

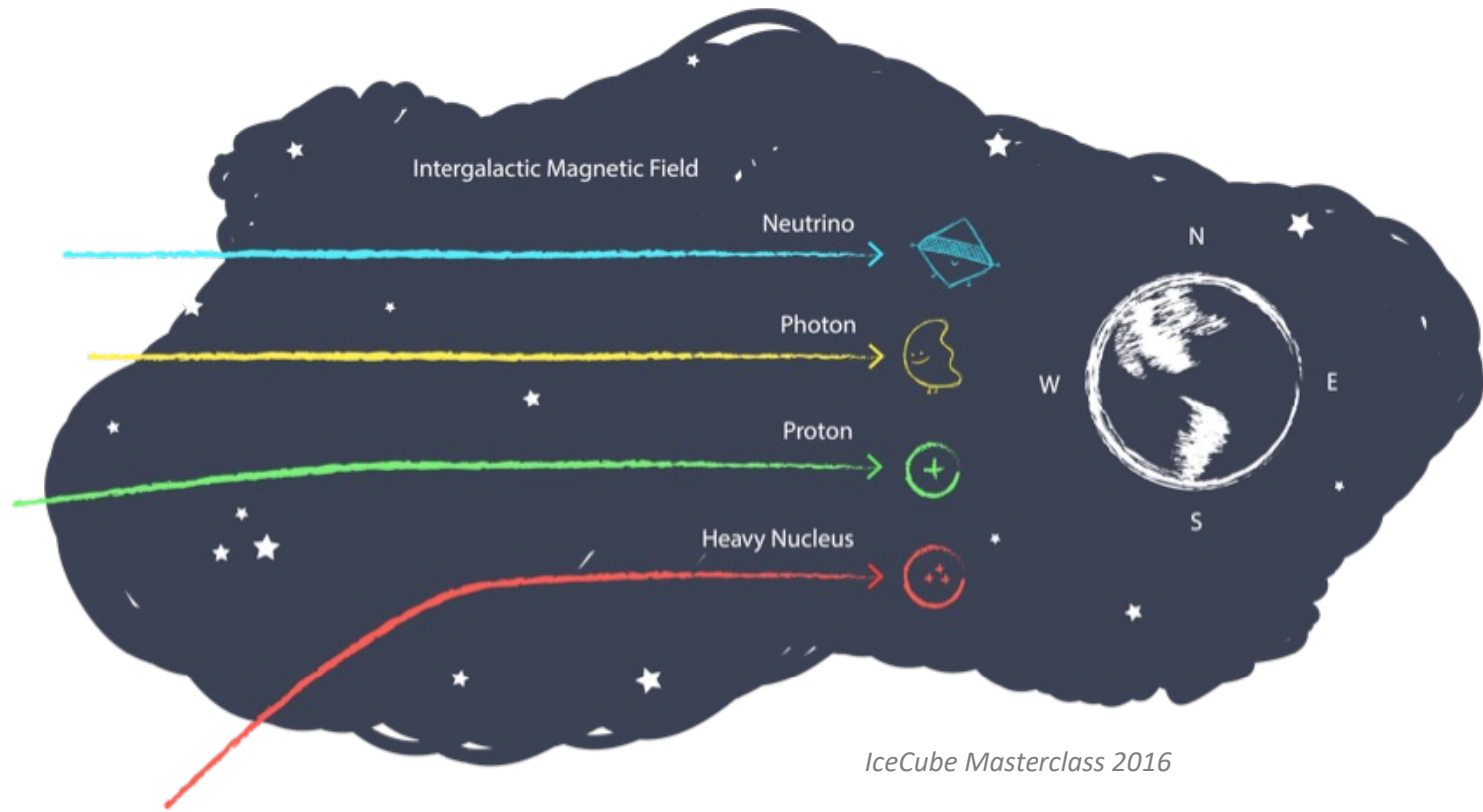
# Das Myonrätzel der kosmischen Strahlung

Hans Dembinski, TU Dortmund

Faszination Astronomie Online  
#FasziAstroOnline

# Astroteilchenphysik

Beobachtung von extremen nicht-thermischen Prozessen  
Schwarze Löcher, Supernovas, ...,  
Zerfall von dunkler Materie oder kosmischen Strings



# Kosmische Strahlung

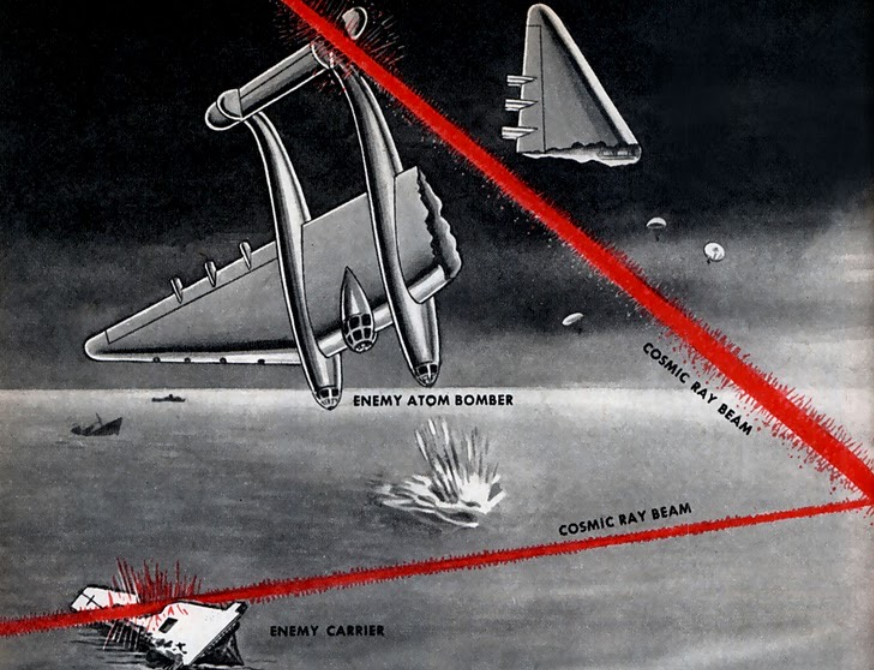


Wikipedia

Hess, 1912



Fantastic 4, Stan Lee & Jack Kirby



BY LOUIS BRUCHISS

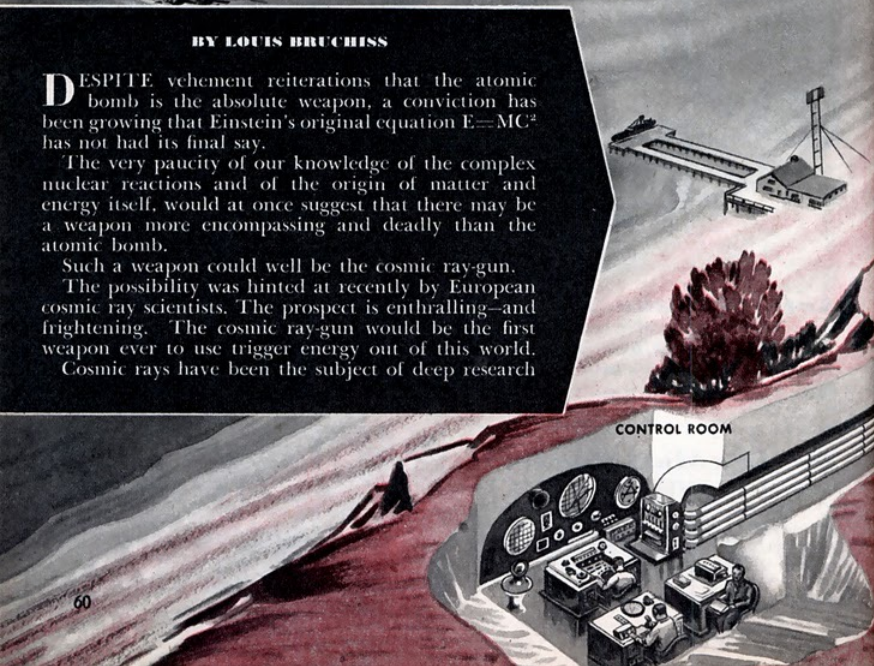
**D**ESPITE vehement reiterations that the atomic bomb is the absolute weapon, a conviction has been growing that Einstein's original equation  $E=MC^2$  has not had its final say.

The very paucity of our knowledge of the complex nuclear reactions and of the origin of matter and energy itself, would at once suggest that there may be a weapon more encompassing and deadly than the atomic bomb.

Such a weapon could well be the cosmic ray-gun.

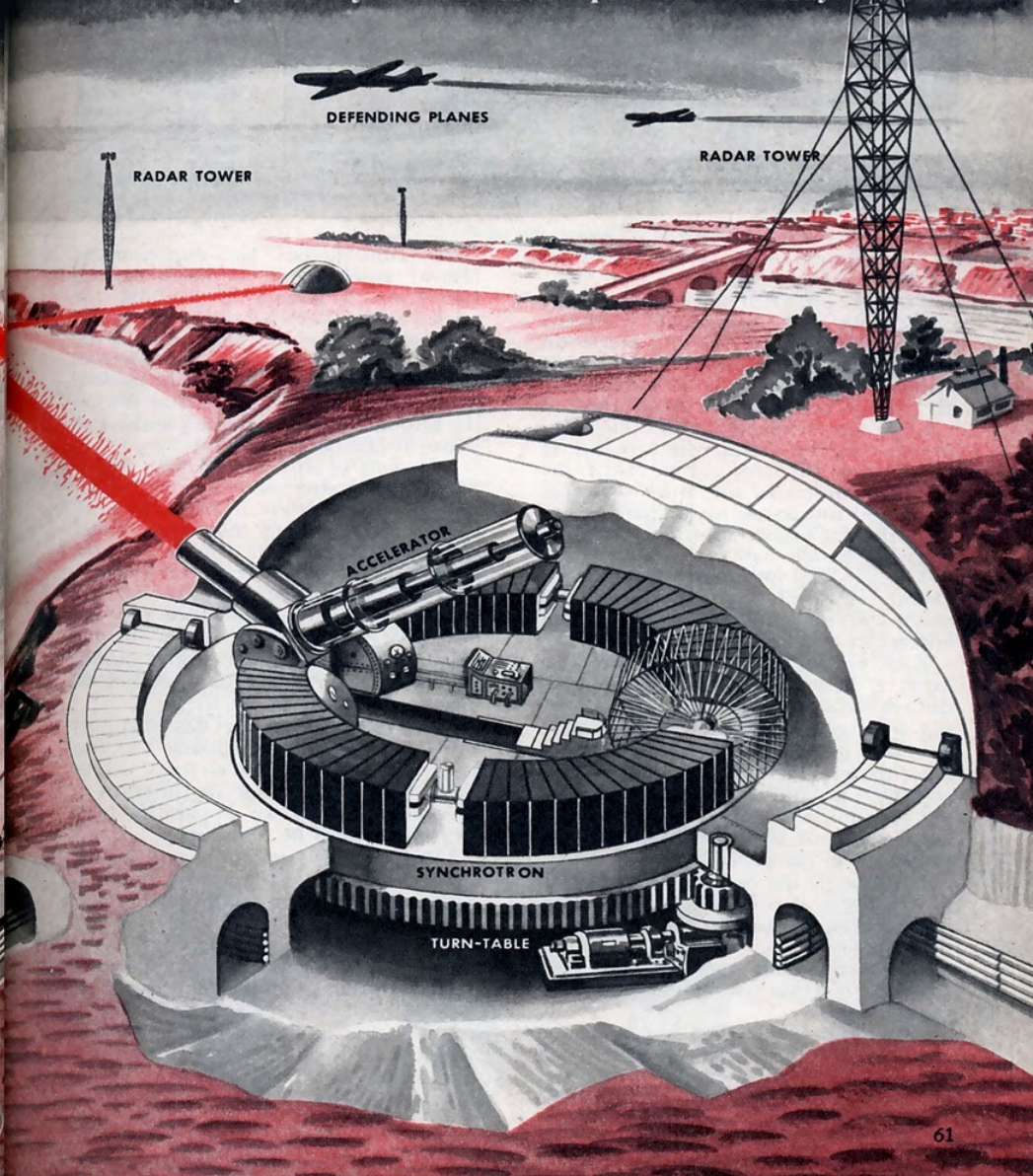
The possibility was hinted at recently by European cosmic ray scientists. The prospect is enthralling—and frightening. The cosmic ray-gun would be the first weapon ever to use trigger energy out of this world.

Cosmic rays have been the subject of deep research



# COSMIC RAY-GUN

Atoms exploded by cosmic rays release far more radiation than is obtained by ordinary fission. Here's a potential death-ray!

