

# Teilchendetektoren

---

Daniel Muenstermann

# Teilchen? Detektoren?

---

Bisher: Viele Teilchen, Wechselwirkungen, Symmetrien, ... - aber alles recht theoretisch. Und wie geht das praktisch?

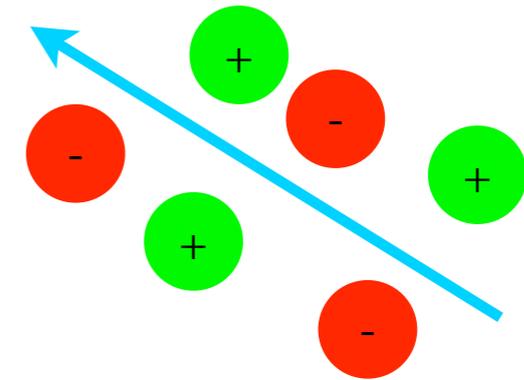
- ▶ Nachweis von Teilchen - “da war was”
  - ▶ Identifikation von Teilchen - “was war es denn?”
  - ▶ Messung von Teilcheneigenschaften
    - ▶ Impuls
    - ▶ Energie
    - ▶ Ladung
    - ▶ Entstehungsort/Vertex
- ➡ Verständnis des physikalischen Vorgangs

# Nachweis von Teilchen

---

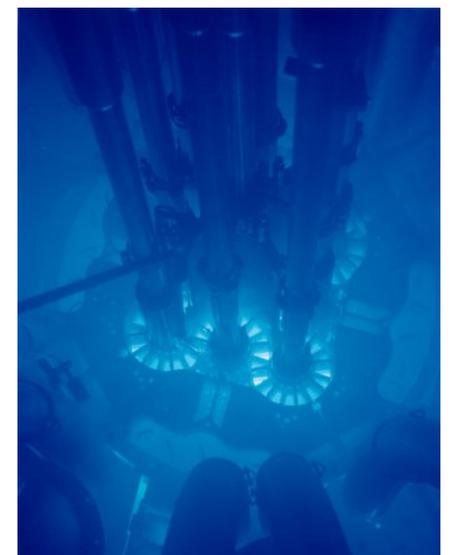
“War da was?” Wie weist man Teilchen überhaupt nach?

- ▶ Standardmodell: 4 Wechselwirkungen (stark, schwach, elektromagnetisch, gravitativ)
  - ▶ Für Teilchendetektoren interessant:
    - ▶ elektromagnetisch
    - ▶ stark (in bestimmten Fällen...)



Warum?

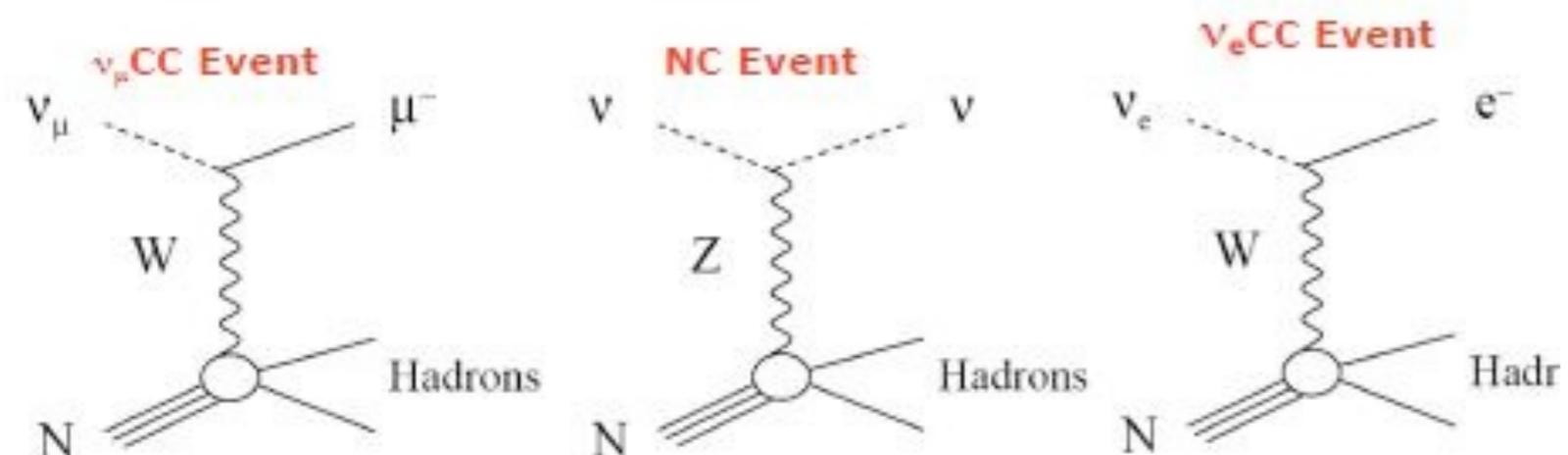
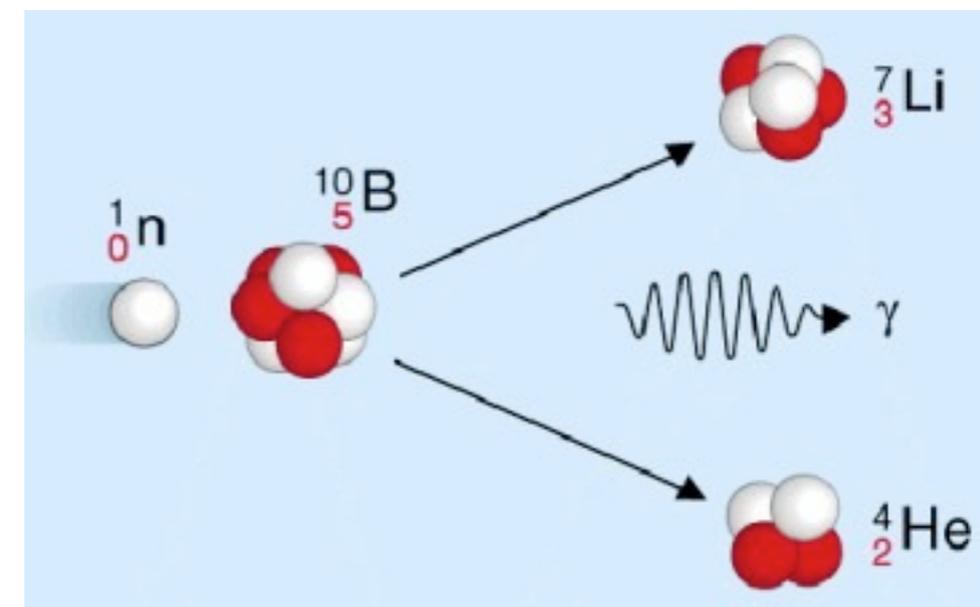
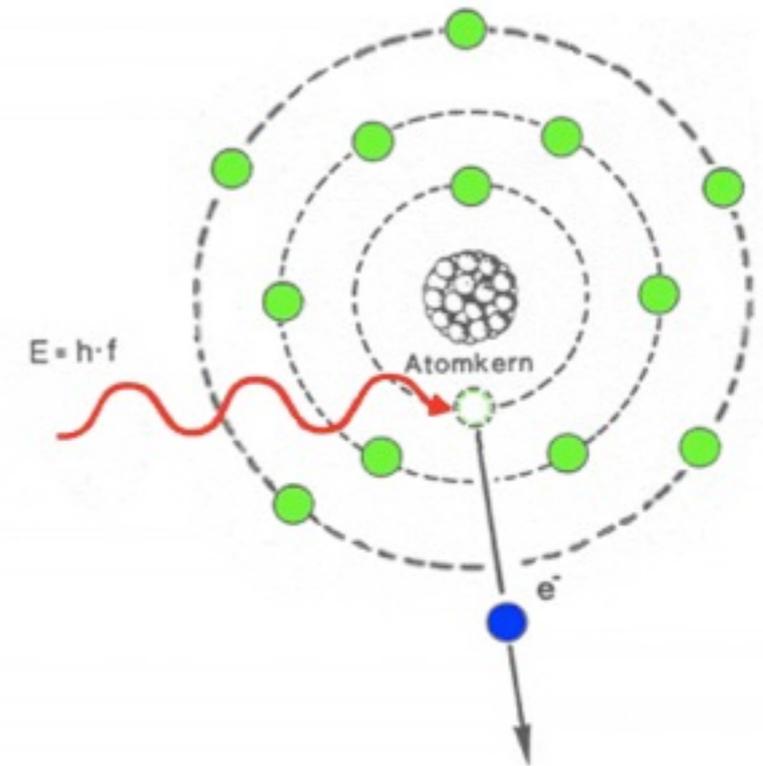
- ▶ Alle direkten Teilchennachweise basieren auf der elektrischen Ladung der Teilchen
  - ▶ Wechselwirkung mit Materie
    - ▶ Geladene Teilchen ionisieren beim Durchgang durch Materie, Ladung ist gut nachweisbar
  - ▶ Etwas ungewöhnlicher: (Direkte) Emission von Photonen
    - ▶ Cherenkov-Strahlung
    - ▶ Übergangsstrahlung (transition radiation)



# Indirekter Nachweis

Äh, nur geladene Teilchen? Und was ist mit den Anderen? Tja, Beispiele:

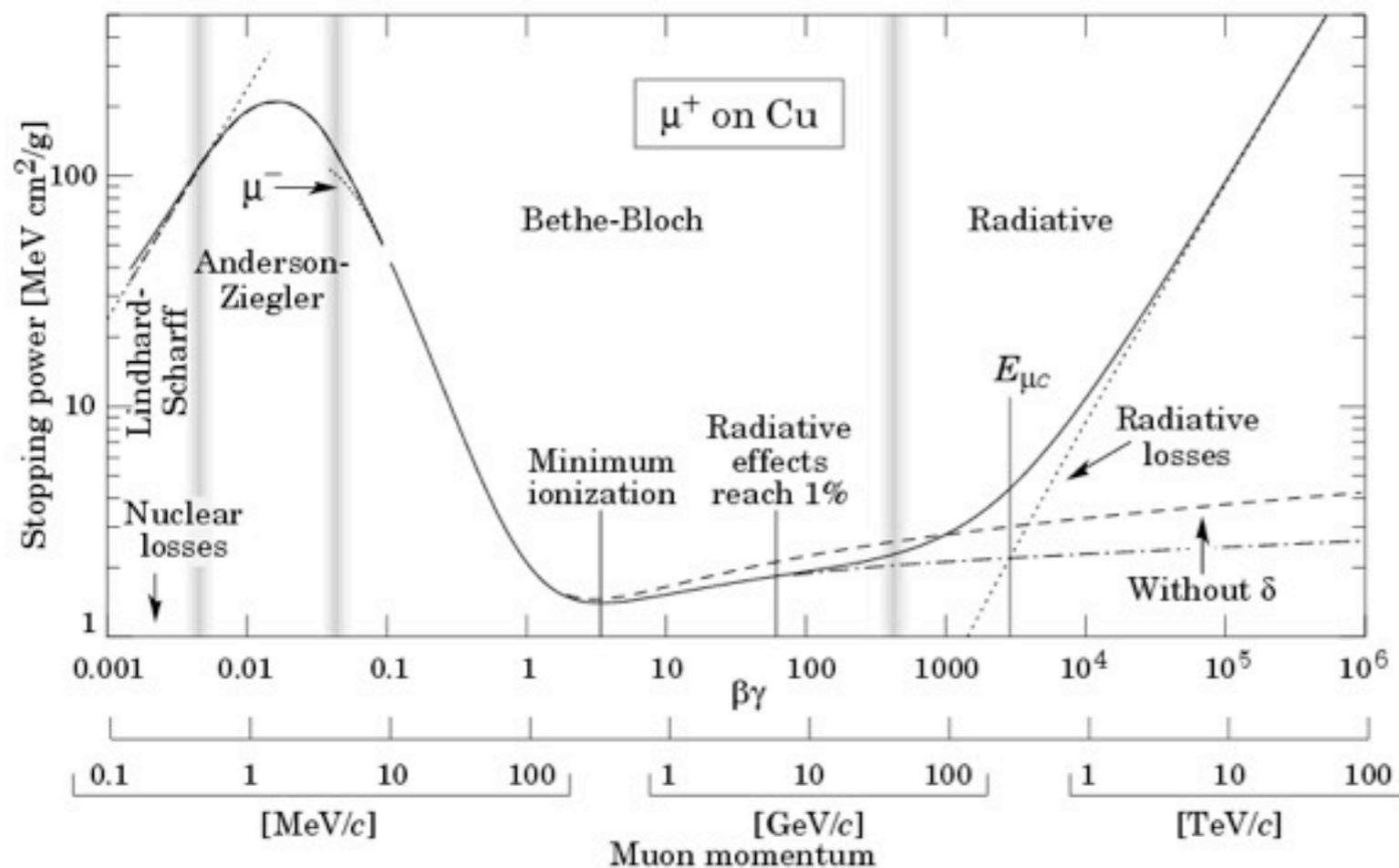
- ▶ Photonen (Gammas, Röntgenstrahlung)
  - ▶ Umwandlung in Elektronen durch Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung
- ▶ Neutronen
  - ▶ Nachweis üblicherweise durch Einfang => Emission von geladenen Teilchen
- ▶ Neutrinos
  - ▶ Streuung oder Einfang erzeugen wieder geladene Teilchen



# Direkter Nachweis

- ▶ Wechselwirkung geladener Teilchen mit Materie wird durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben - Ausnahme: Elektronen (kleine Ruhemasse)
- ▶ Merke:
  - ▶ Große Ionisationsverluste bei niedrigen Energien
  - ▶ Minimum bei  $\approx 0.3 \text{ GeV}$  => MIP

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2}{m_e c^2 \beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$



wobei

$$\beta = v/c$$

$v$  = momentane Geschwindigkeit des Teilchens

$c$  = Lichtgeschwindigkeit

$E$  = Energie des Teilchens

$x$  = Weglänge

$z$  = Ladungszahl des Teilchens ( $z \cdot e$  = Ladung des Teilchens)

$\epsilon_0$  = Elektrische Feldkonstante

$e$  = Elementarladung

$n$  = Elektronendichte des Materials

$m_e$  = Ruhemasse des Elektrons

$I$  = mittleres Anregungspotential des Materials (s.u.)

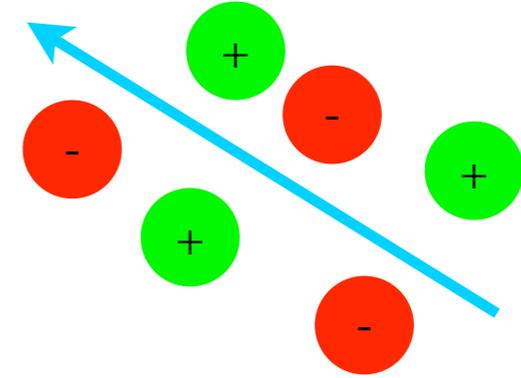
# Ionisation

---

Wie?

- ▶ Naiv gesprochen: Geladenes Teilchen “pflügt” durch das Medium; offensichtliche Stoßpartner sind die Elektronen in den Atomhüllen

Und dann?



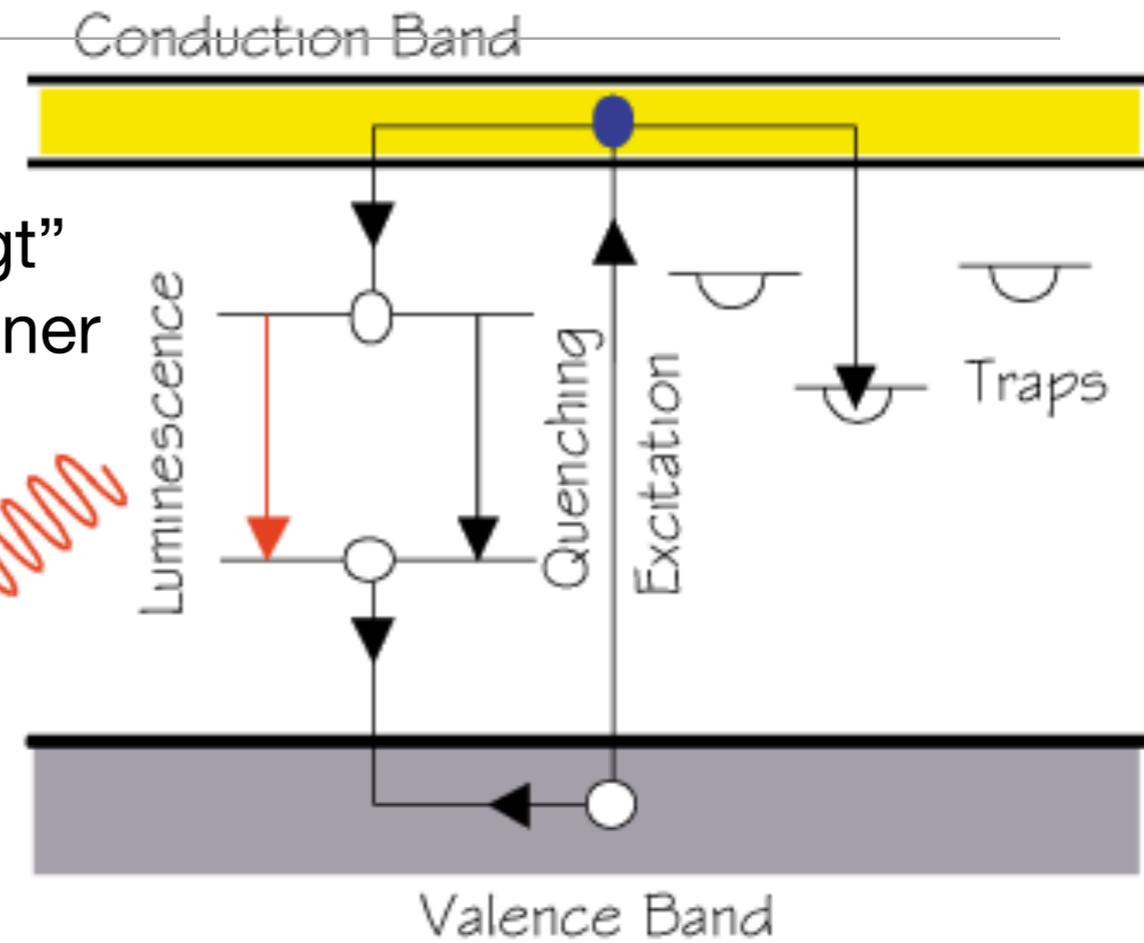
# Ionisation

Wie?

- ▶ Naiv gesprochen: Geladenes Teilchen “pflügt” durch das Medium; offensichtliche Stoßpartner sind die Elektronen in den Atomhüllen

Und dann?

- ▶ Sofern nichts passiert, werden die herausgeschlagenen Elektronen nach gewisser Zeit mit den Ionen rekombinieren
  - ▶ Dabei kann ggf. Licht emittiert werden (Szintillation)
  - ▶ Im Detail komplexer Vorgang



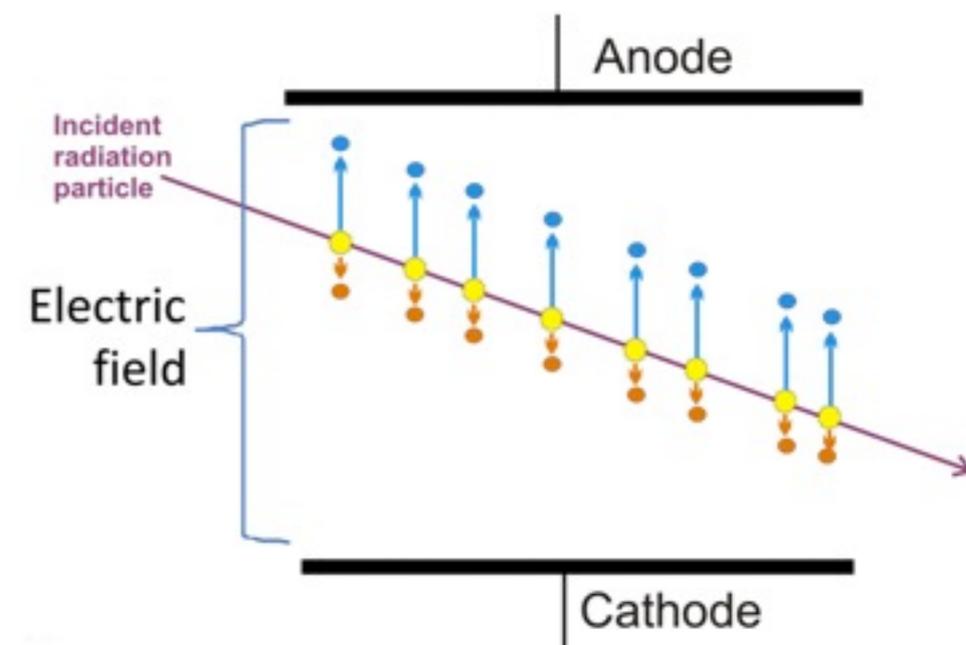
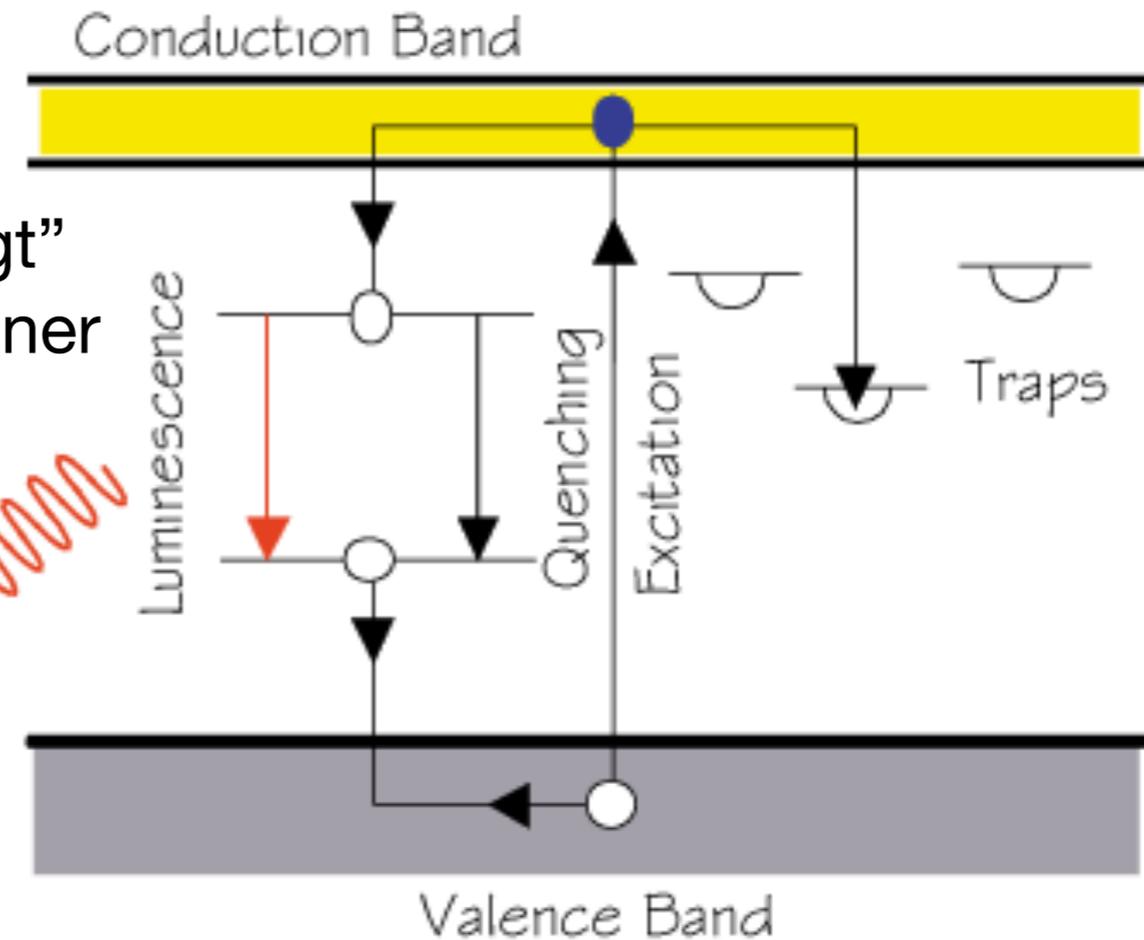
# Ionisation

Wie?

- ▶ Naiv gesprochen: Geladenes Teilchen “pflügt” durch das Medium; offensichtliche Stoßpartner sind die Elektronen in den Atomhüllen

Und dann?

- ▶ Sofern nichts passiert, werden die herausgeschlagenen Elektronen nach gewisser Zeit mit den Ionen rekombinieren
  - ▶ Dabei kann ggf. Licht emittiert werden (Szintillation)
    - ▶ Im Detail komplexer Vorgang
- ▶ Anlegen eines elektrischen Feldes verhindert die Rekombination, die Ladungsträger werden getrennt und driften auseinander
  - ▶ Ladung kann auf Elektroden “gesammelt”, verstärkt und gemessen werden

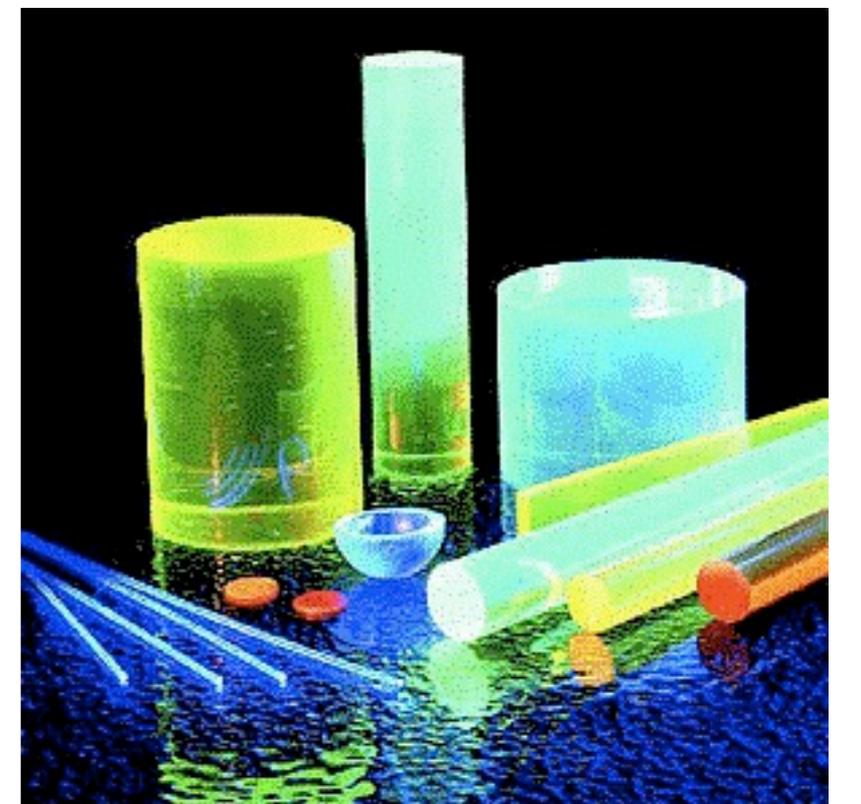
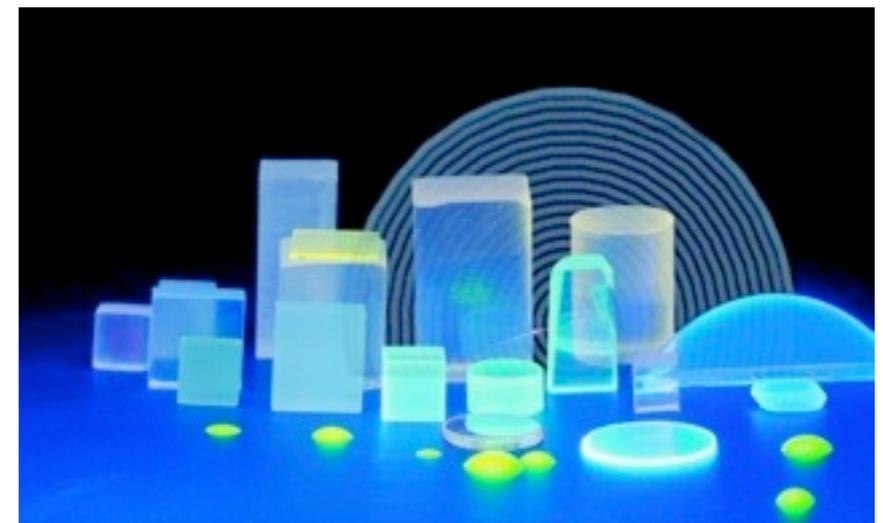


# Szintillatoren

Im Detail komplex, aber allen Szintillatoren ist gemein, dass sie einen (sehr kleinen) Teil der deponierten Energie als Lichtquanten wieder abstrahlen

## ► Verschiedene Typen:

- Anorganische Kristalle: Z.B. NaI, CsI, BGO, PbWO<sub>4</sub>. Eher langsam, hohe Lichtausbeute. Teilweise recht strahlenhart.
- Organisch: Als Kristall, aber auch als Plastik oder flüssig. Schnell, geringere Lichtausbeute. Eher nicht strahlenhart. In vielen Formen erhältlich, teilweise recht preiswert.
- Edelgase (!) szintillieren auch, dies wird tatsächlich genutzt...
- Eher exotisch: Szintillierende Gläser



# Szintillatoren

## ► Einige anorganische Kristalle

| Material   | Typ               | Dichte [g/cm <sup>3</sup> ] | max. Emission bei $\lambda$ [nm] | Lichtausbeute [% Anthracen] | Abklingzeit* [ns] |
|--|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| NaI  | anorgan. Kristall | 3.67                        | 303 <sup>‡</sup>                 | 440 <sup>‡</sup>            | 60 <sup>‡</sup>   |
| NaI:Tl   | anorgan. Kristall | 3.67                        | 413                              | 230                         | 230               |
| LiI:Eu   | anorgan. Kristall | 4.06                        | 475                              | 75                          | 1200              |
| CsI  | anorgan. Kristall | 4.51                        | 400 <sup>‡</sup>                 | 500 <sup>‡</sup>            | 600 <sup>‡</sup>  |
| CsI:Tl   | anorgan. Kristall | 4.51                        | 580                              | 95                          | 1100              |
| BaF <sub>2</sub>   | anorgan. Kristall | 4.9                         | 310                              | 46                          | 620               |
| CeF <sub>3</sub>   | anorgan. Kristall | 6.16                        | 310–340                          | 23                          | 30                |
| BGO (= Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> ) | anorgan. Kristall | 7.13                        | 480                              | 35–45                       | 350               |
| GSO (= Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce)             | anorgan. Kristall | 6.71                        | 430                              | 45–60                       | ≈50               |
| PbWO <sub>4</sub>  | anorgan. Kristall | 8.28                        | 440–500                          | ≈2.5                        | 5–15              |

\*der Hauptkomponente

‡ bei T = 77 K

Quellen, u.a.: <http://www.mkt-intl.com/crystals/scintcrystal.htm>; C. Grupen, *Teilchendetektoren*, B.I. Wissenschaftsverlag, 1993; W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer 1987

# Szintillatoren

## ► Einige organische Szintillatoren

| Material      | Typ                          | Dichte [g/cm <sup>3</sup> ] | max.Emission bei $\lambda$ [nm] | Lichtausbeute [% Anthracen] | Abklingzeit* [ns] |
|---------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Naphtalen     | organ. Kristall              | 1.46                        | 348                             | 28                          | 11                |
| Anthracen     | organ. Kristall              | 1.25                        | 440                             | 100                         | 30                |
| trans-Stilben | organ. Kristall              | 1.16                        | 410                             | 50                          | 4.5               |
| p-Terphenyl   | in flüssiger Lösung, Plastik | –                           | 440                             | ≈58                         | 5                 |
| t-PBD         | in flüssiger Lösung, Plastik | –                           | 360                             | –                           | 1.2               |
| PPO           | in flüssiger Lösung, Plastik | –                           | 355                             | –                           | ?                 |

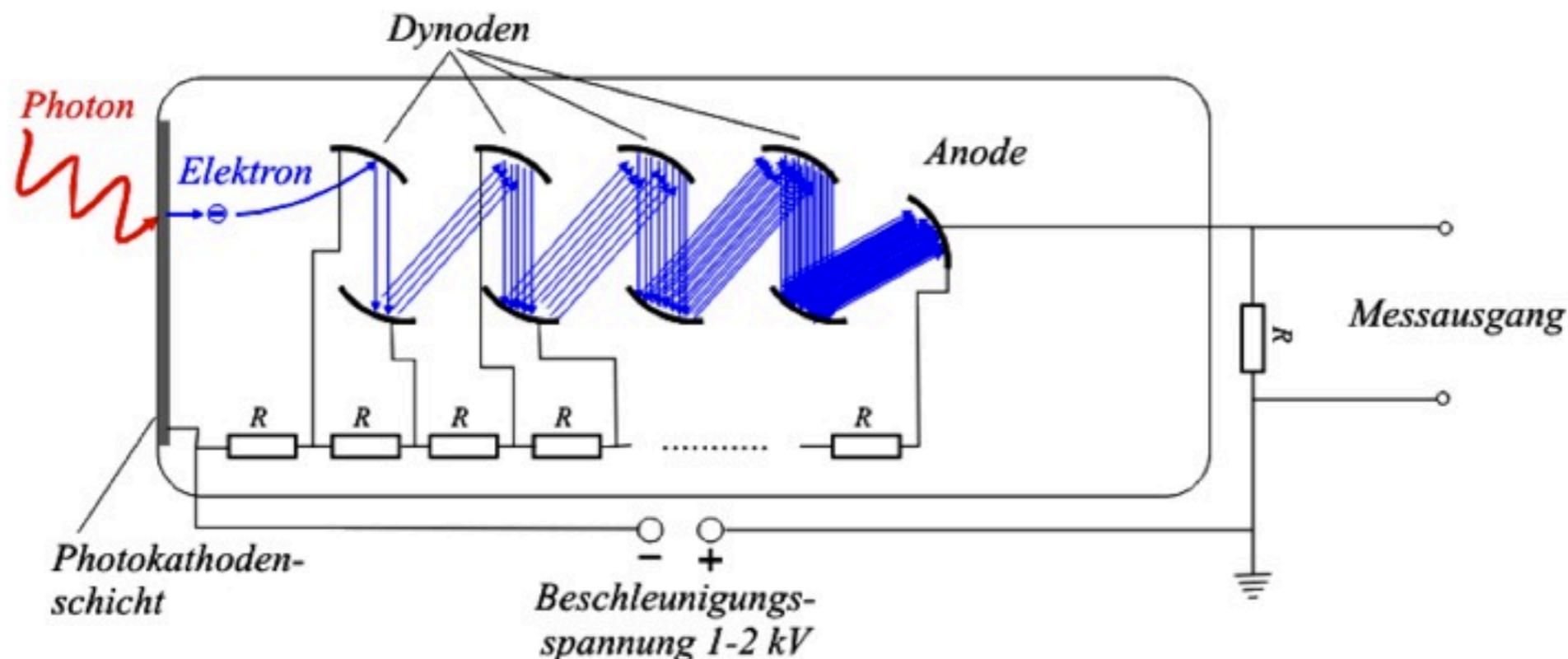
\*der Hauptkomponente

Quellen, u.a.: <http://www.mkt-intl.com/crystals/scintcrystal.htm>; C. Grupen, *Teilchendetektoren*, B.I. Wissenschaftsverlag, 1993; W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer 1987

# Lichtnachweis

Nun haben wir (wenig) Licht - wie kann man dieses Detektieren?

