

Beschleuniger und Detektoren in der Teilchenphysik

10. MÄRZ 2021

DI DR MARKUS FRIEDL
(HEPHY)

- Institut für Hochenergiephysik (HEPHY)
 - Sitz in Wien, 5. Bezirk
 - Wurde 1966 als Beitrag Österreichs zum CERN gegründet
 - Ca. 70 Mitarbeiter in Wien
 - 6 MitarbeiterInnen permanent am CERN

- Österreichische Akademie der Wissenschaften
 - Größte außeruniversitäre Einrichtung für Grundlagenforschung in Österreich
 - 27 Forschungsinstitute mit ca. 1800 MitarbeiterInnen

Institut für Hochenergiephysik
Nikolsdorfer Gasse

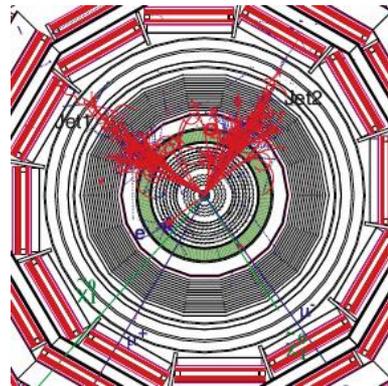
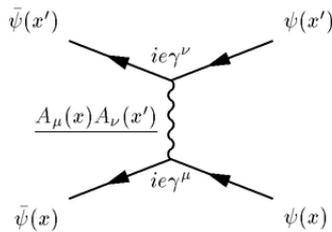
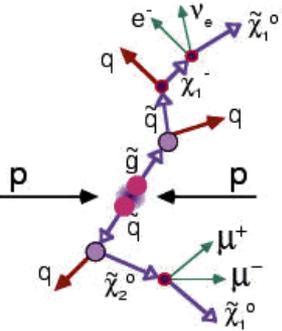


Österreichische Akademie der
Wissenschaften
Hauptgebäude, Ignaz-Seipel-Platz



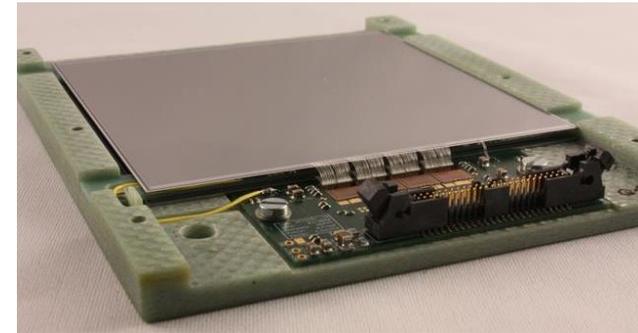
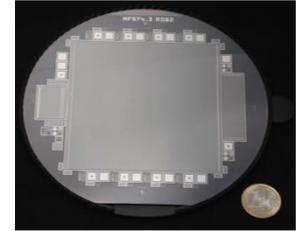
HEPHY Forschungsgebiete

Theorie der Elementarteilchen
Spezialgebiet: SUSY, QCD, Dark Matter



Datenanalyse für
CMS und Belle

Entwicklung von
Siliziumdetektoren



Elektronik

Algorithmen und
Softwareentwicklung



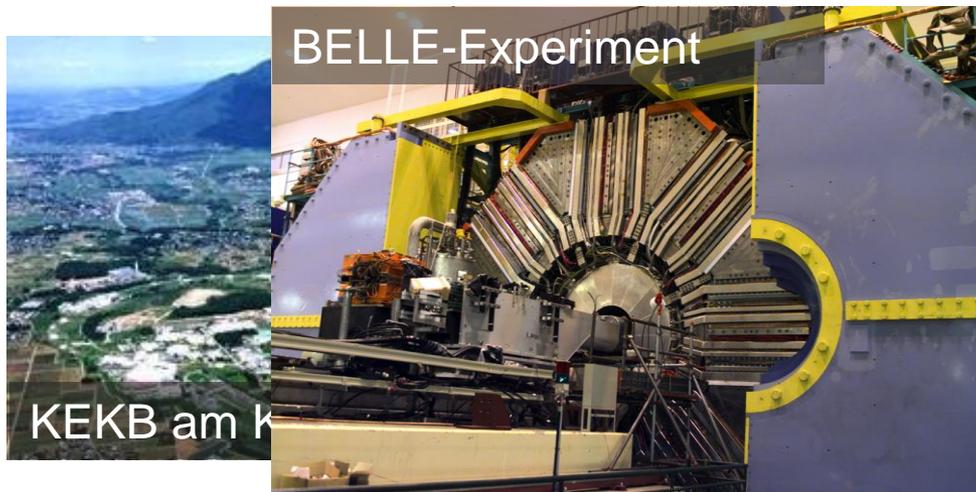
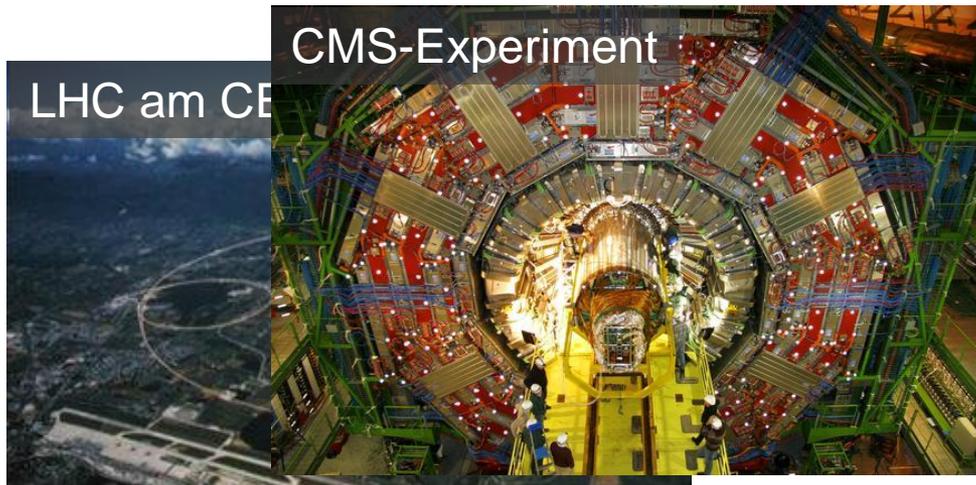
```
public void addMenus() {
    createFileMenu();
    mainMenuBar.add(fileMenu);
    createEditMenu();
    mainMenuBar.add(editMenu);
    setMenuBar(mainMenuBar);
}

private void createEditMenu() {}
private void createFileMenu() {}

public void paint(Graphics g) {
    super.paint(g);
    g.setColor(Color.blue);
    g.setFont(font);
    g.drawString(resbundle.getString("message"), 40, 80);
}

public class newActionClass extends AbstractAction {}
```

Experimente mit HEPHY-Beteiligung



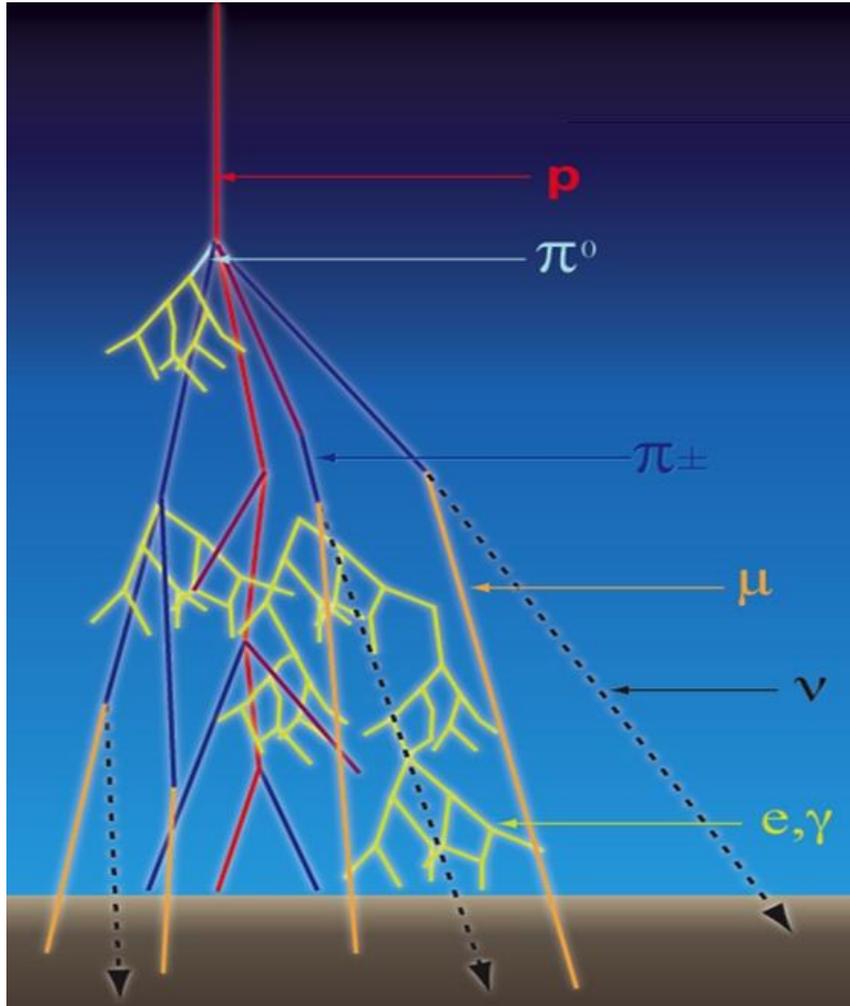
Inhalt dieses Vortrages:

- 1. Wozu benötigt man einen Teilchenbeschleuniger?**
- 2. Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?**
- 3. Was/Wo ist das KEK?**
- 4. Teilchendetektor: das „Experiment“**
- 5. Was bringt *mir* das?**

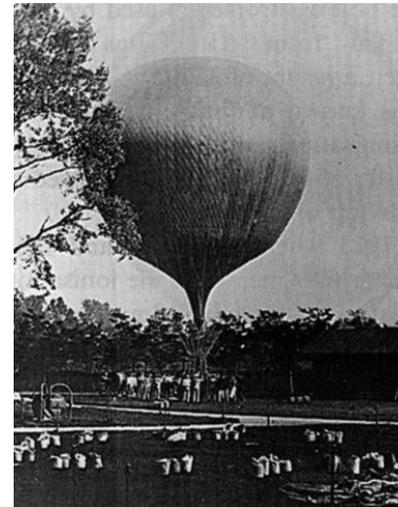


Wozu benötigt man einen
Teilchenbeschleuniger?

1. Kosmische Strahlung im Labor sichtbar machen



- Die **Kosmische Strahlung bombardiert die Erde** ständig mit **Teilchen**
- Entdeckung der sogenannten „Höhenstrahlung“ durch Viktor Hess 1912 (Physik-Nobelpreis 1936)

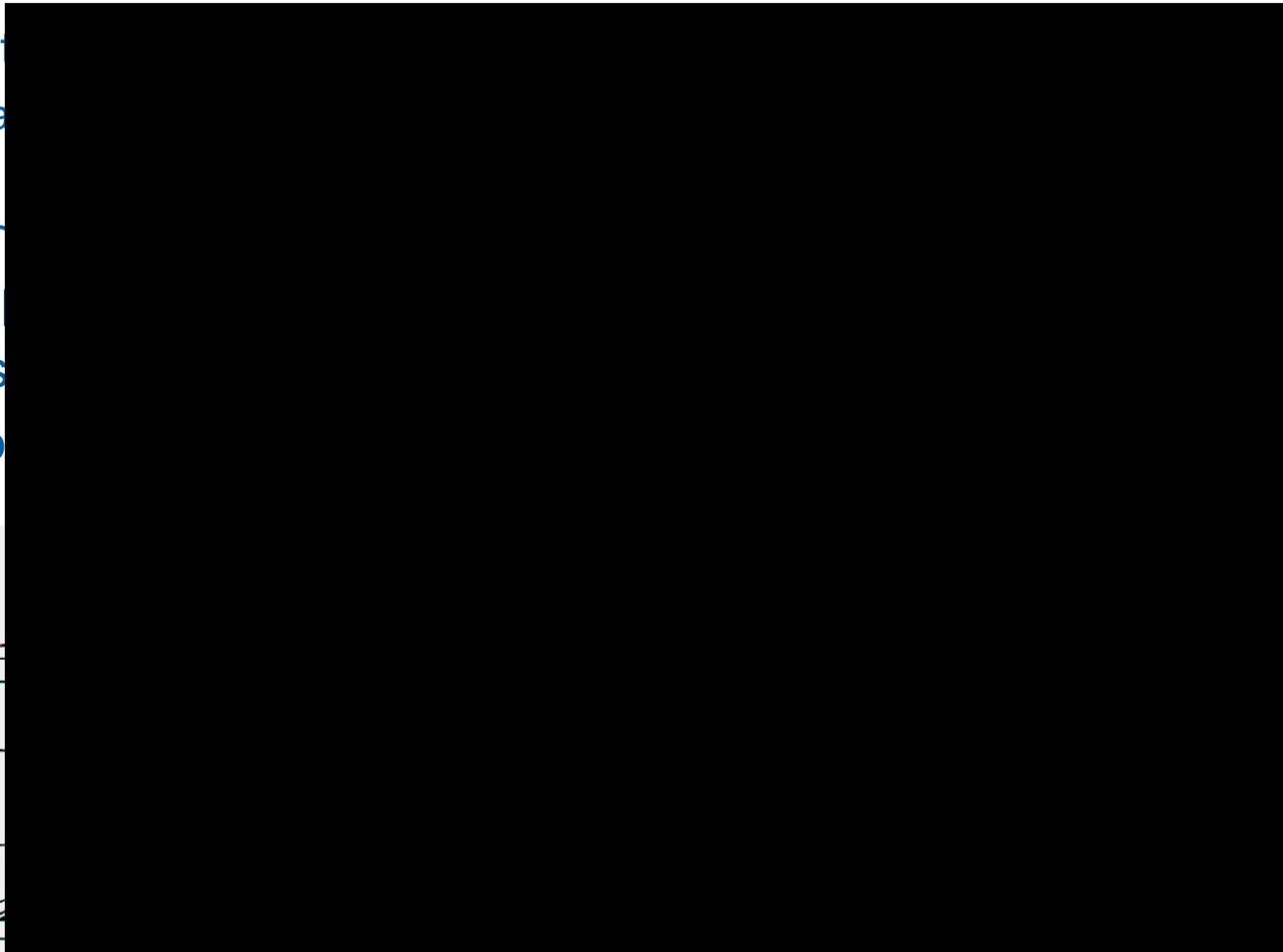
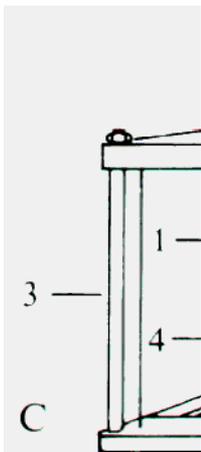


Funkenkammer

- Mach
- Ha

Funktion

- Hoc
- zwis
- Myo



2. Beobachtung kleiner Objekte

Mikroskop:

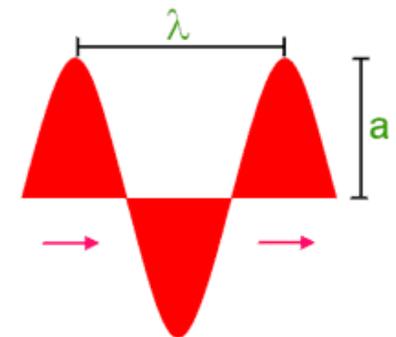
- Licht scheint auf Objekt
- Linsen zur Vergrößerung

Wo liegt die Grenze der Vergrößerung?

