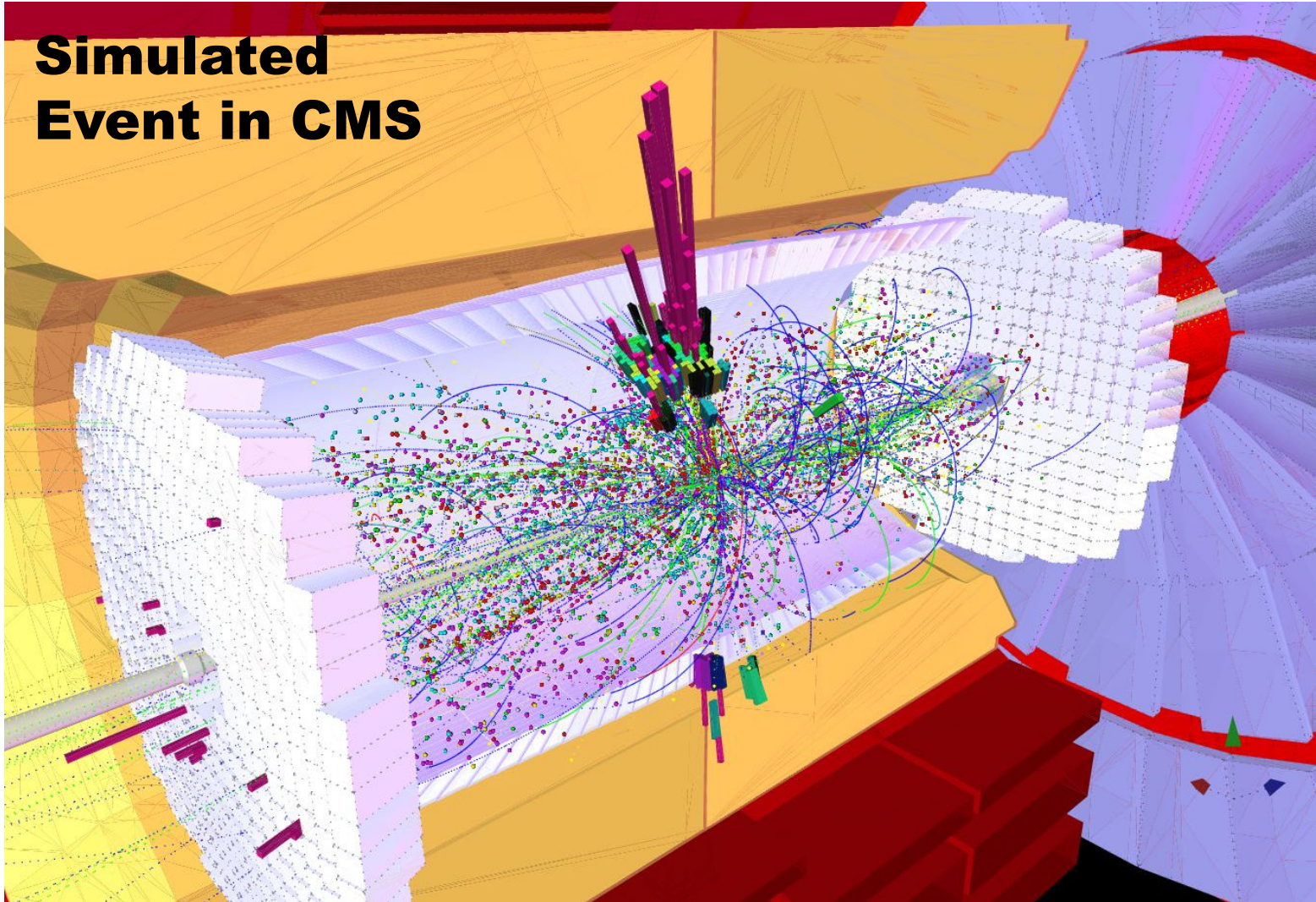


Vergleich von Schwerionen- und Hochenergiephysik Experimenten

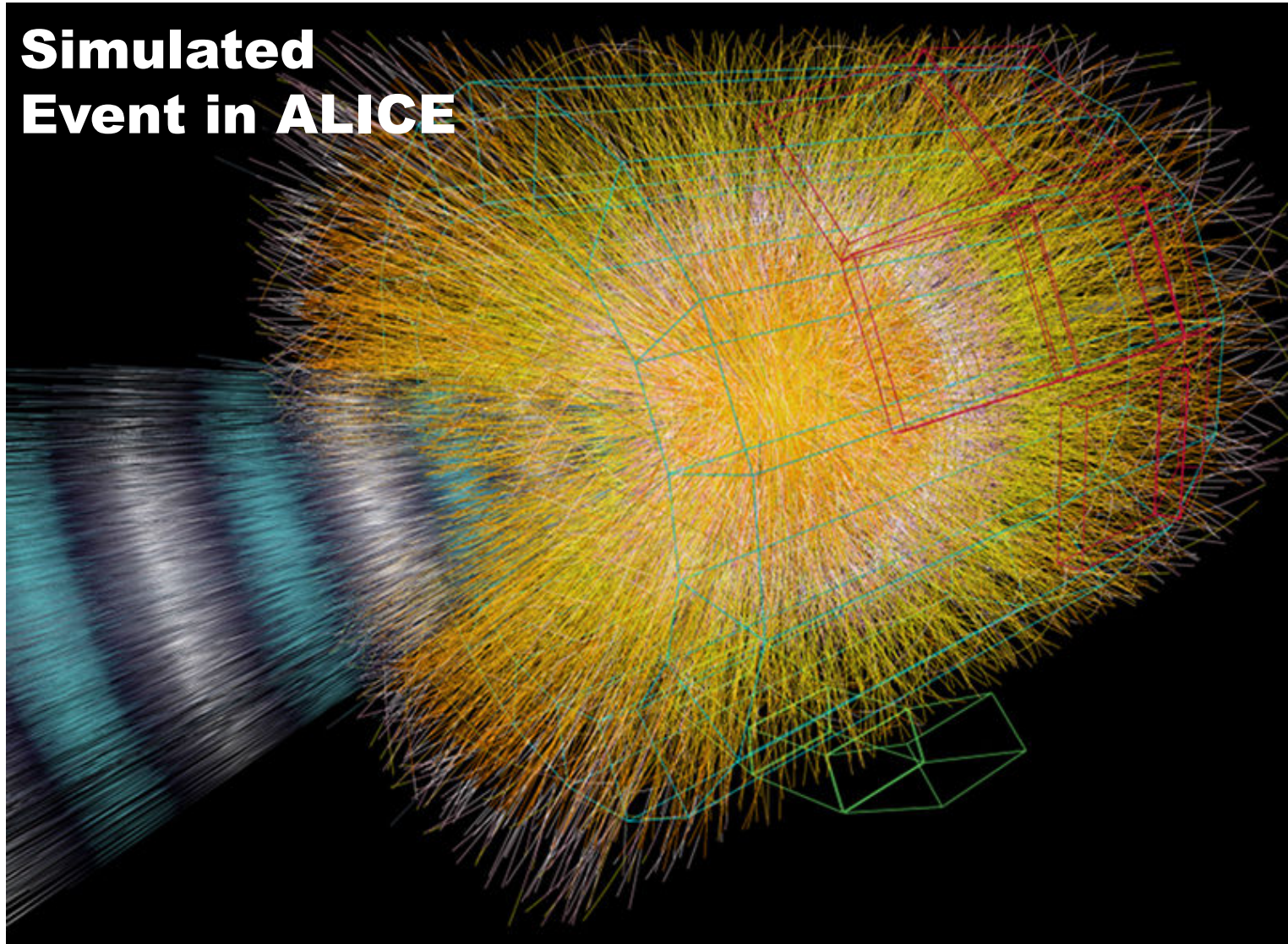


	Hochenergiephysik	Schwerionenphysik
Ziel	<ul style="list-style-type: none">- Erzeugung neuer Teilchen- Bestätigung fundamentaler Theorien	<ul style="list-style-type: none">- Erzeugung neuartiger Materiezustände (hohe Temperaturen und Energiedichten)
Primäre Stosspartner	<ul style="list-style-type: none">- Möglichst fundamental, möglichst hohe Energie	<ul style="list-style-type: none">- Hohe Nukleonenanzahl, verschiedene Energien
Erzeugte Sekundärteilchen	<ul style="list-style-type: none">- Überschaubare Menge (<100)- Hohe Impulse	<ul style="list-style-type: none">- Sehr grosse Menge (>1000)- Niedrige Impulse
Anforderung an Detektor	<ul style="list-style-type: none">- Messung möglichst im gesamten Raumwinkelbereich- Hohe Granularität (Anzahl Messpunkte im Raum)	<ul style="list-style-type: none">- Messung teilweise nur in begrenztem Raumwinkelbereich- Sehr hohe Granularität- Wenig Material

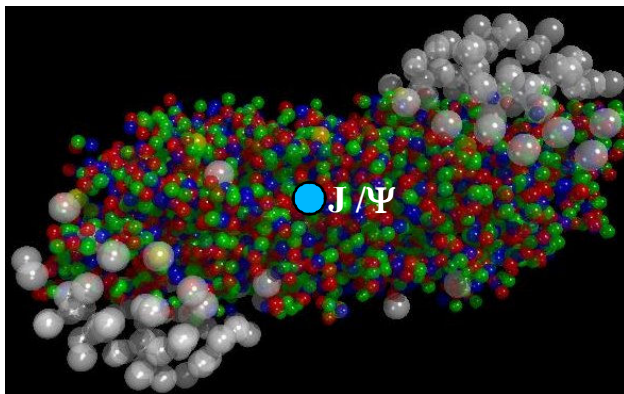
Simulated Event in CMS



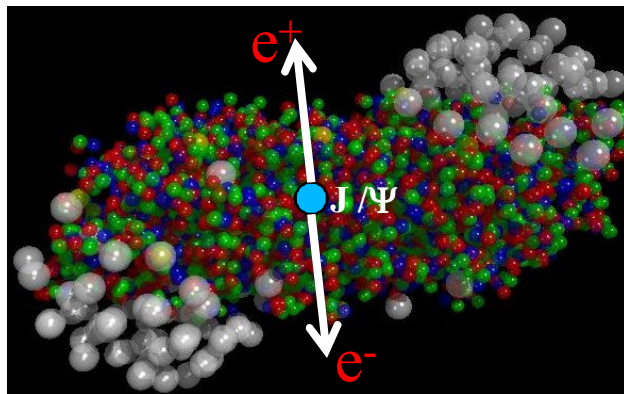
Simulated Event in ALICE



- Woher wissen wir, dass für kurze Zeit ein Quark-Gluon-Plasma (QGP) entstanden ist?
- Wir verwenden “Sonden”, wie **zum Beispiel** das sogenannte **J/Ψ-Teilchen**, welches im QGP zerfällt.
- Wenn sich die Eigenschaften (Masse, Häufigkeit) des J/Ψ- ändern, so erlaubt dies Rückschlüsse auf das QGP.



- 2 wichtige Zerfälle:
 - $J/\Psi \rightarrow e^+ e^-$ (0.73%)
 - $J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (0.73%)
- Die Elektronen und Myonen unterliegen nicht der starken Wechselwirkung
- Auf ihrem Weg durch das QGP werden sie deshalb nicht abgelenkt



- Ziel ist also das Auffinden von $e^+ e^-$ - Paaren und $\mu^+ \mu^-$ - Paaren.



Einführung ALICE

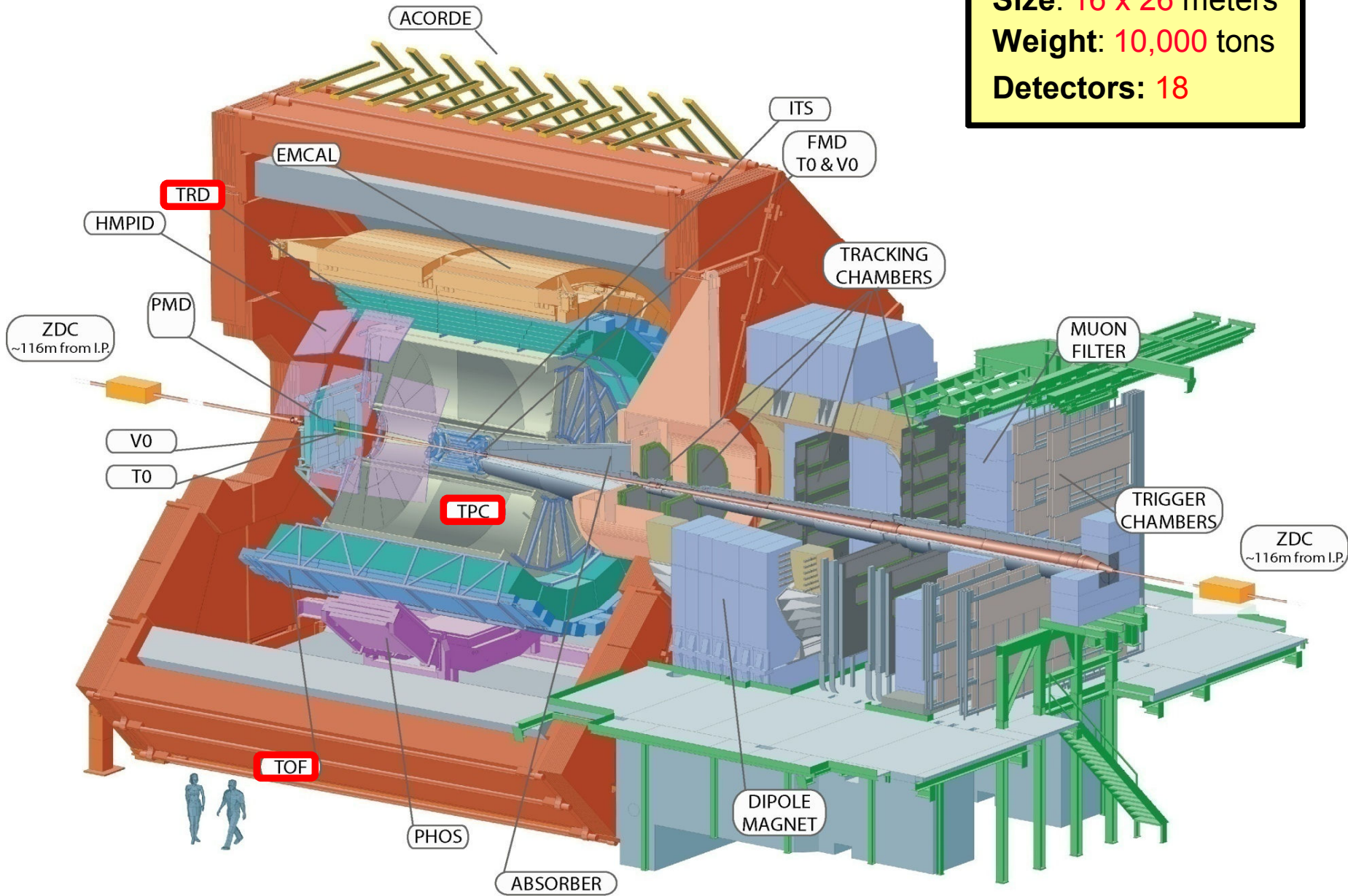


ALICE: A Large Ion Collider Experiment

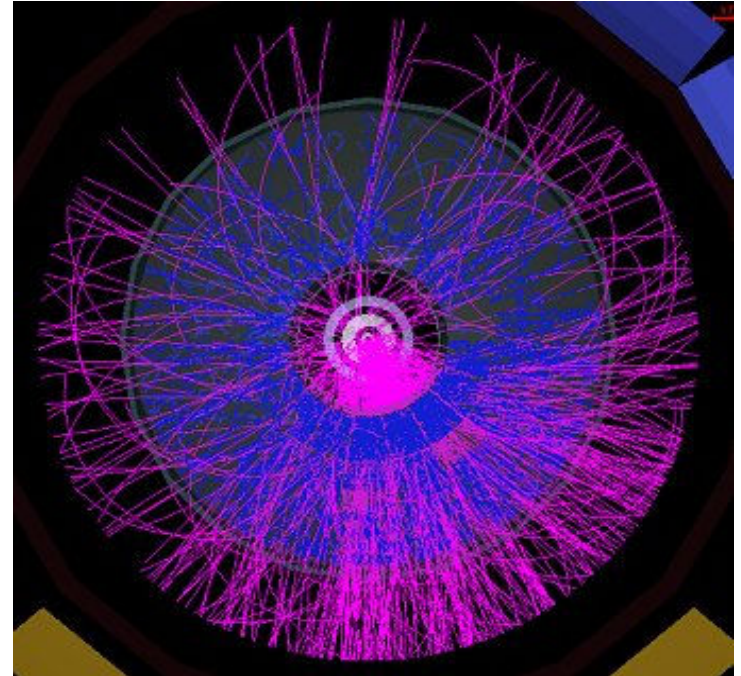
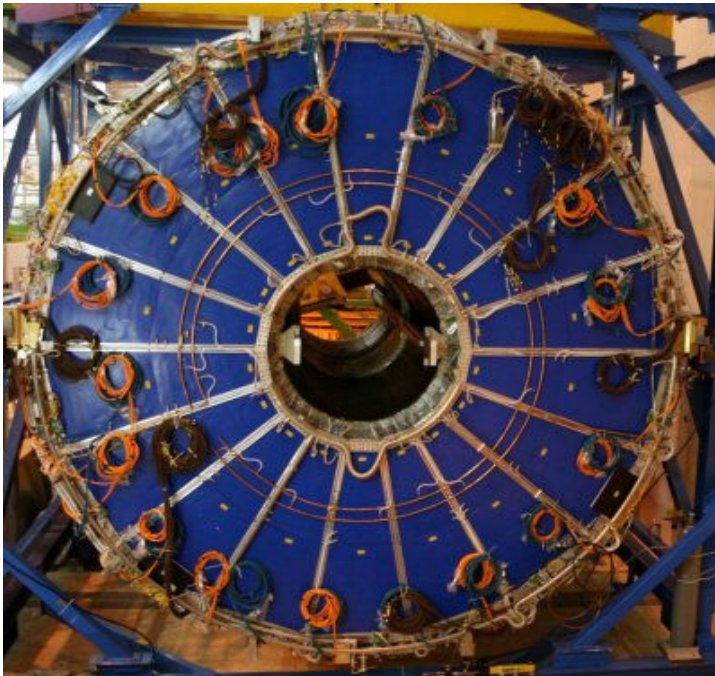


- ALICE ist das eigens der Schwerionenphysik gewidmete Experiment am LHC:
 - **Blei-Blei Kollisionen** bei 5.5 TeV pro Nukleonenpaar.
 - Detaillierte Studien der *Hadronen*, *Elektronen*, *Muonen* und *Photonen*, die in den Kollisionen produziert werden.
- ALICE besteht aus 18 verschiedenen Detektorsystemen.
 - *Von diesen werden 3 in diesem Vortrag beschrieben.*
- Jedes davon hat eine bestimmte Aufgabe
 - Spurverfolgung (“Tracking”)
 - Identifikation bestimmter Teilchen in bestimmten Impulsbereichen
- ALICE benutzt alle bekannten Methoden zur Teilchenidentifikation
- *Von diesen werden ebenfalls 3 in diesem Vortrag beschrieben.*

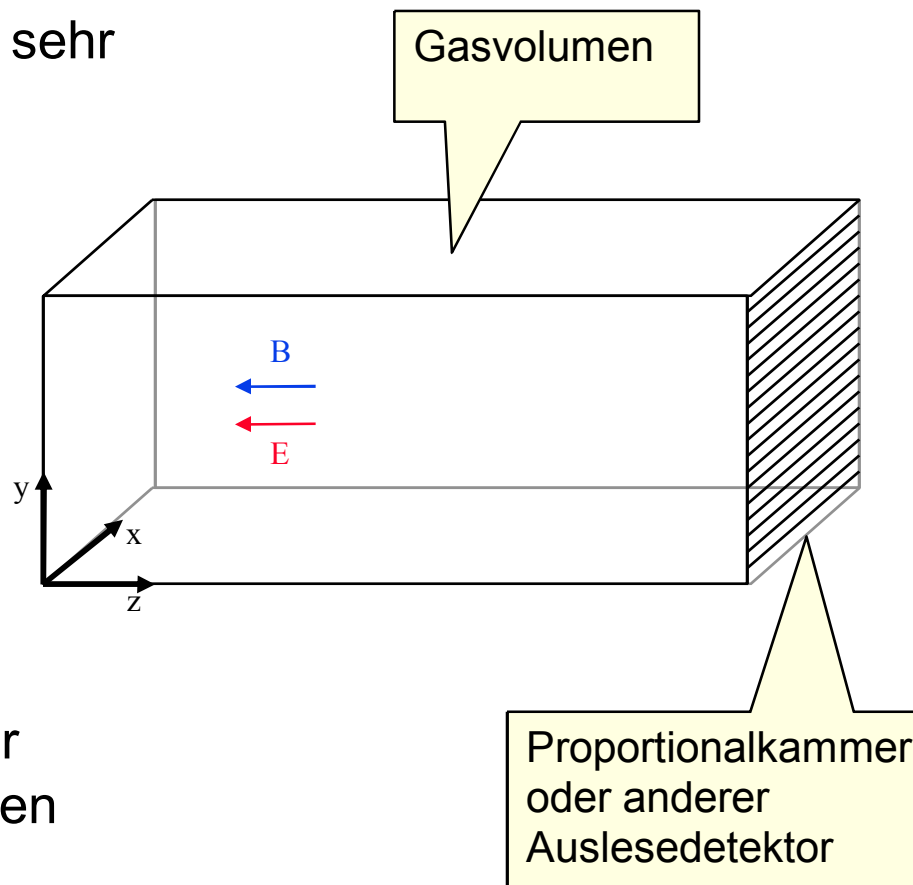
Size: 16 x 26 meters
Weight: 10,000 tons
Detectors: 18