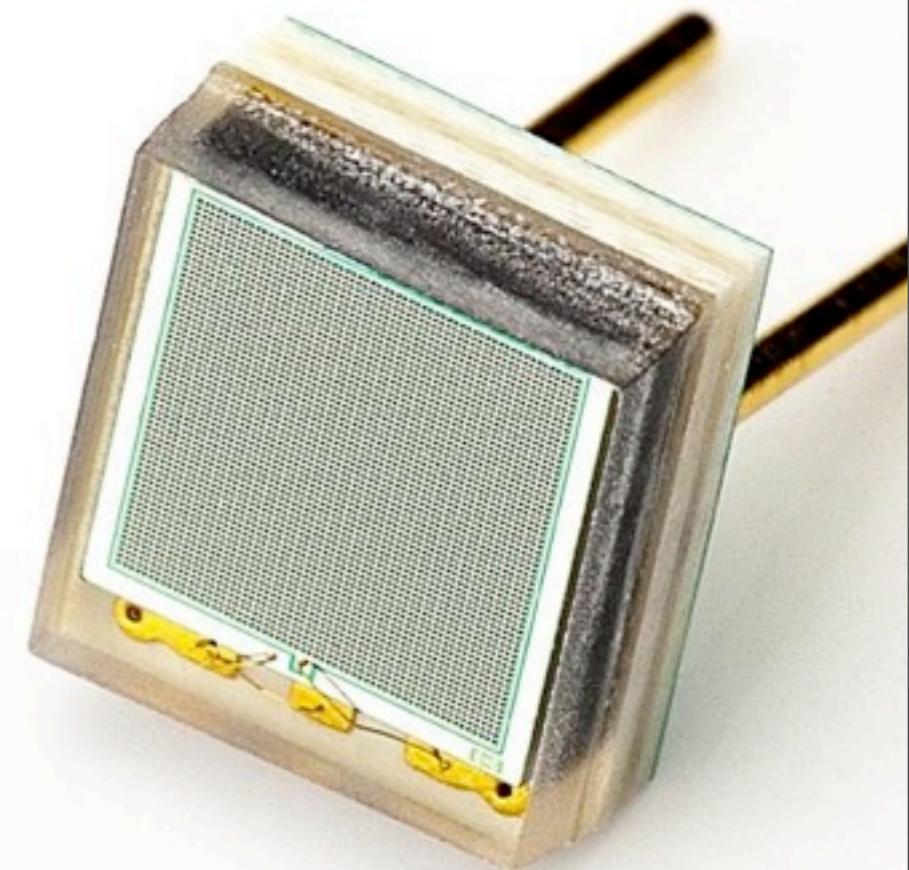
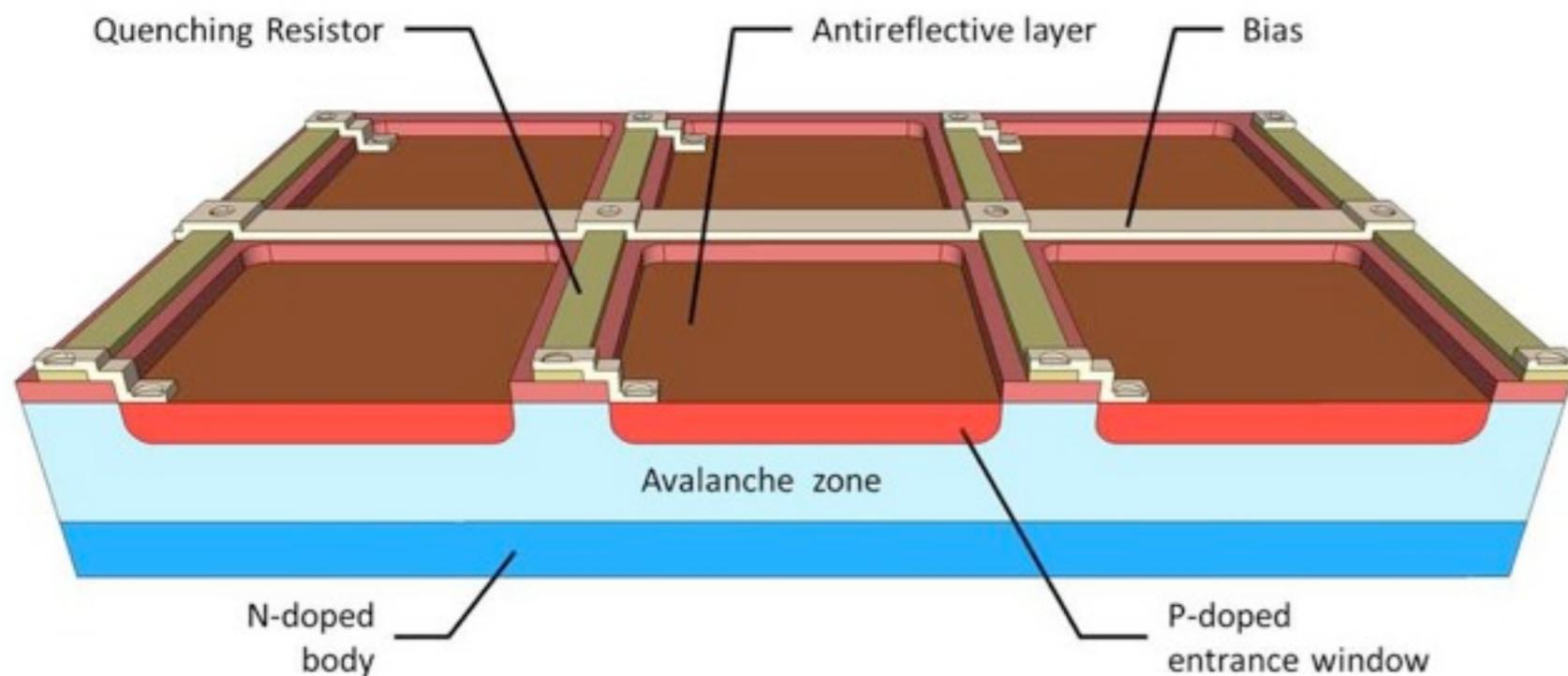
- ▶ Klassisch: Photomultiplier oder im besten Amtsdeutsch: Sekundärelektronenvervielfacher (SEV)...
- ▶ Vakuumröhren, primäre Elektronen einer Photokathode mit geringer Austrittsarbeit werden beschleunigt und schlagen beim Auftreffen auf eine Dynode mehrere Elektronen heraus
- ▶ Macht man das mehrere Male, erhält man einen makroskopischen Strompuls, den man mit geeigneter Elektronik aufnimmt
- ▶ Vorteil: Gute Effizienzen, große Flächen. Nachteil: "Handarbeit", teuer, groß.



# Lichtnachweis

Nun haben wir (wenig) Licht - wie kann man dieses Detektieren?

- ▶ Modern: Silizium-Photomultiplier (SiPMs, MPPCs)
  - ▶ Erzeugen die Elektronenvervielfachung durch den kontrollierten Lawinendurchbruch einer Silizium-Diode
  - ▶ Vorteile: Industriell gefertigt, kompakt, niedrige Spannungen, hohe Granularität durch (sehr) viele Kanäle möglich
  - ▶ Nachteile: Teilweise hohe Dunkelrate, geringere Effizienz



# Ladungsmessung

▶ Zunächst einmal einfaches Prinzip: Ladung wird durch Anlegen eines Feldes zu Elektroden gedriftet und dort mittels geeigneter Elektronik nachgewiesen

▶ funktioniert gut bei großen Ladungsmengen, aber wie weist man einzelne Elektronen nach?

➡ Verstärkung

▶ Betriebsmodi:

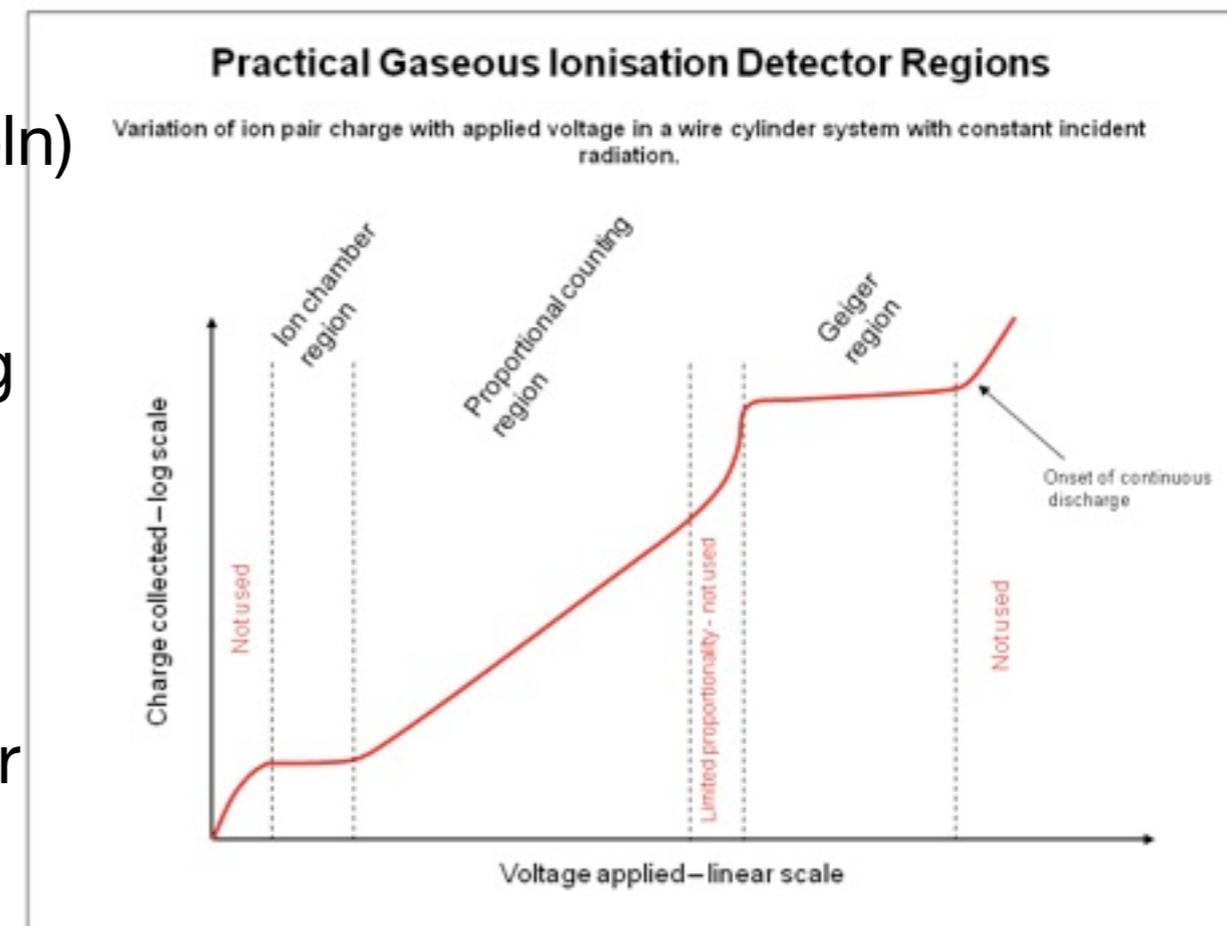
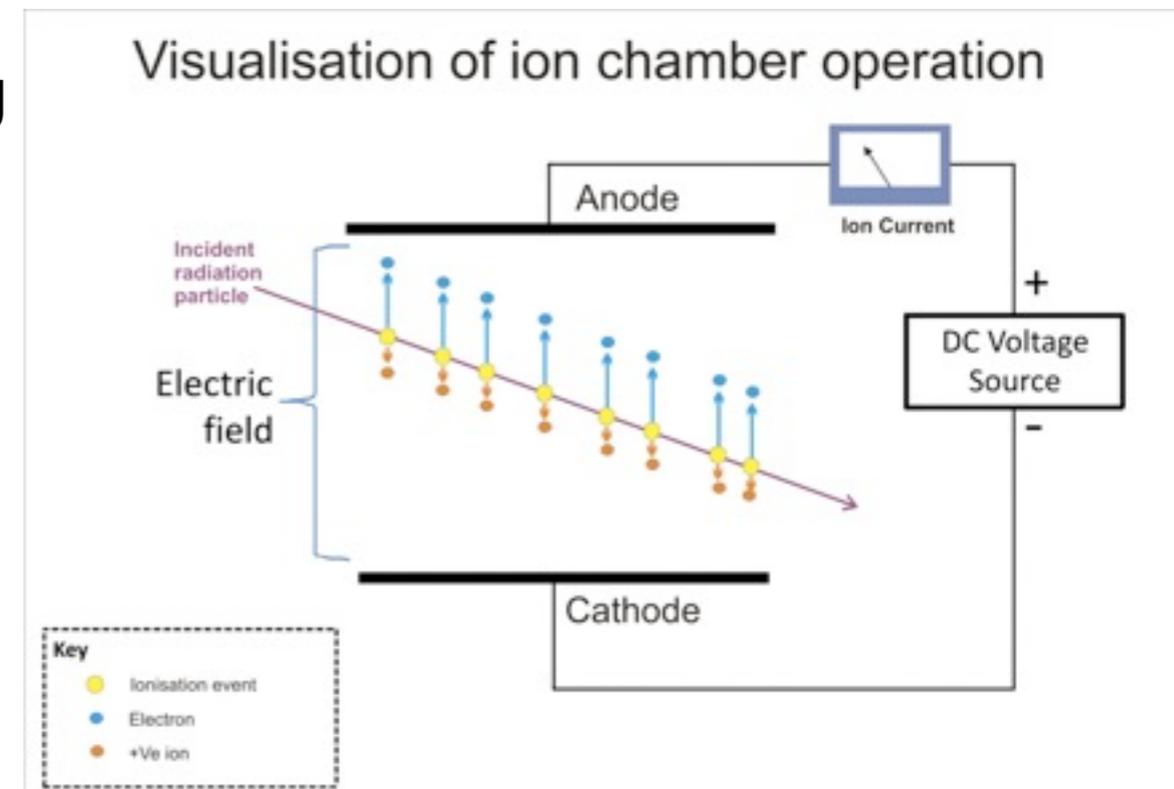
▶ Ionisationskammer (einfaches Sammeln)

▶ Proportionalzählrohr (Gasverstärkung)

▶ proportionale Verstärkung, Erhaltung der primären Ladungsinformation

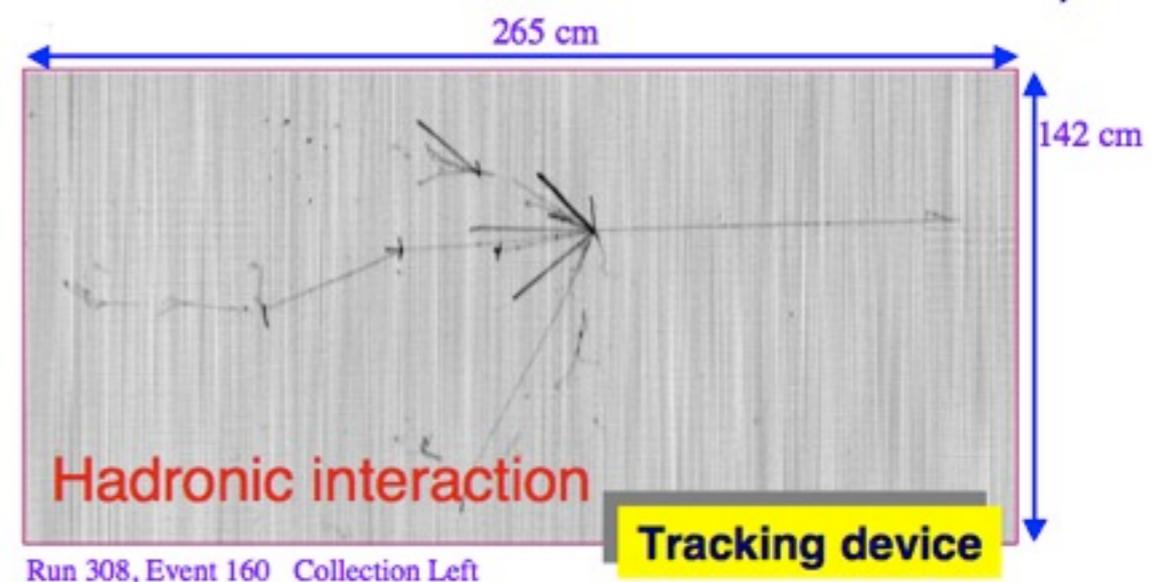
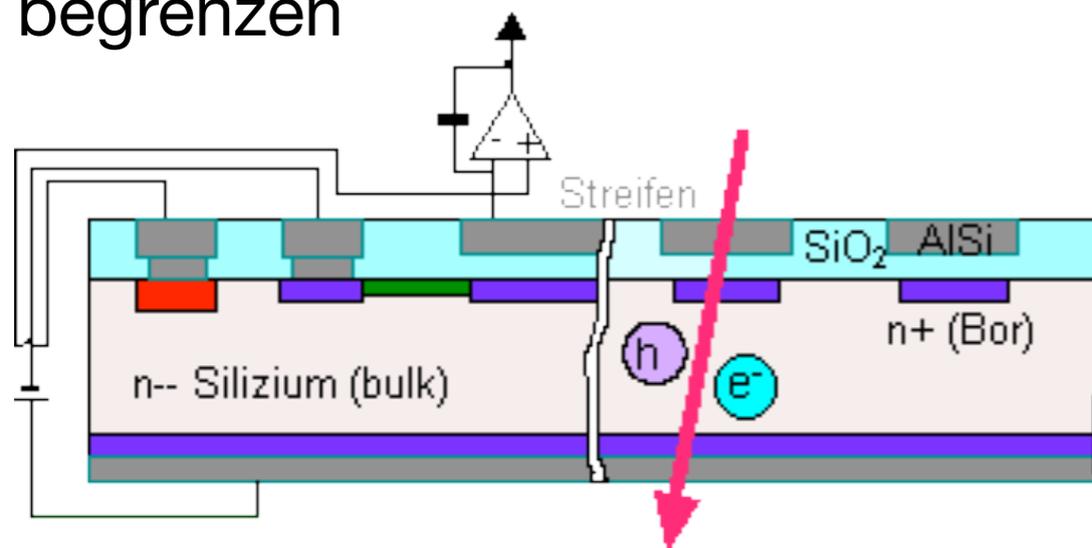
▶ Geiger-Müller-Zählrohr (vollständiges "Zünden" des Gasvolumens)

▶ Verlust der Ladungsinformation, sehr großes Signal



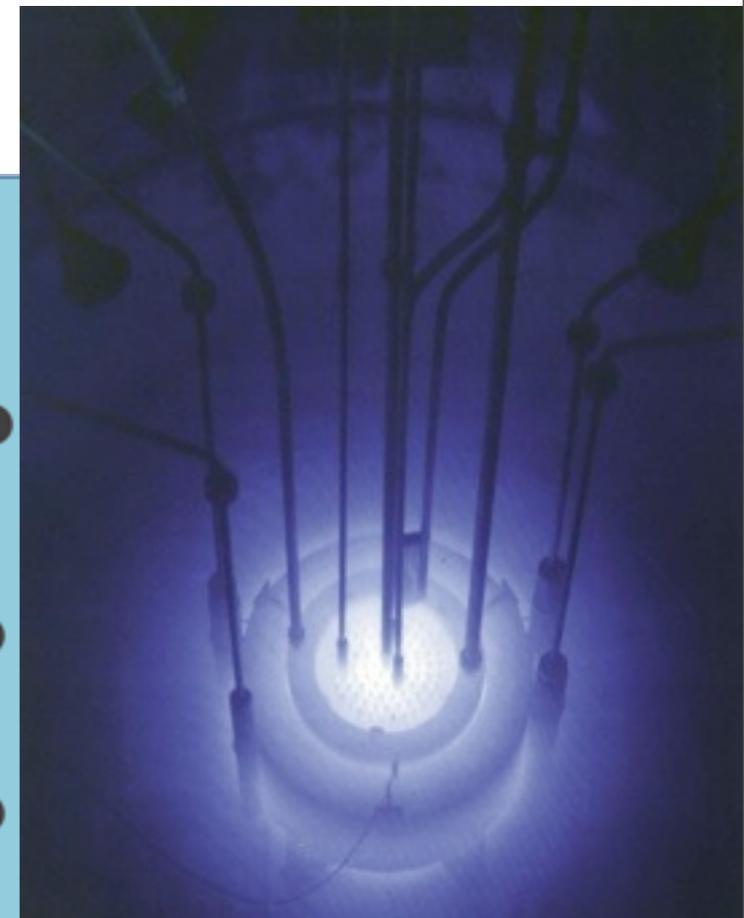
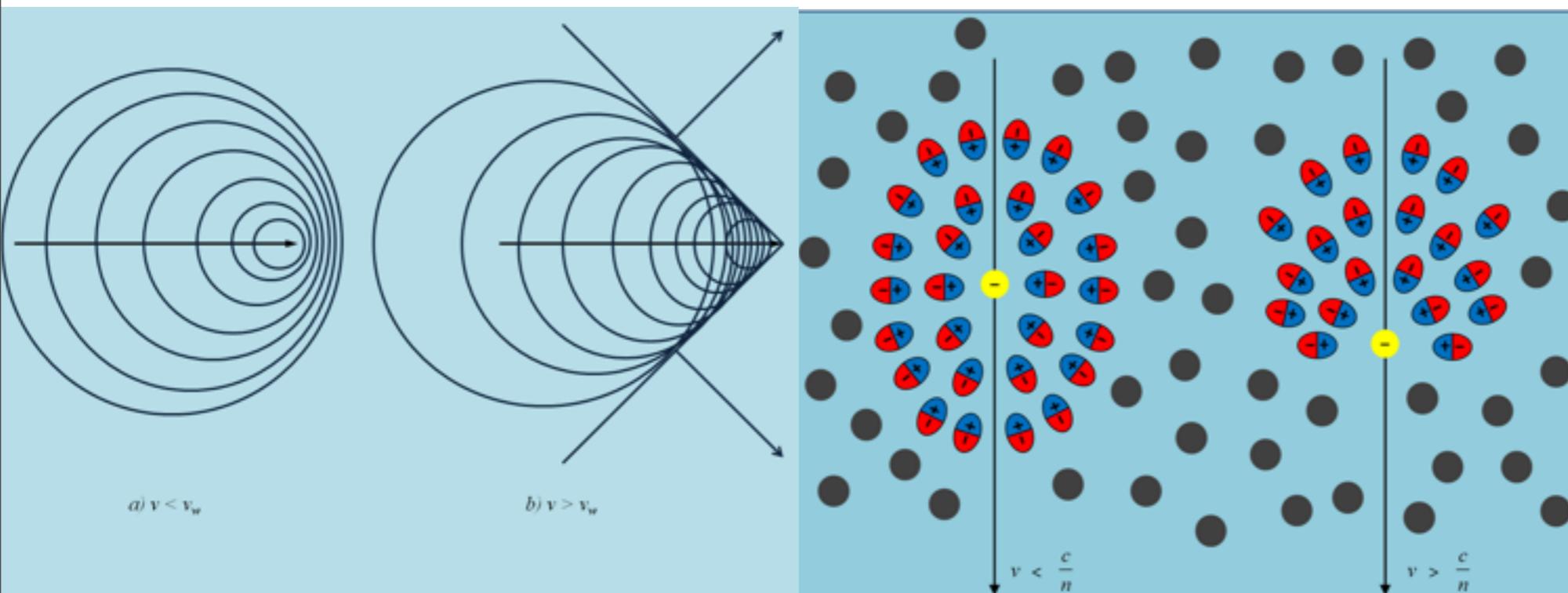
# Wo kann man driften?

- ▶ Ursprünglich: Gase, teilweise Erhöhung der Dichte durch Überdruck
- ▶ Flüssigkeiten
  - ▶ Deutlich höhere Dichte, aber höchste Reinheit nötig!
  - ▶ Verstärkung schwierig: Ionenkammer oder 2-Phasen-Systeme mit Gasverstärkung
  - ▶ Häufig tiefkalte Edelgase (Argon, Xenon), aber auch Flüssigszintillatoren
- ▶ Festkörper
  - ▶ Kristalline Isolatoren als Festkörperionisationskammer sehr geeignet: Diamant (!), Cd(Zn)Te
  - ▶ Alternativ: Halbleiter wie Silizium und Germanium. Betrieb als Diode in Sperrichtung notwendig, um das Rauschen durch den Leckstrom zu begrenzen



# Teilchenidentifikation

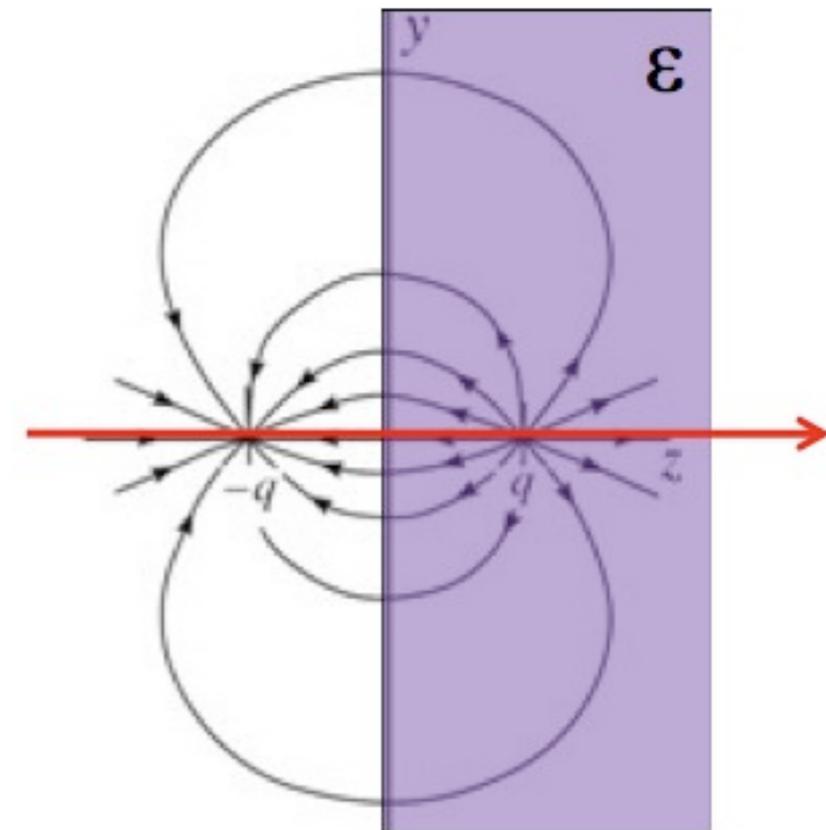
- ▶ Wir sind beinahe fertig mit den Vorarbeiten, aber zwei Effekte fehlen noch, die zur Teilchenidentifikation benutzt werden:
  - ▶ **Cherenkov-Strahlung:** Wird emittiert, wenn sich ein geladenes Teilchen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegt
    - ▶ Einstein?!? Kein Problem, in Medien (z.B. Wasser) ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner als  $c$
    - ▶ Bei gleicher Gesamtenergie sind ruhemassereiche Teilchen langsamer als massearme, eine Separation mittels der (Nicht-)Emission von Cherenkov-Photonen in einem geeigneten Medium ist möglich
    - ▶ Lichtdetektion wieder mit (Si)PMs



# Teilchenidentifikation

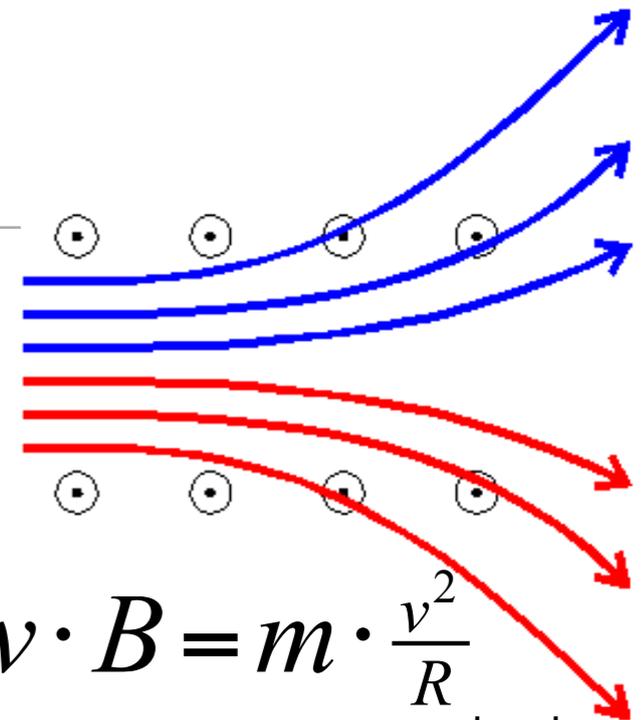
- ▶ Wir sind beinahe fertig mit den Vorarbeiten, aber zwei Effekte fehlen noch, die zur Teilchenidentifikation benutzt werden:
  - ▶ **Cherenkov-Strahlung:** Wird emittiert, wenn sich ein geladenes Teilchen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegt
  - ▶ **Übergangsstrahlung:** Wird emittiert, wenn ein (relativistisches) Teilchen durch einen Übergang im Brechungsindex zwischen zwei Materialien tritt
    - ▶ Verschiedene Erklärungsansätze, z.B. über Spiegelladungen: Im Medium mit anderer Permittivität induziert das sich nähernde geladene Teilchen eine Spiegelladung, die als zeitlich veränderlicher Dipol wirkt und daher elektromagnetische Strahlung emittiert
    - ▶ Energie im Bereich von keV (Röntgen)
    - ▶ Emittierte Intensität ist proportional zum Lorentzfaktor, daher bei bekannter Teilchenenergie Schluss auf die Teilchenmasse möglich:

$$E_{\gamma} \propto \gamma \quad \theta_{TR} \propto \frac{1}{\gamma}$$

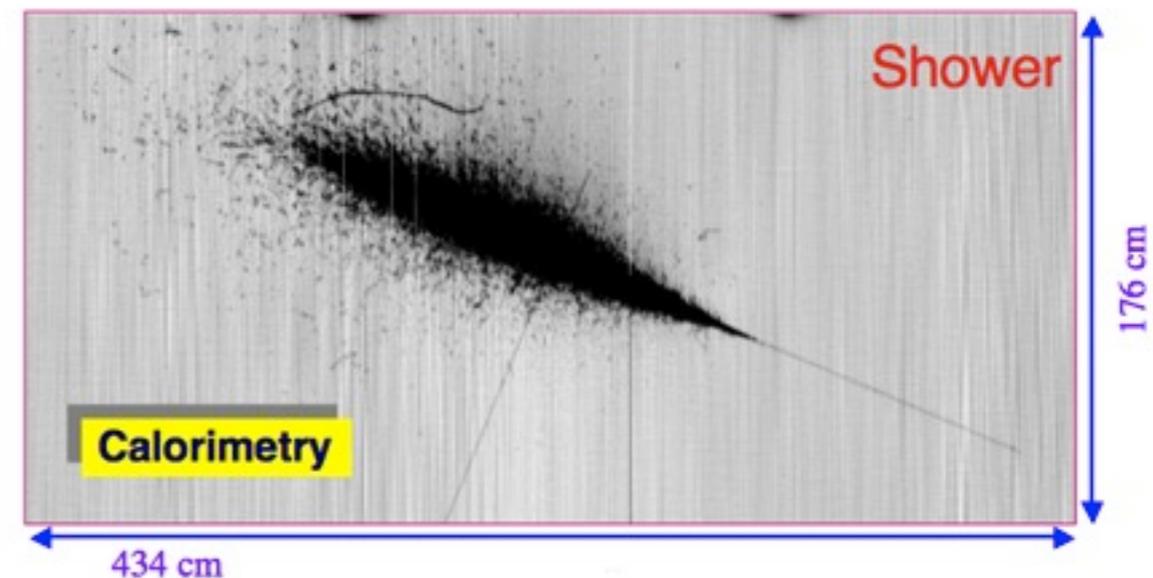


# Messung von Teilcheneigenschaften

- ▶ Ladung: Richtung der Ablenkung im Magnetfeld
- ▶ Impuls: Radius der Ablenkung im Magnetfeld
  - ➔ Möglichst gute Messung der Teilchenspur mit Spurdetektoren
- ▶ Energie: Stoppe das Teilchen, Messe die deponierte Energie
  - ➔ Kalorimetrie
- ▶ Ruhemasse: Energie - Impuls
- ▶ Entstehungsort, Lebensdauer: Messung der Strecke bis zum Zerfall
  - ➔ Spurdetektor, Vertexdetektor
- ▶ Geschwindigkeit (von langsamen Teilchen): Flugzeit, Cherenkov-Licht
  - ➔ Schnelle Szintillatoren, abbildende Cherenkov-Detektoren (RICH - ring imaging cherenkov detectors)



