

Untersuchung der kleinsten Teilchen mit den größten Maschinen

- Struktur der Materie
- Elementare Teilchen; fundamentale Wechselwirkungen
- Der Large Hadron Collider, LHC (CERN, Genf)
- Das Quark-Gluon Plasma im ALICE Experiment

Hochschultag, 10.11.2022

Kern- und Teilchenphysik, Hochschultag 8.11.2018

A. Andronic

2



Was ist Kern- und Teilchenphysik?

A. Andronic

3

- Physik der Atomkerne und der Bausteine der Materie (Elementarteilchen)
Leptonen und Quarks (Fermionen, Spin $1/2$)
- Physik der Starken und Schwachen Wechselwirkungen (Kräfte)
(Kräfte die mit der Entwicklung der Kernphysik kamen)
durch den Austausch von Vektorbosonen (Teilchen mit Spin 1)

Es gibt wichtige Anwendungen der Kern- und Teilchenphysik

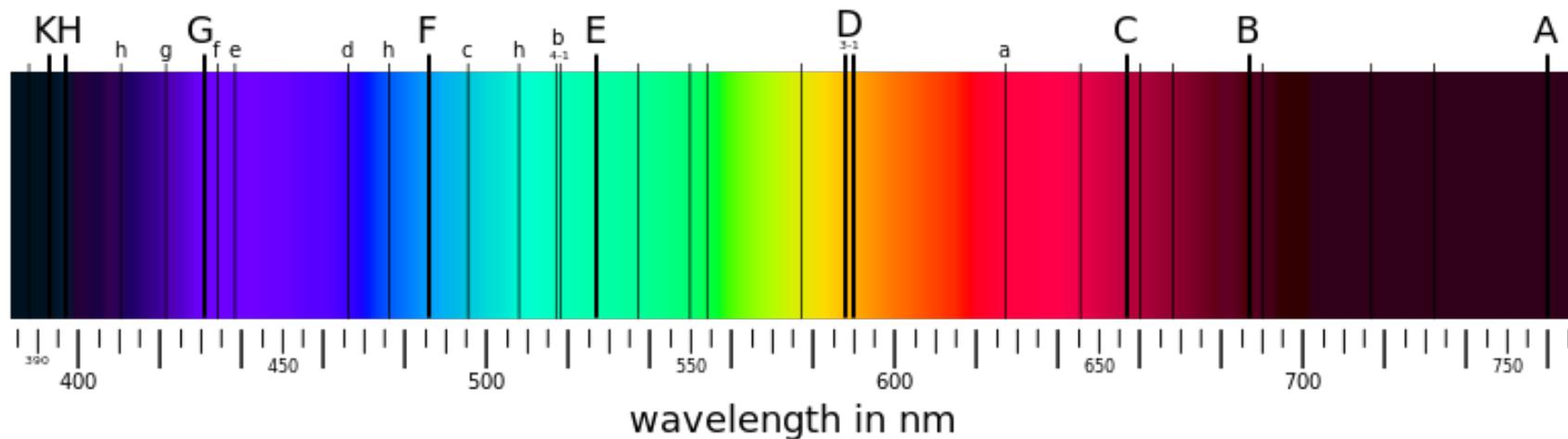
Licht und Materie

A. Andronic

4

...ist was wir sehen und spüren (messen)

- Licht: Welle und Teilchen (Photoelektrischer Effekt; Einstein, Nobelpreis, 1921)



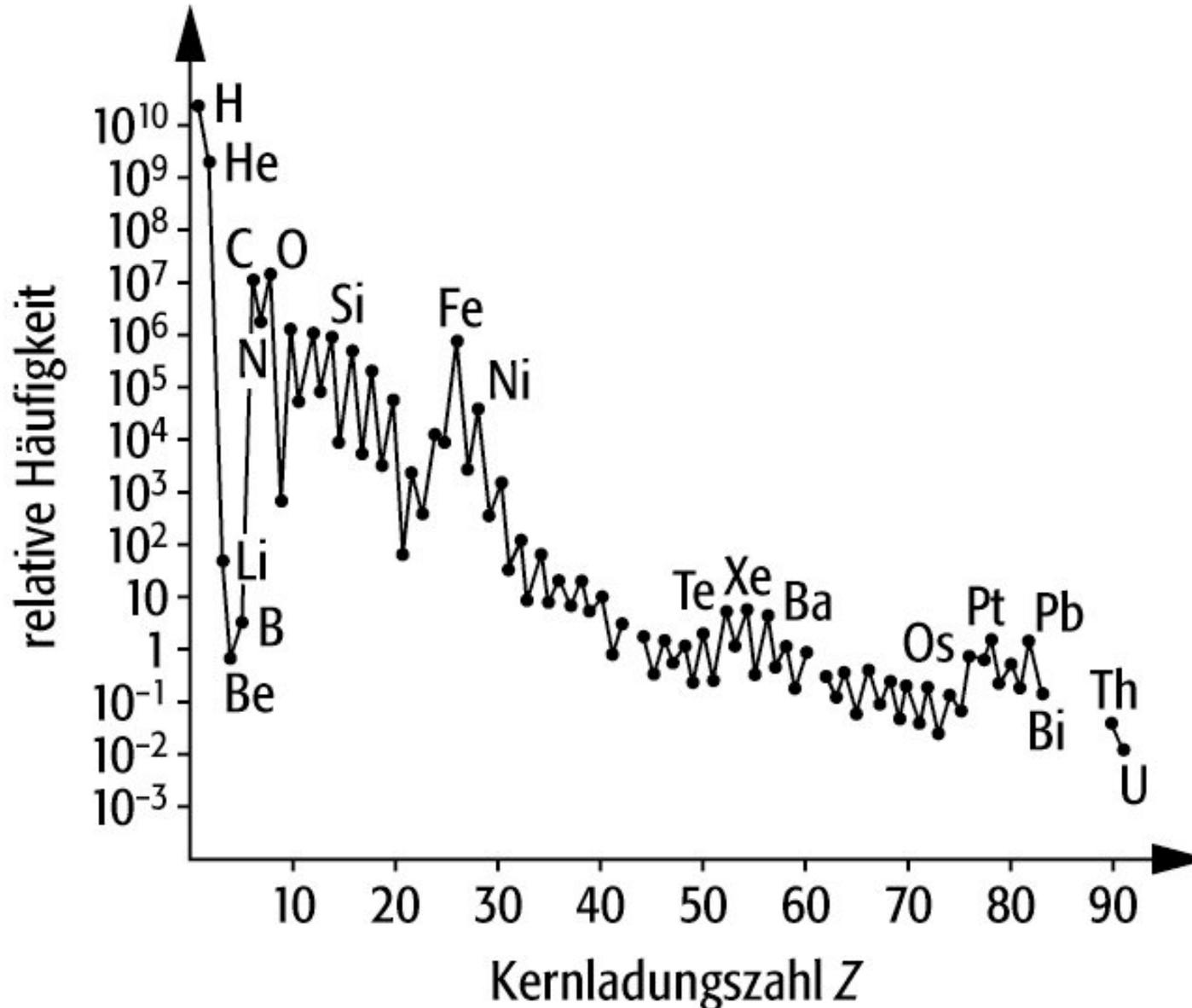
- Materie: Moleküle, Elementen (Anordnung, Periodensystem: Mendeleev, 1869)
...in verschiedene Aggregatzustände: Fest, Flüssig, Gasförmig

Atome: 10^{-10} m = 0,1 nm Energieskala: eV $\simeq 10^{-19}$ J

Häufigkeit der Elemente

A. Andronic

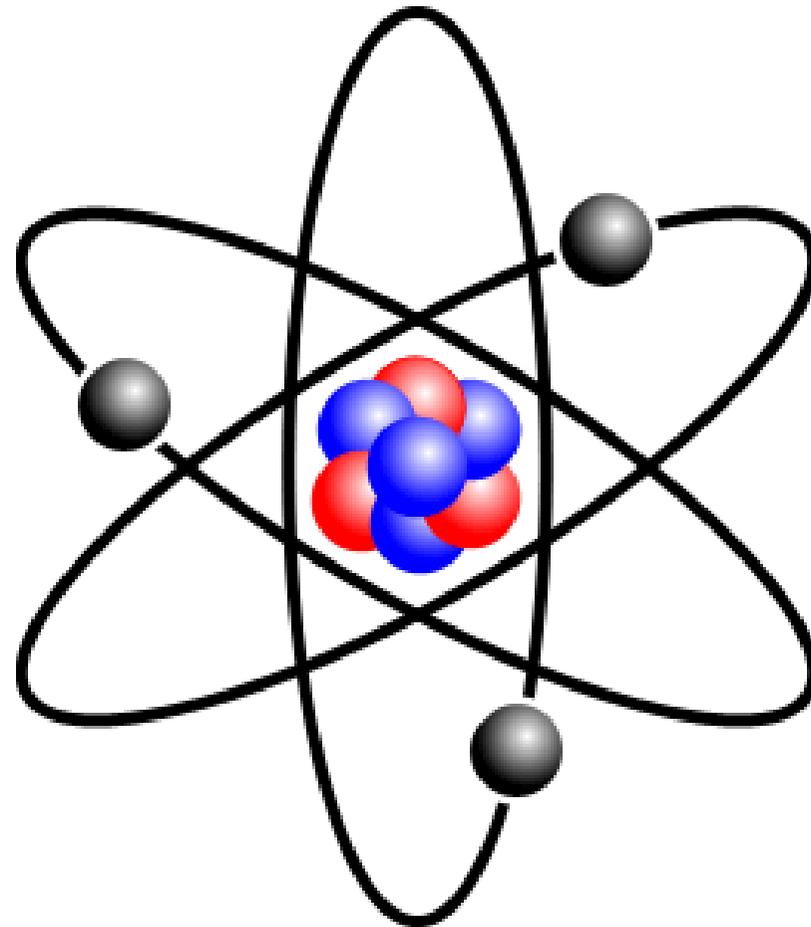
Häufigkeit der Elemente im Sonnensystem, normiert auf 10^6 bei Si



