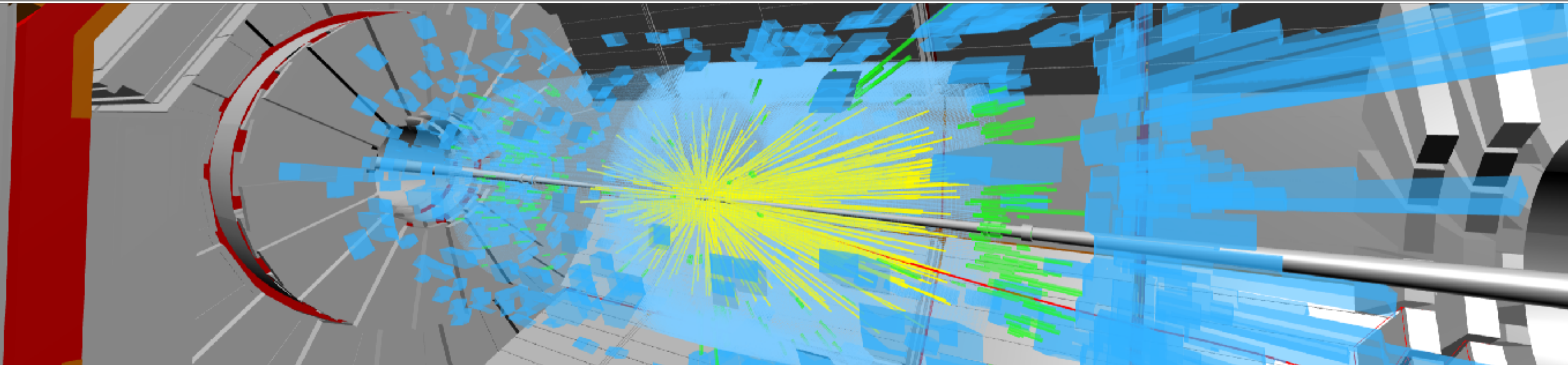


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2019 – 19. Vorlesung (Teil 1)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



Auflösung Aufgabe 32

- Welche der folgenden Aussagen über Neutrinooszillationen sind korrekt?
- A. Die Idee der Oszillationen wurde zunächst für Neutrino-Antineutrino-Zustände betrachtet, dann auf Flavor-Zustände übertragen.
 - B. Alleine aus der Evidenz für Neutrino-Flavor-Oszillationen kann auf die Existenz von nichtverschwindenden Neutrinomassen geschlossen werden.
 - C. Bei Oszillations-Experimenten verwendet man die Erde als „Filter“, um Neutrinos von Antineutrinos zu trennen.
 - D. In der Auswertung werden häufig Experimente mit Sonnen- und Reaktorneutrinos kombiniert, sowie ebenso Experimente mit Beschleuniger- und Atmosphärenneutrinos.
 - E. Mit ausreichend hoher Energieauflösung können zukünftige Oszillations-Experimente auch die Neutrinomassenskala messen.

Kurze Wiederholung

- **Neutrinooszillationen:** theoretische Beschreibung
 - Propagation der Masseneigenzustände (physikalische Teilchen)
→ **Mischung** der Flavoreigenzustände (Wechselwirkung mit W-Boson)
 - Drei-Flavor-Oszillationen: **PMNS-Matrix** (drei Mischungswinkel, eine CP-verletzende Phase?), zwei Differenzen der Massenquadrate Δm_{ij}^2
- Experimentell: Beobachtung von Neutrinooszillationen
 - **Atmosphärische** und **Beschleunigerneutrinos**: ν_μ in ν_3 → großes Δm_{ij}^2
 - **Sonnenneutrinos** und **Reaktorneutrinos**: ν_e in ν_2 → kleines Δm_{ij}^2
 - Reaktor- und Beschleunigerneutrinos: ν_e in ν_3 mit sehr kleinem Mischungswinkel
- Offene Fragen der Neutrinophysik: Neutrinos = **Dirac-** oder **Majorana-**Fermionen? **Absolute** Neutrinomasse? CP-Verletzung?

Kapitel 9

Offene Fragen und Querverbindungen

- Viele **Querverbindungen** zwischen Teilchenphysik – Astroteilchenphysik– Kosmologie:
 - **Inhaltlich:** Wie bestimmen kleinste Teilchen und ihre Wechselwirkungen die Entwicklung des Universums? Wie funktionieren kosmische Beschleuniger? Woraus besteht kosmische Strahlung?
 - **Methodisch:** Detektortechnologie, statistische Analyse der Daten
- Standardmodell der Teilchenphysik: **offene Fragen**
 - **Experiment:** Neutrinomassen, diverse kleinere Abweichungen von Erwartungen des Standardmodells (→ signifikant?)
 - **Theorie:** mehrere Defizite → nur gültig bei „niedrigen“ Energien?

■ Kosmologie:

- Elemententstehung: nukleare Astrophysik (Kapitel 4.3)
- Evidenz für **expandierendes** Universum, **dunkle Materie**, **dunkle Energie**
- **Standardmodell** der Kosmologie = konsistentes Modell von Entwicklung des Universums?

■ **Astroteilchenphysik**: Schnittstelle zwischen Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie

- Kosmische Strahlung → Beschleunigung im Universum?
- Suche nach Antimaterie, dunkler Materie, Gravitationswellen, ...
- Multimessenger-Ansatz: Verknüpfung vieler Beobachtungen (optisch, Radioteleskope, Luftschauber, Neutrinos, Gravitationswellen ...)

Kapitel 9.1

Grenzen des Standardmodells

Probleme des Standardmodells

- Theoretische Defizite des Standardmodell:
 - Viele **freie Parameter**: >20 Massen und Kopplungen
 - Higgs-Mechanismus: ad hoc eingeführt, keine Erklärung für **elektroschwache Symmetriebrechung** und Yukawa-Kopplung
 - Eichkopplungen: keine Erklärung für **Eichgruppe** $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
 - Keine (einfache) **Vereinheitlichung** aller Kräfte bei hohen Energien
 - **Hierarchieproblem**: Gravitation viel schwächer als alle anderen Kräfte
- Hinweise auf Physik **jenseits des Standardmodells**:
 - Labor: Neutrinomassen, Abweichungen in Präzisionsobservablen
 - Kosmologie: dunkle Materie und dunkle Energie (→ später), starke Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie

g-2: Theorie und Experiment

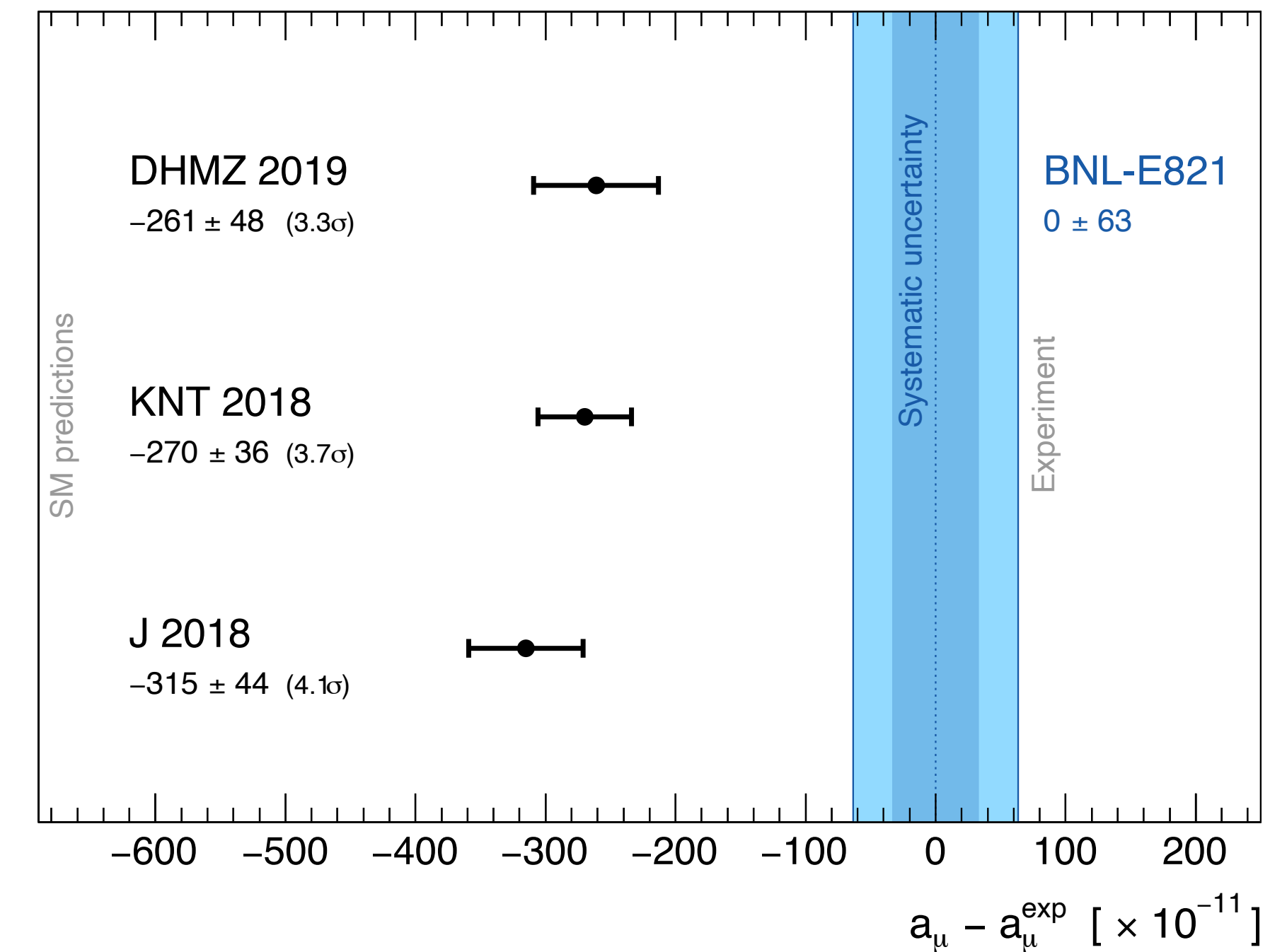
- Dirac-Gleichung: **magnetisches Moment** von Myonen mit g-Faktor $g_\mu = 2$

- Quantenkorrekturen
→ **anomales** magnetisches Moment:

$$a_\mu \equiv \frac{g_\mu - 2}{2}$$

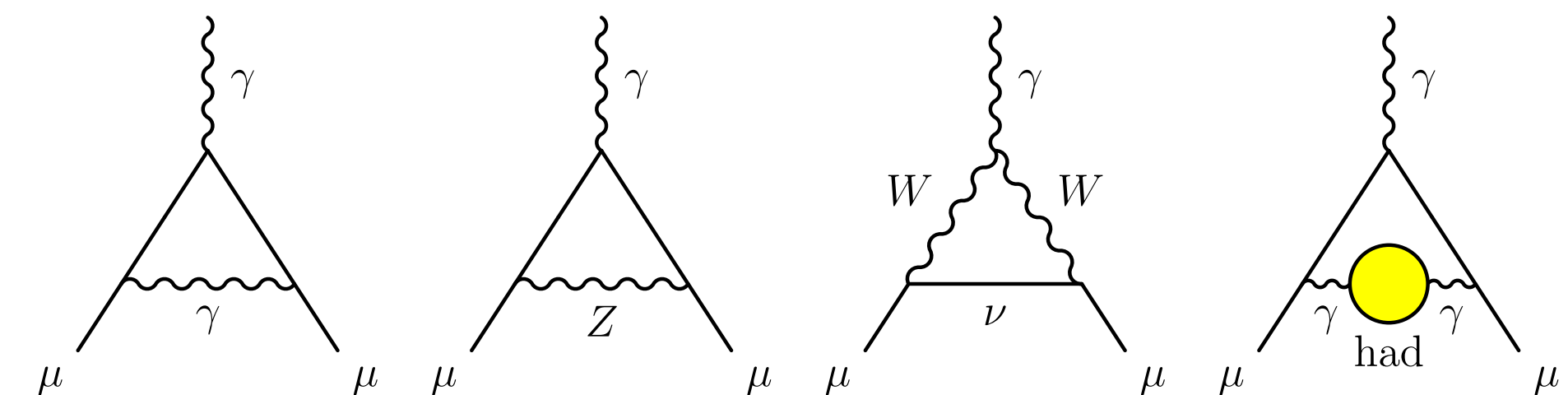
- a_μ extrem genau messbar und berechenbar:
relative Unsicherheit $< 10^{-6}$
- **3,3 Standardabweichungen**
Unterschied zwischen Theorie und Experiment → neue Physik?
- Muon g-2 (Fermilab): Resultat noch 2020?

a_μ : Vergleich von Theorie und Experiment



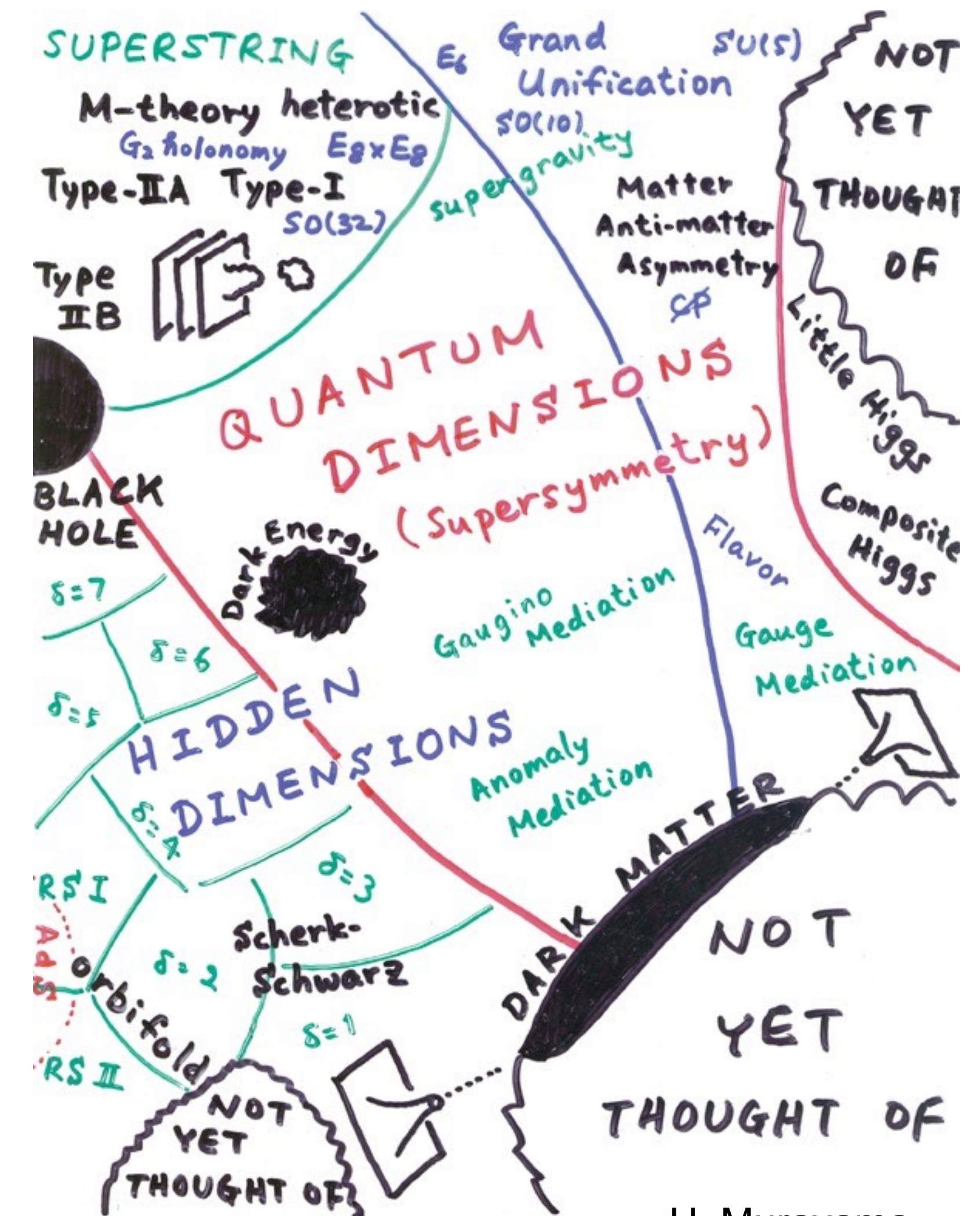
PDG 2020

Beiträge zu a_μ



Jenseits des Standardmodells

- Theorien **jenseits des Standardmodells** (engl.: beyond the standard model, BSM):
 - Lösung der Probleme des Standardmodells
 - Querverbindung zu Kosmologie und Astroteilchenphysik
- Viele Ideen für BSM-Physik:
 - Neue **Symmetrie**?
 - Neue starke **Kraft**?
 - Zusätzliche **Raumdimensionen**?