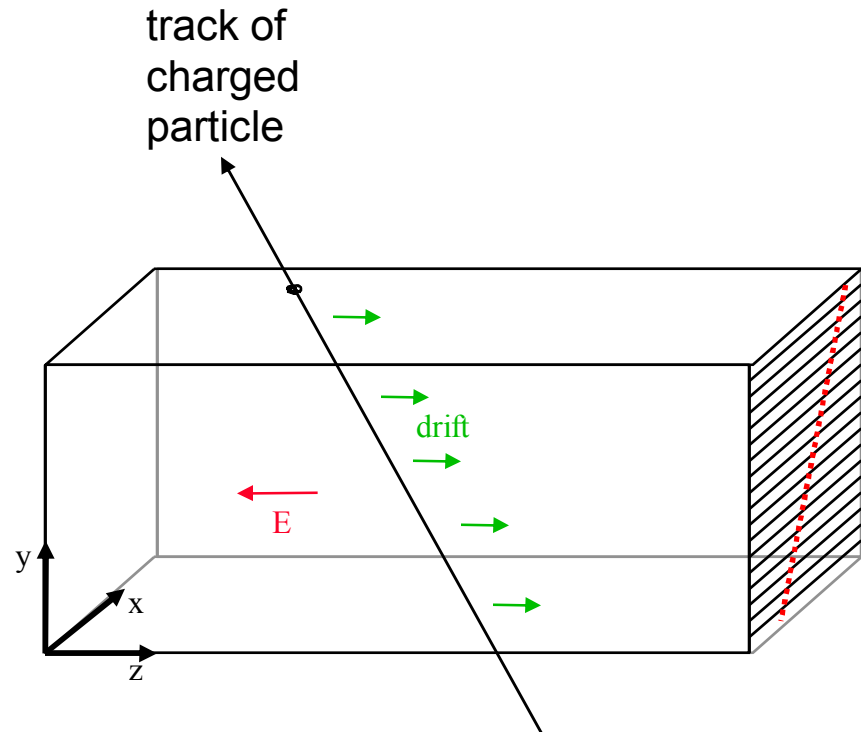
1) ALICE TPC (Time Projection Chamber)



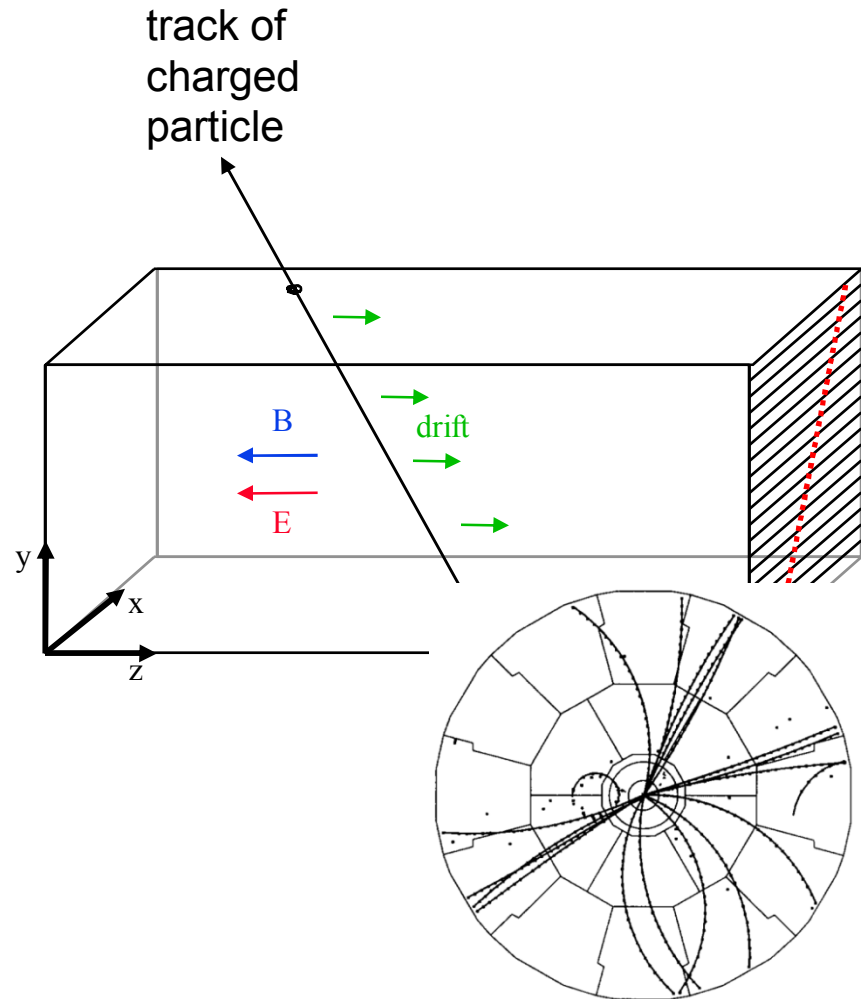
- TPC = Zeitprojektionskammer
- Eine TPC ist ein einfacher, aber sehr effektiver Teilchendetektor
- Man braucht
 - Ein mit Gas gefülltes Volumen
 - Ein homogenes elektrisches Feld
 - Ein dazu paralleles, homogenes magnetisches Feld
 - Ausleseelemente an einer oder mehreren Oberflächen des Volumens



1. Ein geladenes Teilchen ionisiert auf dem Flug durch die TPC das Driftgas
2. Die freigesetzten Elektronen driften zu den Ausleseelementen
3. Die projizierte Teilchenspur wird detektiert
4. Die dritte Raumkoordinate wird über die Driftzeit berechnet



- Das Magnetfeld sorgt dafür, dass die Teilchenspuren gebogen sind, so dass sich der Impuls des Teilchens berechnen lässt
 - $p_T = 0.3 B R$, mit
 B = Magnetfeldstärke in Tesla;
 R = Radius der Teilchenspur in m
- Bonus: Im Allgemeinen verringert das Magnetfeld auch die Diffusion der driftenden Elektronen!





Was macht eine TPC so speziell?



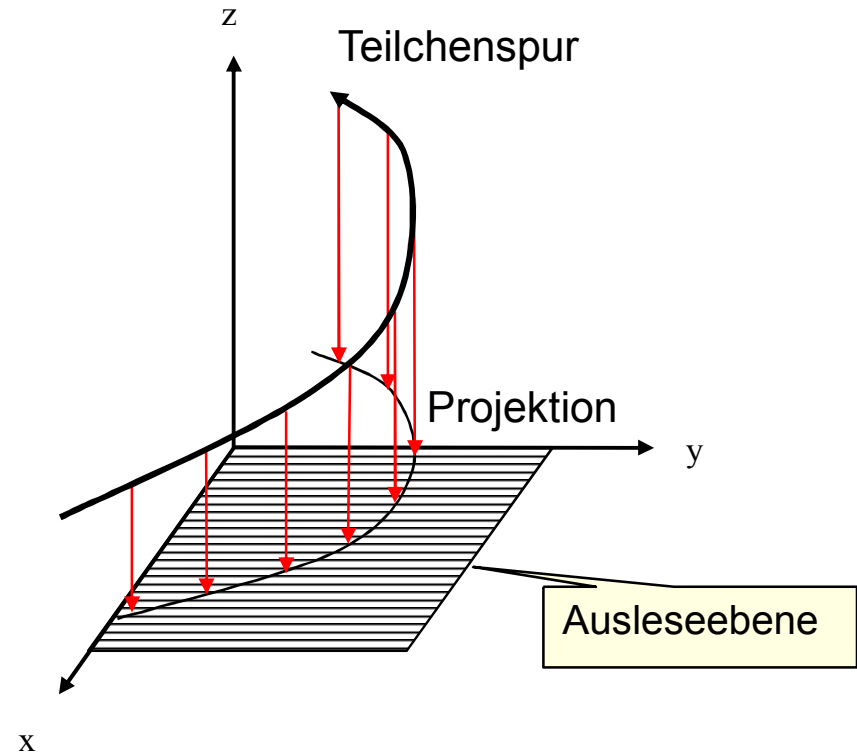
1. 3D Koordinatenmessung von Teilchenspuren

- Hohe Granularität
- Kontinuierliche Teilchenspuren
- Wenig Material \Rightarrow wenig Streuung (Ablenkung der Teilchenspuren)

2. Teilchenidentifikation über den spezifischen Energieverlust (dE/dx)

- Beide Punkte werden im Folgenden näher beschrieben

- Die z -Koordinate wird anhand der **Driftzeit** t und der Driftgeschwindigkeit v_d berechnet.



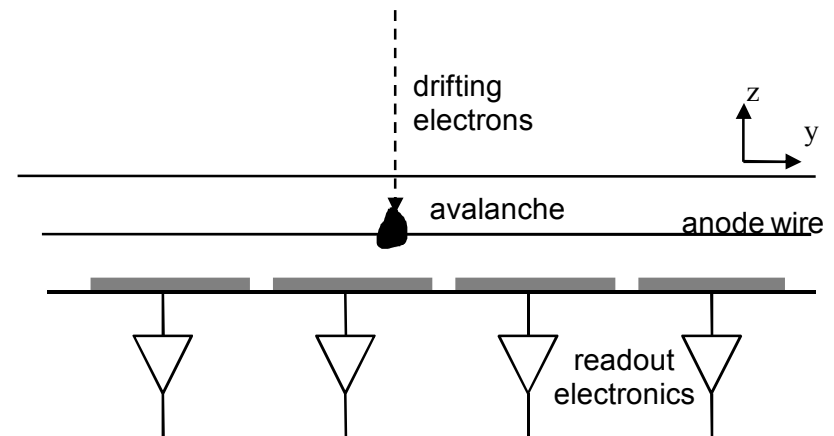
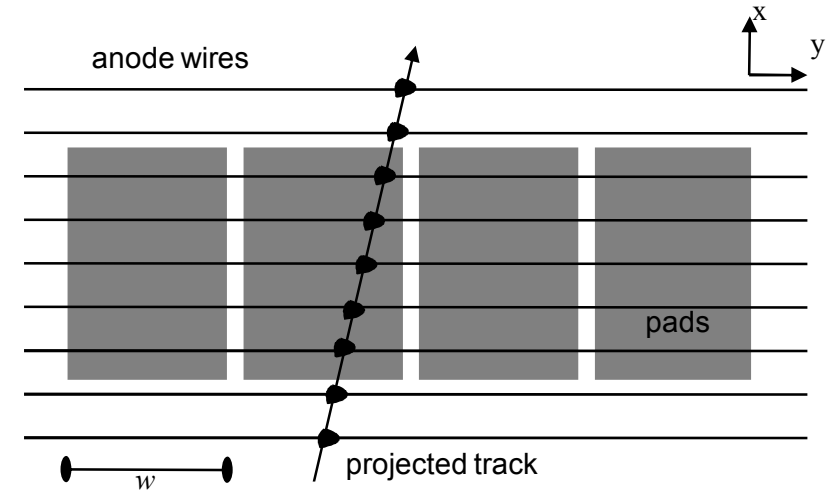
- Die Drift von Elektronen in E und B Feldern:

$$\vec{v}_d = \frac{\mu}{1 + (\omega\tau)^2} \left(\vec{E} + (\omega\tau) \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{|\vec{B}|} + (\omega\tau)^2 \frac{(\vec{E} \cdot \vec{B})\vec{B}}{|\vec{B}|^2} \right)$$

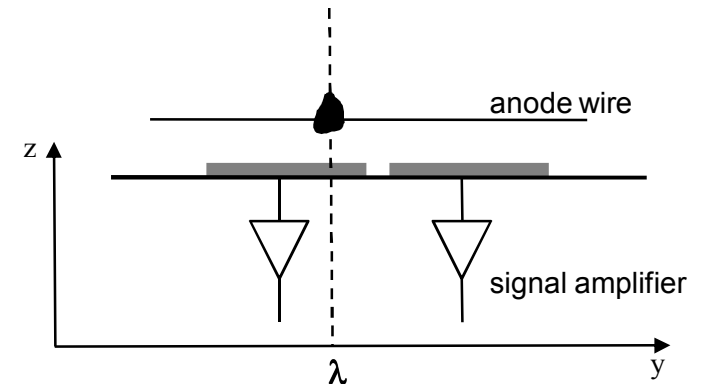
τ	mean drift time between collisions
$\mu = \frac{e\tau}{m}$	particle mobility
$\omega = \frac{eB}{mc}$	cyclotron frequency

- $\omega\tau \ll 1$: Drift entlang E -Feldlinien.
- $\omega\tau \gg 1$: Drift entlang B -Feldlinien.

- Die Ausleseebene ist in “Pads” unterteilt
- Die driftenden Elektronen werden an Anodendrähten in Lawinen multipliziert
- Elektrische Signale werden auf 2 oder 3 nebeneinanderliegenden Pads induziert.
- Das Verhältnis der Signalhöhen wird verwandt, um die Position der Teilchenspur mit Präzision besserer als der Padgröße w zu bestimmen.



- Annahme: 2 Signalamplituden A_1 und A_2 .
- Padbreite w .
- Die Funktion $A_1 / A_2 = P_0(\lambda) / P_0(\lambda - w)$, kann verwendet werden, um die Signalposition λ zu bestimmen.
- P_0 (Pad Response Function) ist eine Funktion, die gemessen oder berechnet werden kann.





Teilchenidentifizierung mit einer TPC (1)



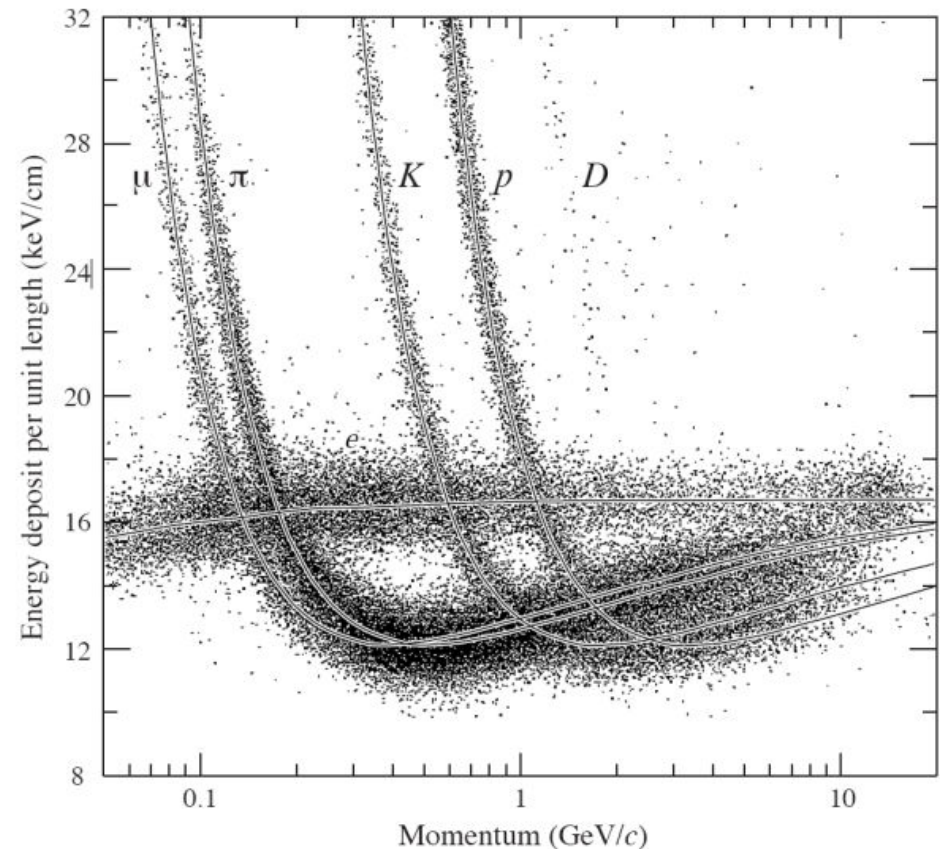
- Geladene Teilchen deponieren Energie im Gasvolumen der TPC.

Energy loss (Bethe-Bloch)

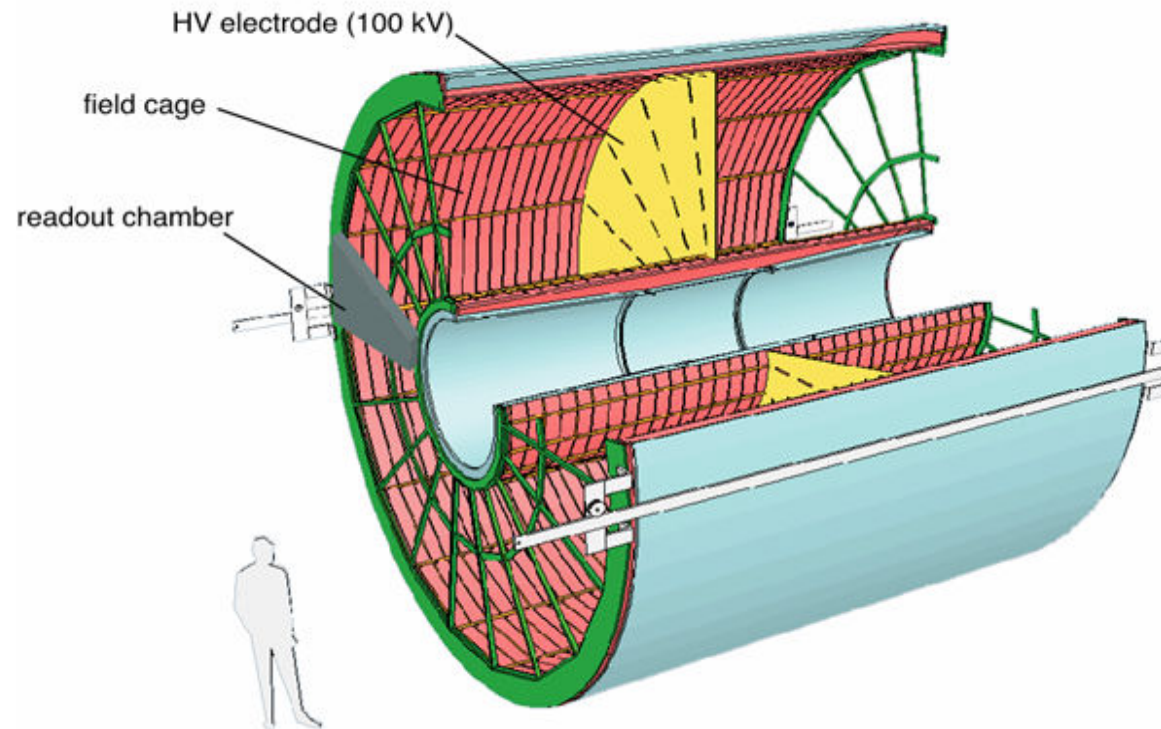
$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{2mv^2}{J(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

m mass of electron
 z, v charge and velocity of incident particle
 J mean ionization energy
 δ density effect term