Das Atom

A. Andronic

7



Wikipedia (Stylised_atom_with_three_Bohr_model_orbits_and_stylised_nucleus.png)

Der Atomkern (entdeckt 1912, Rutherford) trägt beinahe die gesamte Masse

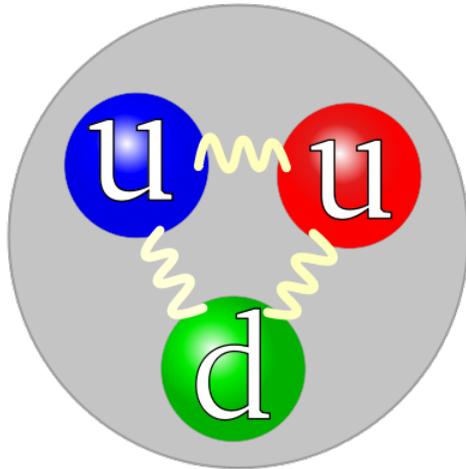
Ein schönes Bild, aber falsch in verschiedenen Aspekten

Tief in den Nukleonen

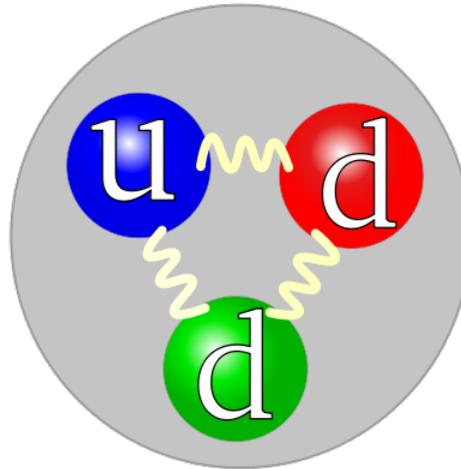
A. Andronic

8

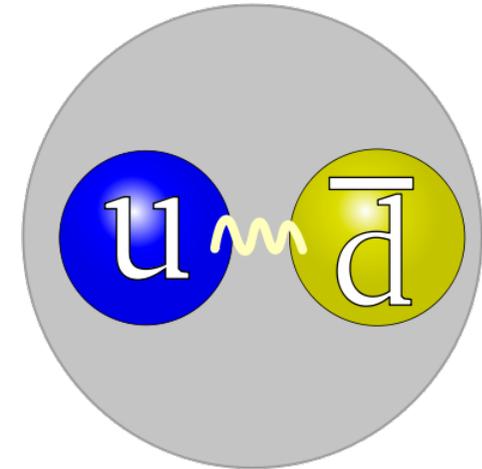
Proton



Neutron



Pion ($mc^2=139.6$ MeV)



Baryonen: p, n, etc.; Mesonen: π , K , etc. (alle: Hadronen)

Quarks sind nie frei beobachtet ... Confinement-Prinzip; Rätsel der Natur

Quarkmasse-Beitrag zur Gesamtmasse ist ein kleiner Bruchteil ($\sim 1\%$)

10^{-15} m = 1 fm; 10^8 eV = 0,1 GeV

Die Kernkraft

A. Andronic

9

...eine sehr starke, anziehende Kraft ("farb-Kraft")

bindet sowohl (farbige) Quarks in Protonen, Neutronen
als auch Protonen, Neutronen in Atomkern

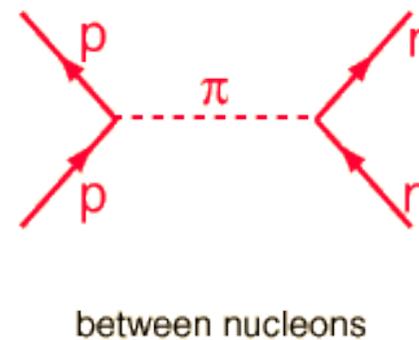
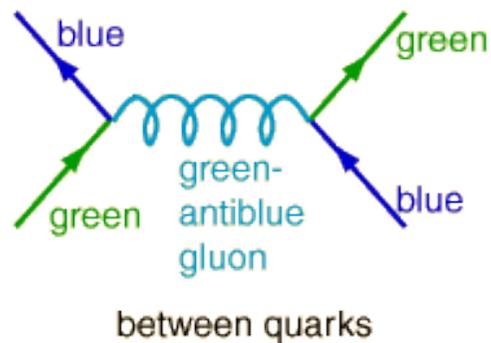
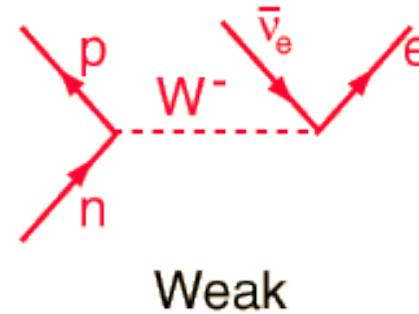
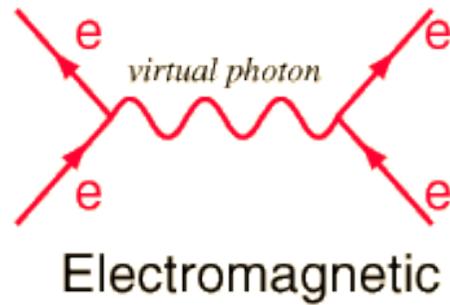
...darf nur über einen kurzen Abstand wirken (ist kurzreichweitig)

ist eine "Restwechselwirkung" zwischen Nukleonen (farbneutrale Teilchen)
(änlich wie Van-der-Waals Kräfte)

Fundamentale Wechselwirkungen - Feynman-Diagramme

A. Andronic

10



Strong Interaction

Hyperphysics

+ Gravitation ... $\alpha_s : \alpha_{em} : \alpha_{schwach} : \alpha_{grav} \simeq 1 : 10^{-2} : 10^{-6} : 10^{-38}$

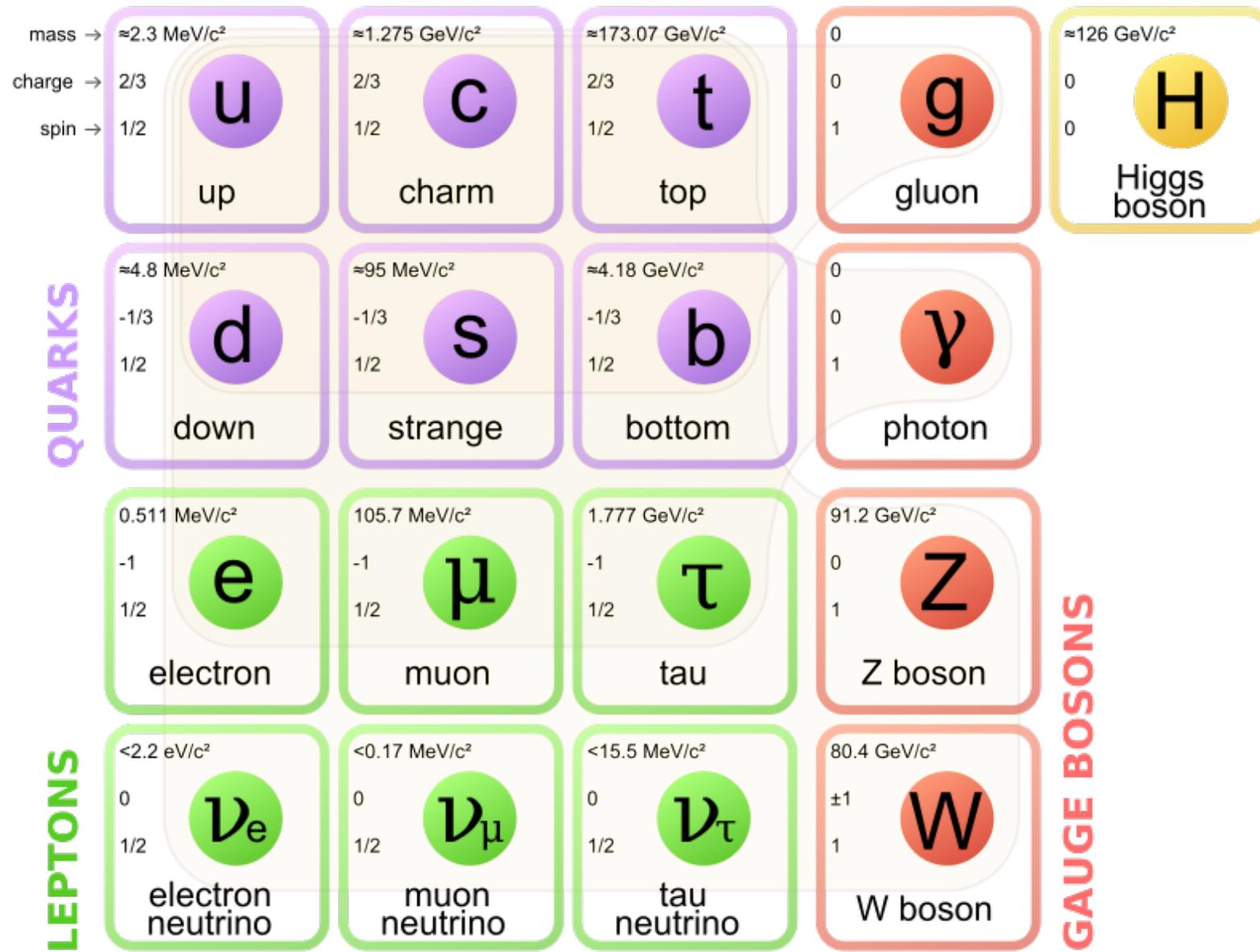
Raum-Zeit (x-y) Diagramme (Übertragung von Energie und Impuls)

Farbladung (nur Quarks u. Gluonen); Schwache Ladung (Quarks und Leptonen)