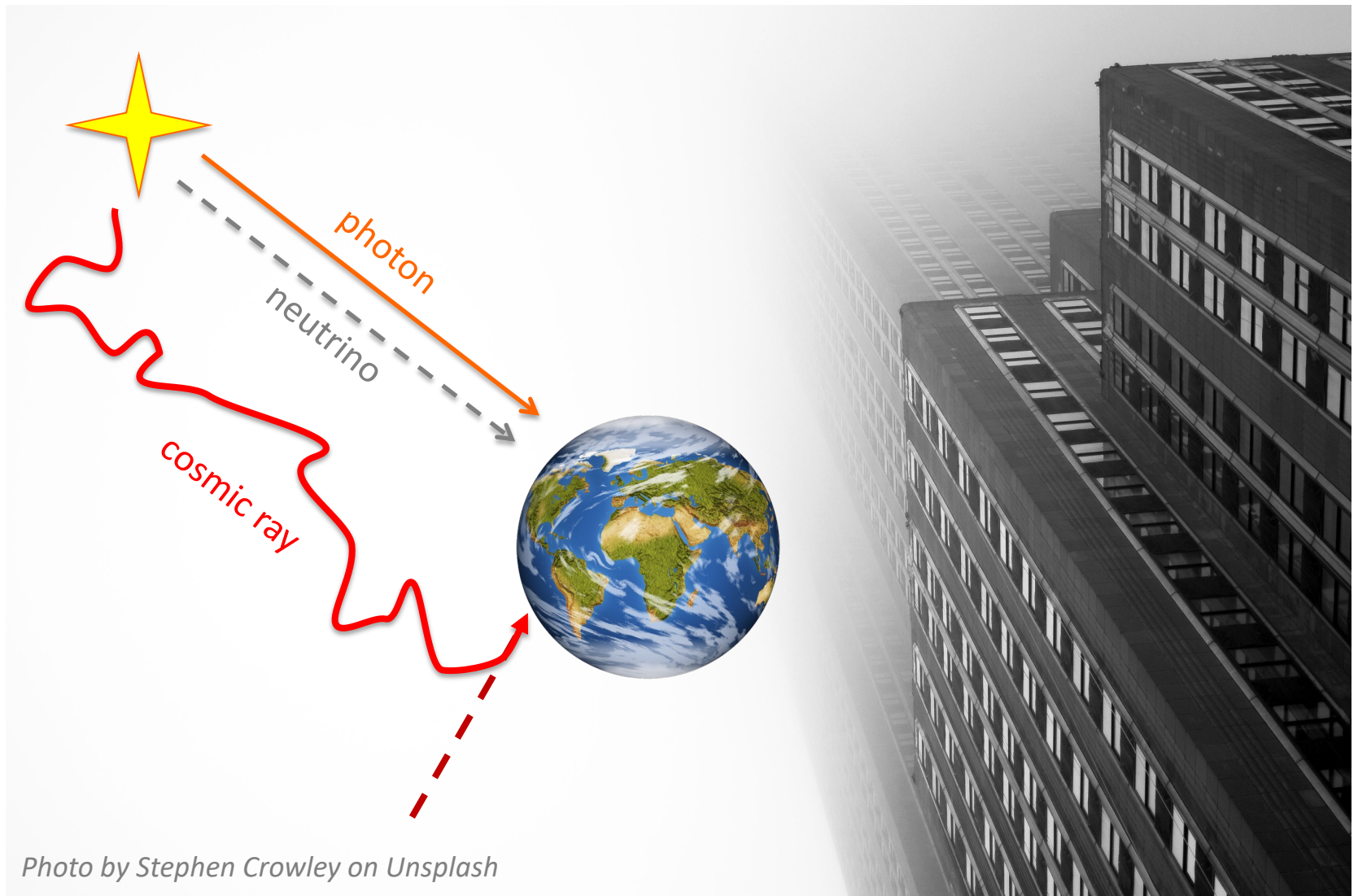


# Astronomie mit kosmischer Strahlung?

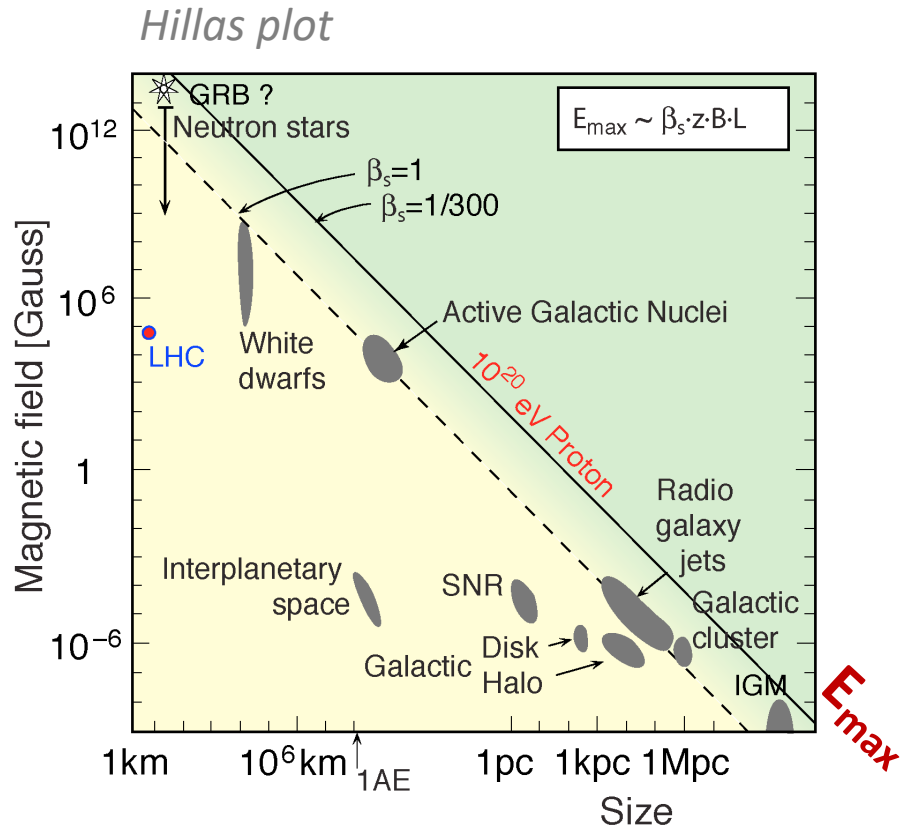


*Photo by Stephen Crowley on Unsplash*

# Astronomie mit kosmischer Strahlung?



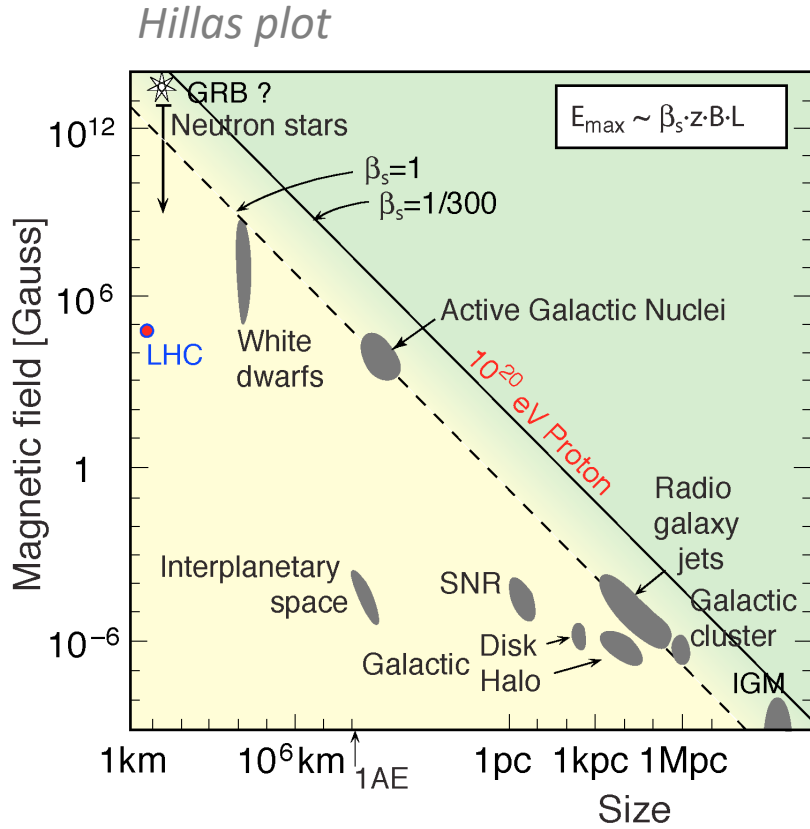
# Quellen?



$$E_{\max} \sim B L$$

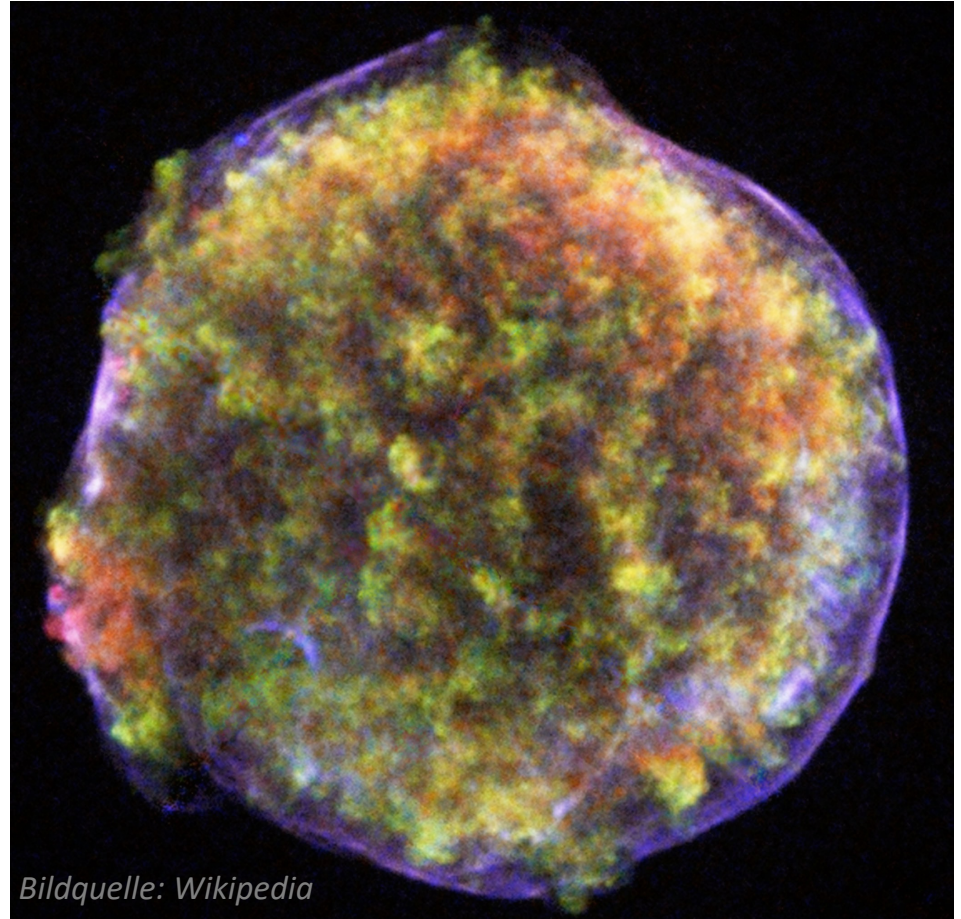
Maximalenergie der kosmischen Strahlung

# Quellen?



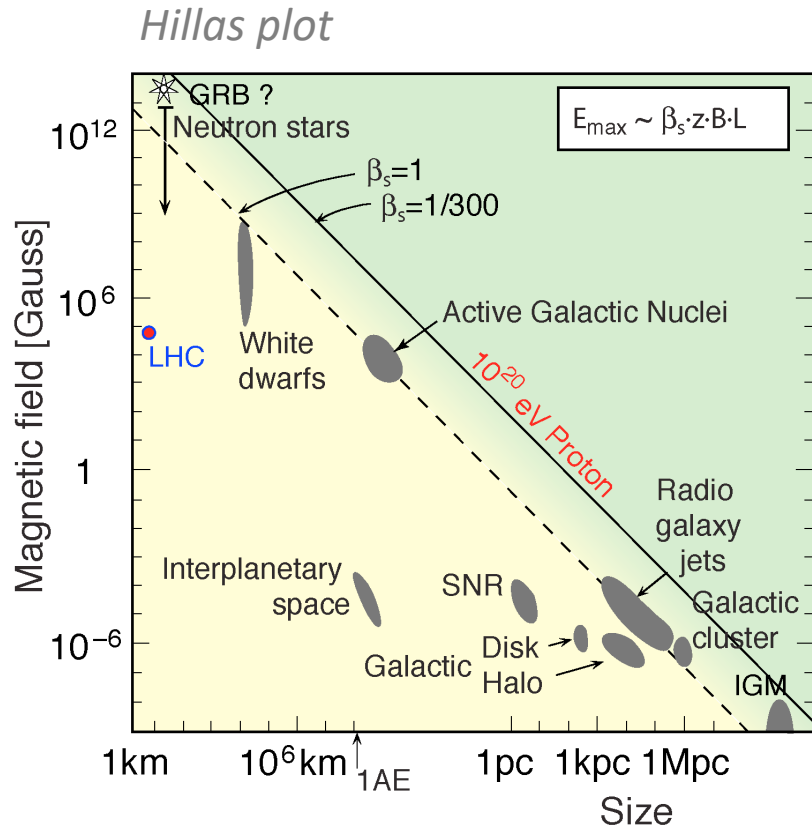
## Galaktische Quelle?

Überrest von Tycho's Supernova 1572





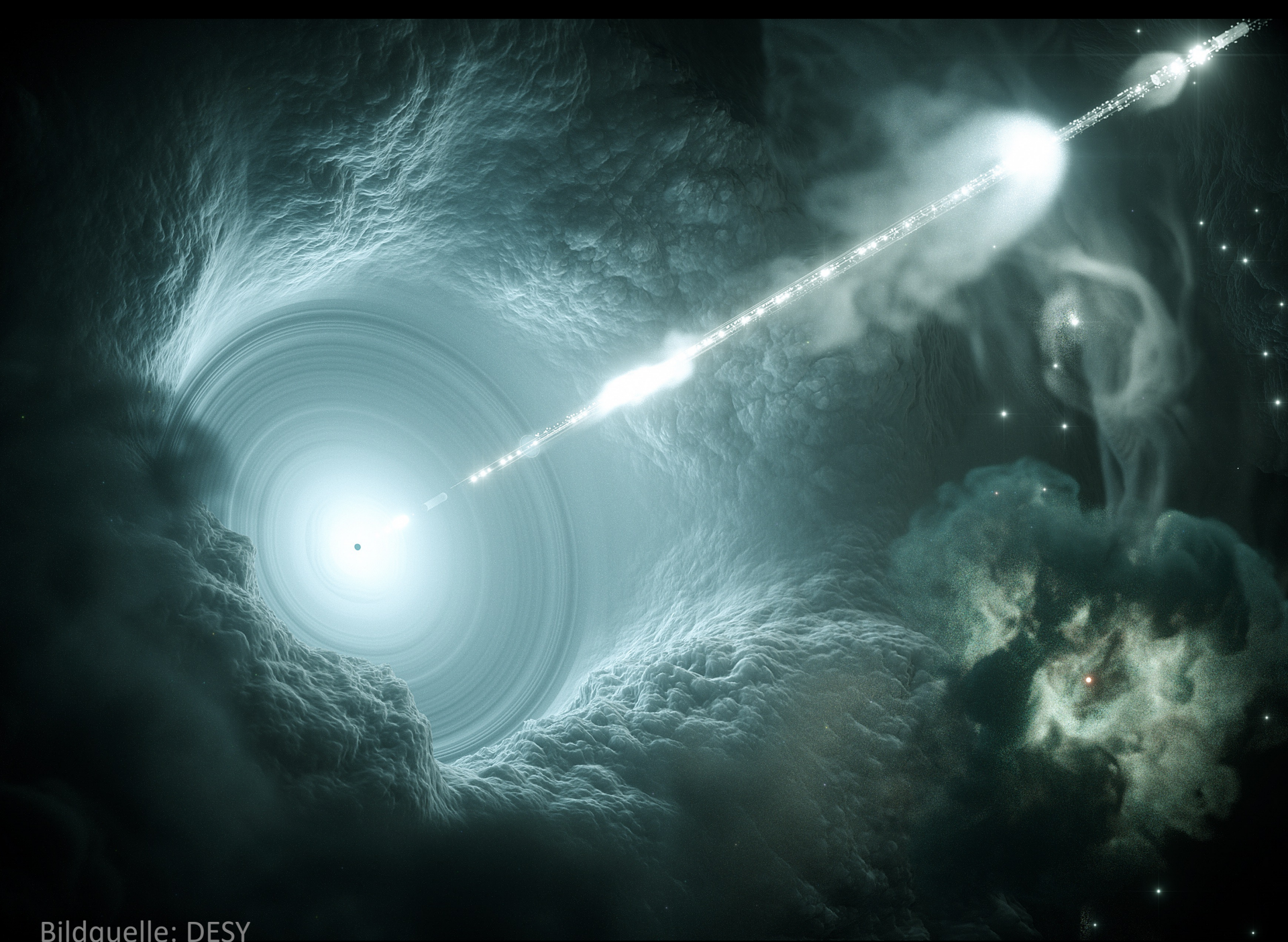
# Quellen?