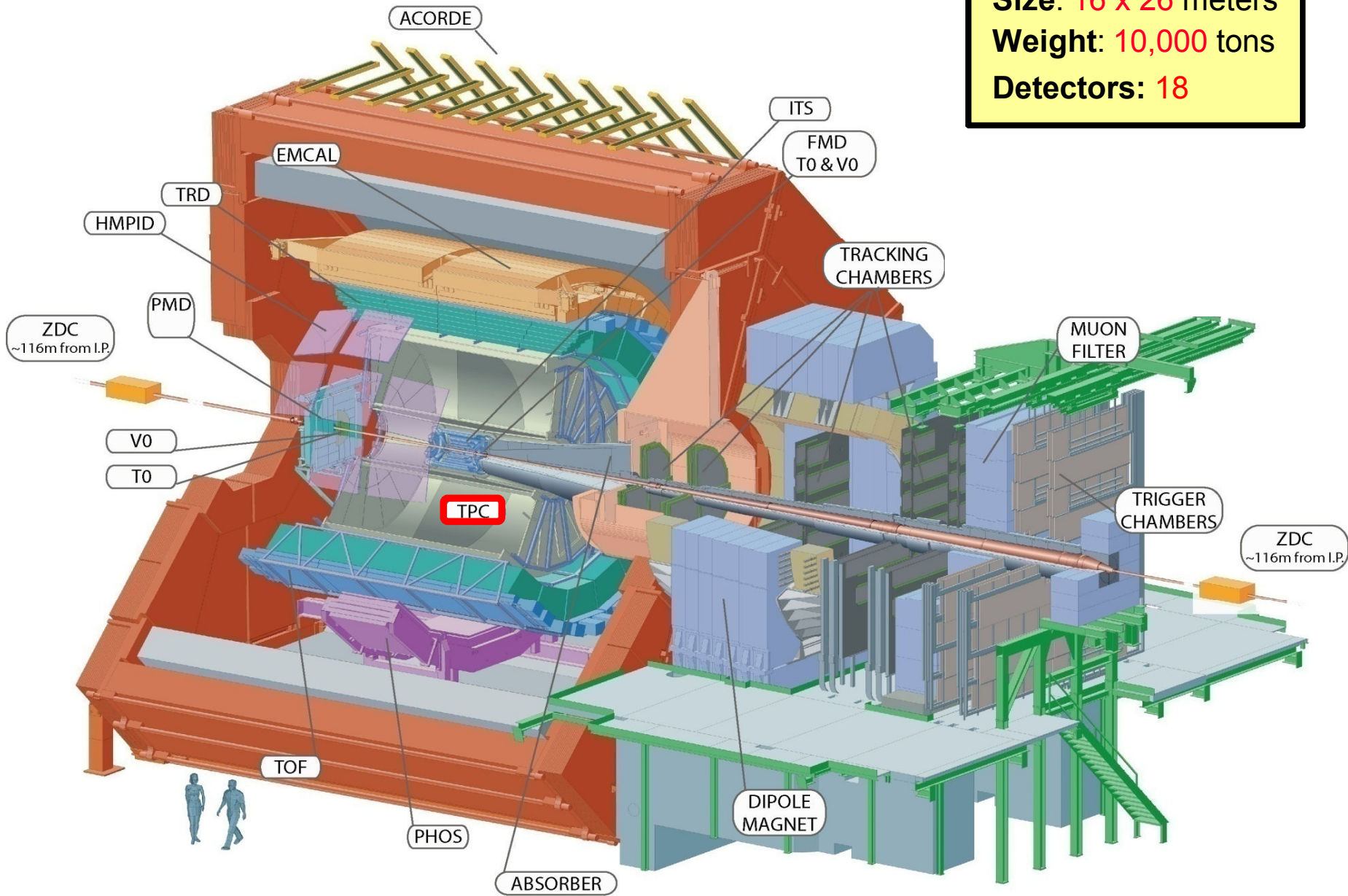
- Der Energieverlust ist abhängig vom Teilchenimpuls
- In bestimmten Impulsbereichen können verschiedene Teilchen auseinandergehalten werden



- Die größte jemals gebaute TPC
 - $L=5$ m
 - $\varnothing = 5$ m
 - 90m^3
- Driftgas: Ne/CO₂/N₂ (86/9.5/4.5%)
- Driftzeit: 92 μs
- Ausleseelektronik mit ~570 000 Kanälen (\Rightarrow ~570 Mio Pixel)

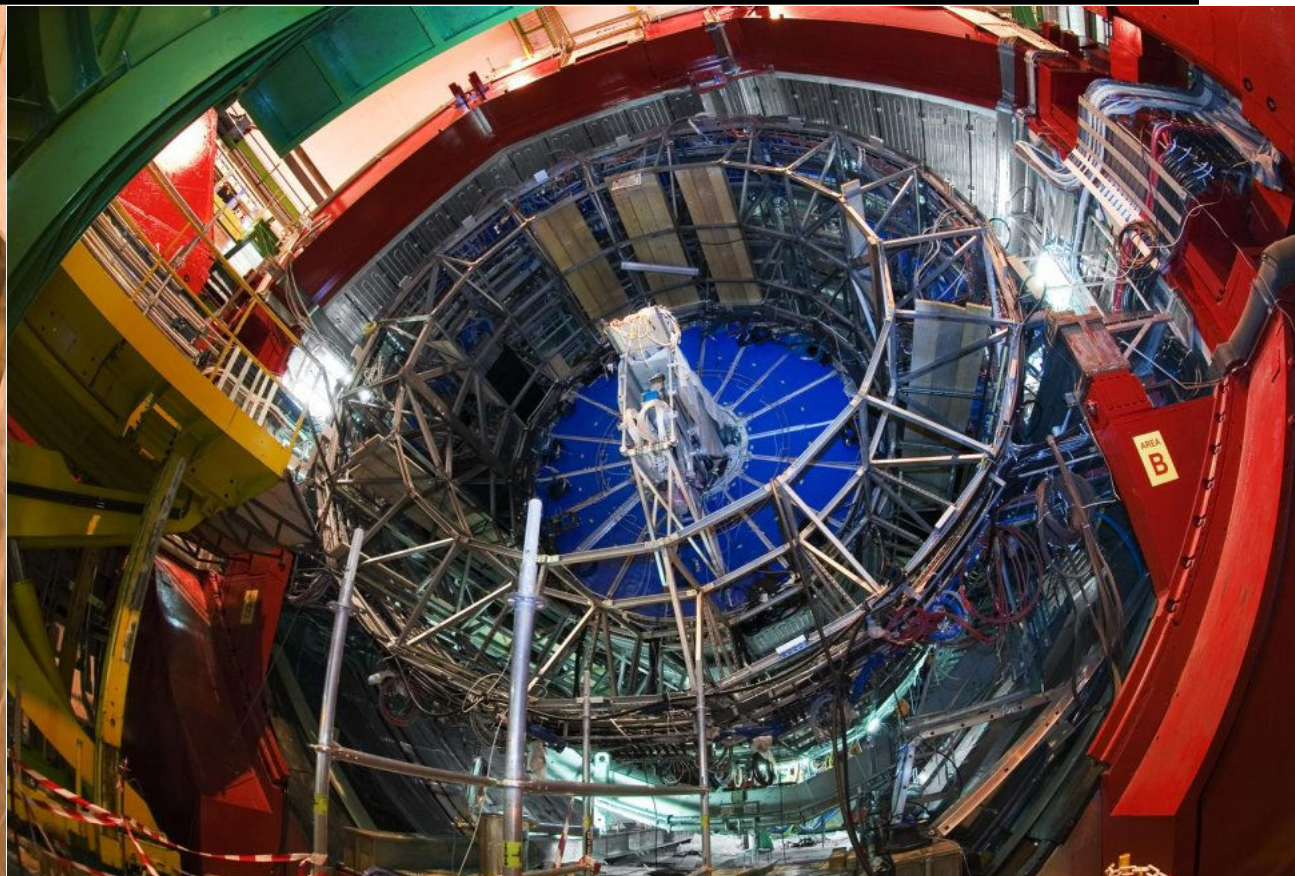


Size: 16 x 26 meters
Weight: 10,000 tons
Detectors: 18

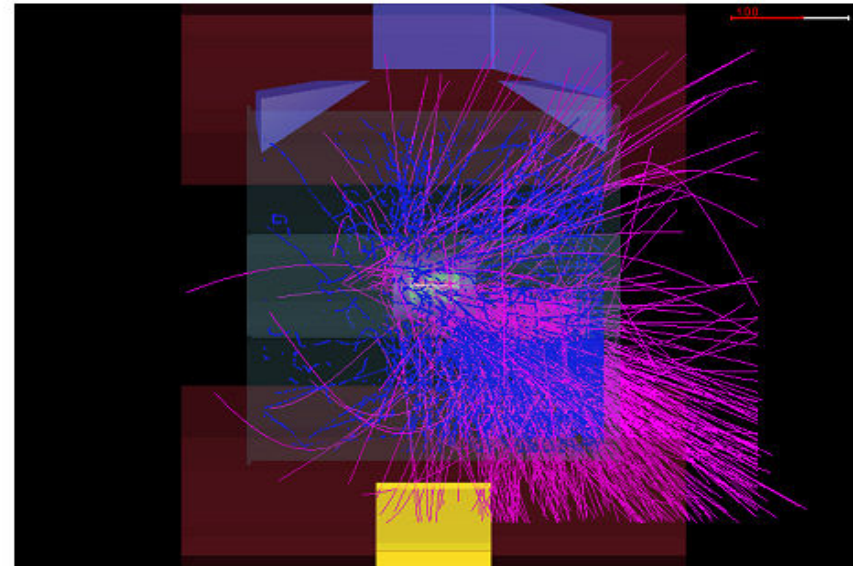
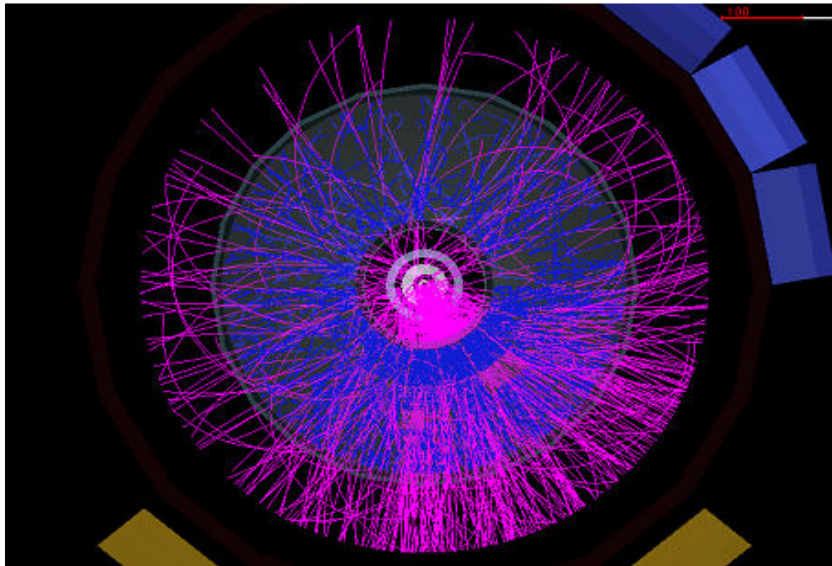
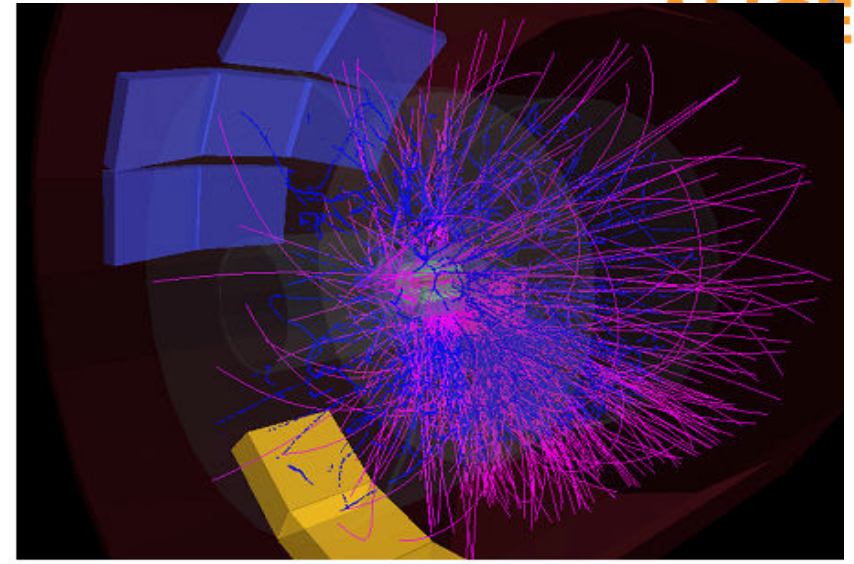
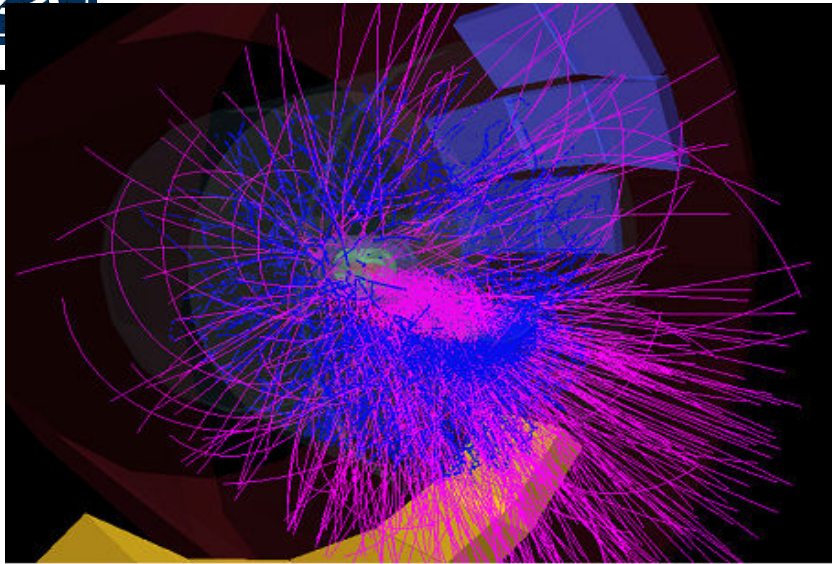




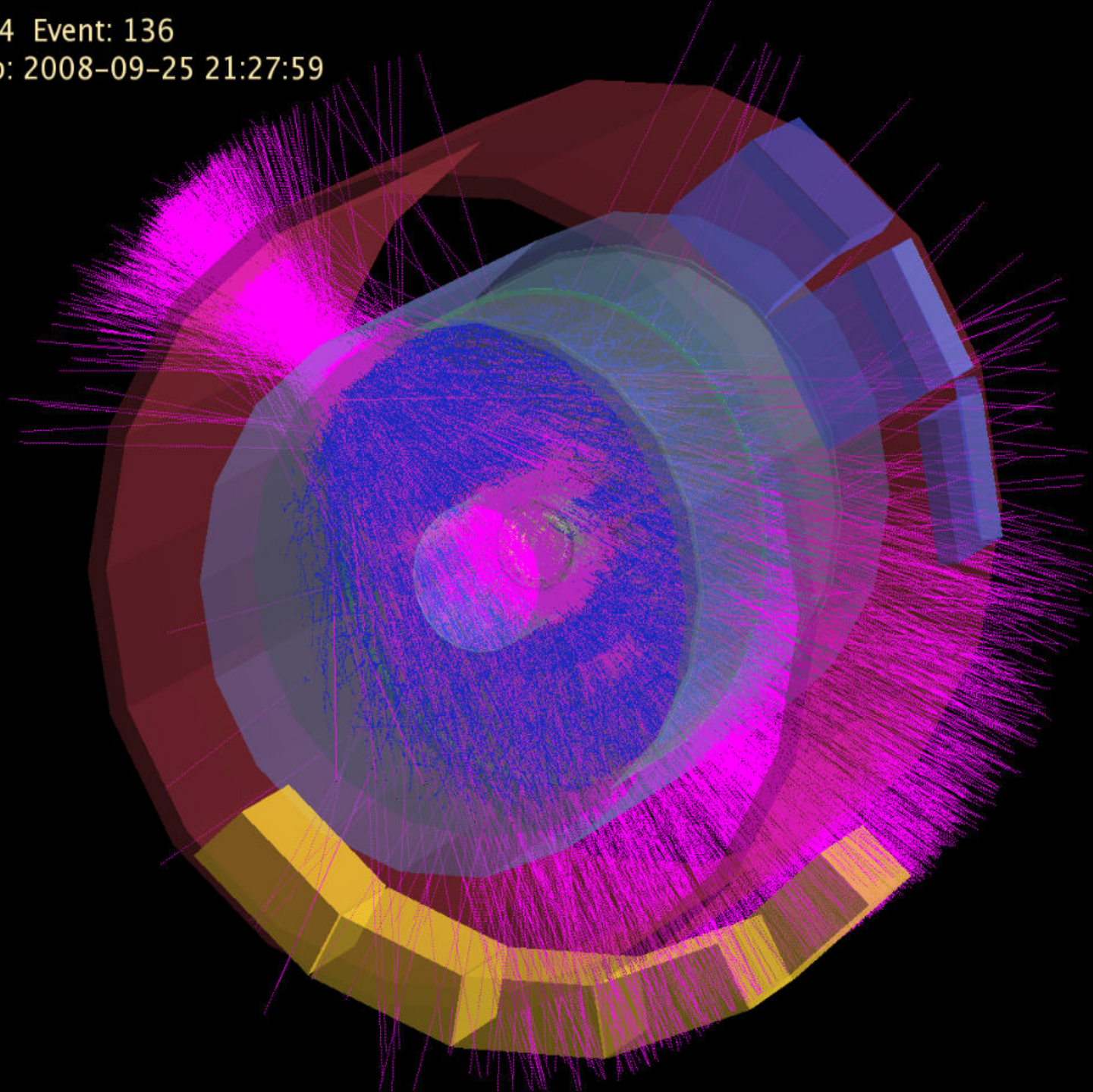
Installation der ALICE TPC



- Field Cage Assembly: 2002-04
- Readout Chamber Installation: 2005
- Electronics Installation: 2006
- Installation in cavern: 2007
- Commissioning/Calibration: 2007-09



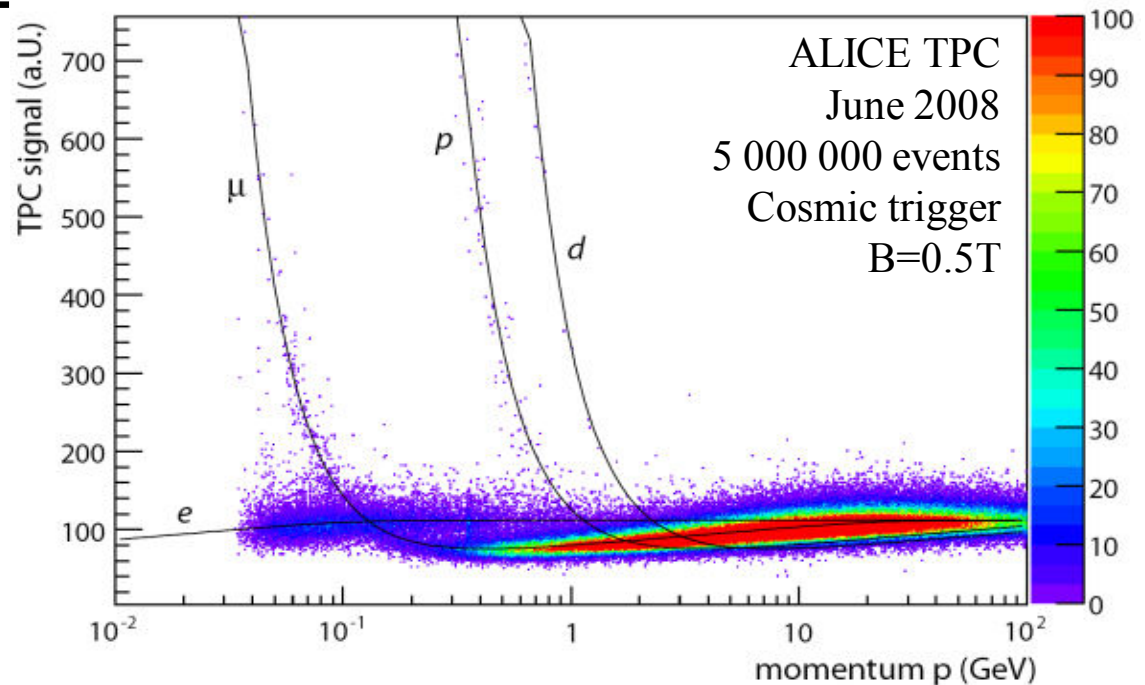
Run: 60824 Event: 136
Timestamp: 2008-09-25 21:27:59