Die Bausteine der Materie u. Austauschbosonen

A. Andronic

11



Wikipedia

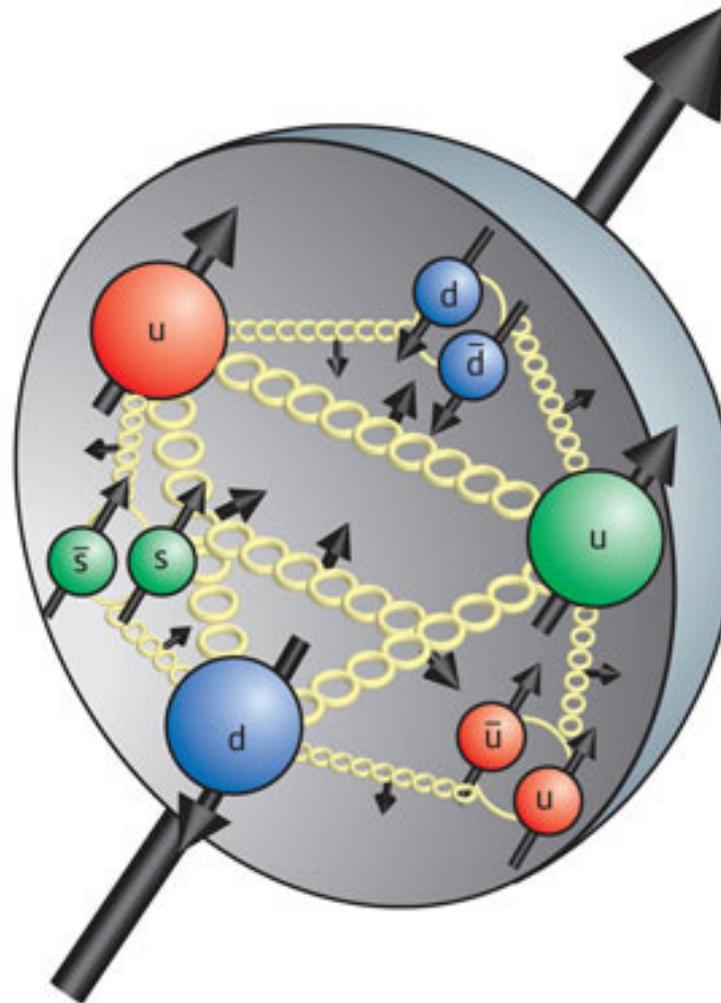
Jedes Quark/Lepton hat Antiteilchen (gleiche Masse, entgegengesetzte Ladung)

Das Proton mit höherer Auflösung

A. Andronic

12

“Quantum-Snapshot”



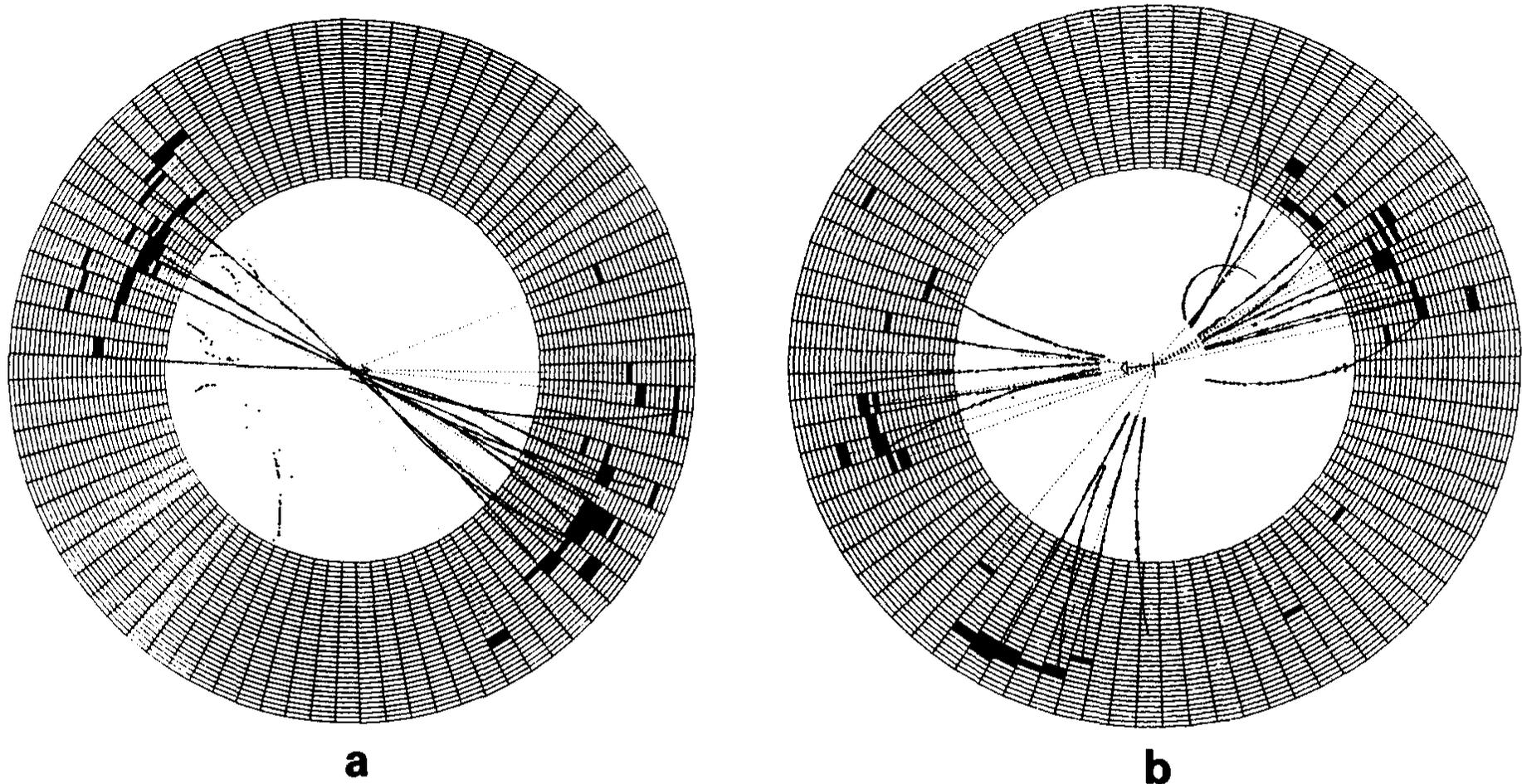
“Röntgen-Bild” ... “Mikroskop”: Elektron-Beschleuniger

Je höher die Energie, desto besser die Auflösung ... $\simeq 10^{-19}$ m

Quarks und Gluonen beobachten

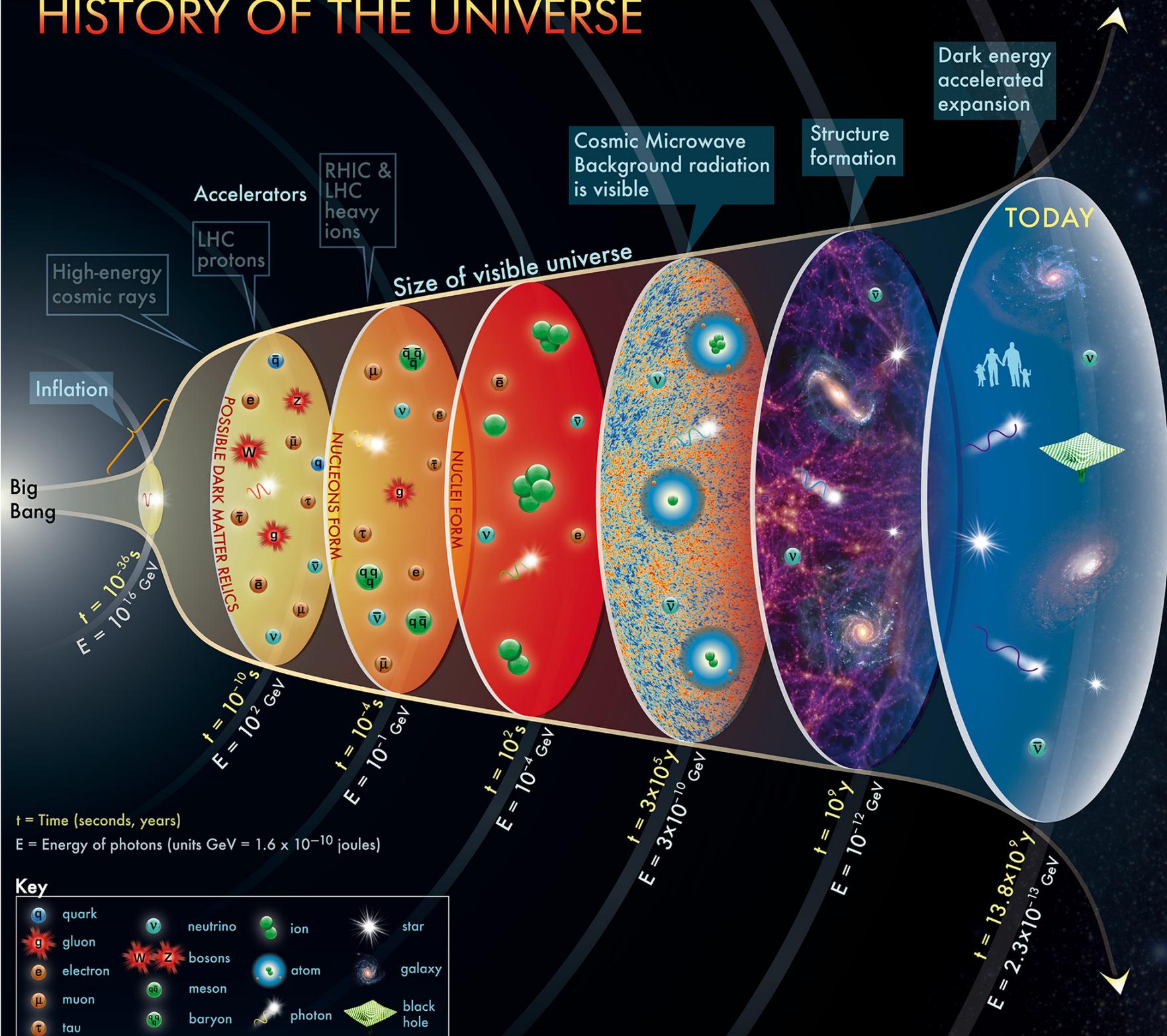
A. Andronic

13



Quark-Antiquark Paar, **a**, (+Gluon, **b**) werden zu “Jets” aus Hadronen
JADE Experiment, e^+e^- Kollisionen, PETRA (DESY Hamburg), 1977-79