## Extra-galaktische Quelle?

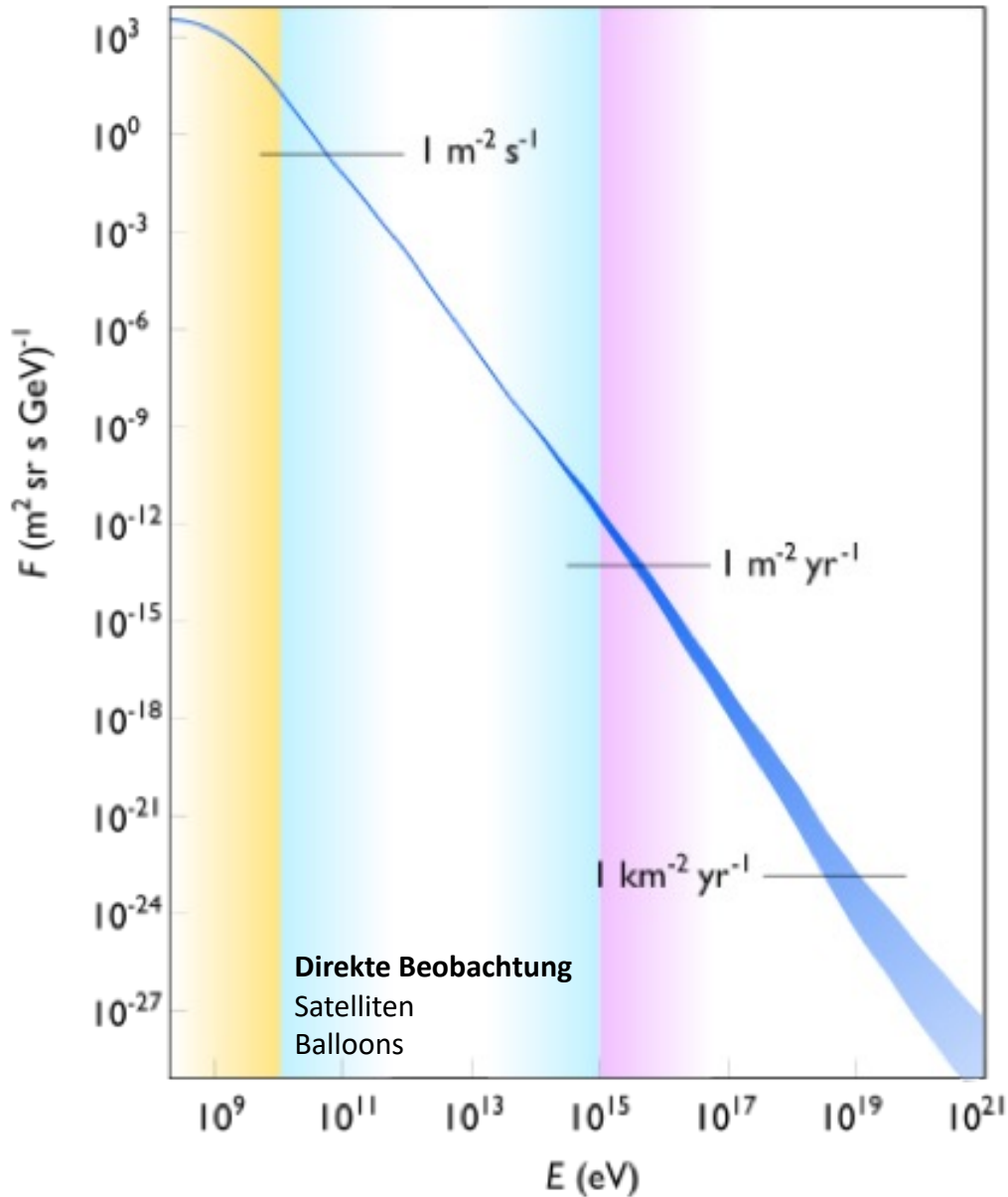
Galaxie M87 mit aktivem Kern und Jet





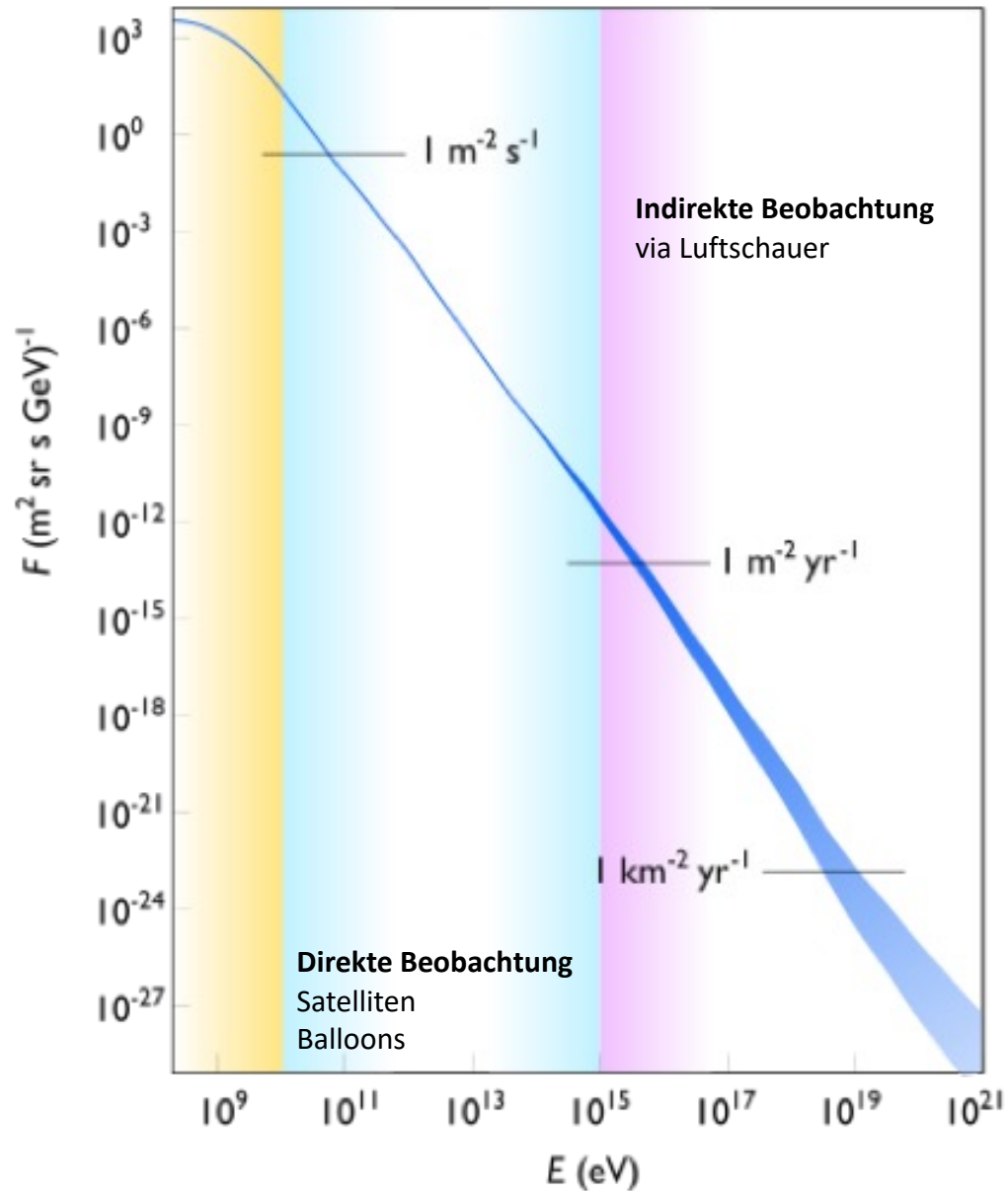
Bildquelle: DESY

# Beobachtung kosmischer Strahlung



Bildquelle: NASA

# Beobachtung kosmischer Strahlung





# Luftschauer

## Künstlerische Darstellung

Image credit: Rebecca Pitt, Discovering Particles, CC BY-ND-NC 2.0



10 GeV proton in cloud chamber with lead absorbers at 3027 m altitude

K.-H. Kampert and A.A. Watson,  
Eur. Phys. J. H37 (2012) 359-412



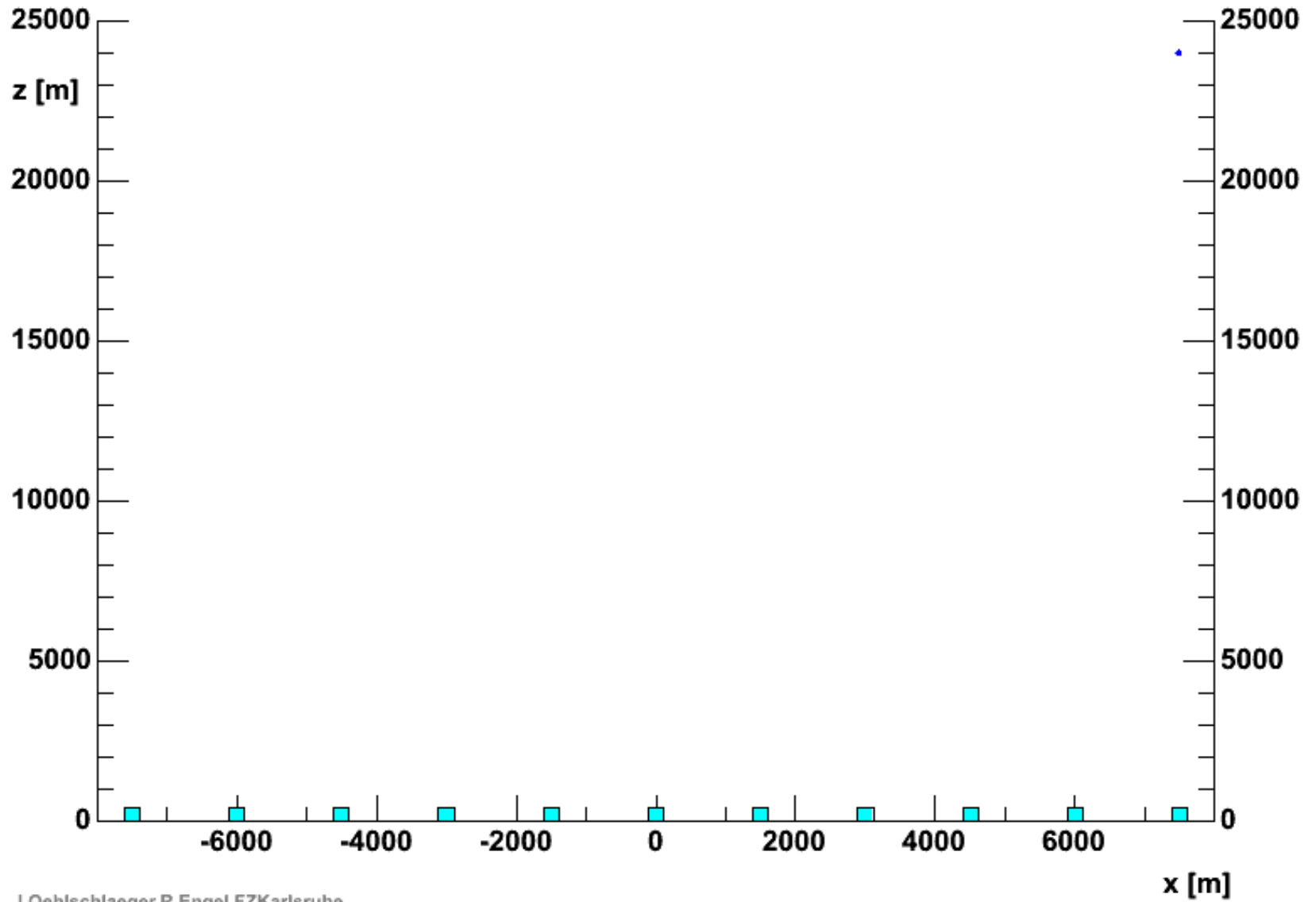
Quelle: University of Chicago



hadrons muons electrs neutrns

Proton  $10^{14}$  eV

23975

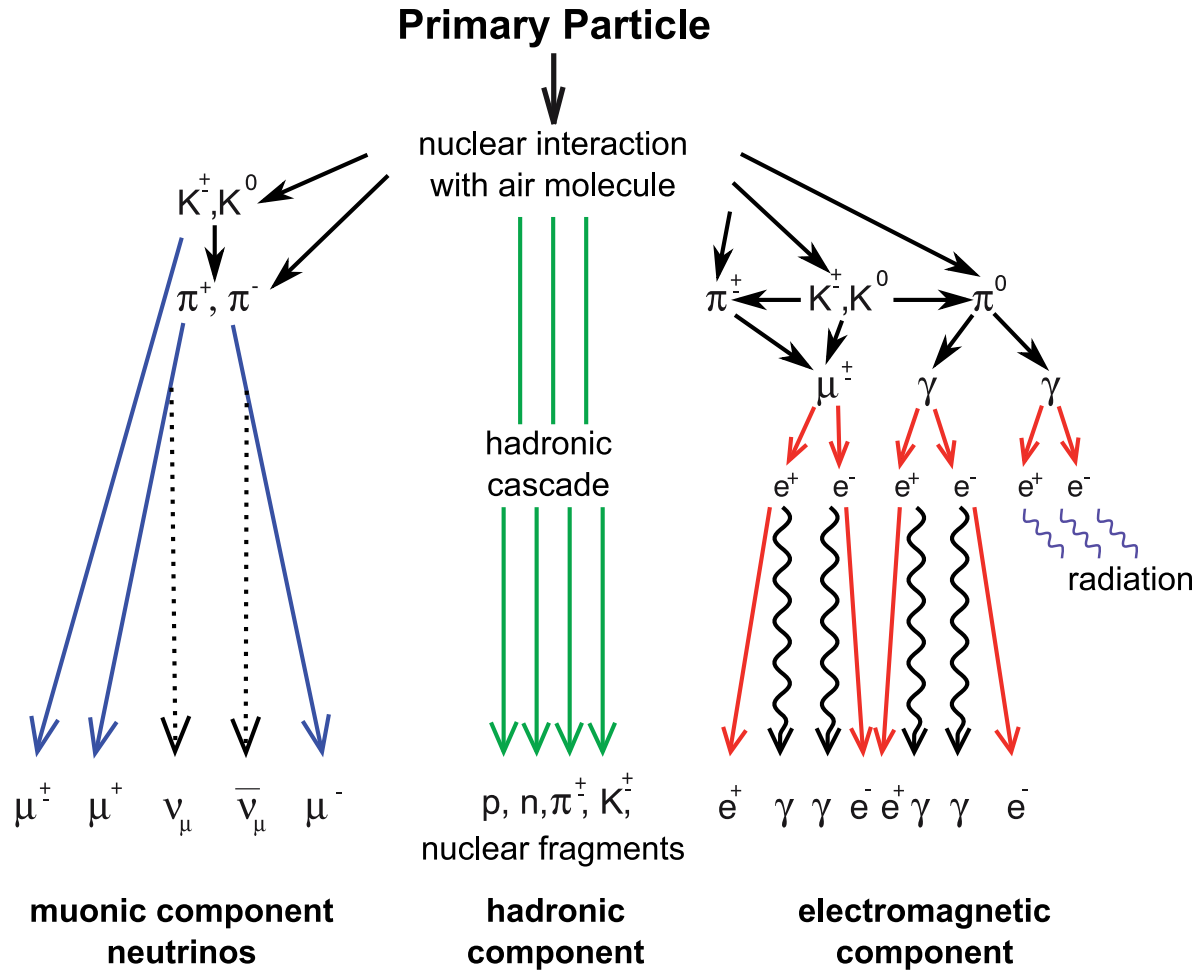


J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlsruhe

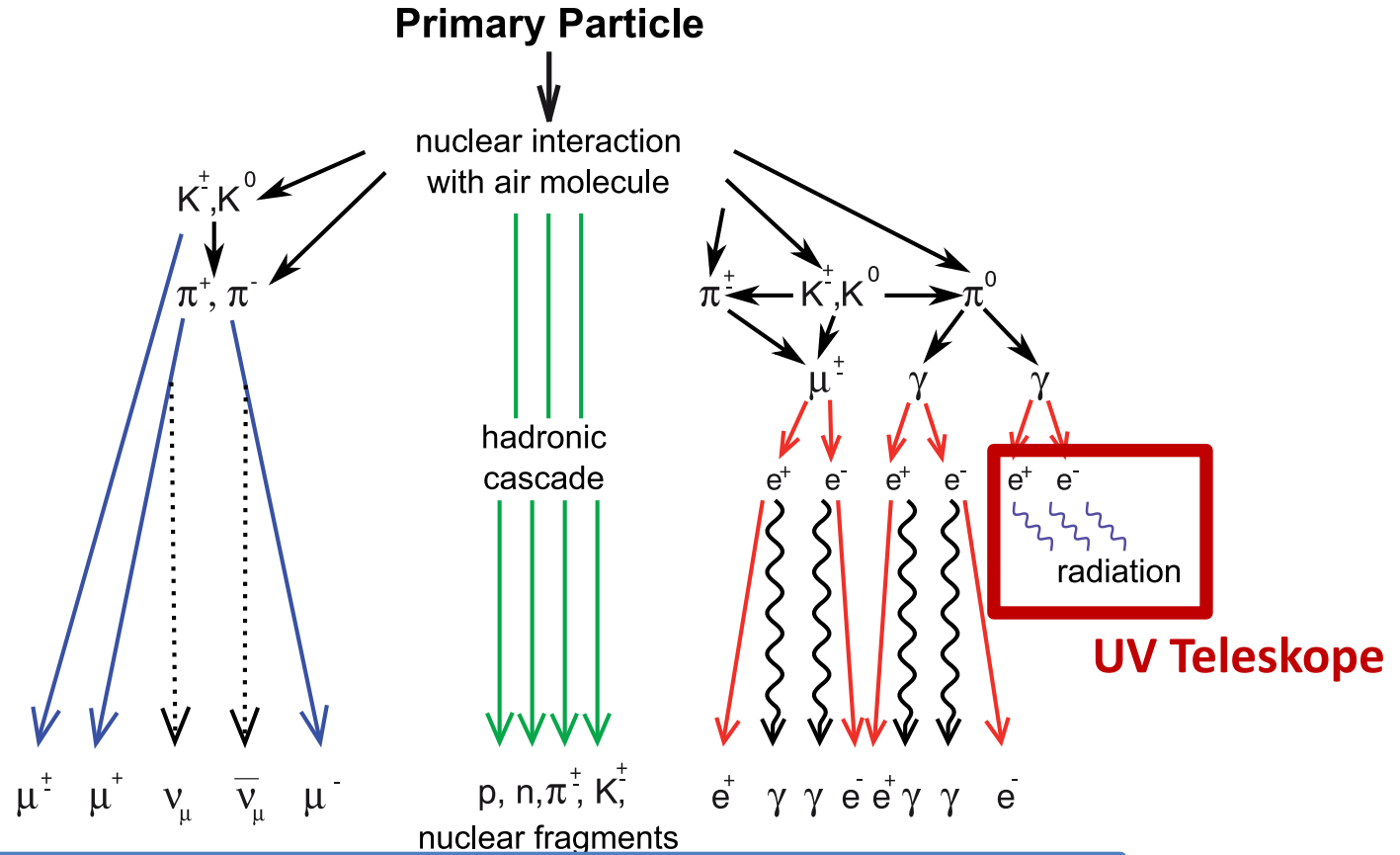


# Anatomie eines Luftschauers

**Myon**  
 Wie Elektron, aber  
 schwerer und instabil



# Anatomie eines Luftschauers



Teilchendetektoren  
auf der Erde



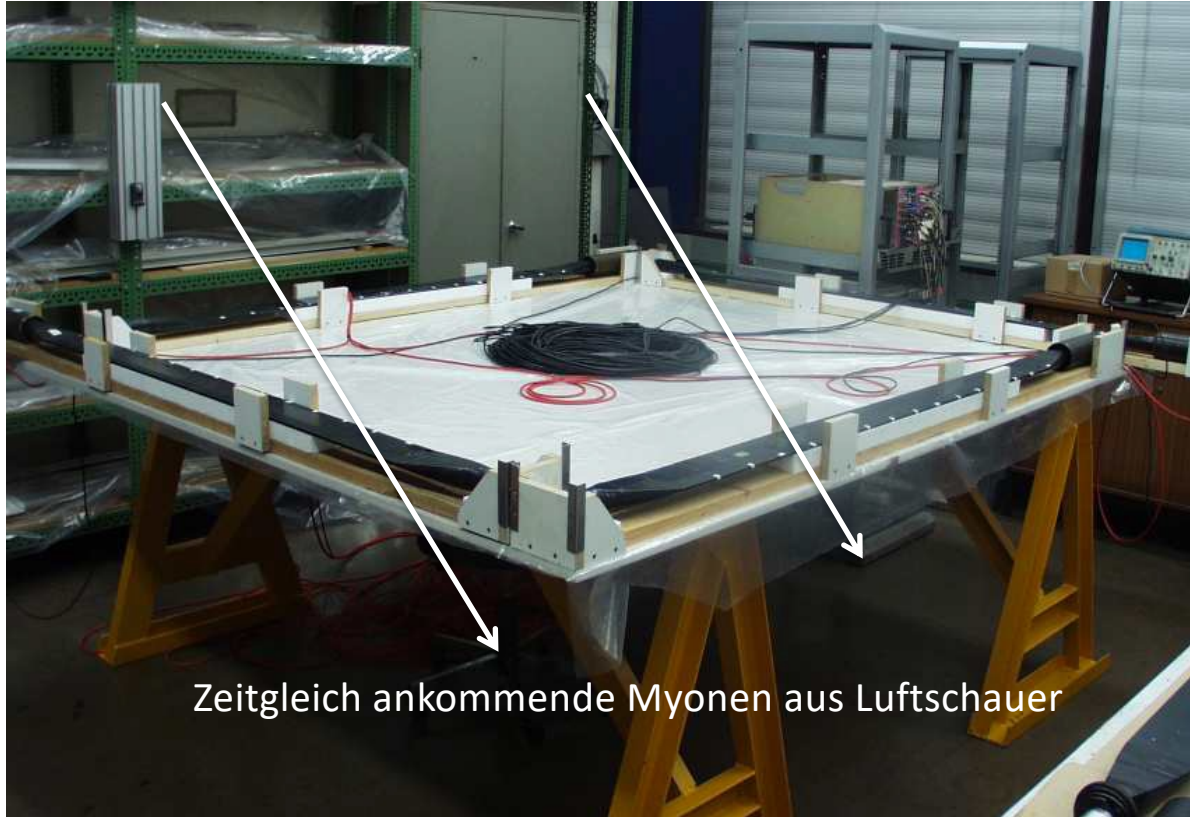
Haungs et al., JoP Conf. Ser. 632 (2015) 012011