- Die **Auflösung** ist abhängig von der Wellenlänge des benutzten Lichts (400-700nm)
 - Beugungseffekte begrenzen Auflösung
 - Bei blauem Licht liegt sie bei etwa $0.4 \mu\text{m}$
- Kleinere Objekte benötigen andere Methoden



Wasserfloh



λ : Wellenlänge des Lichts
 a : Amplitude der Lichtwelle

Beobachtung noch kleinerer Objekte

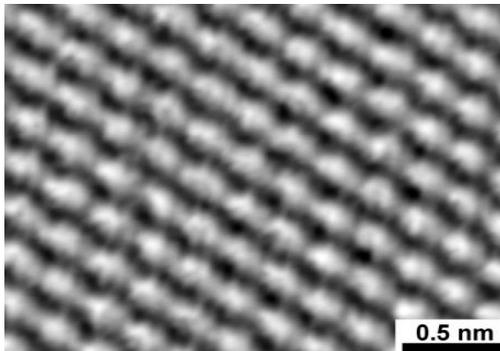


Elektronenmikroskop: 0.1 nm (Millionstel Millimeter)



$$0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

Rastertunnelmikroskop: 0.01 nm



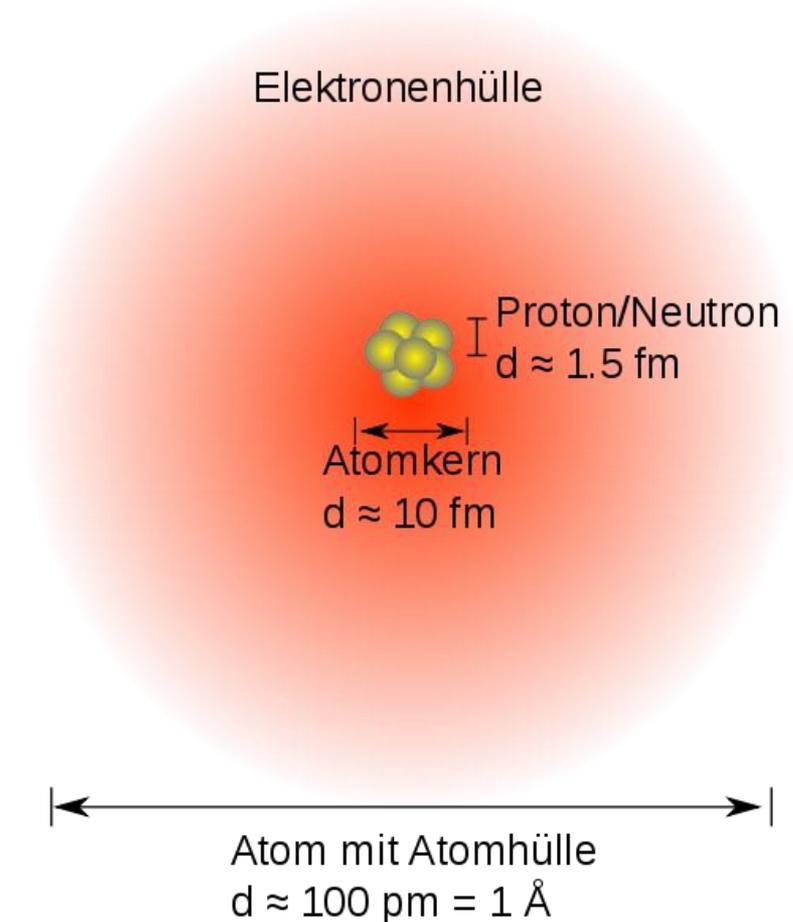
Beobachtung eines Atoms

Atomhülle

- Durchmesser $0.1 \text{ nm} = 100 \text{ pm}$
 $= 10^{-10} \text{ m} = 0.0000000001 \text{ m}$
- *Teilchen*: Elektronen

Atomkern

- Durchmesser $10 \text{ fm} = 10^{-14} \text{ m}$
 $= 0.00000000000001 \text{ m}$
- *Teilchen*: Protonen,
Neutronen



Bestandteile eines Atoms

Einfachstes Beispiel:

Wasserstoff

Bestandteile des
 Protons:
 1 Elektron
 1 Proton

Drei Quarks

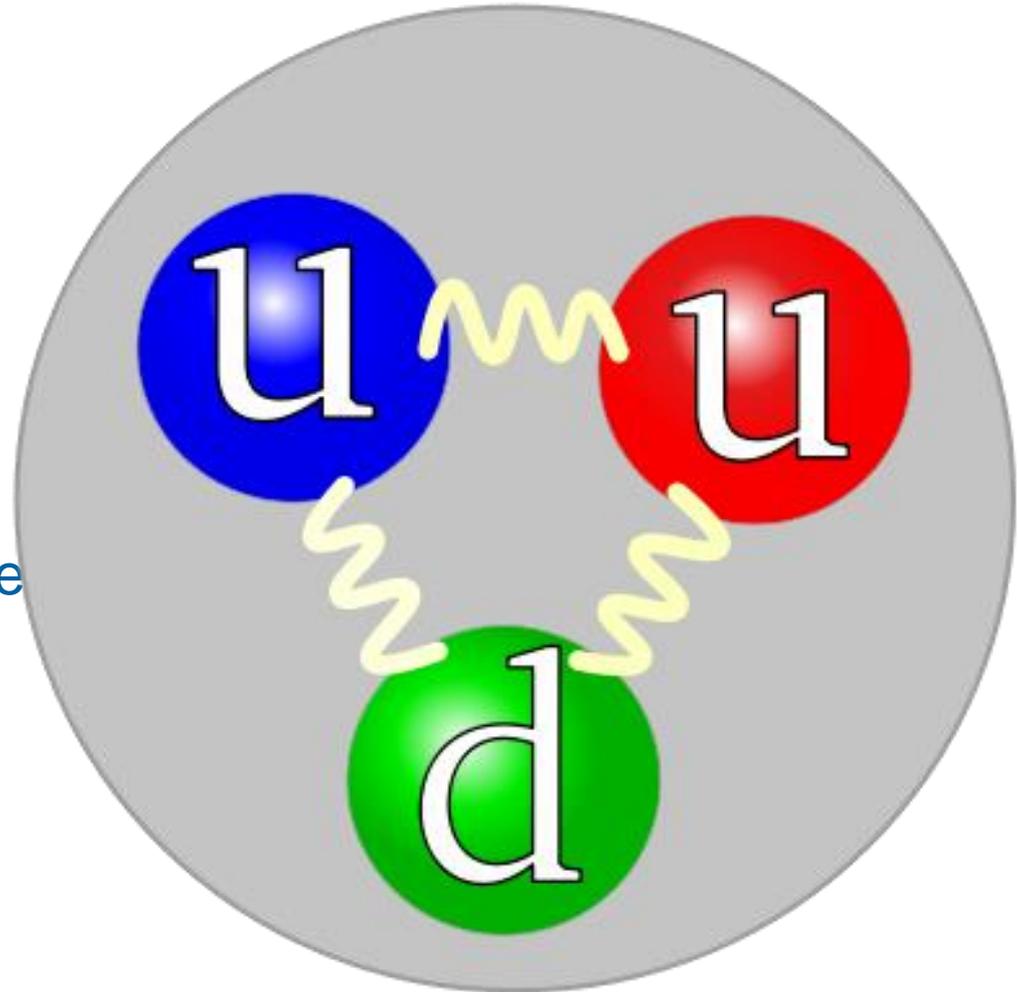
Atomhülle

• **2 „up“** geladene Elektrone

1 „down“

Atomkern

- Positiv geladene Protonen
- (Neutrale) Neutronen

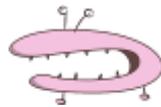


Der “Teilchen-Zoo”

Quarks



Up



Charm



Top



Down



Strange



Bottom

Leptonen



Elektron



Myon



Tau



Elektron-
Neutrino



Myon-
Neutrino

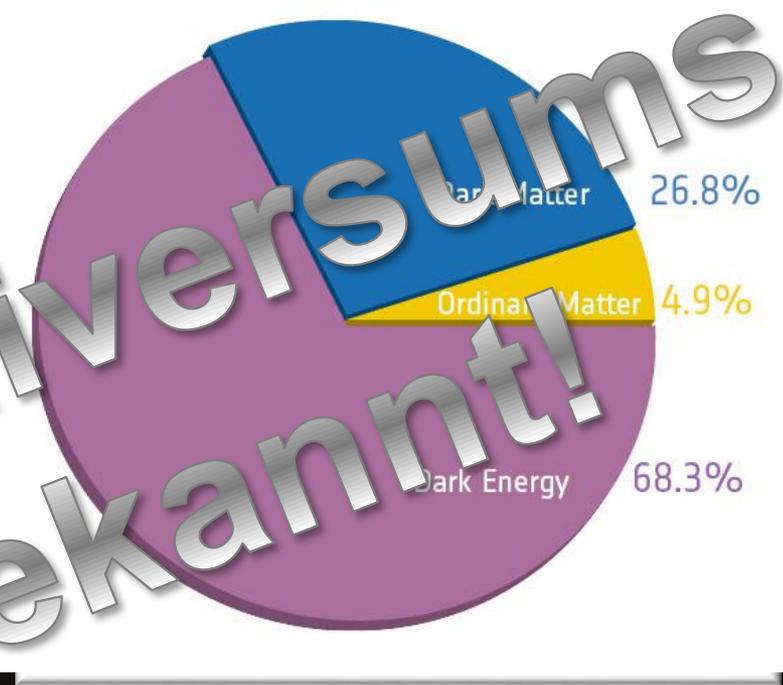


Tau-
Neutrino

- Alle “normale” Materie besteht nur aus diesen 3 Bausteinen!
- **Quarks bilden Protonen und Neutronen**
- Alle Teilchen mit Quarks heissen **Hadronen**

3. Kosmologie verstehen

Kleiner Ausschnitt des Unive
Hubble Deep Field

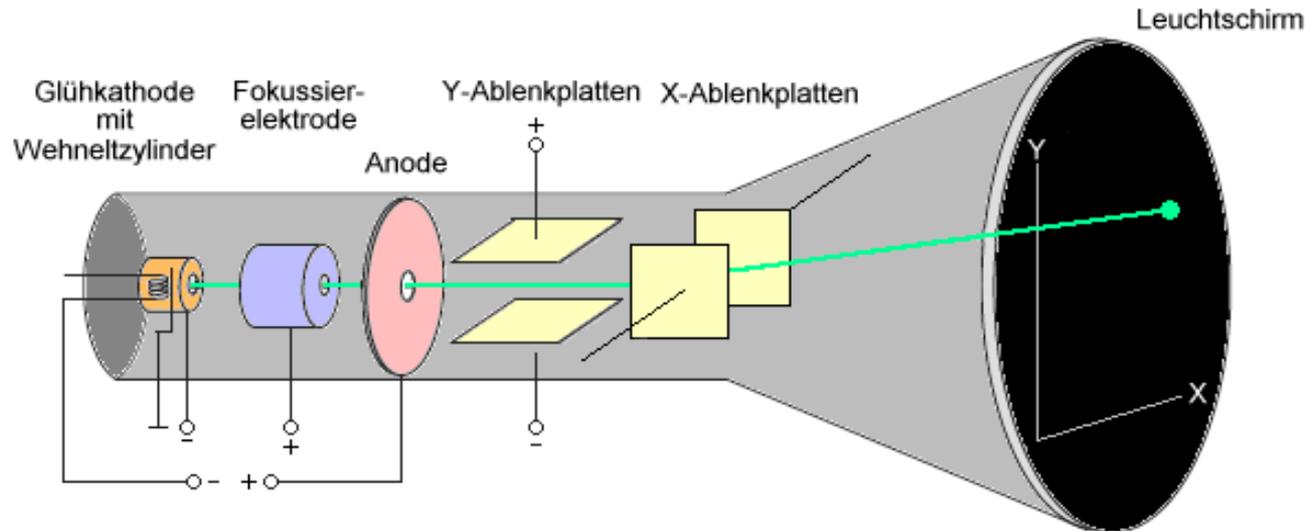


95% des Universums ist unbekannt!

Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?