HISTORY OF THE UNIVERSE



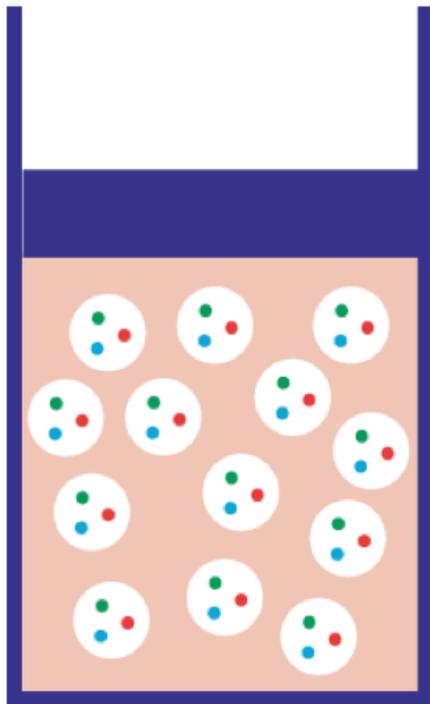
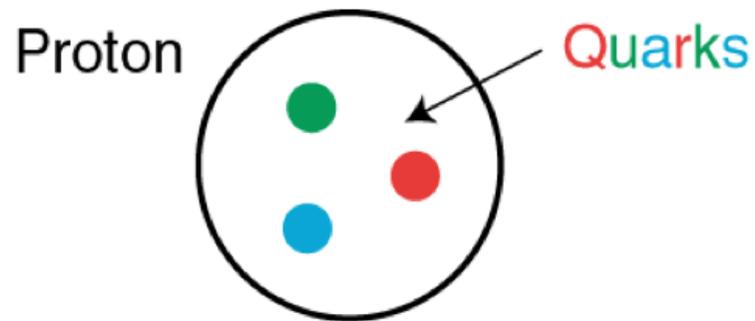
Key

	quark		neutrino		ion		star
	gluon		bosons		atom		galaxy
	electron		meson		photon		black hole
	muon		baryon				
	tau						

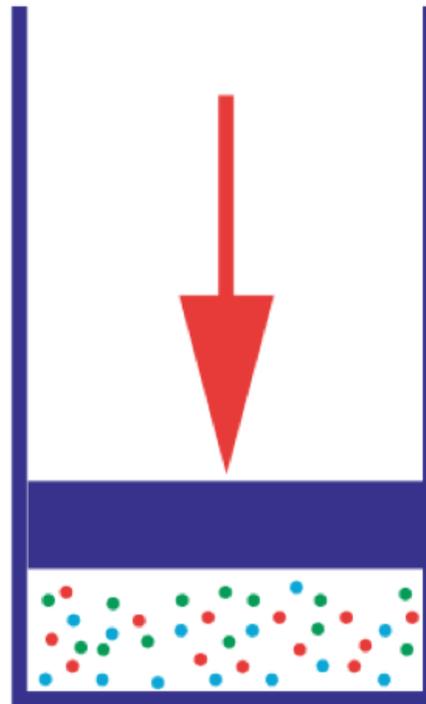
Quark-Gluon Plasma im Labor

A. Andronic

15



Kernmaterie



Quark-Gluon-Plasma

Die Idee:
Kompression und Erhitzung
von Kernmaterie
(schwere Atomkerne)

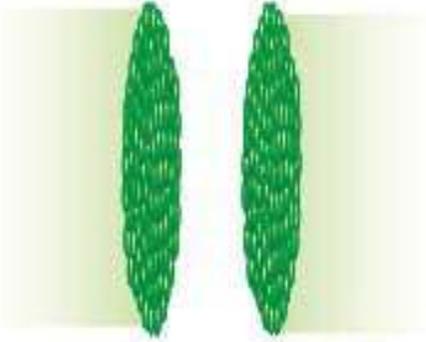
Wie simulieren wir das Universum im Labor?

A. Andronic

16

...durch hochenergetische Blein-Blei-Kerne Kollisionen

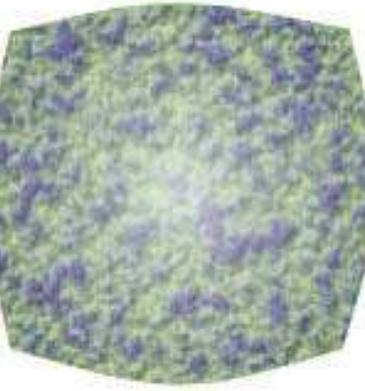
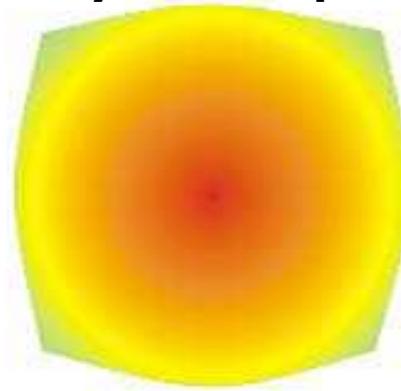
initial state



pre-equilibrium

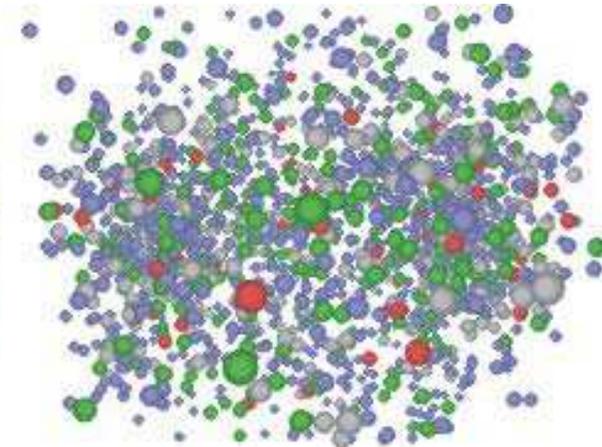


QGP and
hydrodynamic expansion



hadronization

hadronic phase
and freeze-out



$$\underline{t \simeq 10^{-23} \text{ s}, V \simeq 10^{-40} \text{ m}^3}$$

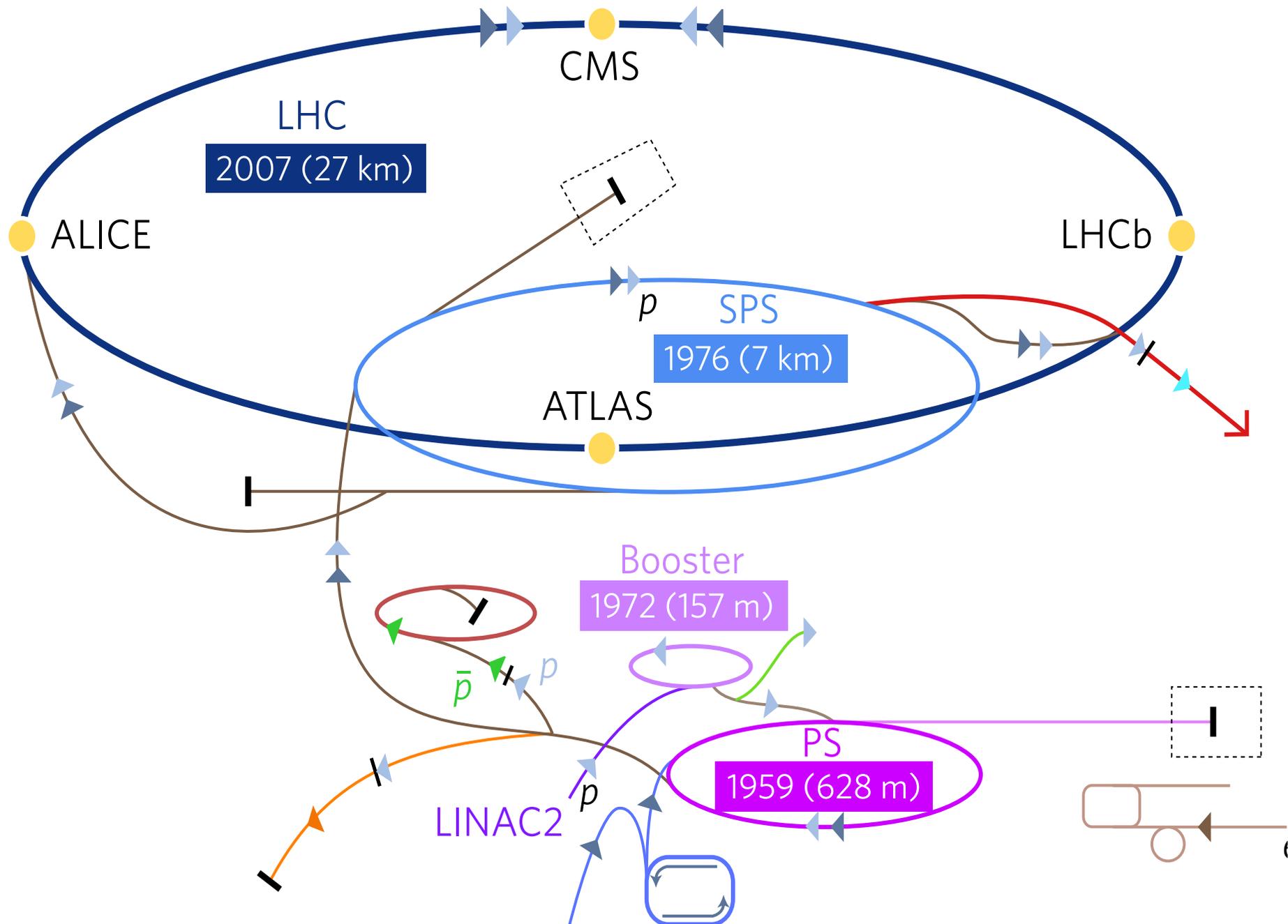
Sehr kurzlebig und sehr winziges Quark-Gluon Plasma "Objekt"