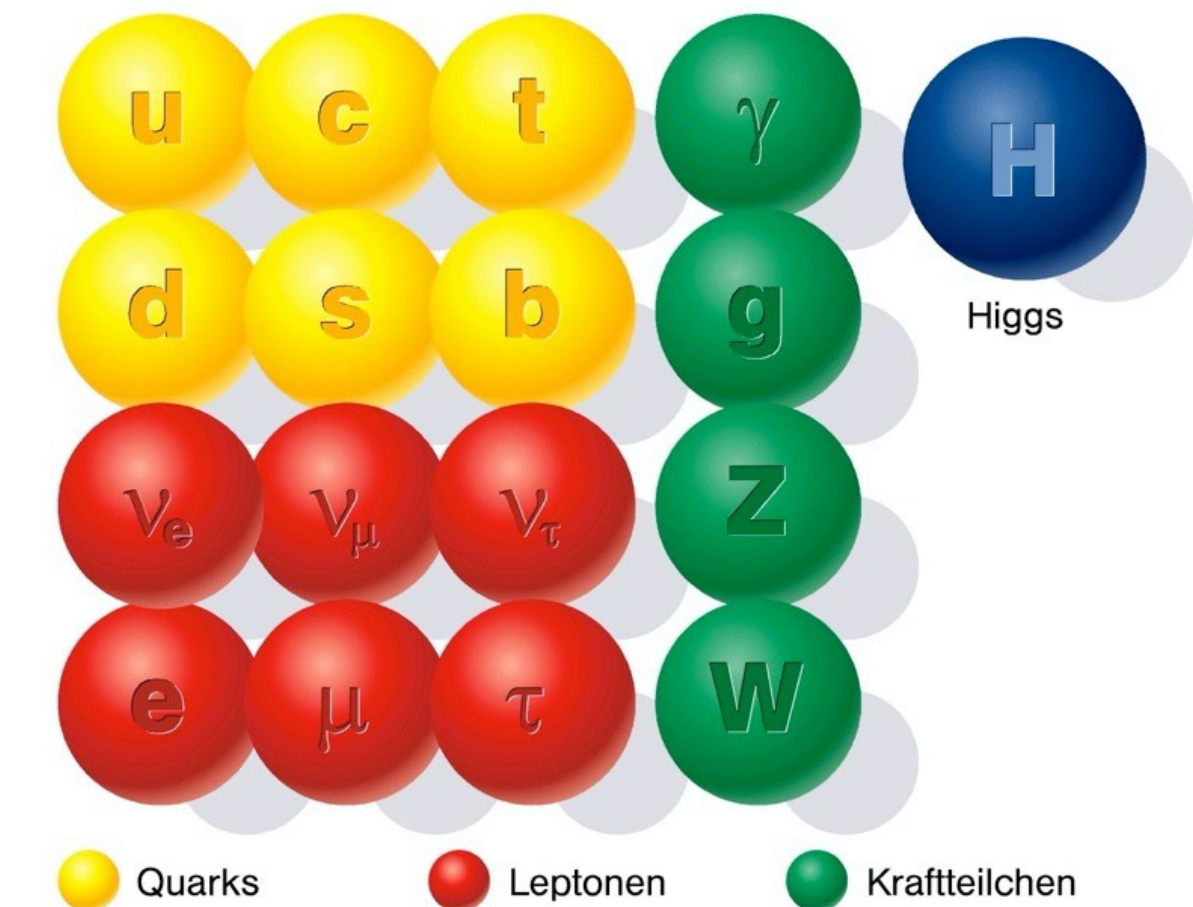


H. Murayama

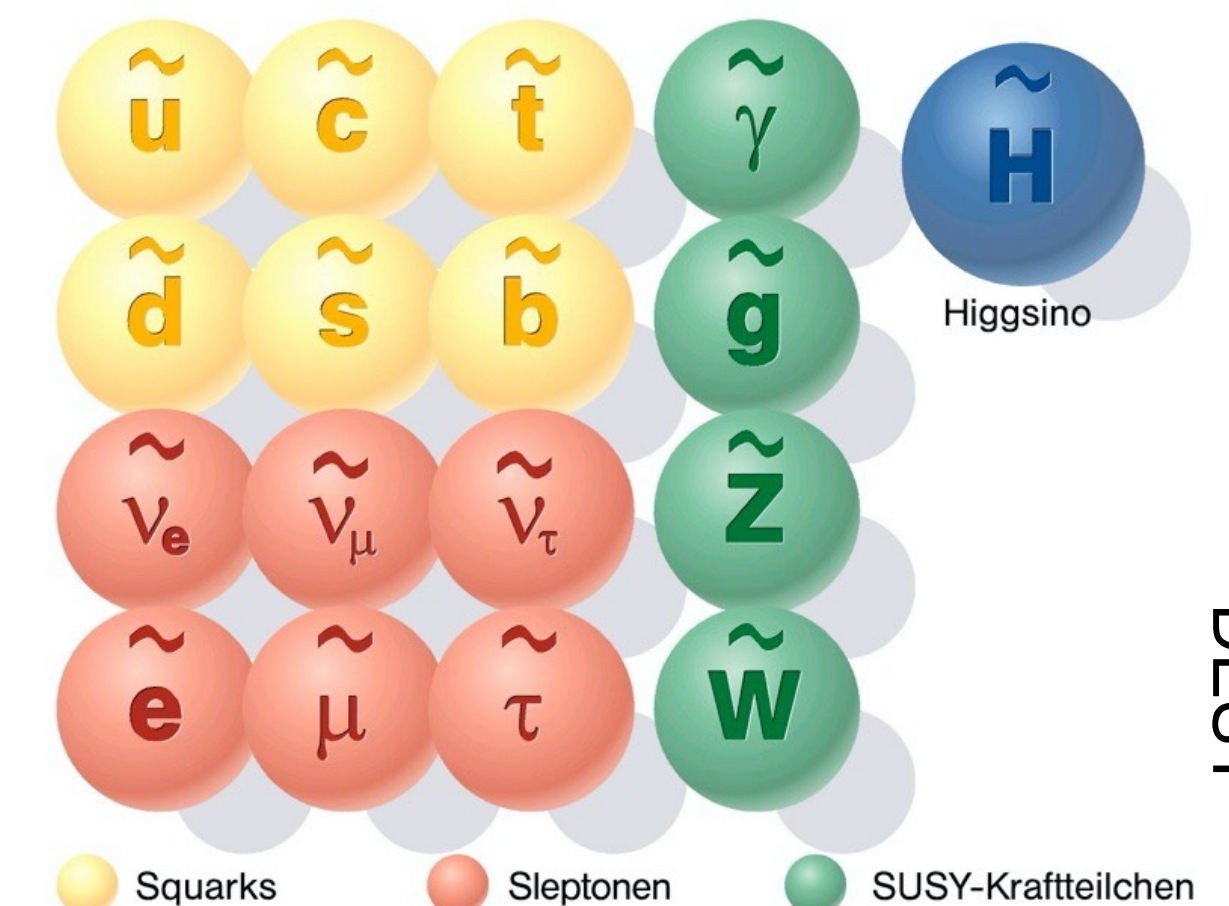
SUSY – Supersymmetrie

- SUSY: postulierte **neue Raum-Zeit-Symmetrie** zwischen **Bosonen** und **Fermionen**
 - Jedes Boson hat ein Fermion als **Superpartner** und umgekehrt
 - Superpartner: dieselbe **Masse**, dieselben **Quantenzahlen** (außer Spin)
 - Populäre SUSY-Modelle: leichtestes SUSY-Teilchen **stabil** → Kandidat für **dunkle Materie** (WIMP = weakly interacting massive particle)
 - Lösungen für viele weitere Probleme des SM...
 - Noch **keine Superpartner** entdeckt → SUSY **gebrochen** (oder nicht realisiert in Natur)

Standard-Teilchen



SUSY-Teilchen

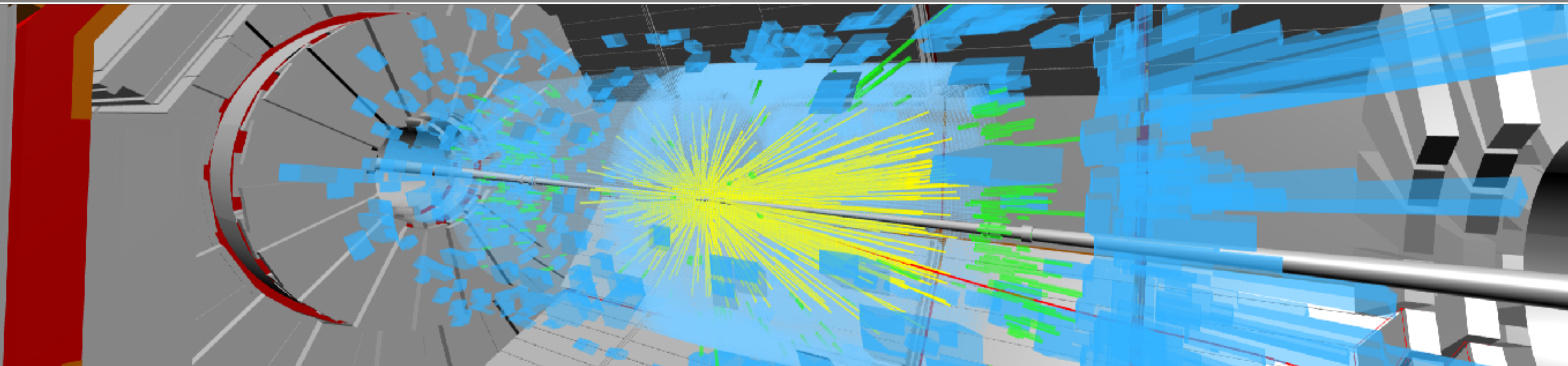


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2019 – 19. Vorlesung (Teil 2)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



Kurze Wiederholung

- **Grenzen** des Standardmodells der Teilchenphysik:
 - **Theoretische** Defizite: freie Parameter, Vereinheitlichung der Kräfte, ...
 - Keine Erklärung für manche **Beobachtungen**, z. B. $g-2$ des Myons, dunkle Materie (→ später)
- Mögliche **Erweiterung** des Standardmodells: **Supersymmetrie**
 - Symmetrie zwischen **Bosonen und Fermionen** → SUSY-Partner für alle Teilchen des Standardmodells
 - Falls in Natur realisiert: Lösung für viele Probleme des Standardmodells, aber: bisher **keine SUSY-Teilchen entdeckt**
- Viele weitere Modelle für Physik jenseits des Standardmodells, bisher **keine signifikanten Abweichungen** in Daten (LHC, B-Fabriken, ...)