Der einfachste Beschleuniger

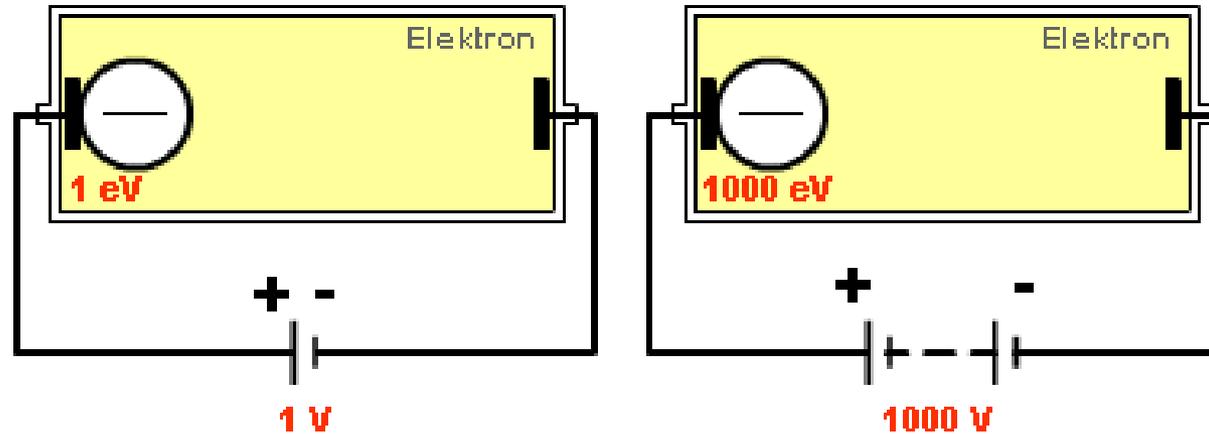


Ein Röhrenfernseher ist der einfachste **elektrostatische Beschleuniger**:

- Erzeugung von freien Elektronen mittels Glühkathode
- Beschleunigung mittels Hochspannung
- Ablenkung mittels magnetischer Felder



Energieeinheit der Teilchenphysiker



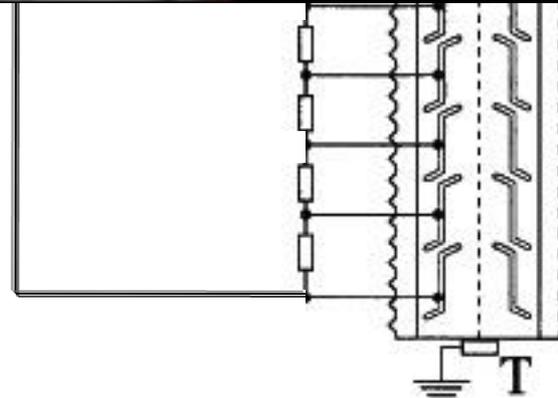
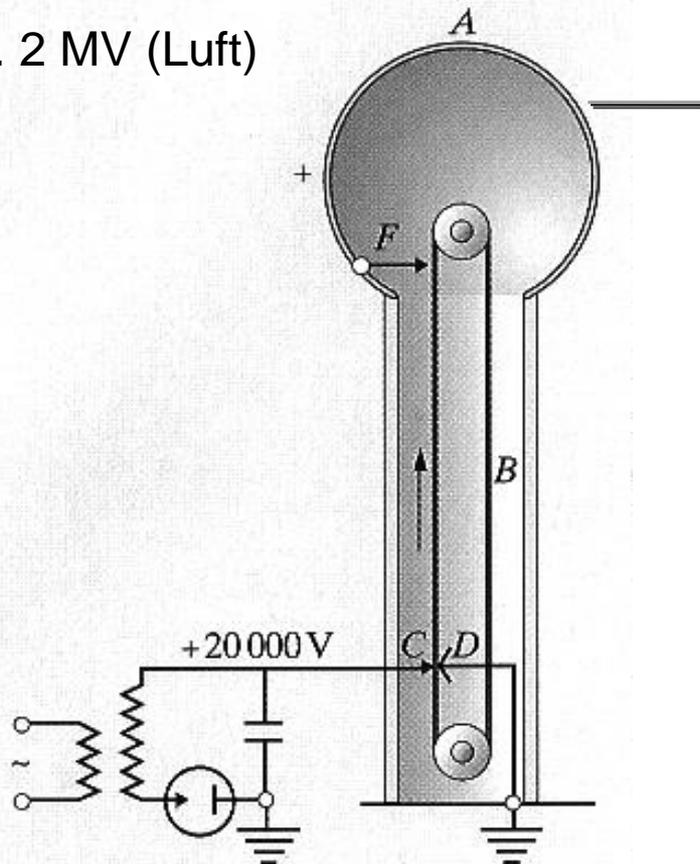
1 Elektronenvolt (1 eV) ist die kinetische Energie, die ein Teilchen mit der Ladung e_0 erhält, wenn es durch eine Spannung von 1 Volt beschleunigt wird.

- Tausend eV = 1 keV
- 1 Million eV = 1 MeV
(4% der Lichtgeschwindigkeit)
- 1 Milliarde eV = 1 GeV
(87,6% des Lichts)
- 1 Billion eV = 1 TeV
(99.999957% des Lichts)

Elektrostatische Beschleuniger

Van-de-Graaff-Beschleuniger (Bandgenerator)

max. 2 MV (Luft)

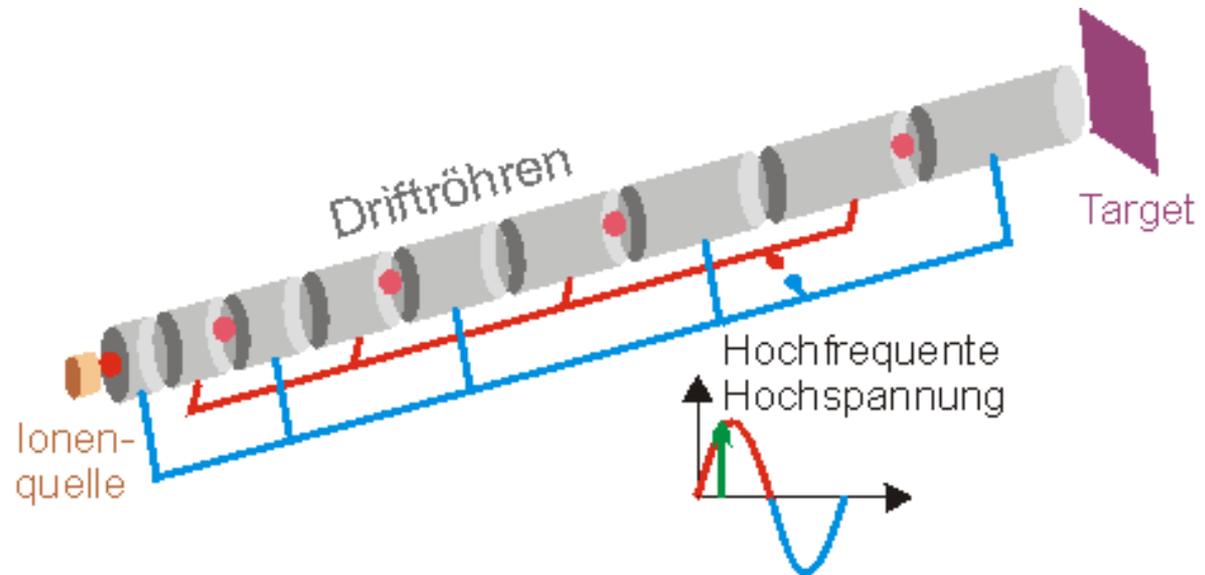
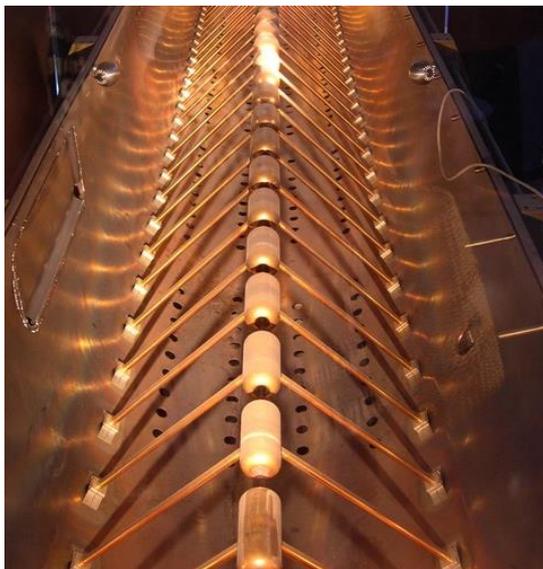


Cockcroft-Walton-Beschleuniger am KEK (Japan)

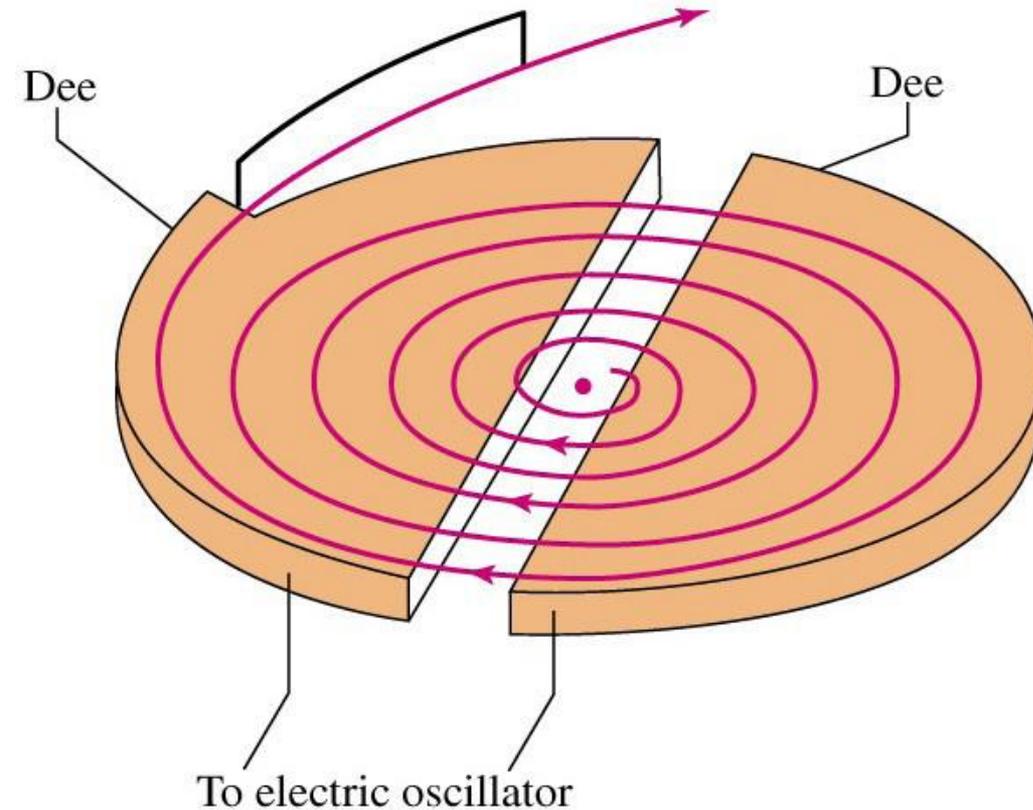


Linearbeschleuniger

- Weiterentwicklung eines elektrostatischen Beschleunigers
- Vorteil: keine hohen Spannungen im Vergleich zu elektrostatischen Beschleunigern
- Nachteil: Teilchen stehen nur einmal zur Beschleunigung zur Verfügung



Kreisbeschleuniger: Das Zyklotron

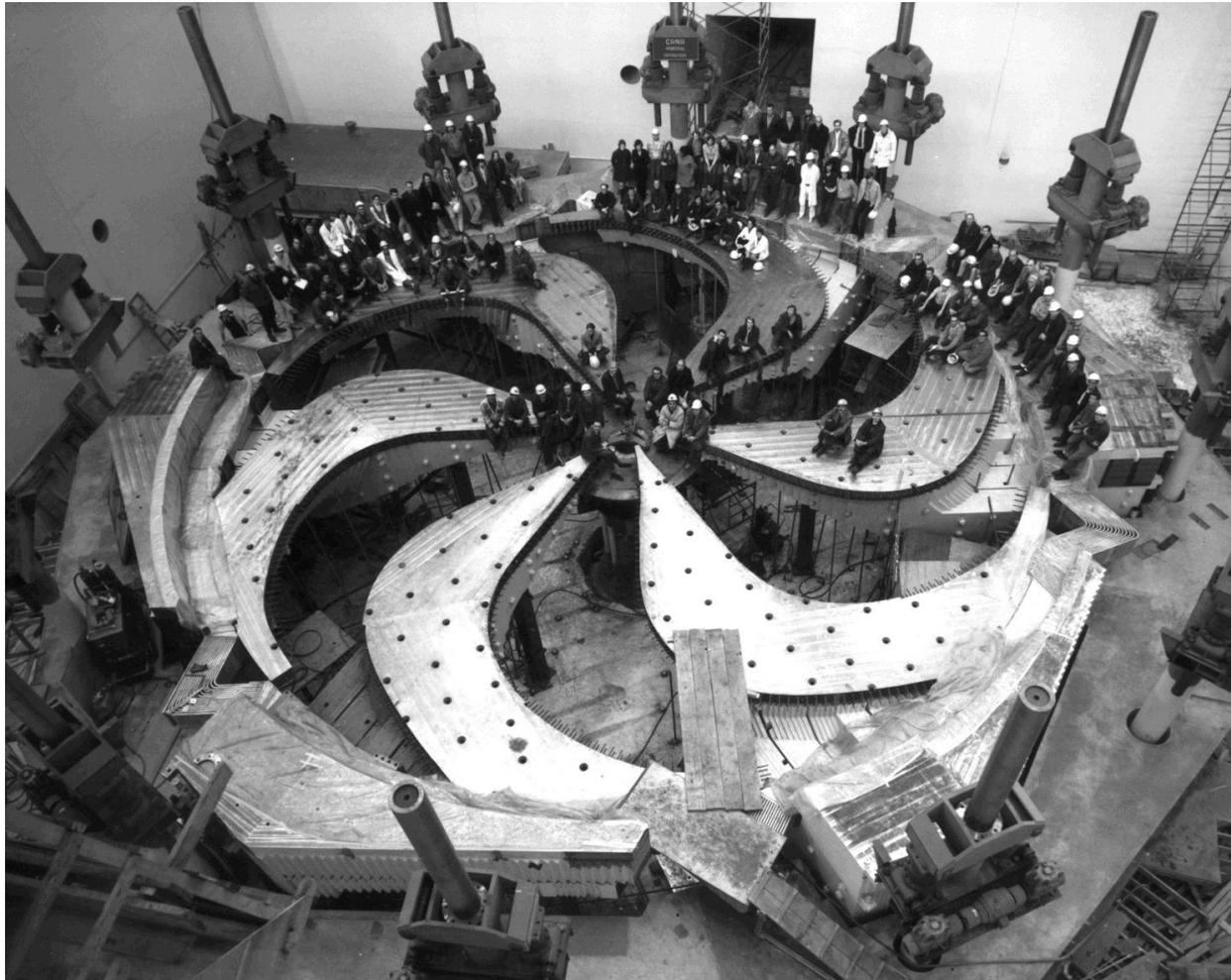


$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

$$\frac{v}{r} = \omega_c = \frac{q}{m} B$$

Zyklotron-Frequenz

TRIUMF K500 Cyclotron

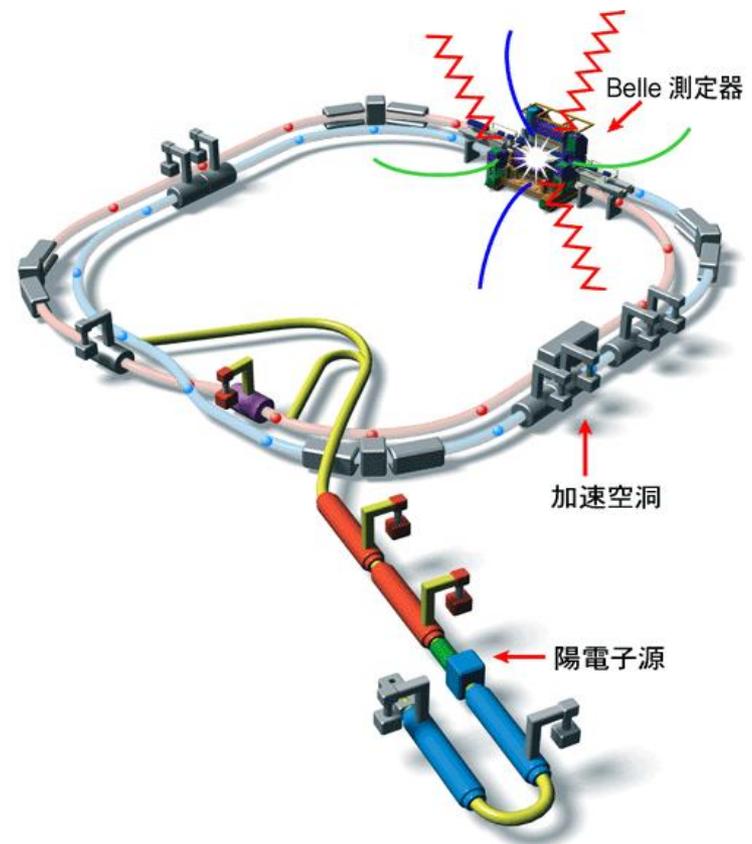


Größtes
Zyklotron
der Welt:
TRIUMF,
Vancouver
(1972)