# Meine Diplomarbeit: Myonzzähler



Einfacher Detektor für Luftschauer:  
Rauschunterdrückung durch Koinzidenz (Zeitgleichheit) der Teilchensignale

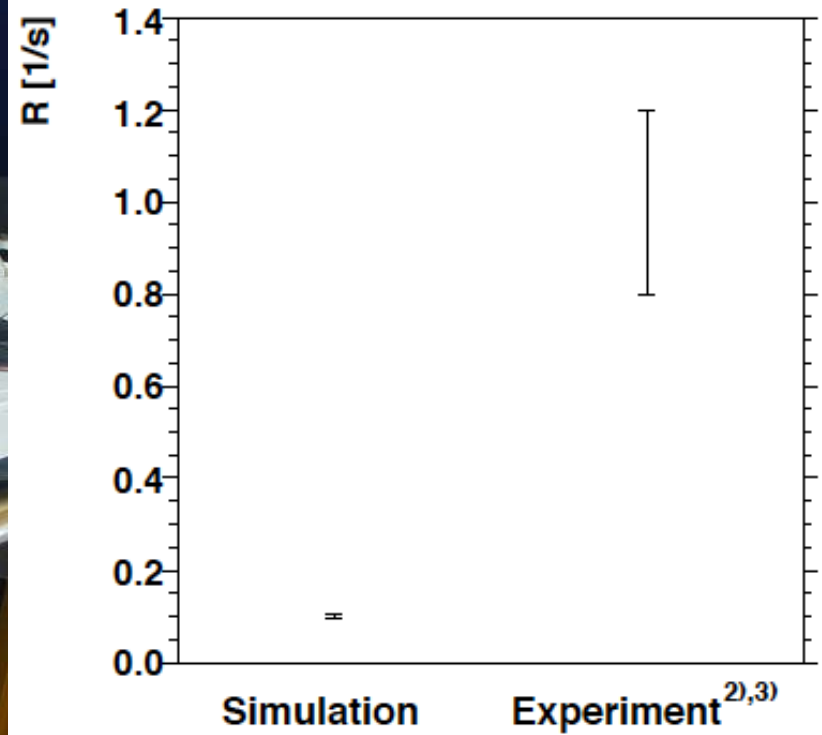
# Meine Diplomarbeit: Myonenzähler



Einfacher Detektor für Luftschauer:  
Rauschunterdrückung durch Koinzidenz (Zeitgleichheit) der Teilchensignale

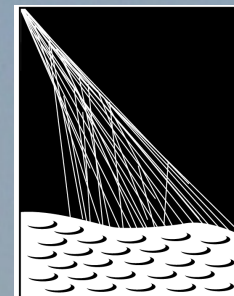
# Meine Diplomarbeit: Myonenzähler

2of4 Omen...?



Einfacher Detektor für Luftschauer:

Rauschunterdrückung durch Koinzidenz (Zeitgleichheit) der Teilchensignale



PIERRE  
AUGER  
OBSERVATORY

**Fluorescence Detector**

UV light from excited  $N_2$

4 x 6 telescopes,  $30^\circ \times 30^\circ$

+ 3 high-elevation telescopes

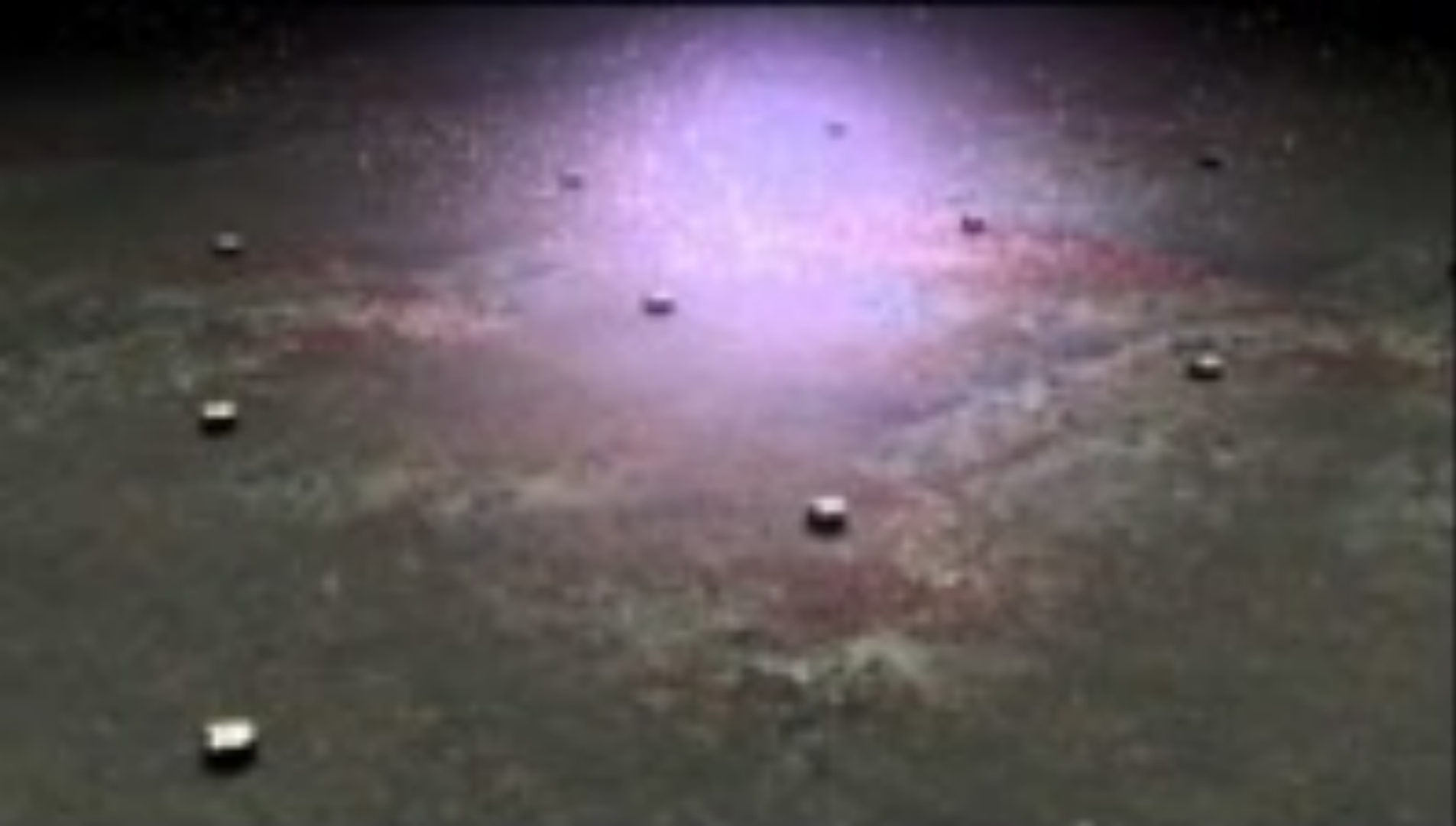
**Surface Detector Array**

charged particle + photon detector

1500 m grid: 1660 stations ( $3000 \text{ km}^2$ )

+ 750 m grid: 71 stations, ( $25 \text{ km}^2$ )