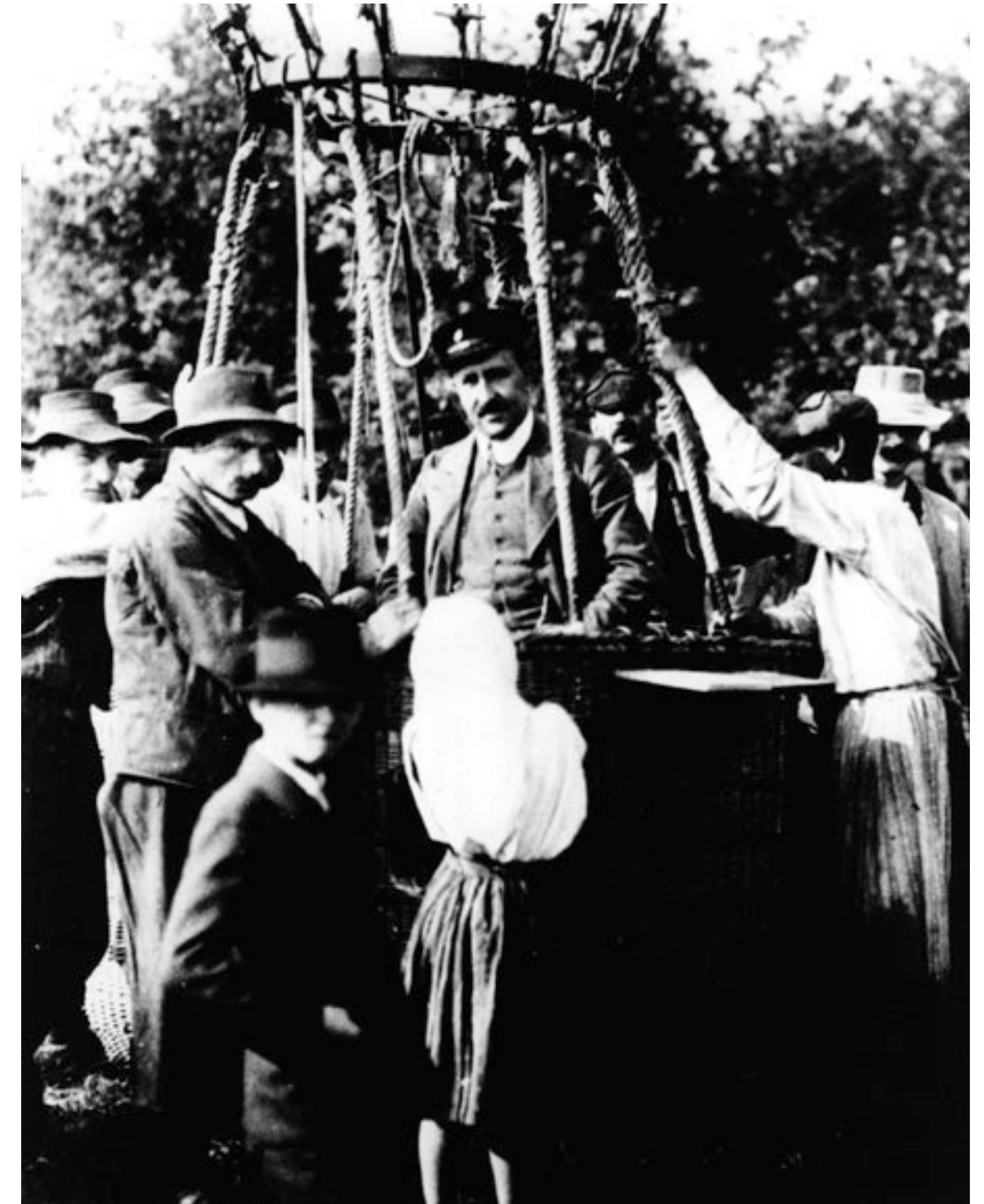
Kapitel 9.2

Astroteilchenphysik und Kosmologie

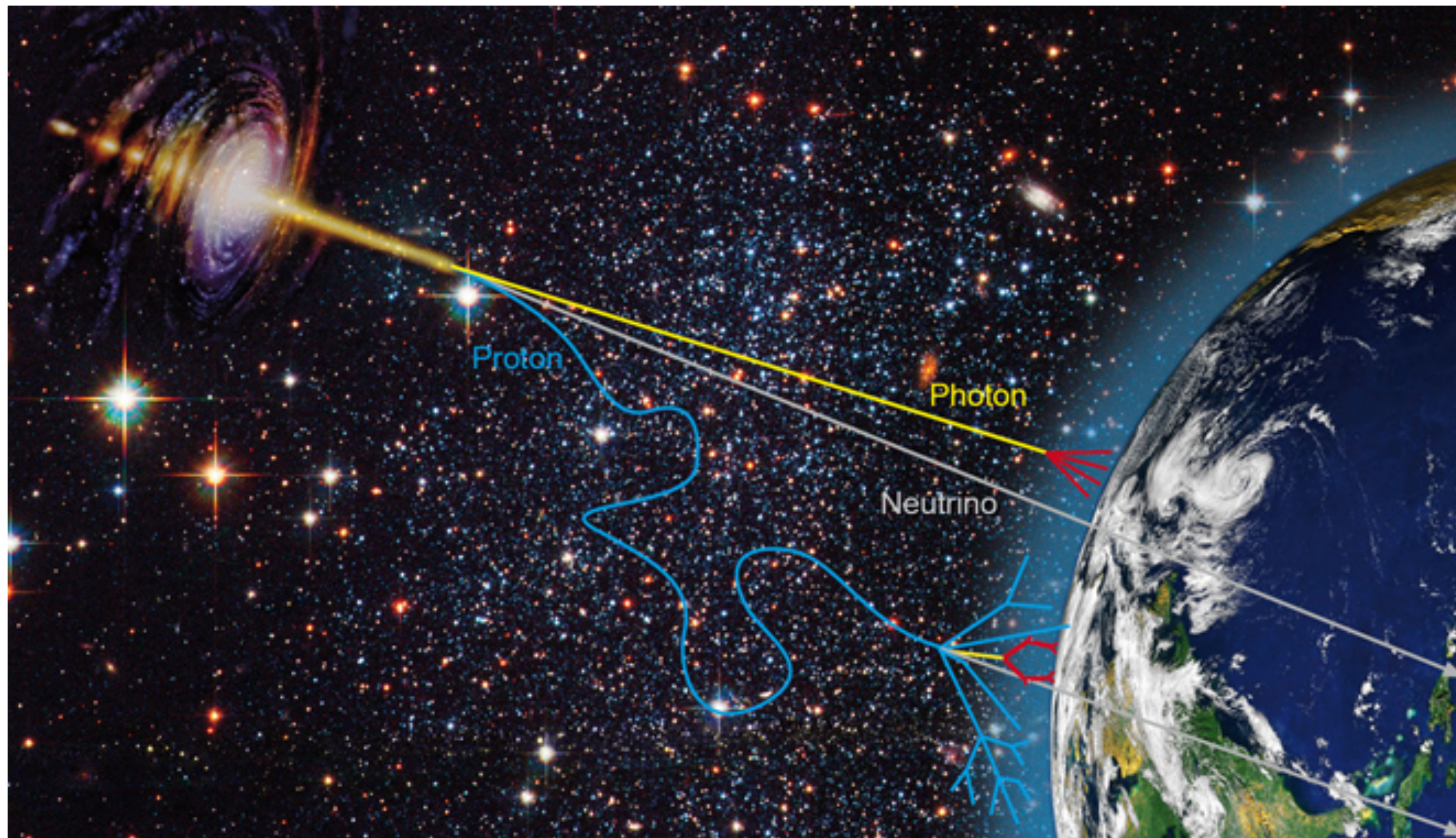
Astroteilchenphysik

Ballonflug V. Hess

- Forschungsgeschichte:
 - Entdeckung der **kosmischen Strahlung** (Hess, 1912): ionisierende Strahlung nimmt mit Höhe über Erdboden zu
 - **Teilchenphysik** mit kosmischer Strahlung (z. B. Positron 1932, Myon 1936, Strangeness 1947)
 - **Astronomie** und **Astrophysik**: Radioteleskope, Satelliten, ... (ab 1950er Jahre)
 - **Astroteilchenphysik** als eigener Forschungszweig (ab 1980er Jahre)



APS, Hessballon.jpg, gemeinfrei

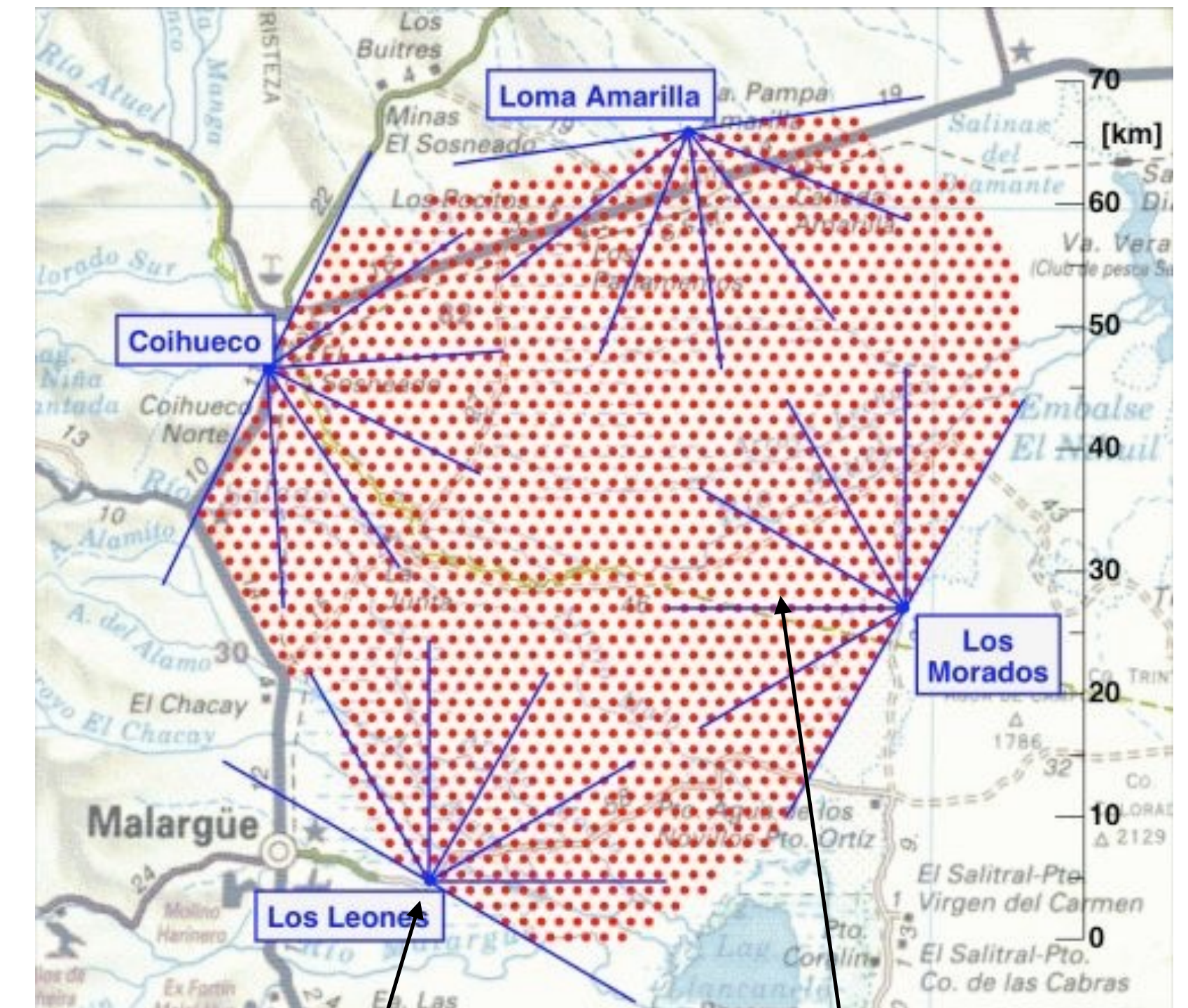


astro.desy.de

- Kosmische „Botenteilchen“:
Nachweis z. B. über:
 - Detektion **geladener kosmischer Strahlung**, direkt oder über Luftschauer
 - Teleskope für TeV-**Gammastrahlung**
 - **Neutrino**teleskope

Pierre-Auger-Observatorium

- Ziel: Detektion kosmischer Schauer mit Primärenergien $> 10^{20}$ eV
- Funktionsprinzip: **Hybriddetektor**
 - 1600 Wasser-**Cherenkov**-Detektoren (1,5 km Abstand) $\rightarrow$ 3000 km²
 - 4 Stationen mit Detektoren für **Fluoreszenzlicht** aus Luftschauder
- Standort: Malargüe (Argentinien)

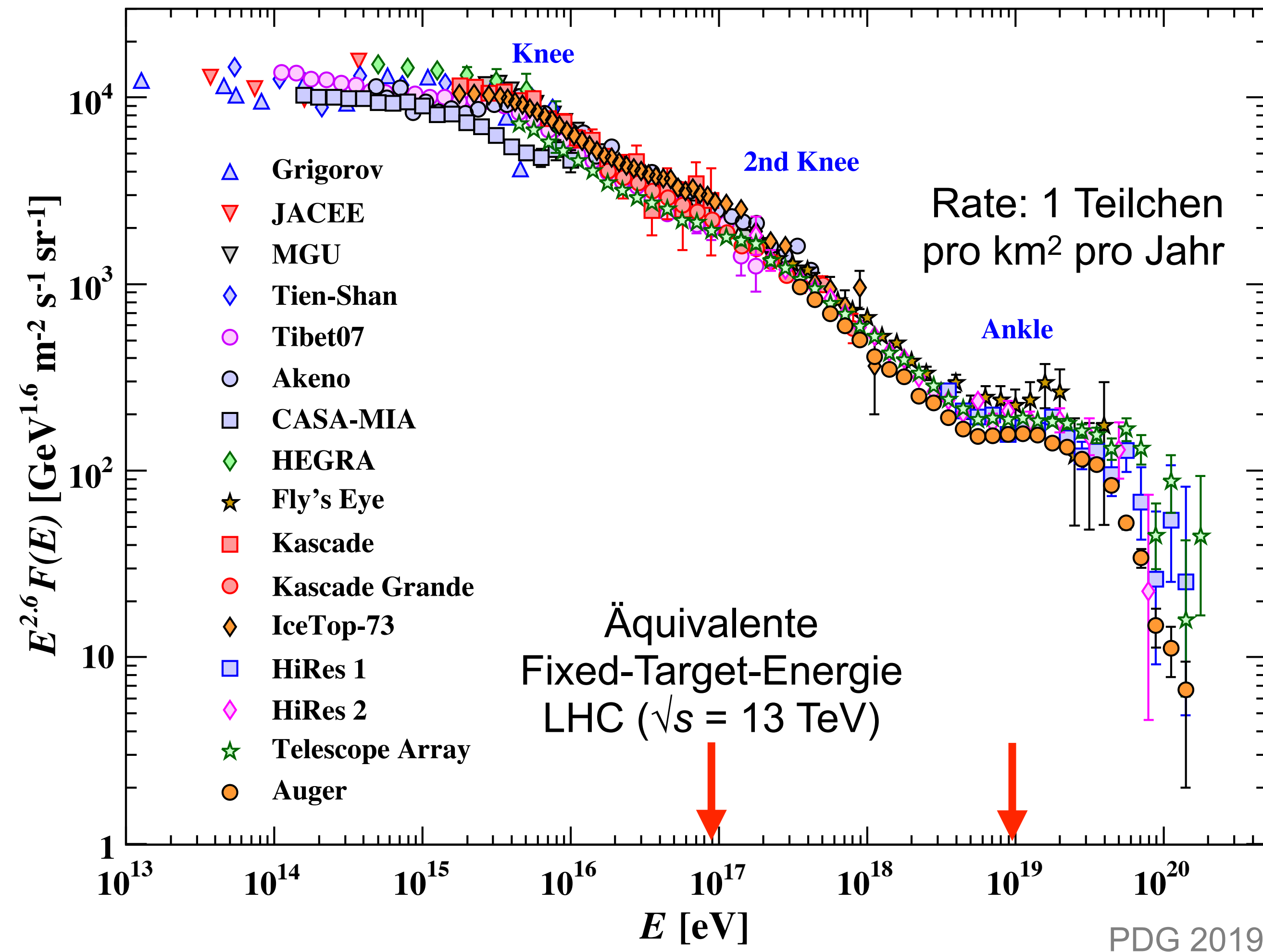


<https://www.auger.org>



Energiespektrum kosmischer Strahlung

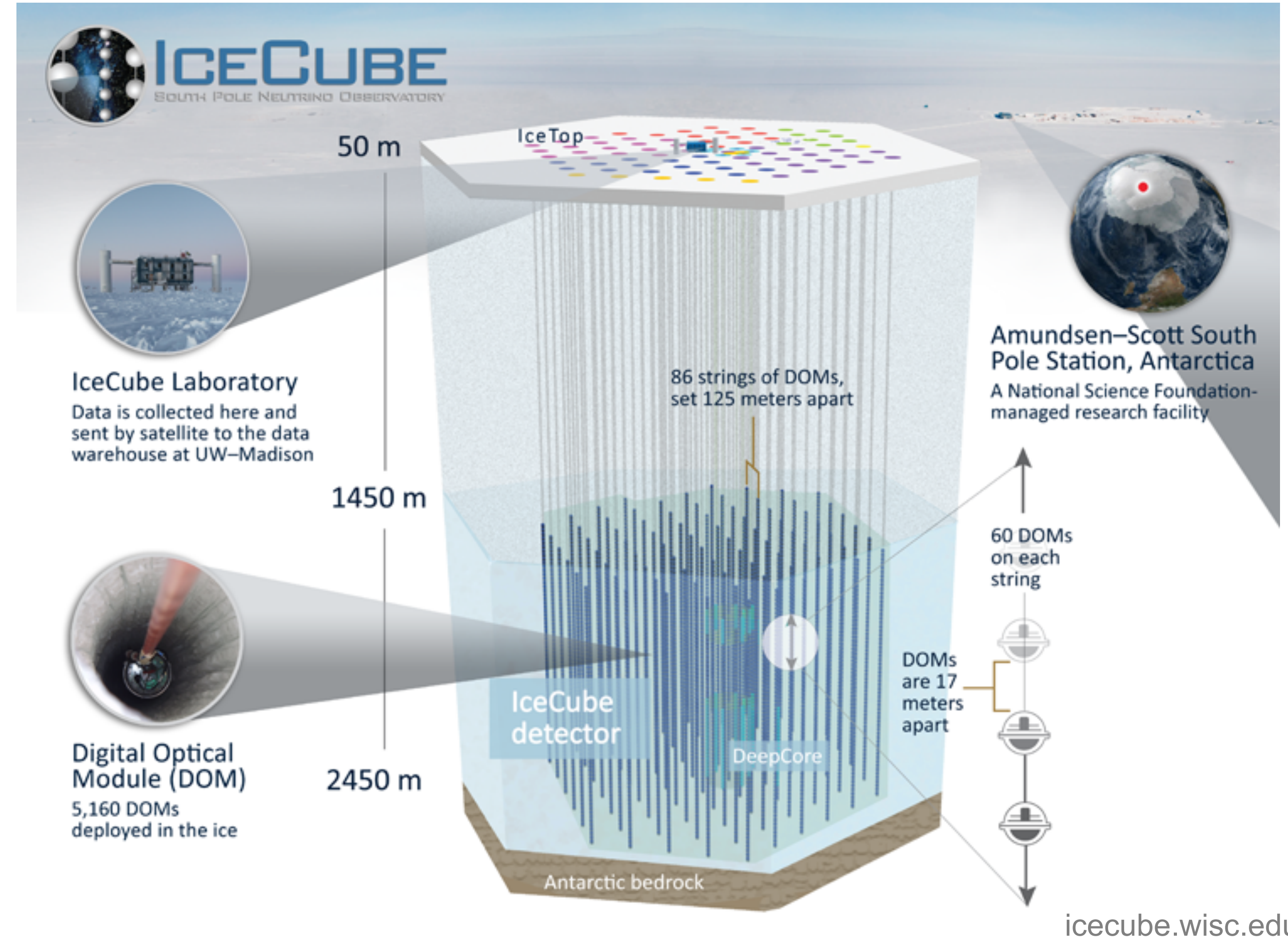
Fluss kosmischer Strahlung skaliert mit $E^{2.6}$