Ringbeschleuniger

Andere Namen: Collider, Synchrotron, Speicherring

- Beispiel SuperKEKB (Japan):
- Vorteil:
 - Teilchen fliegen immer und immer im Kreis
- Nachteil:
 - Synchrotronstrahlung
- Man benötigt mehr Komponenten, um Teilchen auf Kreisbahn zu halten
 - Dipolmagnete



Komponenten eines Synchrotrons

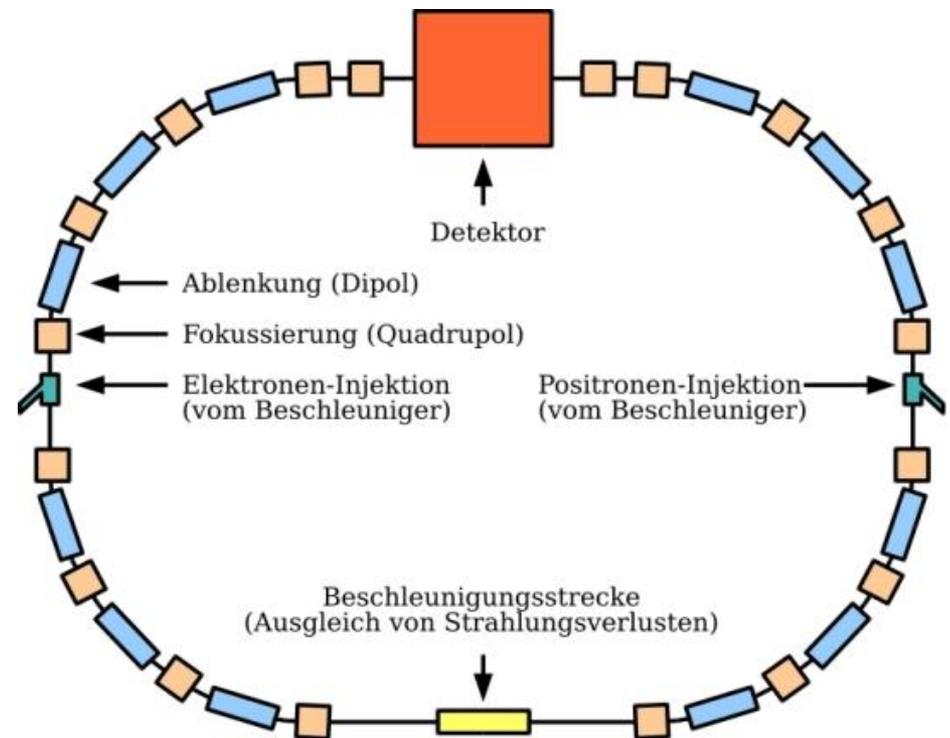
- **Teilchen** (aus LINAC)

- **Beschleunigung** (Hochfrequenz-Kavität → elektrisches Feld)

Magnete zum

- **Ablenken (Dipol)**
- **Fokussieren (Quadrupol)**

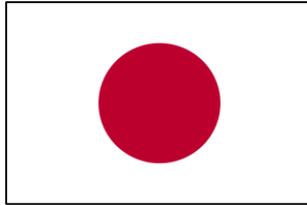
**Extraktion oder
Kollision** an
Kollisionspunkten



Was/Wo ist das KEK?

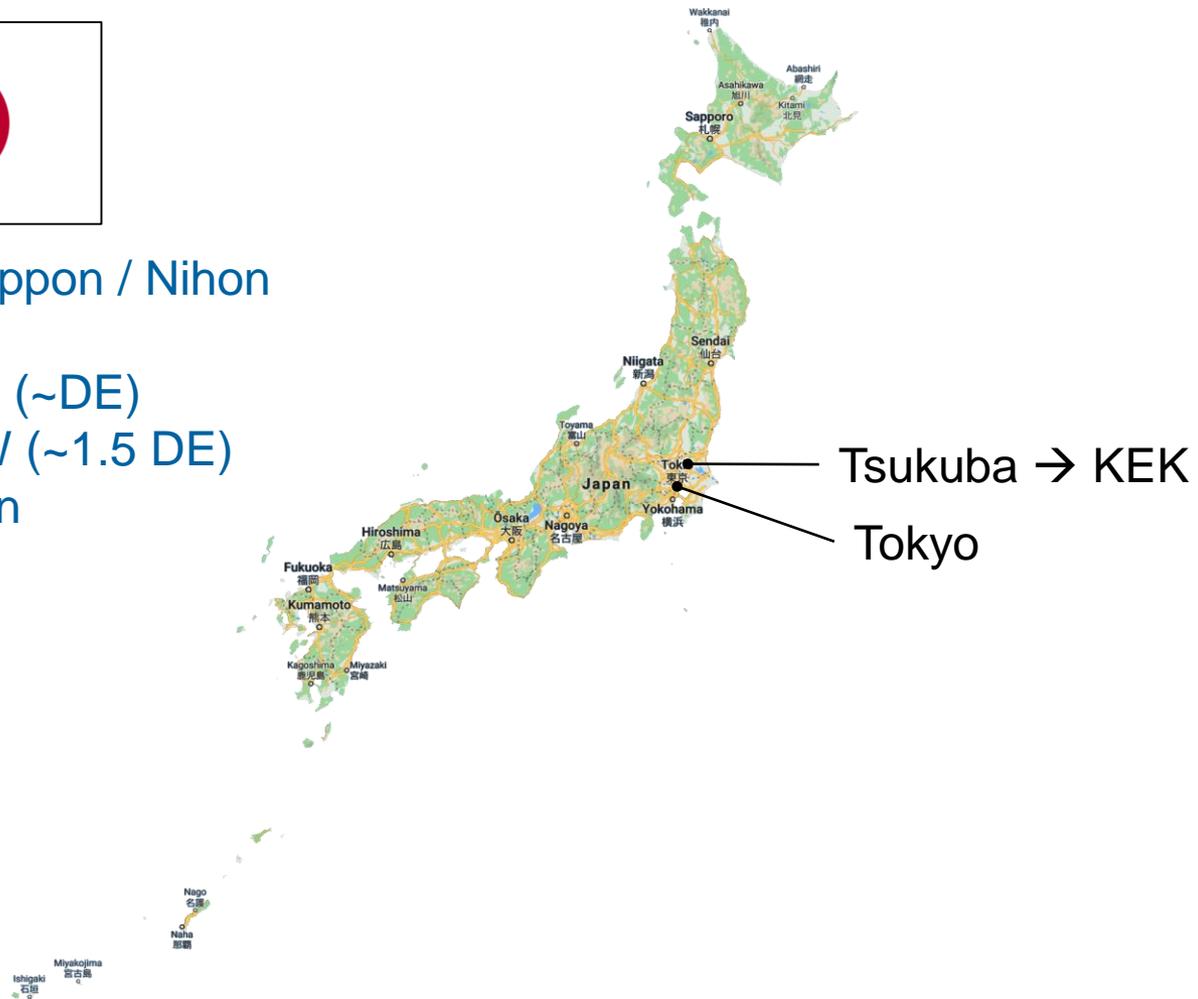


Japan (1/2)



日本 = Nippon / Nihon

378k km² (~DE)
126M EW (~1.5 DE)
~7k Inseln



Japan (2/2)

- Einziges Kaiserreich der Welt
- Aktueller Kaiser: Naruhito (seit 2019)
- Jeder Kaiser benennt seine Regierungsperiode
 - Aktuell 令和 (Reiwa=schöne Harmonie)
- Hauptnahrungsmittel: Reis (米=kome)
- Essbesteck: Stäbchen (箸=hashi)
- Religion:
 - 100% Shintoisten
 - 70% Buddhisten
 - 1% Christen

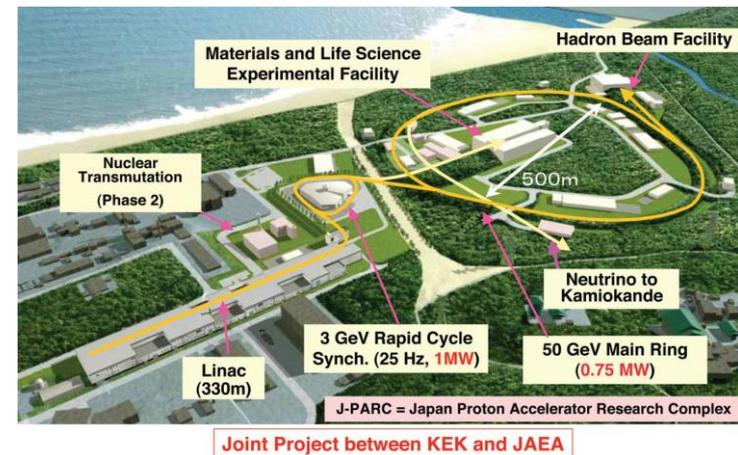


Forschungszentrum **KEK**



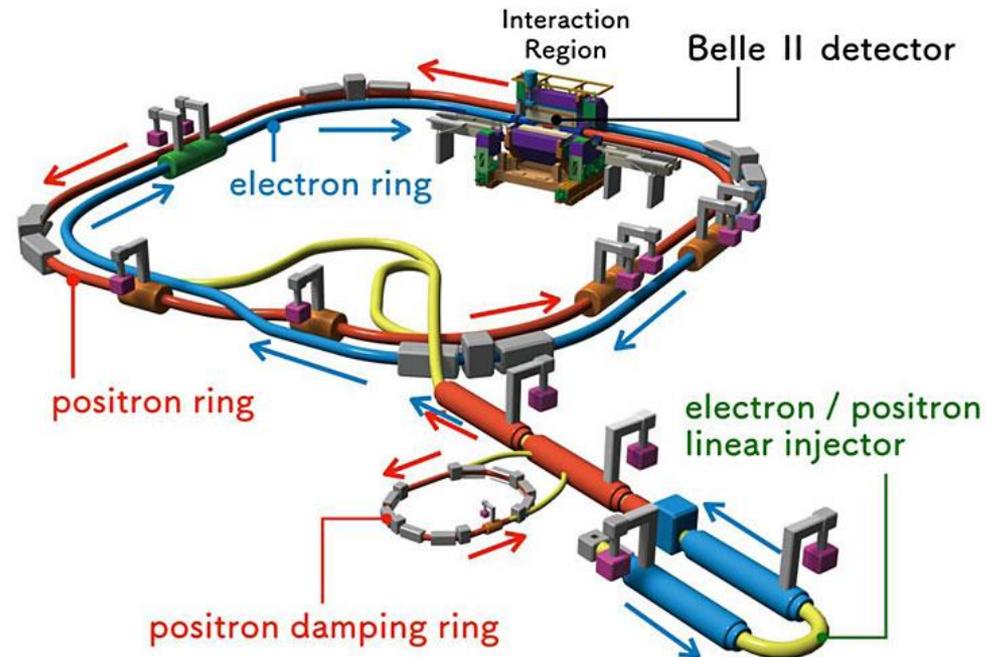
Forschungszentrum KEK

- Untersteht dem japanischen Ministerium für Bildung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie (MEXT)
- Ca. 700 MitarbeiterInnen
- Ca. 380M€ Jahresbudget
- Betreibt neben dem Hauptstandort auch J-PARC (gemeinsam mit der japanischen Atomenergie-Behörde)



SuperKEKB-Speicherring

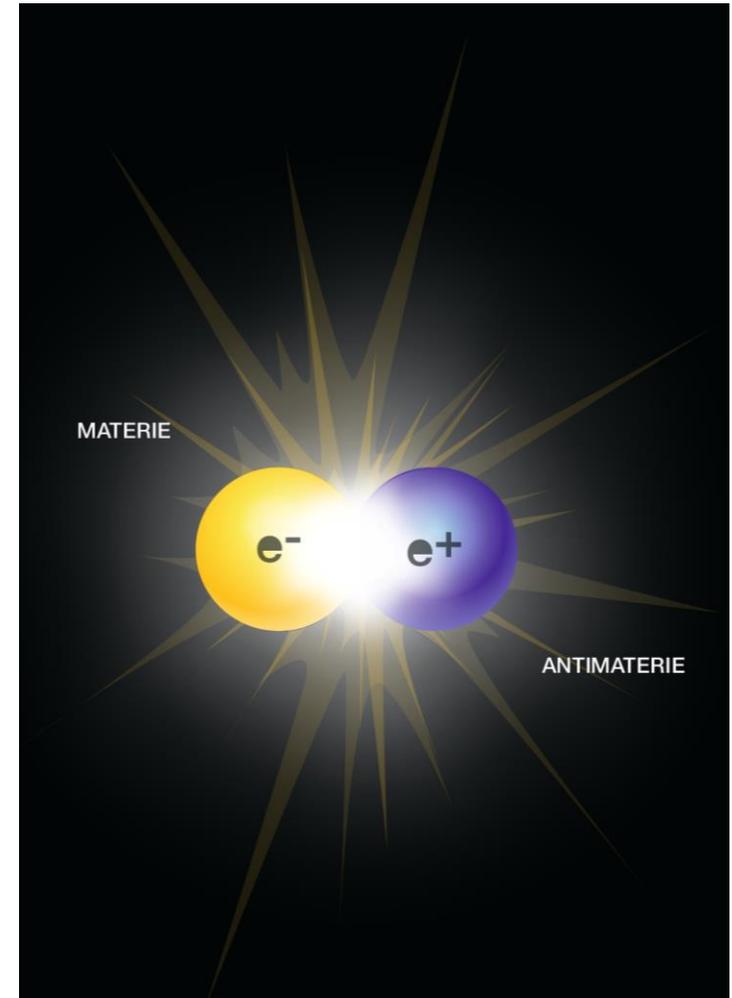
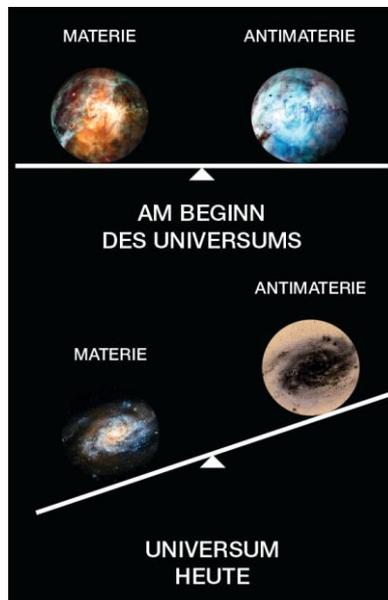
- 7GeV Elektronen
- 4GeV Positronen
- Im Schwerpunkt
 $10.58\text{GeV} = Y(4S)$ -
 Resonanz
 - Zerfällt in B-Mesonen
 (Teilchen+Antiteilchen)
- “B-Fabrik”
- Zur Beobachtung der
 (geringen) Unterschiede
 zwischen Materie und
 Antimaterie



- 3km Umfang
- 100.000 Umdrehungen
 pro Sekunde

Antimaterie (1/2)

- Materie + Antimaterie = Energie
- Beim Urknall gleich viel von beidem erzeugt
- Wo ist die Antimaterie heute?