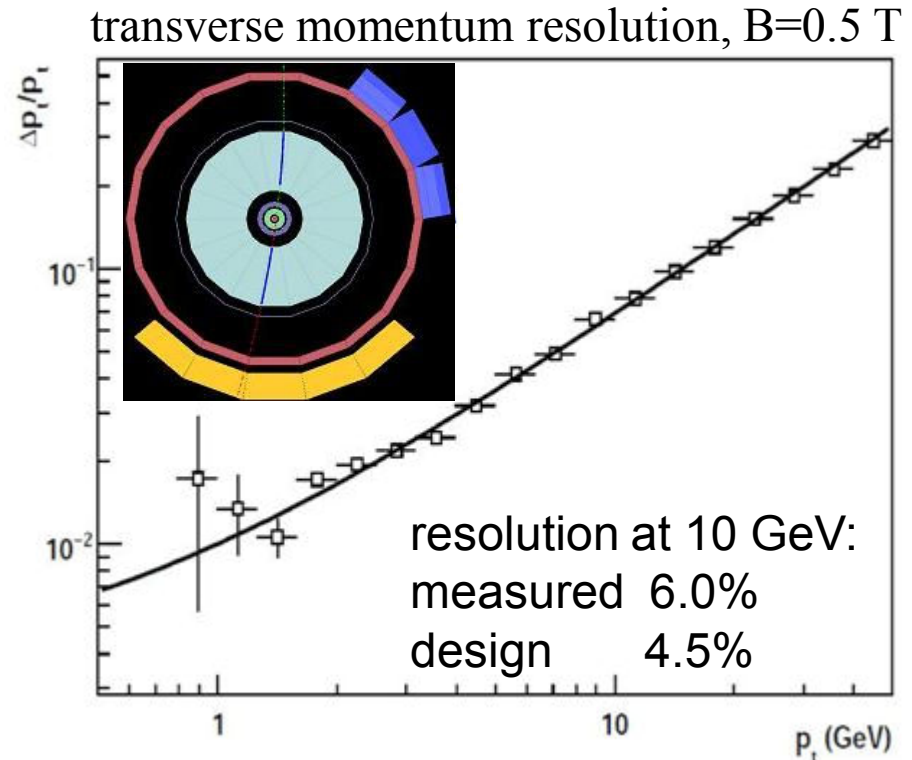
- Bisher nur Messungen mit kosmischer Strahlung

resolution:
measured 5.7%
design 5.5%

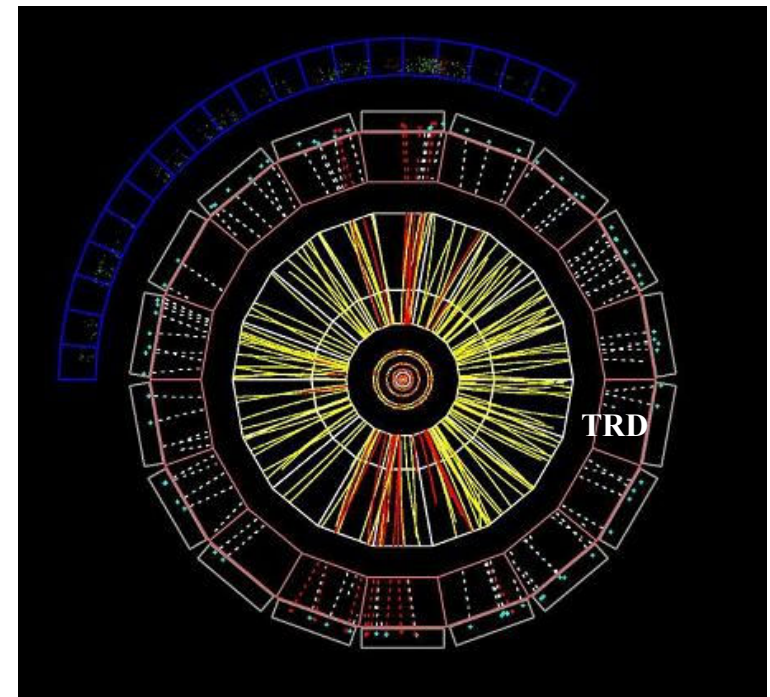
- Da das ALICE Experiment unter der Erde liegt, erreichen nur Muonen die TPC



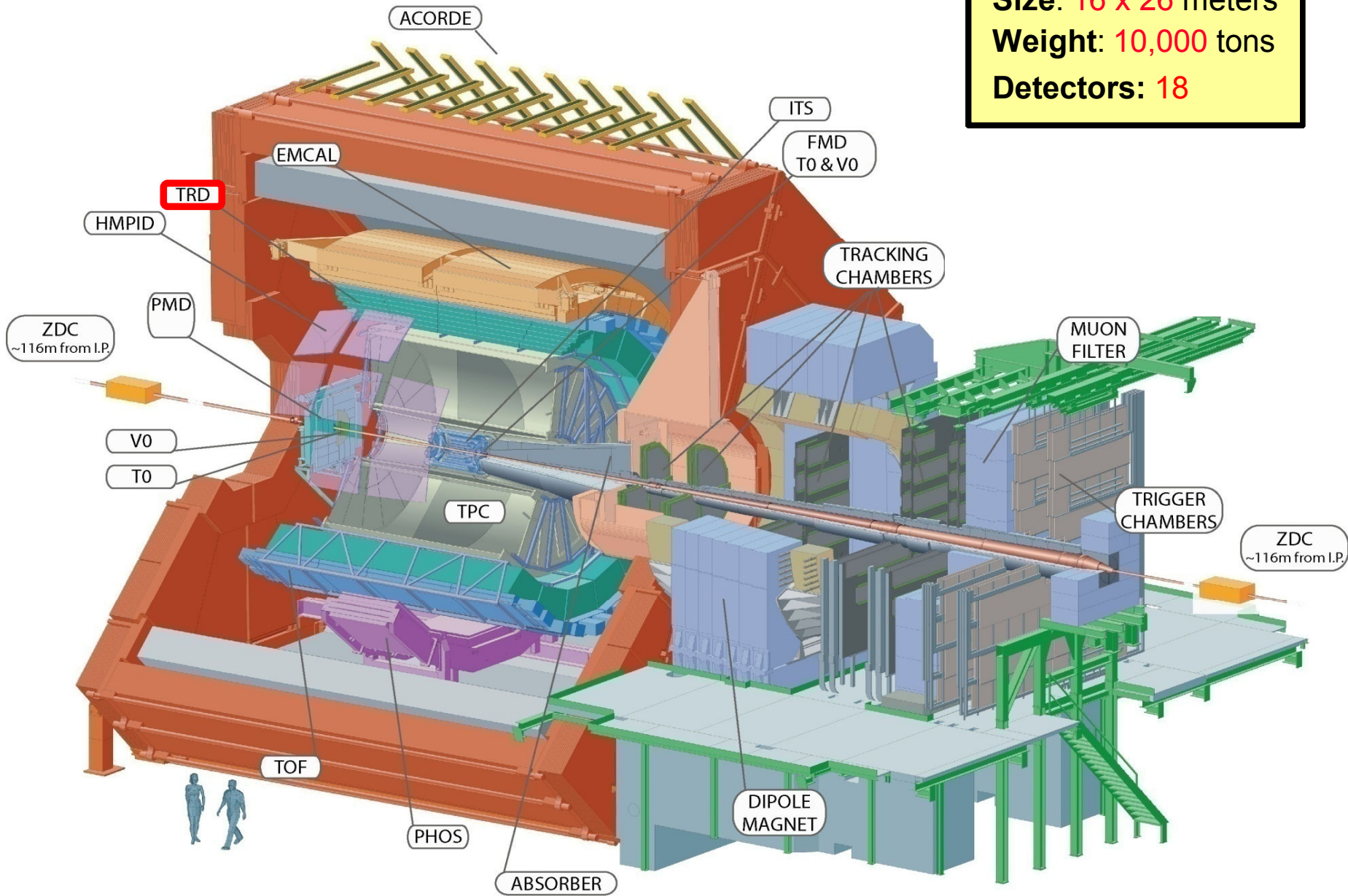
- Bisher nur Messungen mit kosmischer Strahlung
- Die erreichte Impulsauflösung wird sich durch bessere Kalibrierung noch verbessern



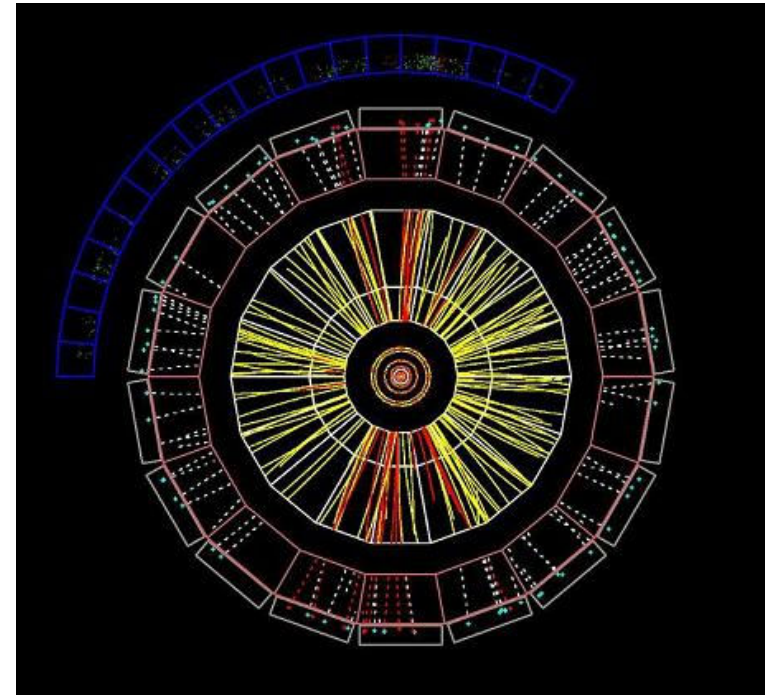
2) ALICE TRD (Transition Radiation Detector)



Size: 16 x 26 meters
Weight: 10,000 tons
Detectors: 18



- TRD = Übergangsstrahlungsdetektor
- Aufgabe in ALICE:
 - Schnelle Elektronen identifizieren
(Pion Rejection Factor 100)
 - Koordinatenmessung zusammen mit der TPC
 - “Trigger” auf schnelle Elektronen
(Startet die Auslese von ALICE im Falle interessanter Ereignisse)

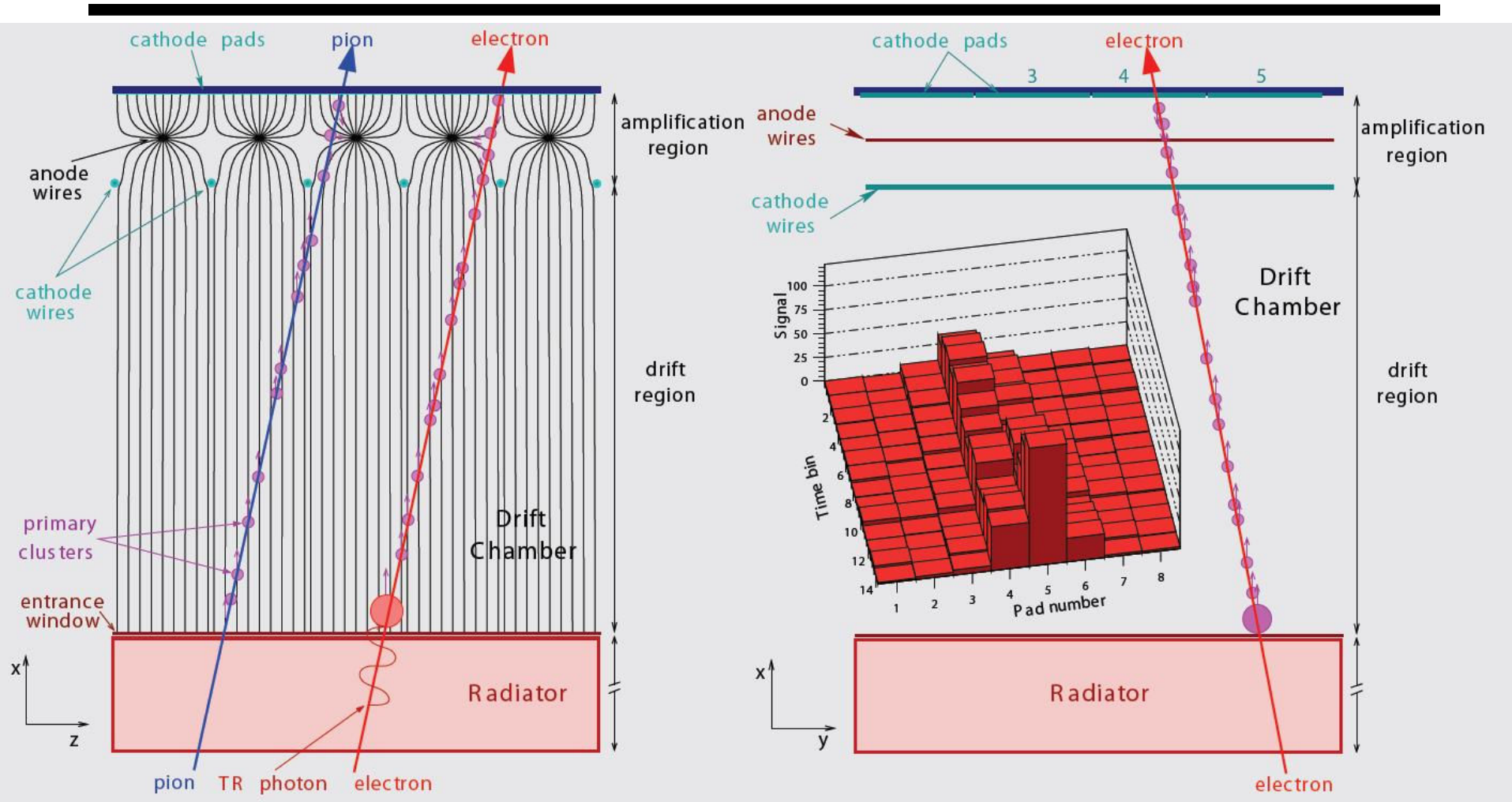




Der ALICE TRD (2)

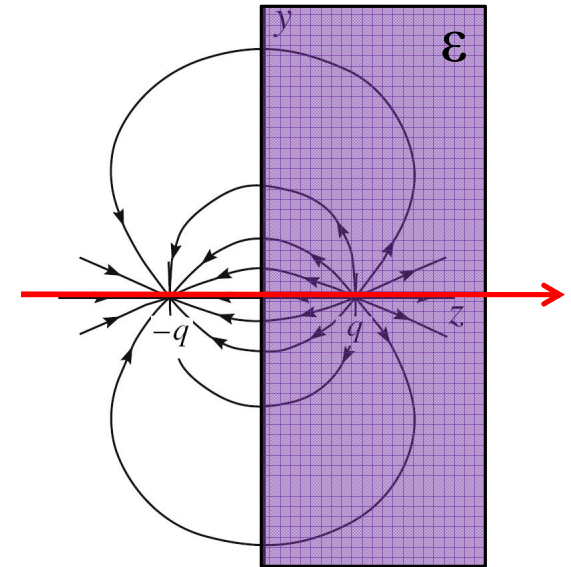


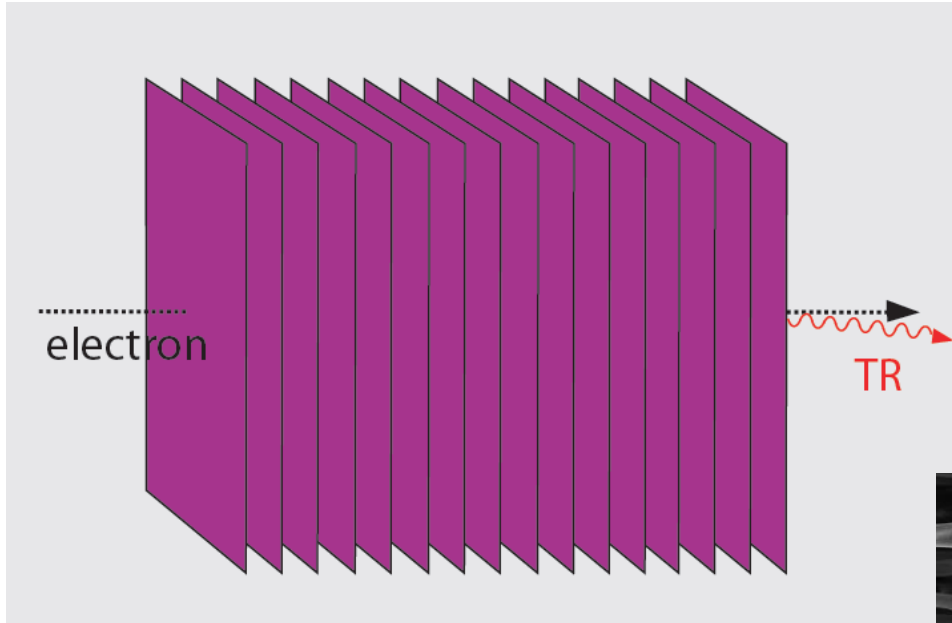
- Es handelt sich um einen Gasdetektor, ähnlich der TPC
 - geladene Teilchen ionisieren das Driftgas
 - die freigesetzten Elektronen driften, werden multipliziert und ein Signal wird auf Auslese pads induziert
- Zusätzlich wird von schnellen Elektronen (und nur von diesen) sogenannte **Übergangsstrahlung** erzeugt



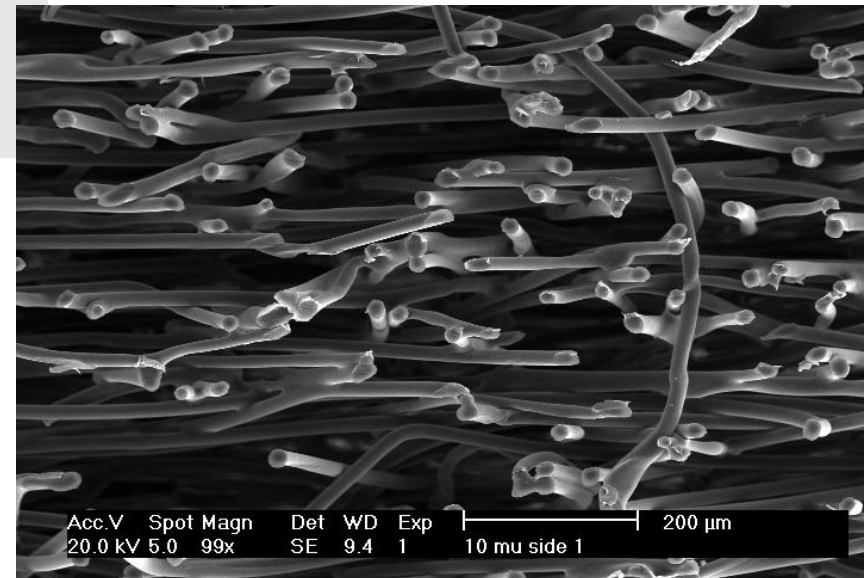
- Nur Elektronen erzeugen die **Übergangsstrahlung**

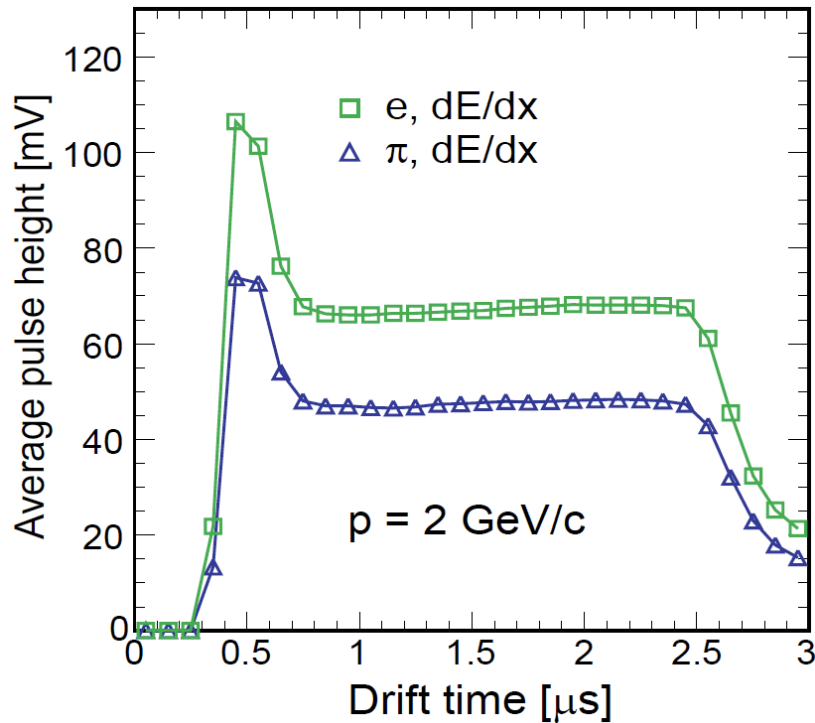
- **Übergangsstrahlung** entsteht, wenn ein geladenes, hochrelativistisches Teilchen die Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten ϵ passiert. Die Wellenlänge dieser Strahlung liegt typischerweise im Bereich des Röntgenspektrums.
- Anschauliche Erklärung:
 - Ein geladenes Teilchen erzeugt im Medium der anderen Dielektrizitätskonstanten eine Spiegelladung.
 - Zusammen mit der sich nähernden Teilchenladung stellt diese einen veränderlichen Dipol dar. Dieser veränderliche Dipol strahlt Photonen ab.