- Grund für **Potenzgesetz**
 $F(E) \sim E^{-\gamma}$? „Knie“ = Änderung des **spektralen Index γ** ?
- Änderung der **Elementzusammensetzung**?
- **Unterdrückung** kosmischer Strahlung bei **höchsten Energien**?
- **Punktquellen?** (Kandidaten: Pulsare, aktive Galaxienkerne, schwarze Löcher)

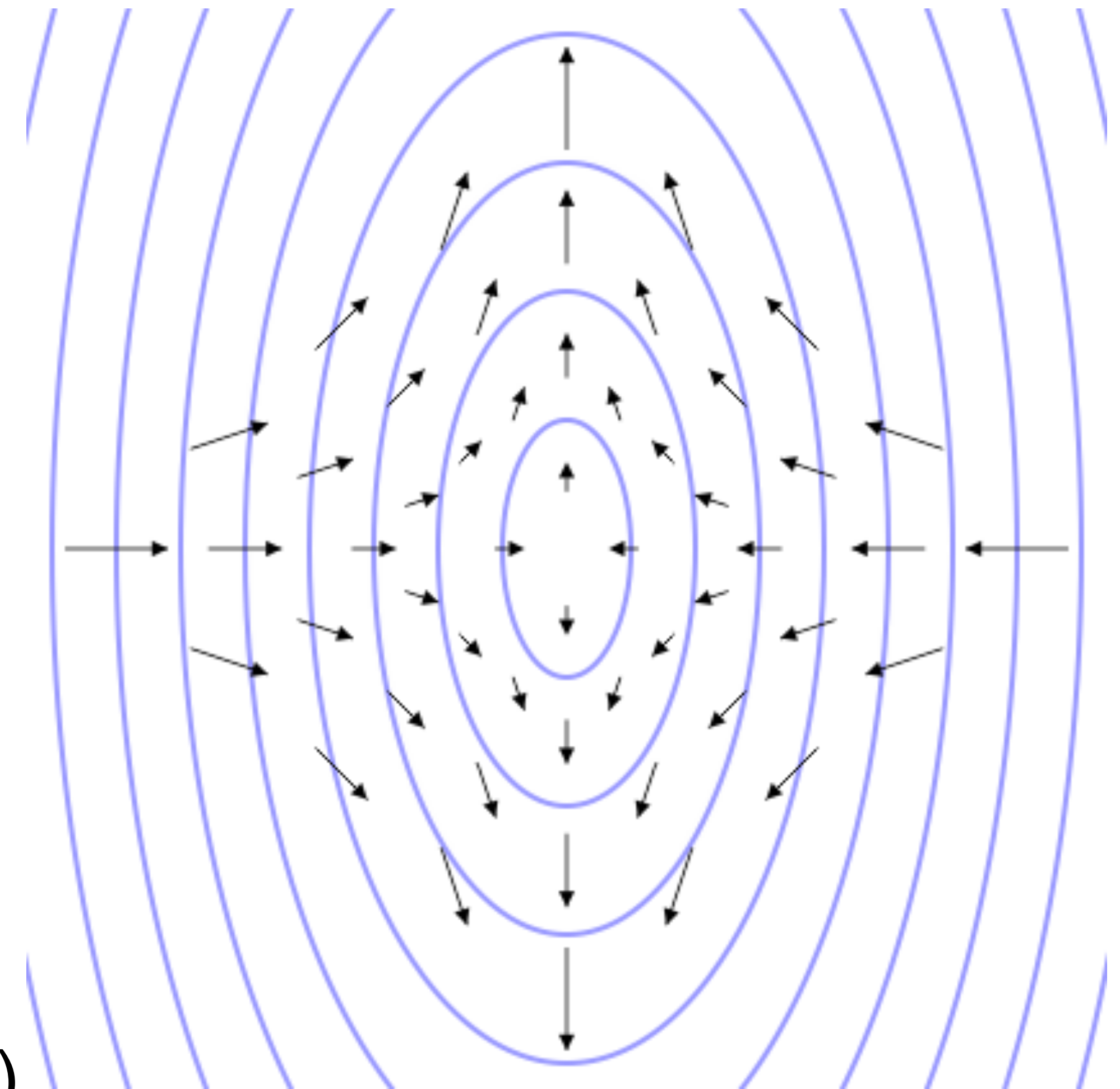
Kosmische Neutrinos: IceCube

- Ziel: Suche nach Quellen kosmischer Neutrinos bis zu PeV-Energien
- Funktionsprinzip: **Cherenkov-Detektor** (Medium: 1 km³ Eis)
- Standort: Südpol



Gravitationswellen

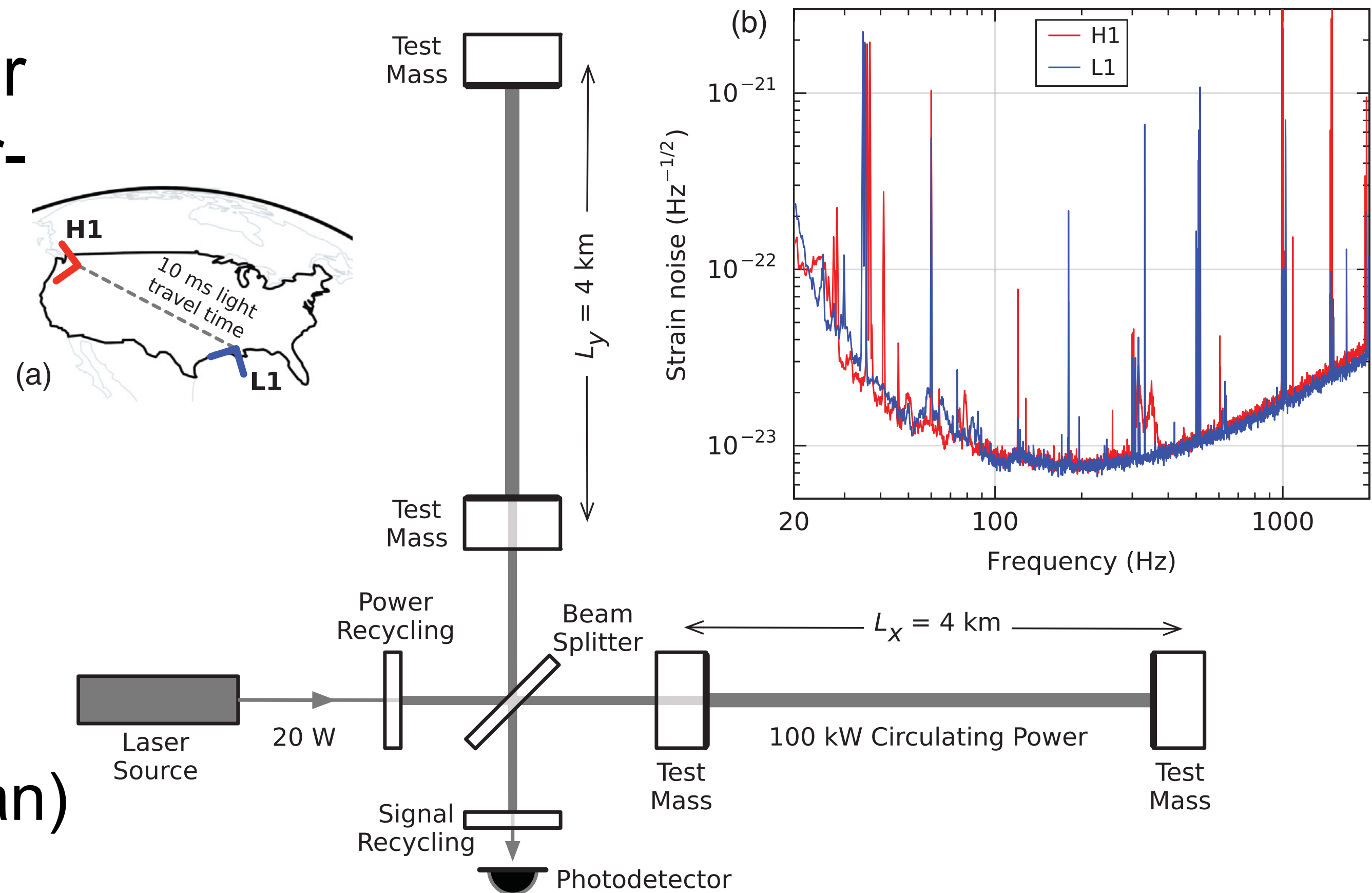
- Gleichungen der **Allgemeinen Relativitätstheorie** gelöst durch Wellen für zeitliche Änderung des Massen-Quadrupolmoments (Einstein 1916)
- Erster indirekter Nachweis: Doppelsternsystem mit Pulsar PSR B1913+16 (Hulse, Taylor, 1974)
→ **Energieverlust des Pulsars**
(Pulsar = schnell rotierender Neutronenstern)



Raoul NK, [Quadrupol_Wave.gif](#), CC BY-SA 3.0

Advanced LIGO

- Direkter Nachweis: **Michelson-Interferometer** → Differenz der Deformation der Interferometerarme: $\Delta L/L < 10^{-21}$
- Aktueller Gravitationswellendetektoren:
 - **LIGO**: 4 km Armlänge (Hanford, Livingston, USA)
 - **Virgo**: 3 km (Cascina, Italien)
 - **KAGRA**: 3 km (Kamioka, Japan)
 - Kombination: Richtungsinformation

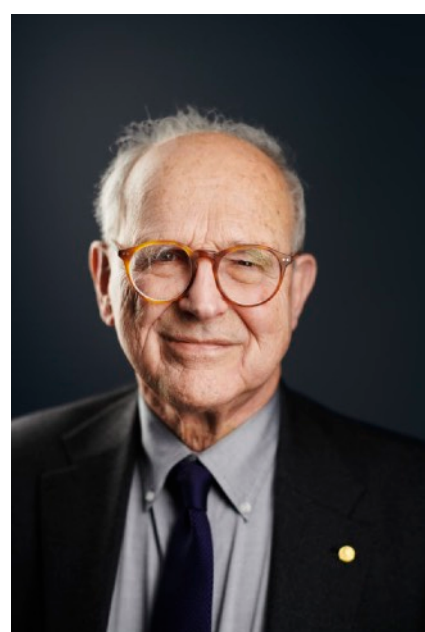


PRL 116 (2016) 061102

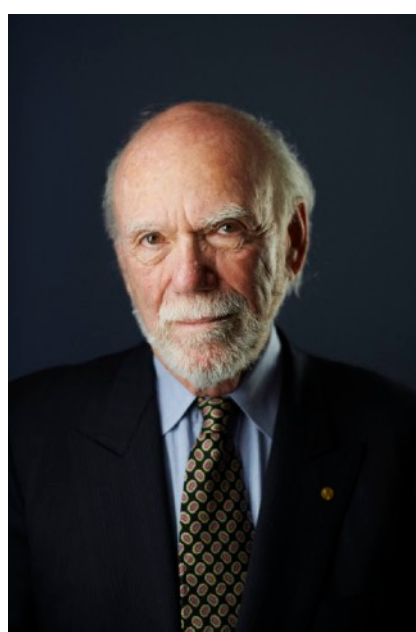
GW150914

- 11. Februar 2016: erster **direkter Nachweis** von Gravitationswellen (GW150914)
- Interpretation: **Verschmelzung zweier schwarzer Löcher** (36 und 29 Sonnenmassen)
- Bisher insgesamt >10 „sichere“ GW-Beobachtungen