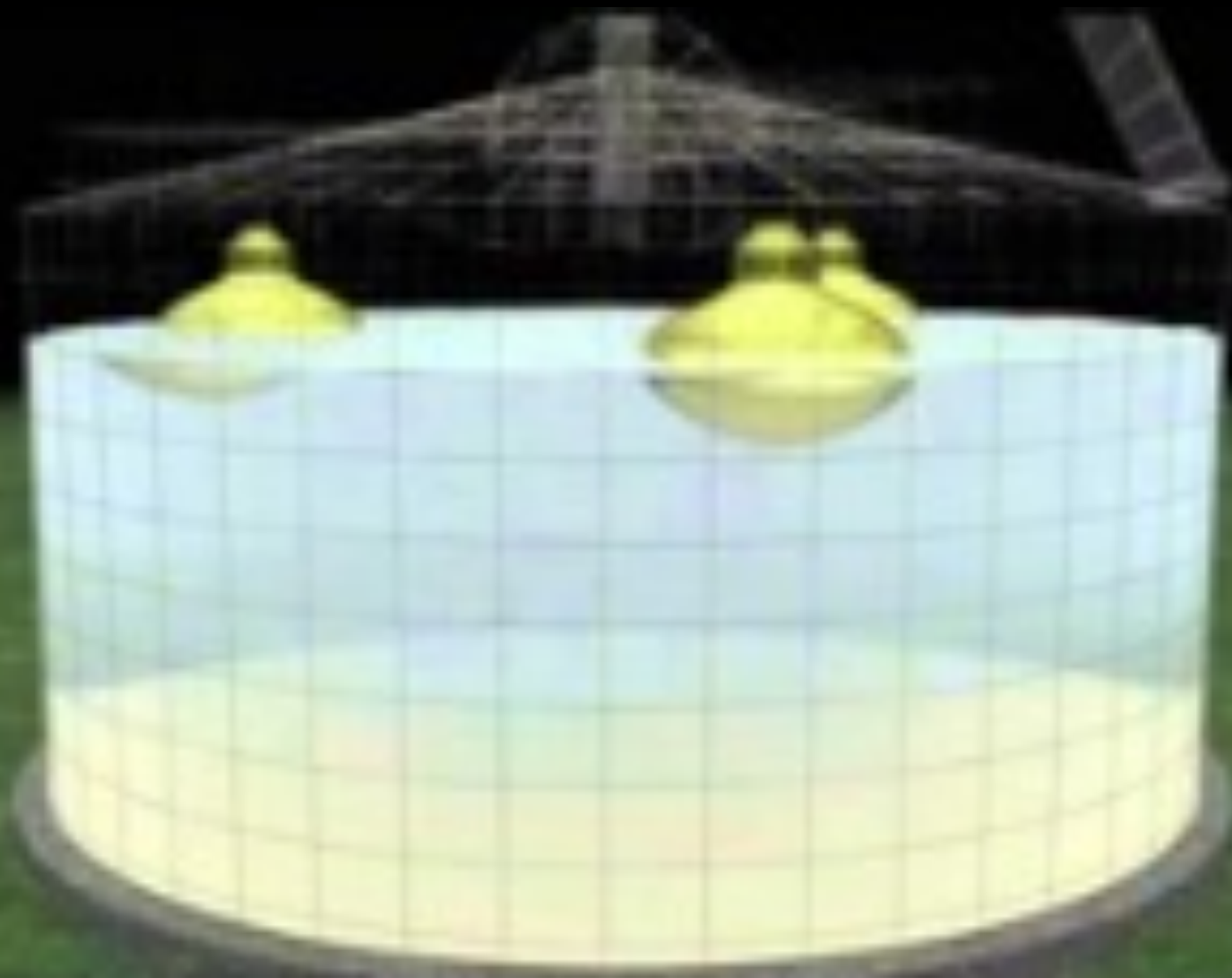


Quelle: Pierre Auger Observatory



Quelle: Pierre Auger Observatory

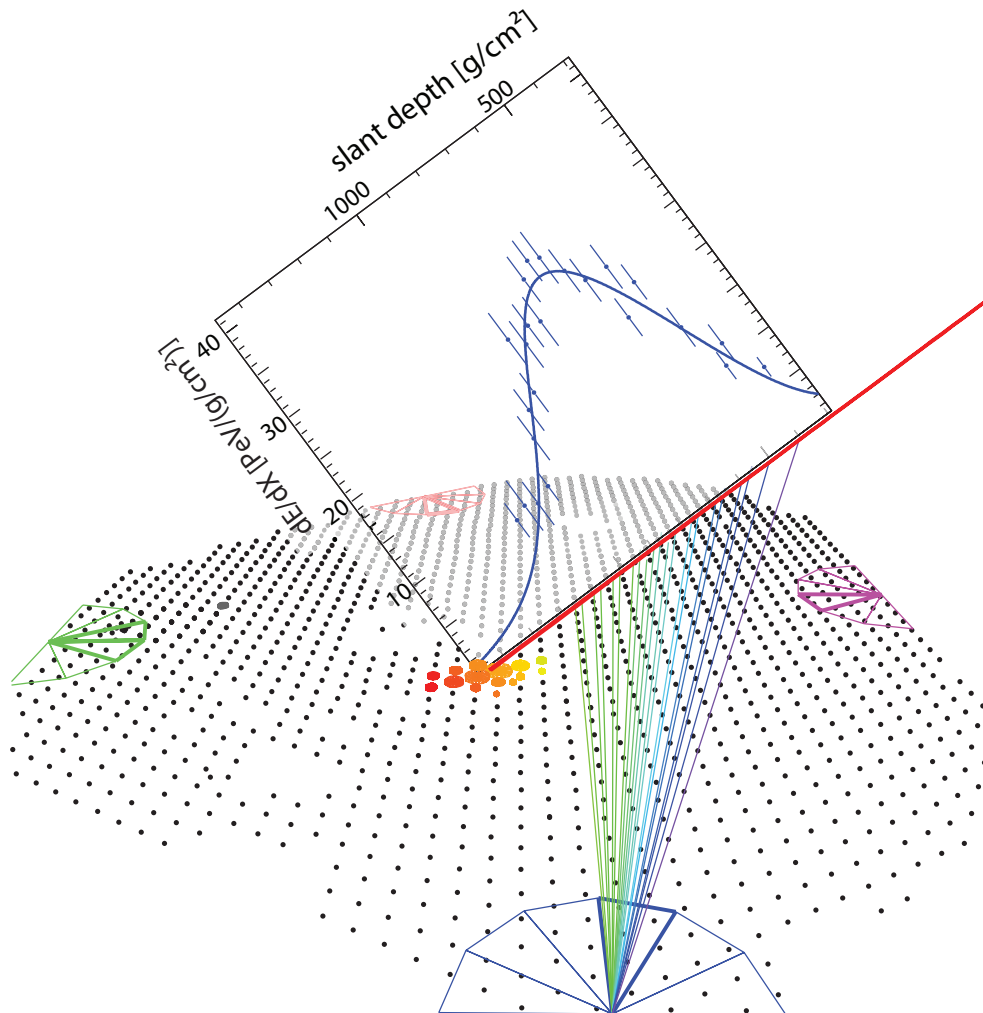




Quelle: Pierre Auger Observatory

# Luftschauermessung

Example: event observed with Pierre Auger Observatory



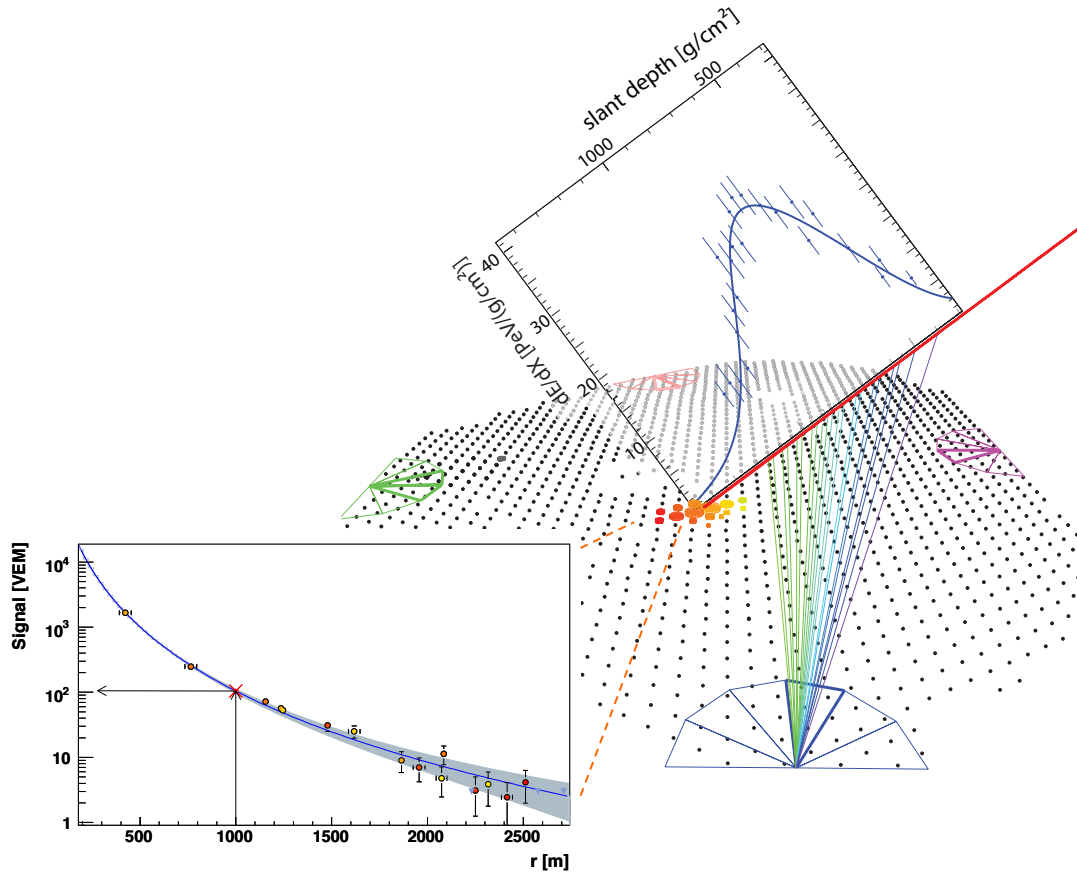
Artist impression of air shower

Image credit: Rebecca Pitt, Discovering Particles, CC BY-ND-NC 2.0



# Luftschauermessung

Example: event observed with Pierre Auger Observatory



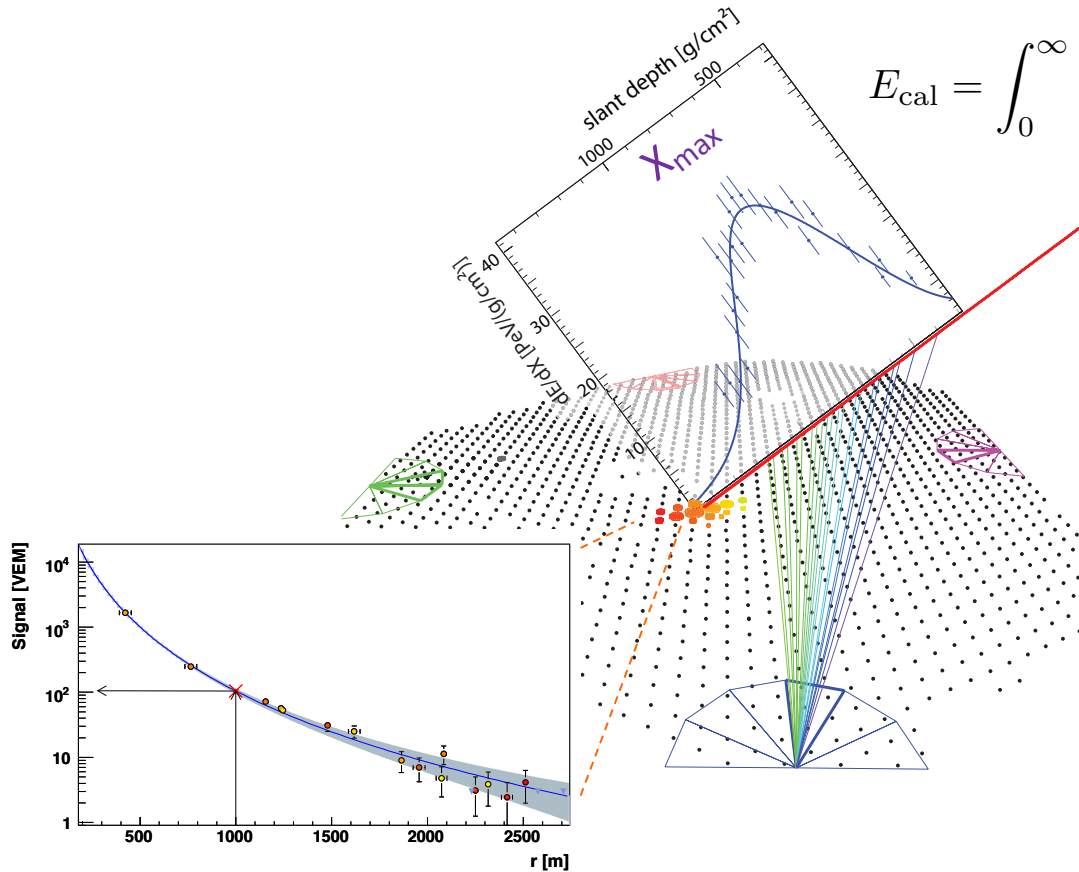
Artist impression of air shower

Image credit: Rebecca Pitt, Discovering Particles, CC BY-ND-NC 2.0



# Luftschauermessung

Example: event observed with Pierre Auger Observatory



$$E_{\text{cal}} = \int_0^{\infty} \left( \frac{dE}{dX} \right)_{\text{ionization}} dX$$

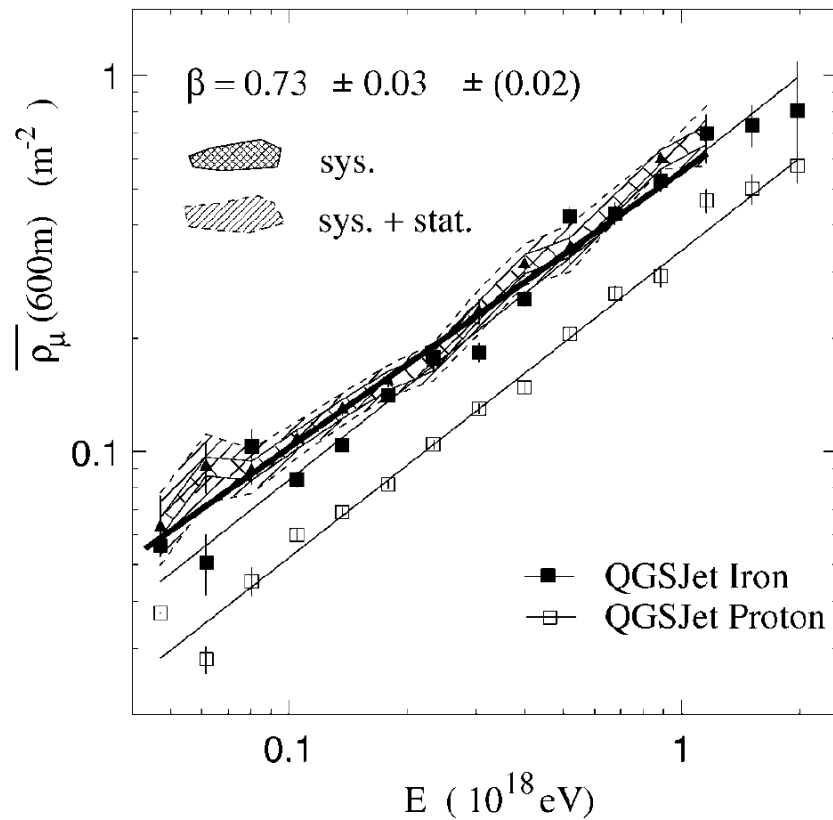
- **Richtung** via Ankunftszeiten
- **Energie** via Lichtprofil
- **Masse** via  
**Tiefe des Schauersmaximums  $X_{max}$**   
**Zahl der produzierten Myonen  $N_{\mu}$**

Ground signal = **electrons**, **photons**, **muons**

# Myondefizit in Luftschauersimulationen

## HiRes-MIA experiment

Abu-Zayyad et al. PRL 84 (2000) 4276



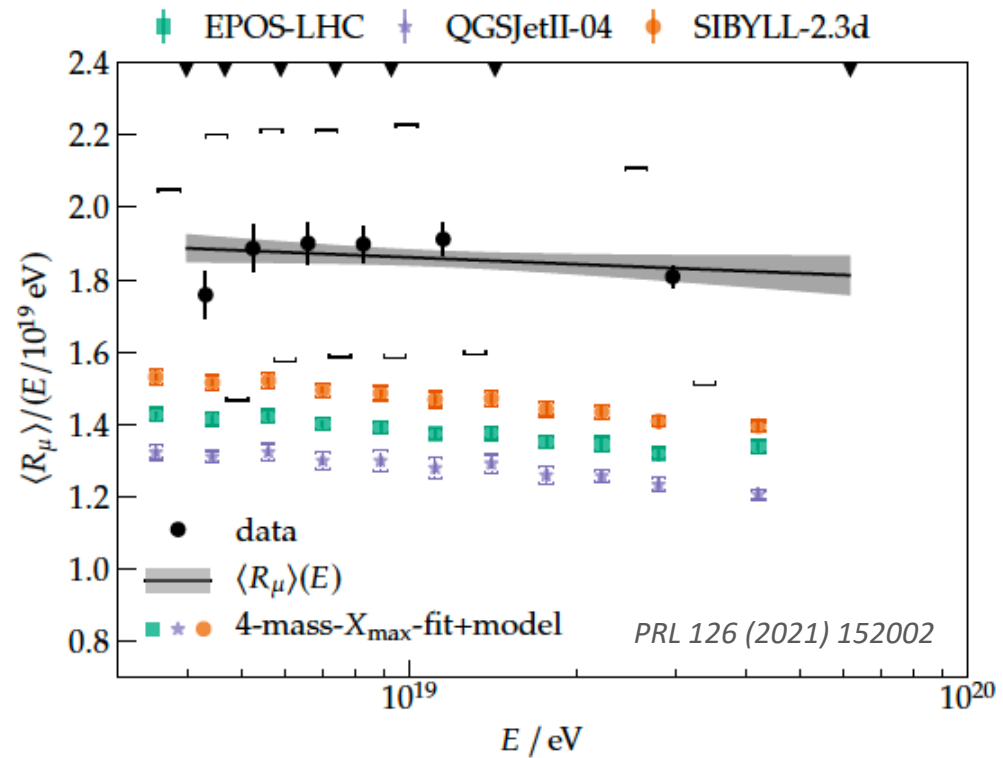
## Pierre Auger Observatory

PRD 91 (2015) 032003

PRL 117 (2016) 192001

Eur. Phys. J. C (2020) 80:751

PRL 126 (2021) 152002



# Myondefizit in Simulationen

Abstrakte Myonenskala

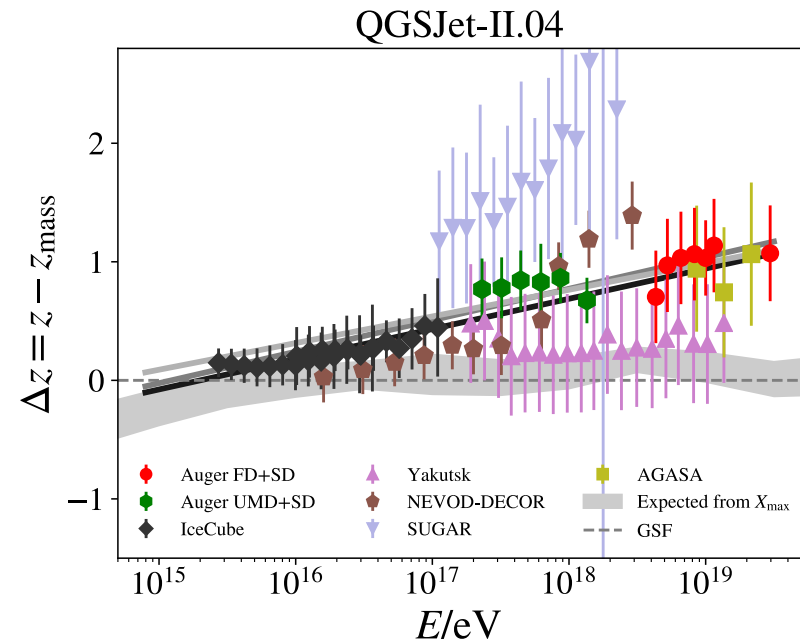
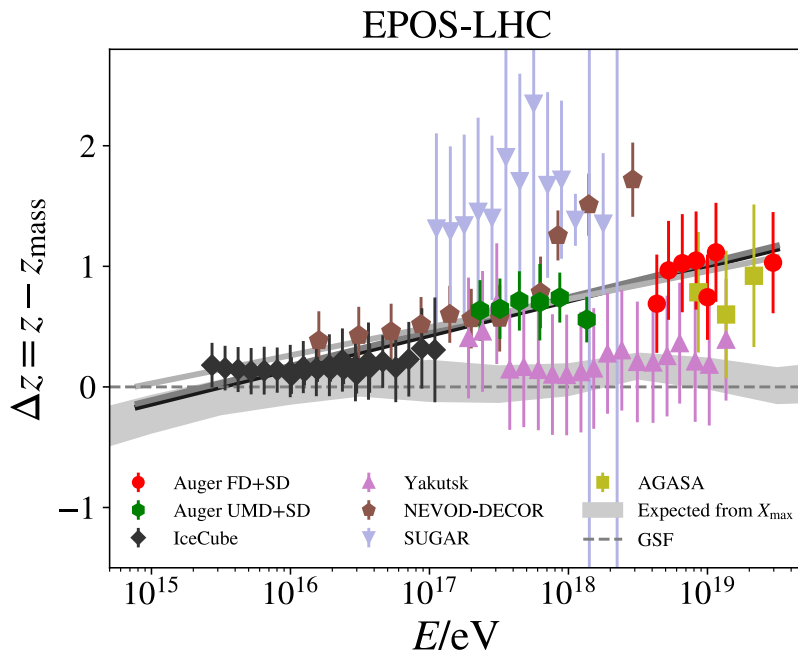
Unabhängig vom Experiment

Abhängig von Simulation

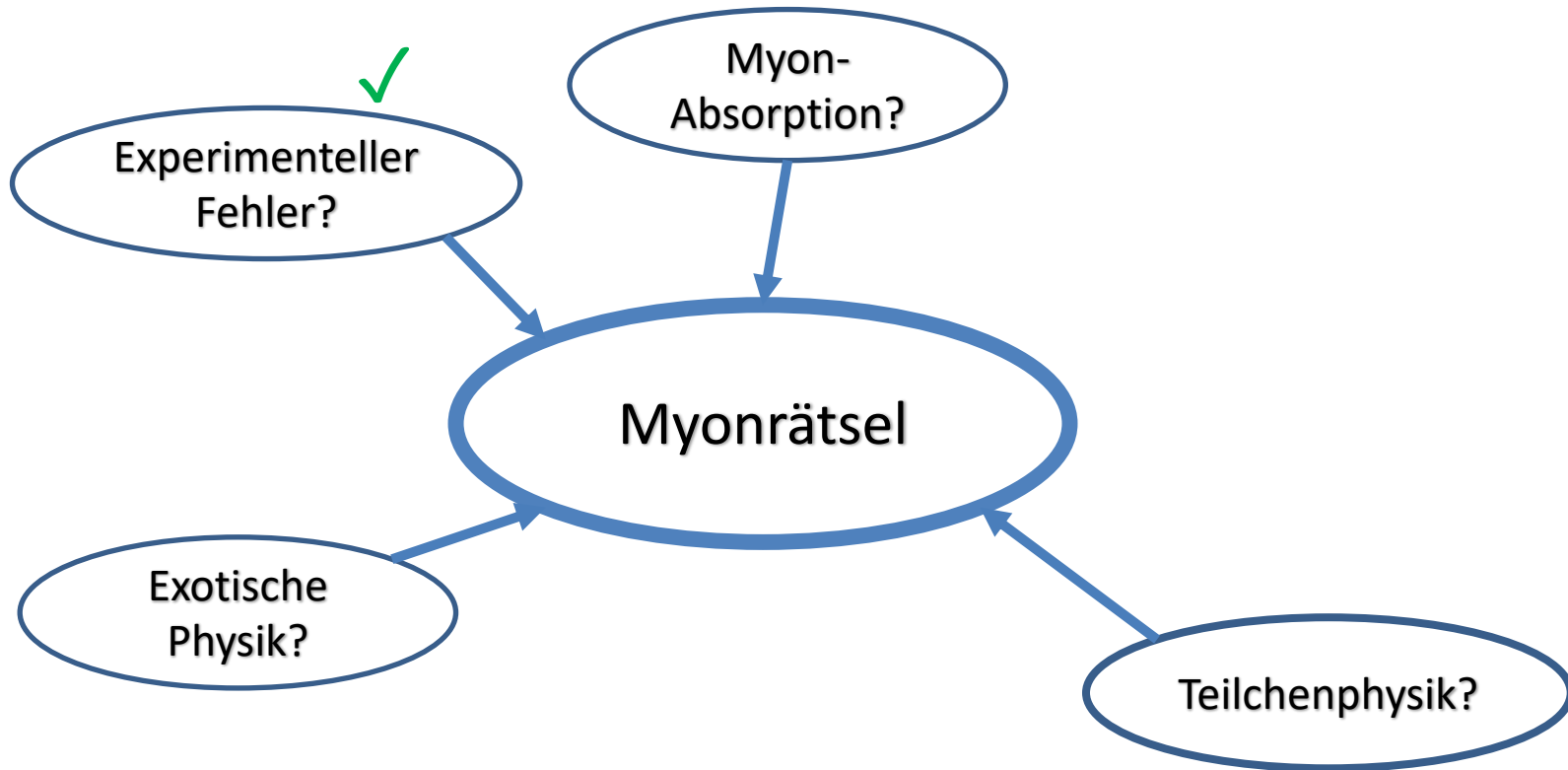
$$z = \frac{\ln(N_{\mu}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu,p\text{-sim}}^{\text{det}})}{\ln(N_{\mu,\text{Fe-sim}}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu,p\text{-sim}}^{\text{det}})}$$