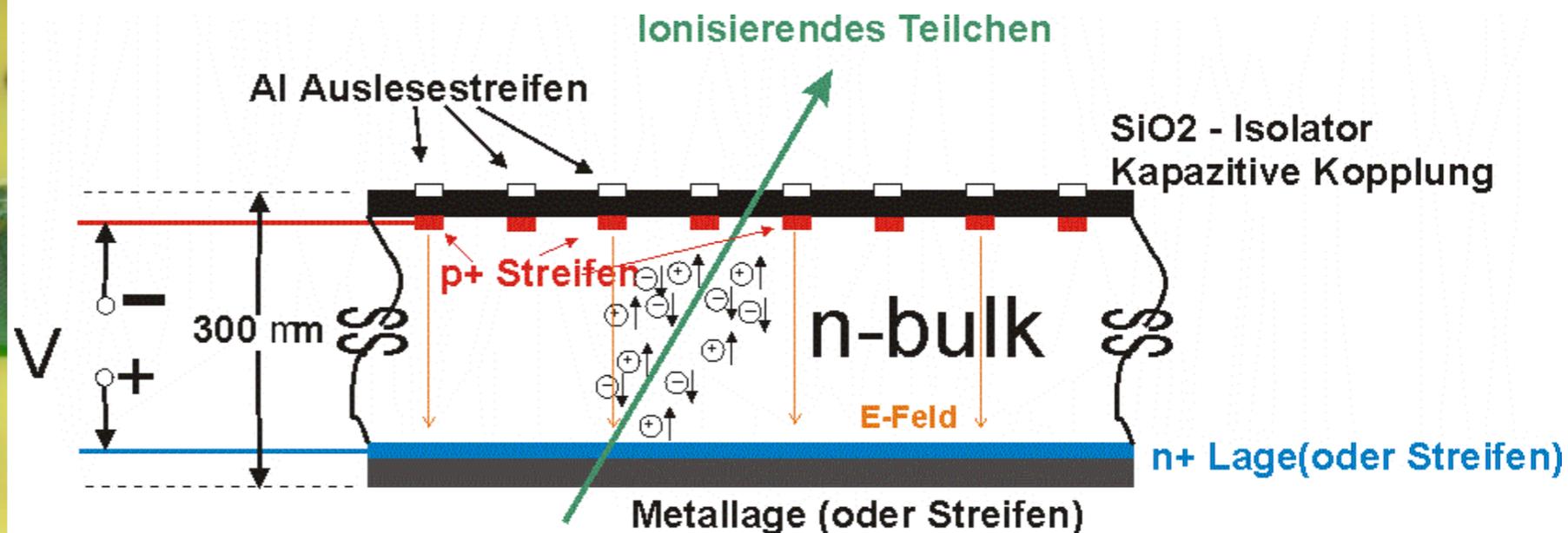
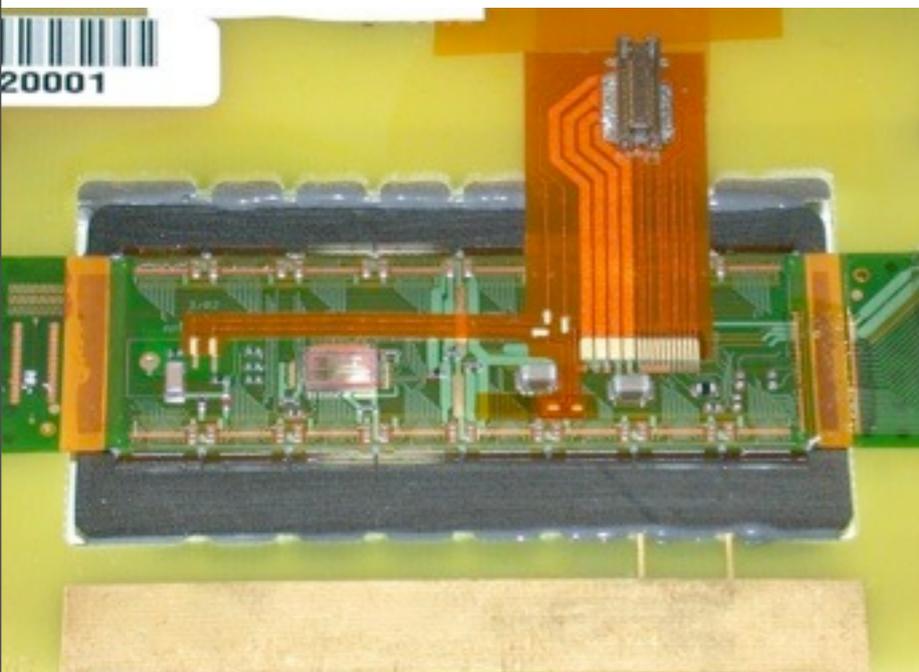
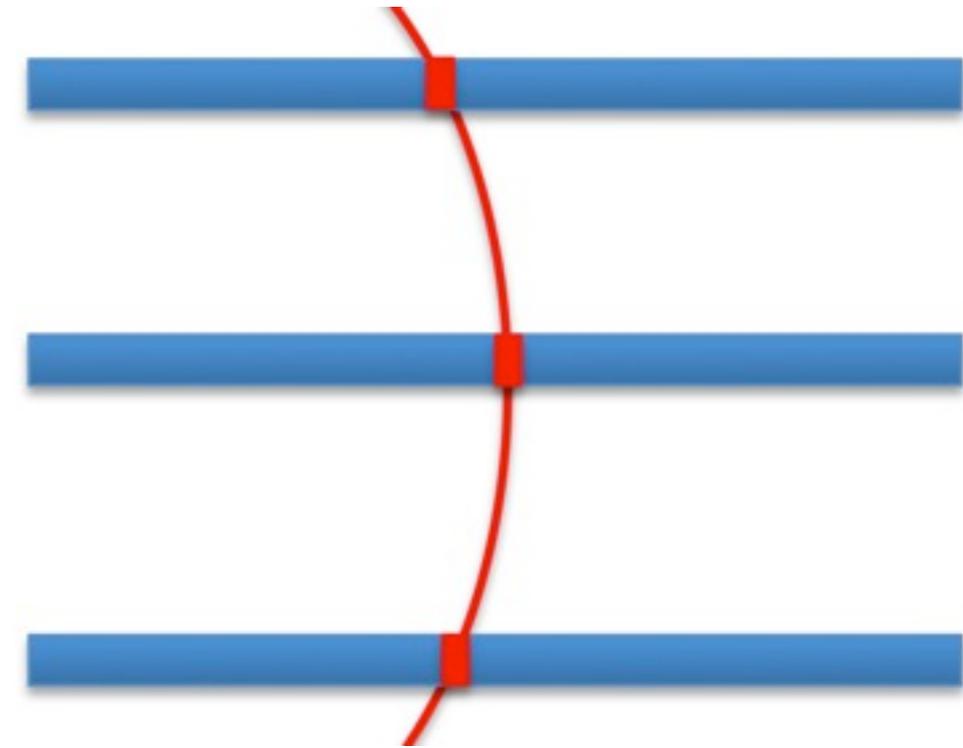
$$F = q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$
$$\Rightarrow q \cdot B \cdot R = m \cdot v = |\vec{p}|$$



# Impulsmessung: Spurdetektoren

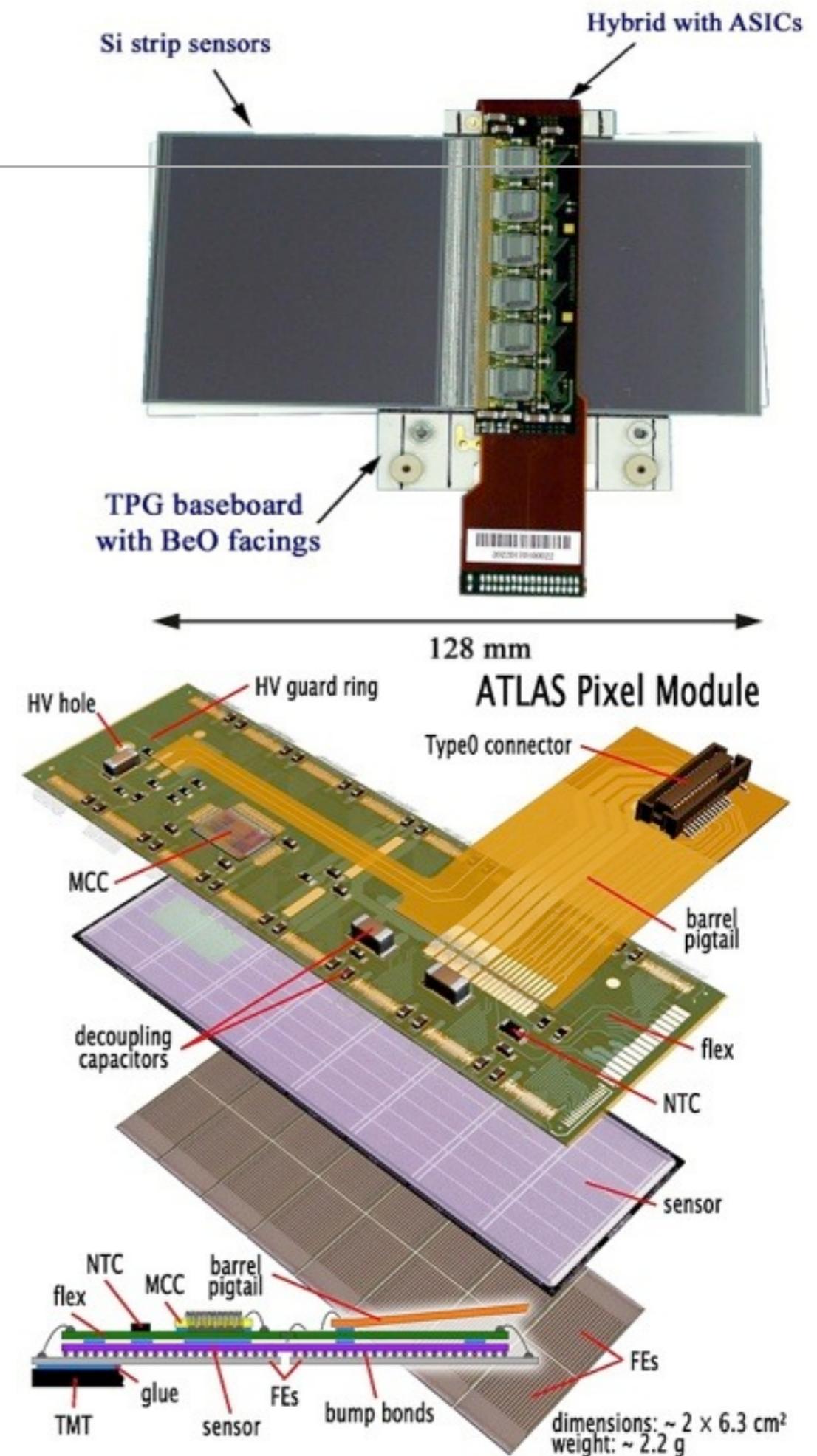
Krümmungsradius im Magnetfeld ist proportional zum Impuls - aber wie misst man die Krümmung einer Spur?

- ▶ Bei idealen Bedingungen (Magnetfeld ideal homogen, keine Mehrdeutigkeiten) würden 3 Punkte reichen
  - ▶ In realen Systemen deutlich mehr (>14)...
- ▶ Aufgrund der hohen Spurdichten bei LHC werden bevorzugt Silizium-Detektoren eingesetzt
  - ▶ Strukturiert zu Streifen- und Pixeldetektoren, aber mit möglichst wenig Material, um Streuung zu vermeiden



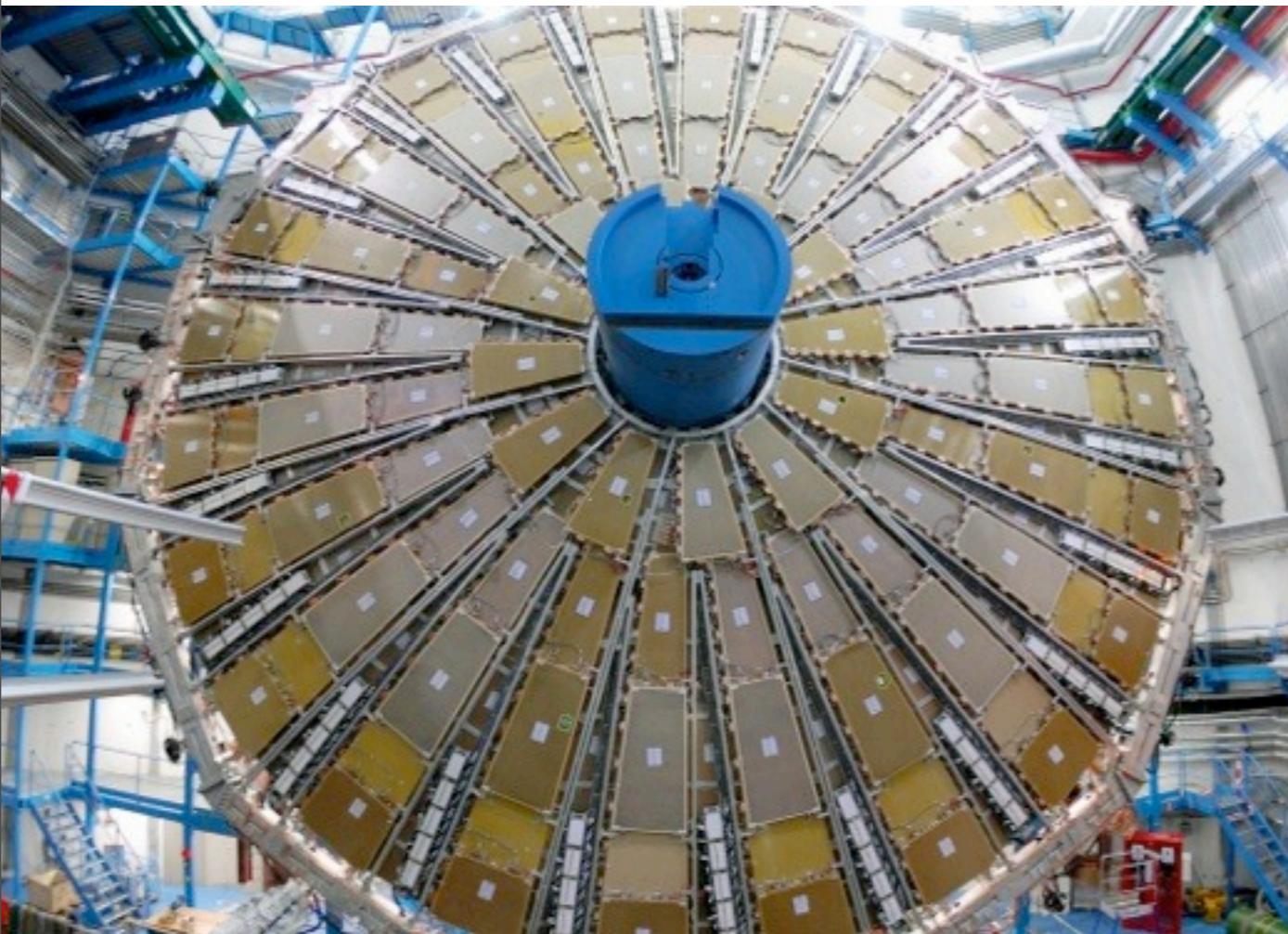
# Streifen und Pixel

- ▶ Um die Krümmung der Teilchenspur zu messen, reicht es aus, eine Koordinate ("r-phi") genau zu messen - das Magnetfeld biegt nur in eine Richtung
  - ▶ Eine Strukturierung des Siliziums in lange, aber sehr schmale Streifen (~80 µm Breite) reicht aus und spart Kanäle/Elektronik
  - ▶ Auslese durch ge-wirebondete ASICs
- ▶ Um den Ursprungsort eines Teilchens genau zu bestimmen, werden teilweise beide Koordinaten sehr genau benötigt - außerdem gibt es um den Primärvertex eine sehr hohe Teilchendichte
  - ▶ Hier wird das Silizium in sehr kleine Pixel strukturiert (ATLAS: 50 µm x 400 µm, CMS: 100 µm x 150 µm)
  - ▶ Auslese durch ge-bump-bondete ASICs
  - ▶ Zukünftig eventuell Sensor+ASIC integriert



# Tracking Großflächig: Myon-Kammern

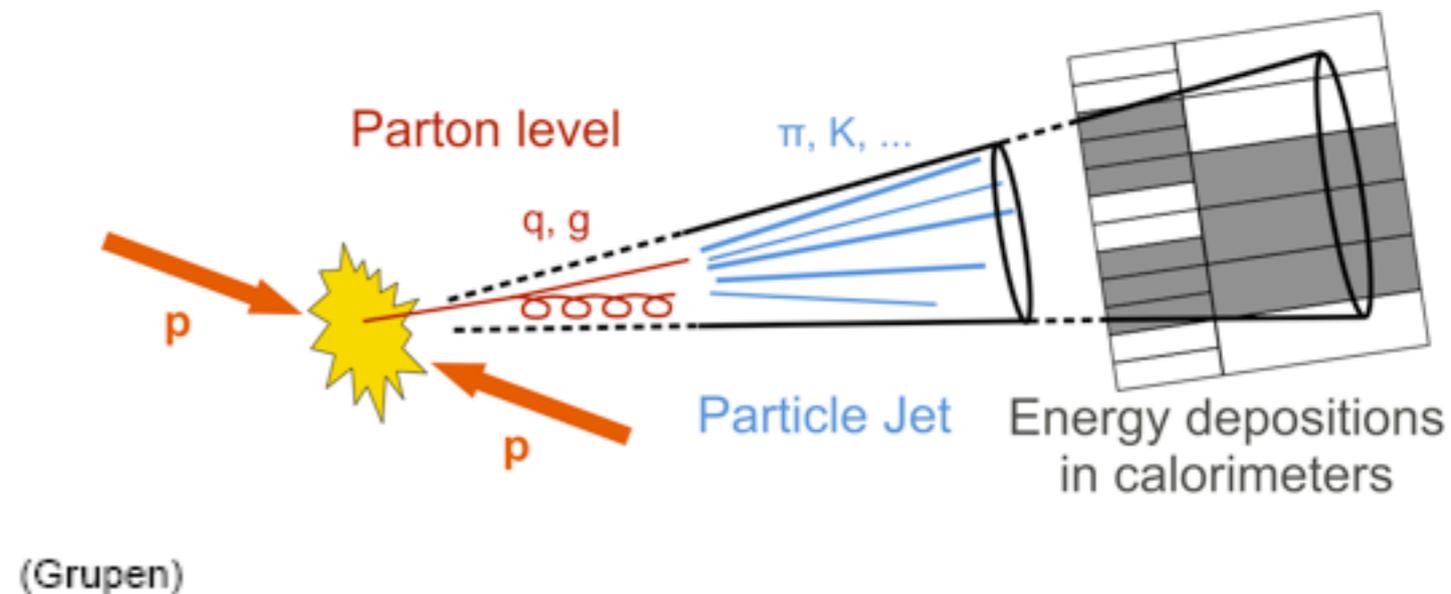
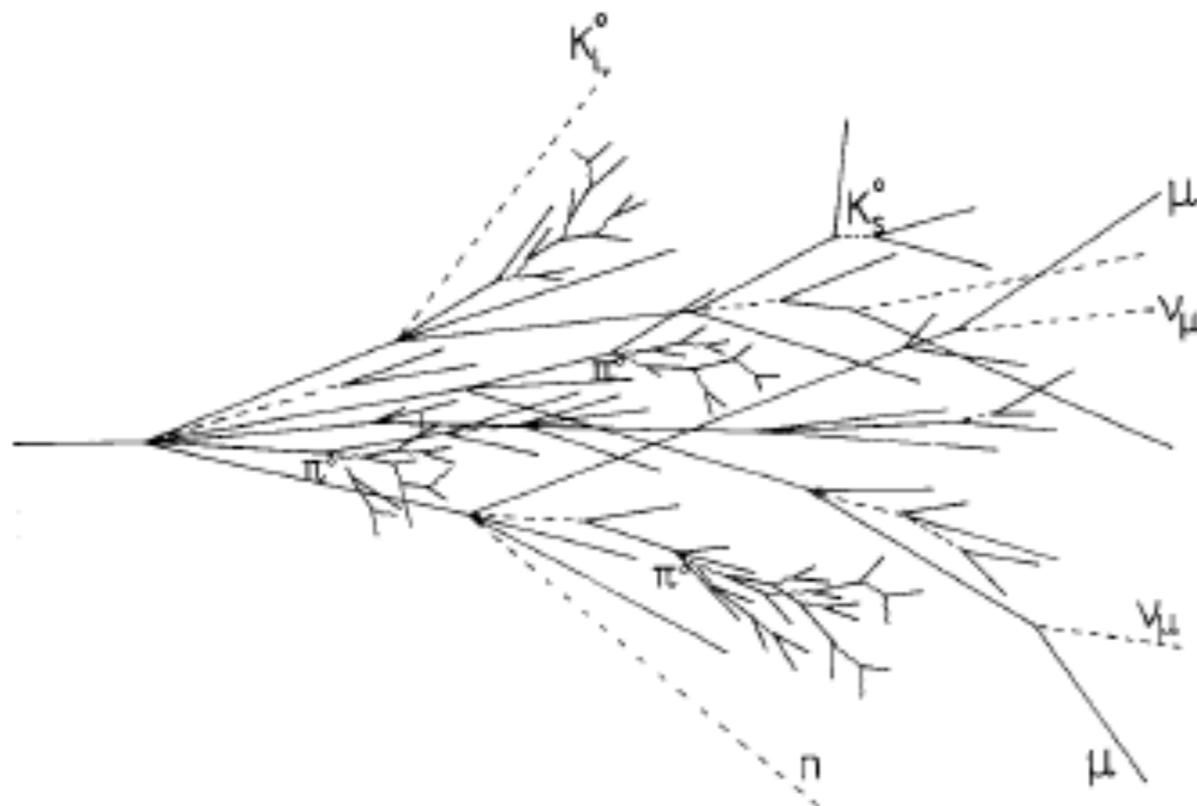
- ▶ Um den Impuls der Myonen möglichst gut zu bestimmen, ist ein großer Hebelarm erwünscht - also sind große Flächen abzudecken
- ▶ Myonen sind üblicherweise MIPs, daher wahrscheinlich ein Verfahren mit Gasverstärkung
  - ▶ ATLAS hat z.B. gleich 4 verschiedene Architekturen von Gas-Detektoren verbaut, je nach Region (Barrel, Endcap) und Geschwindigkeit (Präzision, aber langsam - oder schnell und etwas gröber).



# Energiemessung: Hadronen

Nun schlägt die Stunde der starken Wechselwirkung: Wenn ein hochenergetisches Hadron (was war das doch gleich?) Materie durchdringt, kann es dank der starken Kraft im Zusammenspiel mit den Hadronen der Atomkerne neue Hadronen erzeugen - und zwar so lange, bis die kinetische Energie aufgebraucht ist

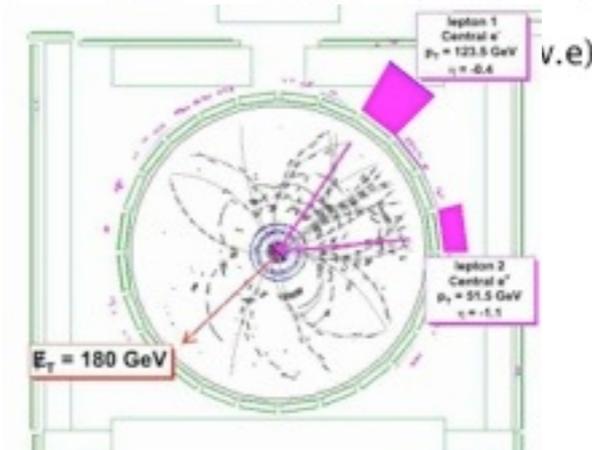
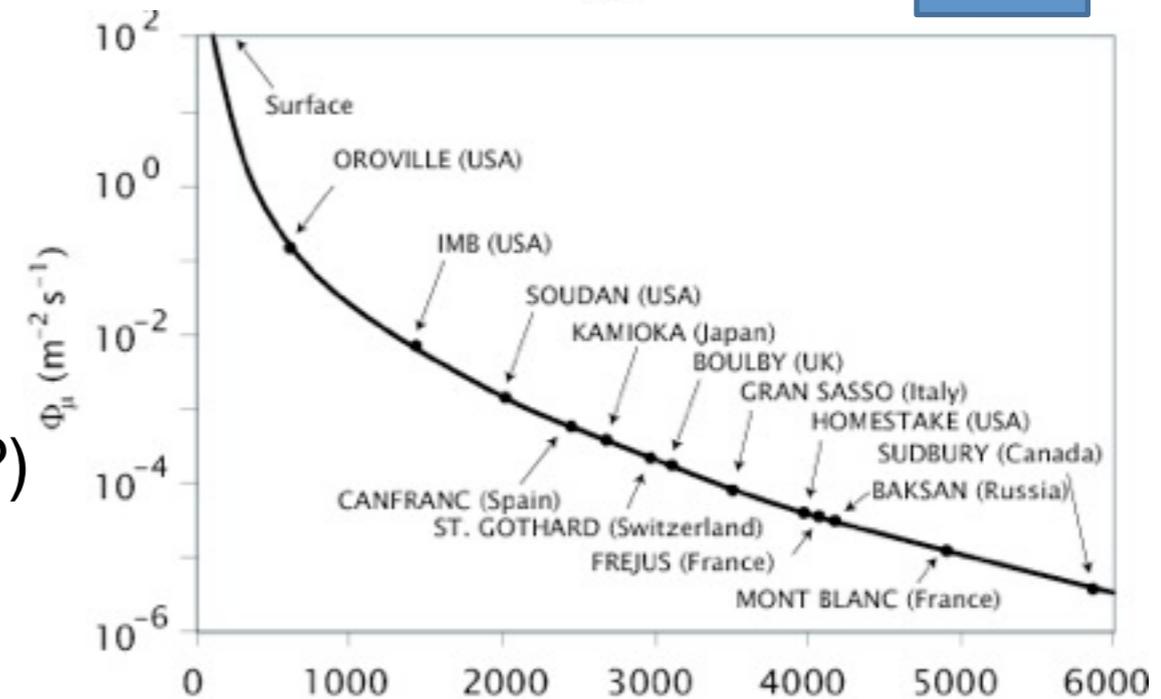
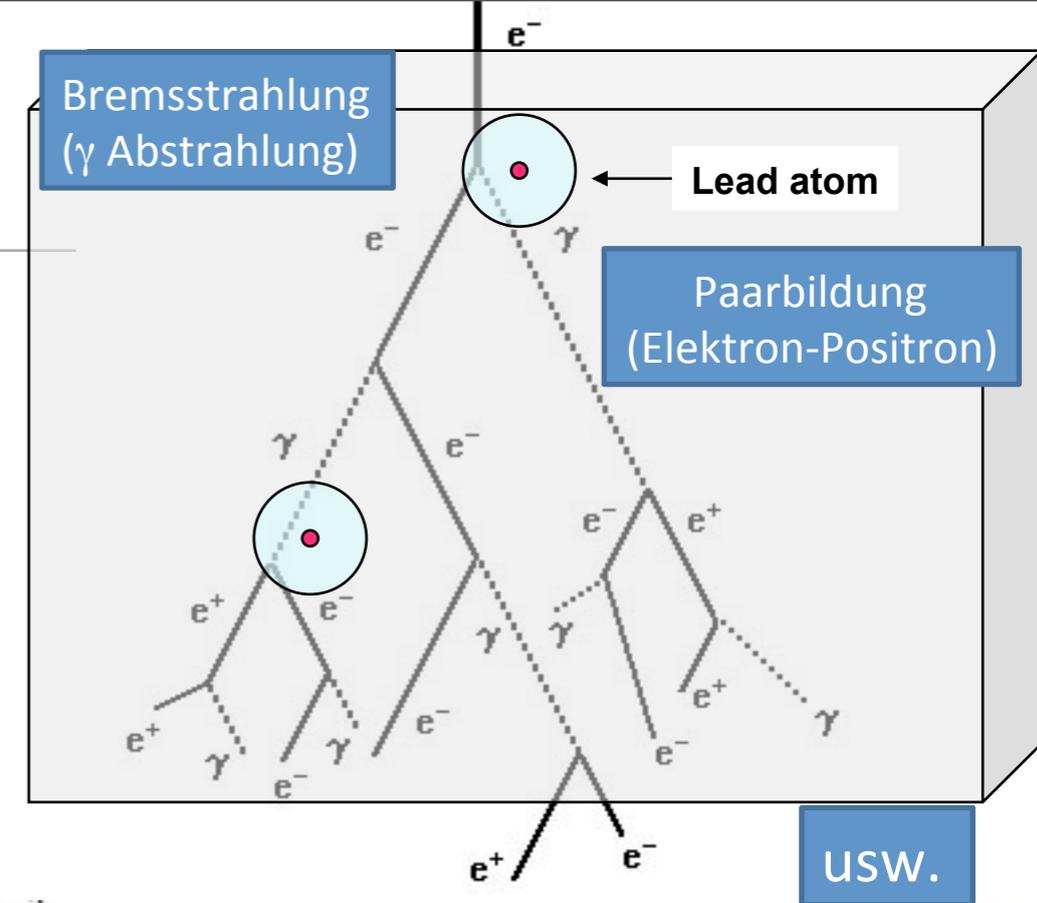
- ▶ Dies nennt man einen hadronischen Schauer (bzw. Jet)
- ▶ Grundidee: Stoppe das Hadron bzw alle Teilchen des Schauers, und messe deren deponierte Energie



# Energiemessung: Der Rest...

Und was ist mit langlebigen Nicht-Hadronen?

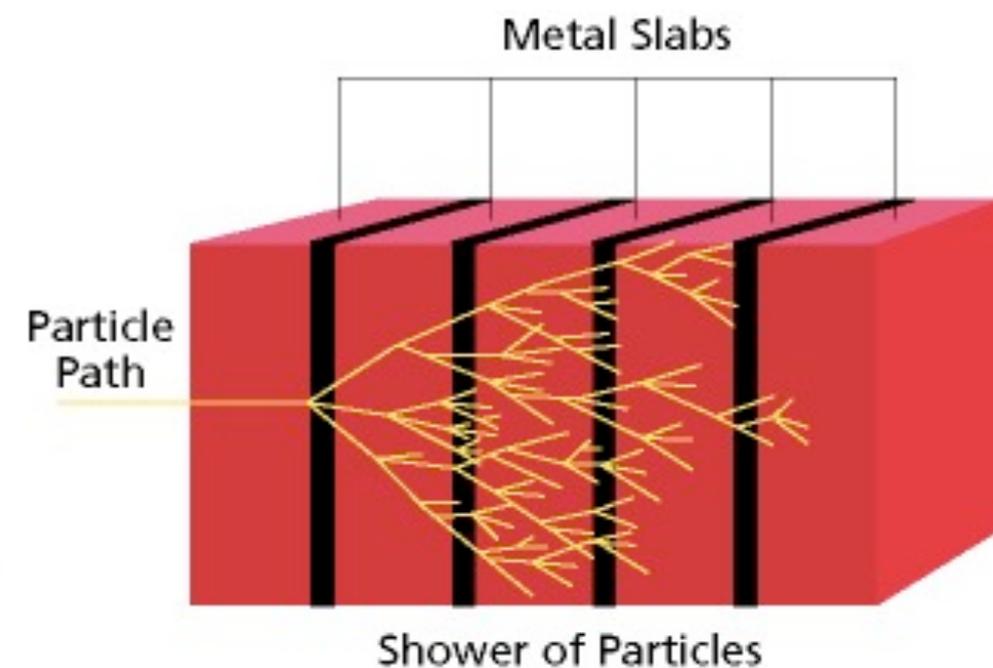
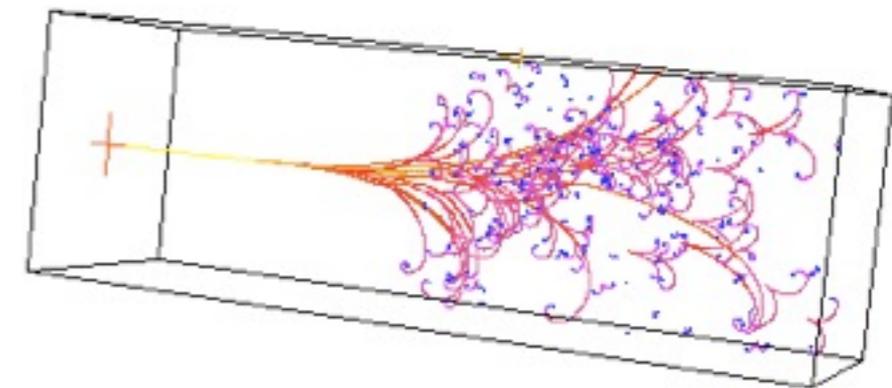
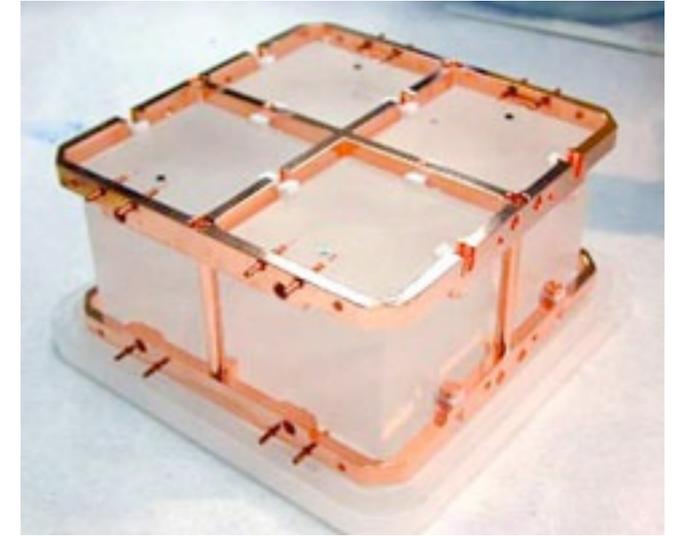
- ▶ Elektronen und Photonen: elektromagnetische Schauer (-> ECAL)
  - ▶ Wechsel aus Paarbildung und Abstrahlung von Bremsstrahlungs-Photonen
- ▶ Myonen: Bethe-Bloch forever ;-)
- ▶ Myonen sind zu schwer, um nennenswert Bremsstrahlung abzugeben, sie ionisieren lediglich
- ▶ Genaue Messung des Impulses erlaubt zusammen mit Teilchenidentifikation (wie?) die Bestimmung der Energie
- ▶ Neutrinos: quasi keine Wechselwirkung
  - ▶ Nur vereinzelte Reaktionen in sehr großen Kalorimetern
  - ▶ Neutrino-Energie aus Kinematik zurückgerechnet - daher Hermetizität nötig!