Direkt zu messen, ist nicht möglich

Die Beschleuniger am CERN

A. Andronic

17



Die Beschleuniger am CERN

A. Andronic

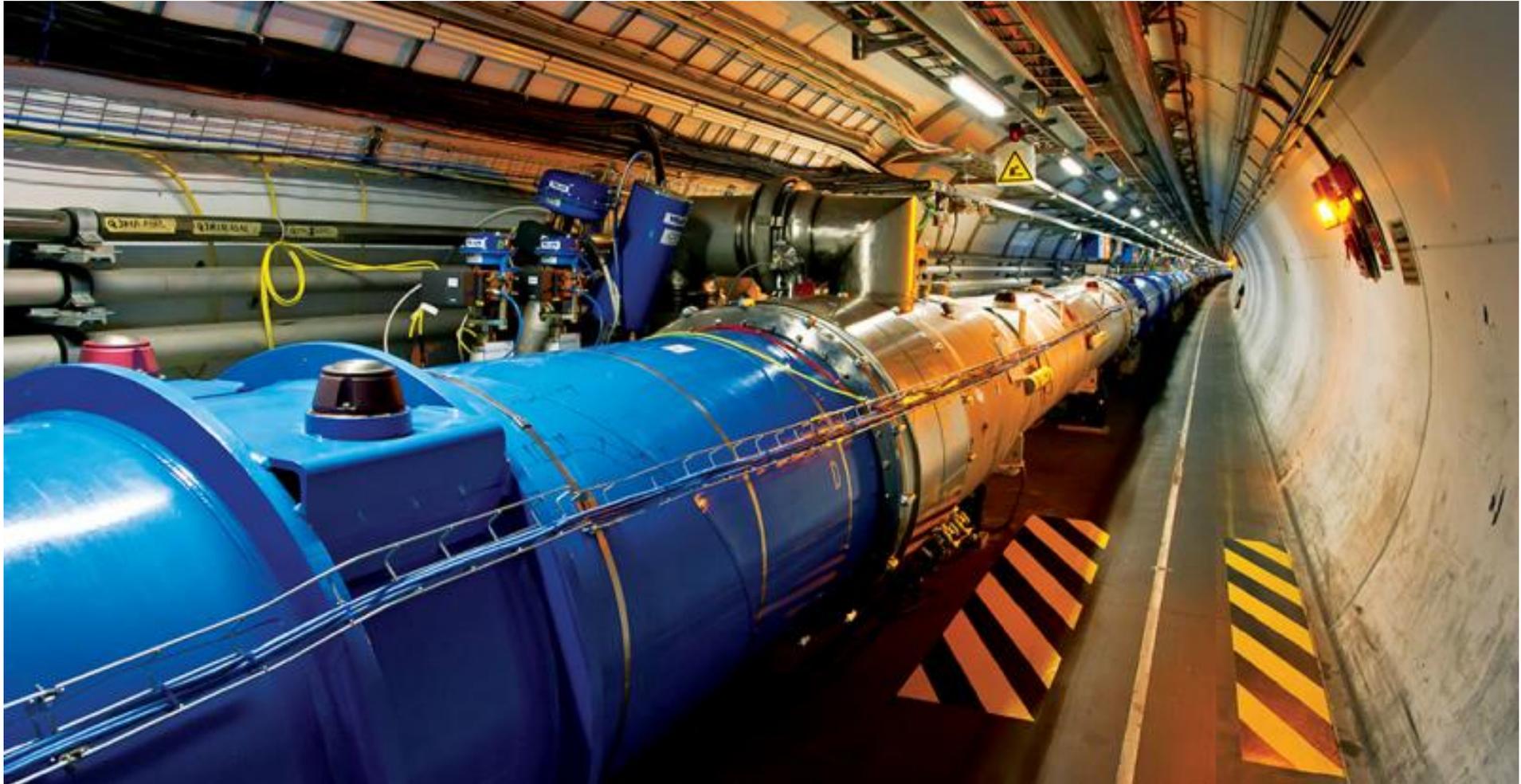
18



Der Large Hadron Collider am CERN

A. Andronic

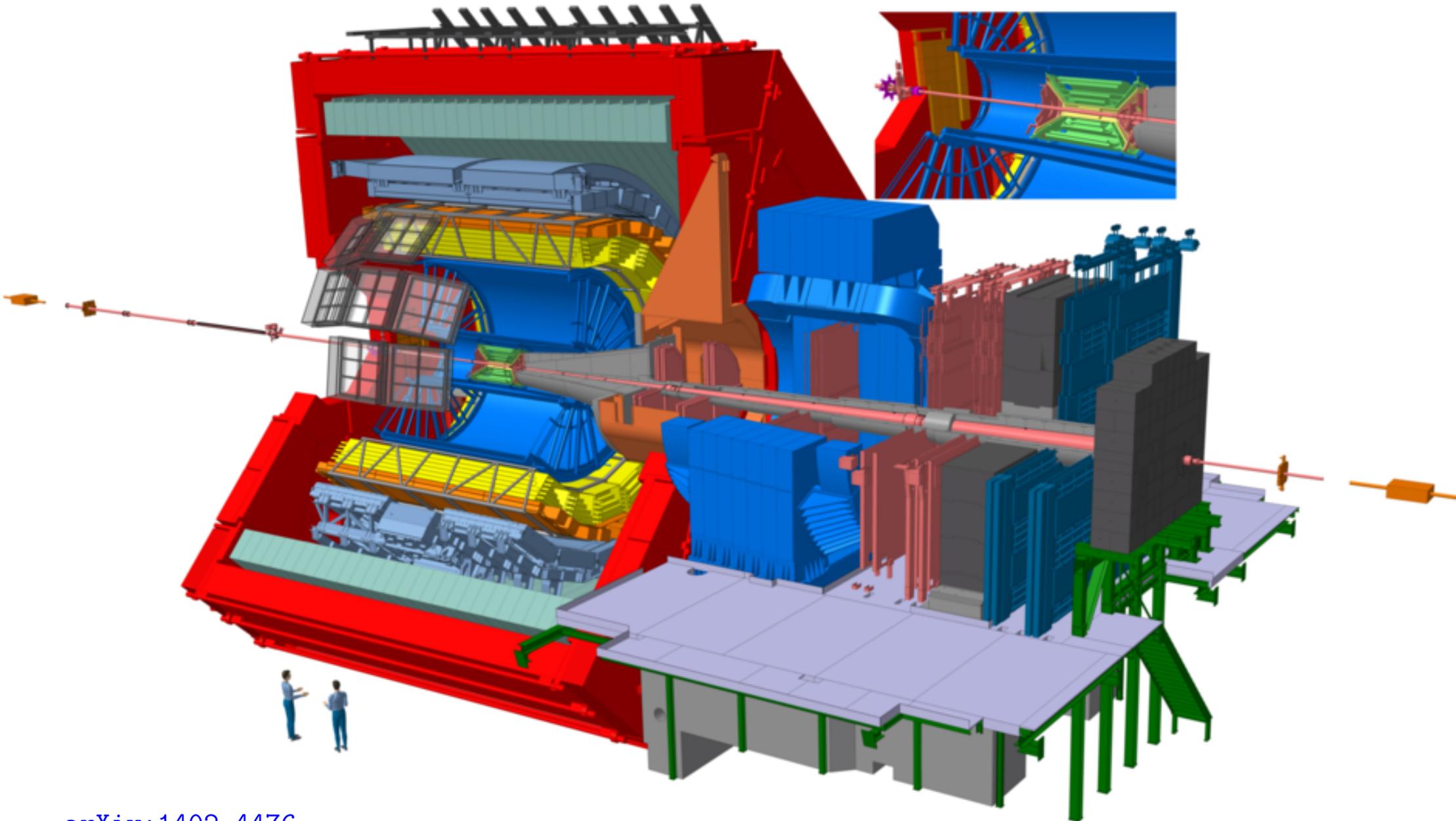
19



Das Proton kreist in dem 27 km Ring ca. 11000 mal pro sekunde umgeleitet durch supraleitende Magneten (Blau) bei $T=1.9$ K (s-l. He) hat das Higgs-teilchen erzeugt ...entdeckt durch die ATLAS, CMS-Kollab., 2012
Nobelpreis Higgs, Englert, 2013

[LHC Page 1](#) [Movie](#)