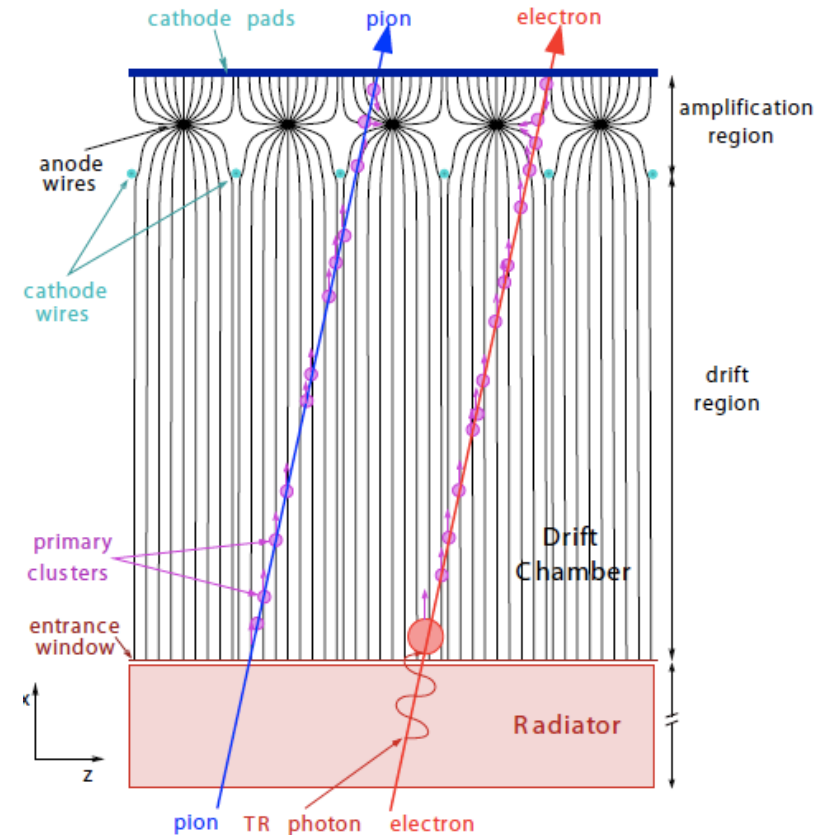


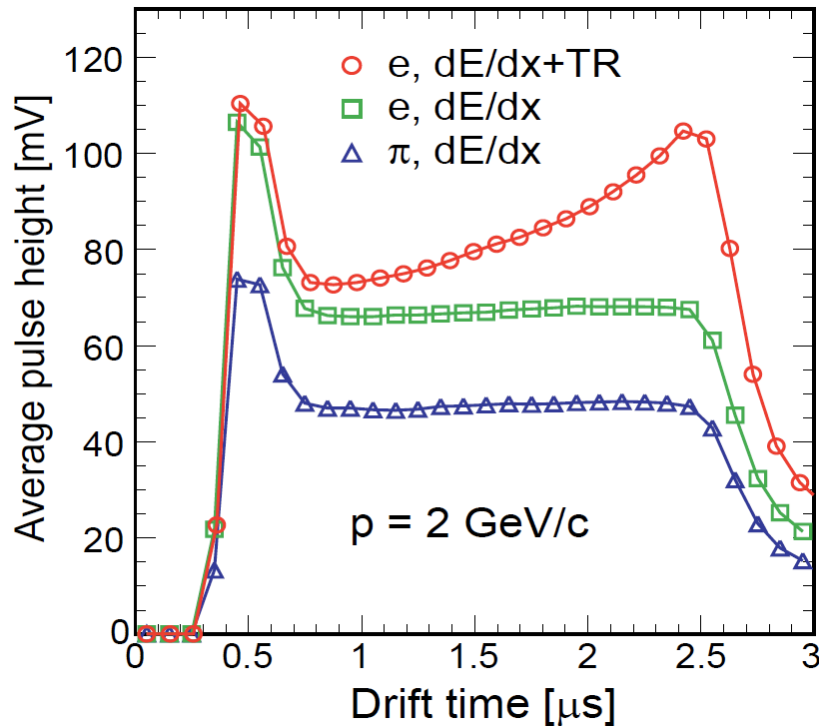
- Man verwendet gestapelte Foilien oder unregelmäßige Materialien





- Signalamplitude als Funktion der Driftzeit
- Simulation ohne Berücksichtigung der Übergangsstrahlung

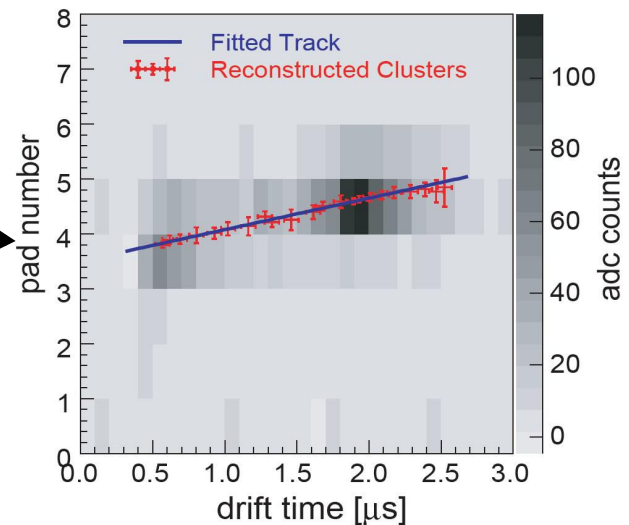
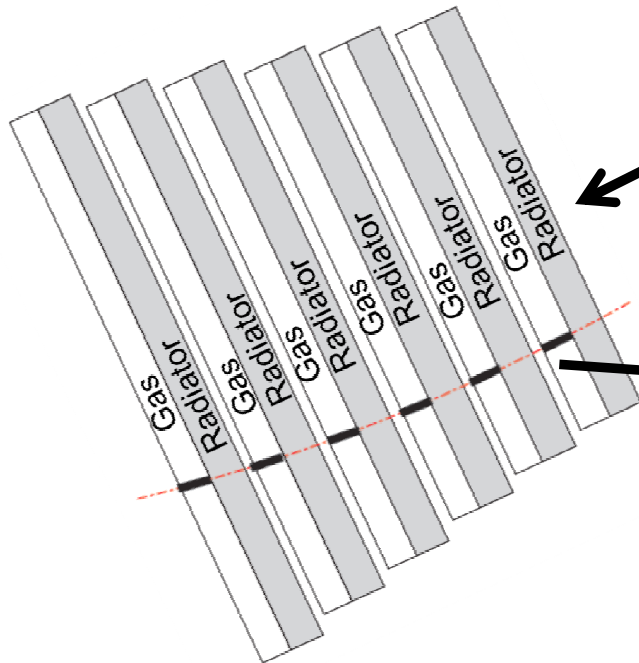
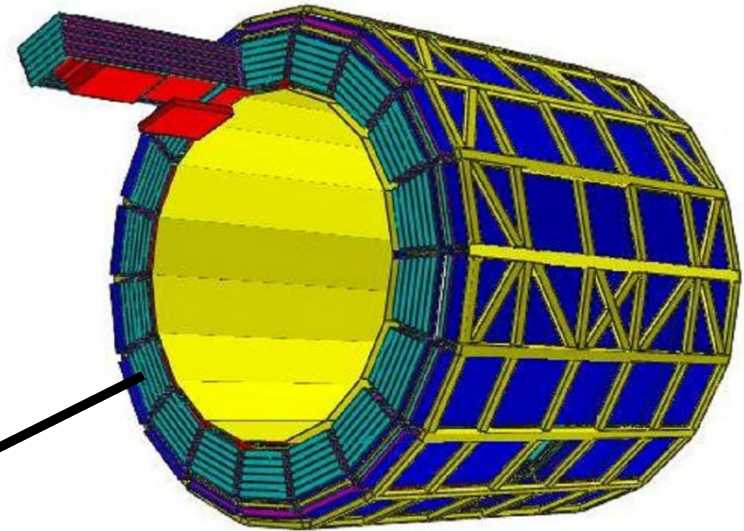


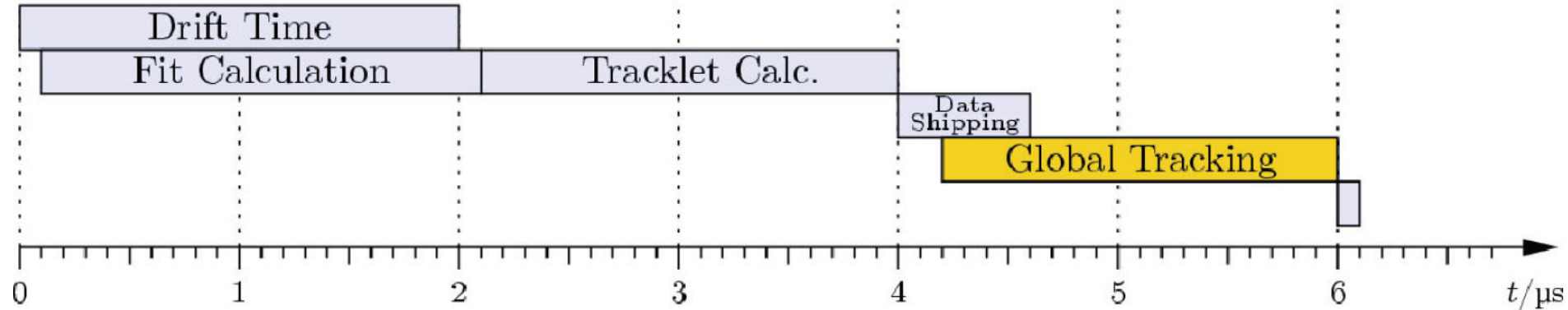


- Signalamplitude als Funktion der Driftzeit
- Rote Linie: Simulation **mit** Übergangsstrahlung

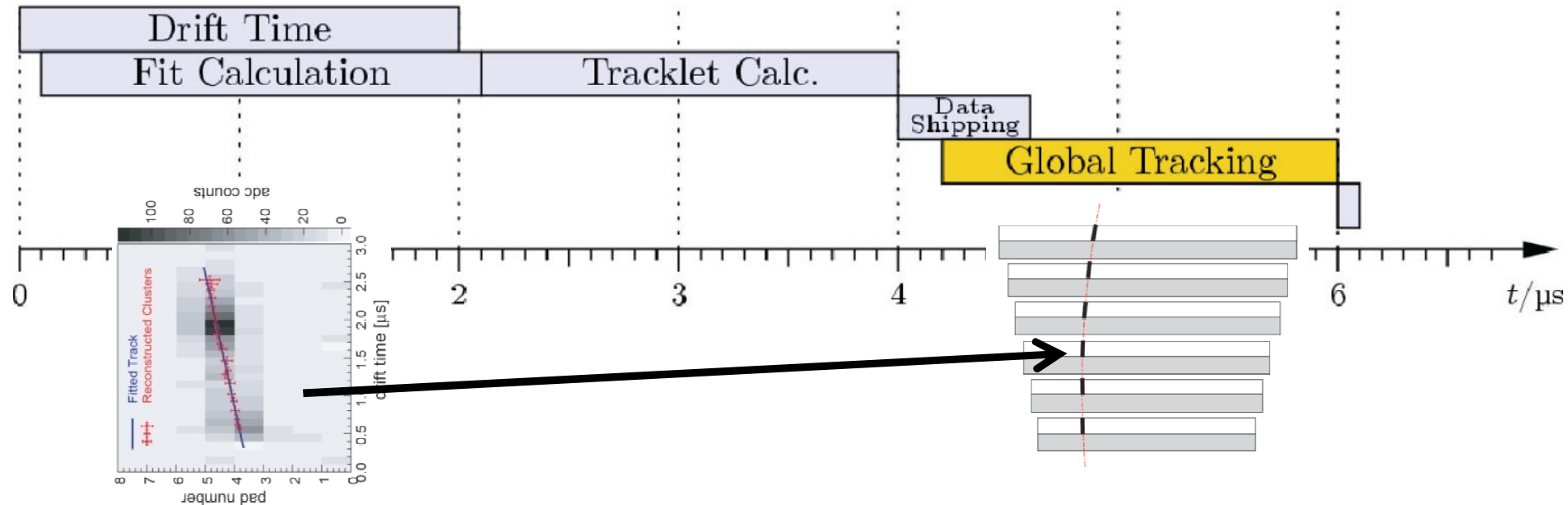
- Der Unterschied in den Signalamplituden und in der Signalform wird verwendet um Elektronen von Pionen zu unterscheiden.

- 540 Ausleseammern in
 - 18 Supermodulen
 - mit je 6 Ebenen
- Driftgas: Xe/CO₂ (85/15)
- > 1 Mio Auslesekanäle

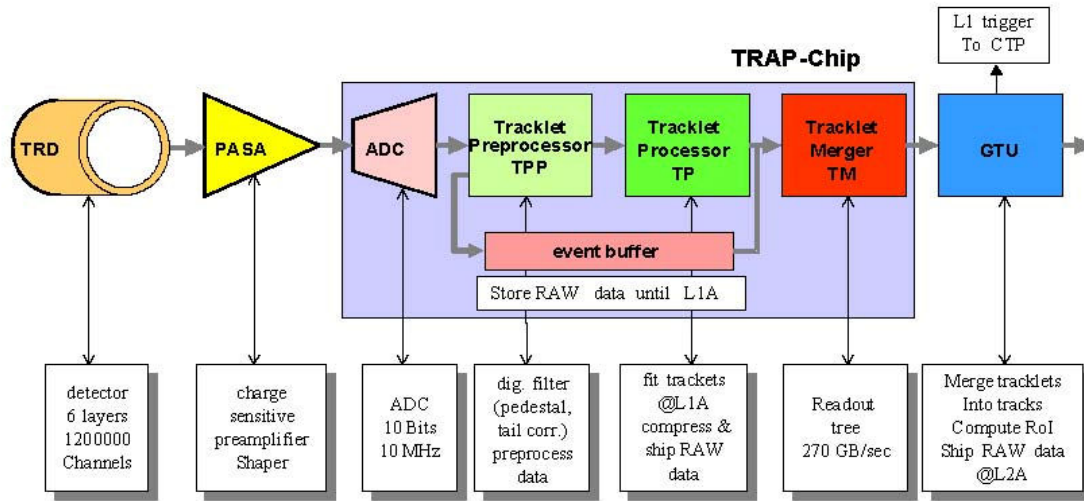




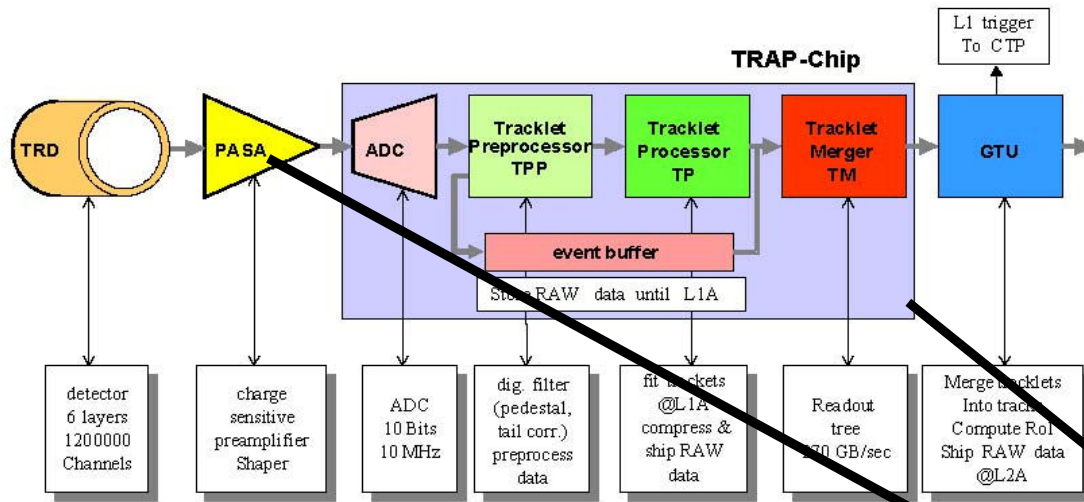
- Gesucht werden in der Datenflut versteckte schnelle Elektronenpaare (Erinnerung: $J/\Psi \rightarrow e^+ e^-$)
- Dafür stehen $<7\mu\text{s}$ zur Verfügung



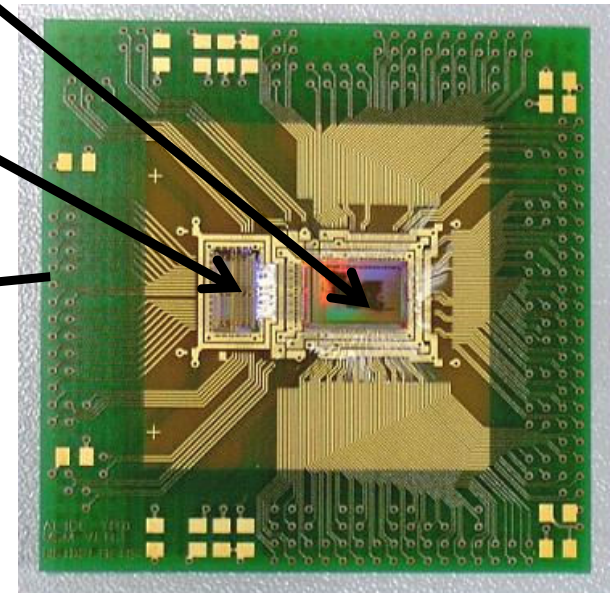
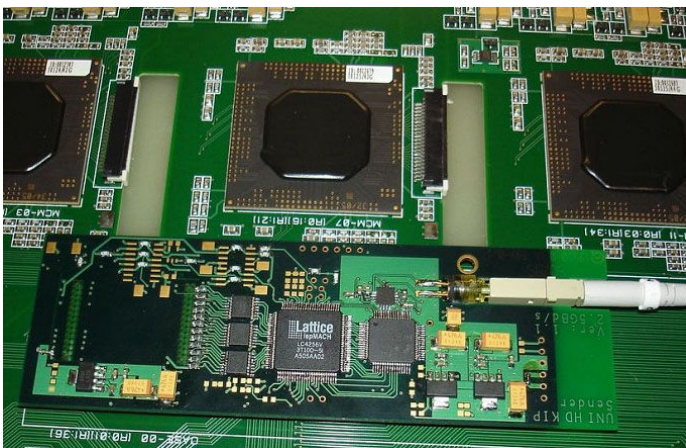
1. Während die Signale noch aufgenommen werden (während der Driftzeit) werden die Daten nach schnellen Elektronenkandidaten durchsucht
2. Die Daten der 6 Ebenen werden in einer "Global Tracking Unit" kombiniert. Elektronenpaare werden gesucht

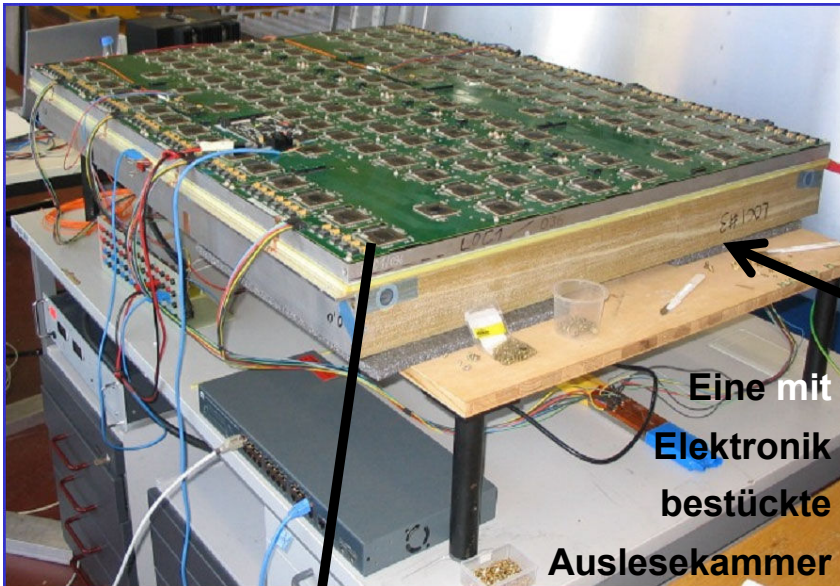


- TRAP chip: Teilchenspuren untersuchen mit 4 CPUs (Prozessoren)

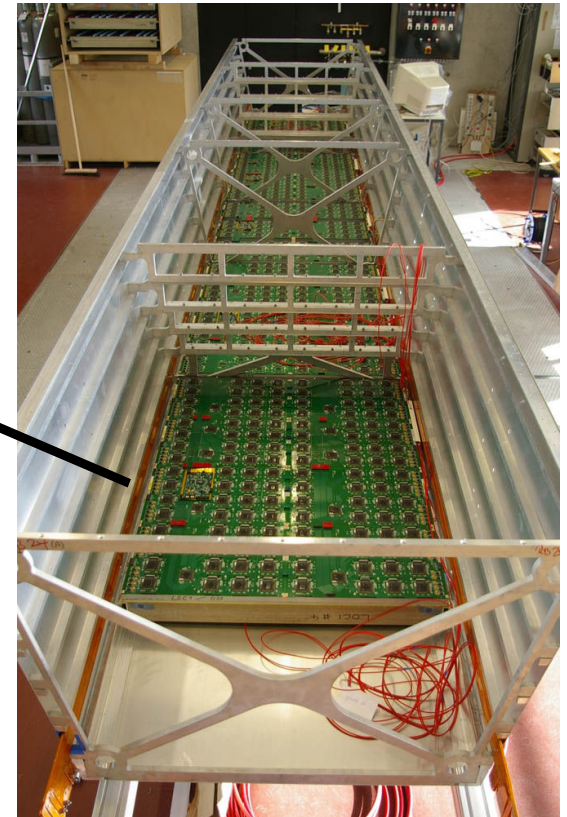
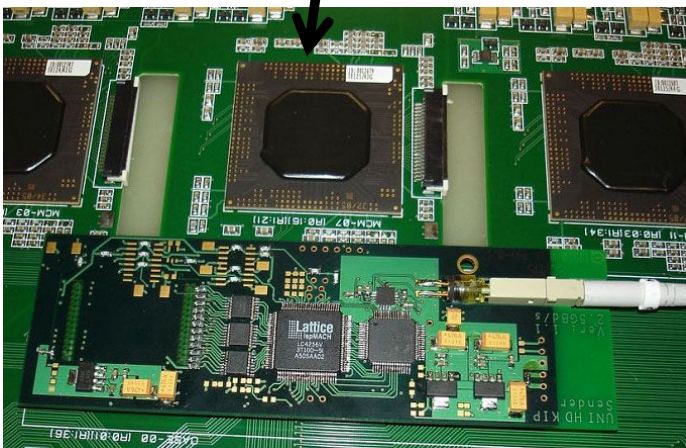