# Energiemessung: Wie?

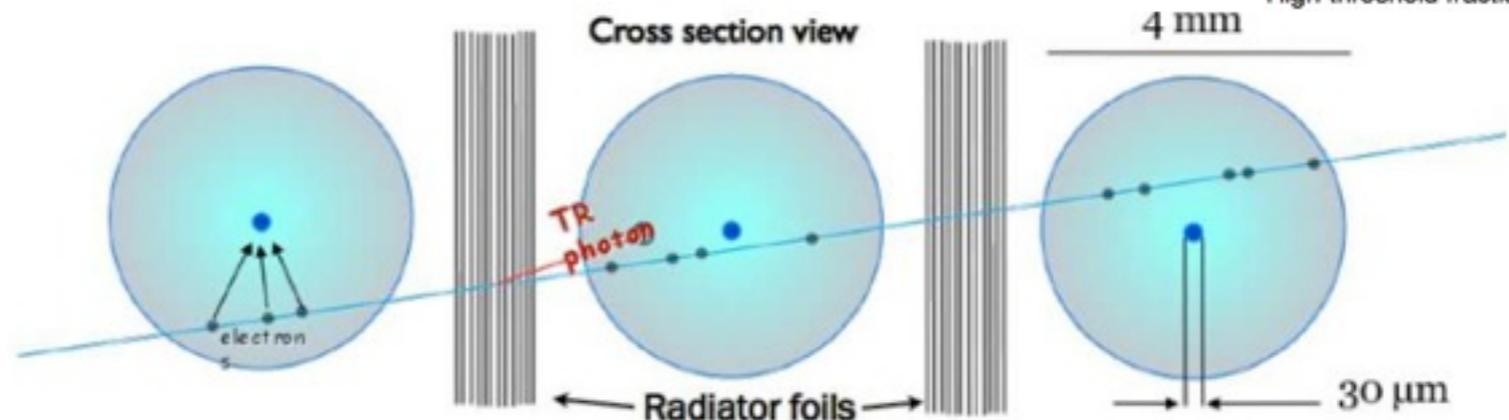
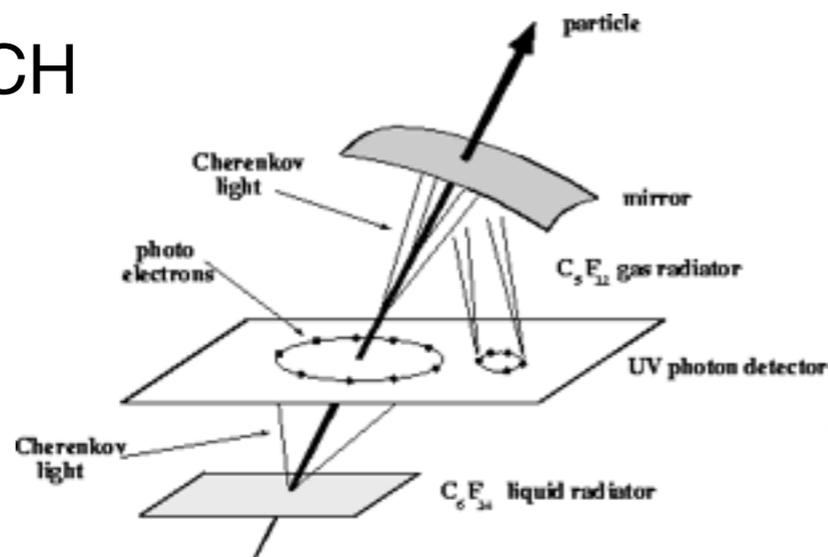
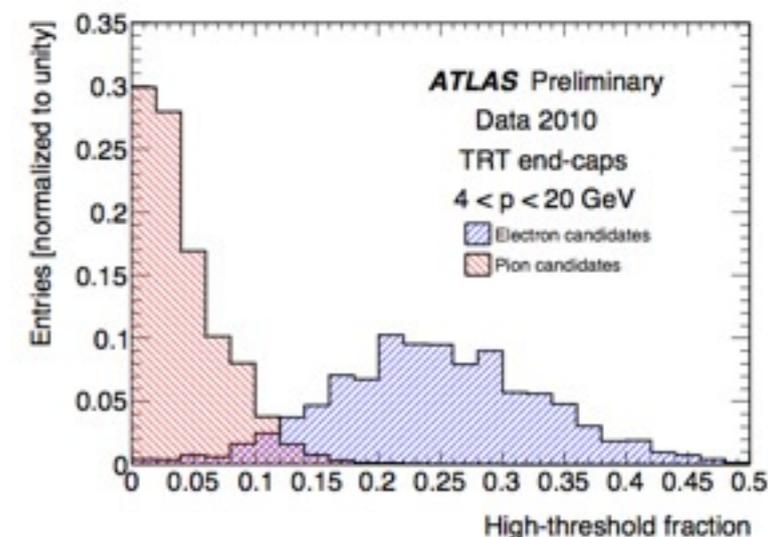
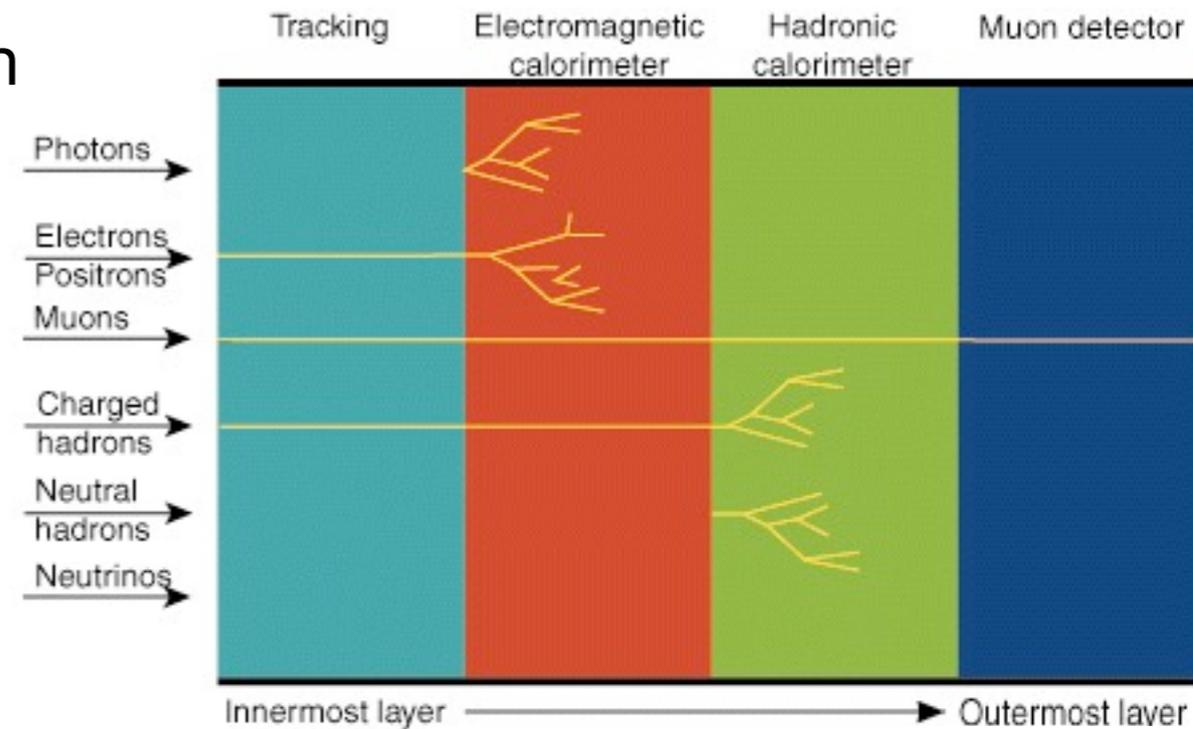
Möglichkeiten:

- ▶ Echte Kalorimetrie: Messung der Erwärmung
  - ▶ Meist unmöglich, wird aber in einigen Experimenten tatsächlich genutzt (CUORE)
- ▶ Homogene Kalorimeter: Schauer stoppt komplett in aktivem Volumen
  - ▶ z.B. CMS PbWO<sub>4</sub> ECAL, Neutrino-Szintillator-Experimente wie Borexino
  - ▶ Prinzipiell gute Energieauflösung (komplette Energie wird "gesehen"), aber wenig/keine Tiefenauflösung
- ▶ Sandwich-Kalorimeter: Wechsel von passivem Absorber und aktiven Lagen
  - ▶ z.B. ATLAS LAr ECAL, sämtliche hadronischen Kalorimeter
  - ▶ Meist Szintillator in Verbindung mit einem dichten Absorber (Eisen, Blei, Wolfram, Uran (!))



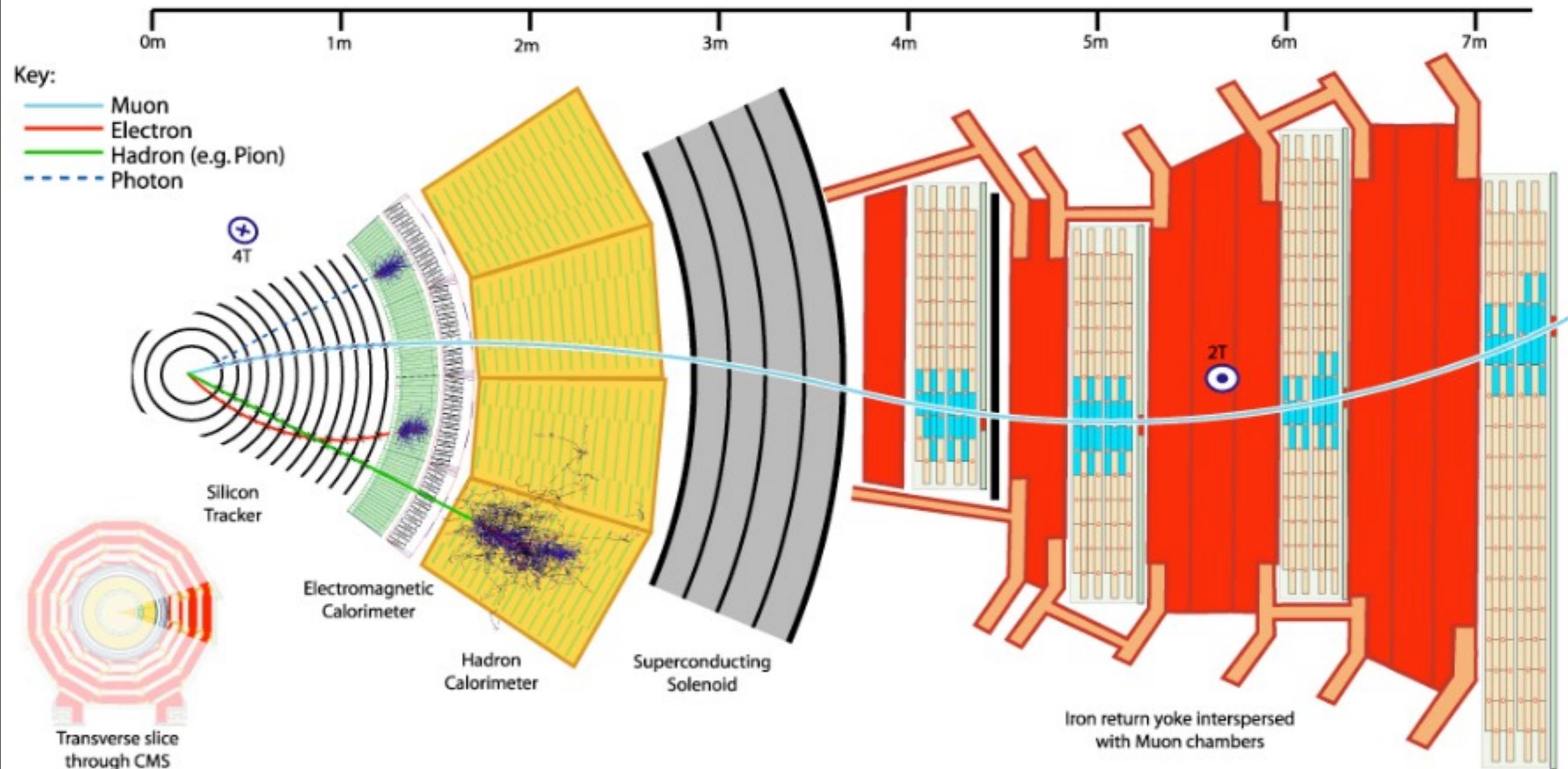
# Geschwindigkeit, Teilchenidentifikation

- ▶ (Sehr) schwere, langsame Teilchen kommen im Kalorimeter einfach später an - danach kann gesucht werden
- ▶ Teilchenidentifikation einfach:
  - ▶ Alles im Spurdetektor sichtbare ist geladen
  - ▶ Alles, was es (nur) bis ins ECAL schafft, war nicht hadronisch
  - ▶ Alles, was das HCAL durchdringt muss ein Myon sein
- ▶ Teilchenidentifikation komplexer:
  - ▶ Übergangsstrahlungsdetektor
  - ▶ RICH



# Anwendung: Ein Streifzug durch ATLAS/CMS

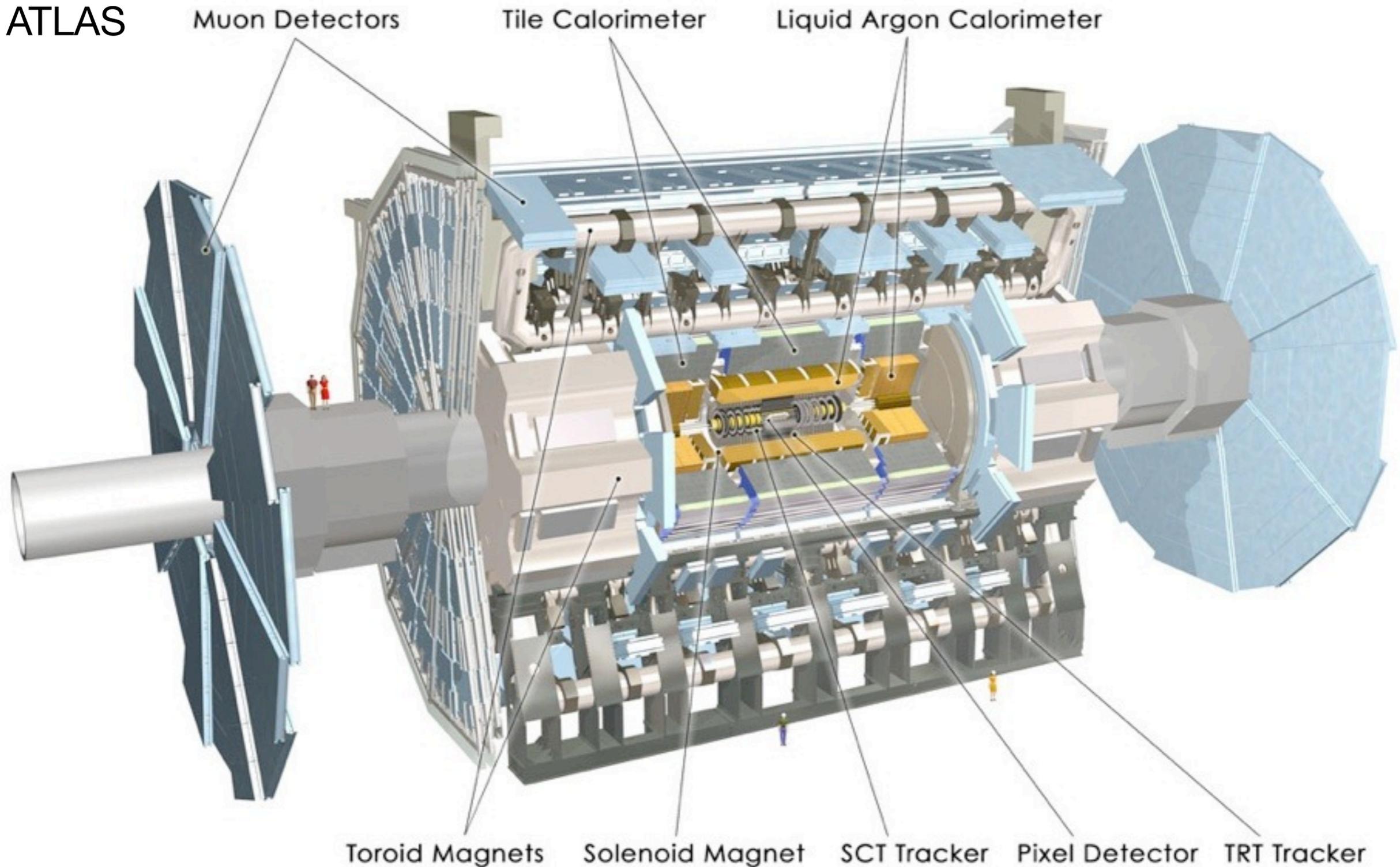
- ▶ Im Lichte unseres neu erworbenen Wissens schauen wir uns nun die LHC Detektoren an
  - ▶ CMS



# Anwendung: Ein Streifzug durch ATLAS/CMS

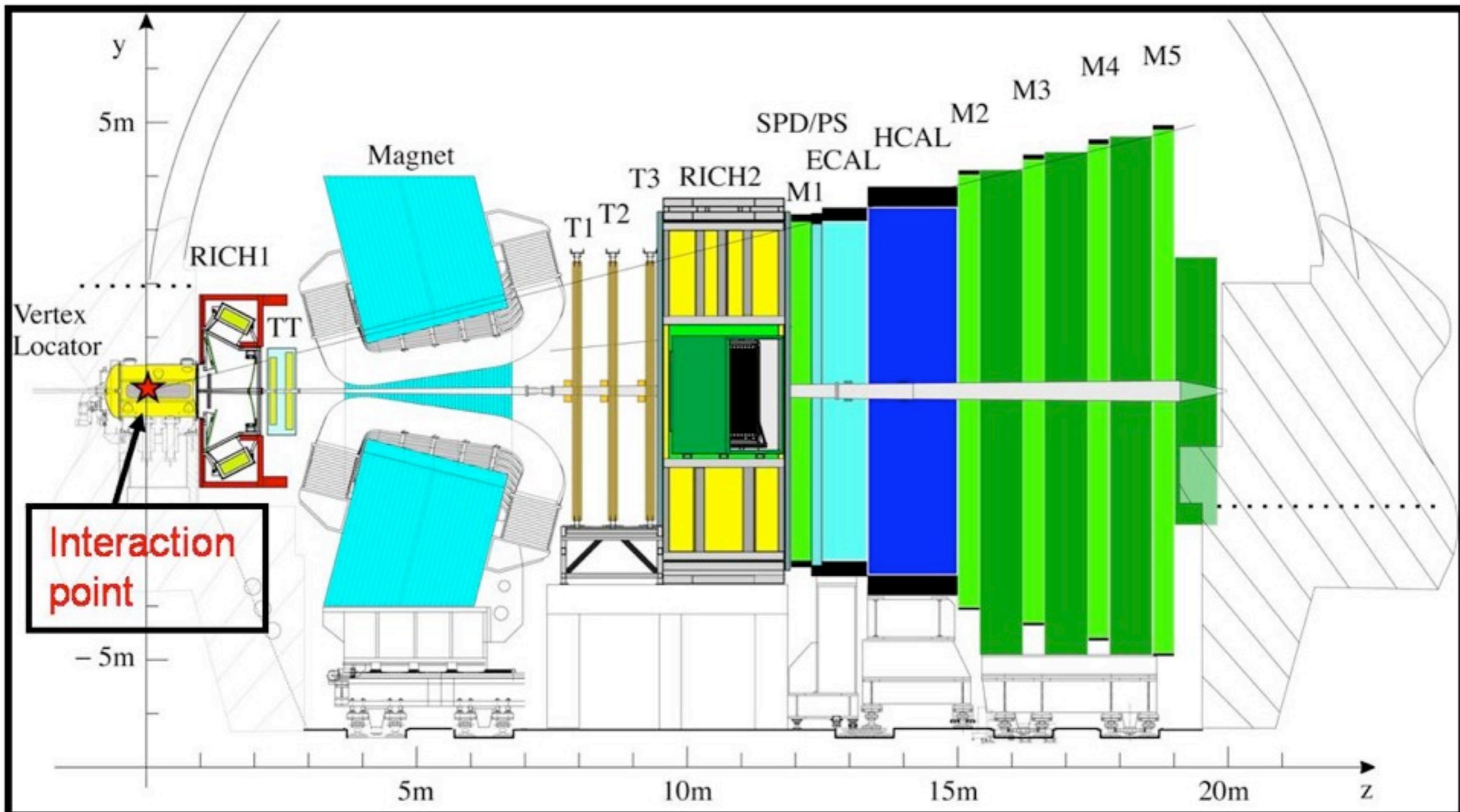
- ▶ Im Lichte unseres neu erworbenen Wissens schauen wir uns nun die LHC Detektoren an

- ▶ **ATLAS**



# Anwendung: Ein Streifzug durch LHCb/Alice

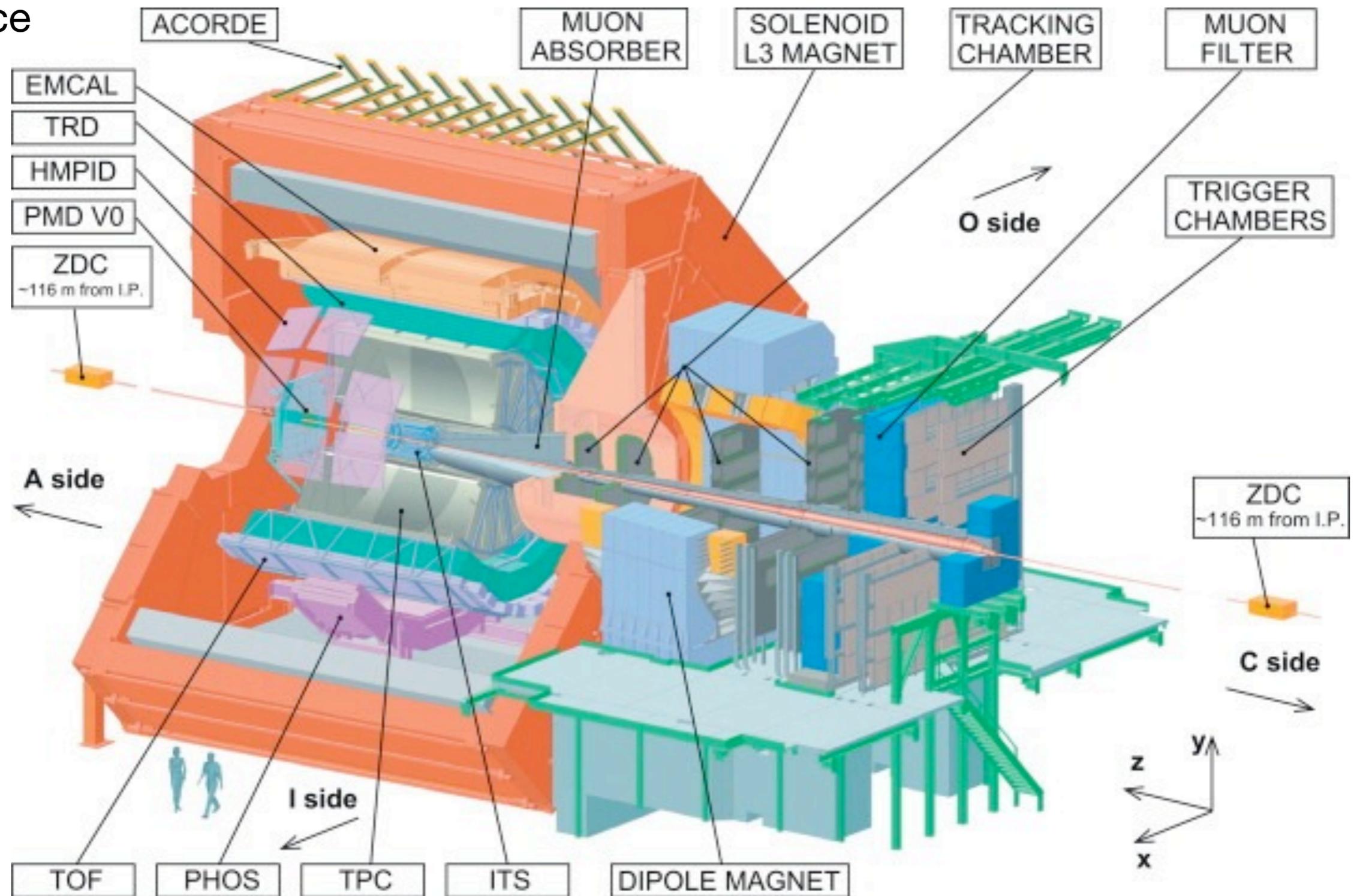
- ▶ Im Lichte unseres neu erworbenen Wissens schauen wir uns nun die LHC Detektoren an
  - ▶ LHCb



# Anwendung: Ein Streifzug durch LHCb/Alice

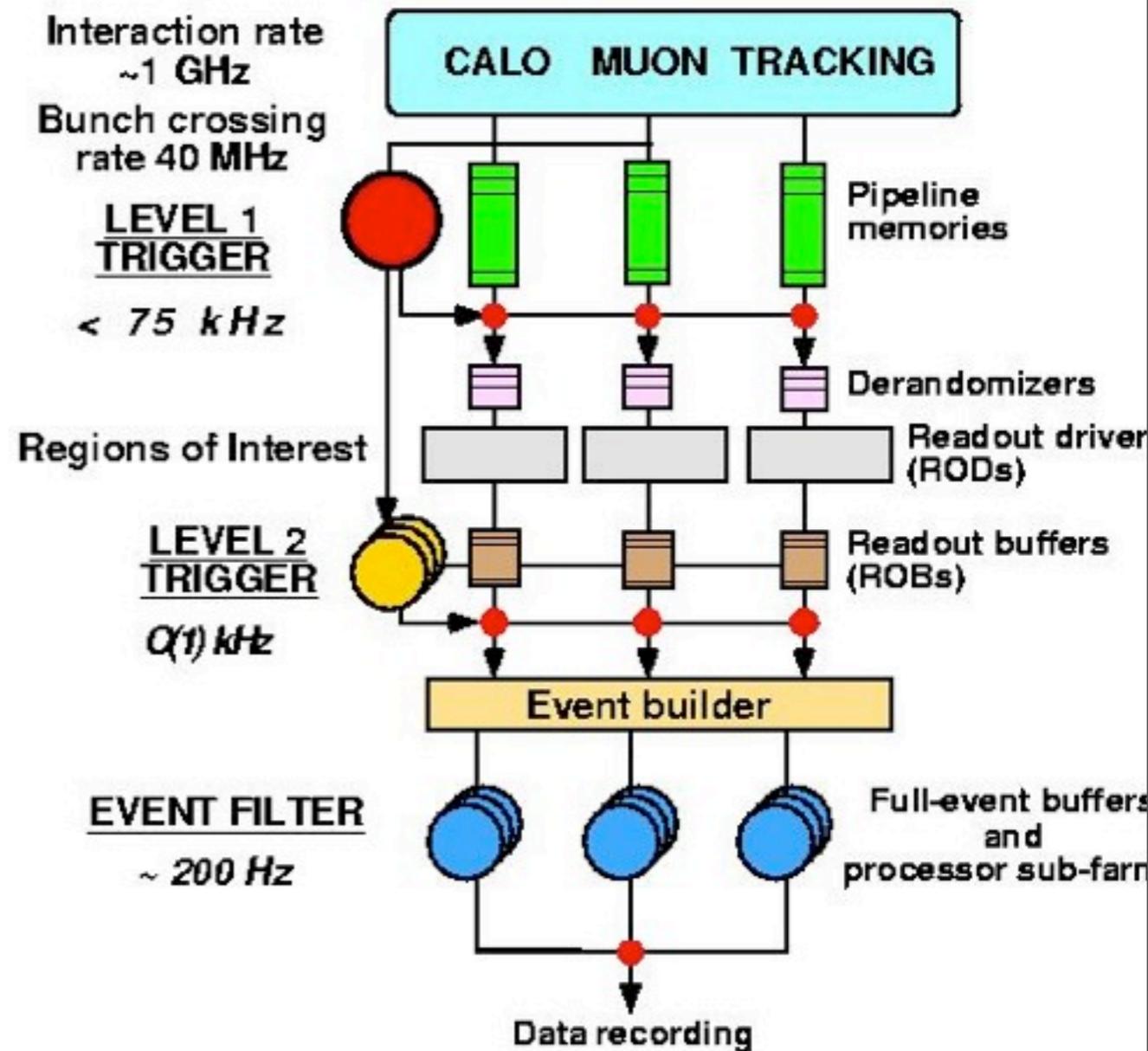
► Im Lichte unseres neu erworbenen Wissens schauen wir uns nun die LHC Detektoren an

► Alice



# Trigger

- ▶ In ATLAS und CMS kollidieren etwa 40 Millionen Mal pro Sekunde Protonen-Pakete und ausgelegt ist LHC darauf, dass im Durchschnitt bei jeder (!) Kollision 25 Protonen miteinander wechselwirken
- ▶ Diese Menge an Daten ist unmöglich aufzuzeichnen - ja nicht einmal komplett aus dem Detektor zu holen
- ➔ Auslese von "schnellen" Detektoren (Teile der Myonkammern und der Kalorimeter), Auswertung (innerhalb von  $\sim 2 \mu\text{s}$ !), ob im bunch-crossing ein potentiell interessantes Ereignis war, nur dann wird der komplette Detektor ausgelesen.
- ➔ Später noch weitere Reduktion auf ein Maß, das man auf Bänder (ja, wirklich...) wegschreiben kann.



- ➔ Weltweite Verteilung der Last für Datenrekonstruktion und Simulation über das Grid. Eine rein CERN-basierte Datenhaltung wäre nicht mehr möglich.

# Etwas anderes: Neutrinodetektoren

---

Detektoren an Beschleunigern sehen - trotz vieler Unterschiede - doch immer ähnlich aus:

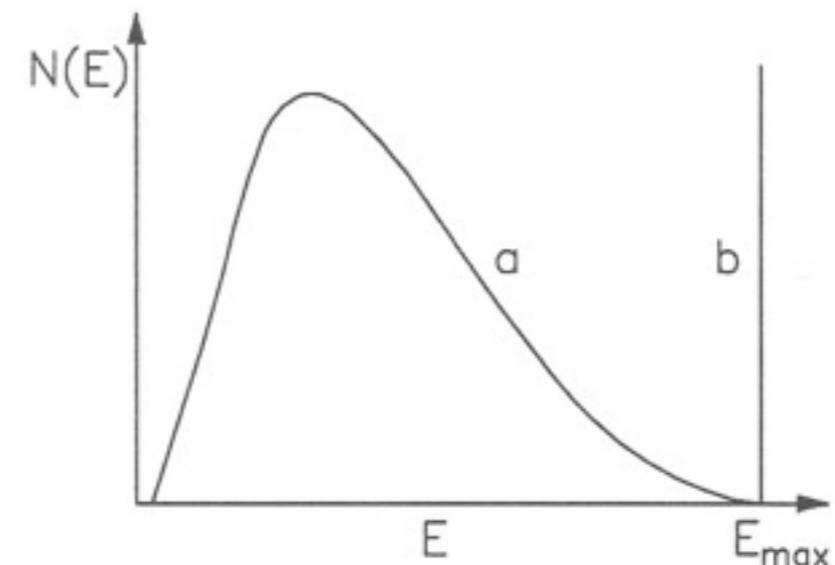
- ▶ Collider-Geometrie (ATLAS, CMS, die LEP-Detektoren, D0, CDF, ...)
- ▶ Fixed-target/Assymetrische-Geometrie (LHCb, (Alice), NA-Experimente)

Um einen Eindruck zu geben, wie vielfältig Detektoren aussehen können, werden wir nun einen Blick auf das Gebiet der Neutrinophysik werfen - und damit gerade die Teilchen detektieren, die wir bisher nur über das “missing Et” beobachtet haben:

In den 20er Jahren wurden  $\beta$ -Spektren beobachtet, die mit dem bis dahin angenommenen 2-Körper-Zerfall nicht erklärt werden konnten.

Daraufhin postulierte Pauli in seinem „Brief an die Radioaktiven“ das „Neutron“ (!!), das den Zerfällen undetektiert entkommen kann. Es muss folgende Eigenschaften besitzen:

- ▶ es kann nicht geladen sein
- ▶ es muss sehr leicht sein: Der Endpunkt der Spektren ist sehr nahe am Q-Wert



# Der erste Nachweis

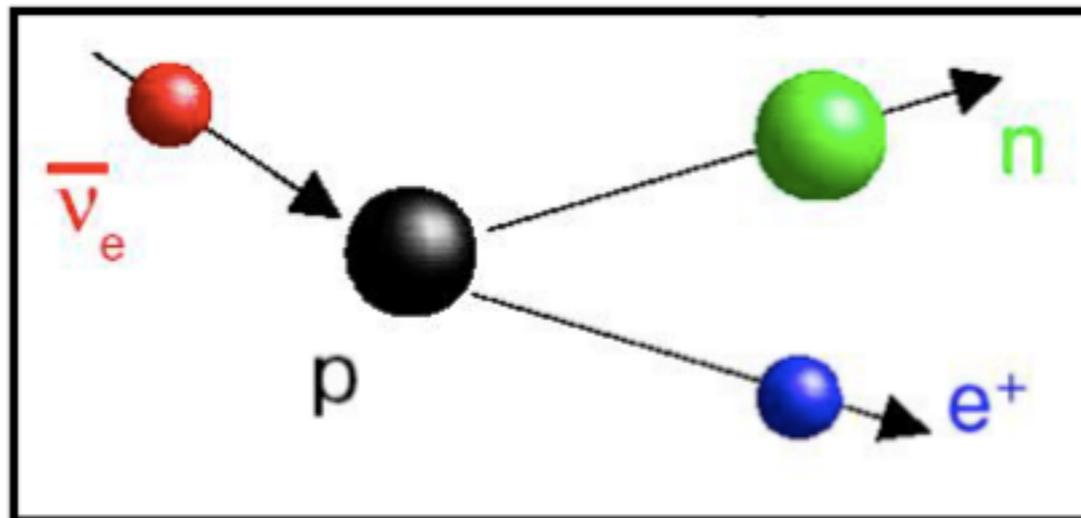
---

Das Neutrino nimmt nur an der schwachen Wechselwirkung teil, der Nachweis ist daher schwierig:

- ▶ Sehr große Mengen von Materie sind notwendig, mit denen die Neutrinos wechselwirken können
- ▶ Der Untergrund muss stark unterdrückt werden; an der Erdoberfläche macht bereits die kosmische Strahlung einen Nachweis sehr schwierig!
- ▶ Sehr lange Messzeiten sind notwendig.