Ein Detektor am LHC - ALICE



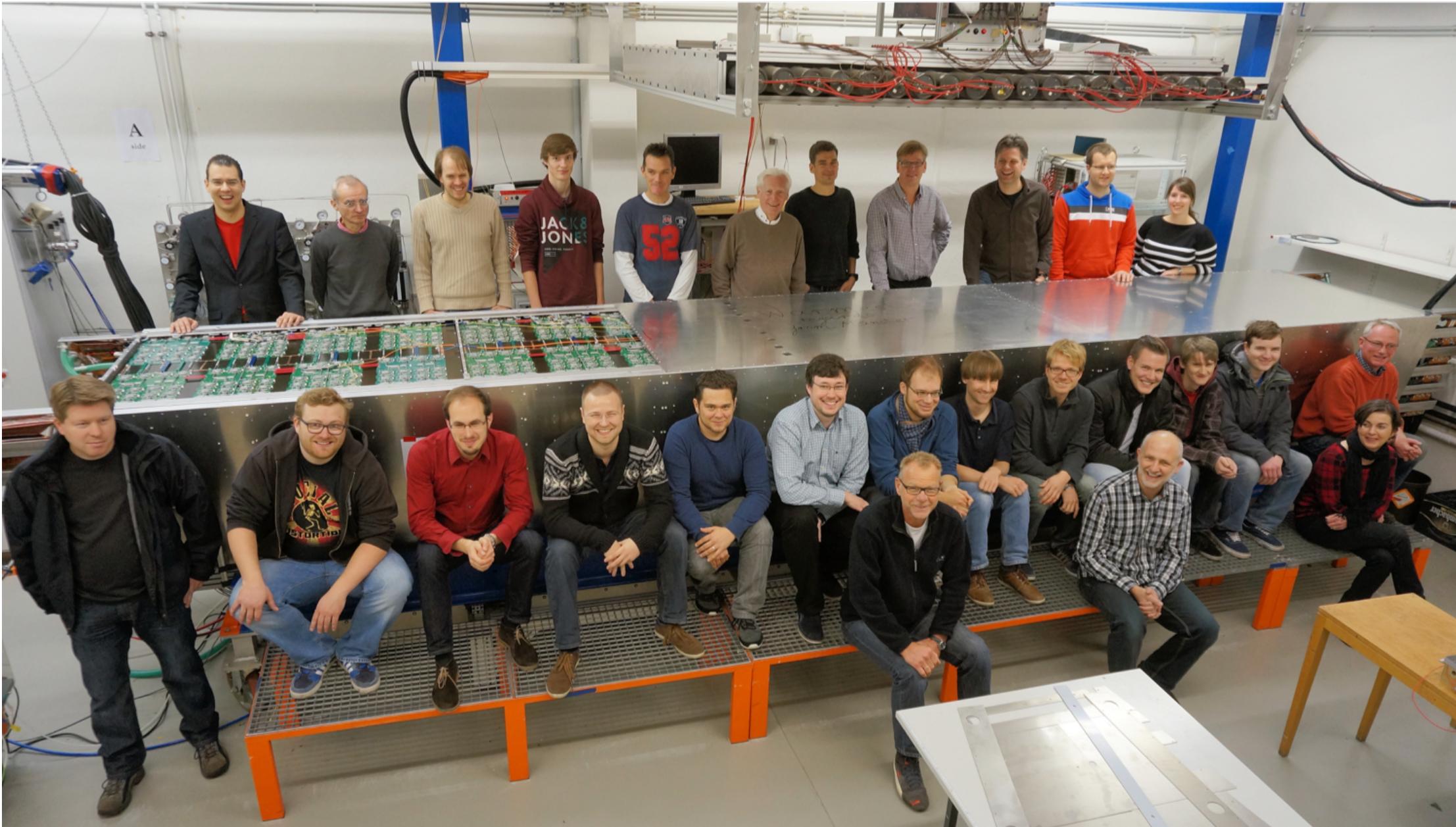
[arXiv:1402.4476](https://arxiv.org/abs/1402.4476)

ALICE Collaboration: 40 countries, 174 institutions, 2001 members

Ein Teil (nicht so klein:) wurde in Münster gebaut

A. Andronic

21



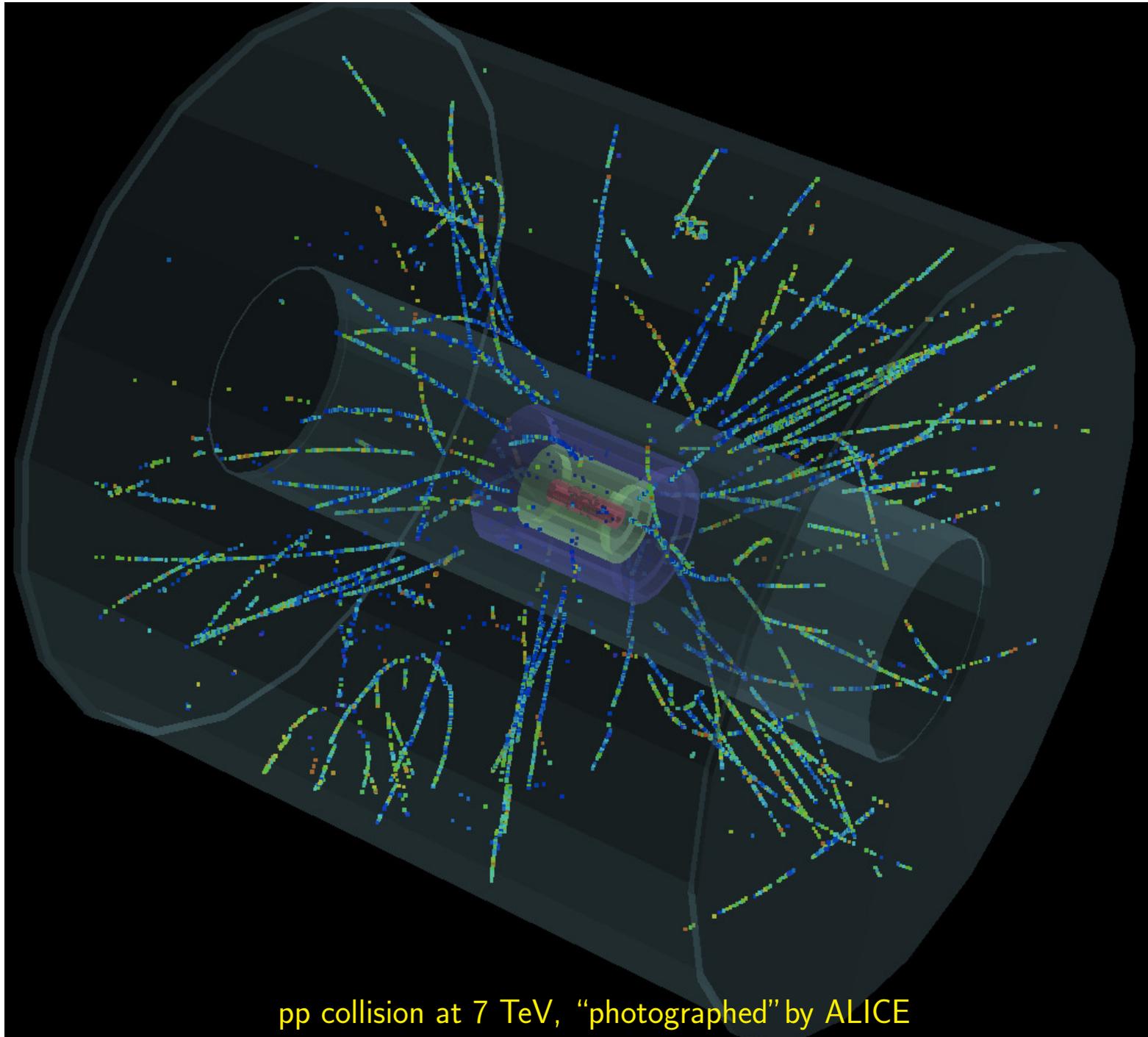
...das Letzte von 18 Modulen (2014)

(ich selbst bin seit 25 Jahre in ALICE beteiligt)