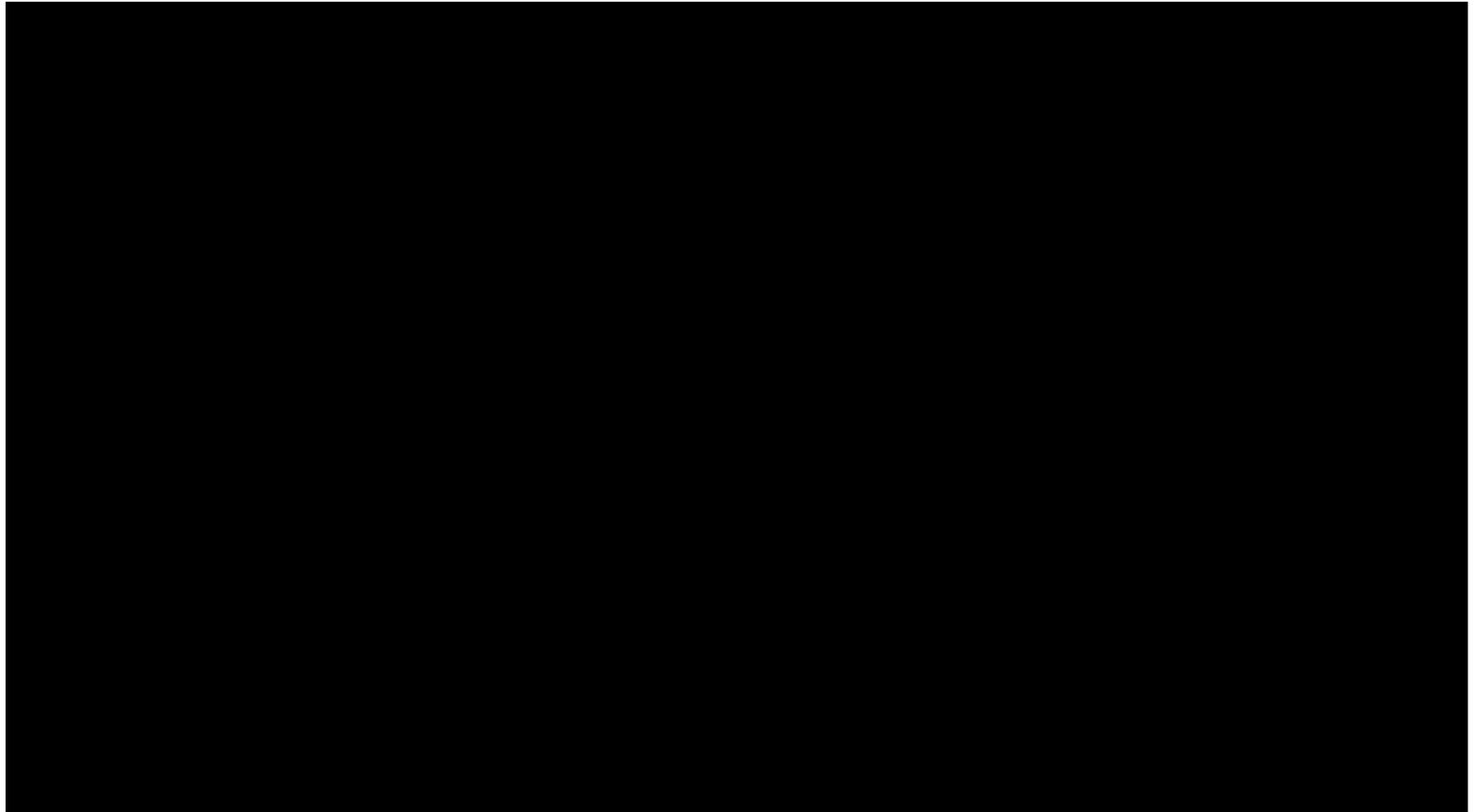
Antimaterie (2/2)

- Dank verschiedener Experimente wissen wir:
- Manche Teilchen verhalten sich geringfügig anders als deren Antiteilchen
- Aber die Differenz reicht nicht aus, um die Entstehung des Universums zu beschreiben
- Es muss noch weitere, bislang unbekannte Effekte geben
- Diese werden u.a. am KEK erforscht

Blick in den Speicherring



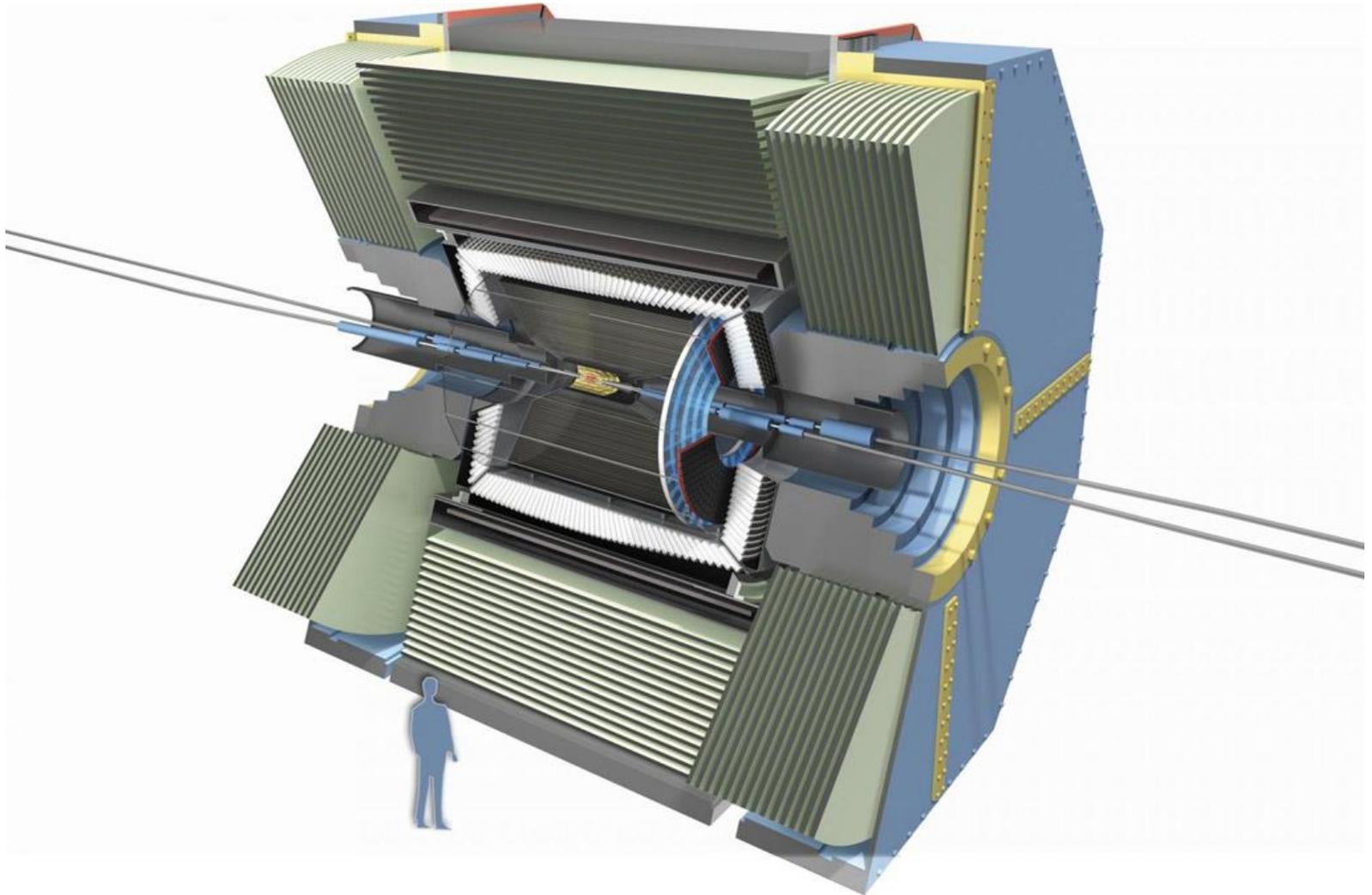
Rund um den Ring



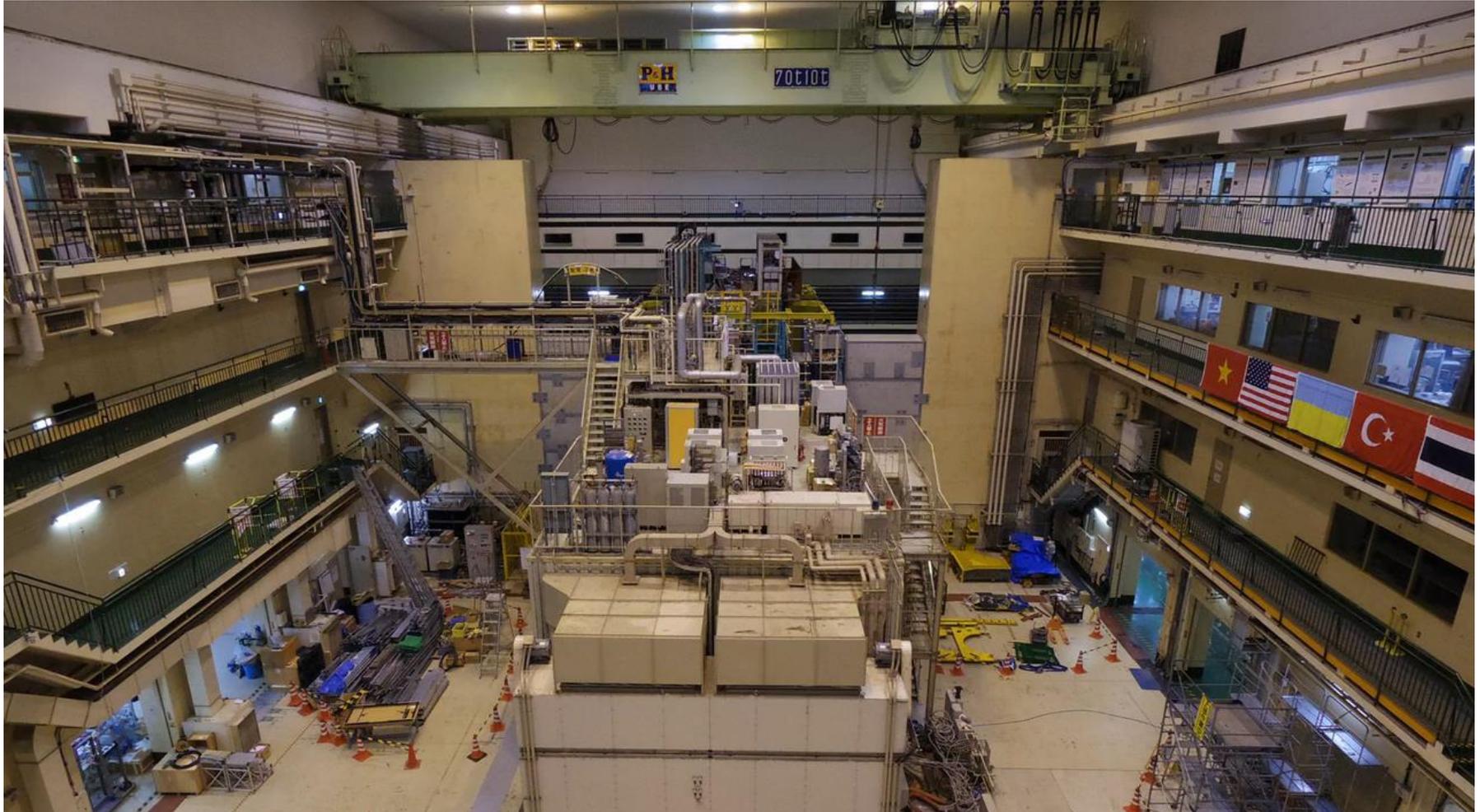


Teilchendetektor
Was fehlt ^{oder} jetzt noch?
“Das Experiment”

Belle II – Schnittbild

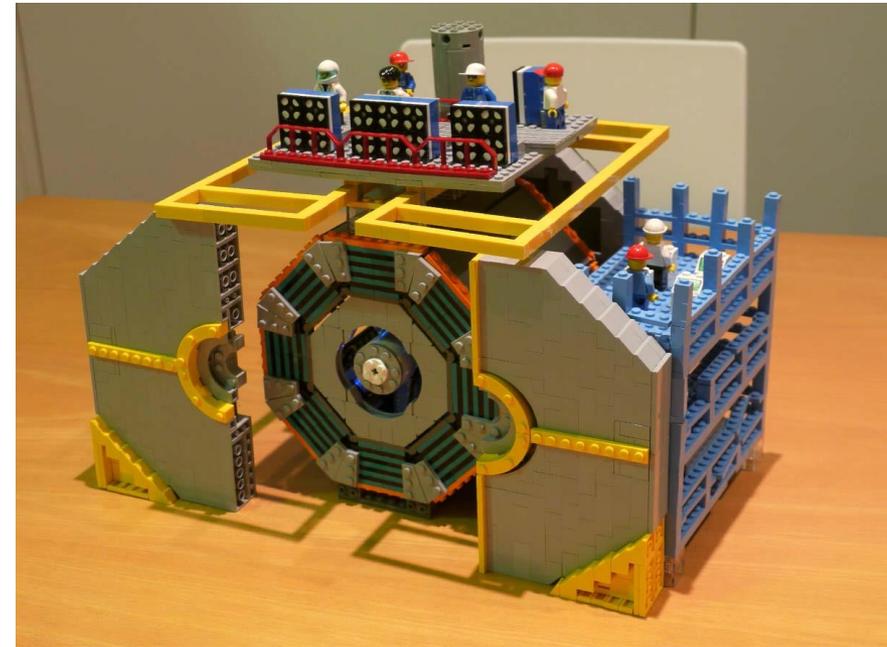
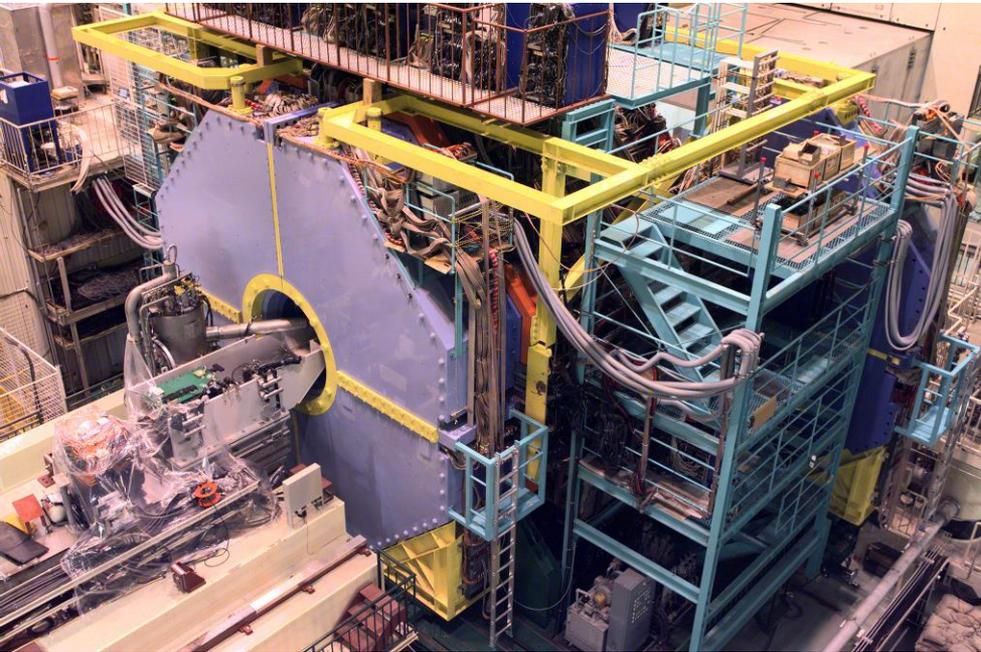