R. Weiss



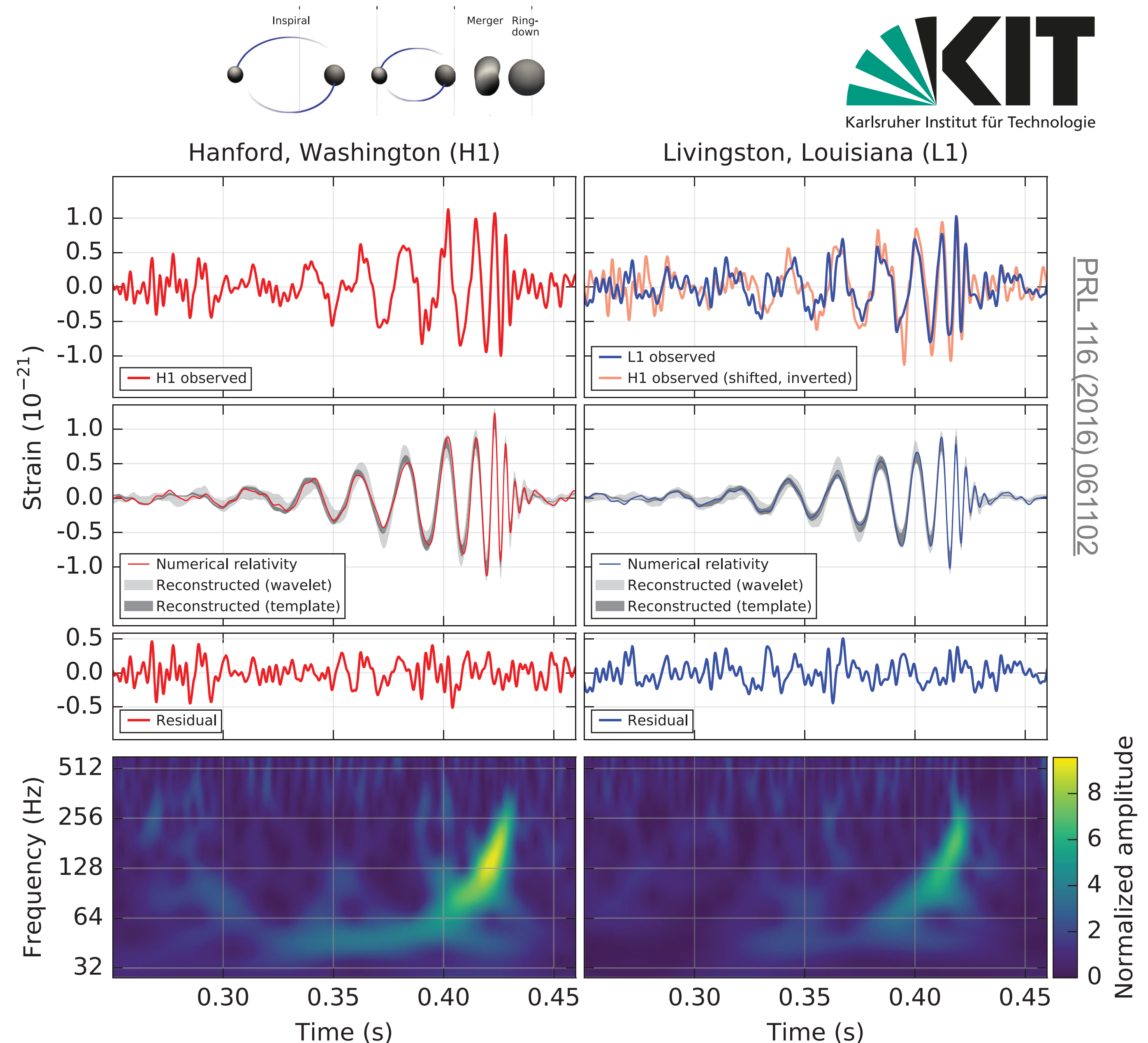
B. C. Barish



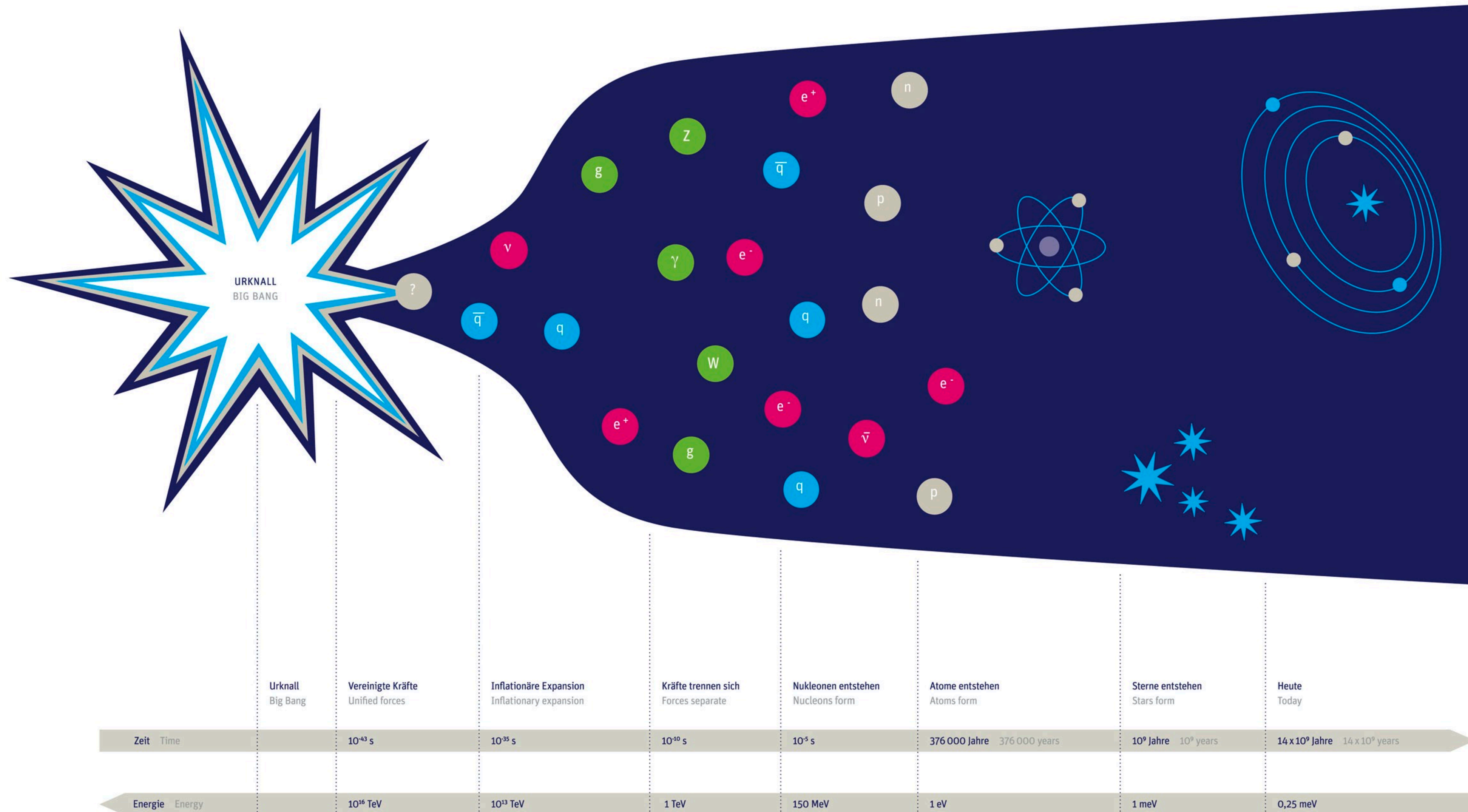
K. S. Thorne



nobelprize.org

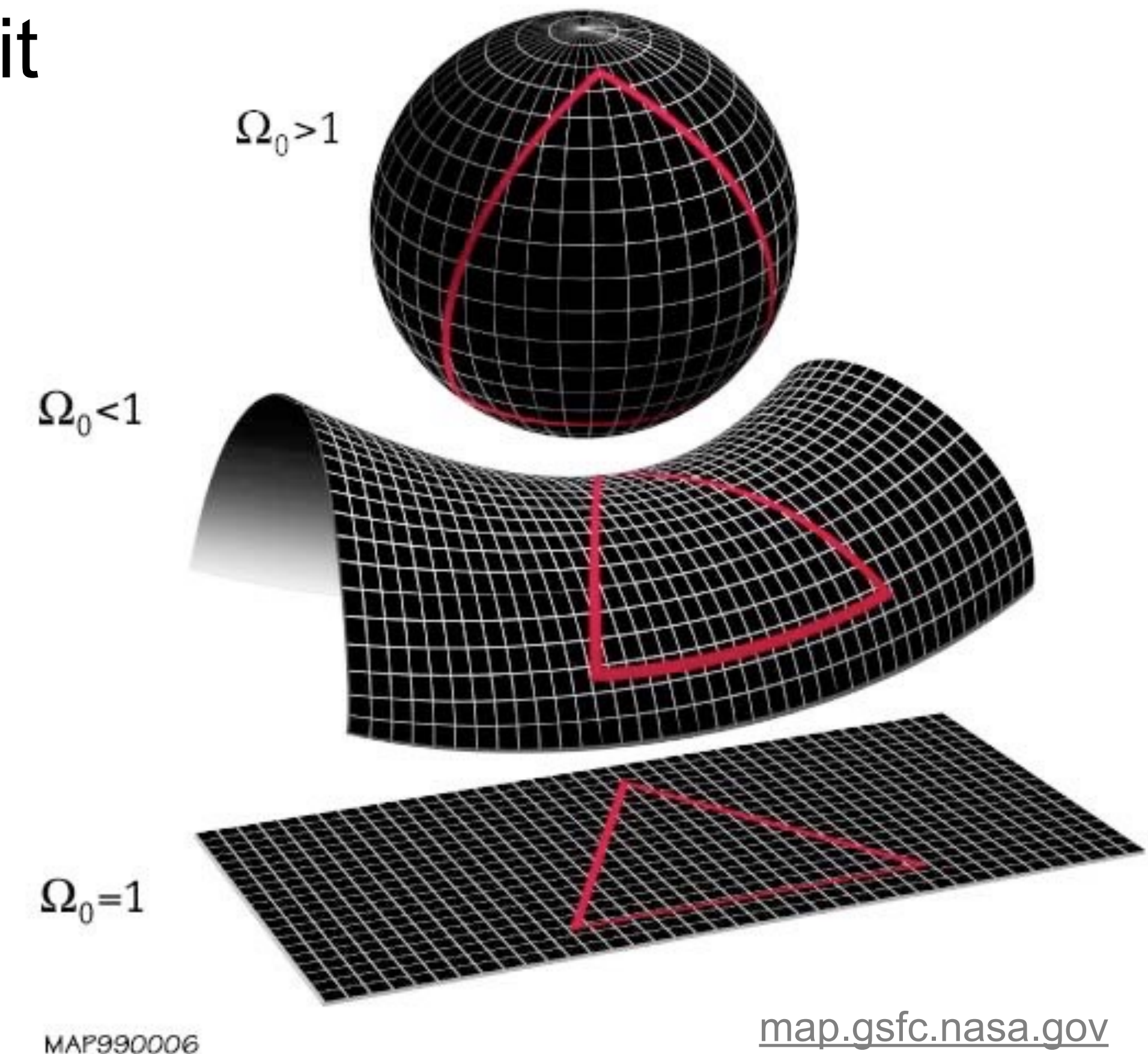


Entwicklung des Universums



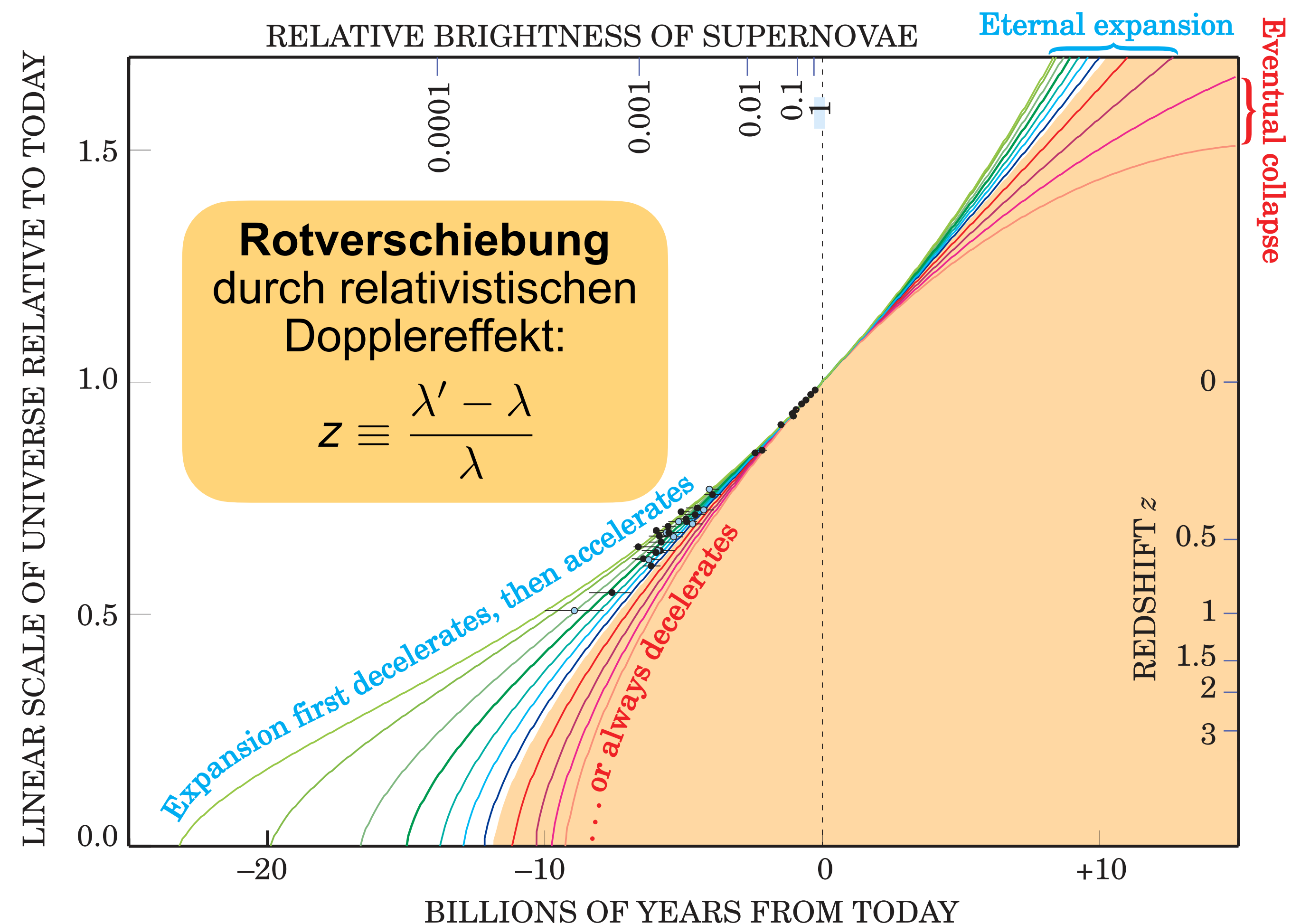
Grundlagen der Kosmologie

- **Allgemeine Relativitätstheorie** (ART, Einstein, 1915)
= **geometrische** Feldtheorie: alle Formen von Energie führen zu **Verformung** der Raumzeit
→ **Gravitationskraft**
- **Kosmologisches Prinzip**: auf größten Längenskalen ist Universum **homogen** und **isotrop** (→ Friedmann-Gleichungen)
- Mögliche **Geometrie** der Raumzeit:
 - Sphärisch: Big Bang und Big Crunch
 - Hyperbolisch: asymptotische Expansion
 - Flach: beschleunigte Expansion



Expandierendes Universum

- Beobachtung weit entfernter **Supernovae**:
(Perlmutter; Riess, Schmidt, 1998)
- Messgrößen:
Helligkeit (→ Alter)
vs. Rotverschiebung (→ Größe)
- Daten kompatibel mit beschleunigt **expandierendem** Universum



S. Perlmutter, Physics Today, April 2003

S. Perlmutter



A. G. Riess



B. P. Schmidt



NobelPrize.org

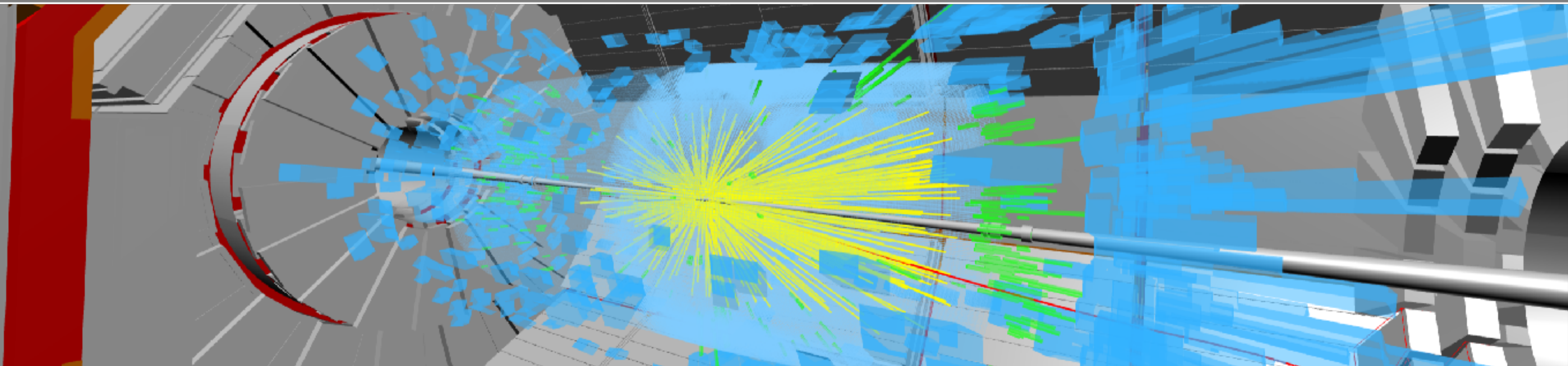
- **Astroteilchenphysik:** Verbindung von Astrophysik und Teilchenphysik
 - Physikalische Fragestellung: **Quellen** und **Beschleunigungsmechanismen** kosmischer Strahlung
 - Experimente mit kosmischen **Photonen, Neutrinos, Atomkernen**
→ Beispiele: AUGER, IceCube
 - Seit 2015: erste Signale in Experimenten mit **Gravitationswellen**
→ Beispiele: LIGO, Virgo, KAGRA
- **Kosmologie** und Entwicklung des Universums
 - Expandierendes Universum → dunkle Energie, flache Raumzeit

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2019 – 19. Vorlesung (Teil 3)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



Kurze Wiederholung

- **Astroteilchenphysik:** Verbindung von Astrophysik und Teilchenphysik
 - Experimente mit kosmischen **Photonen, Neutrinos, Atomkernen**
→ Beispiele: Pierre Auger Observatory, IceCube
 - Seit 2015: erste Signale in Experimenten mit **Gravitationswellen**
→ Beispiele: LIGO, Virgo, KAGRA
- Physikalische Fragestellung: **Quellen und Beschleunigungsmechanismen** kosmischer Strahlung
 - Kandidaten: Pulsare, aktive Galaxienkerne
 - Suche nach Punktquellen
- **Kosmologie** und Entwicklung des Universums
 - Expandierendes Universum → flache Raumzeit

Evidenz für dunkle Materie

- **Fehlende Masse** im Universum:
 - Bahngeschwindigkeit von Galaxien im Coma-Cluster (Zwicky 1932)
→ Name: **dunkle Materie (DM)**
 - **Rotationskurven** von Galaxien (Rubin 1970) → **DM-Halo**
- DM als **Gravitationslinse** („Lensing“)
- **Körnigkeit** größter Strukturen im Universum → **nicht-relativistische DM** (cold dark matter, CDM)