Proton-Proton Kollisionen am LHC

A. Andronic

22

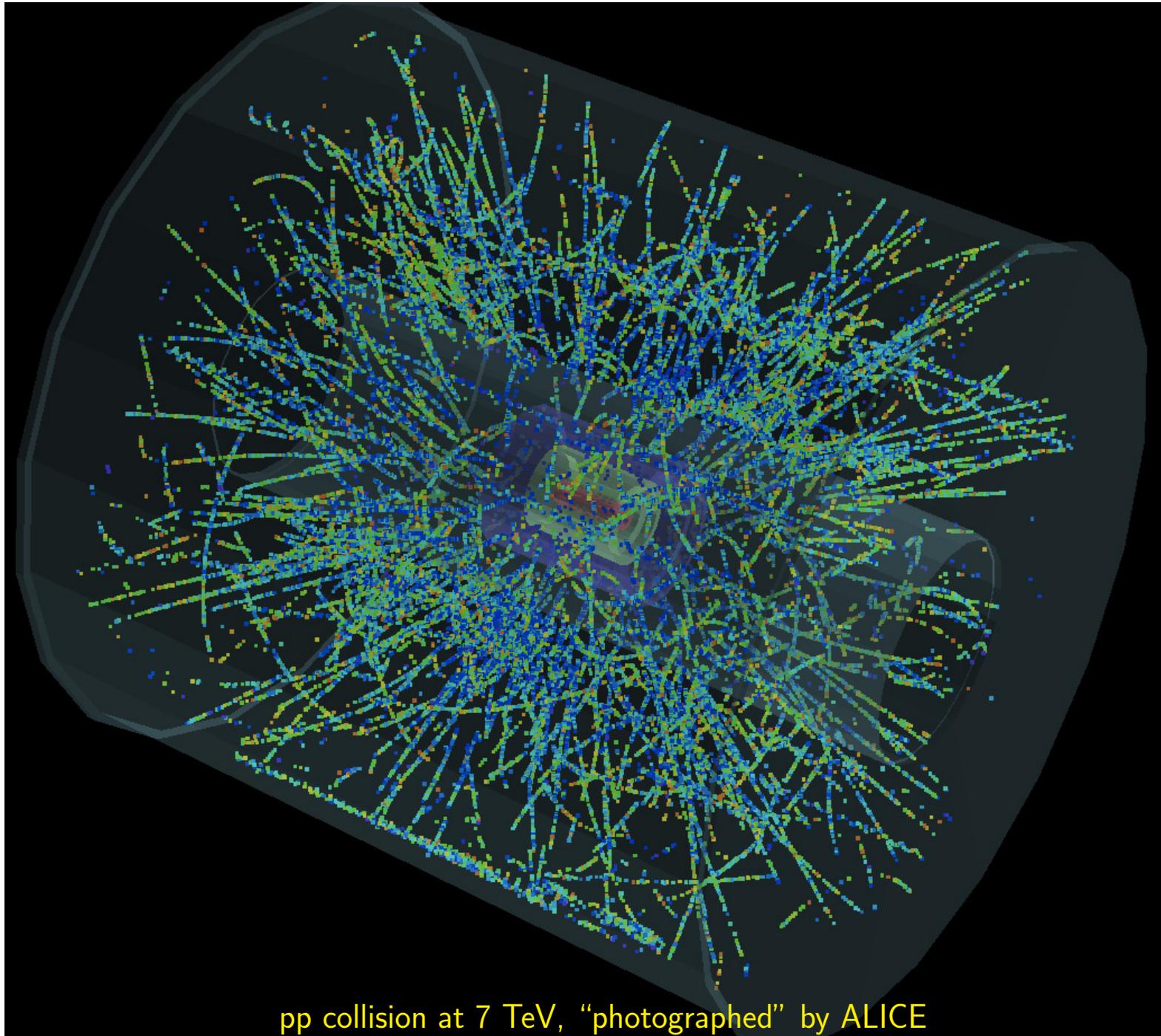


pp collision at 7 TeV, "photographed" by ALICE

Proton-Proton Kollisionen am LHC

A. Andronic

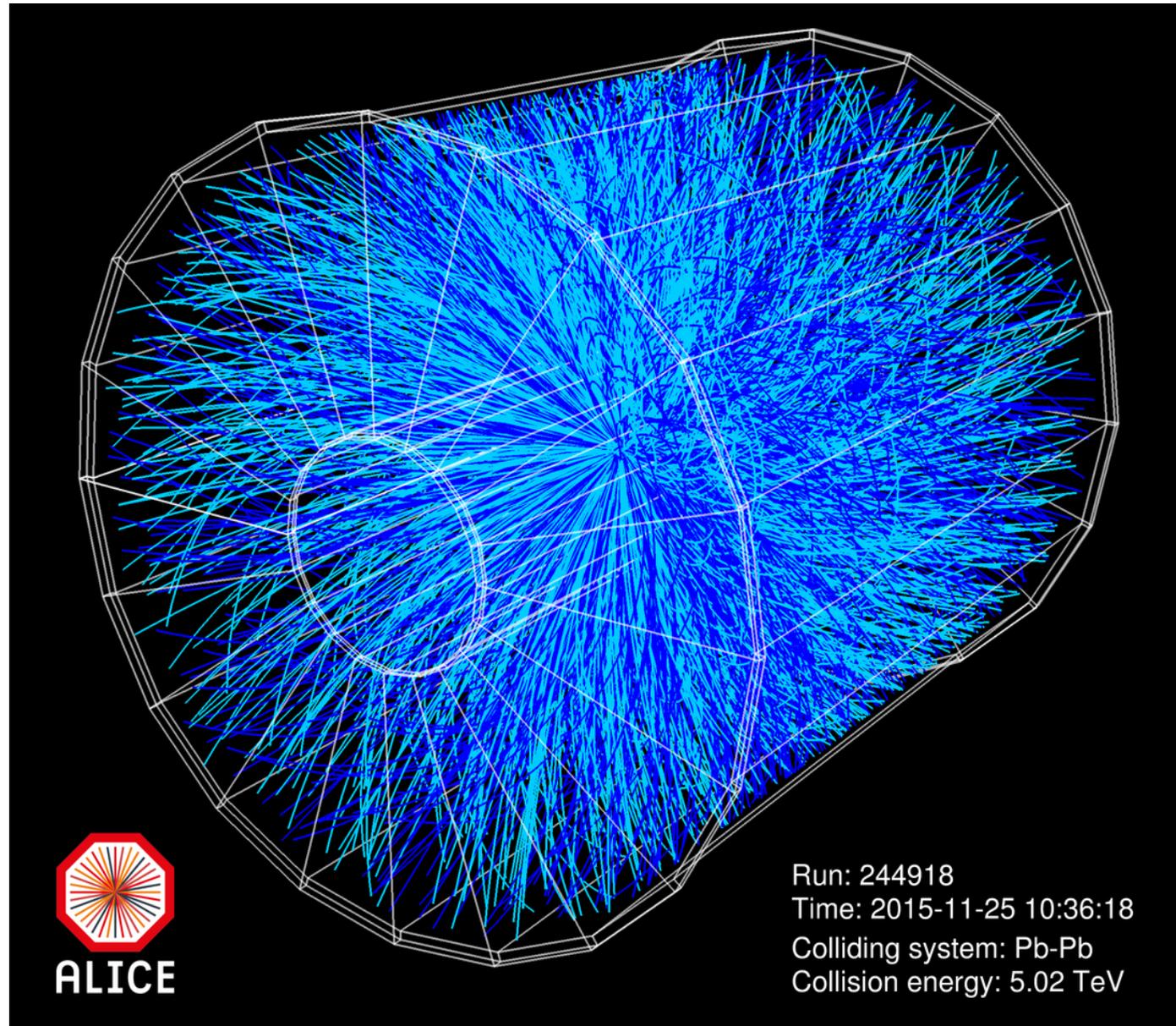
23



Blei-Blei Kollisionen am LHC

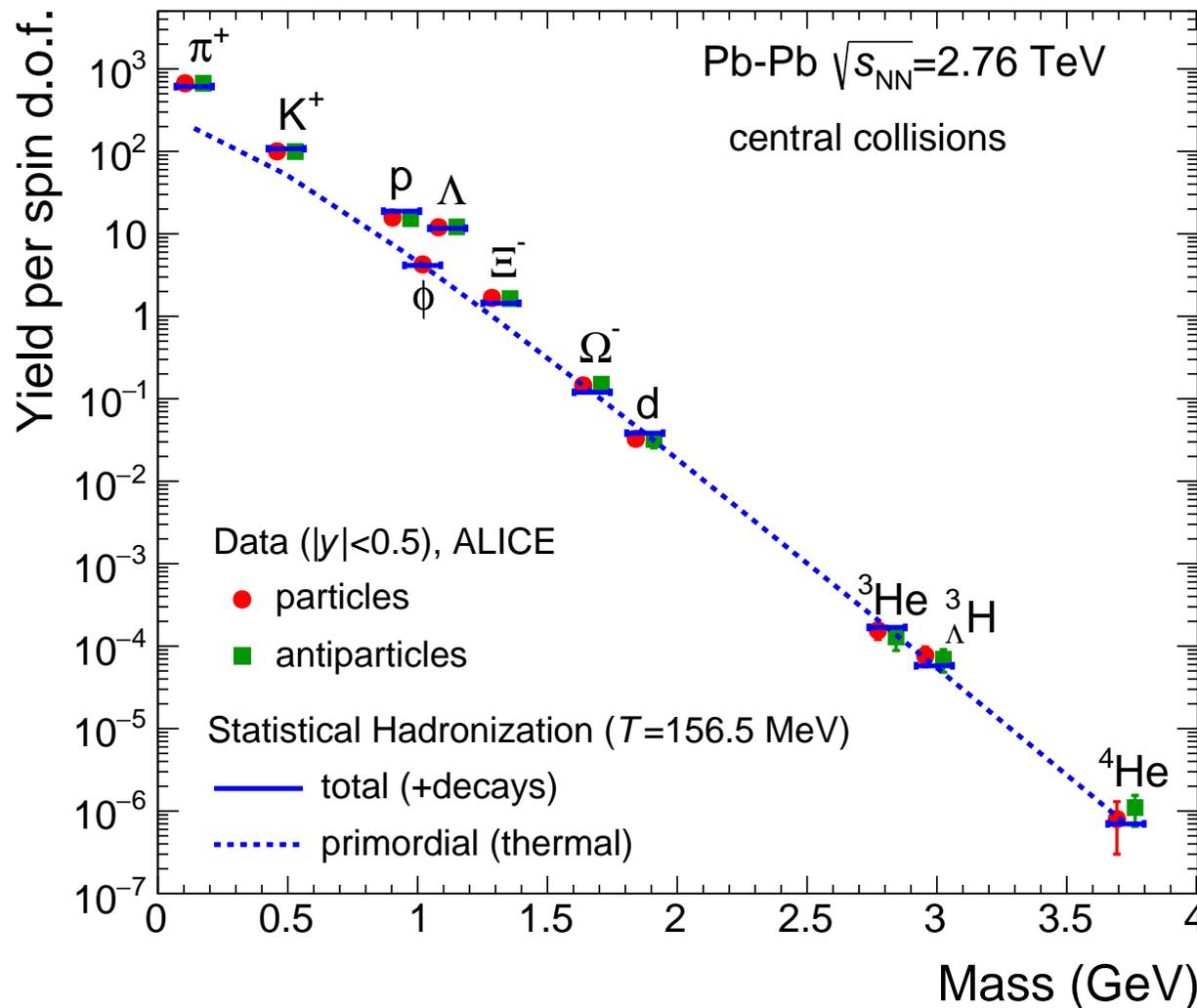
A. Andronic

24



a picture of a central collision (about 3200 primary tracks in $|\eta| < 0.9$); “Camera”: Time Projection Chamber
5 m length, 5 m diam.; 500 mil. pixels; we take about 500 pictures per second (and are preparing to take 50000)

Was wir messen, Beispiel: Temperatur



Materie und Antimaterie in Gleichgewicht erzeugt ...aus Energie, $m = E/c^2$

$\log(Y) \sim -\frac{m}{T}$, $T \simeq 10^{12}$ K (156.5 ± 1.5 MeV) ... $100000 \times T_{\text{Sonne}}$

Übergang von Quark-Gluon Plasma zu Hadronen

Gibt es doch Rätsel?