Belle II – in echt



Geschichte

- 1999-2010: KEK-B (Beschleuniger) & Belle-Experiment
- Seit 2018: SuperKEK-B (Beschleuniger) & Belle II

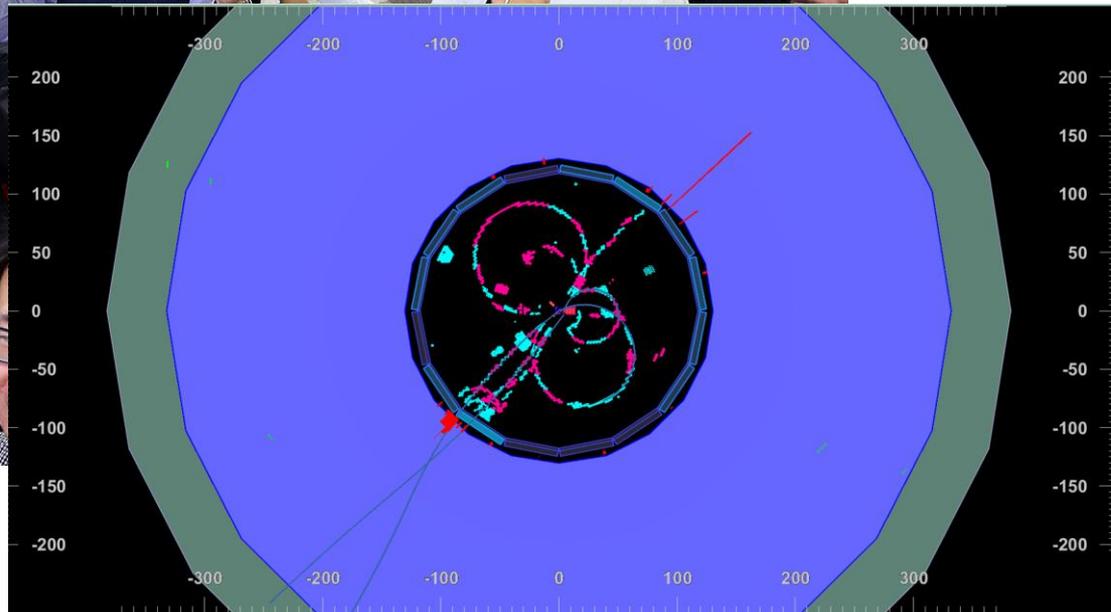
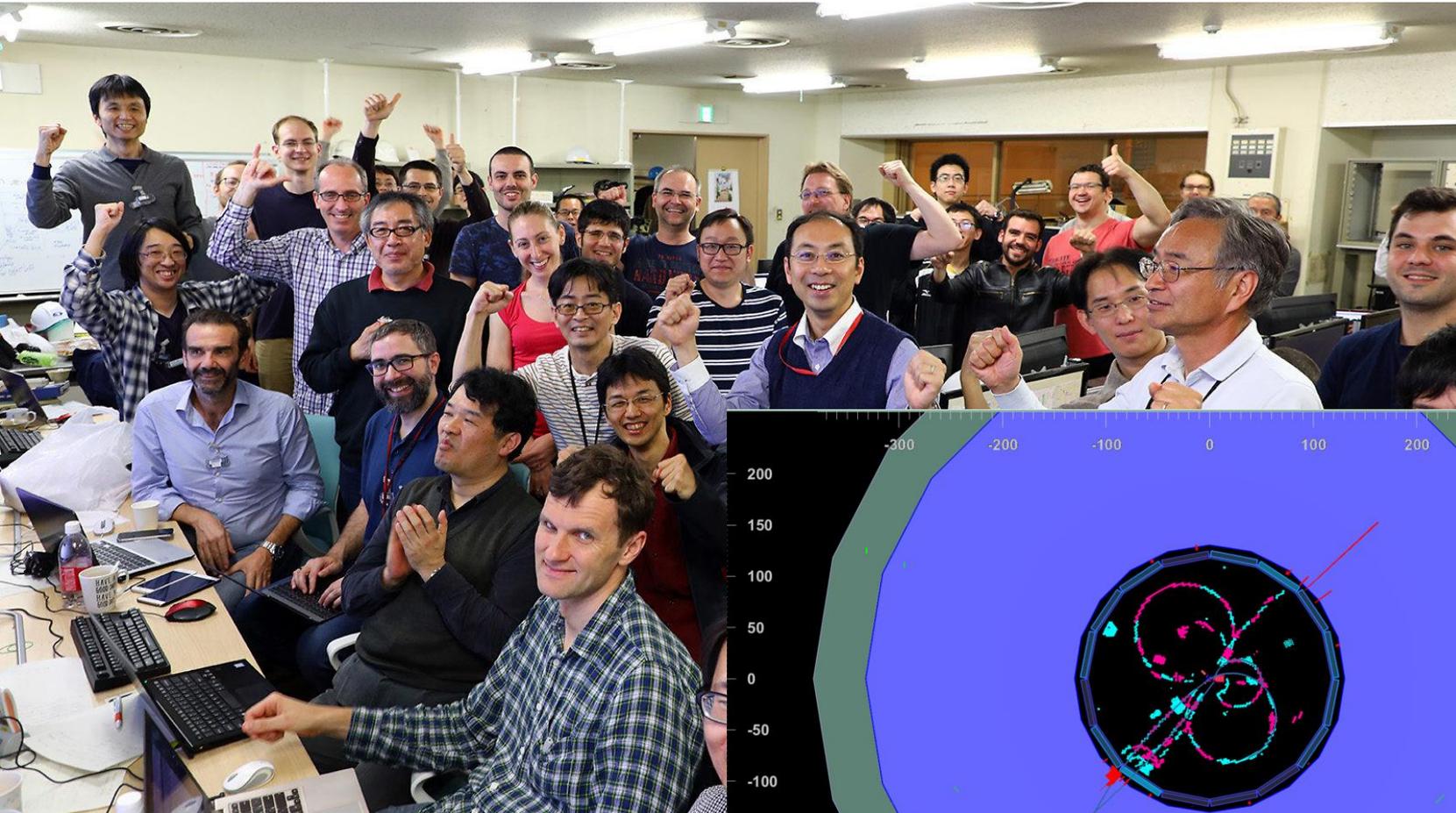


Nobelpreis 2008

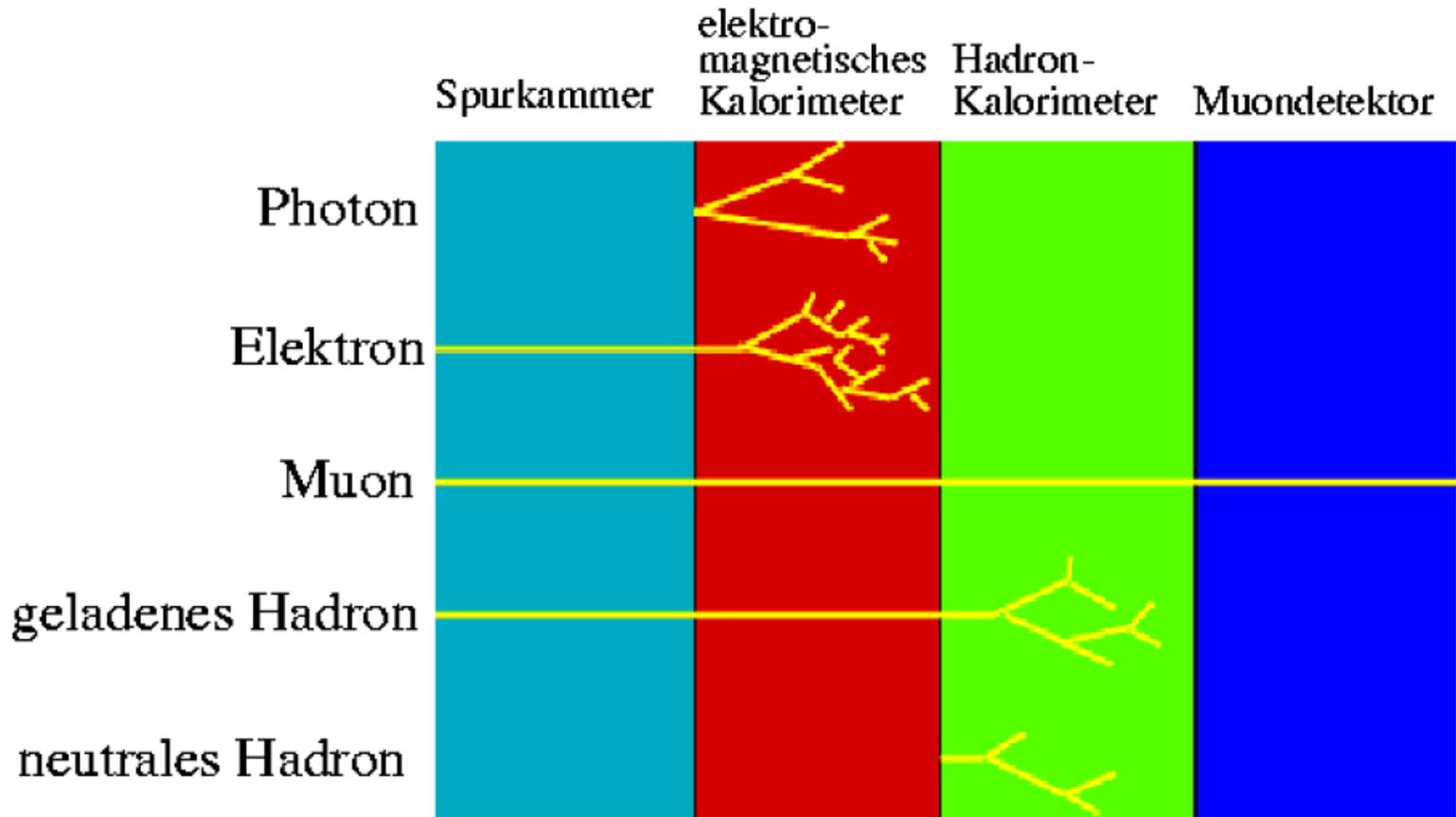
- Für Makoto Kobayashi und Toshihide Masukawa für die Vorhersage von 3 Quark-Generationen (1973)
- In den 2000ern experimentell bestätigt durch Belle (Japan) und Babar (USA)



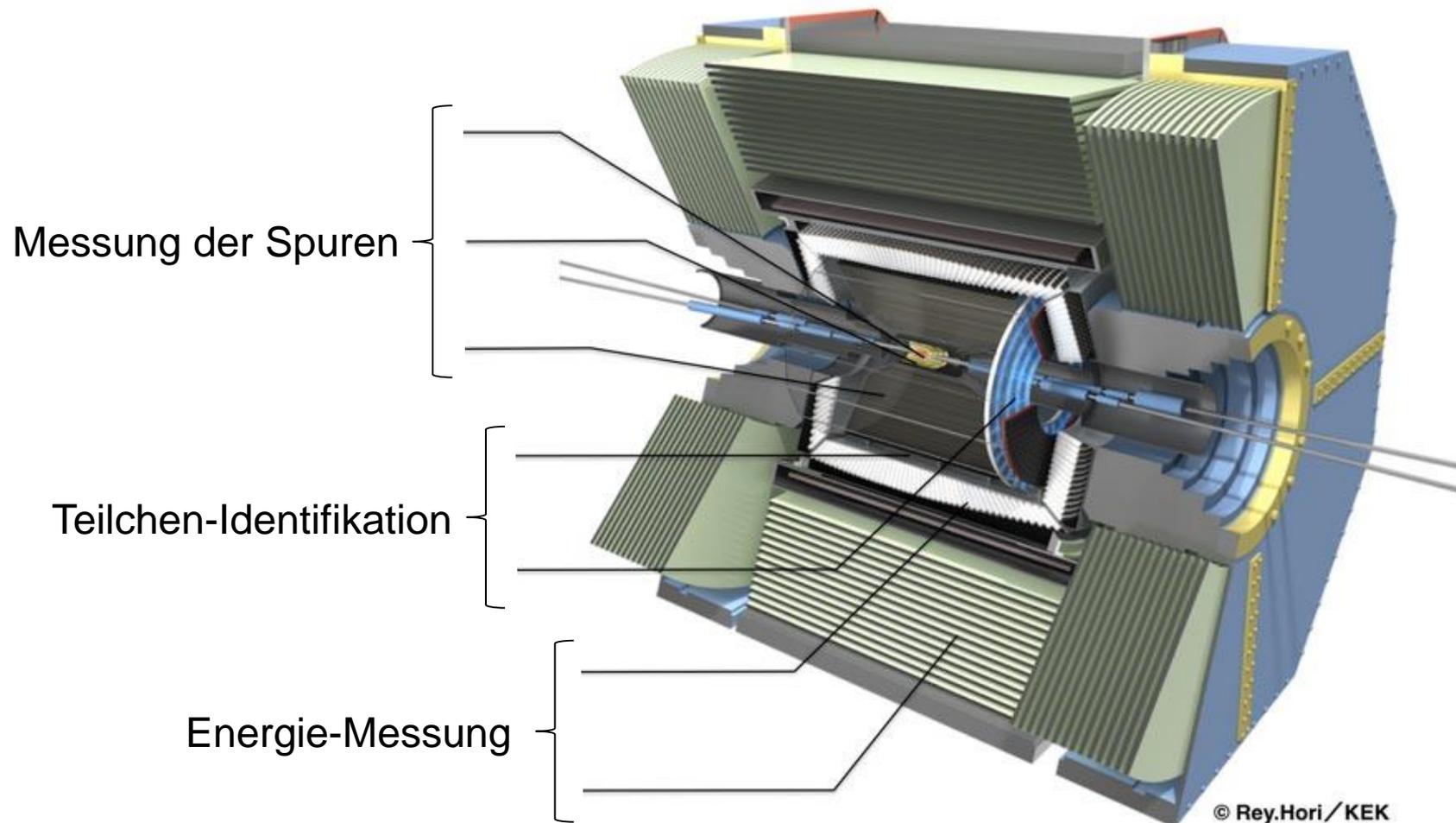
Start von SuperKEK-B/Belle II (2018)