Erster Nachweis durch Cowan und Reines:

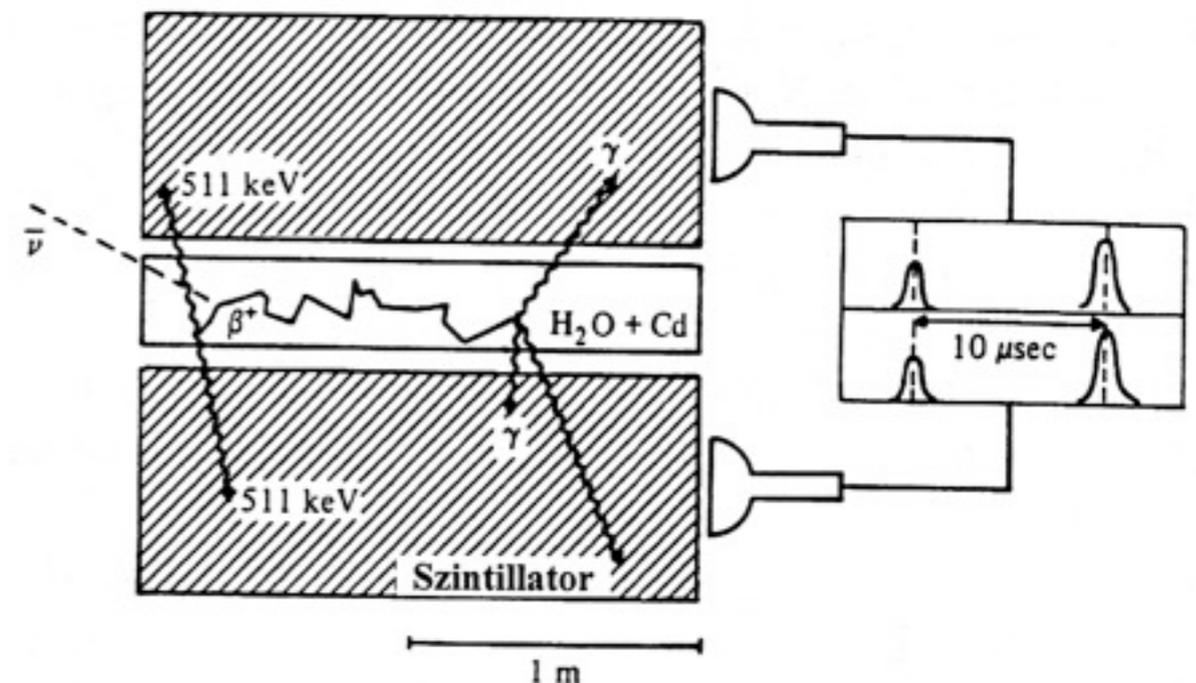
- ▶ Inverser  $\beta$ -Zerfall:



# Der erste Nachweis

- ▶ Quelle der Antineutrinos: Kernreaktoren
- ▶ Experiment im Untergrund zur Reduktion des Untergrundes durch die kosmische Strahlung
- ▶ Idee:
  - ▶ „schnelles“ Stoppen des Positrons und Nachweis der 511 keV Vernichtungsstrahlung
  - ▶ „langsames“ Thermalisieren des Neutrons, dann Einfang durch  $^{113}\text{Cd}$  und Detektion der  $\gamma$ s
- Signale im Abstand der Thermalisierung

Entdeckung 1956



# Eigenschaften des Neutrinos

---

Welche Eigenschaften wurden postuliert und gemessen?

- ▶ Nimmt nur an der schwachen Wechselwirkung teil
- ▶ Hat eine sehr geringe oder keine Ruhemasse
- ▶ Es existiert für jede Teilchengeneration ein Neutrino und ein Antineutrino:

$$\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$$

- ▶ Leptonenzahl von +1 (bzw -1 für die Antiteilchen)

→ sind Neutrinos uninteressant? Nur „zur Energieerhaltung“ wichtig? Nein!

- ▶ Neutrinos sind extrem häufige Teilchen
- ▶ mit Neutrinos kann man an Orte „sehen“, aus denen sonst nichts entkommt:
  - ▶ Supernovae bereits vor ihrer Explosion → Informationen über den Ablauf
  - ▶ solare Neutrinos aus dem Sonneninneren → läuft die Fusion noch?

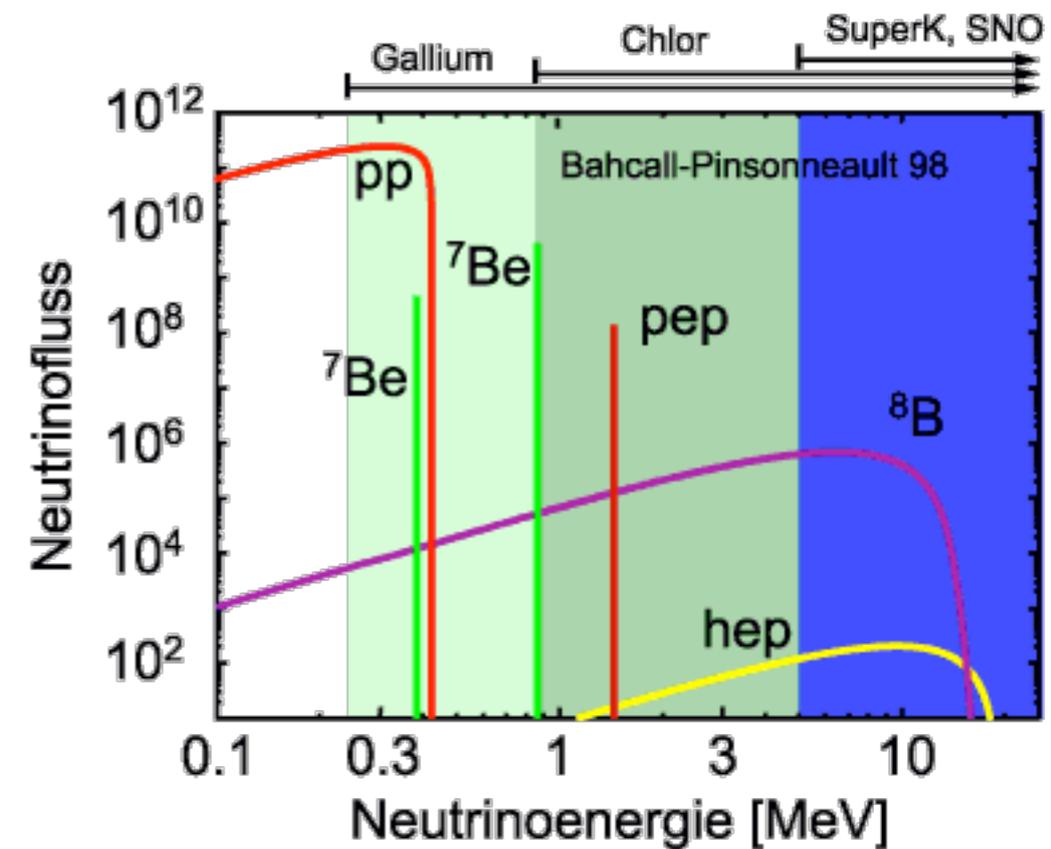
# Das solare Neutrino Defizit

In der Sonne entstehen bei der Kernfusion Neutrinos, z.B.

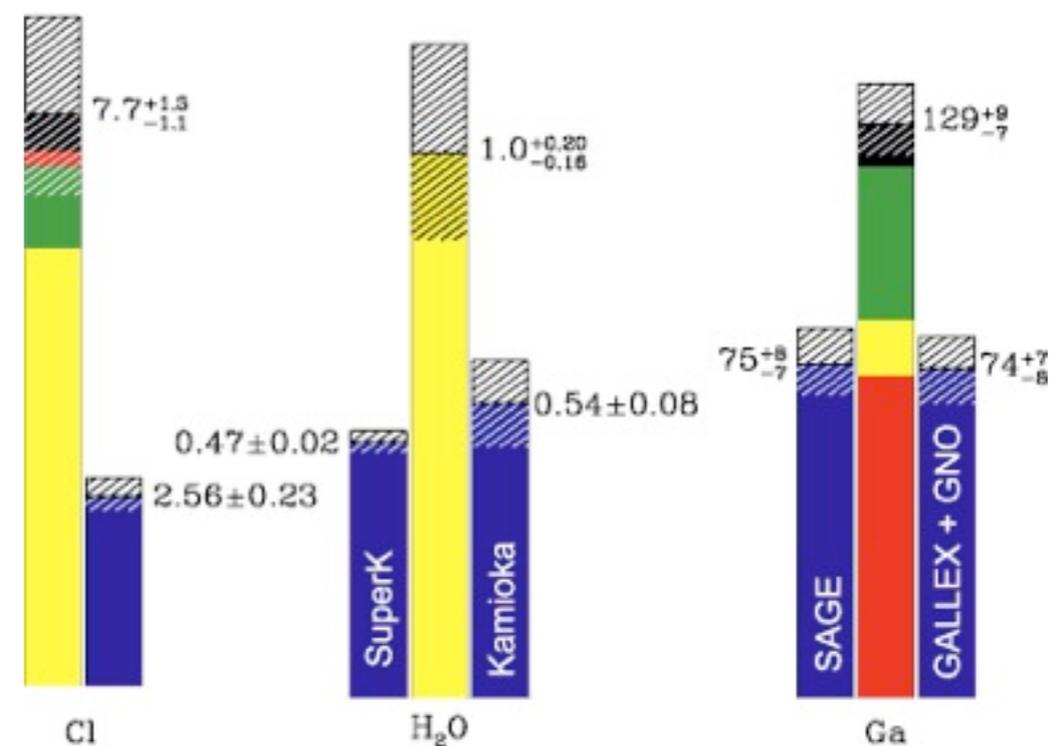
- ▶ pp-Neutrinos:  $pp \longrightarrow De^+ \nu_e$
- ▶  $^7\text{Be}$ -Neutrinos:  $^7\text{Be} + e^- \longrightarrow ^7\text{Li} + \nu_e$
- ▶  $^8\text{B}$ -Neutrinos:  $^8\text{B} \longrightarrow ^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$

Diese haben unterschiedliche Energiespektren  
 Verschiedene Experimente können jeweils nur Neutrinos jenseits einer gewissen Schwellenenergie detektieren

Alle Experimente sehen zu wenig Neutrinos auf der Erde: In Blau jeweils die Experimente, in den anderen Farben die Vorhersagen.



Neutrino raten: Vergleich Standardsonnenmodell zu Experimenten Bahcall-Pinsonneault 2000



# Ist die Sonne „kaputt“?

---

„Zu wenige Neutrinos“ könnte verschiedene Ursachen haben:

- ▶ Die Sonne ist „kaputt“ und die Kernfusion läuft nicht mehr richtig. Wir sehen nur noch die „Restwärme“ der alten Kernfusion...
- ▶ Das Sonnenmodell ist nicht richtig. Das Modell ist sehr komplex und viele Abhängigkeiten sind ziemlich instabil.
- ▶ Die Neutrinos gehen irgendwie verloren:
  - ▶ Zerfall?
  - ▶ Oszillation...

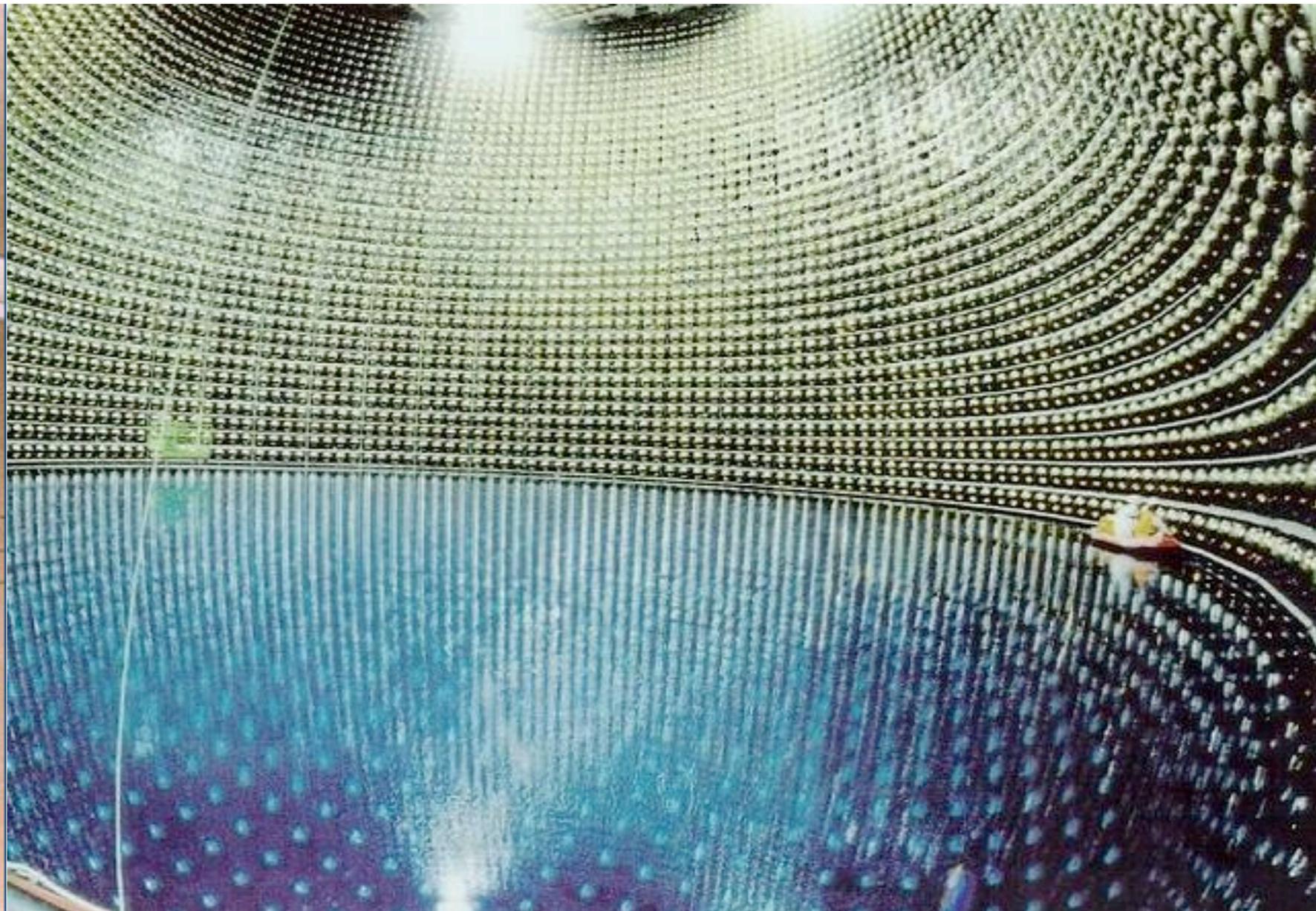
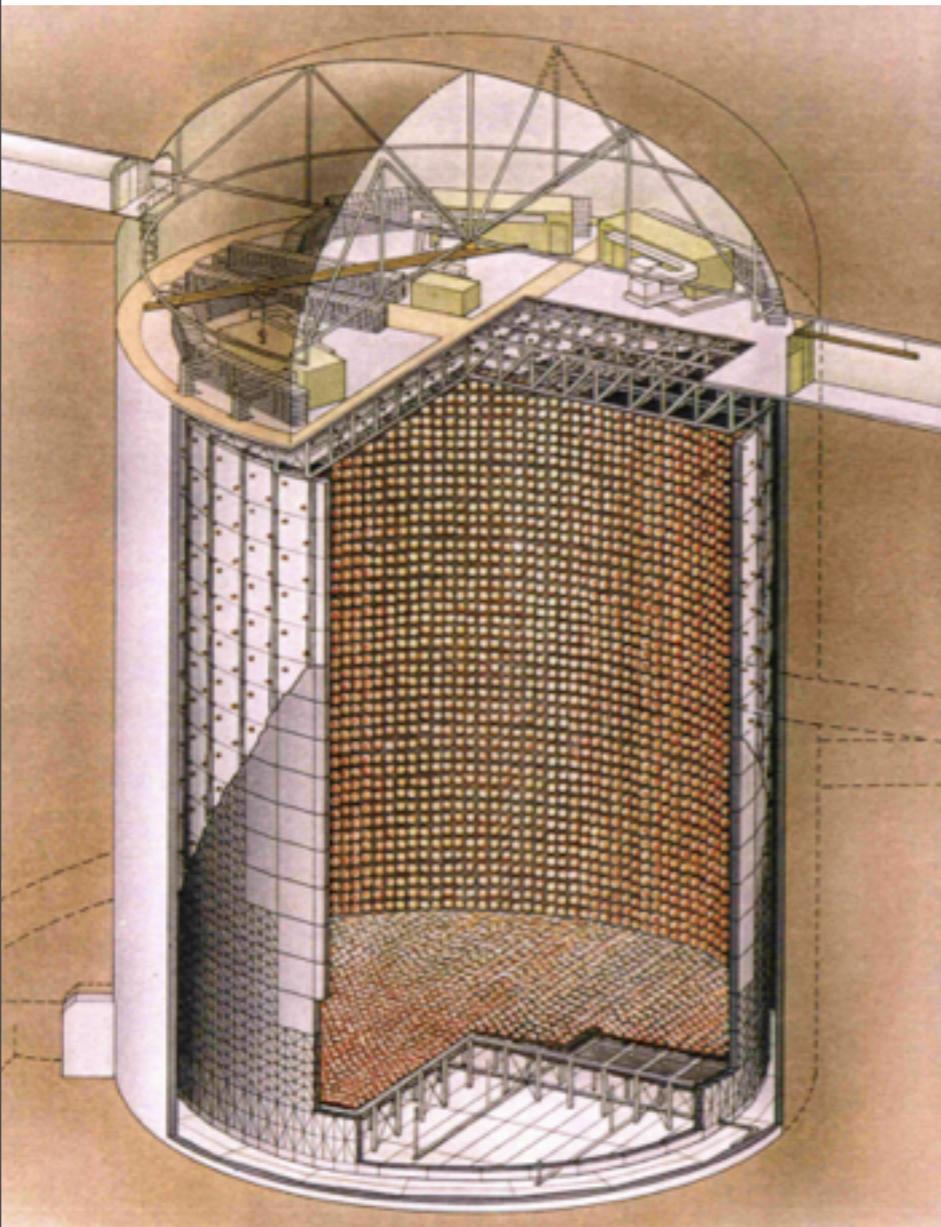
Oszillation: Elementarteilchen „propagieren“ als Masseneigenzustände, wechselwirken aber als Flavoureigenzustände.

**Falls** Neutrinos eine Ruhemasse besäßen, könnten ihre Flavoureigenzustände oszillieren, während sie als Masseneigenzustände von der Sonne zur Erde fliegen...

# Defizite auch bei anderen Neutrinoquellen?

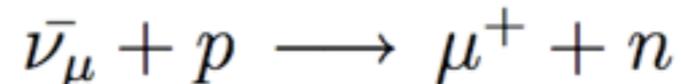
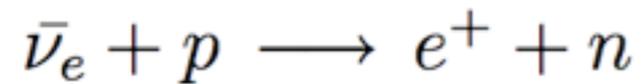
## Atmosphärische Neutrinos

- ▶ Die kosmische Höhenstrahlung erzeugt viele Myonen in der Atmosphäre
- ▶ Bei Erzeugung und Zerfall entstehen viele Myon-Neutrinos
- ▶ Diese sind hochenergetisch und können mit großen Wasser-Cherenkov-Detektoren nachgewiesen werden (Kamiokande, SuperKamiokande):



# Nachweis als Cherenkov-Licht

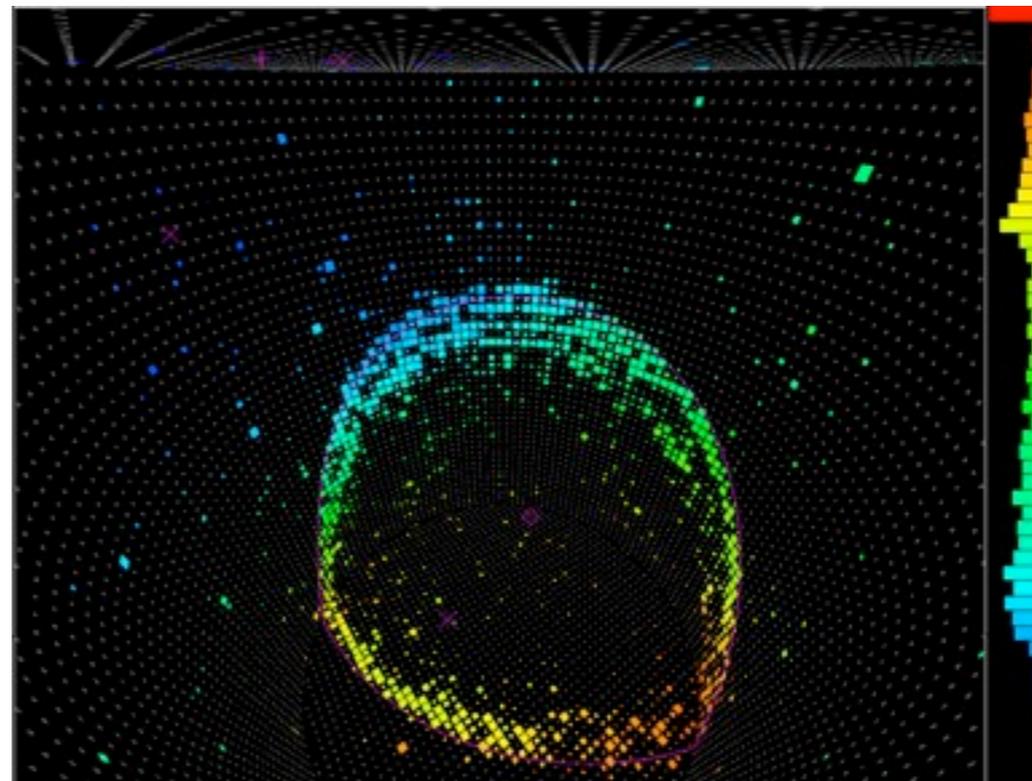
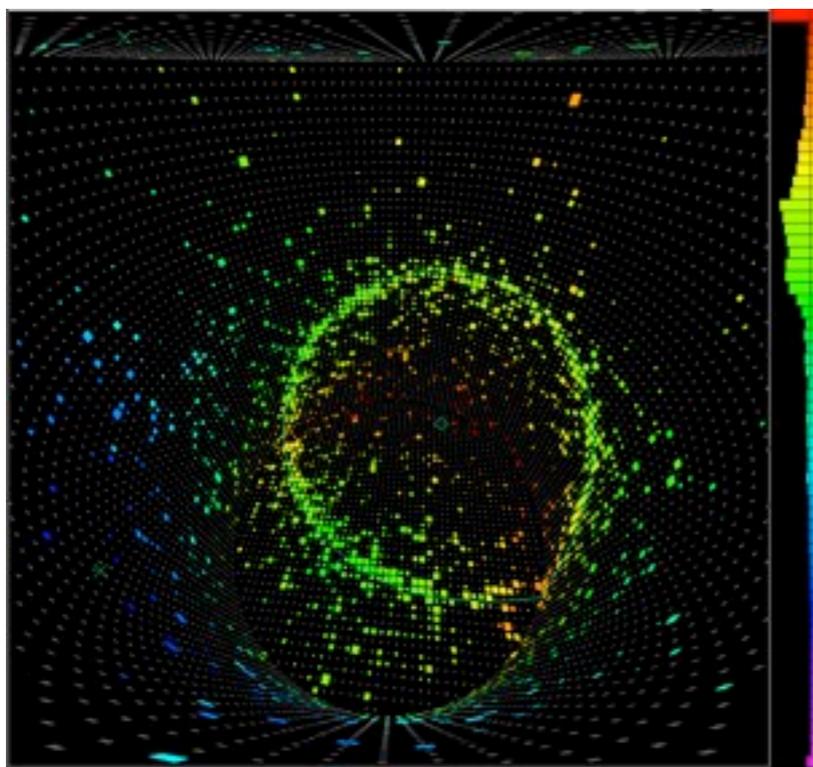
Die Neutrinos erzeugen je nach Flavour Myonen oder Elektronen



Diese sind sehr energiereich und bewegen sich im Wasser überlichtschnell  
→Cherenkov-Licht

Photomultiplier detektieren die Zahl der Photonen und ihre Ankunftszeit

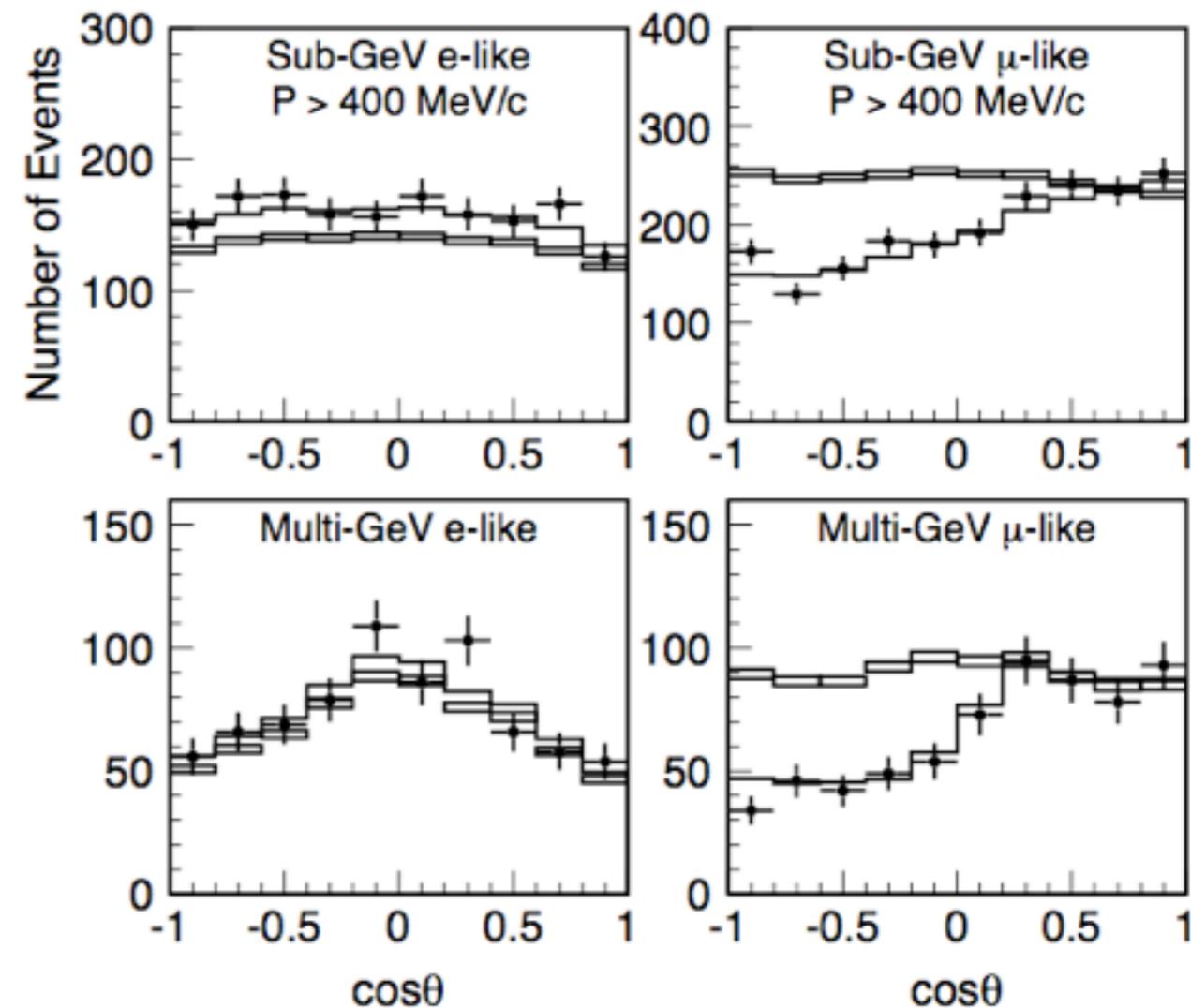
Daraus kann die Flugrichtung und Energie des Neutrinos rekonstruiert werden  
Elektronen erzeugen „ausgefranste“ Cherenkov-Ringe → Neutrinoidentifikation



# Ergebnisse von Super-Kamiokande

- ▶ Darstellung in Abhängigkeit vom Zenithwinkel:
  - ▶  $\cos \theta = +1$ : Zenith, Neutrino kam direkt von oben
  - ▶  $\cos \theta = -1$ : Nadir, Neutrino kam genau durch den Erdmittelpunkt
  - ▶ Die Flugstrecke des Neutrinos wächst von +1 zu -1!
- ▶ Zahl der Elektron-Neutrinos entsprach ungefähr den Erwartungen
- ▶ Zahl der Myon-Neutrinos in größerer Entfernung weit unterhalb der Erwartung
  - ▶ Hinweis auf Neutrino-Oszillation

$$\nu_{\mu} \longrightarrow ?$$



# Oszillationen

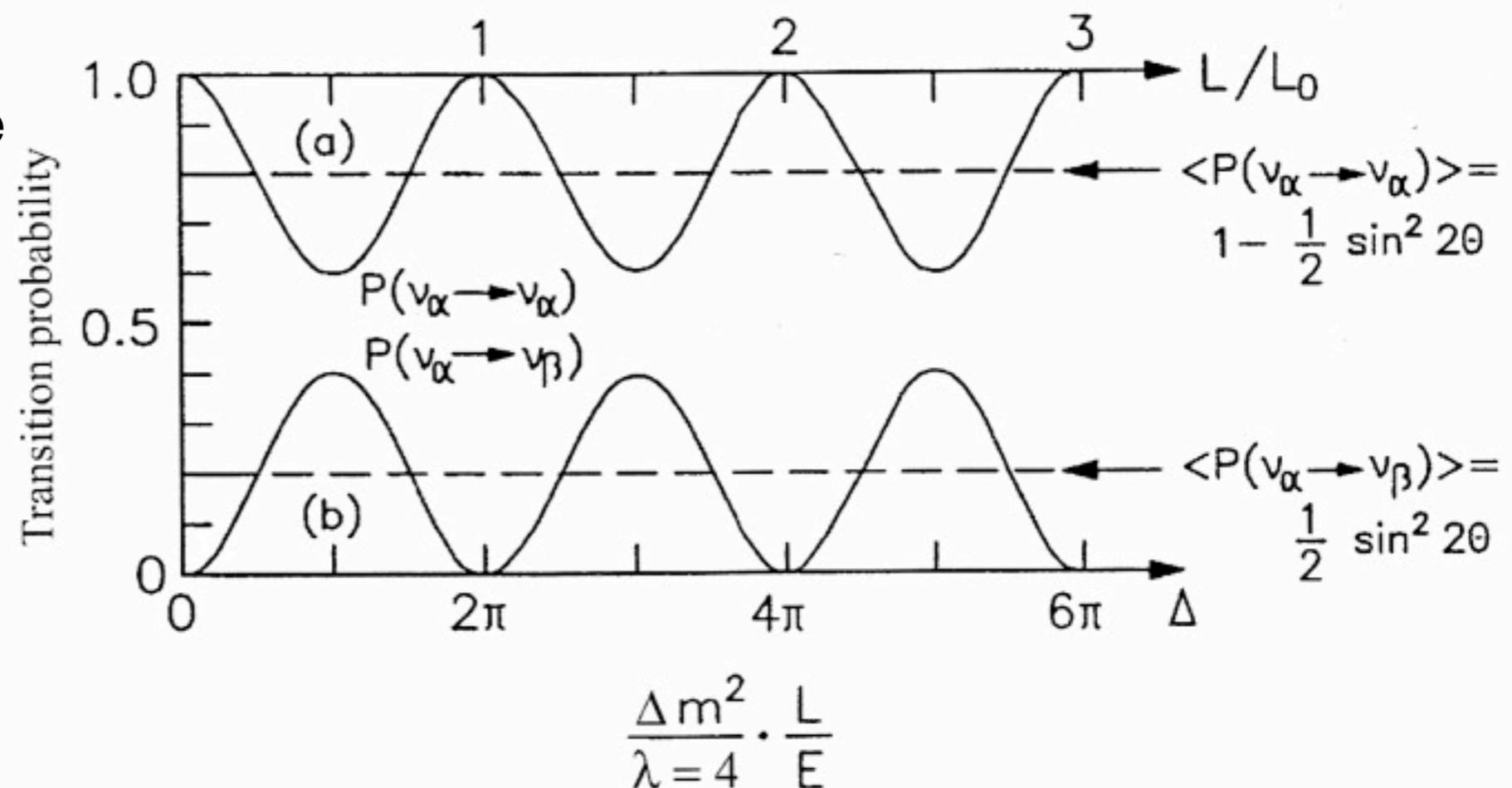
Massen- und Flavoureigenzustände verschieden: Oszillationen möglich

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Propagation als Masseneigenzustand

Wahrscheinlichkeit, nach gewisser Propagationslänge als Flavourzustand wechselzuwirken, oszilliert. Parameter:

- ▶ Mischungswinkel
- ▶ Mischungsamplitude



# Beispiele zu Oszillationen

Oszillationswahrscheinlichkeit:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu) = P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$$

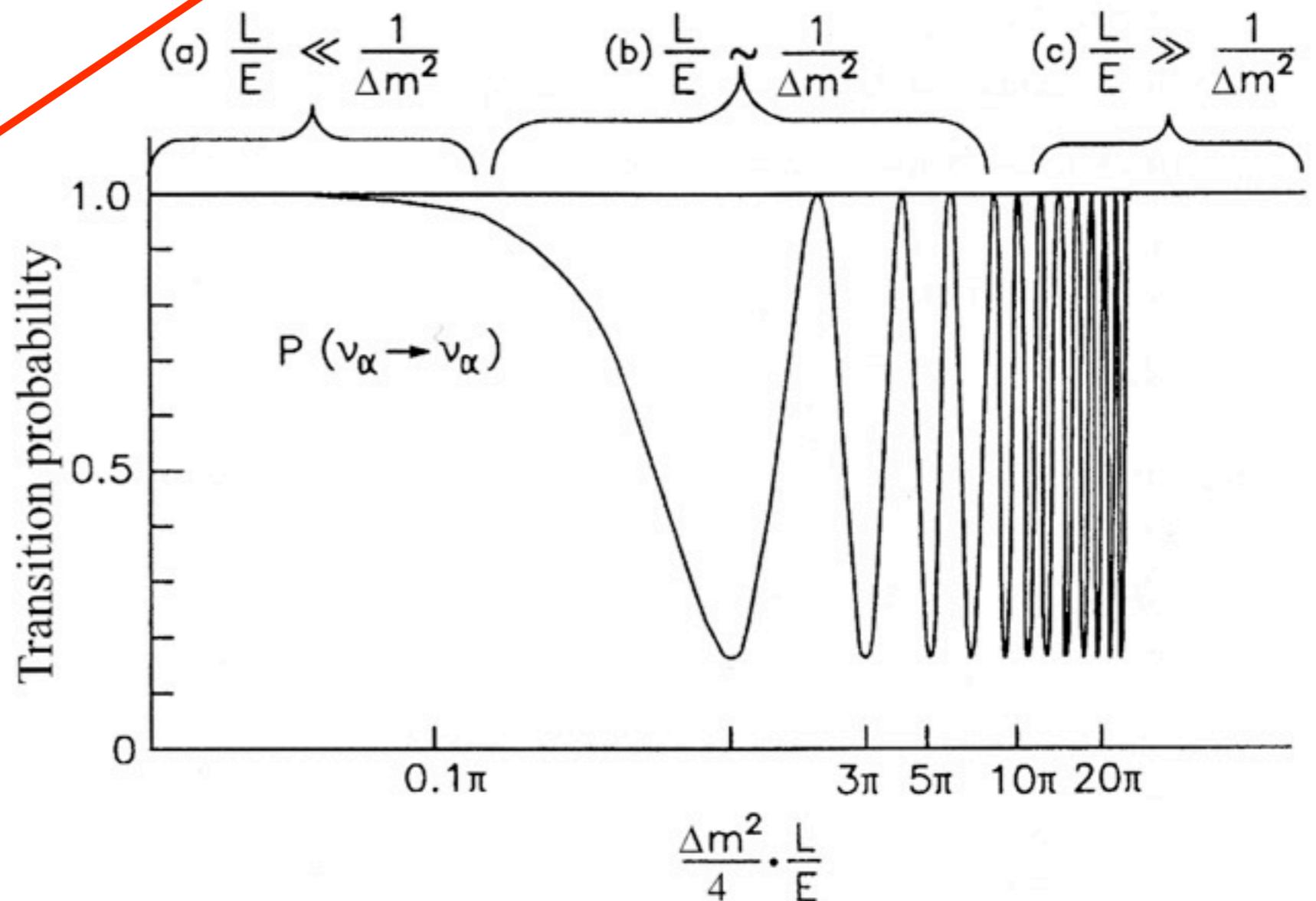
$$= \sin^2(2\theta) \times \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4} \times \frac{L}{E}\right) = 1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$$

Mischungswinkel:  
Naturkonstante

Amplitude:  
Massendifferenz

Experimentell: Wahl  
einer vorteilhaften  
Baseline wichtig!