- TRAP chip: Teilchenspuren untersuchen mit 4 CPUs (Prozessoren)



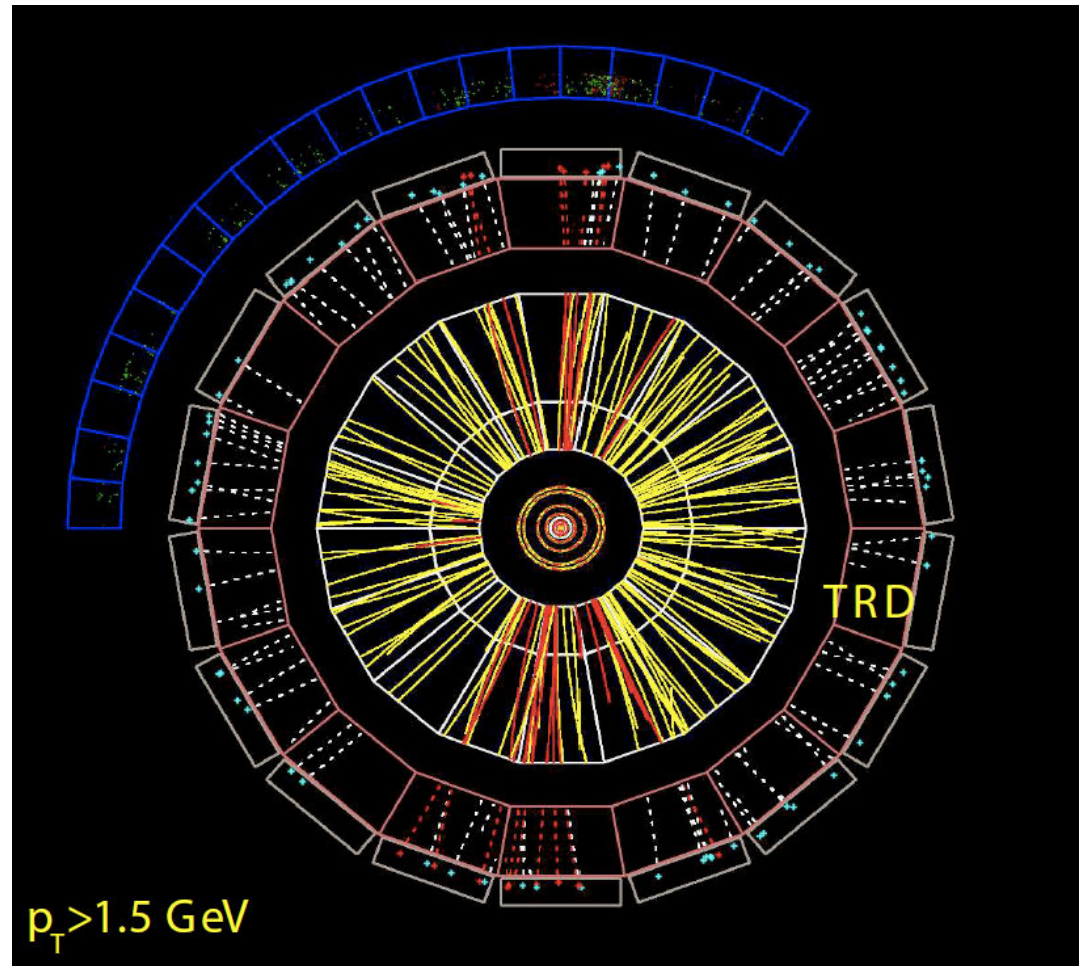


Eine mit
Elektronik
bestückte
Auslesebox

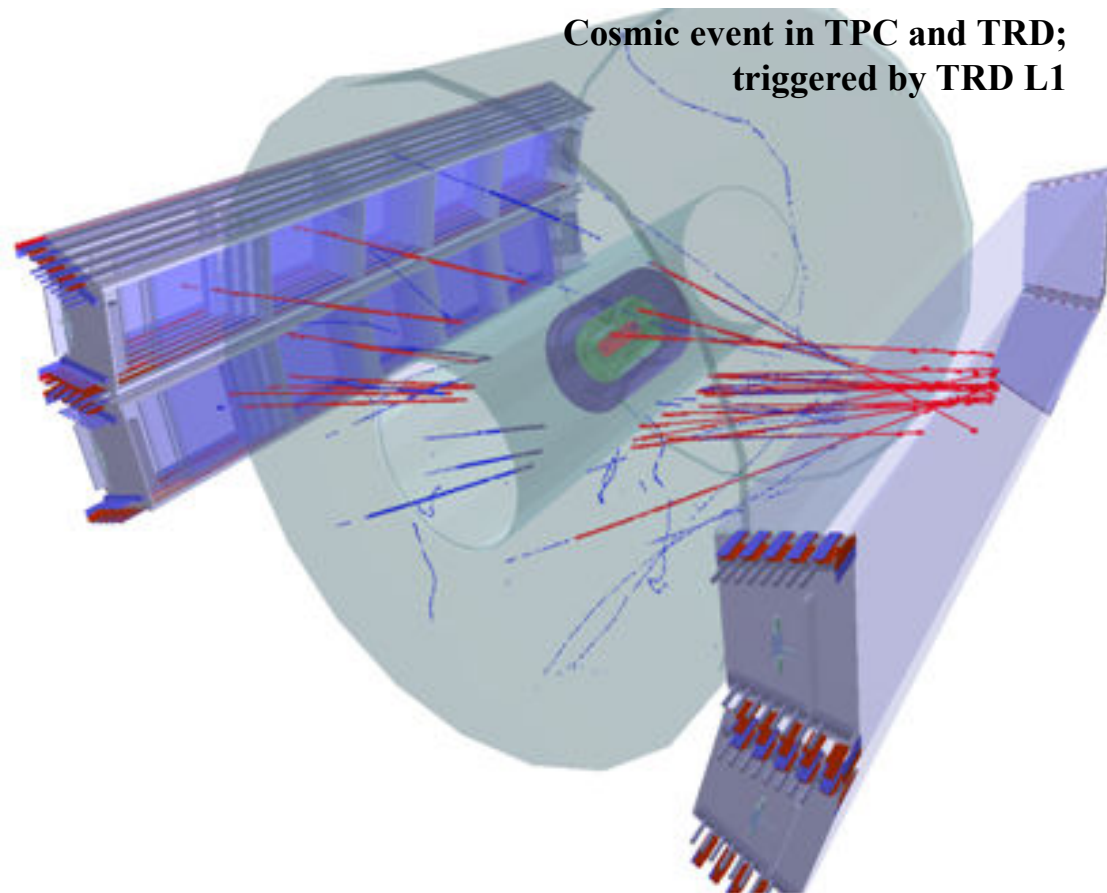


Ein TRD Supermodul in Bau
Die erste der 6 Detektorebenen
wird installiert.

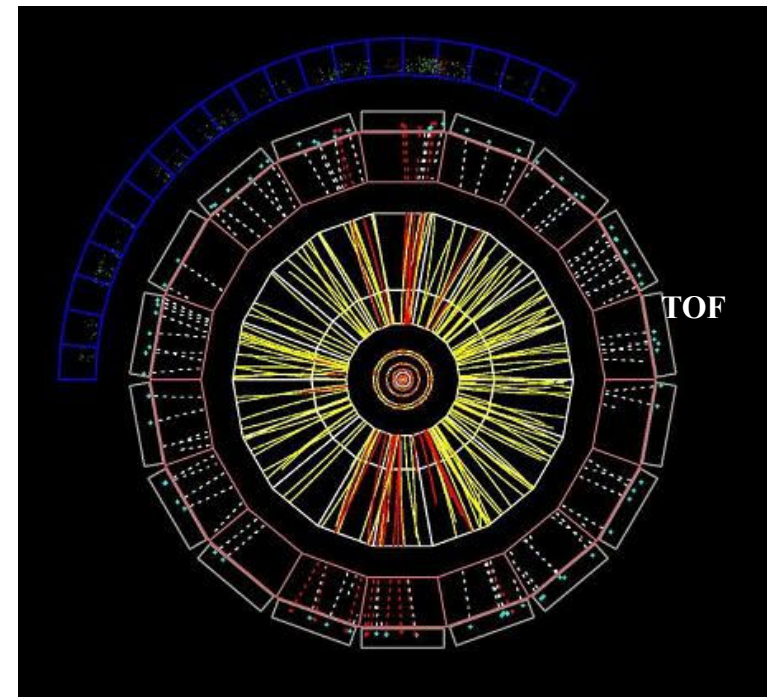
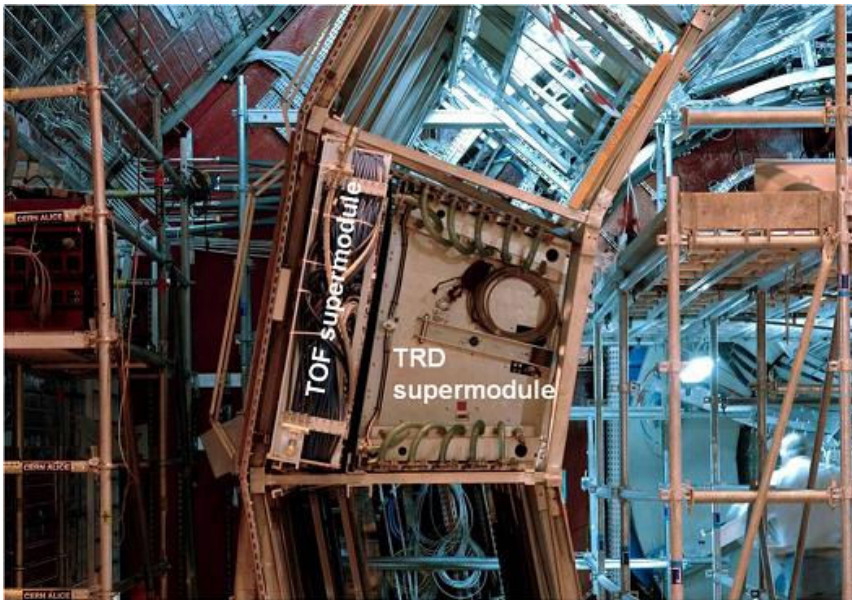
- Eine viertel Million CPUs direkt auf dem Detektor durchsuchen eine unglaubliche Datenmenge nach Elektronen!
- Das Bild zeigt nur einen sehr kleinen Teil aller geladenen Teilchen im ALICE Detektor bei einer zentralen Blei-Blei Kollision



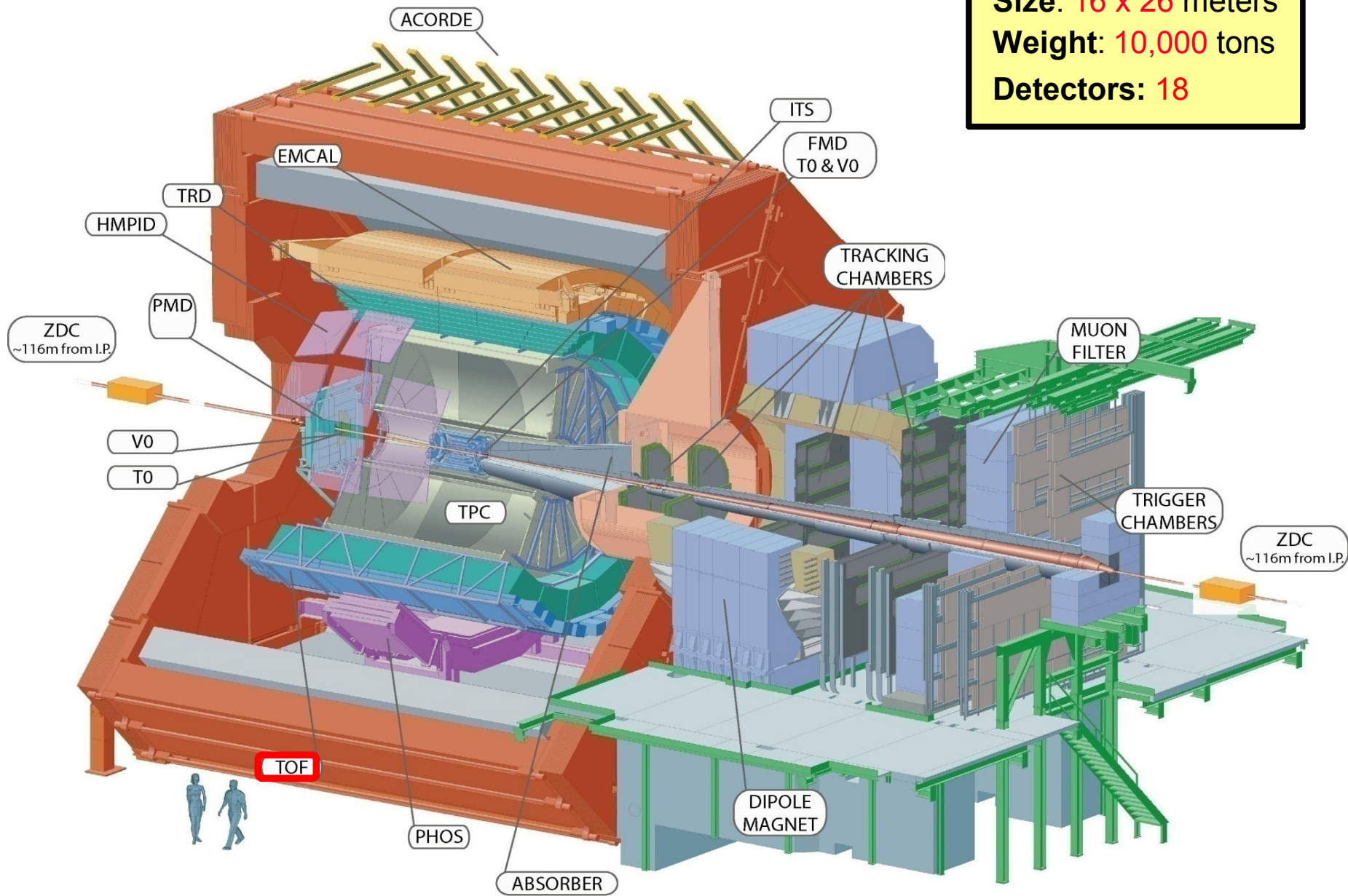
- Daten aus TRD (4 Supermodule eingebaut) und TPC
- TRD “Trigger” Entscheidung



3) ALICE TOF (Time Of Flight Detector)



Size: 16 x 26 meters
Weight: 10,000 tons
Detectors: 18



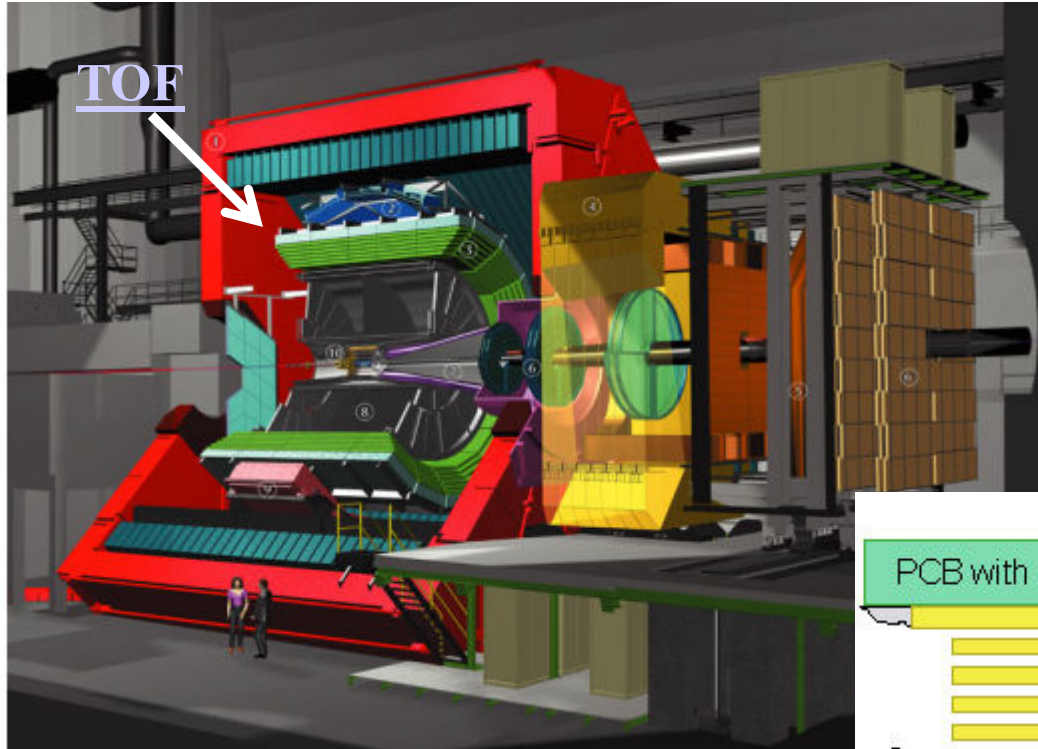


Der ALICE TOF (1)

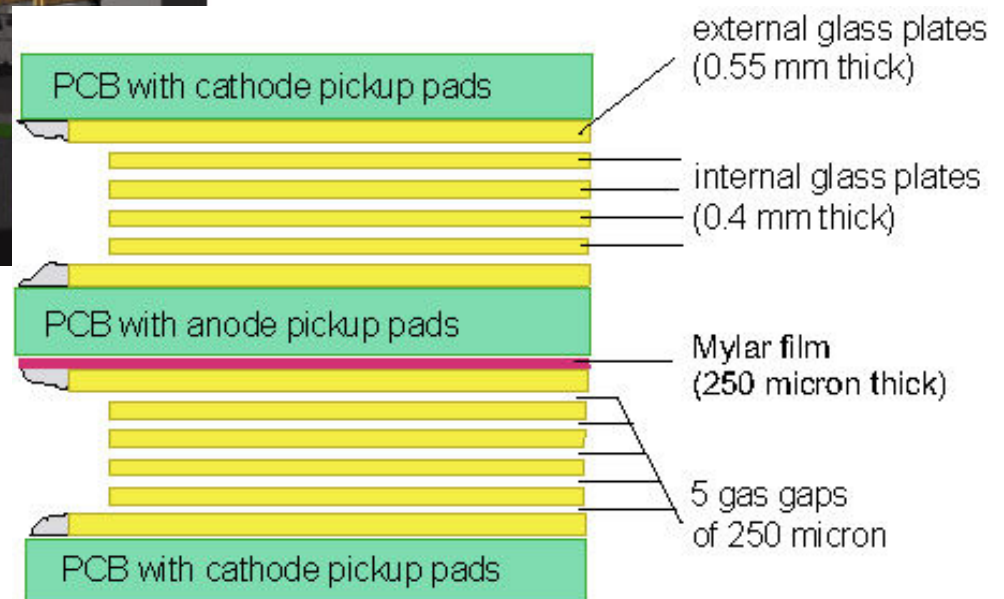


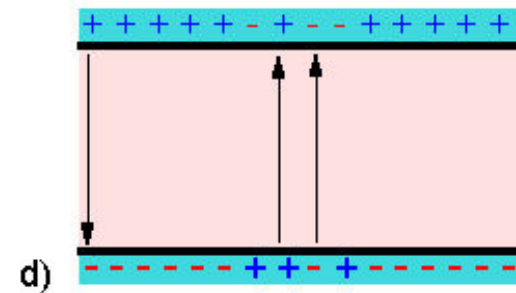
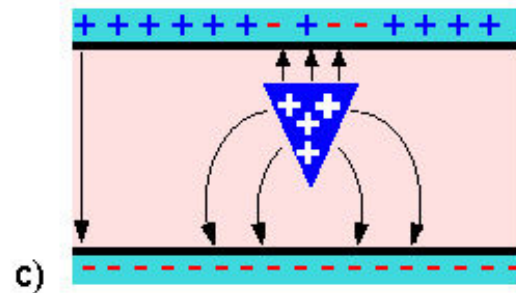
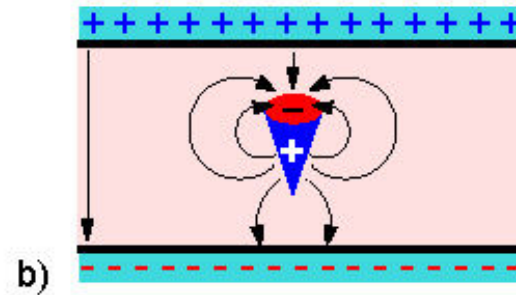
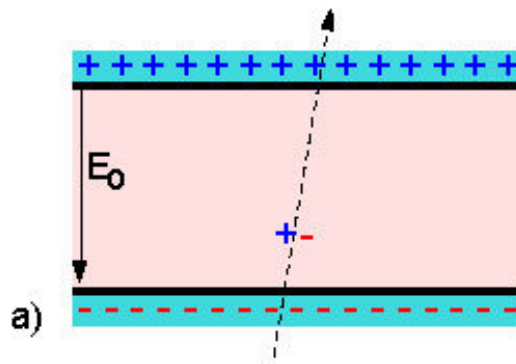
- **Teilchenidentifizierung über die Messung der Flugzeit**
 - Geschwindigkeit des Teilchens aus Flugzeit (gemessen im TOF Detektor) und Flugstrecke (gemessn in der TPC)
 - Masse des Teilchens aus Impuls (gemessen in der TPC)
 - Die Masse identifiziert das Teilchen!
- Die Zeitauflösung des Detektors muss sehr gut sein!
- Gemessene Zeitauflösung im ALICE Experiment: <100 ps ($=10^{-10}$ s)
- ~160 000 elektronische Auslesekanäle