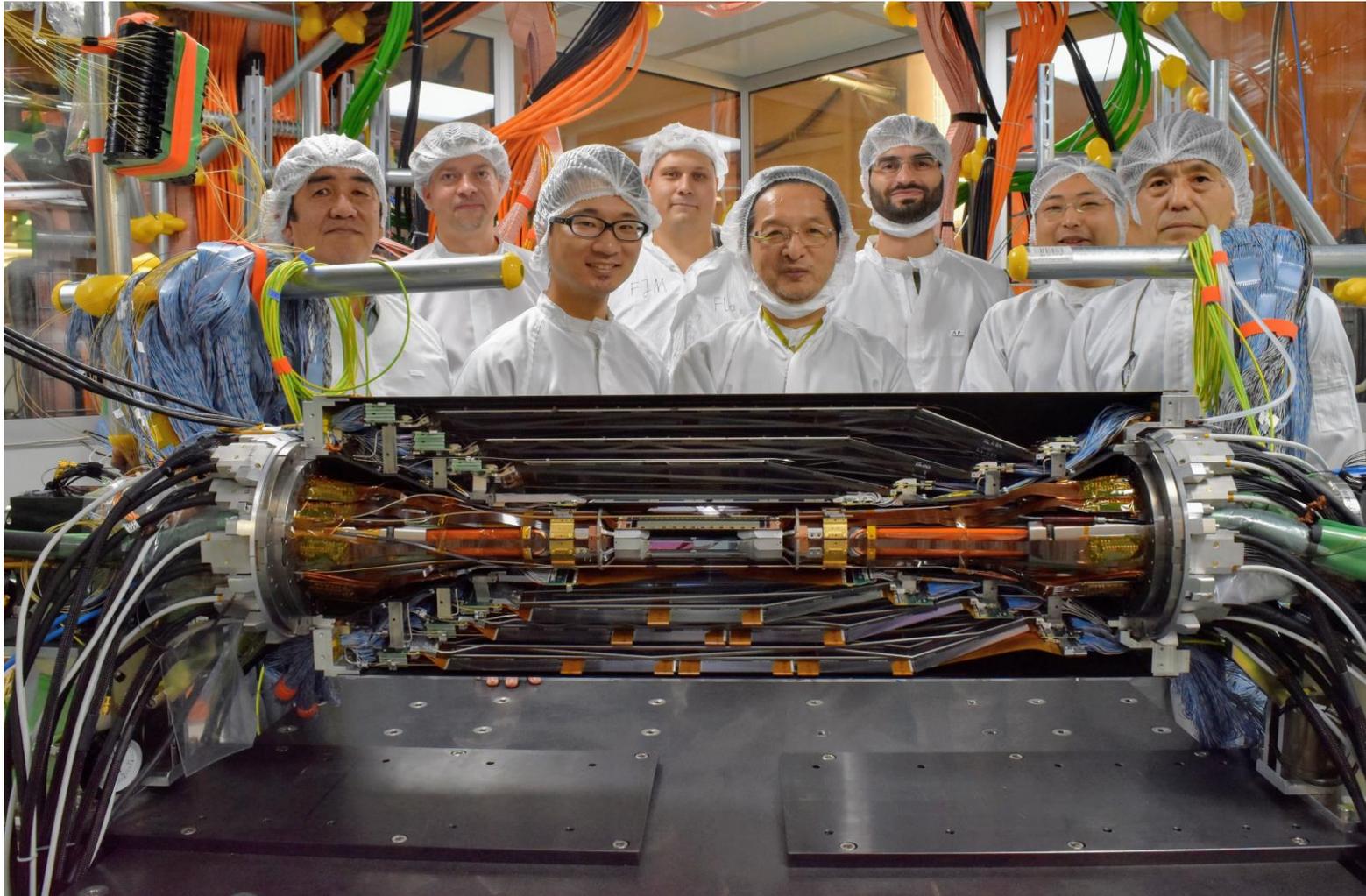
Prinzipieller Aufbau eines Experiments



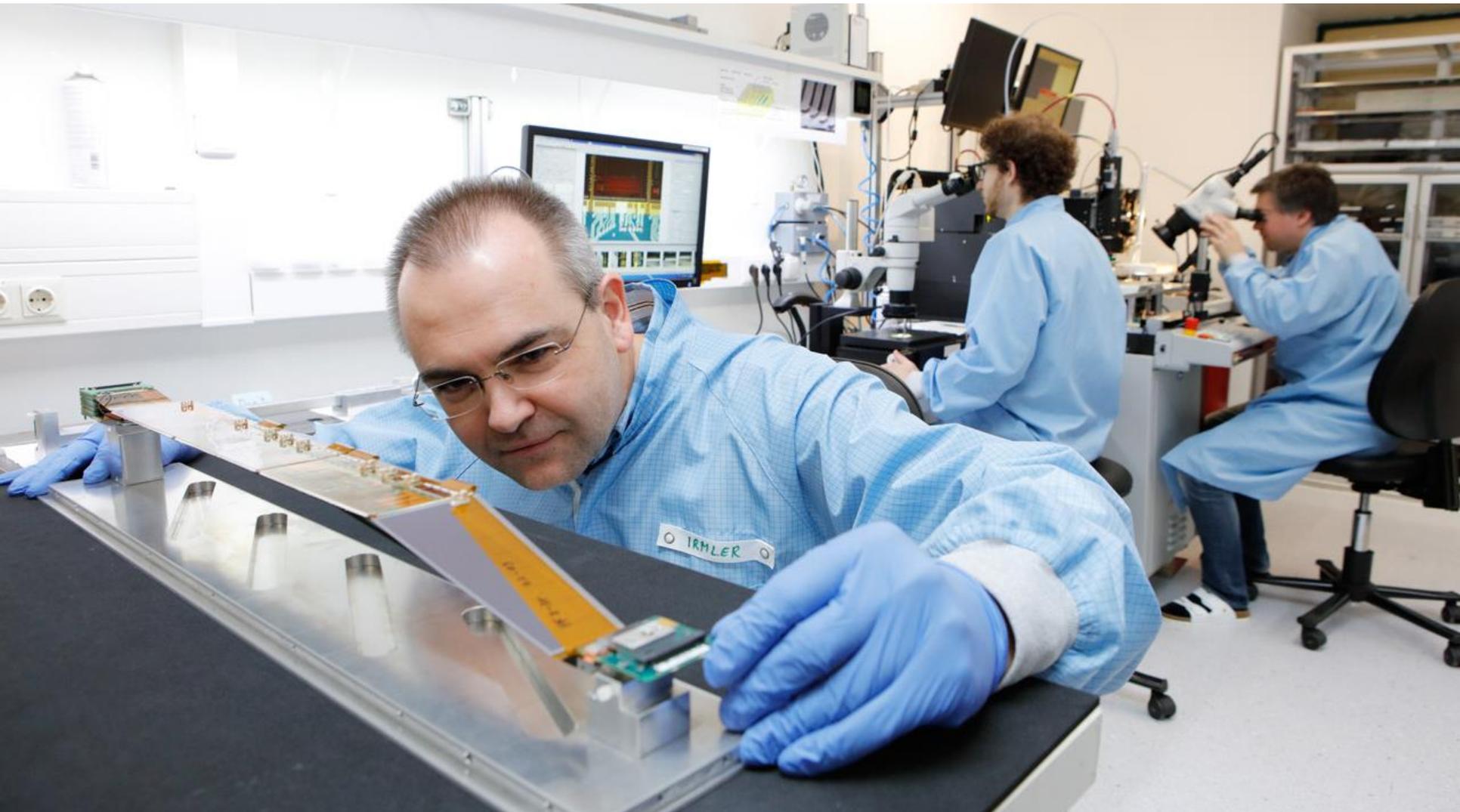
Aufbau von Belle II



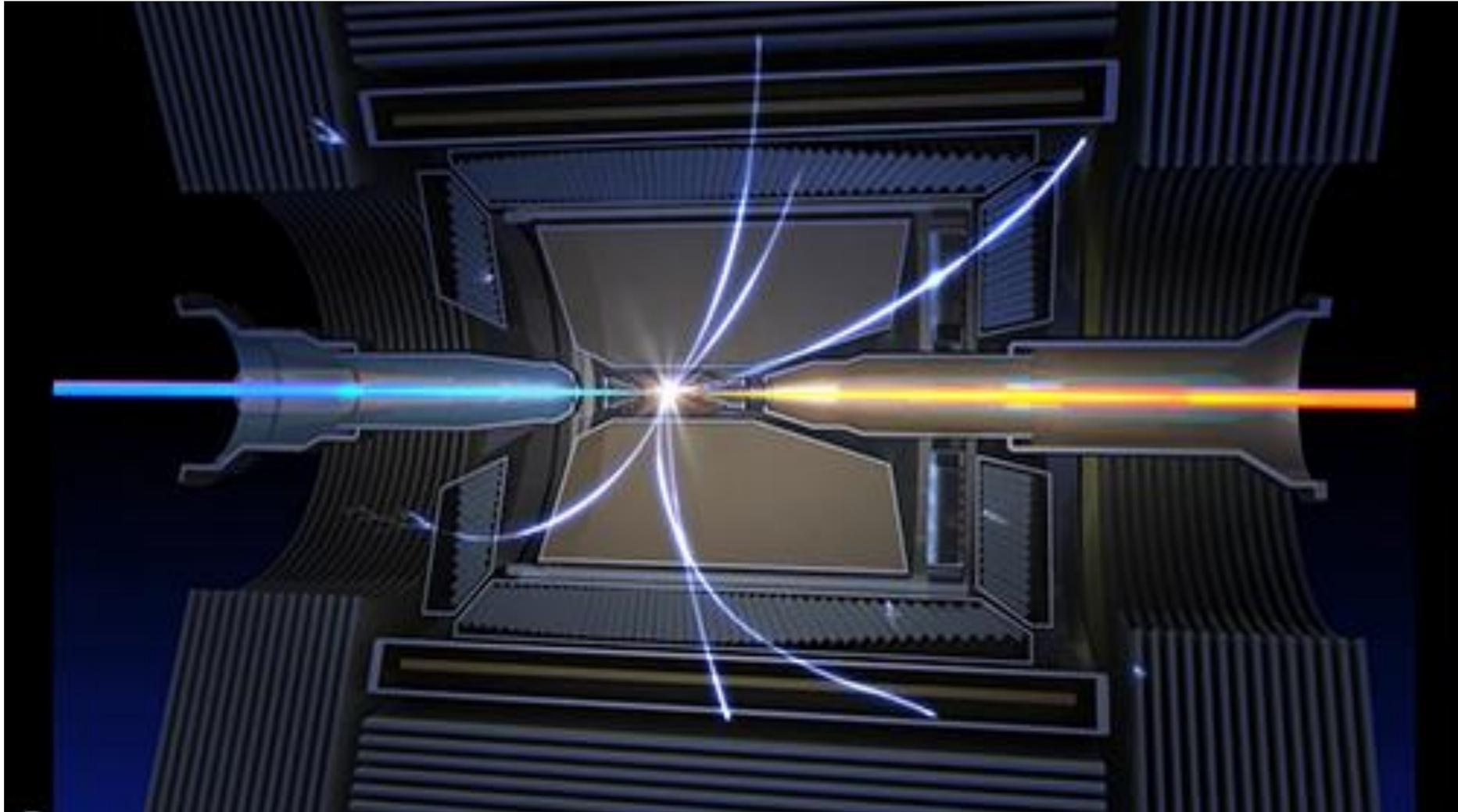
Pixel (PXD) + Silicon Vertex Detector (SVD)



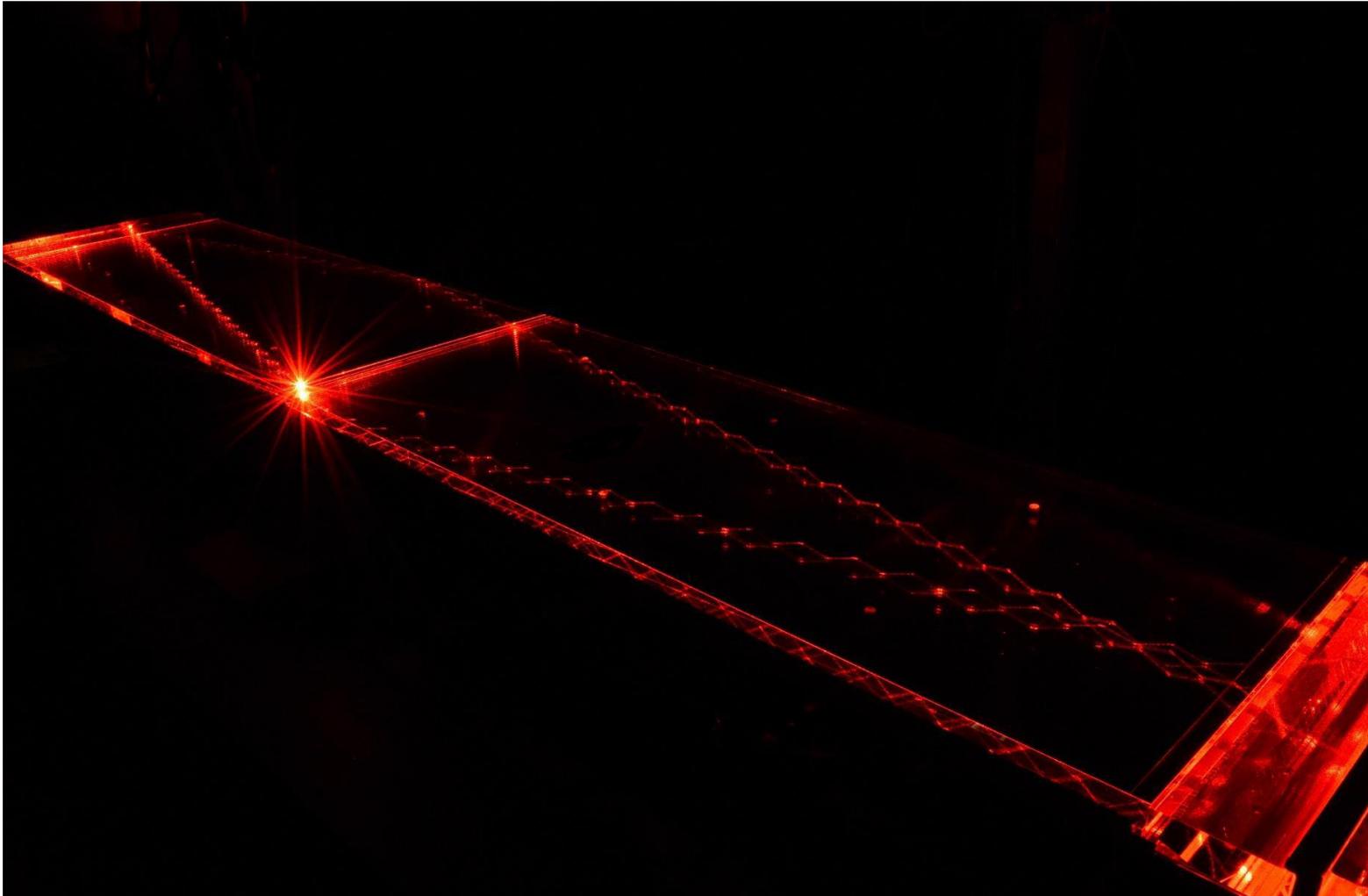
Ein Teil des SVD wurde bei uns gebaut



Central Drift Chamber (CDC)