$$z_{\text{mass}} \approx \frac{\langle \ln A \rangle}{\ln 56}$$

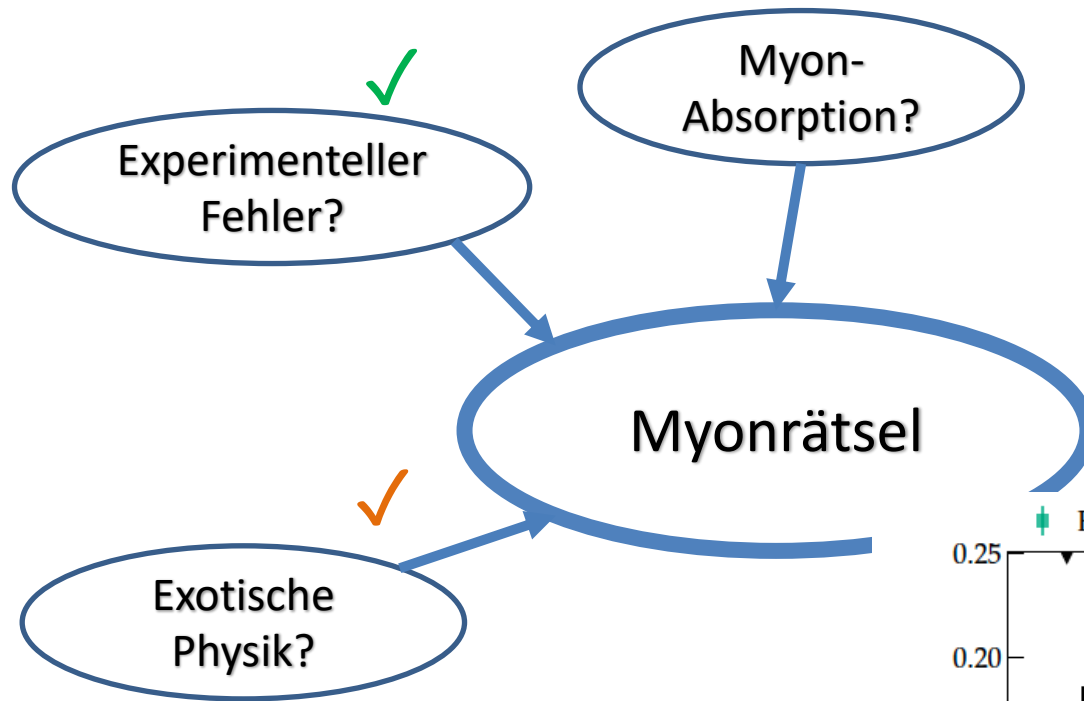
PoS(ICRC2021)349



# Suche nach Ursachen für Myon-Rätsel

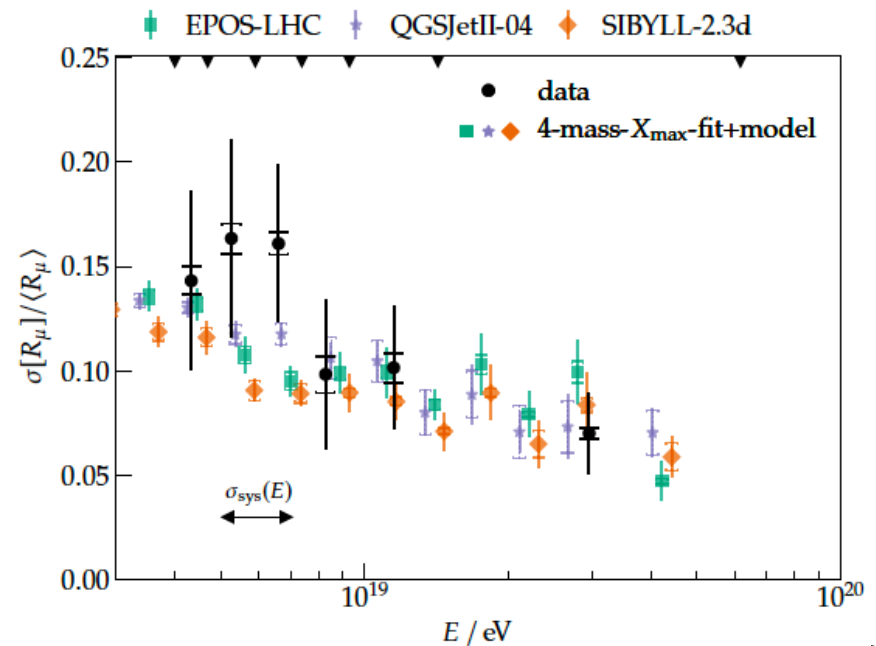


# Suche nach Ursachen für Myon-Rätsel



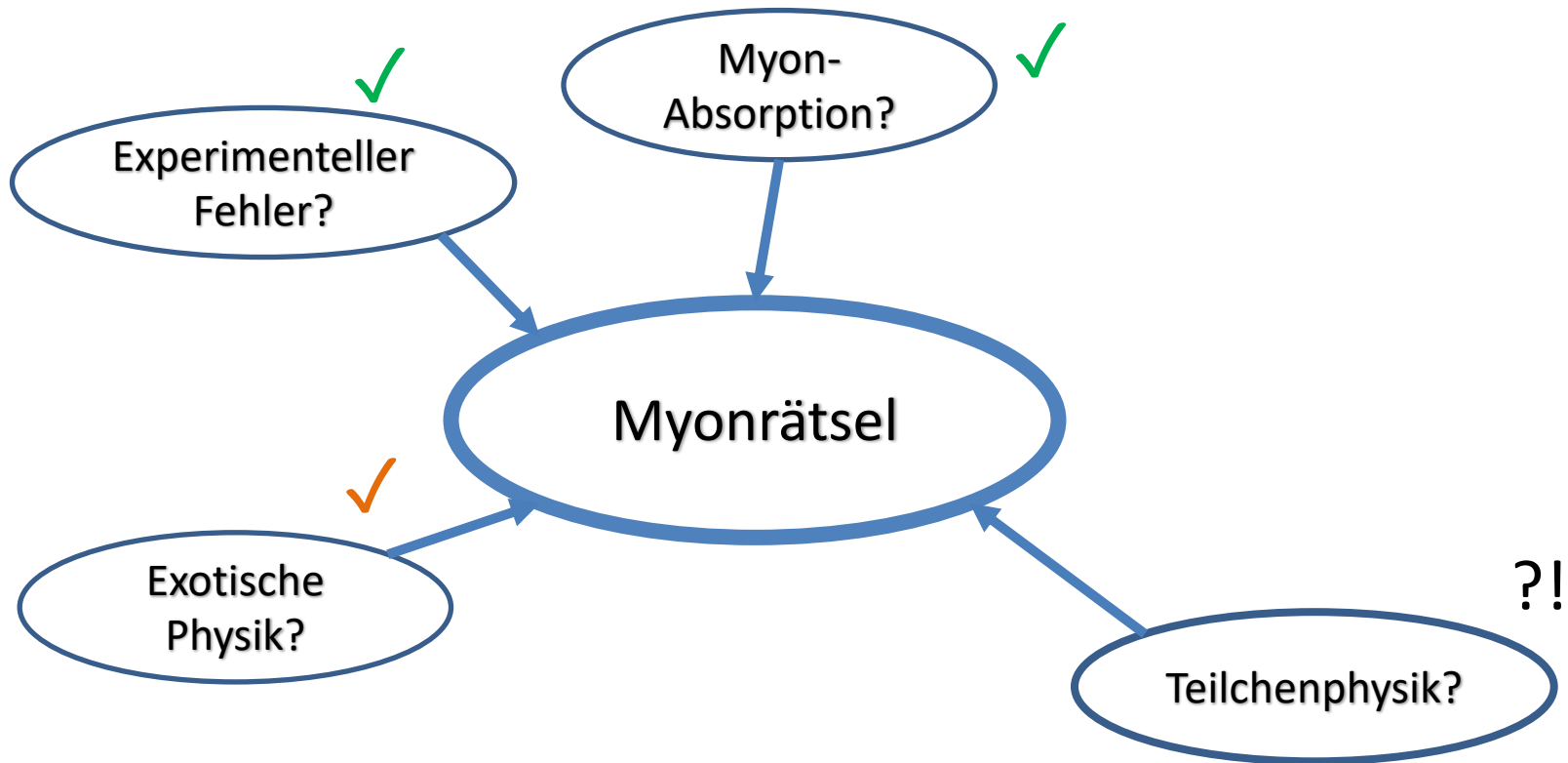
Erstmalige Messung von Myonzahl-Fluktuationen

Pierre Auger collab., PRL 126 (2021) 15, 152002

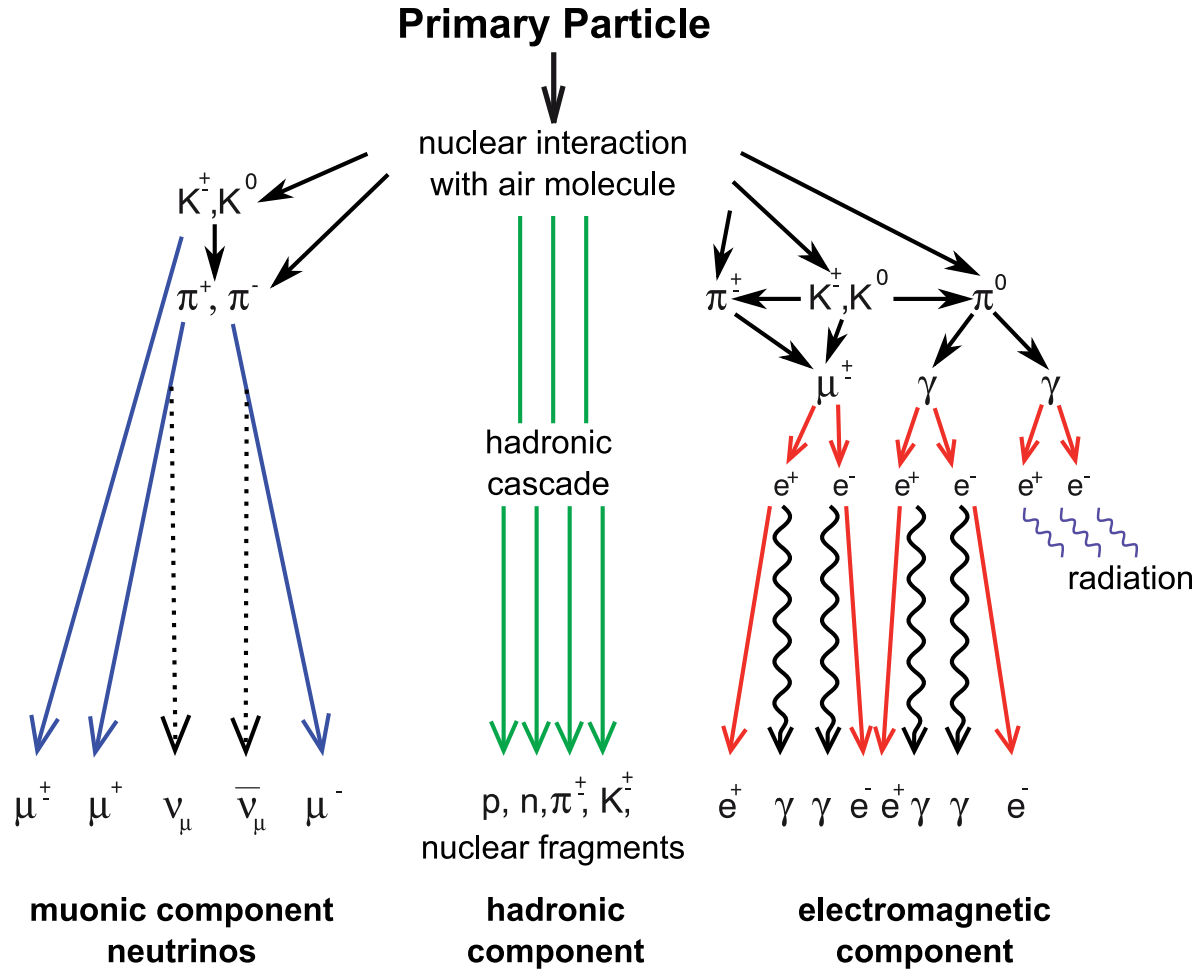




# Suche nach Ursachen für Myon-Rätsel



# Anatomie eines Luftschauers

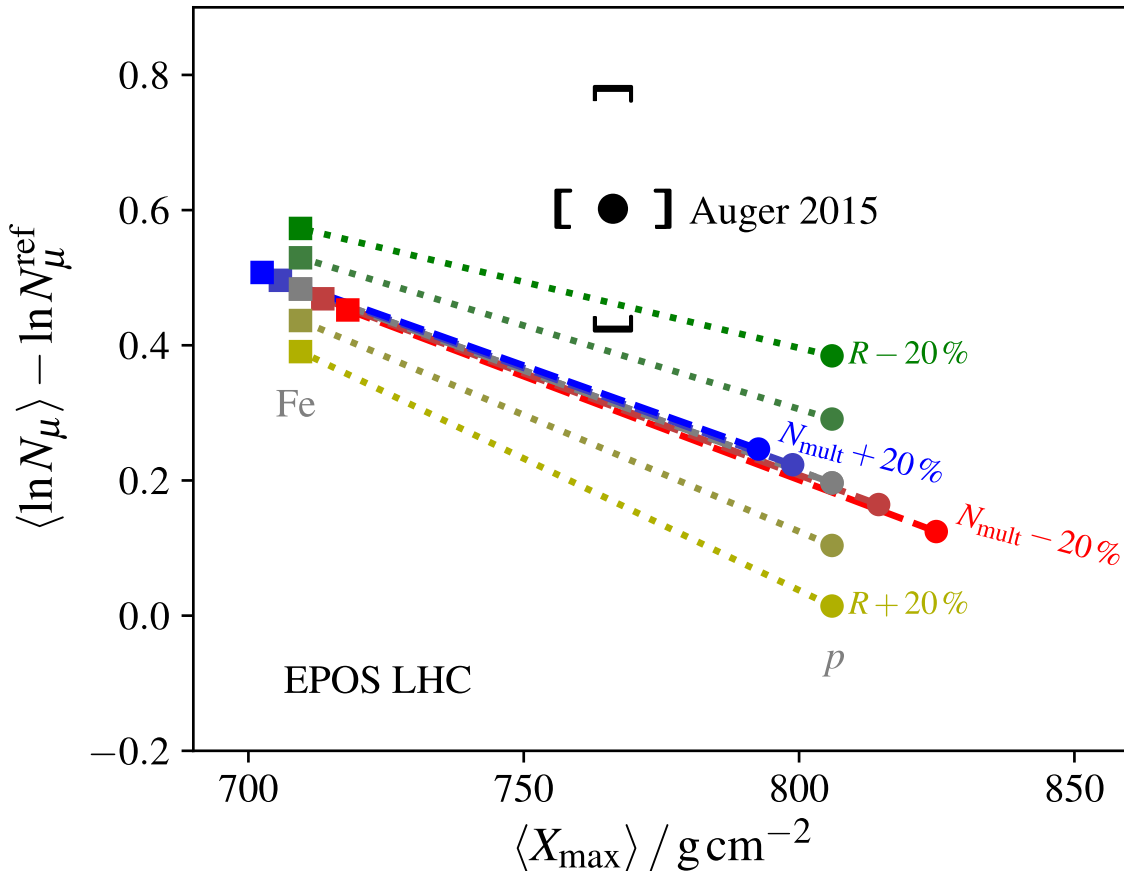


Haungs et al., JoP Conf. Ser. 632 (2015) 012011

# Teilchenphysik und Myonrätzel

S. Baur, HD, M. Perlin, T. Pierog, R. Ulrich, K. Werner,  
arXiv:1902.09265

$E_0 = 10^{19} \text{ eV}$



$$R = \frac{E_{\pi^0}}{E_{\text{other hadrons}}}$$

Hadronen: p, n,  $\pi$ , K...