F. Zwicky

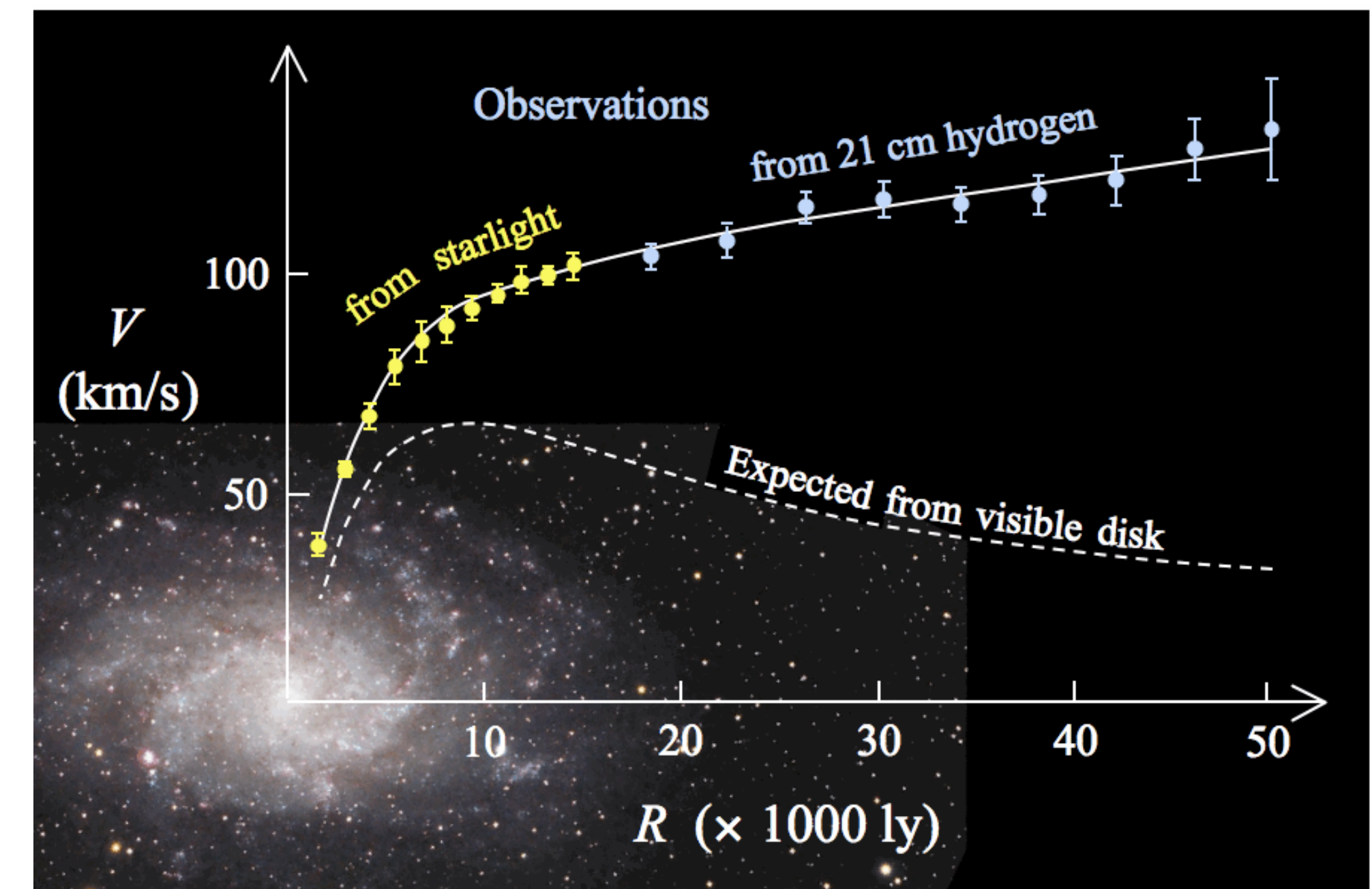


www.zwicky-stiftung.ch

V. Rubin



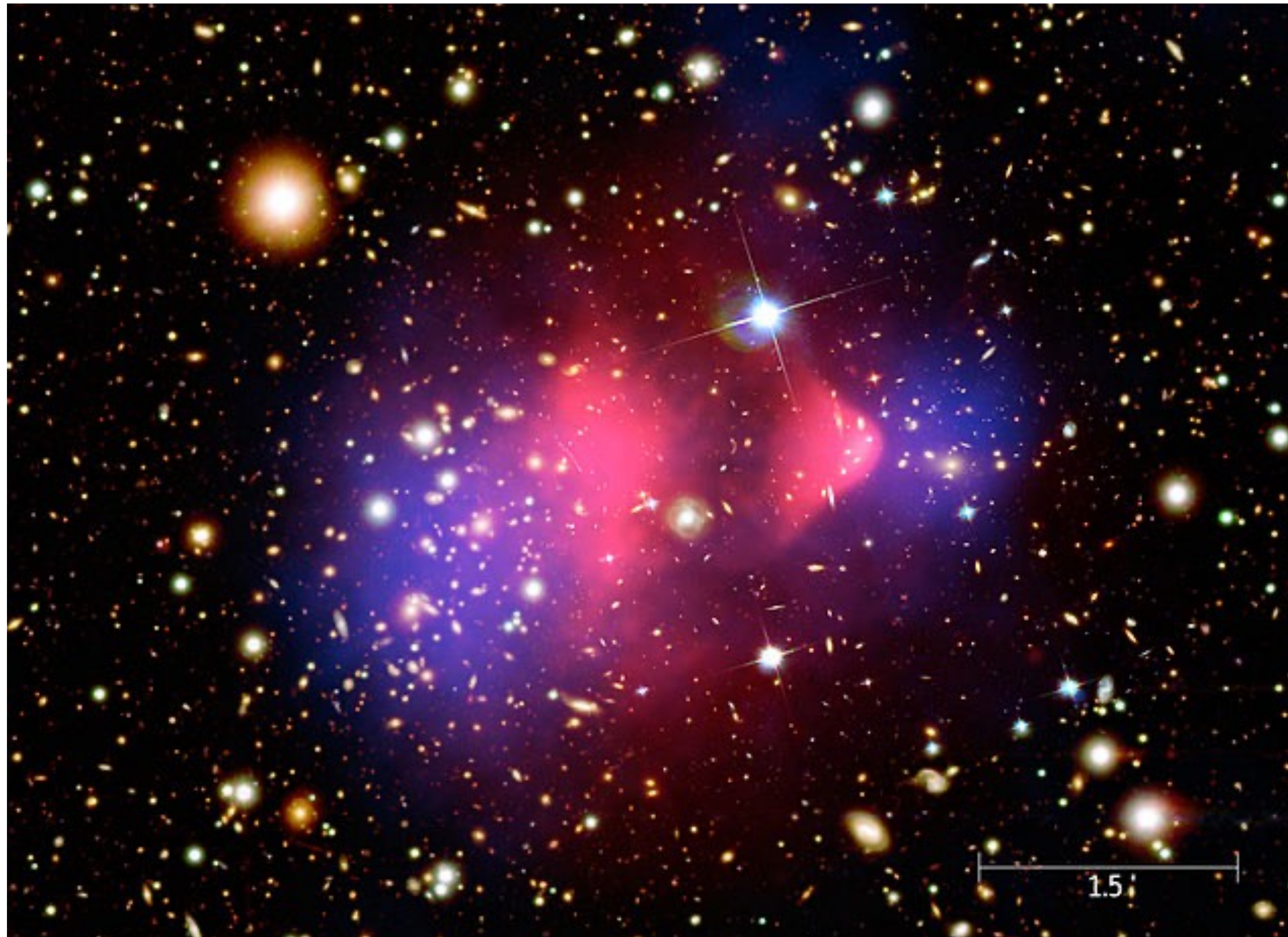
www.aip.org



Stefania.deluca, M33 rotation curve_H1.gif, gemeinfrei

Evidenz für dunkle Materie

Bullet-Cluster: Optisches Bild + Massenbestimmung
(blau, aus Gravitationslinseneffekt) + Röntgenemission (pink)



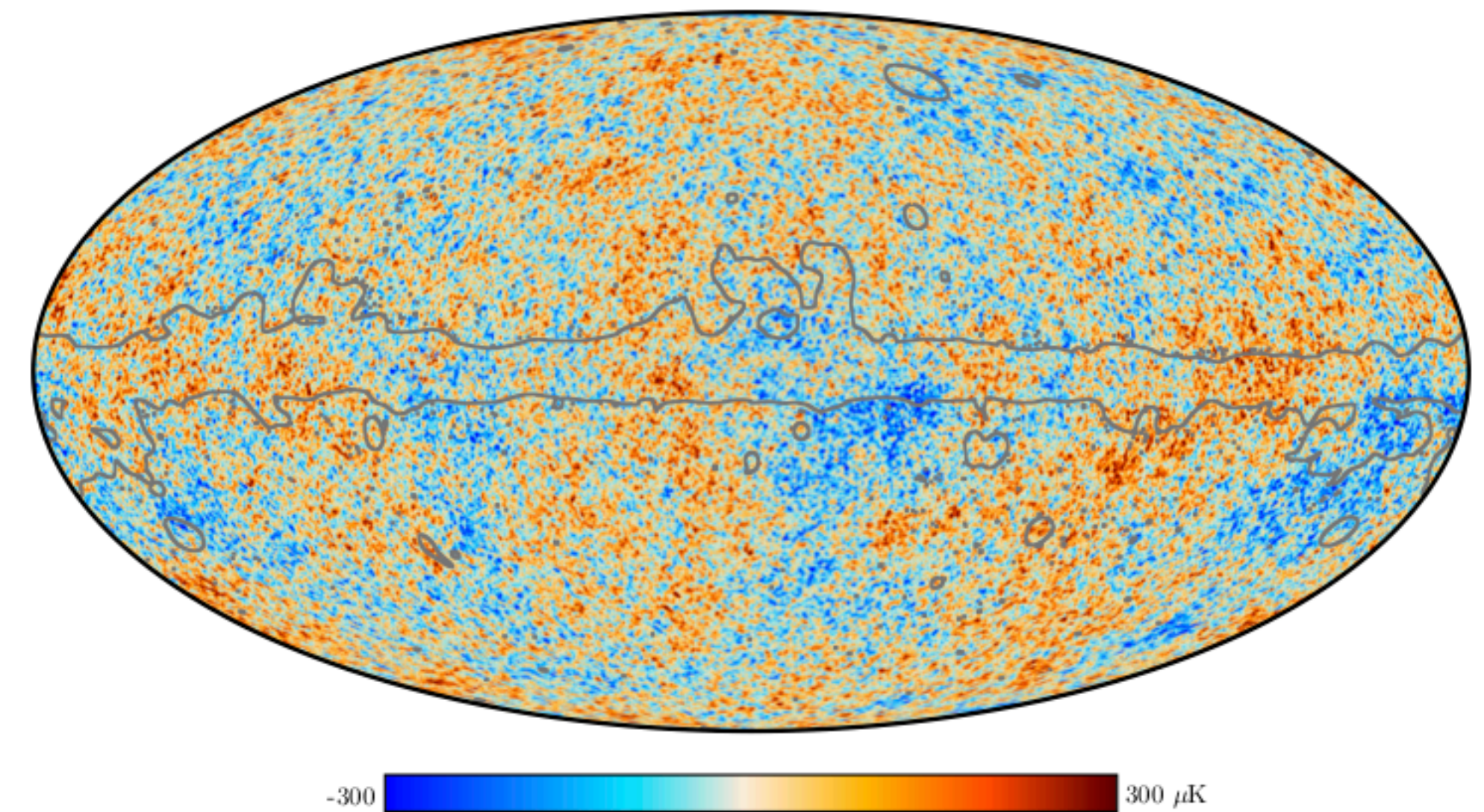
NASA, 1e0657_scale.jpg, gemeinfrei

- **Kollisionen** von Galaxienhaufen:
 - **Gesamtmasse** aus Lensing
→ benötigt dunkle Materie
 - **Baryonische** Materie:
Gaswolken stoßen aneinander
→ Röntgenemission
 - **Dunkle** Materie durchdringt sich (fast) ohne Stöße
→ höchstens **schwache** Wechselwirkung

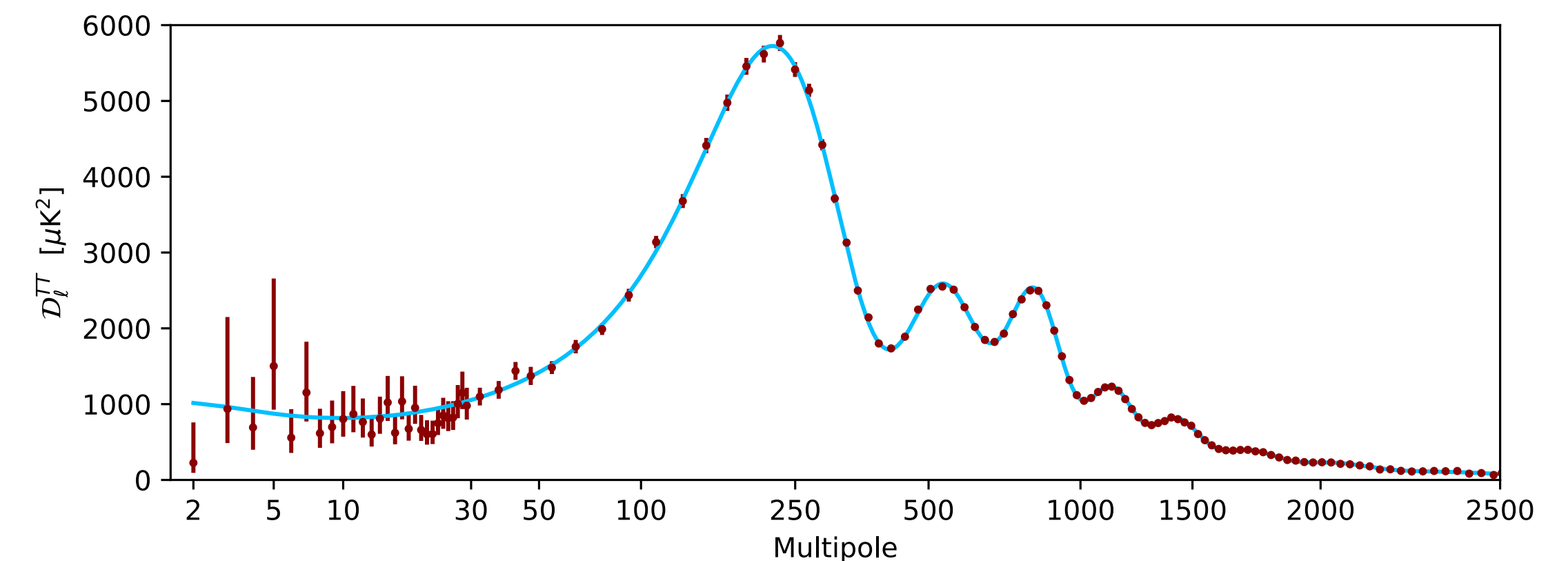
Kosmischer Mikrowellenhintergrund

(engl.: cosmic microwave background, CMB)

- Schwarzkörperstrahlung aus Universum (ca. 2,73 K) (Penzias, Wilson, 1965):
- Entstehung: **Entkopplung der Photonen** aus thermischem Gleichgewicht, ca. 380.000 Jahre nach Urknall
- Temperaturschwankung $O(100 \mu\text{K})$: „Fingerabdruck“ der **Dichteschwankungen** im frühen Universum (z. B. Planck-Satellit) → kosmologische Modelle