Time of Propagation Detector (TOP)

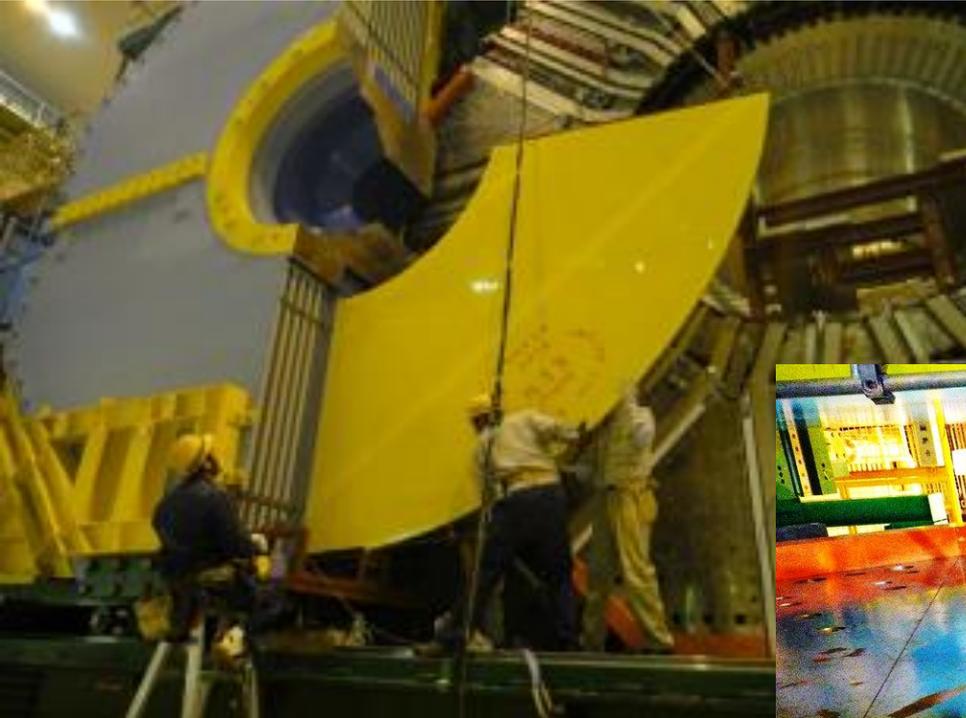


Aerogel Ring Imaging Cherenkov Detector (ARICH)

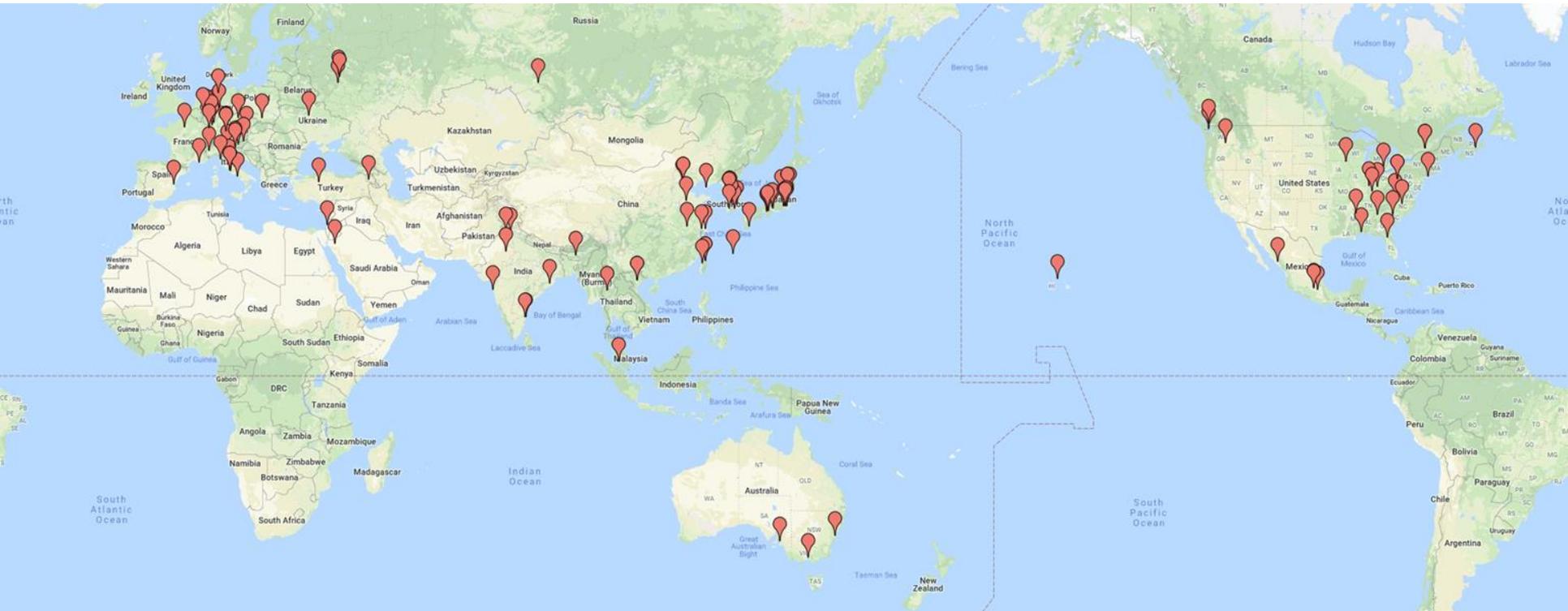


„Überschall-Knall“:
Teilchen, die
schneller als das
Licht im Aerogel
sind, erzeugen
blaues Licht

Electromagnetig Calorimeter (ECL) and K_L /Muon Detector (KLM)



Belle II-Kollaboration



- Über 1000 Wissenschaftler aus 26 Ländern
- ...und es werden laufend mehr

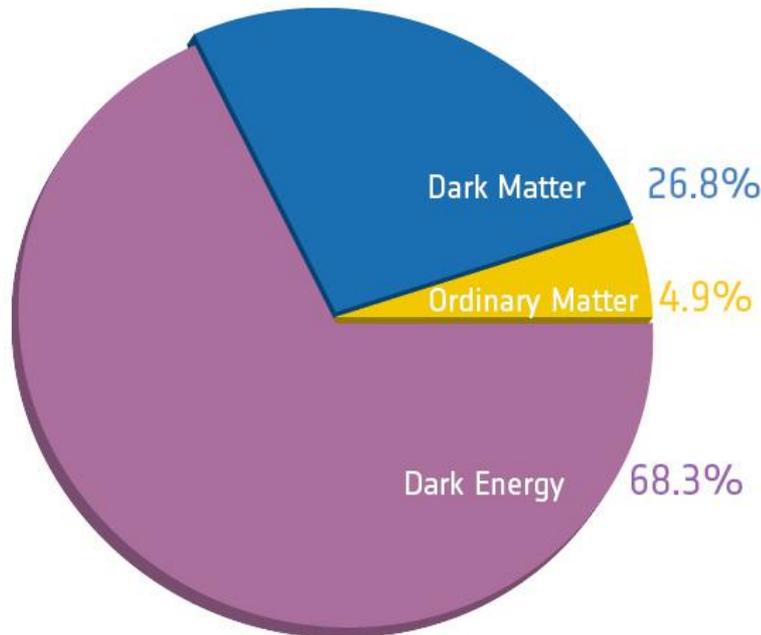
Was habe ICH davon?

5 Beispiele



1. Erkenntnisgewinn

Im Grunde sind wir neugierig



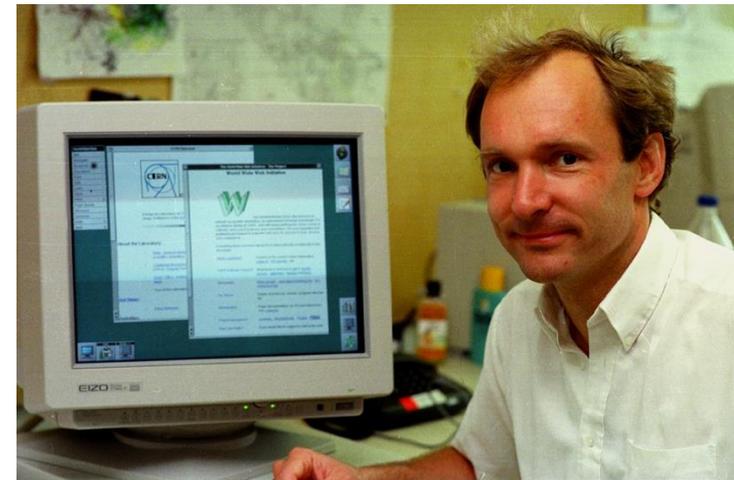
all?
de
um
ta
tin
riv



Zusammengesetzte Aufnahme aus normaler Materie (rot) und Dunkler Materie (blau)

2. Das World Wide Web

- Erfunden am CERN von Tim Berners-Lee
- Text mit Hyperlinks
 - Einfache und schnelle Methode um wissenschaftliche Ergebnisse auszutauschen
- Erster Webserver lief am CERN



3. Krebstherapiezentrum MedAustron

- Therapiezentrum für
Krebstumore bei Wiener
Neustadt
 - Baubeginn 2011
 - Erste Patientenbehandlung
2016
 - Verwendet
Beschleunigertechnik vom
CERN
- 15 Forscher „lernten“ am
CERN Beschleuniger-
technik

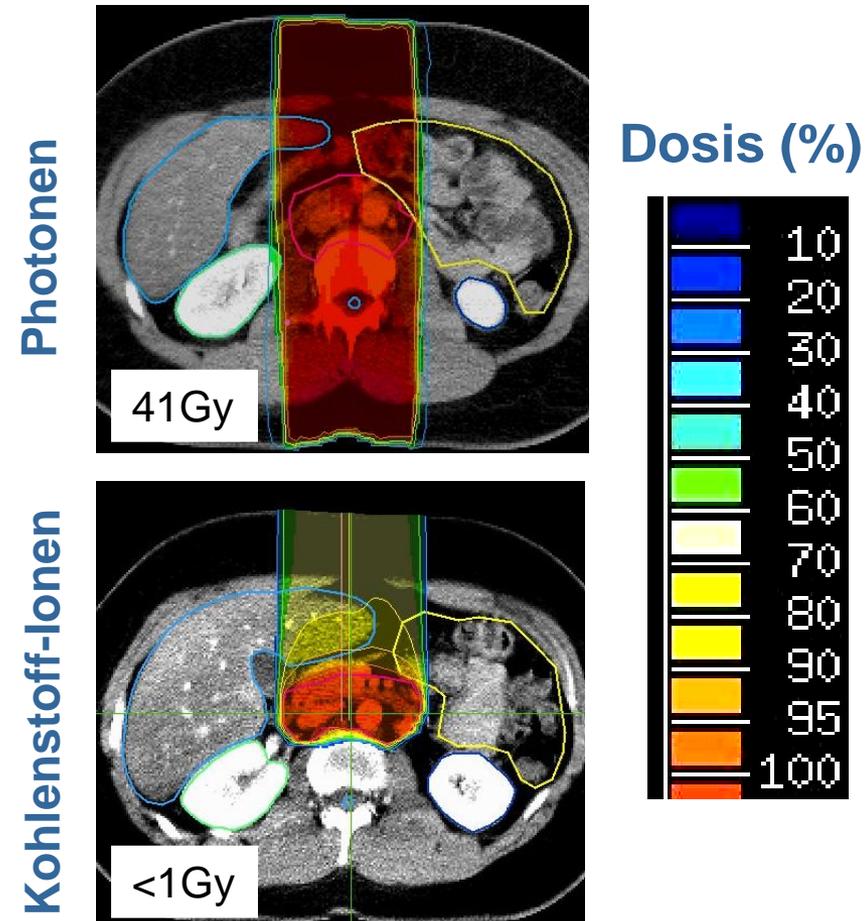


3. Krebstherapiezentrum MedAustron



Tumorbestrahlung mit Hadronen

- Vorteile gegenüber Bestrahlung mit Elektronen oder Photonen
- Hadronen schädigen gezielt Tumorgewebe und verschonen „gutes“ Gewebe vor dem Tumor (Bsp: Rückenmark)
- Physik: „Bragg-Peak“
- Nachteile
 - Technik komplizierter als Elektronen oder Gamma-Bestrahlungseinrichtungen
 - Großer Beschleuniger benötigt



4. Positron-Emissions-Tomographie

- Bildgebenes Verfahren in der Nuklearmedizin
- Verwendet Antimaterie, um Signal in Detektoren zu erzeugen.
- Patienten wird ein Radiopharmaka verabreicht, dass Positronen beinhaltet
- Positronen reagieren mit Elektronen und erzeugen zwei Lichtblitze in genau entgegengesetzte Richtungen
- Detektierung der Lichtblitze mittels Szintillatoren und Photomultiplier
- Bildentstehung im Computer

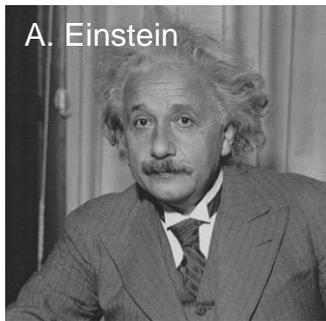


5. Ausbildungsmöglichkeiten

- HEPHY, KEK und CERN bieten ein exzellentes Arbeitsumfeld
- StudentInnen können Diplomarbeit oder Dissertation machen
 - Physik
 - Elektrotechnik
 - Maschinenbau
 - Informatik
- Wissen wird nach Abschluss wieder nach Österreich zurückgebracht



Grundlagenforschung als Motor für Innovation



Relativitätstheorie
100%
Wissenschaft



J.C. Maxwell



Elektromagnetismus
100%
Wissenschaft



ENDE

Mehr Informationen im Internet unter

www.hephy.at

www.kek.jp