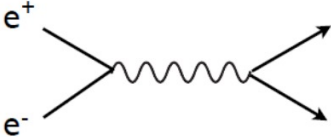
Pionen:  $\pi^{+/-}$ ,  $\pi^0$

Häufigste instabile Hadronen

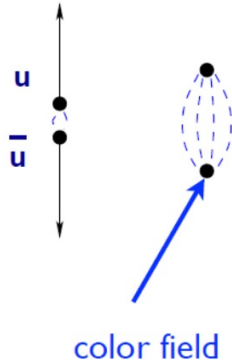
# Problem: R ist eigentlich fixiert

T. Pierog, K. Werner, NA61-theory talk (2015); figure from R. Engel

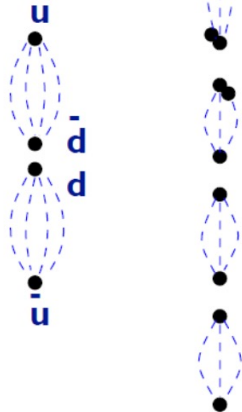
Annihilation at high energy



Quarks together are color-neutral system



time →



String fragmentation



Probabilities to generate quark pairs independent of collision details

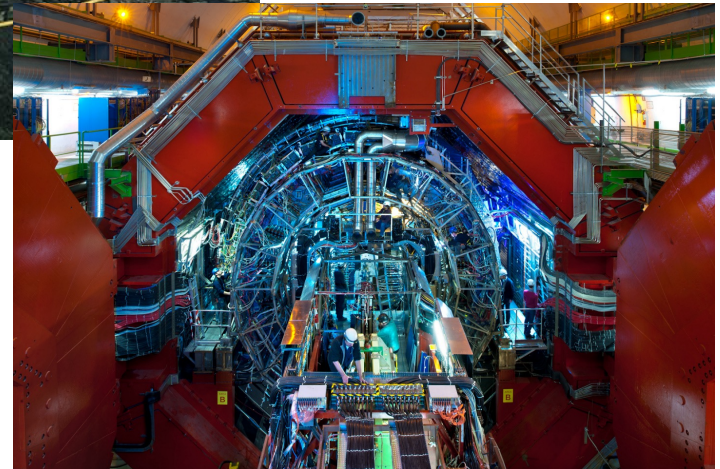
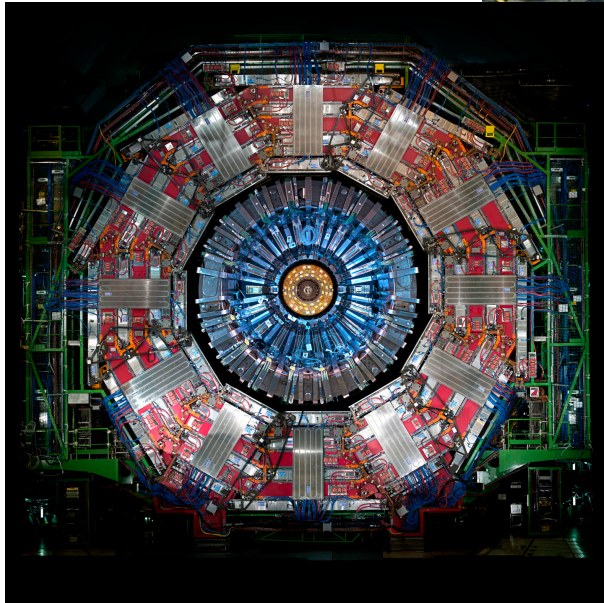
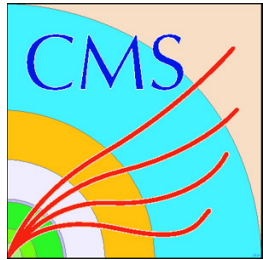
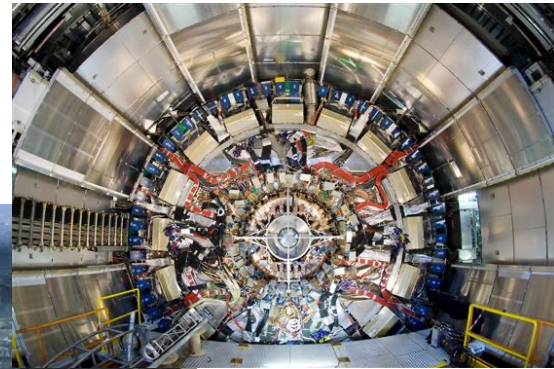
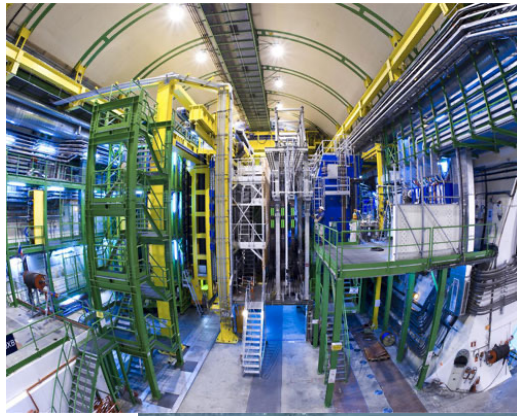
- $u\bar{d}$   $\pi^+$
- $d\bar{u}$   $\pi^-$
- $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$   $\bar{p}$
- $udd$   $n$
- $u\bar{s}$   $K^+$
- .....
- $s\bar{d}$   $K^-$
- $u\bar{d}$   $\pi^+$
- $q\bar{q}$
- $q\bar{q}$  ...
- $q\bar{q}$

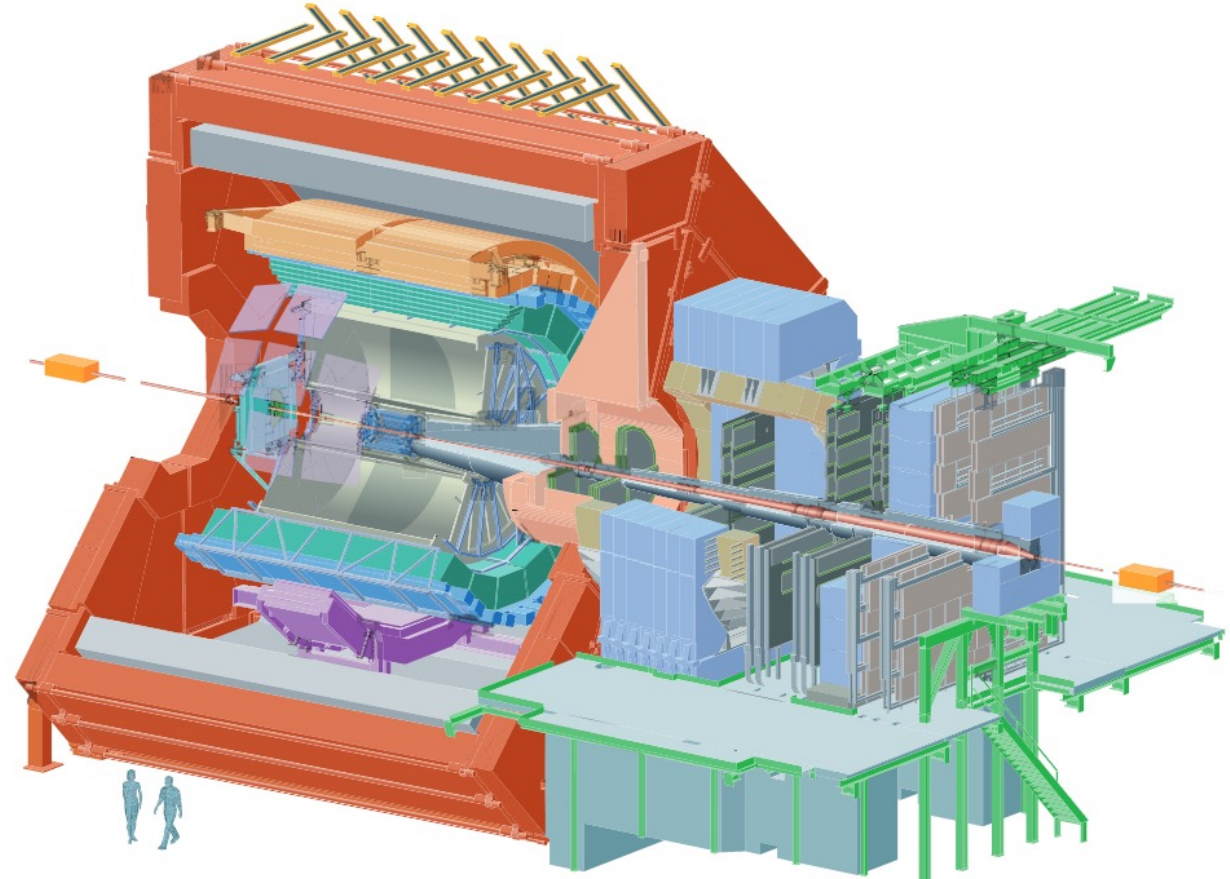
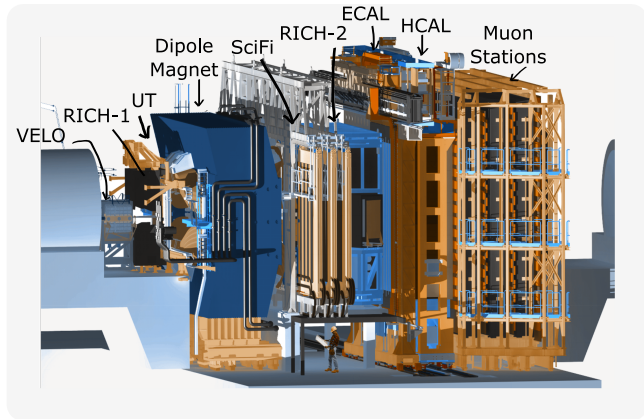
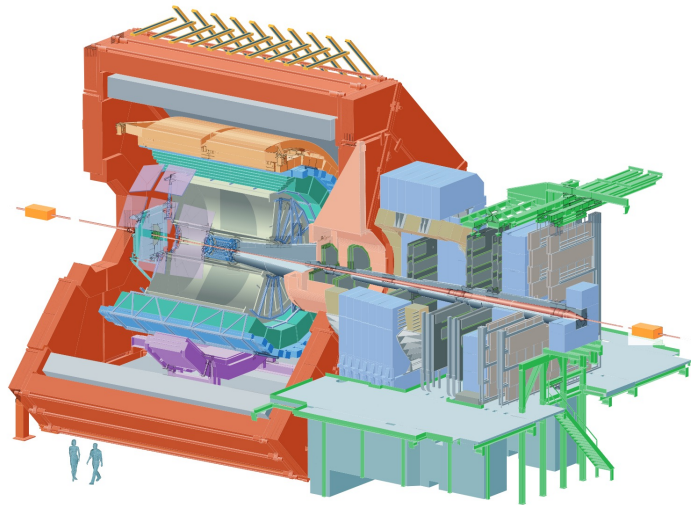
Chain of hadrons

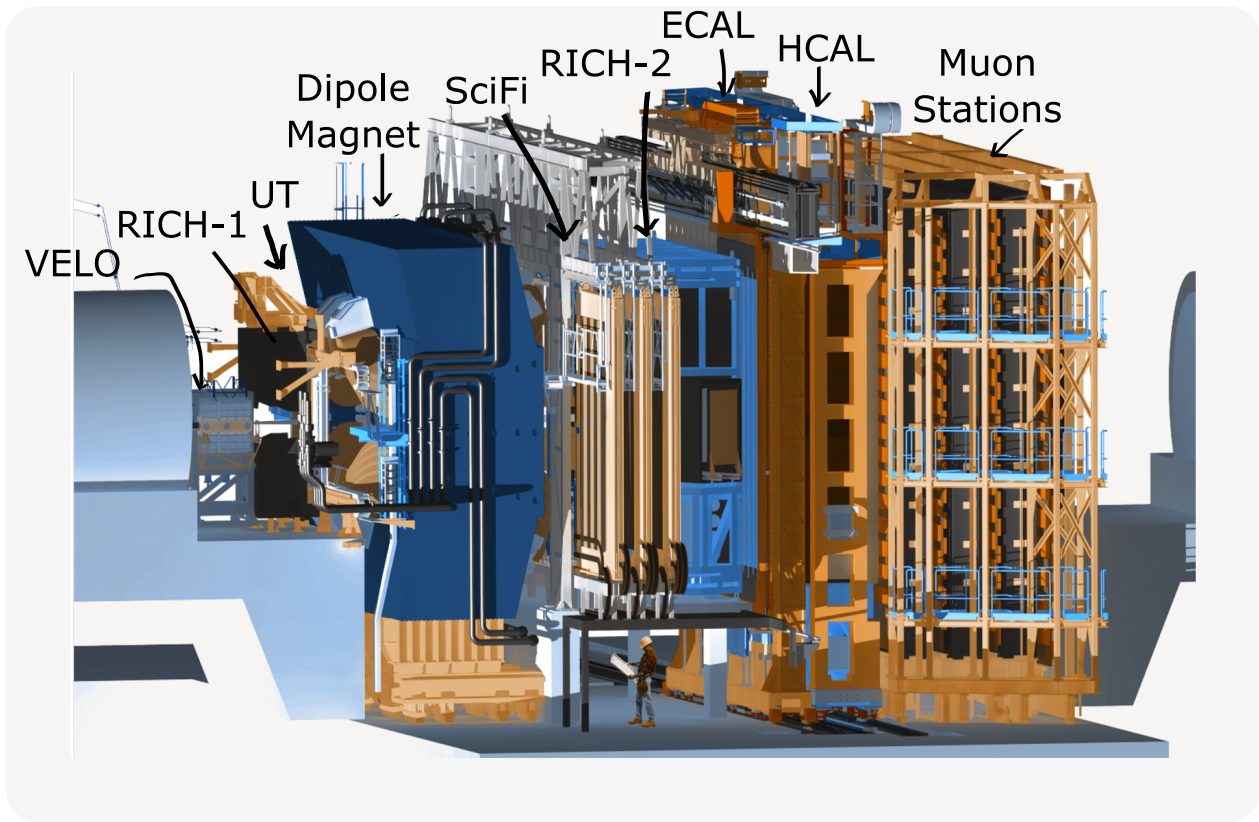
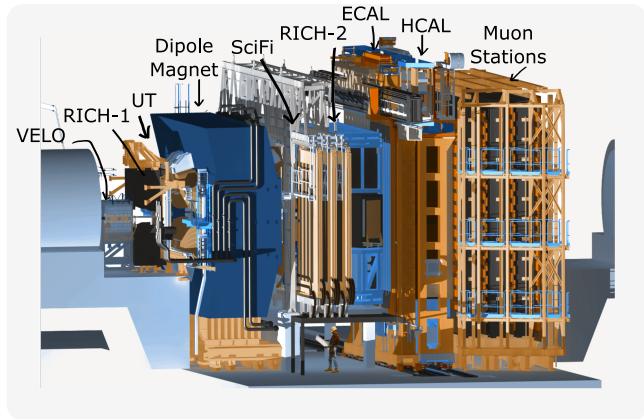
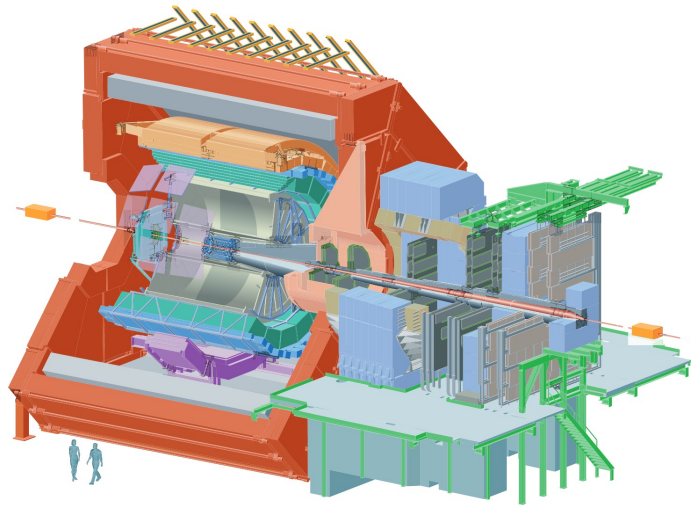
# Large Hadron Collider (LHC)