- ▶ Erste Oszillations-  
experimente am CERN  
(NOMAD, CHORUS) bei  
zu kurzen Baselines!



# Des Rätsels Lösung

Atmosphärische Neutrinos:  $\nu_\mu \longrightarrow \nu_\tau$

$$\sin^2(2\theta_{23}) > 0.92 \text{ [a]}$$

$$\Delta m_{32}^2 = (2.43 \pm 0.13) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ [b]}$$

Solare Neutrinos:  $\nu_e \longrightarrow \nu_\mu$

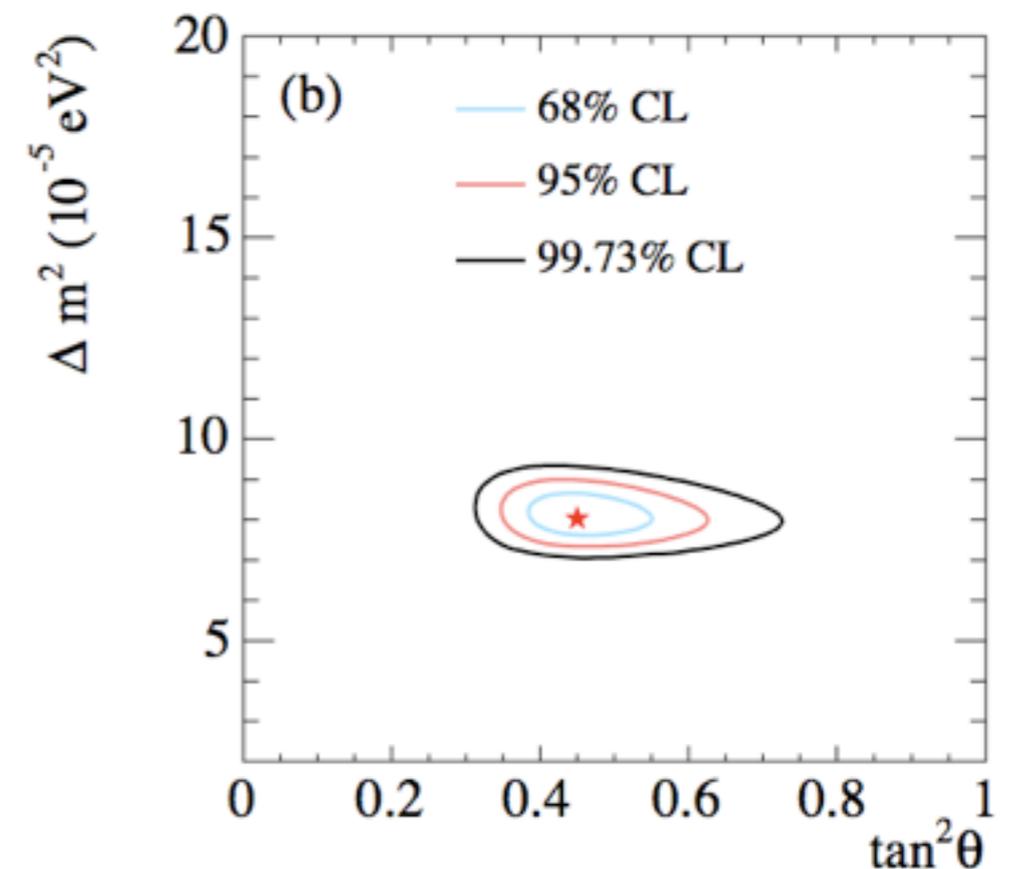
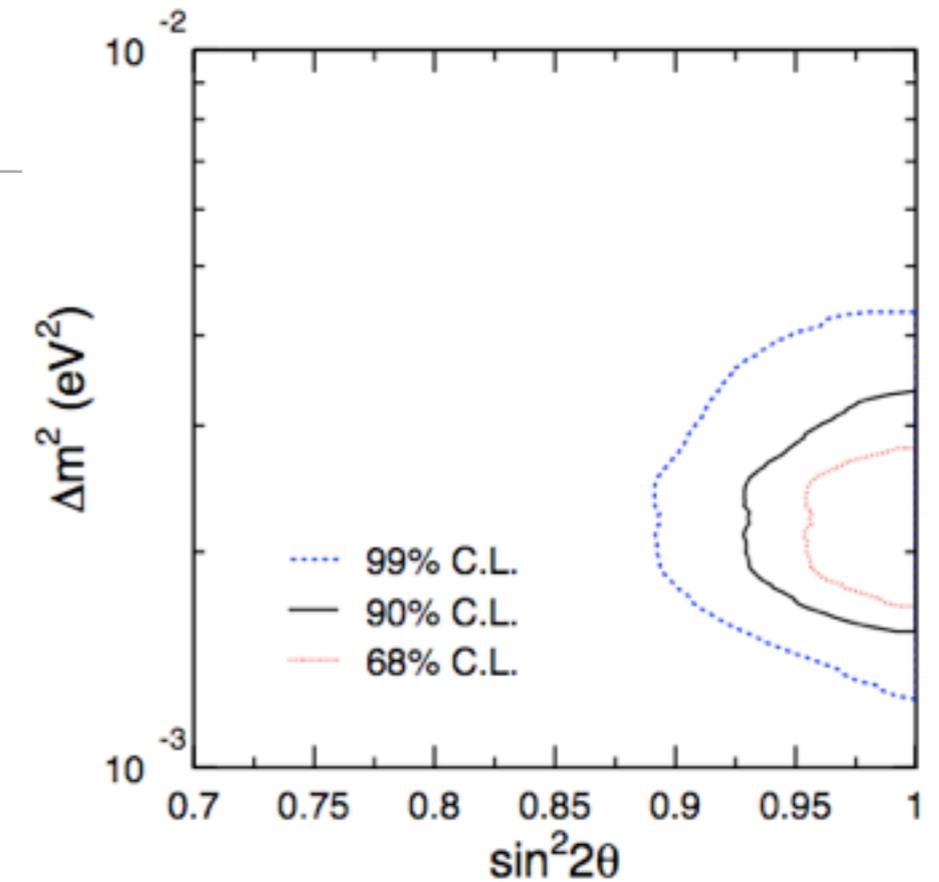
$$\sin^2(2\theta_{12}) = 0.87 \pm 0.03$$

$$\Delta m_{21}^2 = (7.59 \pm 0.20) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$\theta_{13}$  sehr klein, vielleicht sogar 0?

Implikationen für die Masse:

- ▶ Klein, aber vorhanden
- ▶ Absolute Masse nicht mit Oszillationen bestimmbar
- ▶ Massenhierarchie? „Natürliche Reihenfolge“ nicht zwingend!



# Erkenntnisse der Oszillationsexperimente

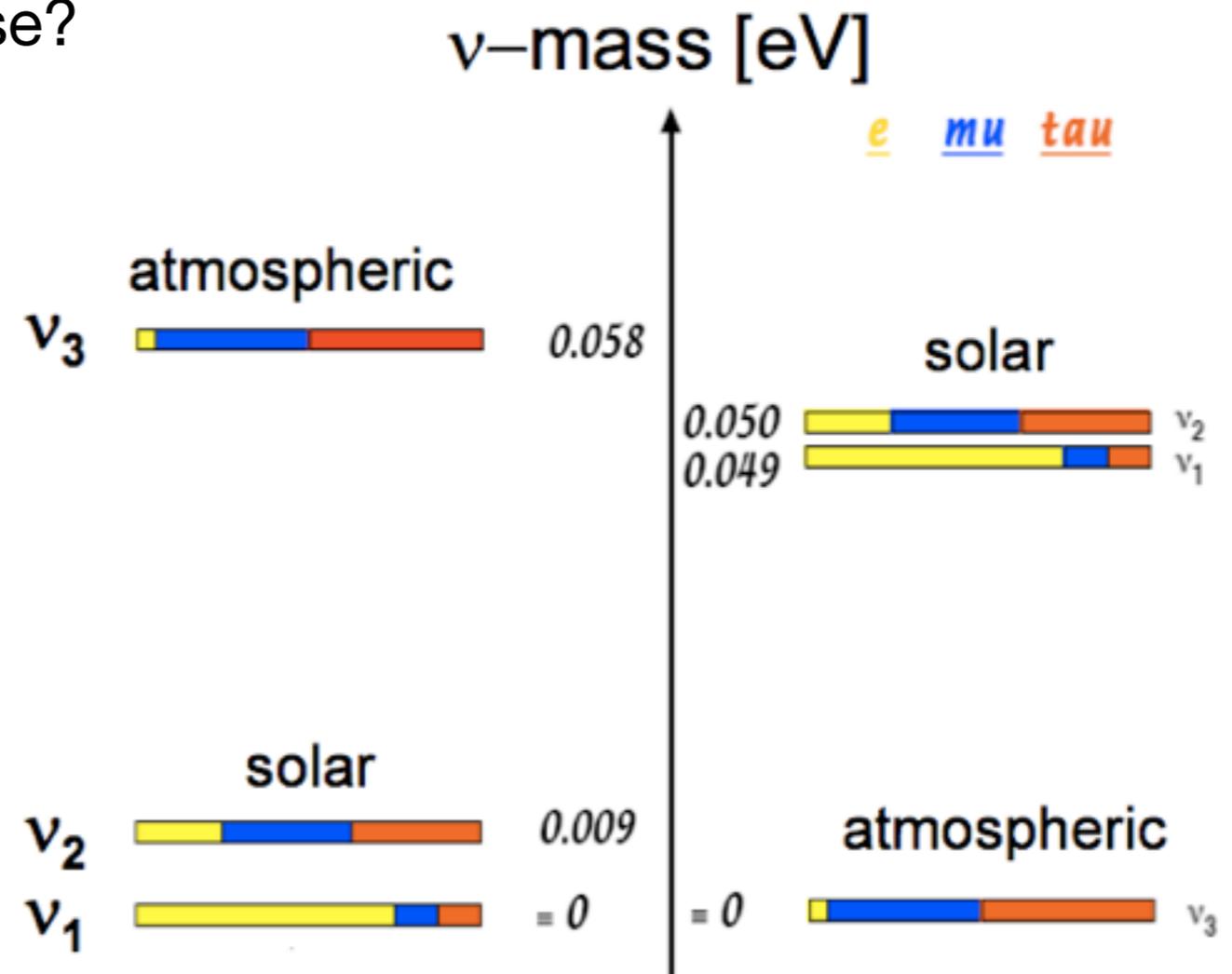
Mischungswinkel für  $\nu_e$  groß, für  $\nu_\mu$  wahrscheinlich sogar maximal

Massendifferenzen sehr klein, aber vorhanden

- ▶ Bestimmung der absoluten Masse?
- ▶ Hierarchie der Massen?

Möglichkeiten zur Massenmessung:

- ▶ Beta-Endpunkt
- ▶ Doppel-Beta-Zerfälle

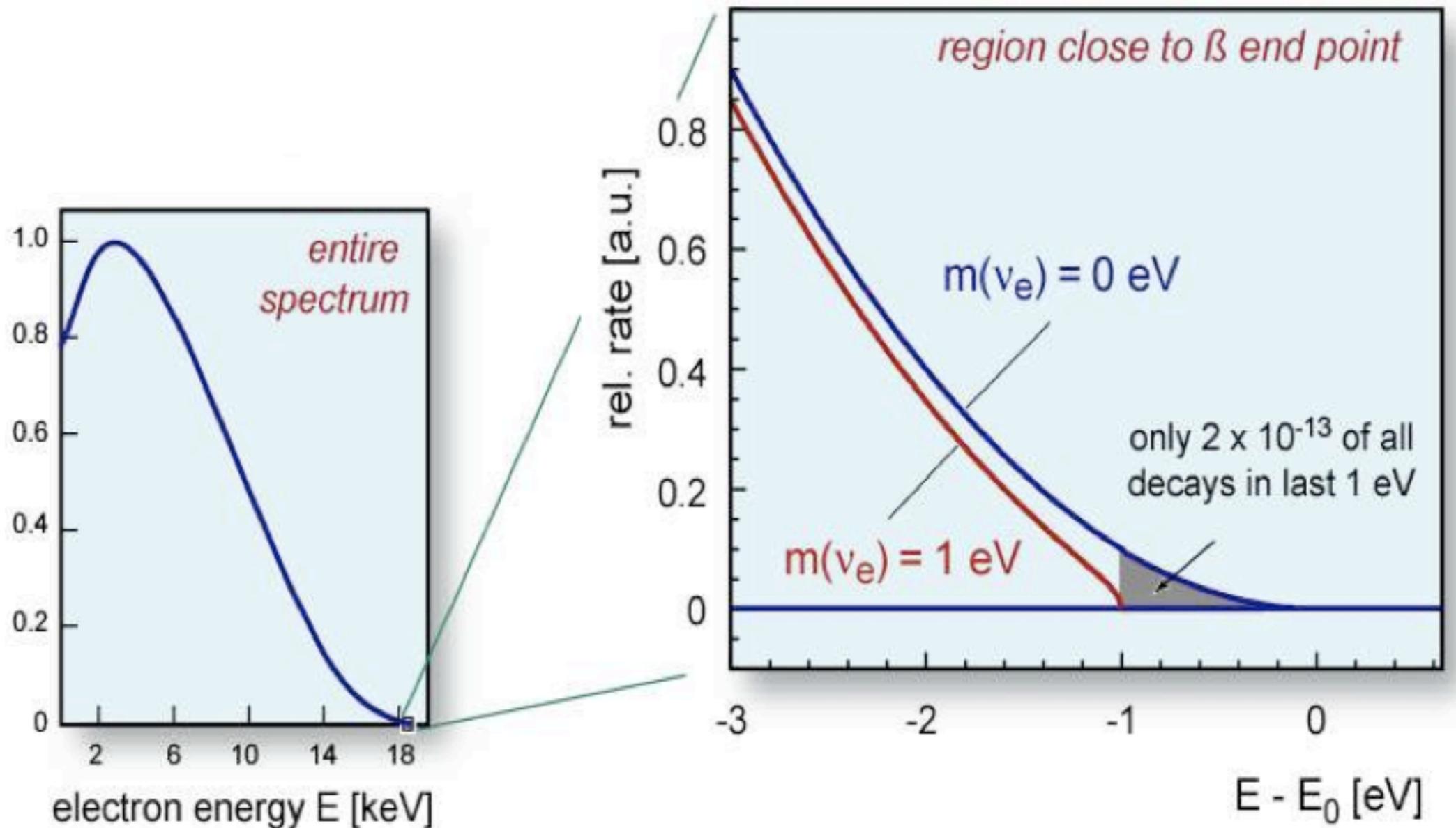


# Beta-Endpunkts-Experimente

Die (kleine) Neutrino-Ruhemasse muss von der kinetischen Energie des Zerfalls-Elektrons „abgezwickelt werden“

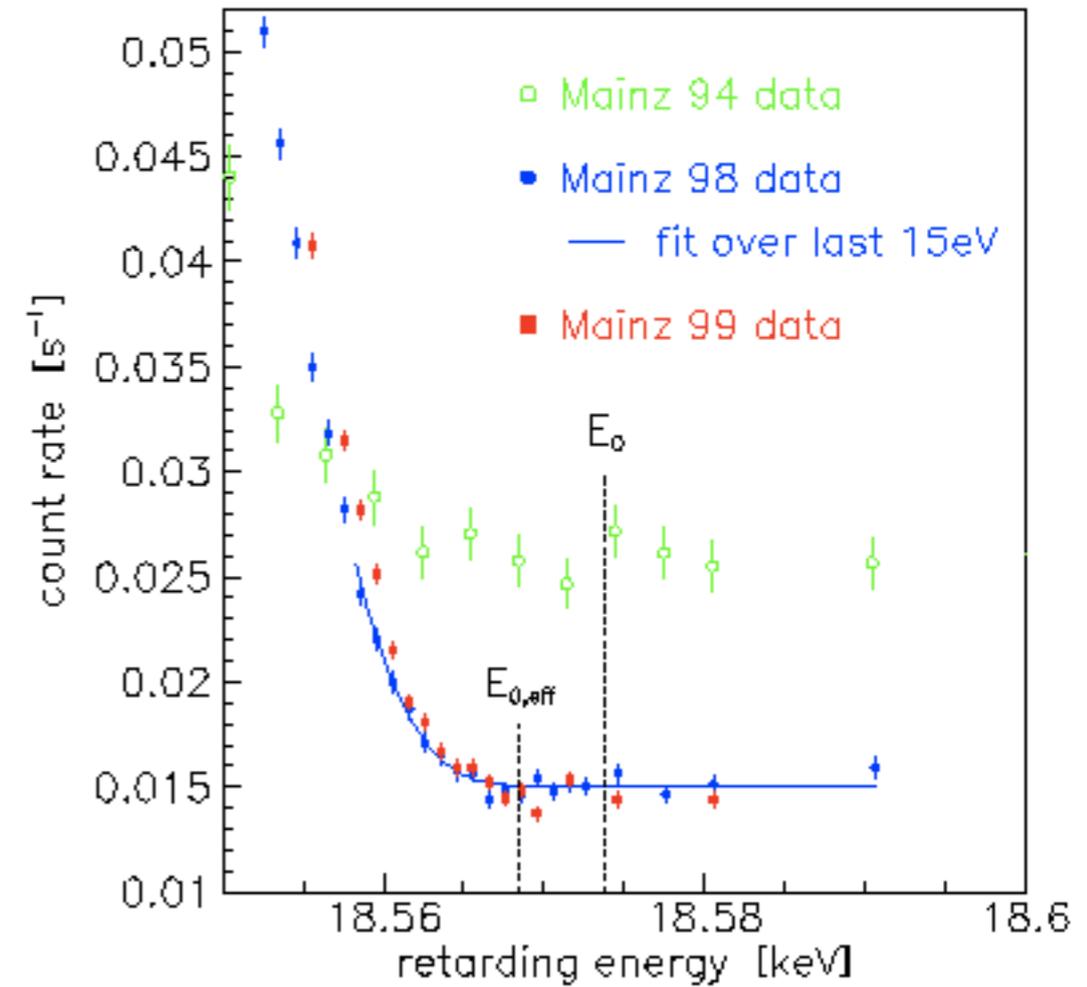
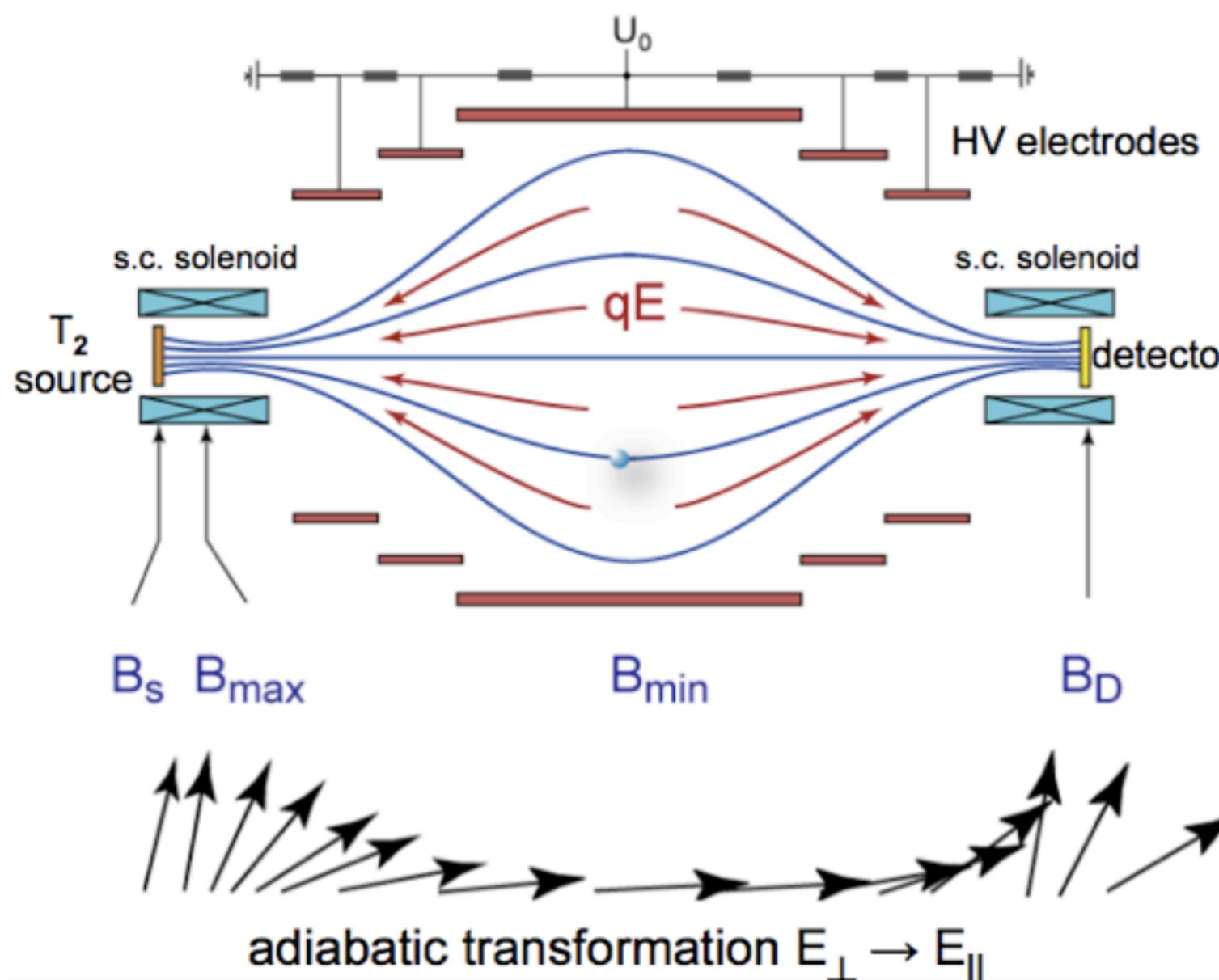
- ▶ Verformung am Ende des  $\beta$ -Spektrums

Am Besten geeignet: Zerfälle mit kleinem Q-Wert, hier ist der Effekt am Größten



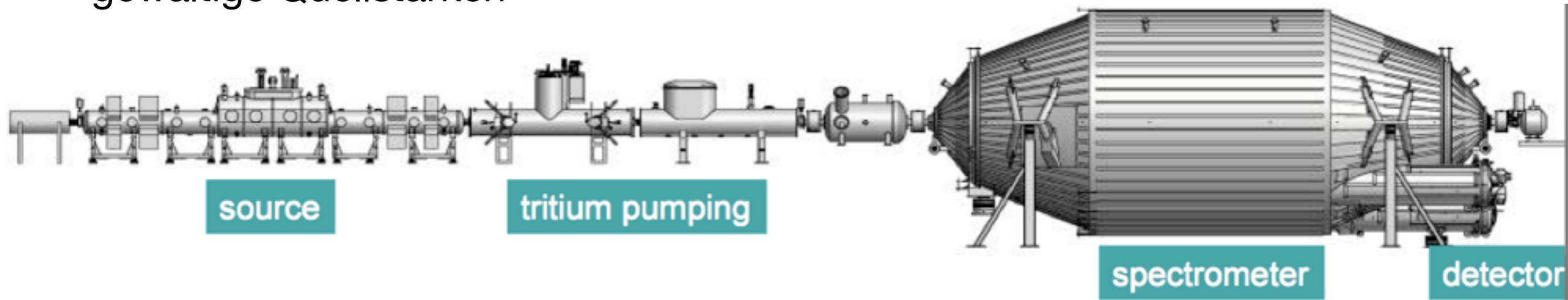
# Bisherige Ergebnisse und künftige Experimente

Bisher: Mainz und Troitsk, zunächst magnetische und dann MAC-E-Filter



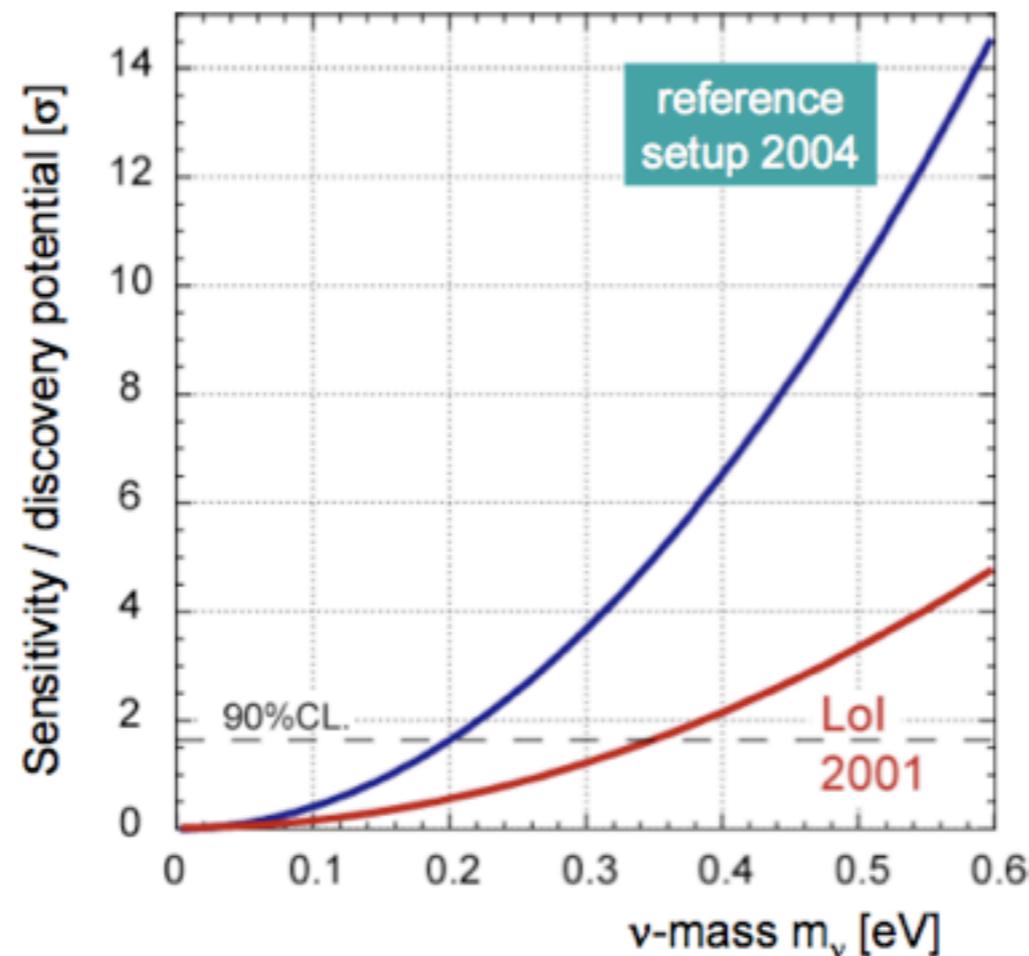
# KATRIN

KATRIN: ‚ultimatives‘ Beta-Endpunkts-Experiment, alles in sehr groß, gewaltige Quellstärken



Sensitivität:  $< 1$  eV

Datennahme:  
ab Ende 2010



statistical & systematic errors  
contribute equally:

- statistical error  $\sigma_{\text{stat}} = 0.018 \text{ eV}^2$
- systematic error  $\sigma_{\text{syst}} < 0.017 \text{ eV}^2$

sensitivity (90% CL)  
 $m(\nu) < 200 \text{ meV}$

discovery potential  
 $m(\nu) = 350 \text{ meV} (5\sigma)$

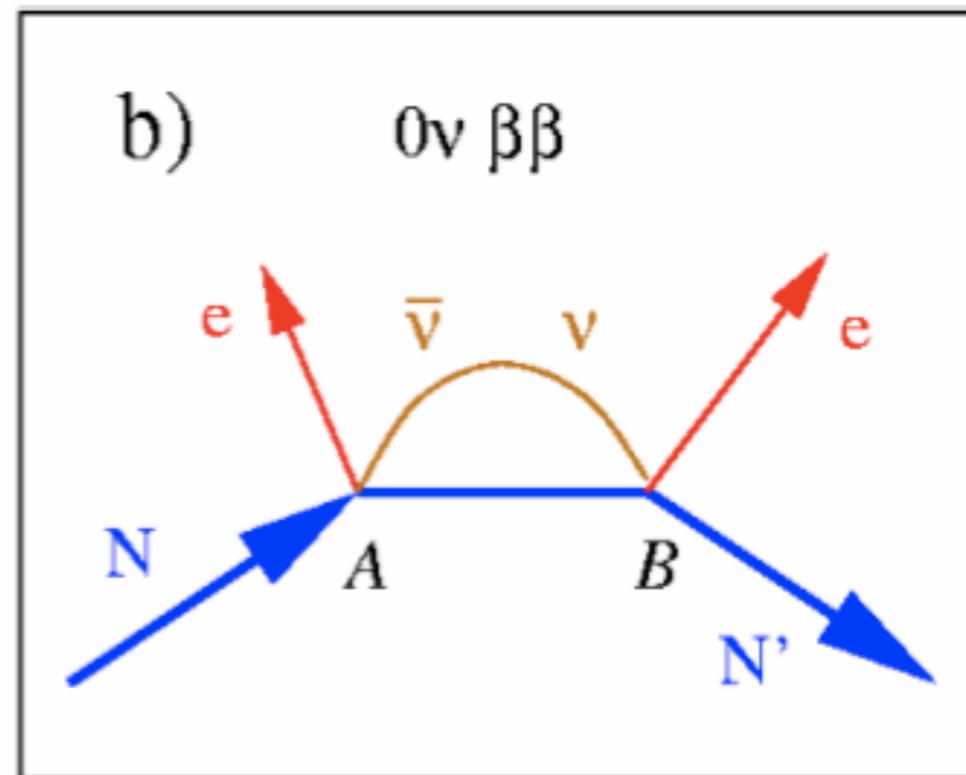
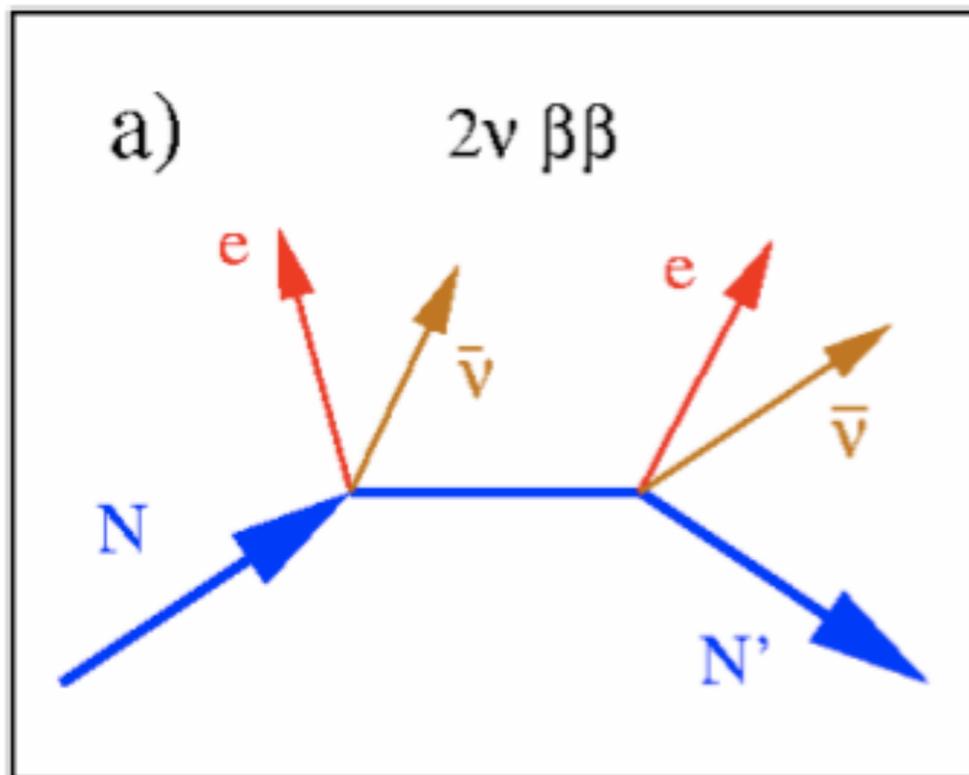
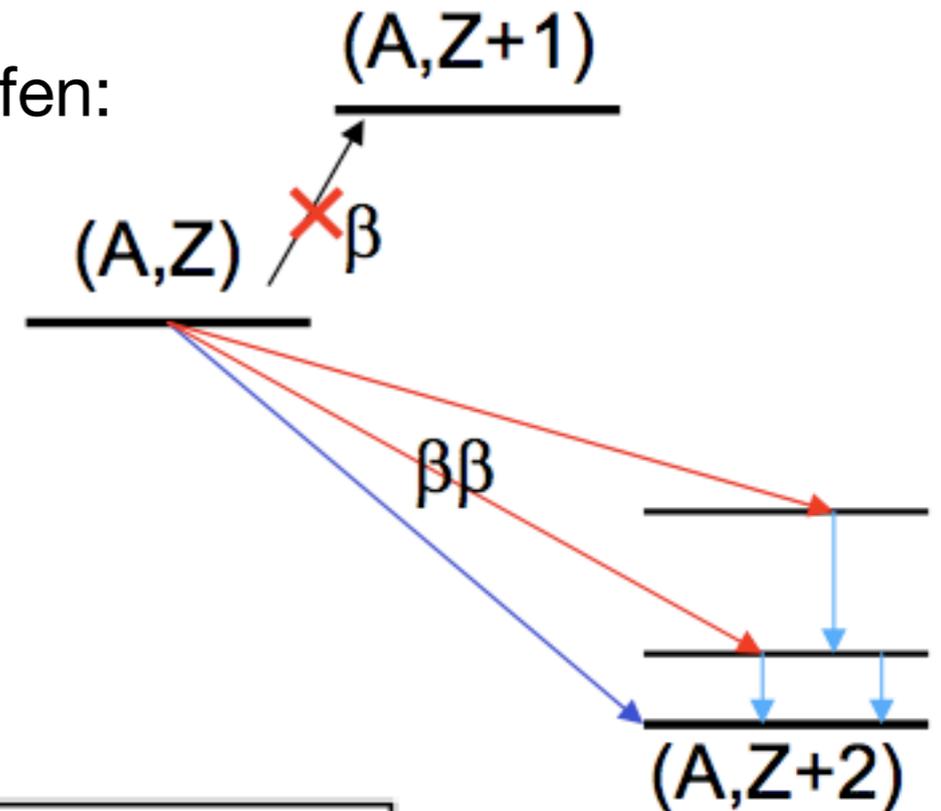
# Doppel-Beta-Zerfall