...eine Menge, trotz der generell ausgezeichneten Übereinstimmung der gemessenen Daten (Beschleuniger und Kosmos, Astroteilchen) mit Theorie

- Warum 3 Familien von Quarks und Leptonen?
- Warum haben die so verschiedene Massen?
($m_e=0.5$, $m_{top}=1.7 \cdot 10^5$ MeV/ c^2 ; $m_\nu < 0.8$ eV/ c^2)
- Warum 2 Quanten-Familien (Fermionen, Bosonen)?
- Warum gibt es nur ein einziges Higgs-Boson (und so “leicht” in Masse)?
- Warum besteht unser Universum (anscheinend) nur aus Materie? DM? DE?
- Gibt es eine große Vereinheitlichung der 4 fundamentalen Wechselwirkungen?
- Warum ist alles so gut/schön feinabgestimmt?

...sehr aktiv recherchiert, *Experiment und Theorie*

...und noch dazu:

”Man wird den Wunsch nach Erkenntnisgewinn nicht stoppen können.”

”Menschen versuchen immer, ihr Leben zu verbessern, und die Naturwissenschaften sind eine unmittelbare Konsequenz davon.”

Stefan Hell, Physiker, Nobelpreis Chemie, 2014

Wunderbare Anwendungen der Kern- und Teilchenphysik:

- WWW wurde am CERN erfunden (1990, T. Berners-Lee, R. Cailliau)

“...es unsere Pflicht ist, Informationen öffentlich zugänglich zu machen”

- Beschleuniger erzeugen Radionuklide für Medizin; Strahlentherapie

- Teilchendetektoren: bildgebende Verfahren in der Medizin (CT, MRT, PET)

- Datierung durch Isotope (Archeologie, Geophysik)

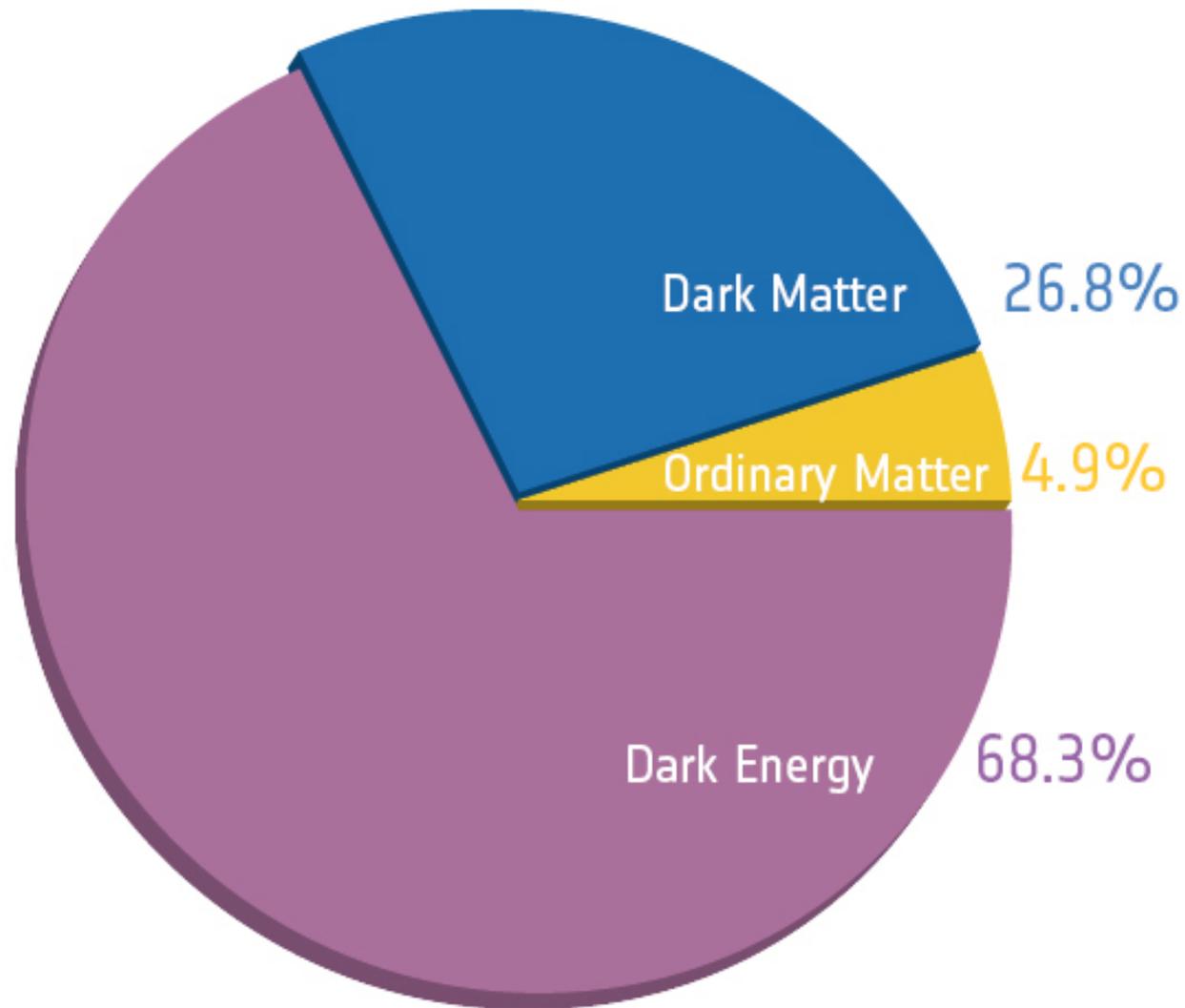
Extra slides

A. Andronic

“ZensusMaterie / Energie

A. Andronic

29

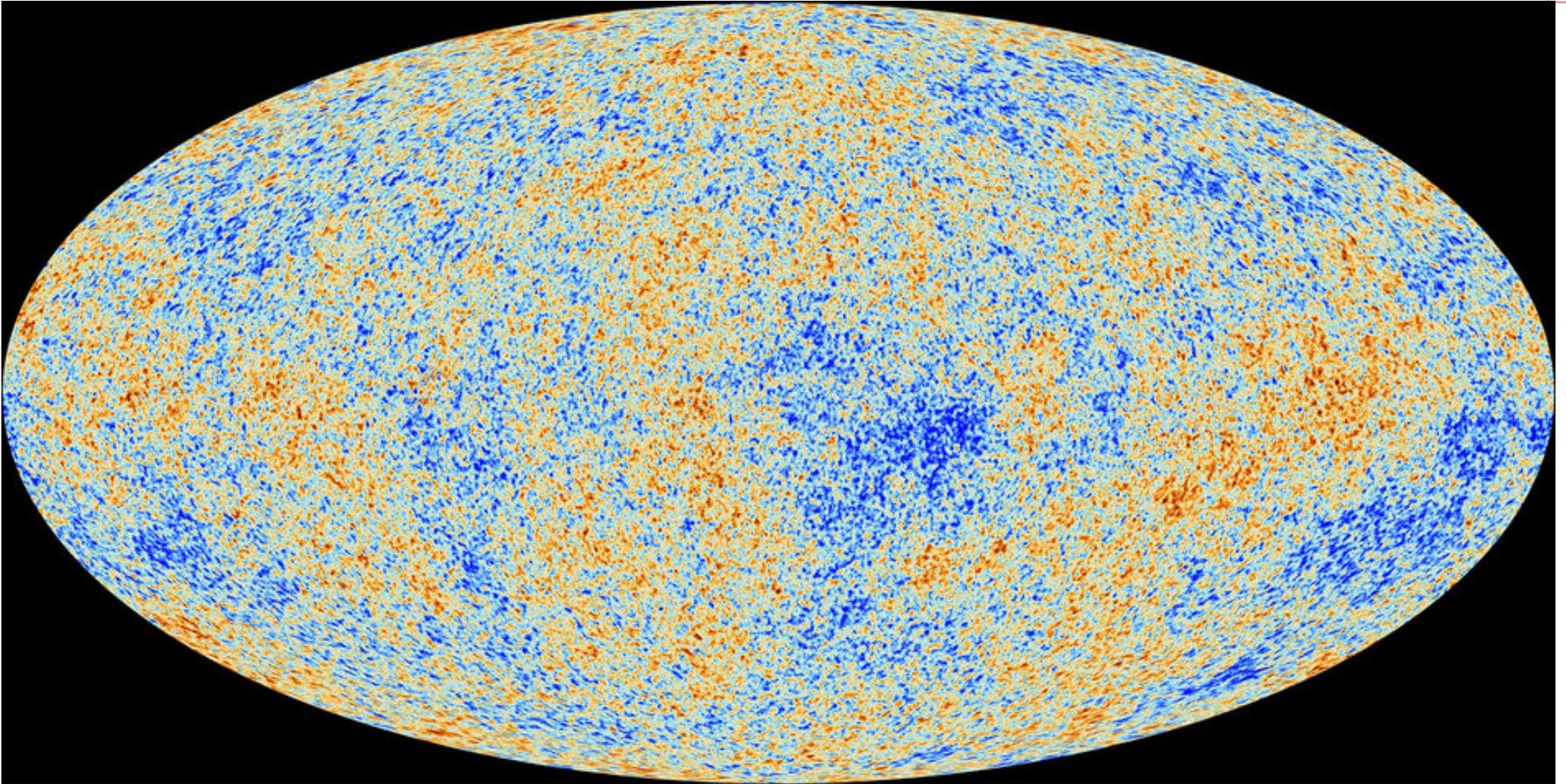


Was ist Dunkle Materie und was ist Dunkle Energie?

Kosmische Microwellenhintergrundstrahlung

A. Andronic

30



http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck

Photonen (10^9 / Proton) von Materie 380000 J. nach Urknall “entkoppelt”
Temperaturschwankungen (10^{-5}), “Ur-Samen” für die 100 Milliarden Galaxien