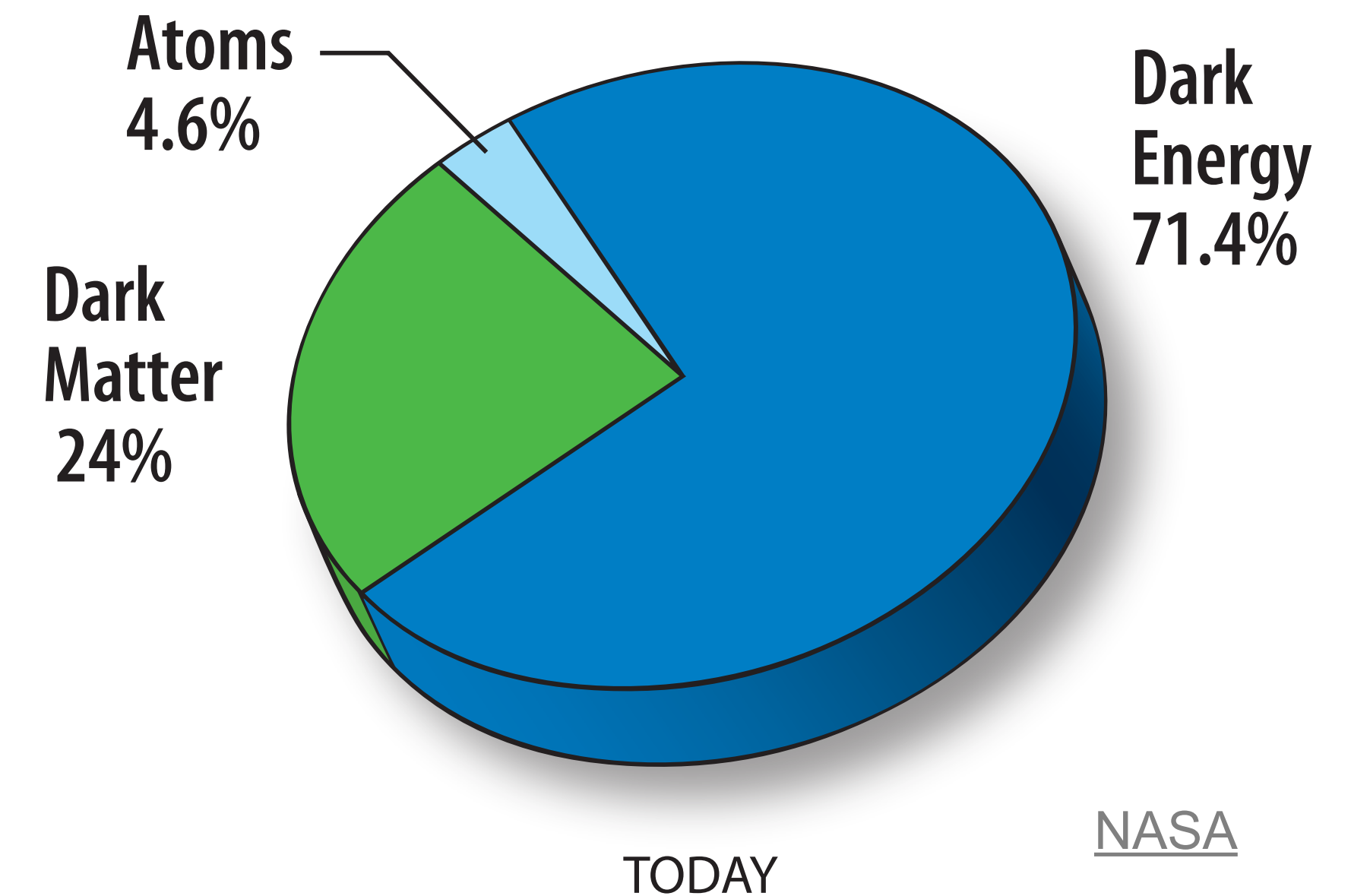
Multipolentwicklung Strahlungsleistung



<https://www.cosmos.esa.int/web/planck/picture-gallery>

Λ CDM-Kosmologie

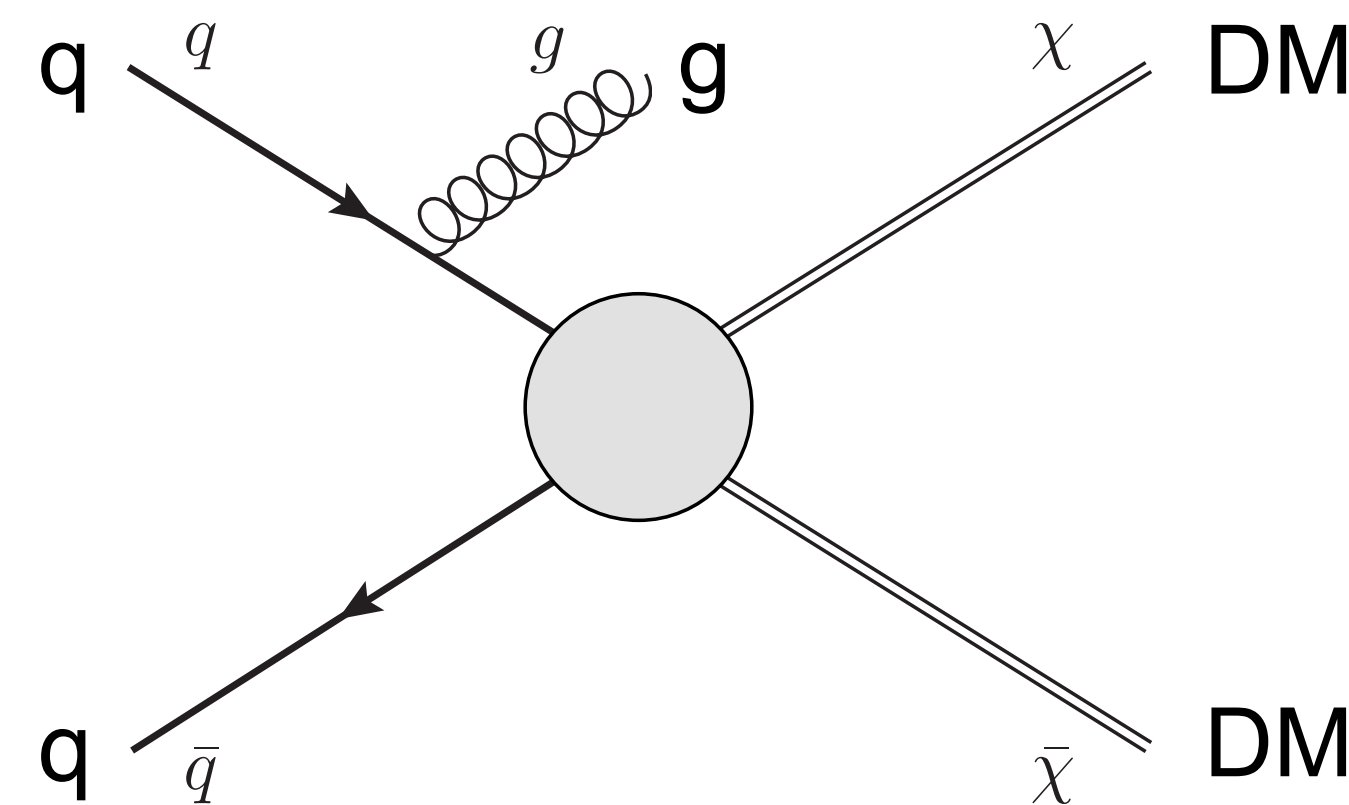
- Standardmodell der Kosmologie: **Λ CDM**
 - Zutaten: ART, kosmische Inflation, kalte dunkle Materie (CDM), dunkle Energie (symbolisiert durch kosmologische Konstante Λ)
 - Mit allen derzeitigen kosmologischen Daten verträglich (Spannungen im Detail)
- Standardmodell der Teilchenphysik: **keine Kandidaten** für dunkle Materie und dunkle Energie → SUSY-WIMP? Andere Kandidaten?



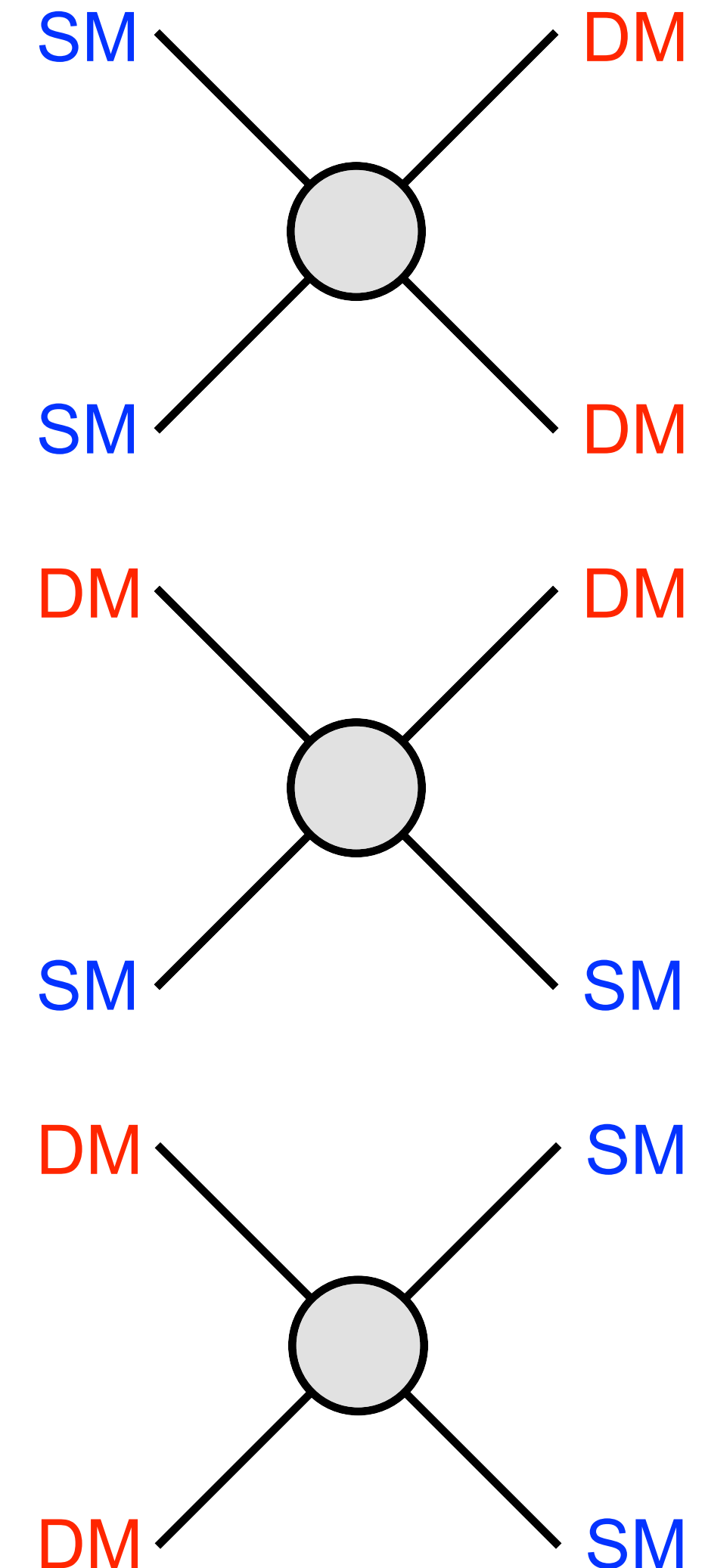
Suche nach Dunkler Materie

- Drei Suchstrategien: **make it – shake it – break it**
- **Paarproduktion** in Kollisionen von Standardmodell-Teilchen
→ Nachweis: **Rückstoß** und **fehlender Transversalimpuls**

Beispiel: Monojet-Signatur

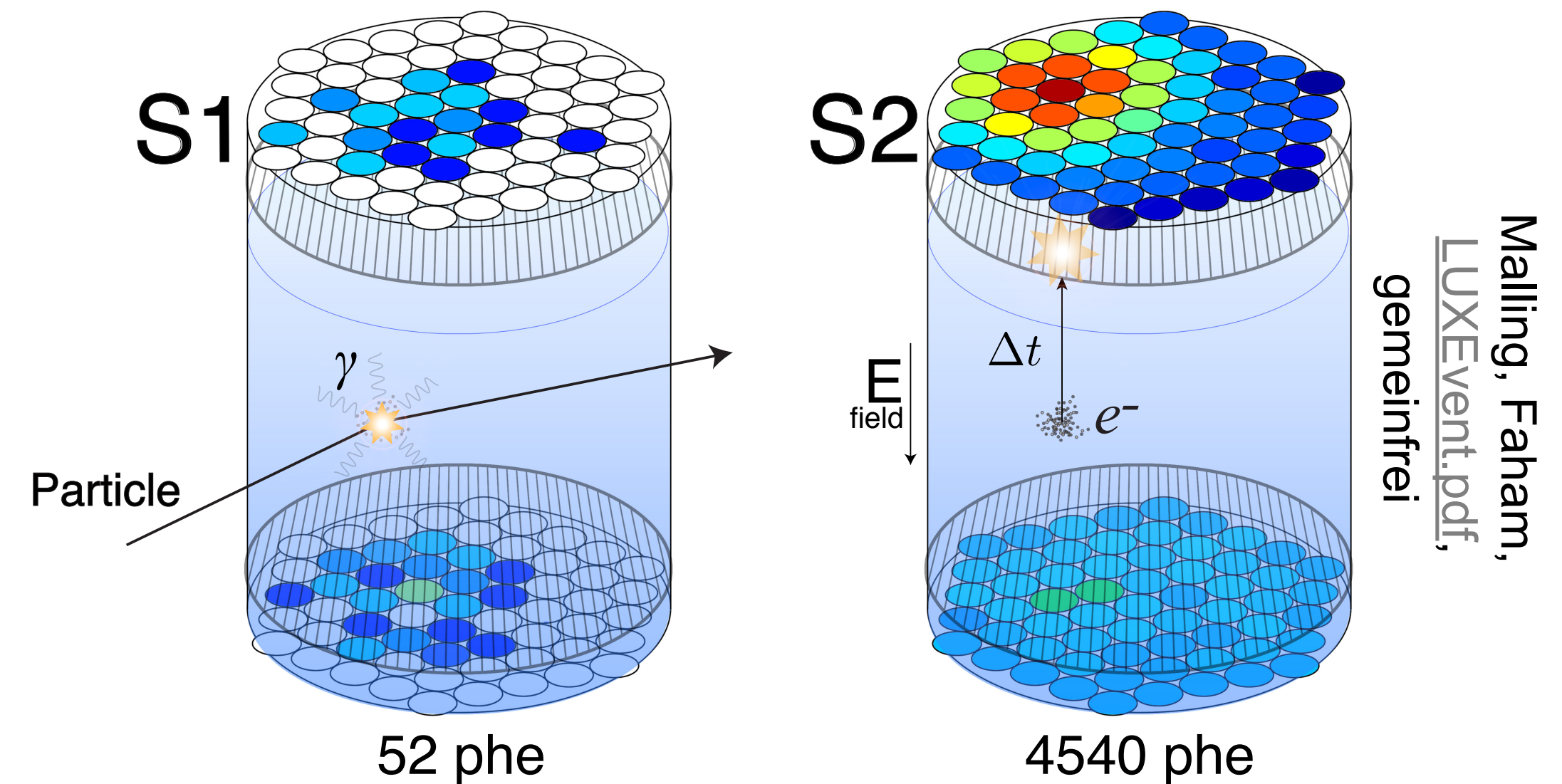


- **Streuung** an SM-Teilchen → Nachweis durch **Rückstoß**
- **Annihilation** der DM-Teilchen im Universum
→ Nachweis der resultierenden SM-Teilchen



Suche nach Dunkler Materie

- **Direkter Nachweis:**
 - **Streuung** an Kernen: Wärme, Szintillation, Ionisation
 - Derzeit führend: Zweiphasen-Zeitprojektionskammer mit **flüssigem Xenon** (XENON, LUX)



- **Indirekter Nachweis:**
 - Annihilationsprodukte aus **DM-Paarvernichtung**
→ Überschuss von Antiteilchen
 - Diverse Teilchendetektoren, z. B. AMS-02 auf der ISS



Kurze Zusammenfassung

- Astrophysikalische Evidenz für **kalte dunkle Materie**:
 - Rotationskurven von Galaxien
 - Größte Strukturen im Universum
 - Gravitationslinseneffekt
 - Kollisionen von Galaxienhaufen
- Standardmodell der Kosmologie: **Λ CDM**
 - Allgemeine Relativitätstheorie + Inflation $\rightarrow$ flaches Universum
 - Kalte dunkle Materie und dunkle Energie
- Suche nach **dunkler Materie**: bisher kein signifikantes Signal
 - Direkt durch **Kernrückstoß in Streuung** und in **Collider-Experimenten**
 - Indirekt durch Nachweis der **Annihilationsprodukte**

Kapitel 10

Zusammenfassung und Ausblick

Kern- und Teilchenphysik

- **Experimentelle Methoden:**
 - Teilchendetektoren
 - Teilchenbeschleuniger
- **Struktur der Materie:**
 - **Streuexperimente:** vom Rutherford-Experiment zum LHC
 - **Fundamentale Bausteine** der Natur:
Atome → Kerne → Nukleonen → Quarks und Leptonen
- Grundlagen der **Kernphysik:**
 - **Radioaktivität:** Alpha-, Beta- und Gammazerfall
 - **Anwendungen:** Entstehung der Elemente im Universum, Energieerzeugung, ...