(Elektron-)Neutrinomassen unterhalb von ca. 100 meV kaum noch durch Beta-Endpunktexperimente zugänglich

Neutrinoloser Doppel-Beta-Zerfall könnte hier helfen:

- ▶ Ist möglich, falls Neutrinos
  - ▶ Majorana-Teilchen sind UND
    - ▶ Ruhemasse besitzen oder
    - ▶ es rechtshändige schwache Ströme gibt

Neutrino-los und Neutrino-behaftet:



# Doppel-Beta-Zerfall

Experimentelles Signal: Rate der neutrinolosen Zerfälle

$$(\mathbf{T}_{1/2}^{0\nu})^{-1} \sim \mathbf{5 \times 10^{-17}} \text{ [y}^{-1}\text{]} \mathbf{F_{0\nu}} \mathbf{(Q,Z)} \mathbf{|M_{0\nu}|^2} \mathbf{m_{\nu}^2/m_e^2}$$

↑
↑
↑
↑

**0νββ  
half-life**
**Phase  
space...**
**Nuclear  
Matrix  
Elements**
**Effective  
Majorana  
neutrino mass**

Geeignete Isotope:

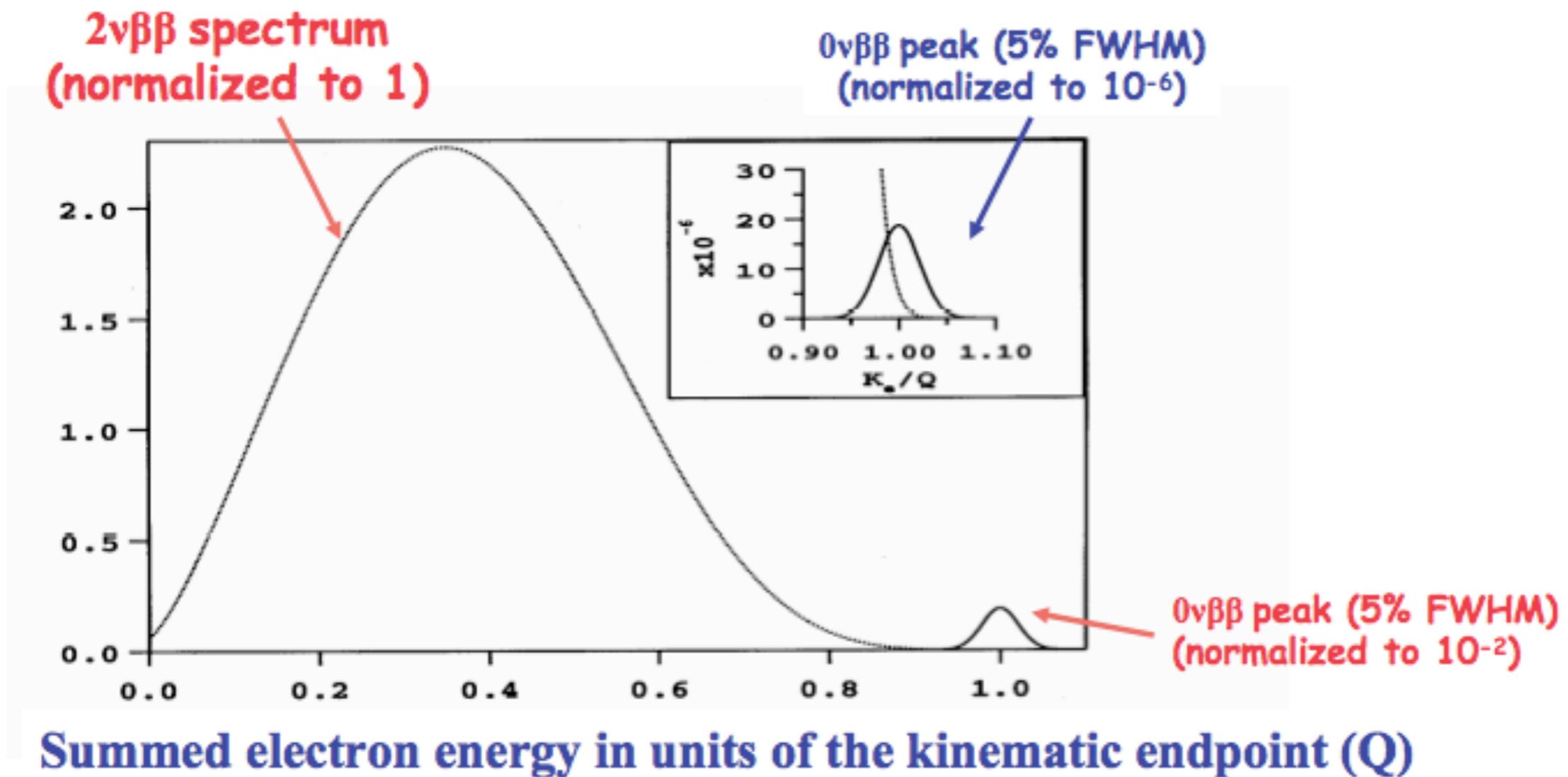
- ▶ Hoher Q-Wert (Phasenraum ~ Q<sup>5</sup>)
- ▶ Gute Matrix-Elemente
- ▶ Hohe natürliche Häufigkeit
- ▶ Q-Wert an für Untergrund ‚günstiger‘ Position

| Candidate                             | Q<br>(MeV) | Abund.<br>(%) |
|---------------------------------------|------------|---------------|
| <sup>48</sup> Ca → <sup>48</sup> Ti   | 4.271      | 0.187         |
| <sup>76</sup> Ge → <sup>76</sup> Se   | 2.040      | 7.8           |
| <sup>82</sup> Se → <sup>82</sup> Kr   | 2.995      | 9.2           |
| <sup>96</sup> Zr → <sup>96</sup> Mo   | 3.350      | 2.8           |
| <sup>100</sup> Mo → <sup>100</sup> Ru | 3.034      | 9.6           |
| <sup>110</sup> Pd → <sup>110</sup> Cd | 2.013      | 11.8          |
| <sup>116</sup> Cd → <sup>116</sup> Sn | 2.802      | 7.5           |
| <sup>124</sup> Sn → <sup>124</sup> Te | 2.228      | 5.64          |
| <sup>130</sup> Te → <sup>130</sup> Xe | 2.533      | 34.5          |
| <sup>136</sup> Xe → <sup>136</sup> Ba | 2.479      | 8.9           |
| <sup>150</sup> Nd → <sup>150</sup> Sm | 3.367      | 5.6           |

# Doppel-Beta-Zerfall

Spektrale Form des Summenenergiespektrums:

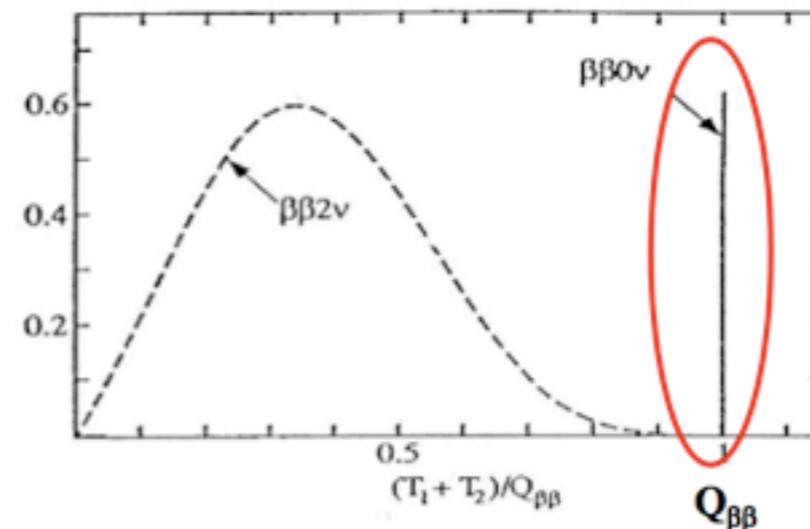
- ▶  $2\nu$ -DBD: Typisches Beta-Spektrum
- ▶  $0\nu$ -DBD: Linie beim Q-Wert des Zerfalls



# Experimentelle Rahmenbedingungen

- ▶ Reichweite der Elektronen gering → Quelle = Detektor
- ▶ Extrem seltener Zerfall (Höhere Ordnung) → Große Quellmasse (viele kg bis t)
- ▶ Durch Seltenheit auch große Anforderungen an den experimentellen Untergrund → Hochreine Abschirmungen, Vermeidung von verunreinigten Bauteilen (wie z.B. Photomultipliern, Elektronik, etc.)

$\varepsilon$  = detection efficiency  
 $a$  =  $\beta\beta$  isotope fraction → **enrichment**  
 $M$  = mass of detector in kg  
 $T$  = data taking time [y]  
 $B$  = **background index** in cts/(keV kg y)  
 $R$  = energy resolution at  $Q_{\beta\beta}$  [keV]



**With bck** →  $T_{1/2}^{0\nu} \propto a\varepsilon \sqrt{\frac{MT}{BR}}$

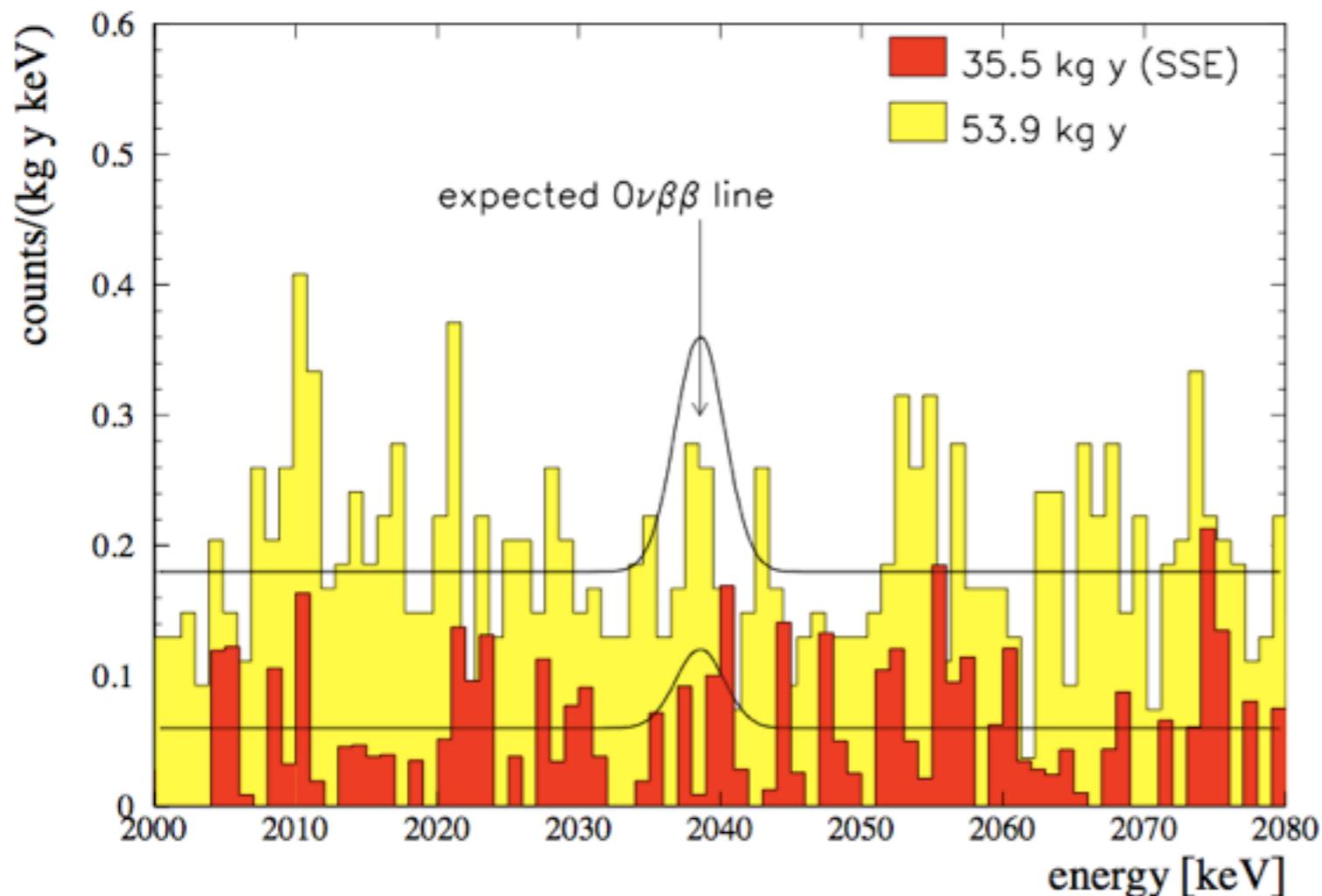
$T_{1/2}^{0\nu} \propto a\varepsilon MT$  ← **Bck free**

- ▶ Mit Untergrund: Gewinn an HWZ nur noch Wurzelförmig!

# Experimente: Heidelberg-Moskau

Prinzip:

- ▶ Benutze möglichst große (und in  $^{76}\text{Ge}$  angereicherte) Ge-Detektoren
  - ▶ Hervorragende Energieauflösung
  - ▶ Halbleiter-Kristalle sind extrem ‚sauber‘
- ▶ Setup im Untergrundlabor (LNGS) zum Schutz vor kosmischer Strahlung
- ▶ Möglichst gute Abschirmung (Blei, Kupfer, n-shield)

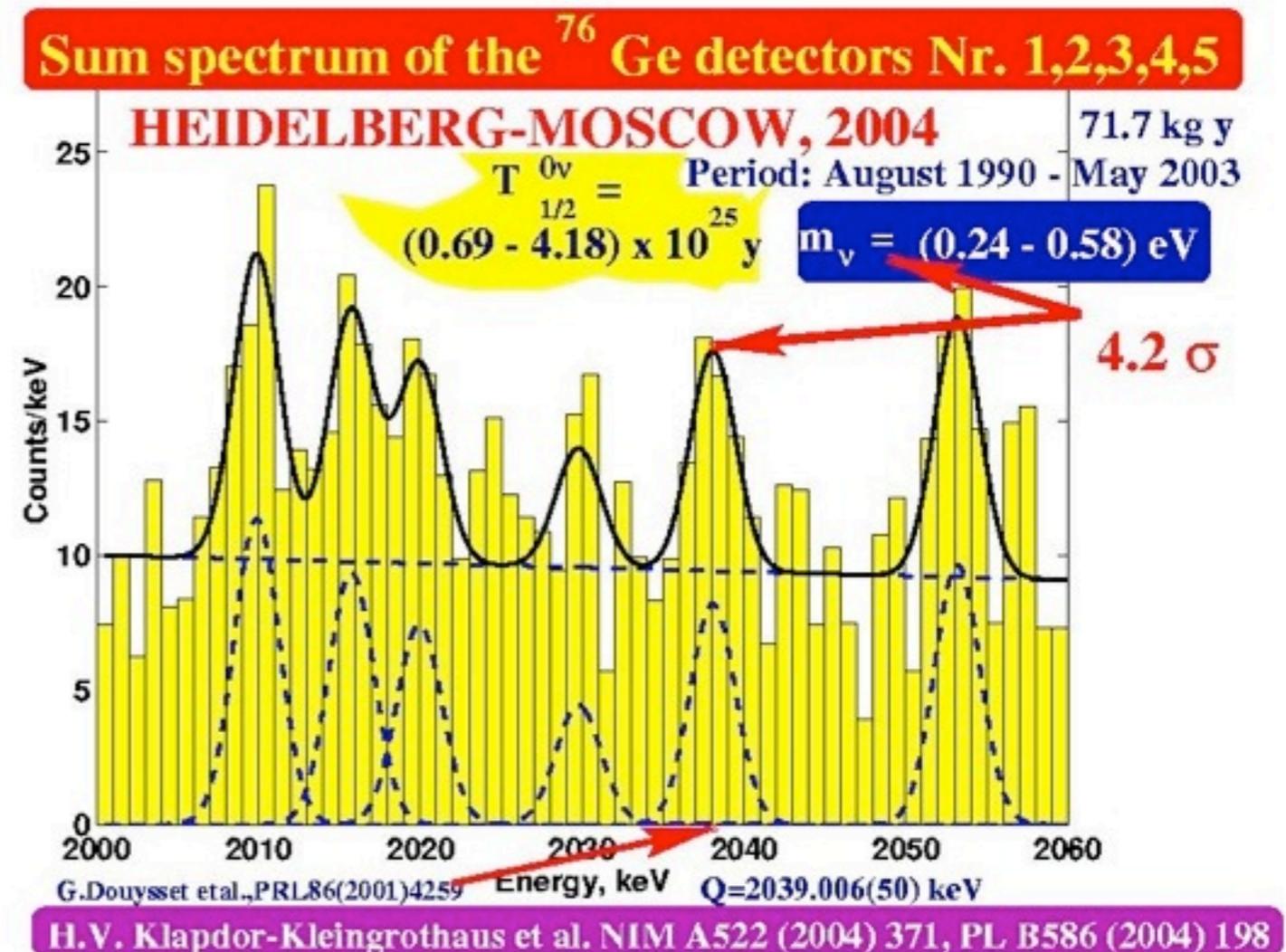


# Experimente: Heidelberg-Moskau

Ergebnisse:

- ▶ a) Die Kollaboration verneint eine positive Evidenz und gibt eine Grenze von  $T_{1/2} > 1.9 \cdot 10^{25}$  Jahren oder  $m_{\nu e} < 0.35$  eV an
- ▶ b) Eine Subgruppe kommt mit alternativen Analysemethoden zu einem ihrer Meinung nach signifikanten Nachweis des neutrinolosen Zerfalls:
  - ▶  $T_{1/2} = (0.69-4.18) \cdot 10^{25}$  Jahre
  - ▶  $m_{\nu e} = (0.24-0.58)$  eV
  - ▶ Heftige Debatten...
  - ▶ Nachmessen, aber wie?

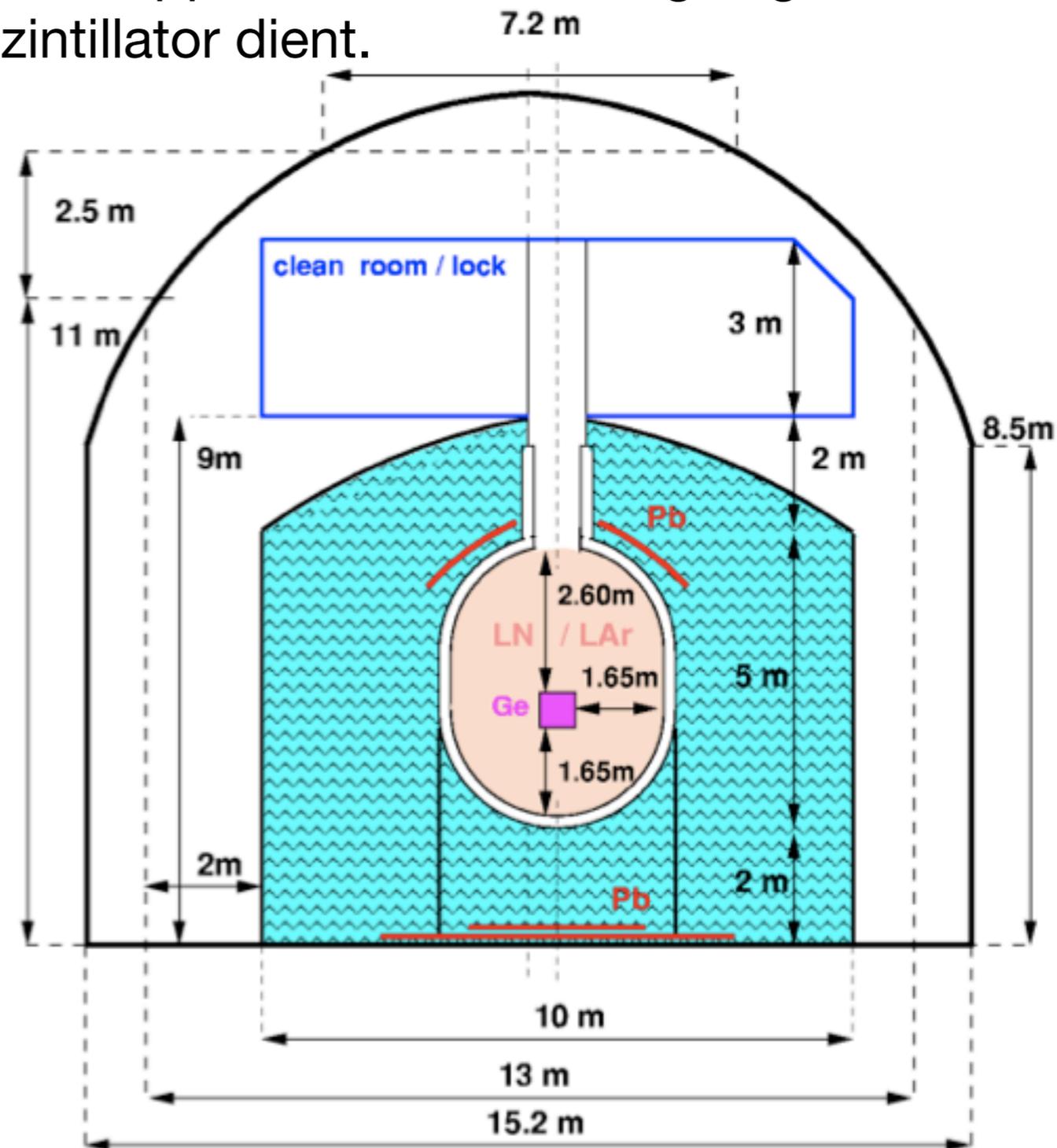
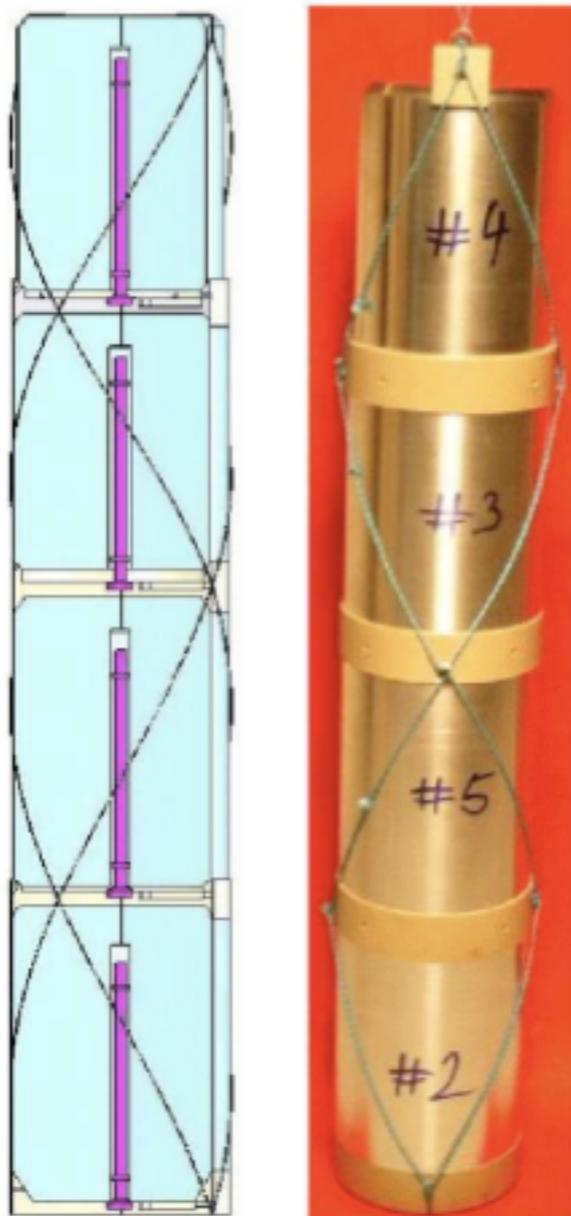
$$T_{1/2}^{0\nu} \propto a\varepsilon \sqrt{\frac{MT}{BR}}$$



# Der Nachfolger: GERDA

Das Potential von Heidelberg-Moscow war im Wesentlichen ausgereizt: Nur eine signifikante Reduktion des Untergrunds wird helfen.

Neuer Ansatz: Ge-Kristalle mit minimalem Support in einem Flüssig-Argon-Tank, das als Abschirmung und Veto-Szintillator dient.



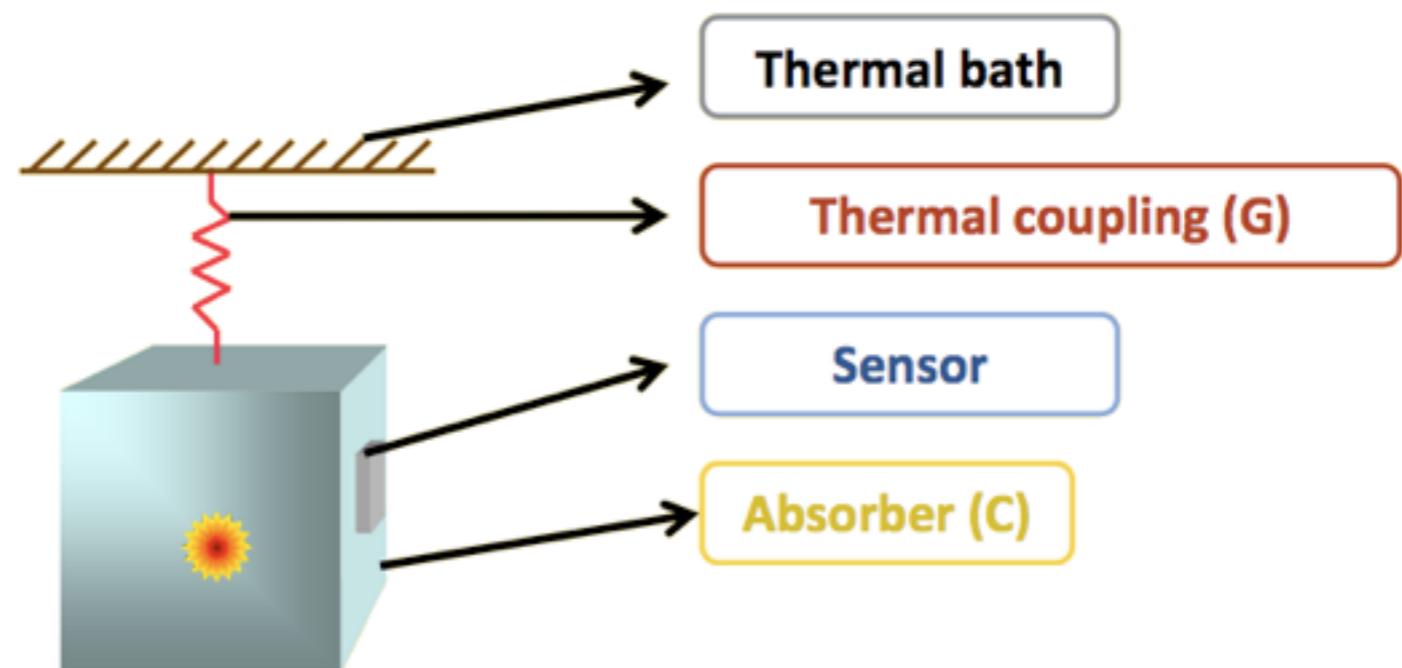
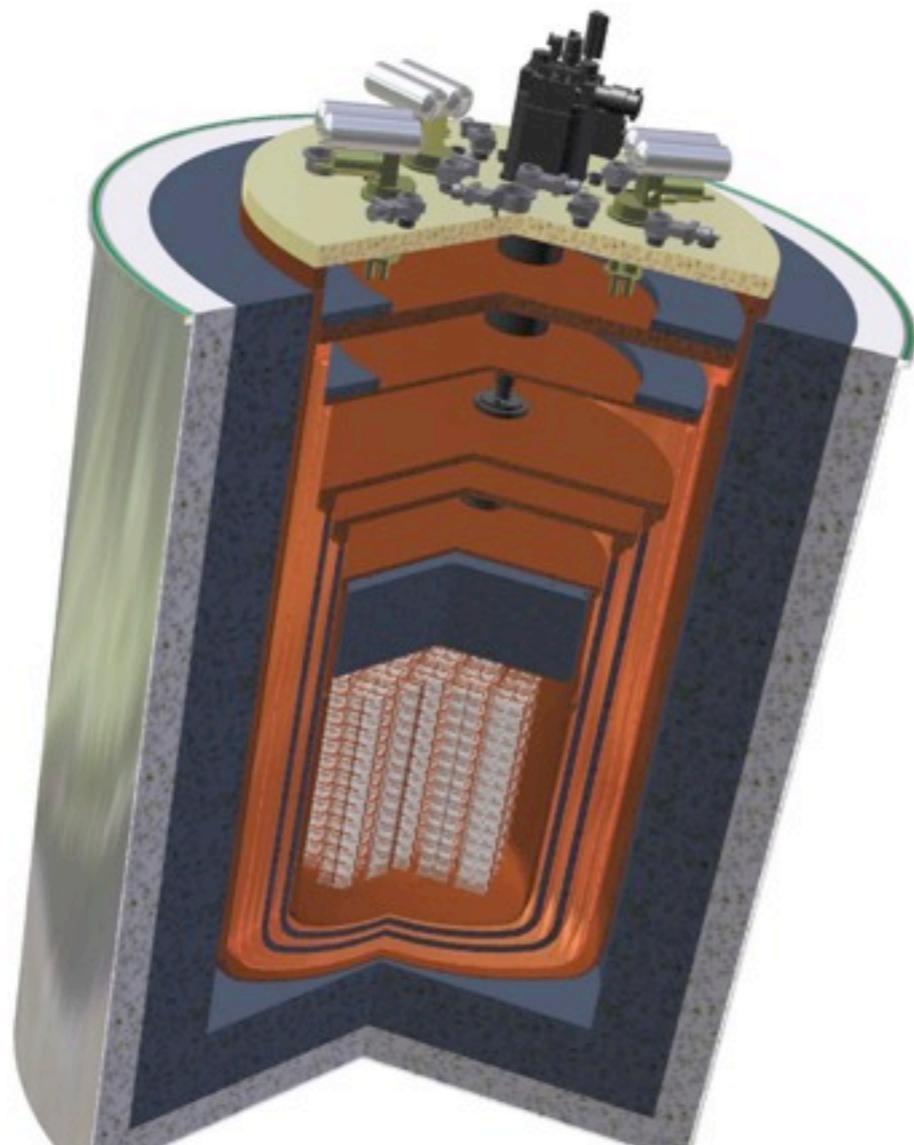
# Kryogene Bolometer, z.B. CUORE/CUORICINO