Der ALICE TOF (2)



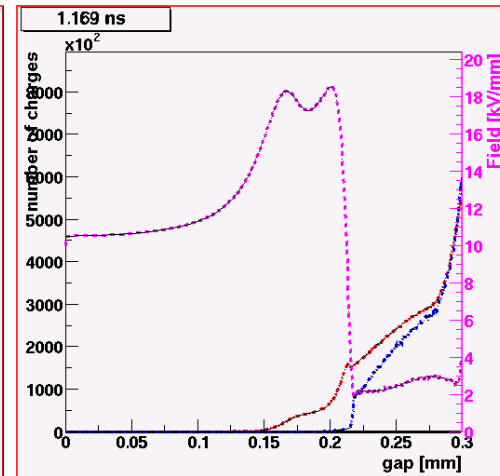
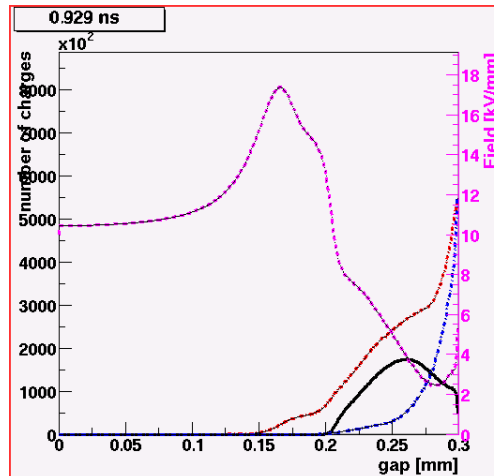
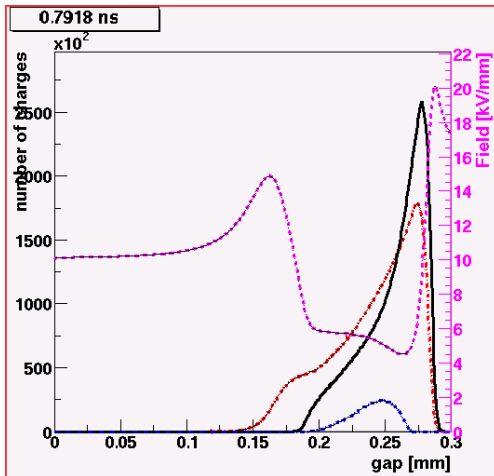
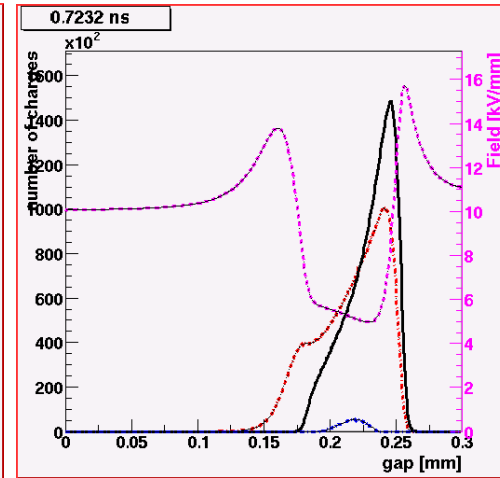
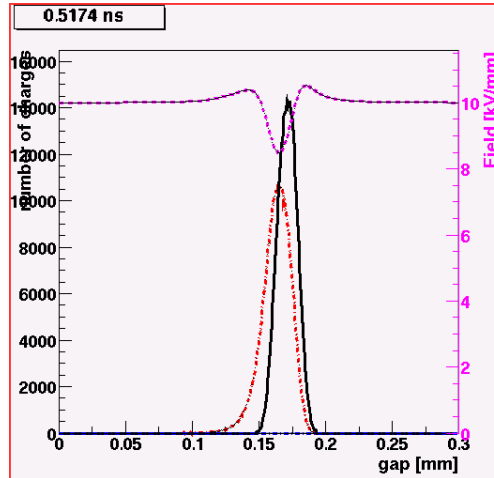
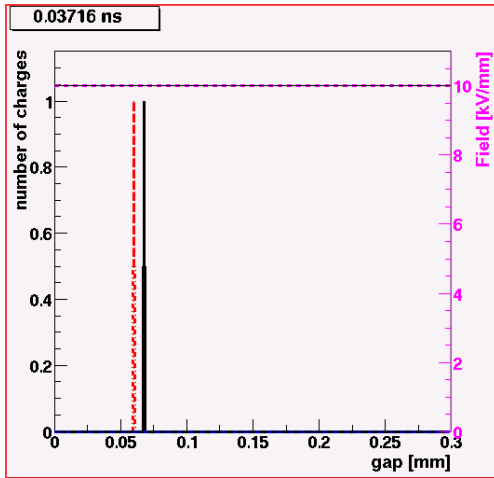
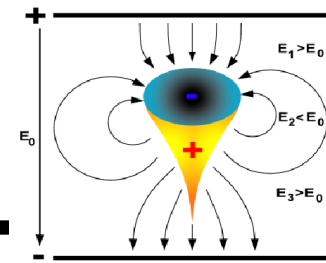
- **TOF: Time Of Flight Detektor**
- Man verwendet 'Resistive Plate Chambers' (RPC, Widerstandsplattenkammer) zur Teilchenidentifizierung über die Flugzeit (TOF)





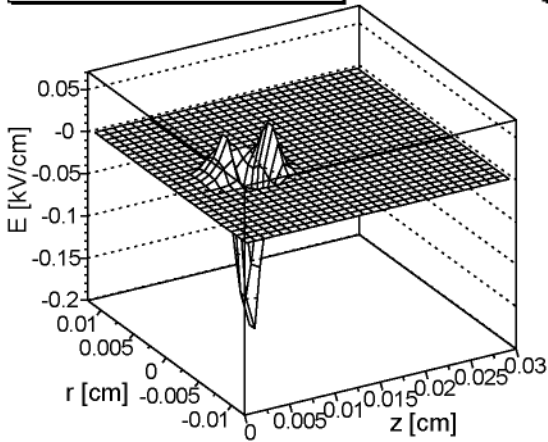
- a) Gasionisation
- b) Lawinenentwicklung, **Raumladungseffekte**
- c) Ionen driften langsamer als Elektronen
- d) Ladungen in den Elektrodenplatten beeinflussen elektrisches Feld

Raumladungseffekt

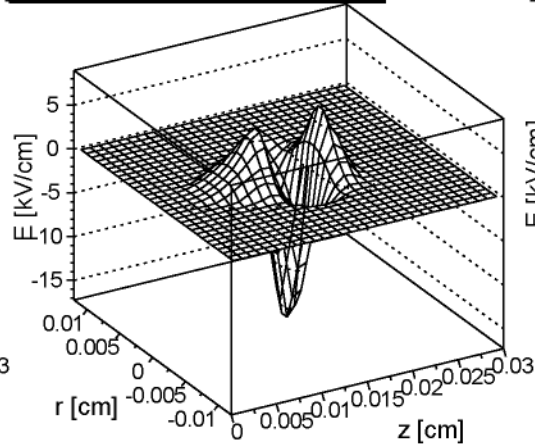


positive ions negative ions electric field

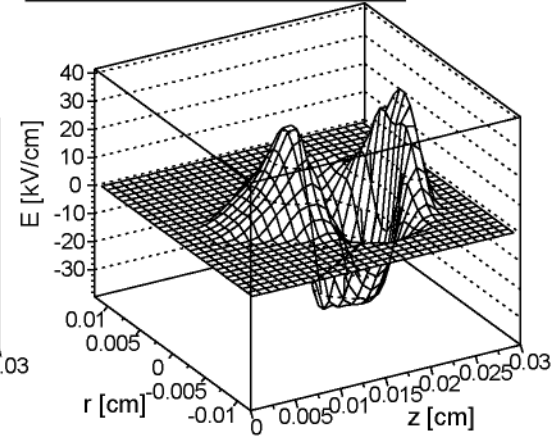
a) $t=0.48\text{ns}$; 6407 electrons



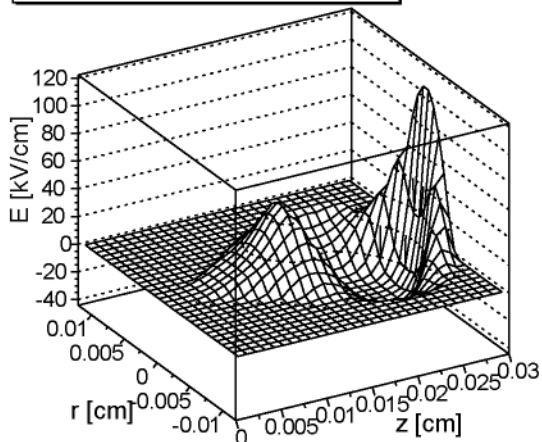
b) $t=0.76\text{ns}$; 1336129 electrons



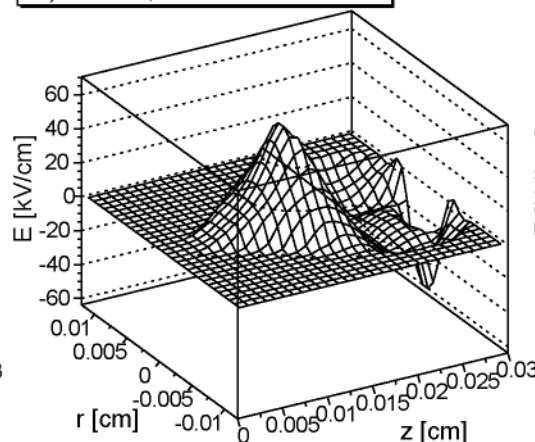
c) $t=0.95\text{ns}$; 13480643 electrons



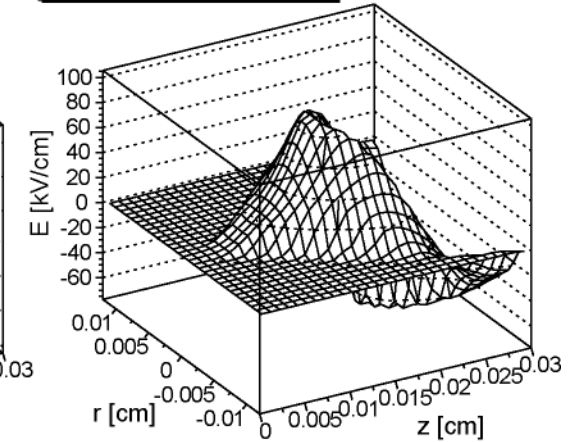
d) $t=1.05\text{ns}$; 32515291 electrons



e) $t=1.1\text{ns}$; 52649179 electrons

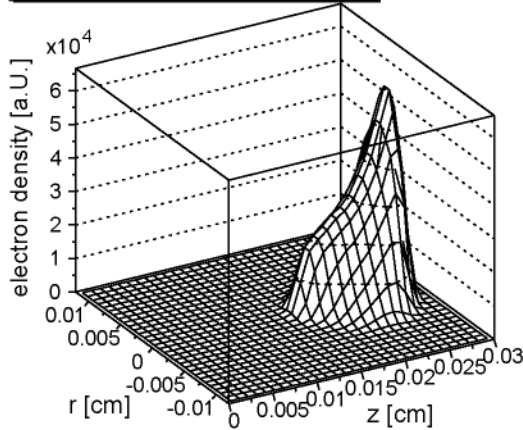


f) $t=1.86\text{ns}$; 38 electrons

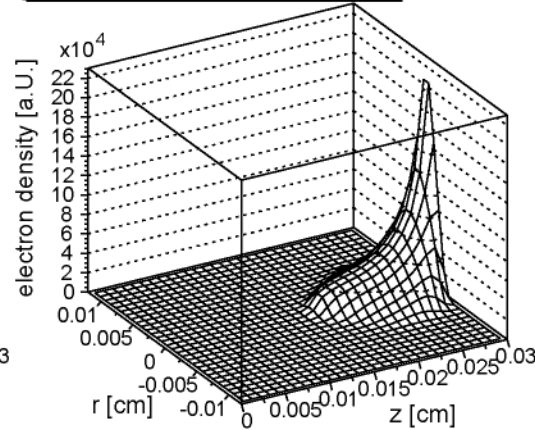


Das Raumladungsfeld erreicht die Größenordnung des externen angelegten Feldes!

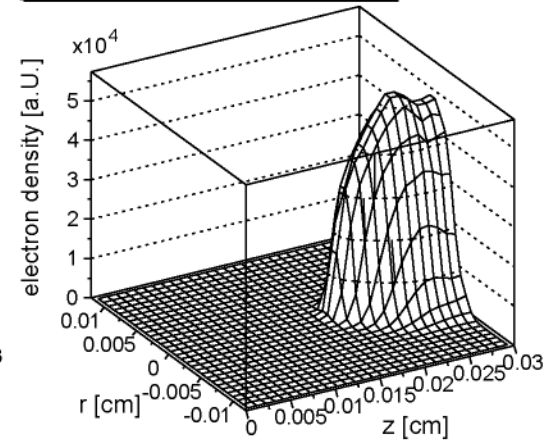
a) $t=1.0\text{ns}$; 22083969 electrons



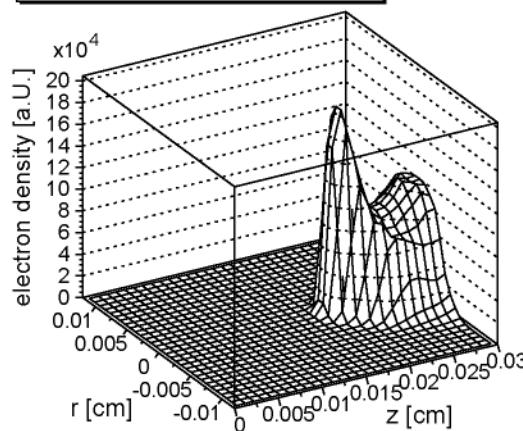
b) $t=1.05\text{ns}$; 38260973 electrons



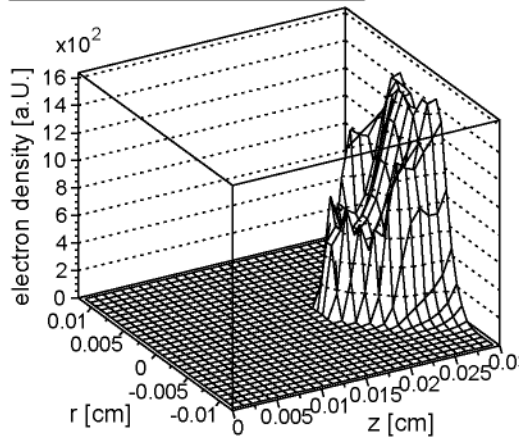
c) $t=1.19\text{ns}$; 32774968 electrons



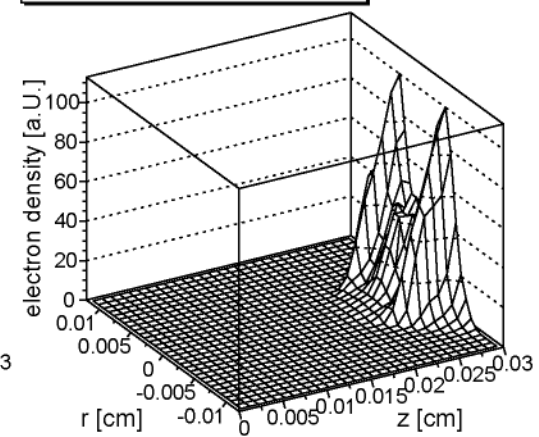
d) $t=1.29\text{ns}$; 8736025 electrons



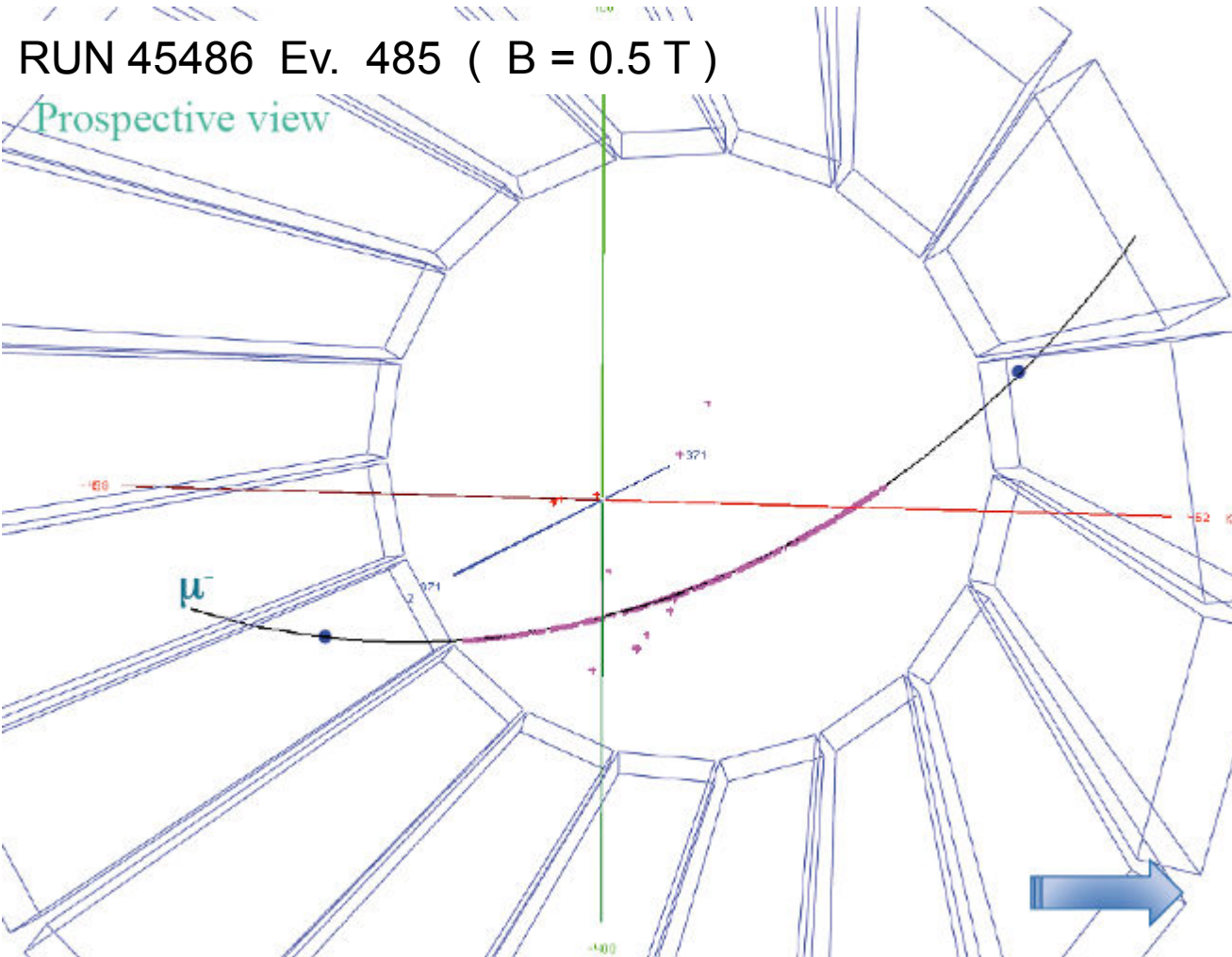
e) $t=1.38\text{ns}$; 1134153 electrons



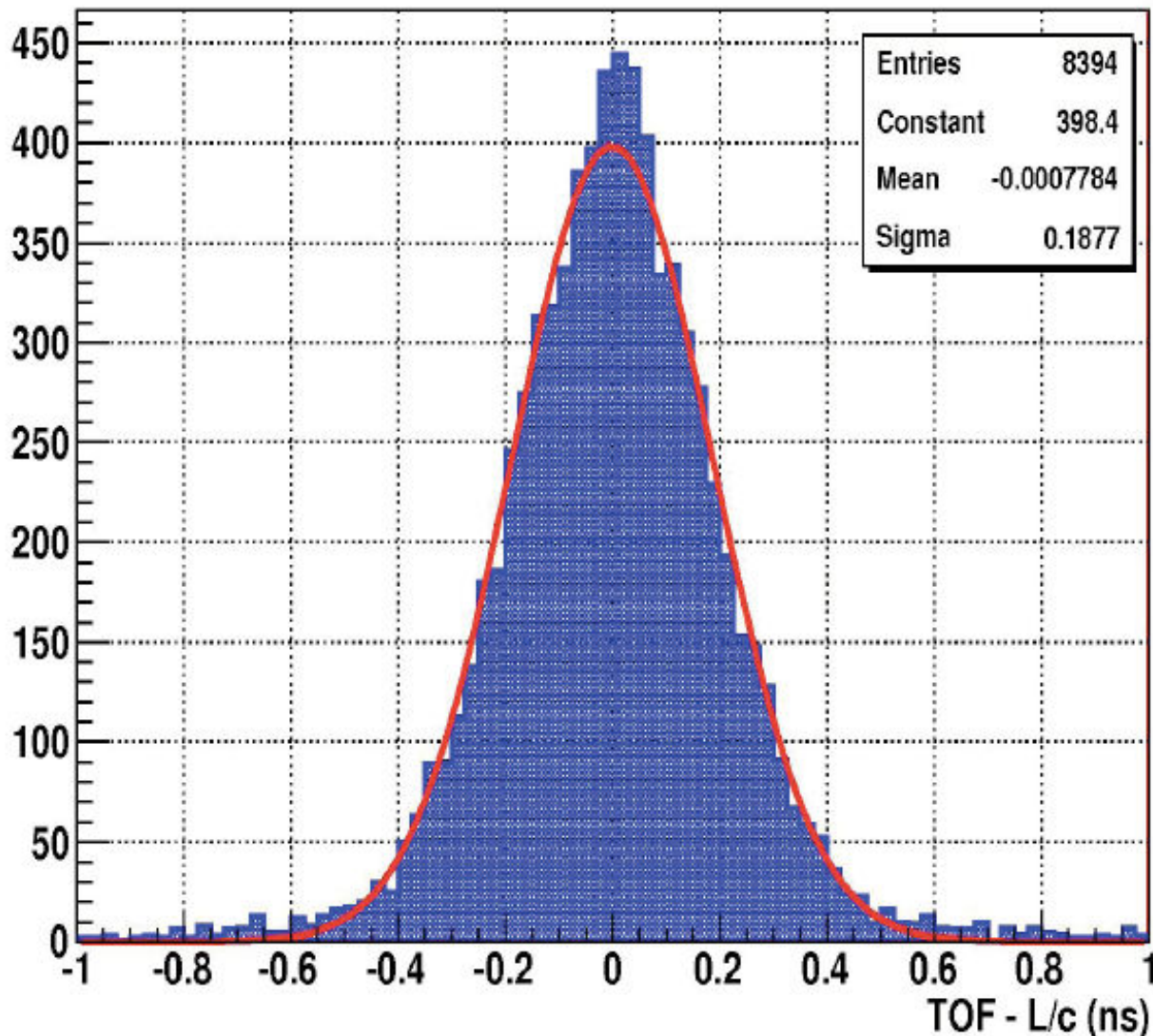
f) $t=1.52\text{ns}$; 50399 electrons



Im Endstadium der Lawine gibt es extrem starke Elektronenanlagerung.