Kern- und Teilchenphysik

- **Symmetrien und Erhaltungssätze:**
 - **Eichsymmetrien** → Wechselwirkungen
 - **Diskrete Symmetrien** C, P, T und ihre Verletzung in der Natur
 - **Quantenzahlen** der Elementarteilchen
- **Fundamentale Wechselwirkungen:**
 - **QCD:** Theorie der starken Wechselwirkung
 - **Elektroschwache Wechselwirkung:** vereinheitlichte Theorie der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung
- **Moderne Teilchenphysik:**
 - Teilchenphysik bei höchsten Energien am Collider: LHC, LEP, B-Fabriken, ...
 - Neutrino-physik mit und ohne Beschleuniger
- **Querverbindungen** zu Astroteilchenphysik und Kosmologie

Experimentelle Teilchenphysik am KIT

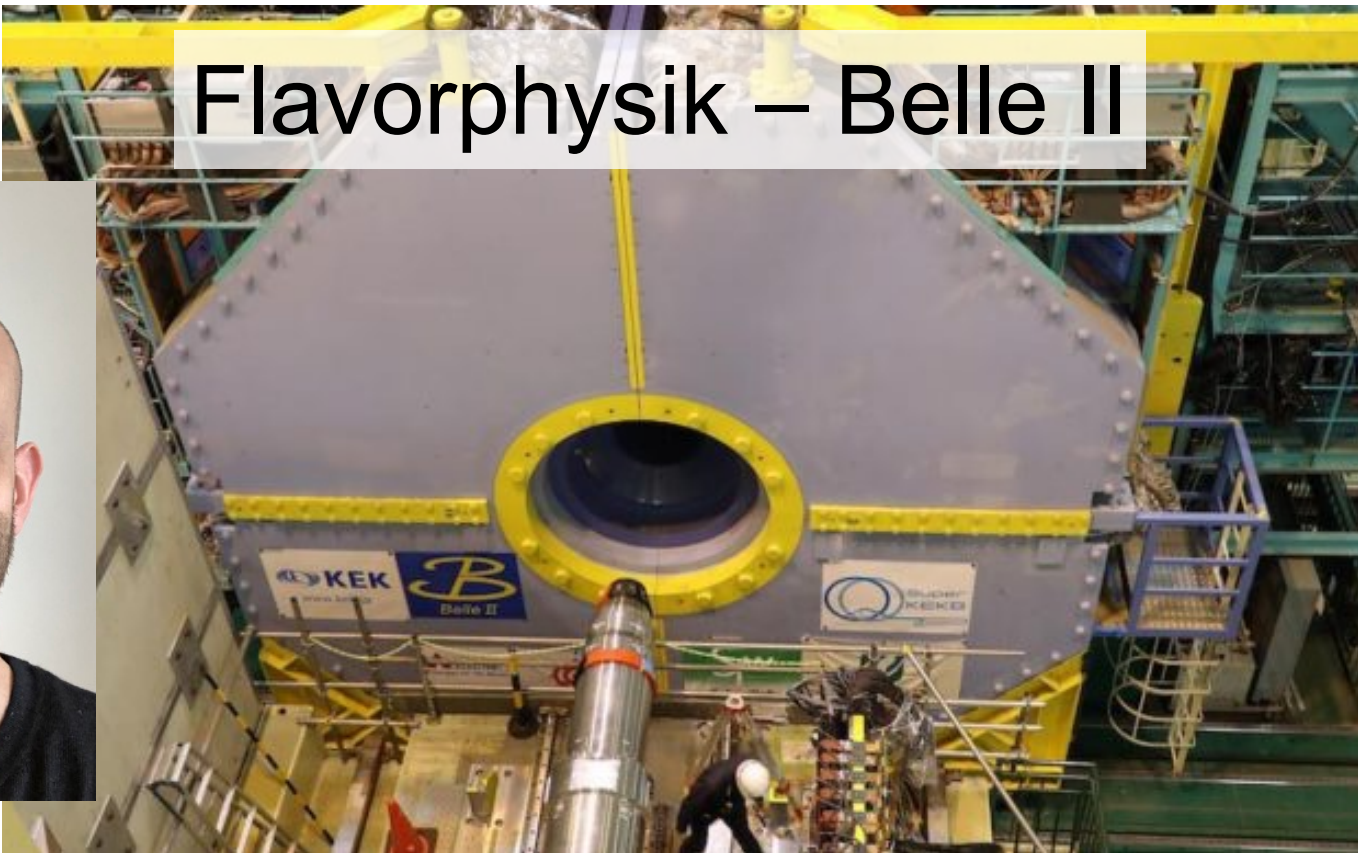


Hadron-Collider – CMS



ETP

CERN



Flavorphysik – Belle II



Neutrinomasse – KATRIN

KIT



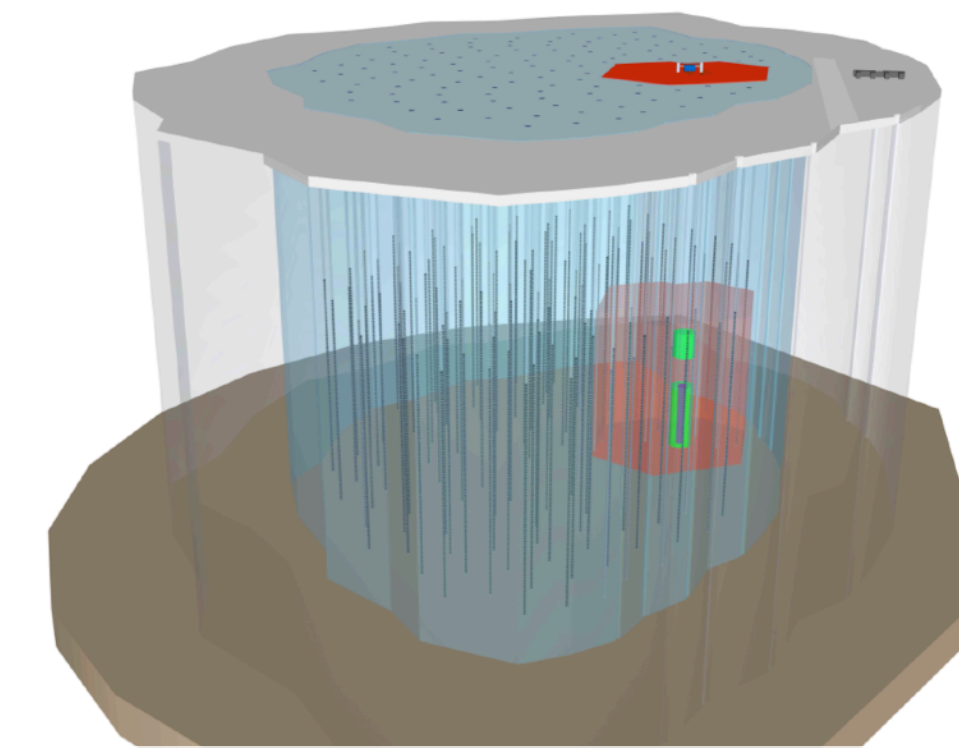
A



A

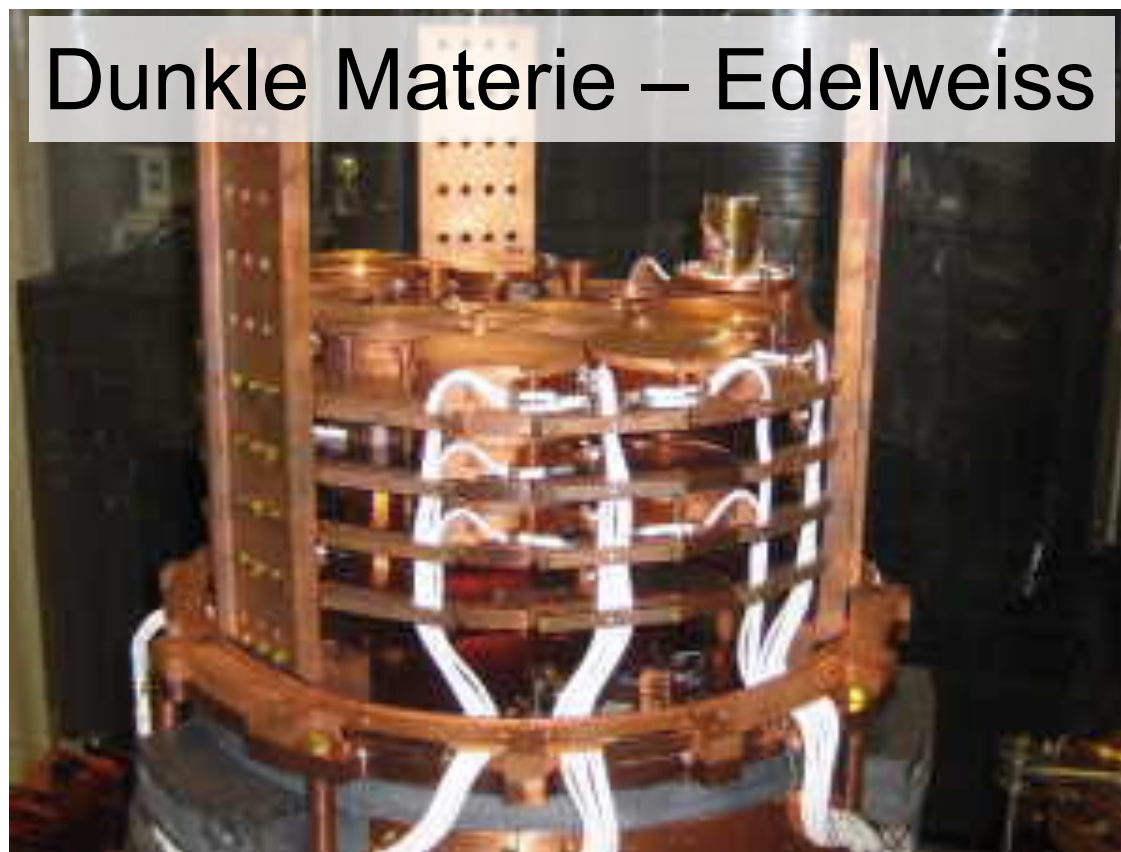
Astroteilchenphysik am KIT

Kosmische Strahlung –
Auger-Observatorium, Tunka-Rex

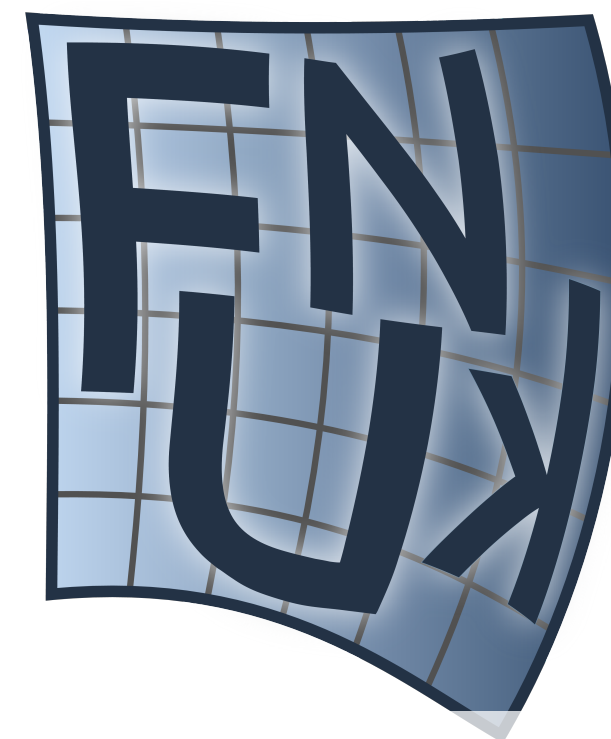


Kosmische Neutrinos –
IceCube-Gen2

Dunkle Materie – Edelweiss

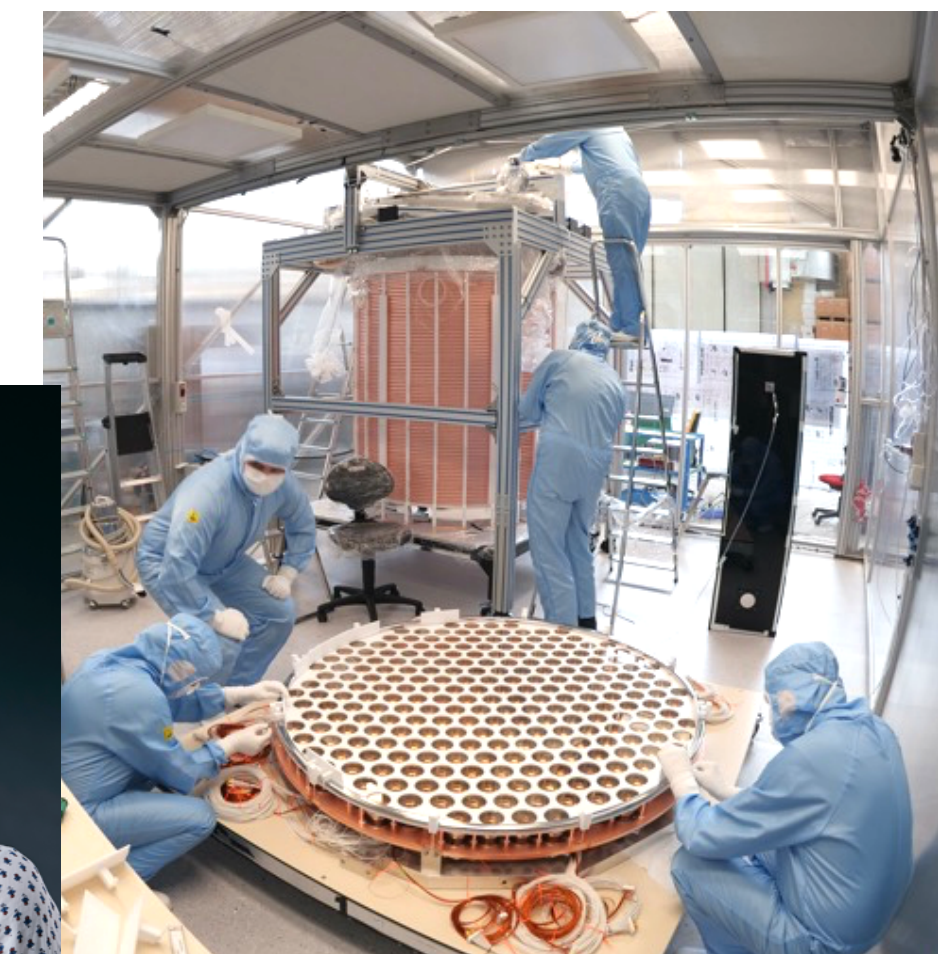


ETP
IKP



Dunkle Photonen – FUNK

Dunkle Materie – XENON/DARWIN



Ende.