Cuore benutzt  $\text{TeO}_2$ -Kristalle als Quellen und Detektoren

Bei Temperaturen knapp über dem absoluten Nullpunkt verhält sich in diesen die Temperatur wie  $T = k \cdot E^3$

Die Temperaturerhöhung wird mit extrem empfindlichen Thermistoren gemessen

Hauptproblem ist die Reinheit des benötigten He-Entmischungskryostaten



# Kryogene Bolometer, z.B. CUORE/CUORICINO

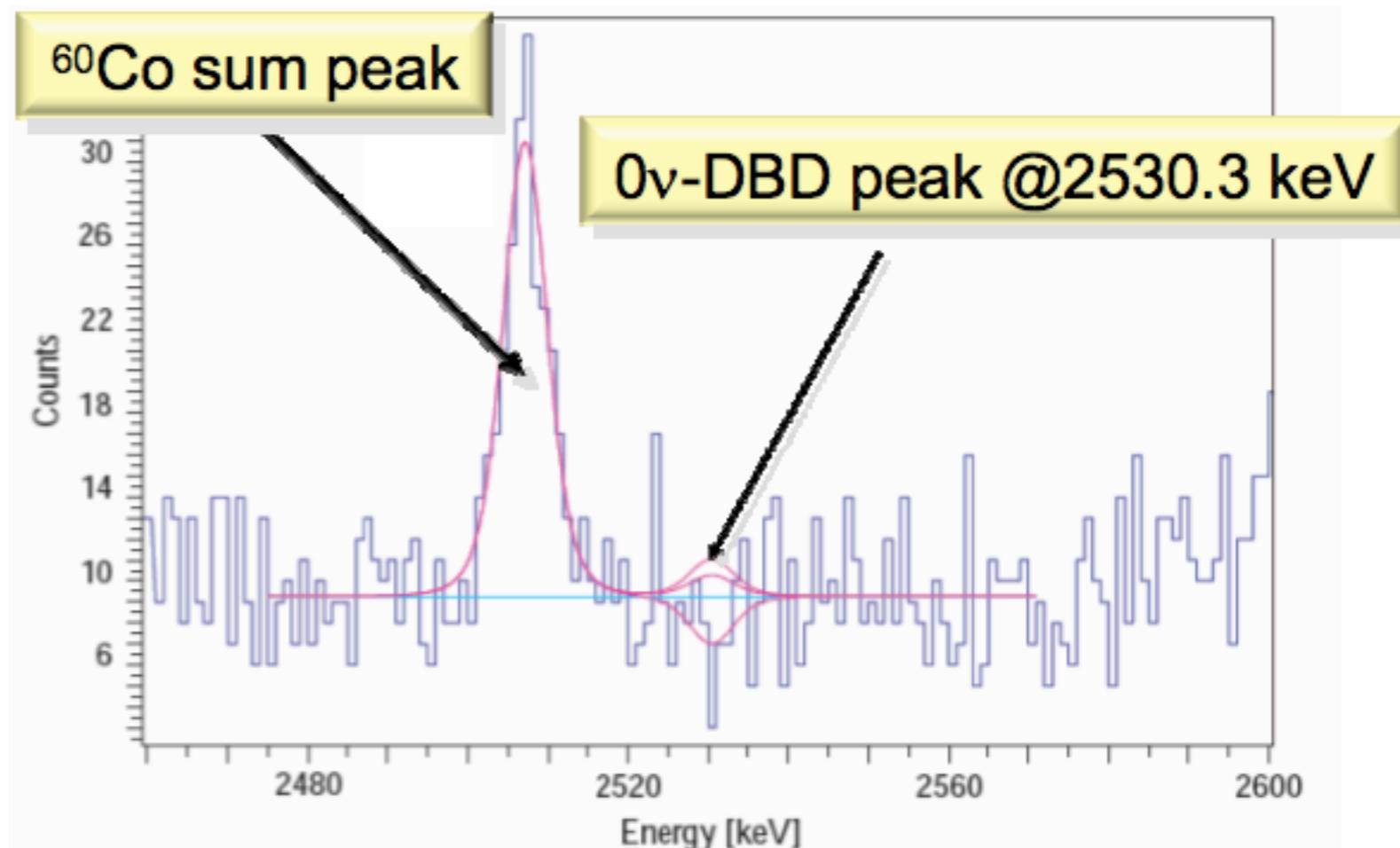
Energieauflösung sehr gut

Untergrund wird immer besser Verstanden

Cuoricino hat die Datennahme abgeschlossen, Cuore soll 2011 mit den Messungen beginnen

Aktuelle Limits von Cuoricino:

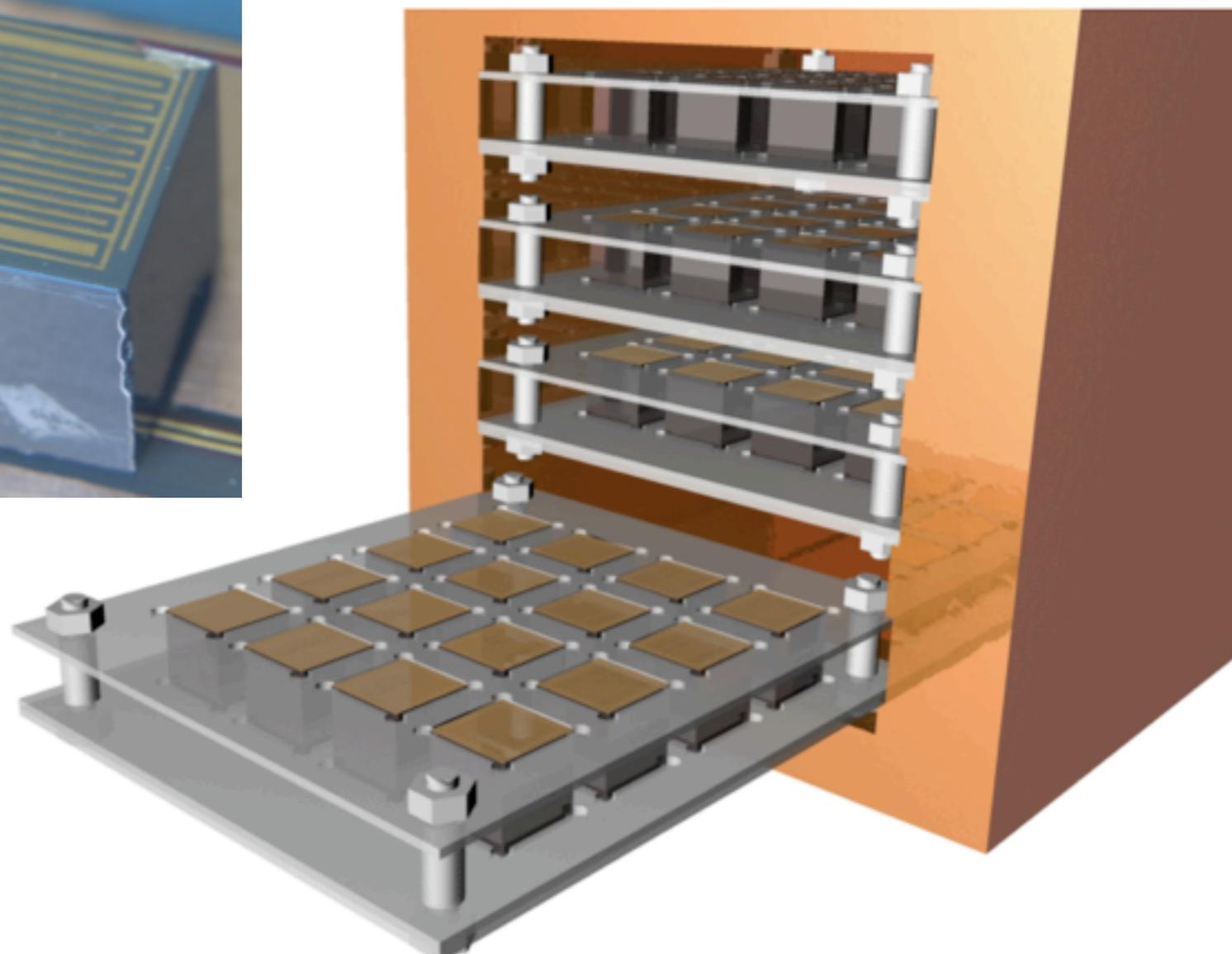
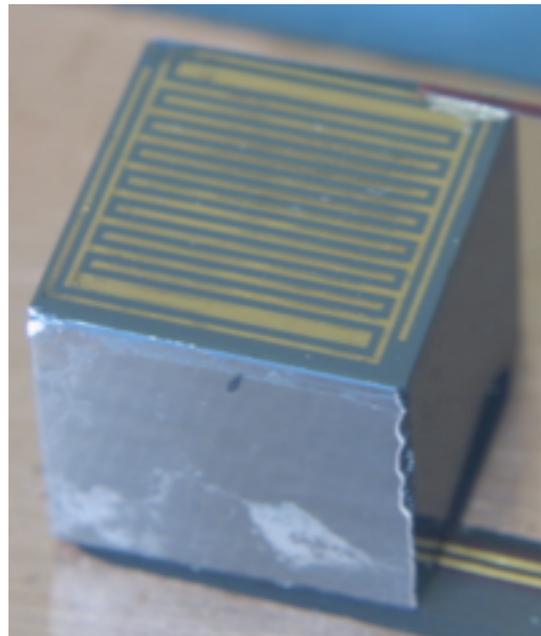
- ▶  $T_{1/2} > 3.1 \cdot 10^{24}$  Jahren
- ▶  $m_{\nu e} < 0.2-0.68$  eV (abhängig von Matrixelementen)



# COBRA

Idee: Halbleiter-Detektoren sind sauber und haben eine gute Energieauflösung → Suche Halbleiter mit ‚besseren‘ Isotopen

CdTe bzw. CdZnTe werden als ‚high-Z‘ und ‚Raumtemperatur-Detektoren‘ seit einigen Jahren aktiv entwickelt, v.a. für medizinische Anwendungen



| Candidate                                     | Q (MeV) | Abund. (%) |
|---|---------|------------|
| $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$   | 4.271   | 0.187      |
| $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$   | 2.040   | 7.8        |
| $^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$   | 2.995   | 9.2        |
| $^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$   | 3.350   | 2.8        |
| $^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$ | 3.034   | 9.6        |
| $^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$ | 2.013   | 11.8       |
| $^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$ | 2.802   | 7.5        |
| $^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$ | 2.228   | 5.64       |
| $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ | 2.533   | 34.5       |
| $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$ | 2.479   | 8.9        |
| $^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$ | 3.367   | 5.6        |

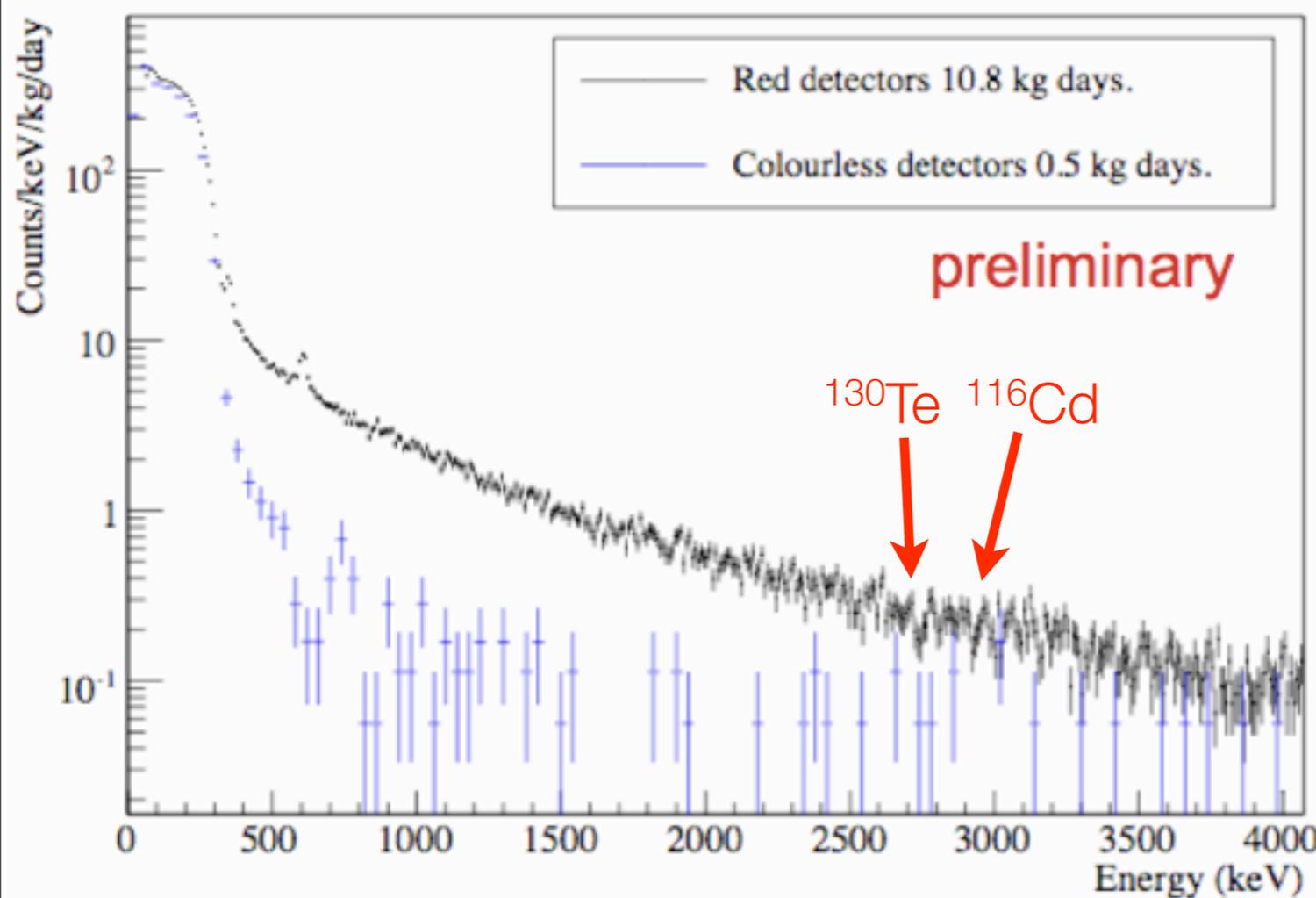
# COBRA

Kristallzucht von CdZnTe noch schwierig → Array von kleinen Kristallen

Kontaminationen in der Oberflächenpassivierung → Alternativen gefunden

An einer ‚low-mass‘-Lösung für die Kontaktierung so vieler Kanäle wird noch gearbeitet

Aktuelle Kristallzahl: Maximal 64, Ziel: 64000!



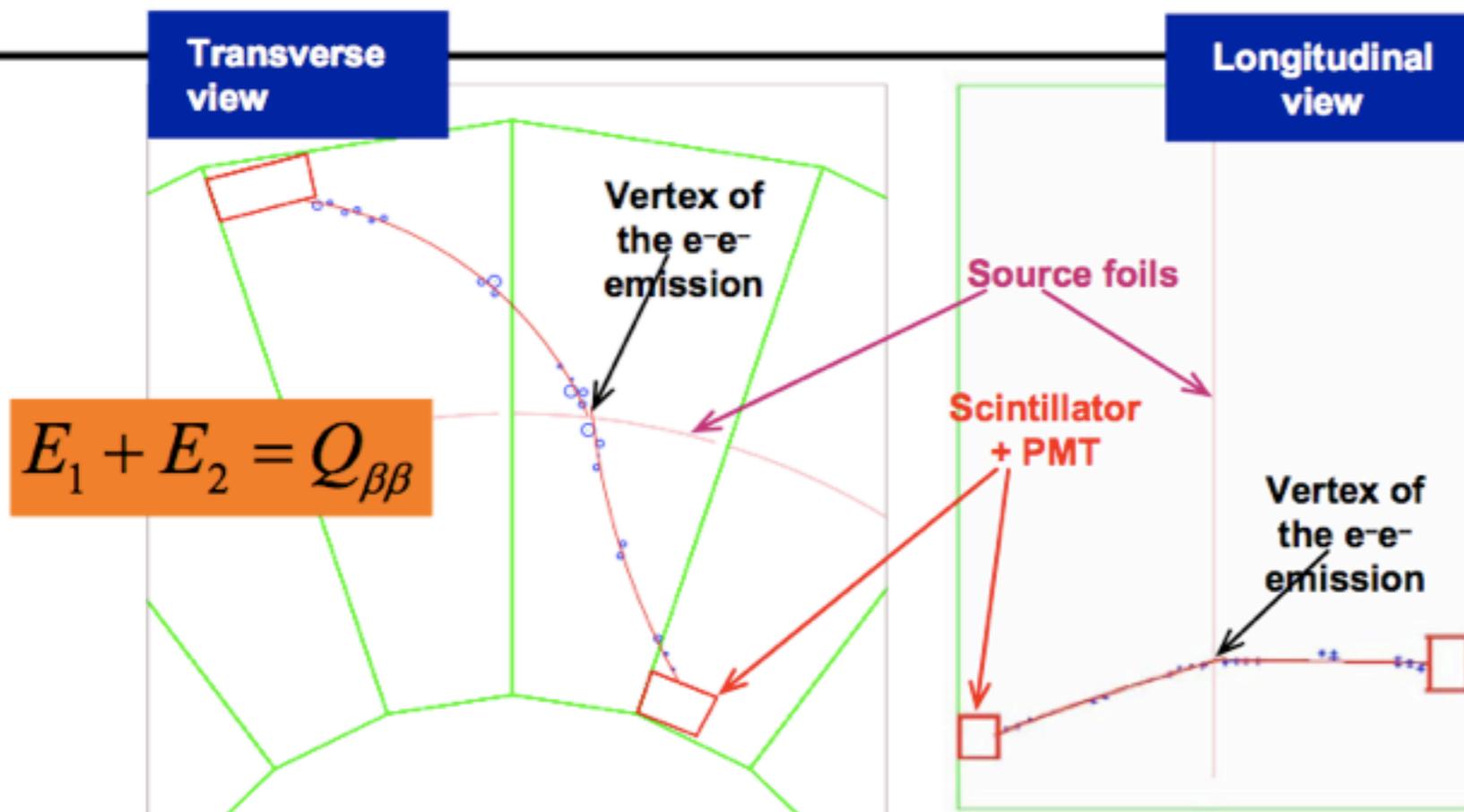
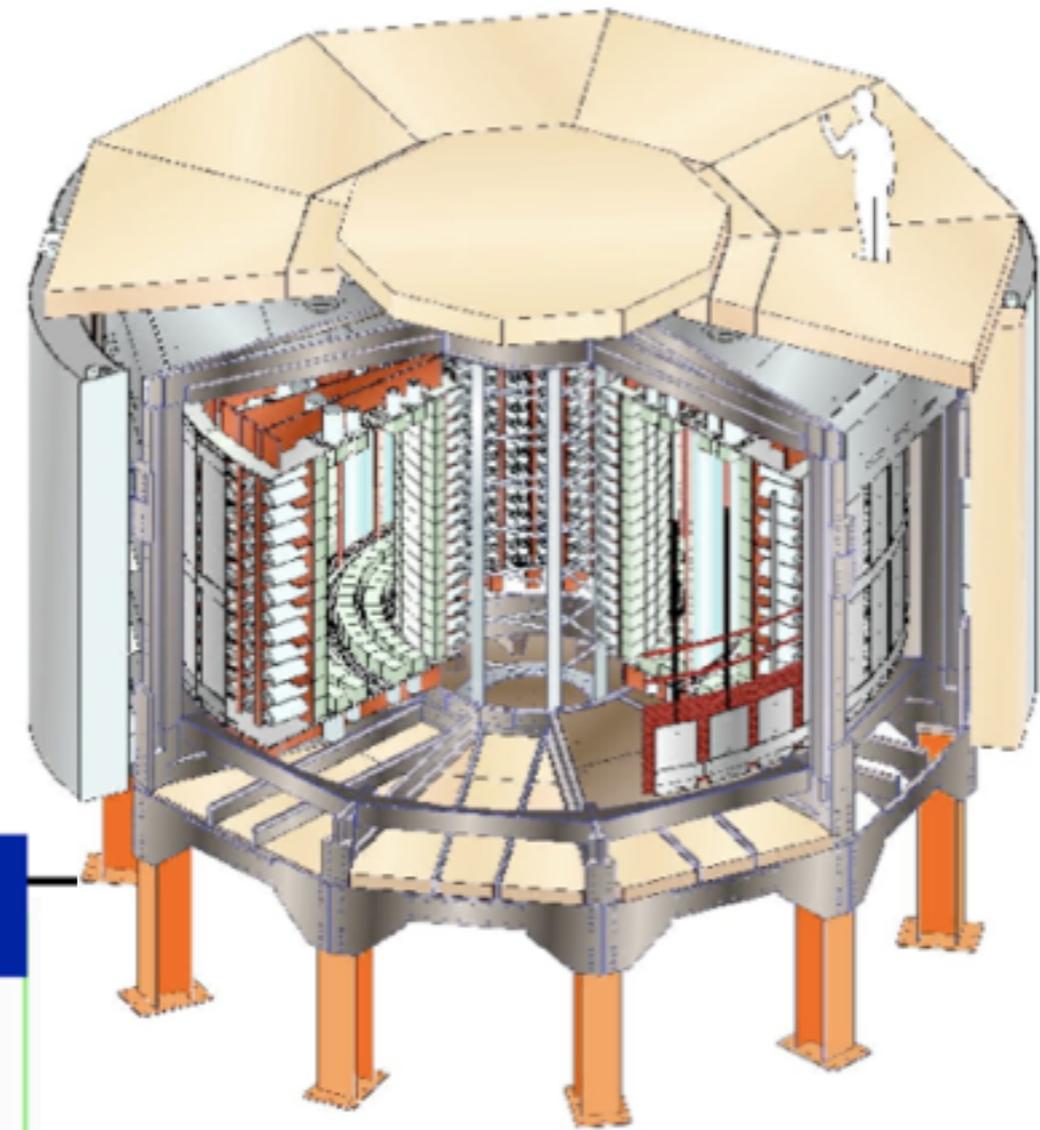
| Isotope and Decay             | Fit Range (MeV) | T <sub>1/2</sub> limit (years) |                               |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|
|                               |                 | This work                      | Measured                      |
| <sup>116</sup> Cd to gs       | 2.2–3.2         | 9.4 × 10 <sup>19</sup>         | 1.7 × 10 <sup>23</sup> [15]   |
| <sup>130</sup> Te to gs       | 2.2–3.2         | 5.0 × 10 <sup>20</sup>         | 3.0 × 10 <sup>24</sup> [26]   |
| <sup>130</sup> Te to 536 keV  | 1.7–2.3         | 3.5 × 10 <sup>20</sup>         | 9.7 × 10 <sup>22</sup> [27]   |
| <sup>116</sup> Cd to 1294 keV | 1.2–1.8         | 5.0 × 10 <sup>19</sup>         | 2.9 × 10 <sup>22</sup> [15]   |
| <sup>116</sup> Cd to 1757 keV | 0.9–1.3         | 4.2 × 10 <sup>19</sup>         | 1.4 × 10 <sup>22</sup> [15]   |
| <sup>128</sup> Te to gs       | 0.6–1.3         | 1.7 × 10 <sup>20</sup>         | 1.1 × 10 <sup>23</sup> [28]   |
| <sup>116</sup> Cd to 2027 keV | 0.5–1.2         | 2.8 × 10 <sup>19</sup>         | 2.1 × 10 <sup>21</sup> [29]   |
| <sup>116</sup> Cd to 2112 keV | 0.5–1.0         | 4.7 × 10 <sup>19</sup>         | 6.0 × 10 <sup>21</sup> [15]   |
| <sup>116</sup> Cd to 2225 keV | 0.5–1.0         | 2.1 × 10 <sup>19</sup>         | 1.0 × 10 <sup>20</sup> † [30] |
| <sup>130</sup> Te to 1794 keV | 0.5–1.2         | 1.9 × 10 <sup>20</sup>         | 2.3 × 10 <sup>21</sup> [31]   |
| <sup>130</sup> Te to 1122 keV | 1.1–1.7         | 1.2 × 10 <sup>20</sup>         | 2.7 × 10 <sup>21</sup> [31]   |
| <sup>114</sup> Cd to gs       | 0.4–1.0         | 2.0 × 10 <sup>20</sup>         | 1.1 × 10 <sup>21</sup> [17]   |

| Isotope and Decay  | Fit Range (MeV) | T <sub>1/2</sub> limit (years) |                             |
|--|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|
|  |                 | This work                      | Measured                    |
| <sup>64</sup> Zn β <sup>+</sup> EC to gs                   | 0.5–1.1         | 1.1 × 10 <sup>18</sup>         | 4.3 × 10 <sup>20</sup> [16] |
| <sup>64</sup> Zn 2EC to gs                                 | 0.5–1.3         | 3.3 × 10 <sup>17</sup>         | 1.1 × 10 <sup>20</sup> [16] |
| <sup>120</sup> Te β <sup>+</sup> EC to gs                  | 1.0–2.0         | 4.1 × 10 <sup>17</sup>         | 1.9 × 10 <sup>17</sup> [18] |
| <sup>120</sup> Te 2EC                                      | 0.8–2.0         | 2.4 × 10 <sup>16</sup>         | 6.0 × 10 <sup>17</sup> [18] |
| <sup>120</sup> Te 2EC to 1171 keV                          | 0.6–2.0         | 1.8 × 10 <sup>16</sup>         | 6.0 × 10 <sup>17</sup> [18] |
| <sup>106</sup> Cd β <sup>+</sup> β <sup>+</sup> to gs.     | 0.5–2.0         | 2.7 × 10 <sup>18</sup>         | 2.4 × 10 <sup>20</sup> [32] |
| <sup>106</sup> Cd β <sup>+</sup> EC to gs                  | 1.5–3.0         | 4.7 × 10 <sup>18</sup>         | 3.7 × 10 <sup>20</sup> [32] |
| <sup>106</sup> Cd 2 EC to gs                               | 2.0–3.0         | 1.6 × 10 <sup>17</sup>         | 3.5 × 10 <sup>18</sup> [33] |
| <sup>106</sup> Cd β <sup>+</sup> β <sup>+</sup> to 512 keV | 0.6–1.5         | 9.4 × 10 <sup>17</sup>         | 1.6 × 10 <sup>20</sup> [32] |
| <sup>106</sup> Cd β <sup>+</sup> EC to 512 keV             | 0.8–2.0         | 4.6 × 10 <sup>18</sup>         | 2.6 × 10 <sup>20</sup> [32] |

# (Super)NEMO

Anderer Ansatz:

- ▶ Quellen: Metallfolien
- ▶ Detektion durch Tracking und Kalorimeter (wie in der HEP):
  - ▶ (Spezielle) Driftkammern
  - ▶ Szintillatoren als Kalorimeter
  - ▶ Magnetfeld zur Ladungsidentifikation



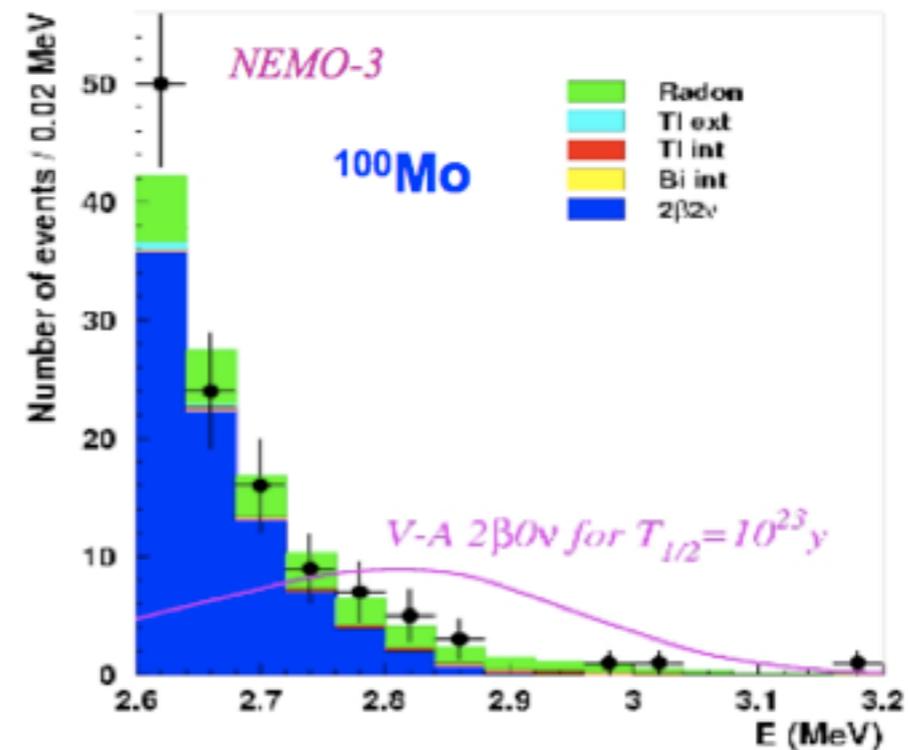
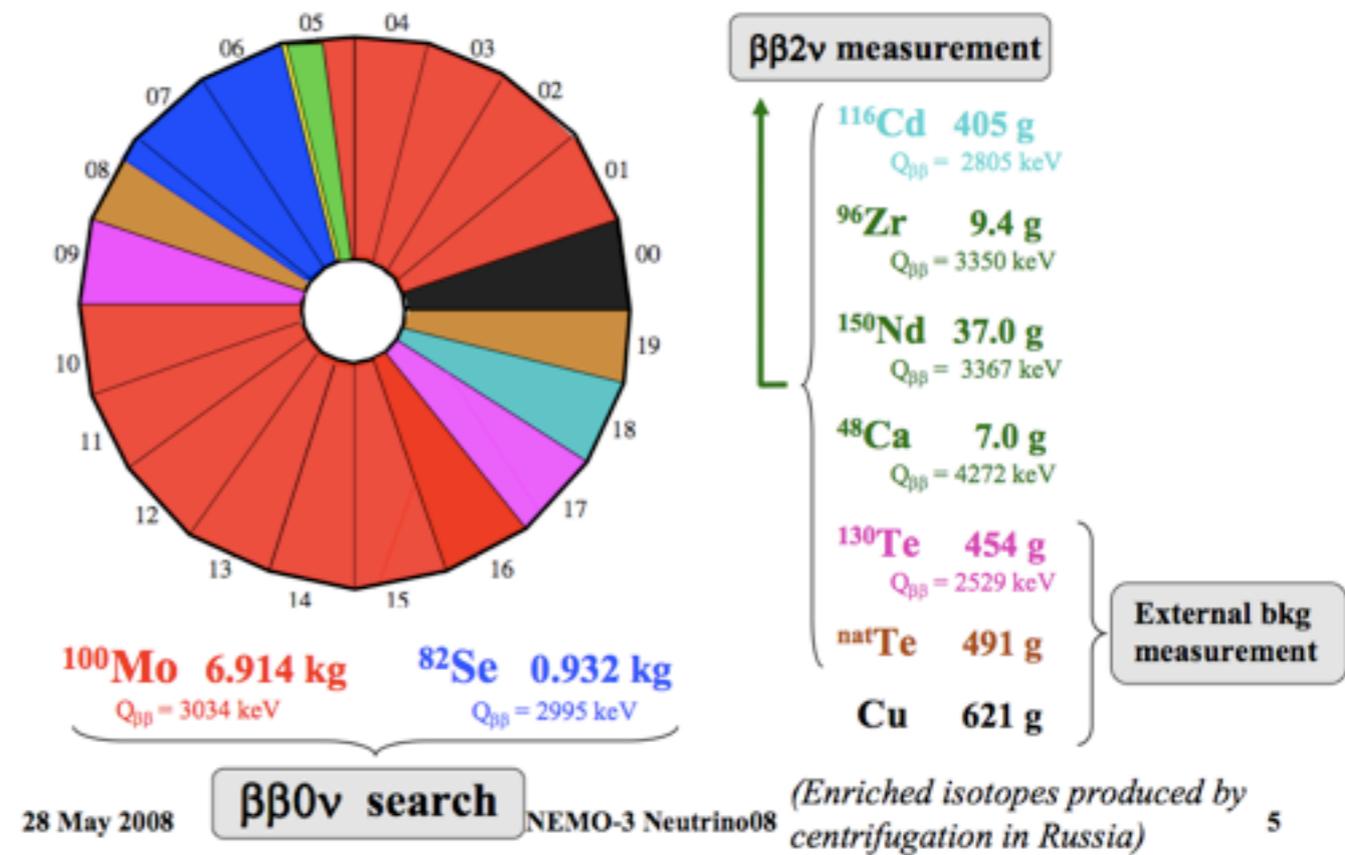
# (Super)NEMO

## Vorteile:

- ▶ Beliebige Isotope verwendbar
- ▶ Vertex-Identifikation möglich
- ▶ Gute Auflösung für 2ν-Zerfälle

## Nachteile:

- ▶ Quellmassen eher klein
- ▶ Irreduzibler Untergrund trotz Vertex-Auflösung
- ▶ Schlechte Energieauflösung führt zu Ambiguität zwischen 0ν- und 2ν-Zerfällen



$$T_{1/2} > 5.8 \times 10^{23} \text{ y @ 90\% C.L.}$$

$$\langle m_\nu \rangle < (0.8 - 1.3) \text{ eV [1-3]}$$

# Fazit

---

Detektorphysik ist eine eigene Disziplin und hat sehr häufig den Erkenntnisgewinn in anderen Feldern (Teilchenphysik, Kernphysik, aber auch im Bereich der Röntgenstreuung) erst möglich gemacht.

Obwohl es bereits sehr viele spezialisierte Detektoren gibt, läuft die Forschung auf Hochtouren:

- ▶ HL-LHC wird die Okkupanzen und Strahlenschäden um einen Faktor 5 nach oben treiben
- ▶ ILC/CLIC benötigen ein unglaublich gutes Kalorimeter und einen quasi masselosen Spurdetektor
- ▶ In der Neutrinophysik arbeitet man an Detektoren, deren Masse in Kilotonnen (Szintillator) oder gar Megatonnen (Wasser-Cherenkov) gemessen wird

Neue technische Entwicklungen im Detektorbereich werden sicherlich auch wieder neue Durchbrüche in der Teilchenphysik und anderen Disziplinen (z.B. Medizinphysik) ermöglichen.