- Gemessenes Muon, Sommer 2008



TOF resolution:

$$\sigma_{\text{TOF}} \sim 190 \text{ ps}$$

including all contributions
poor time-slewing correction
not aligned geometry

$$\sigma_{\text{TOF}} = \sqrt{2} \sigma_t$$

single-hit resolution:

$$\sigma_t \sim 130 \text{ ps}$$

ALICE im Sommer 2008





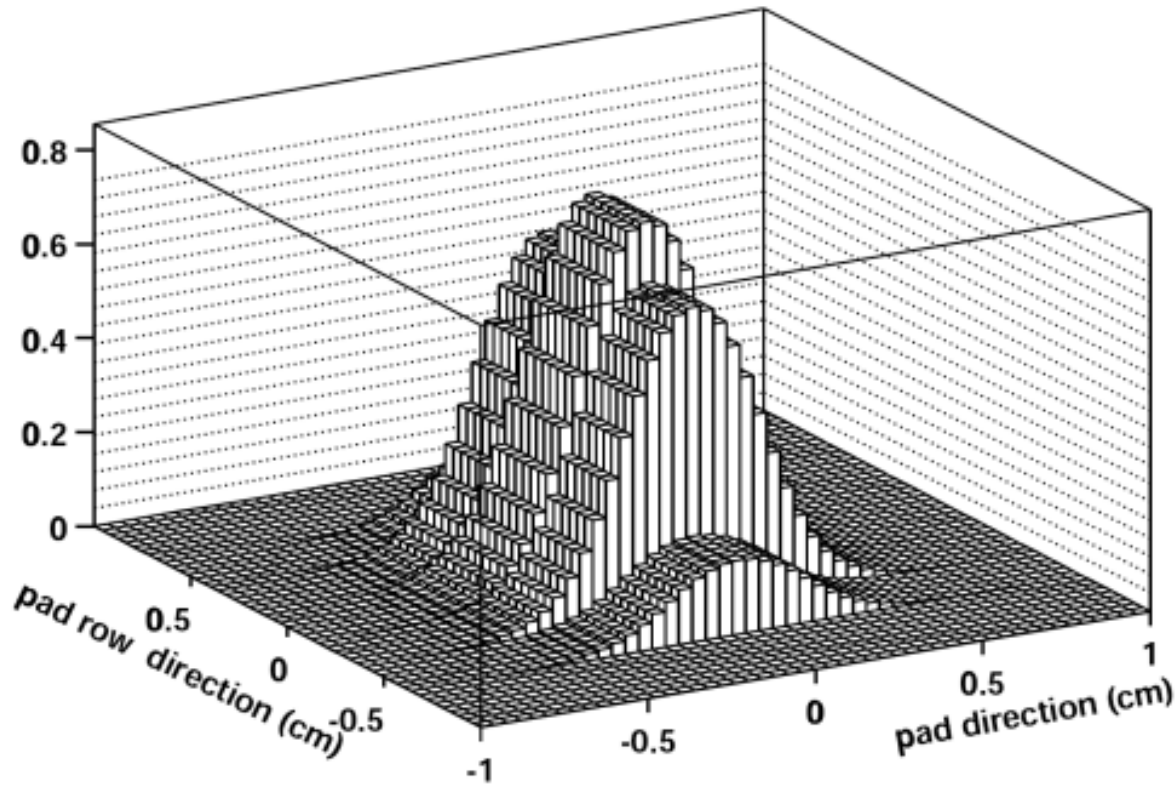
Zusammenfassung



- In Schwerionenexperimenten (z.B. ALICE) wird eine viel höhere Teilchendichte gemessen als in Hochenergiephysikexperimenten (z.B. ATLAS, CMS)
- Hauptaufgabe des Detektors ist die Identifizierung von Teilchen
- In ALICE werden alle bekannten Teilchenidentifizierungsmethoden verwendet
- Drei Subdetektoren wurden vorgestellt:
 - Die **TPC** misst die Spuren der geladenen Teilchen und identifiziert sie über den charakteristischen Energieverlust
 - Der **TRD** misst ebenfalls Teilchenspuren und identifiziert Elektronen über die charakteristische Übergangsstrahlung
 - Der **TOF** identifiziert Teilchen über ihre exakt gemessene Flugzeit



Backup slides



- Pad Response Function for the ALICE TPC (rectangular $4 \times 7.5 \text{ mm}^2$ pads).



Limitations for Coordinate Measurement



- 1) **Diffusion** displaces the charge clusters during the long drift.
- 2) **Attachment** of drifting electrons leads to loss of signal amplitude.
- 3) **$E \times B$ effects**: Small misalignment (E and B not perfectly parallel) displaces the charge clusters during the long drift.
- 4) **Field distortions** due to *space charge* in the drift volume.

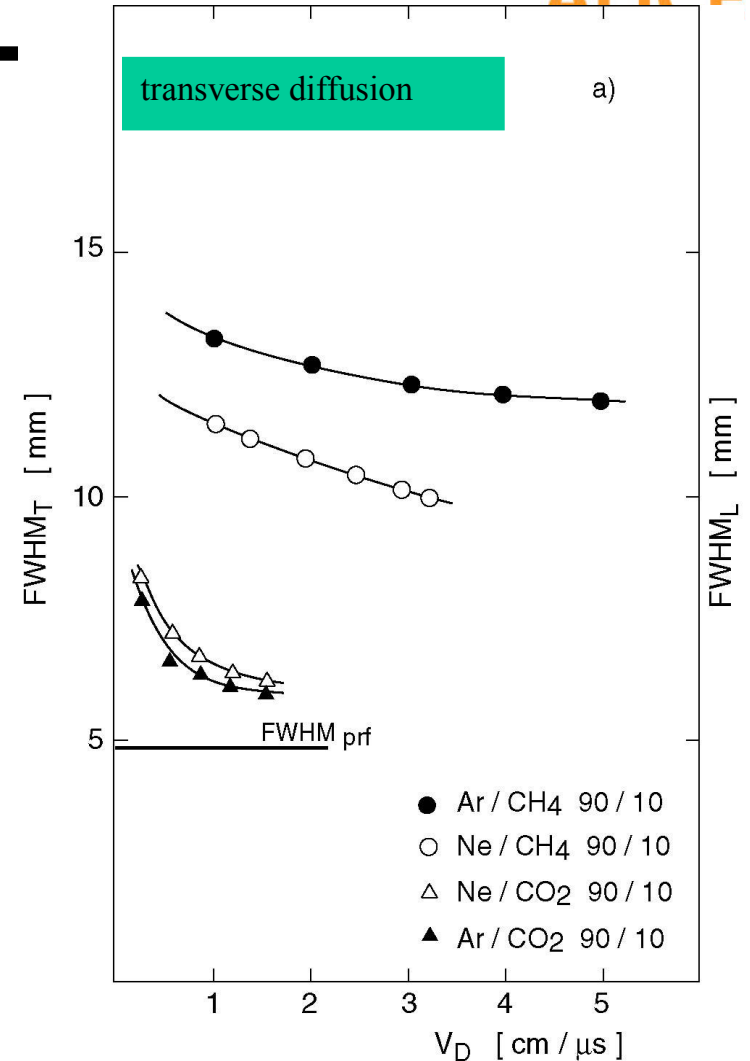


Limitation 1: Diffusion (1)



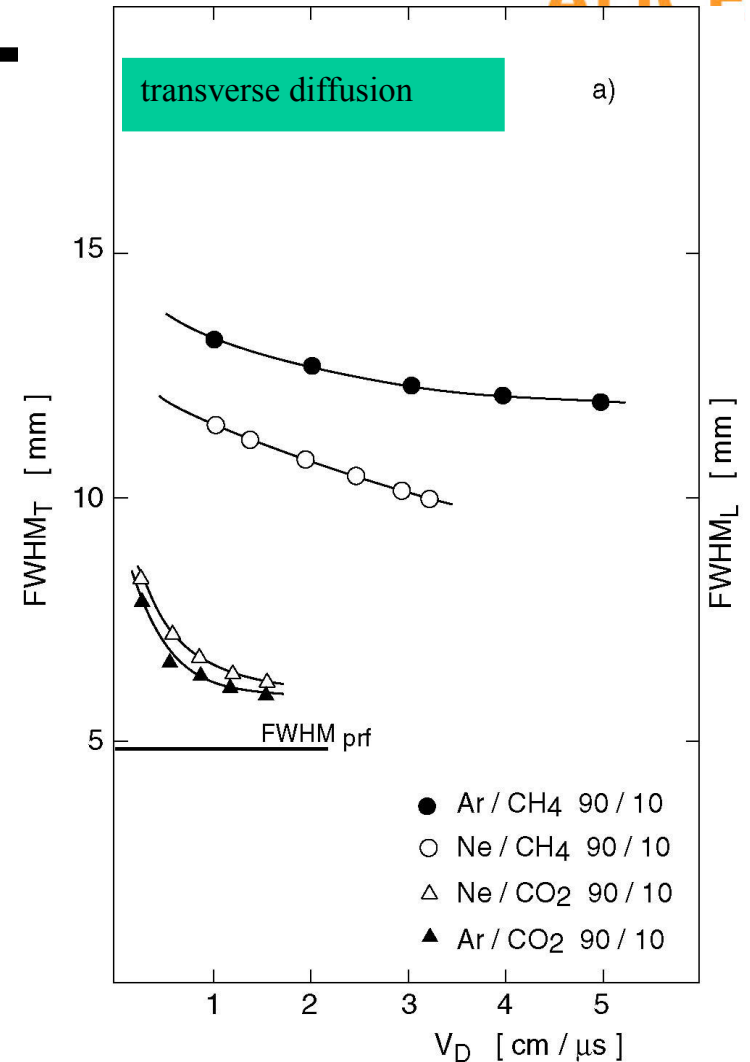
- Electrons are drifting along z and scatter on gas molecules.
- As a consequence, their drift velocity deviates from the average due to the random nature of the collisions.
- The diffusion is Gaussian with $\sigma(z) = D\sqrt{z}$, where
 - z = drift length and
 - D = diffusion coefficient [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$].
- Longitudinal (in drift direction) and transverse diffusion can differ.

- How to reduce diffusion?
 - 1) Certain additions to the gas mixture (like e.g. CO₂) help reduce the diffusion.



- How to reduce diffusion?
 - 1) Certain additions to the gas mixture (like e.g. CO₂) help reduce the diffusion.
 - 2) Assume $E \parallel B$ and $\omega\tau \gg 1$: Transverse Diffusion is suppressed by a large factor:

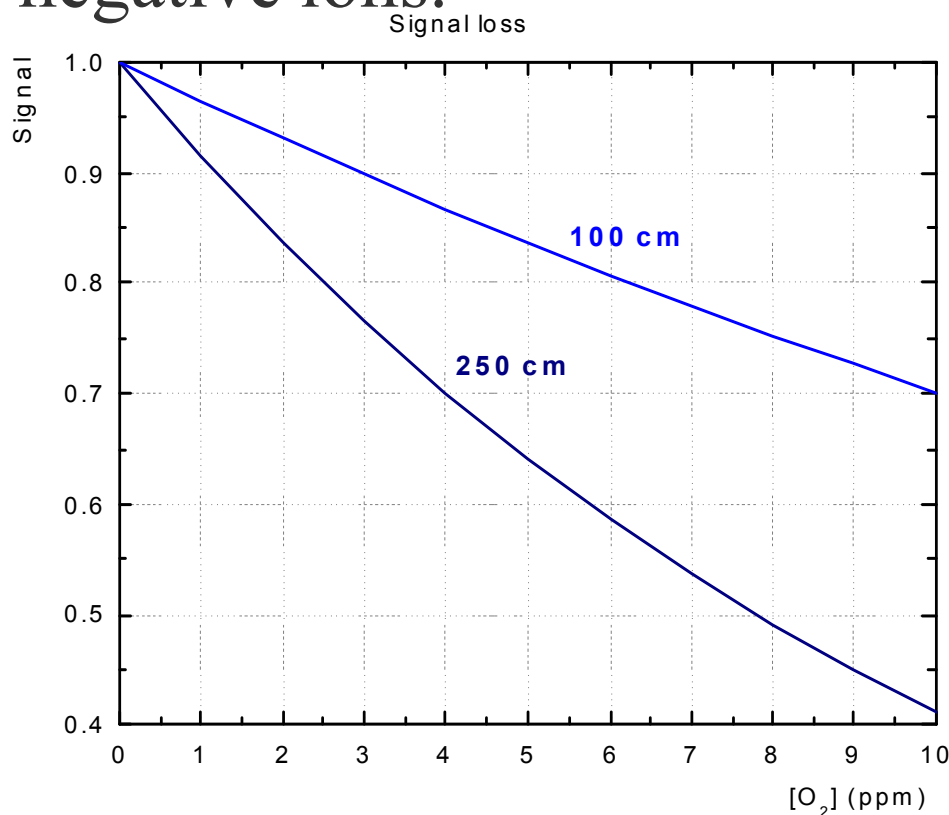
$$D(B)/D(0) = \frac{1}{1 + \omega^2\tau^2}$$



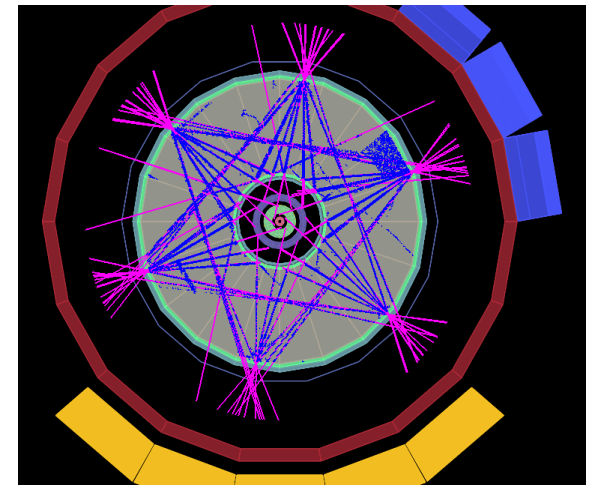
- The drifting electrons can be absorbed in the gas by the formation of negative ions.

- Need to keep O_2 content low!

- <1 ppm of O_2 keeps signal loss below 10% for 250cm drift.



- ExB distortions arise from **nonparallel E and B fields**.
- It is difficult to build a very big detector ($\sim 5\text{m}$) such that E and B fields are always perfectly parallel.
- Remaining effects must be corrected for in data.
- In ALICE we use a Laser system to calibrate ExB distortions.





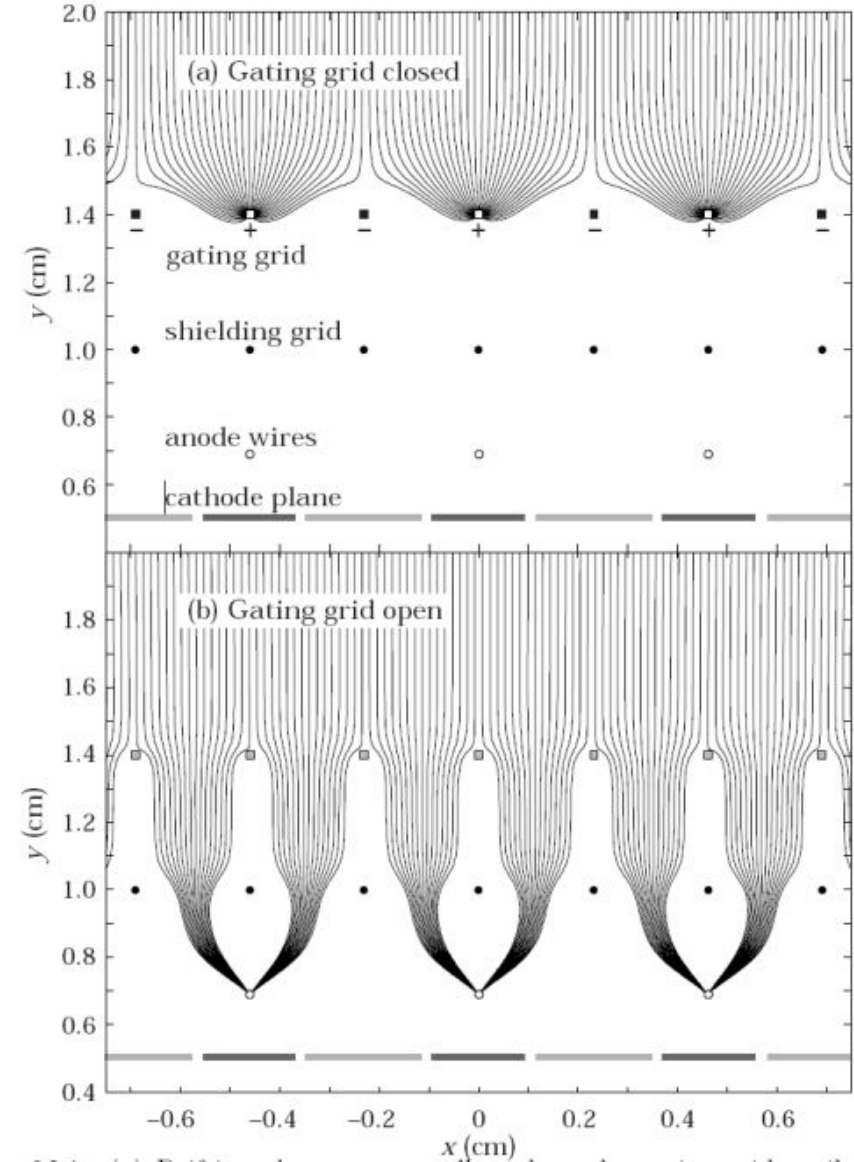
Limitation 4: Space Charge



- In high-rate environments charges distort the electric field.



- In high-rate environments charges distort the electric drift field.
- The **gating grid**
 - allows electrons to enter anode region only for interesting events
 - and keeps ions produced in avalanches out of the drift region.





The gas mixture for the ALICE TPC



ALICE TPC - Choosing a Gas



- Basic components could be Ar, Ne, CO₂, CH₄, N₂.
- Different (competing) requirements:
 - Low **multiple scattering** (\Rightarrow low Z),
 - Low **gas gain** (\Rightarrow high primary ionisation \Rightarrow high Z),
 - Low space charge distortions (\Rightarrow low **primary ionisation** \Rightarrow low Z),
 - Low event overlap (\Rightarrow high **drift velocity**),
 - Low **sensitivity to variations** in gas composition or ambient conditions.



ALICE TPC Gas: Ne-CO₂-N₂



- ALICE TPC uses **Ne-CO₂-N₂** [90%-10%-5%].
- **Advantage:** Low diffusion, fast drift, low space charge by primary ionisation.
- **Drawback:** High gain needed, sensitive to variations of pressure, temperature and to exact composition;
- But: Addition of N₂ reduces this sensitivity.