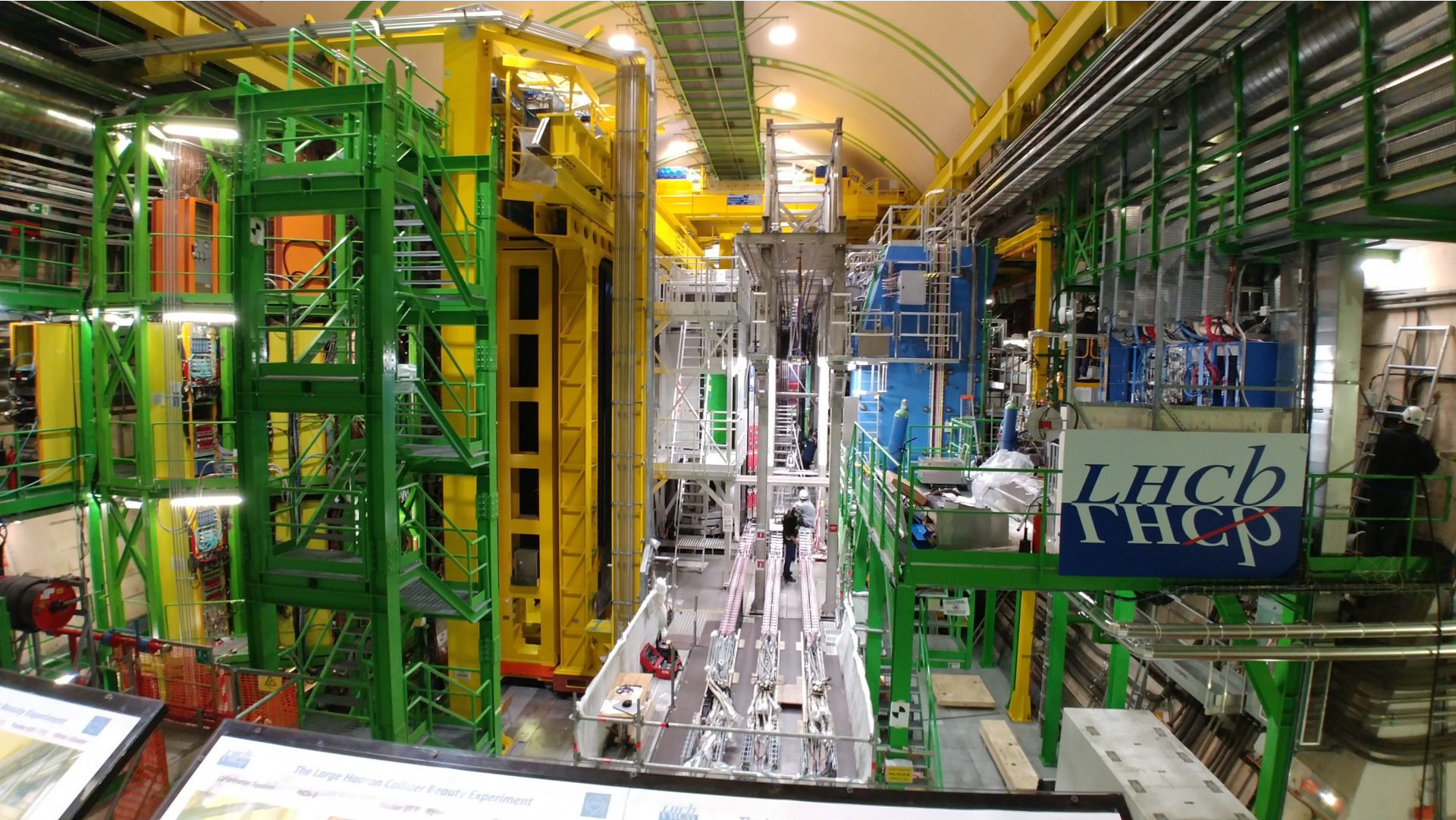
# Expériences am LHC









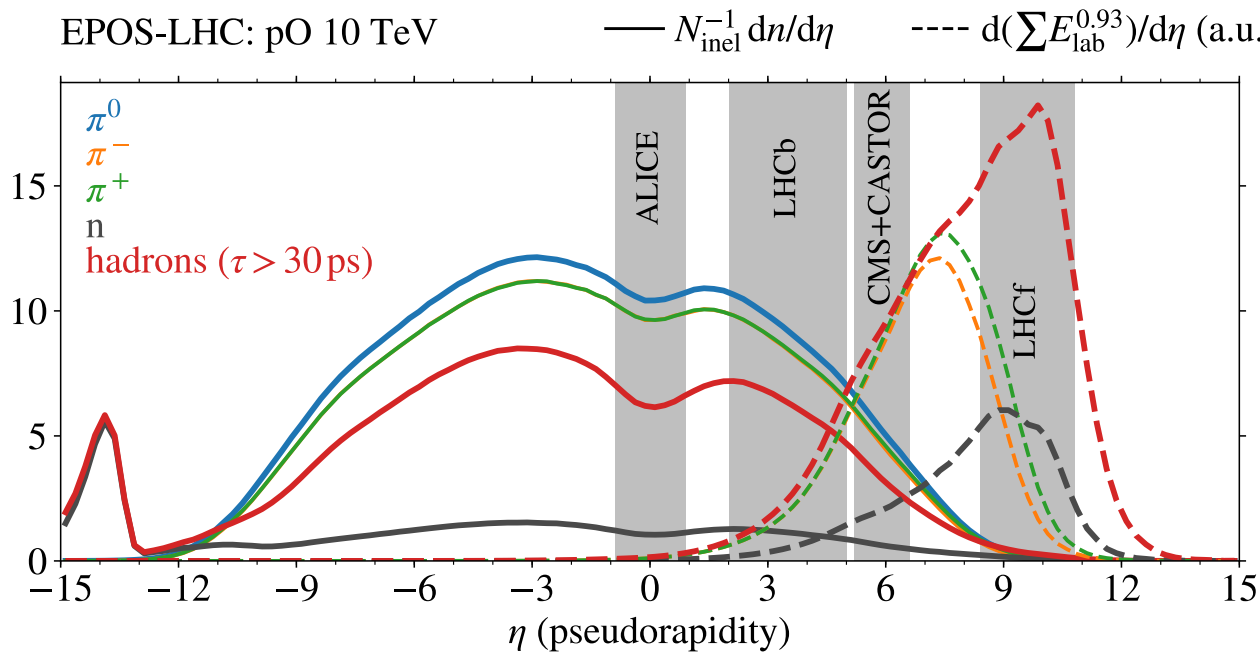


# Vorwärtsproduktion und Luftschauer

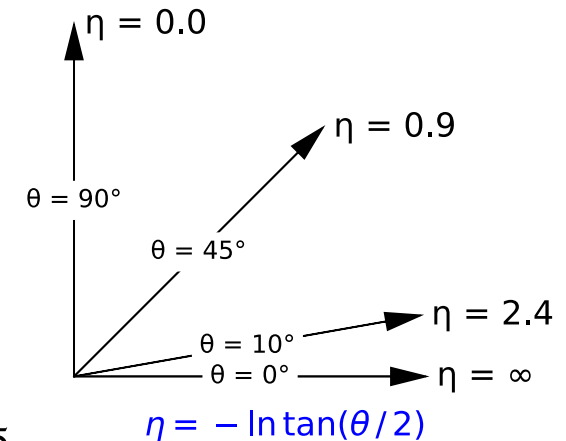
Albrecht, HD et al., *Astrophys.Space Sci.* 367 (2022) 3, 27  
 arXiv:2105.06148

## Gestrichelte Linie

Wie viele Myonen würde das Teilchen  
 in einem Luftschauer erzeugen

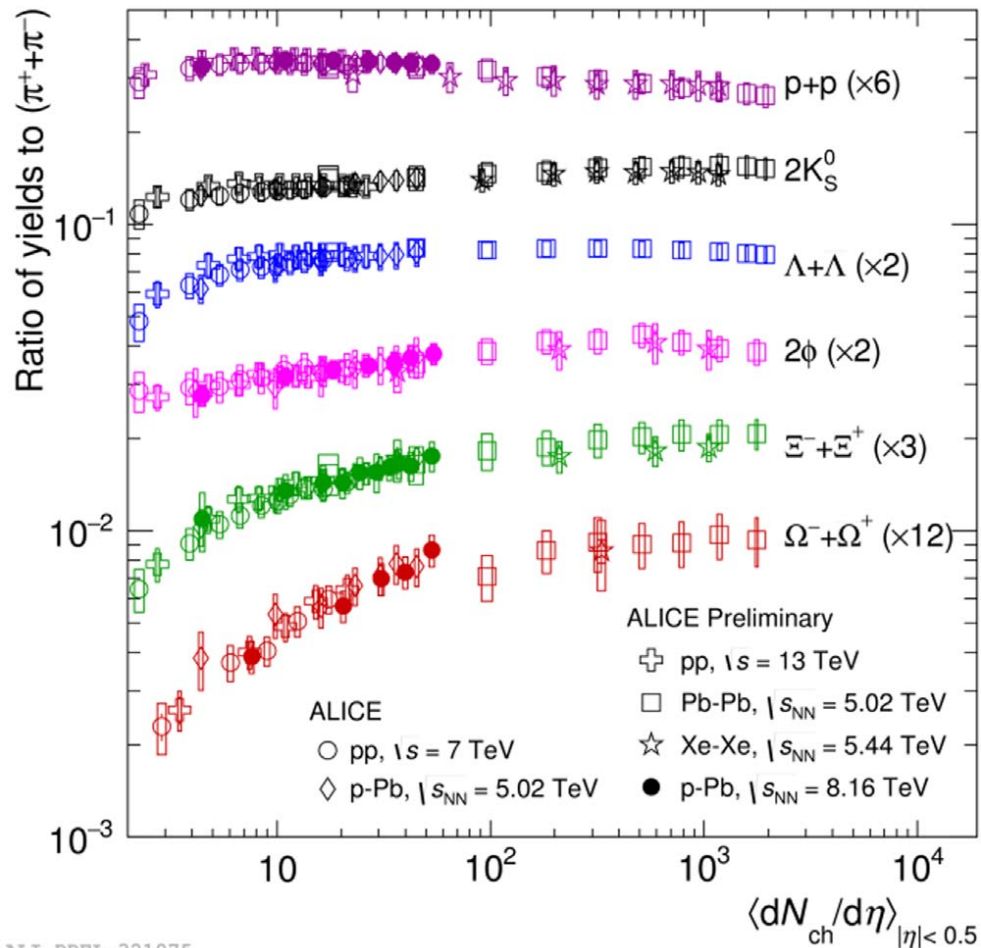


## $\eta$ und Emissionswinkel



# Myonrätzel und seltsame Teilchen

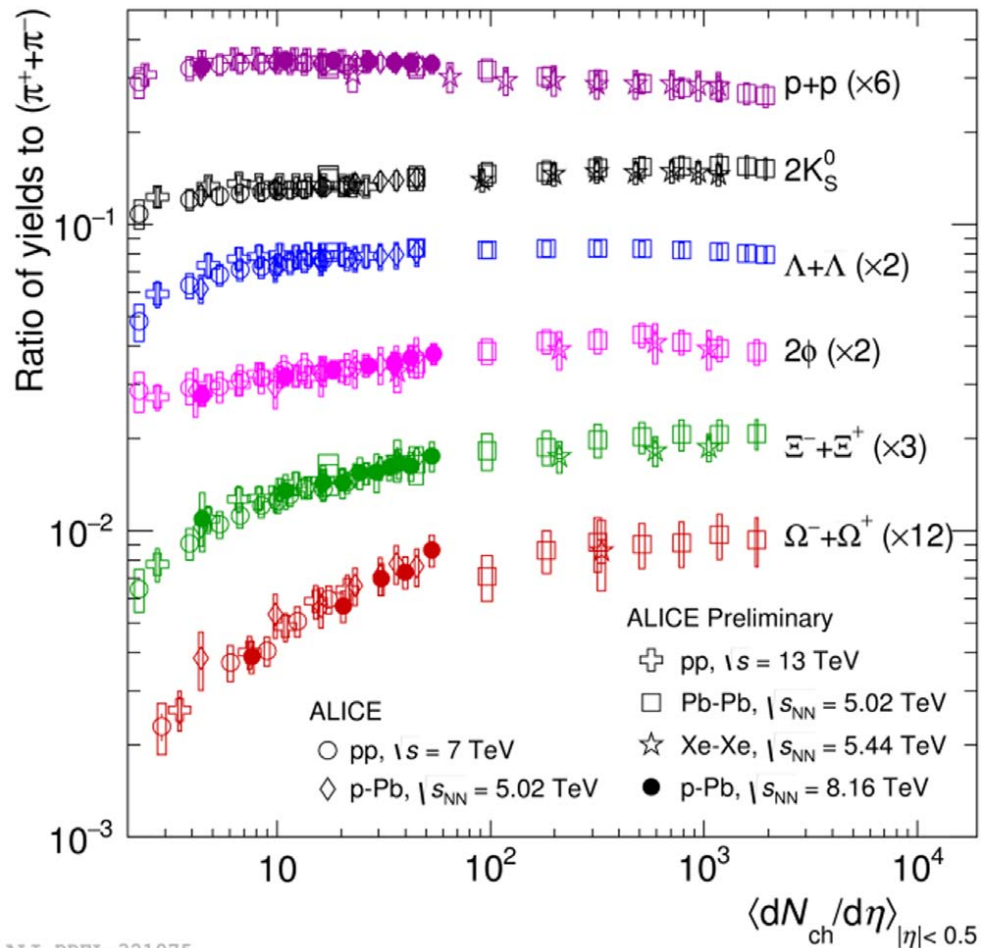
M. Vasileiou for ALICE, Phys. Scr. 95 (2020) 064007



ALI-PREL-321075

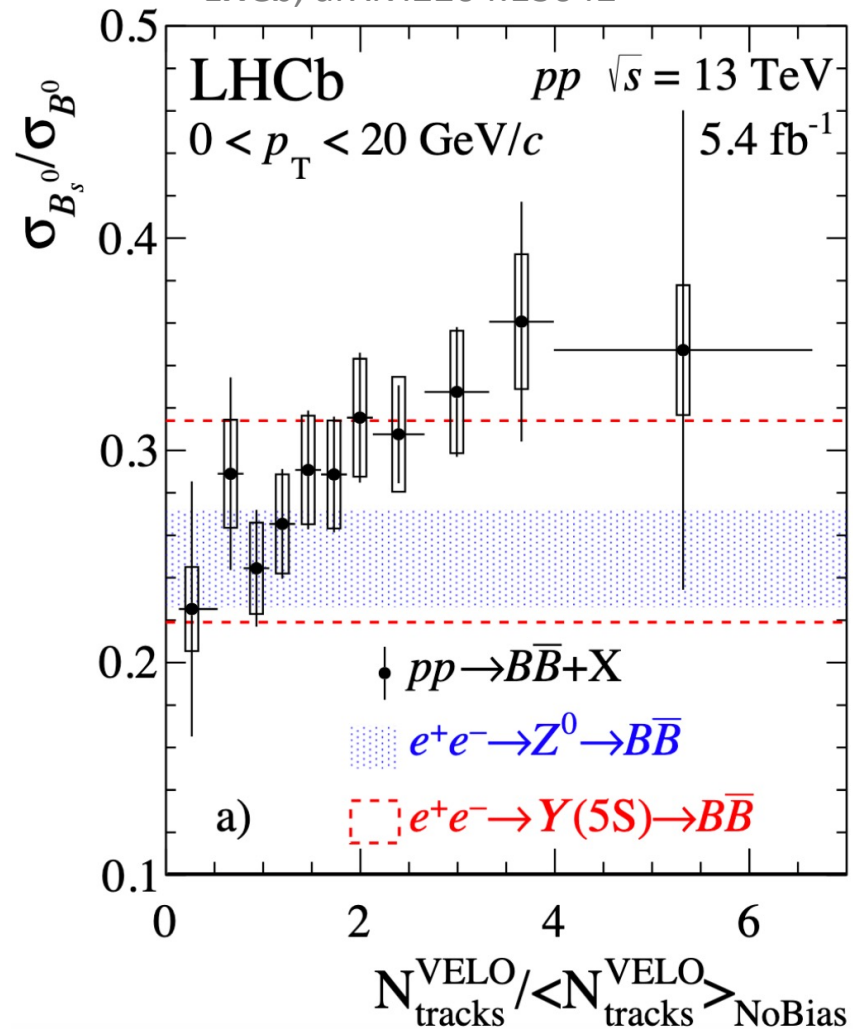
# Myonrätzel und seltsame Teilchen

M. Vasileiou for ALICE, Phys. Scr. 95 (2020) 064007



ALI-PREL-321075

LHCb, arXiv:2204.13042



# Zusammenfassung

- Kosmische Strahlung
  - Boten von extremen Prozessen im Universum
  - Hochenergetische Strahlung mit Luftschauerdetektoren gemessen

# Zusammenfassung

- Kosmische Strahlung
  - Boten von extremen Prozessen im Universum
  - Hochenergetische Strahlung mit Luftschauerdetektoren gemessen
- Myonrätsel in Luftschauern
  - Mehr Myonen in echten Luftschauern als von Modellen vorhergesagt

# Zusammenfassung

- Kosmische Strahlung
  - Boten von extremen Prozessen im Universum
  - Hochenergetische Strahlung mit Luftschauerdetektoren gemessen
- Myonrätsel in Luftschauern
  - Mehr Myonen in echten Luftschauern als von Modellen vorhergesagt
- Wahrscheinlichster Ursprung: Teilchenproduktion nicht korrekt beschrieben
  - Vielleicht muss neue Art von Teilchenproduktion berücksichtigt werden
  - Keine "neue Physik" (neue Kraft oder neue Teilchen) dazu nötig

# Zusammenfassung

- Kosmische Strahlung
  - Boten von extremen Prozessen im Universum
  - Hochenergetische Strahlung mit Luftschauerdetektoren gemessen
- Myonrätsel in Luftschauern
  - Mehr Myonen in echten Luftschauern als von Modellen vorhergesagt
- Wahrscheinlichster Ursprung: Teilchenproduktion nicht korrekt beschrieben
  - Vielleicht muss neue Art von Teilchenproduktion berücksichtigt werden
  - Keine "neue Physik" (neue Kraft oder neue Teilchen) dazu nötig
- Starke Wechselwirkung ("Kraft")
  - Hält Atomkerne zusammen und Vorstufe der Myonproduktion im Luftschauer
  - Im Grunde verstanden, aber Vorhersagen schwierig
  - Noch nicht alle Effekte verstanden
  - Fakt: Mehr "seltsame" Teilchen bei hohen Energien/Teilchendichten als bislang erwartet
  - Könnte Schlüssel für das Myonrätsel sein
  - LHCb Experiment am LHC hat Schlüsselrolle aufgrund Vorwärtsausrichtung





**Faszination Astronomie Online**

**#FasziAstroOnline**

**[www.haus-der-astronomie.de/faszi-astro-online](http://www.haus-der-astronomie.de/faszi-astro-online)**

**Donnerstag, 9. Juni 2022 um 19 Uhr live**

**Von Eisvulkanen, verborgenen  
Ozeanen und Lava-Welten: Eine Reise  
zu den Monden im Sonnensystem**

**PD Dr. René Heller, Max-Planck-Institut für  
Sonnensystemforschung**

Bilder: NASA/JPL/Space Science Institute/Ted Stryk