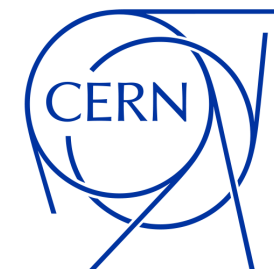


Ask the expert - Future Colliders

Jenny List (DESY/CERN)
Netzwerk Teilchenphysik
8. Dezember 2022

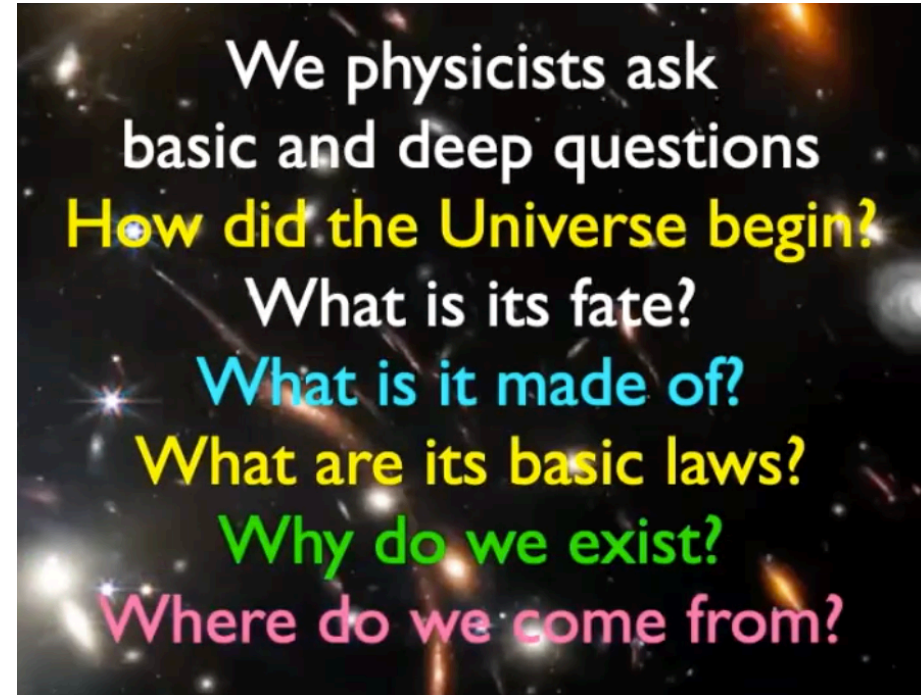


Gliederung

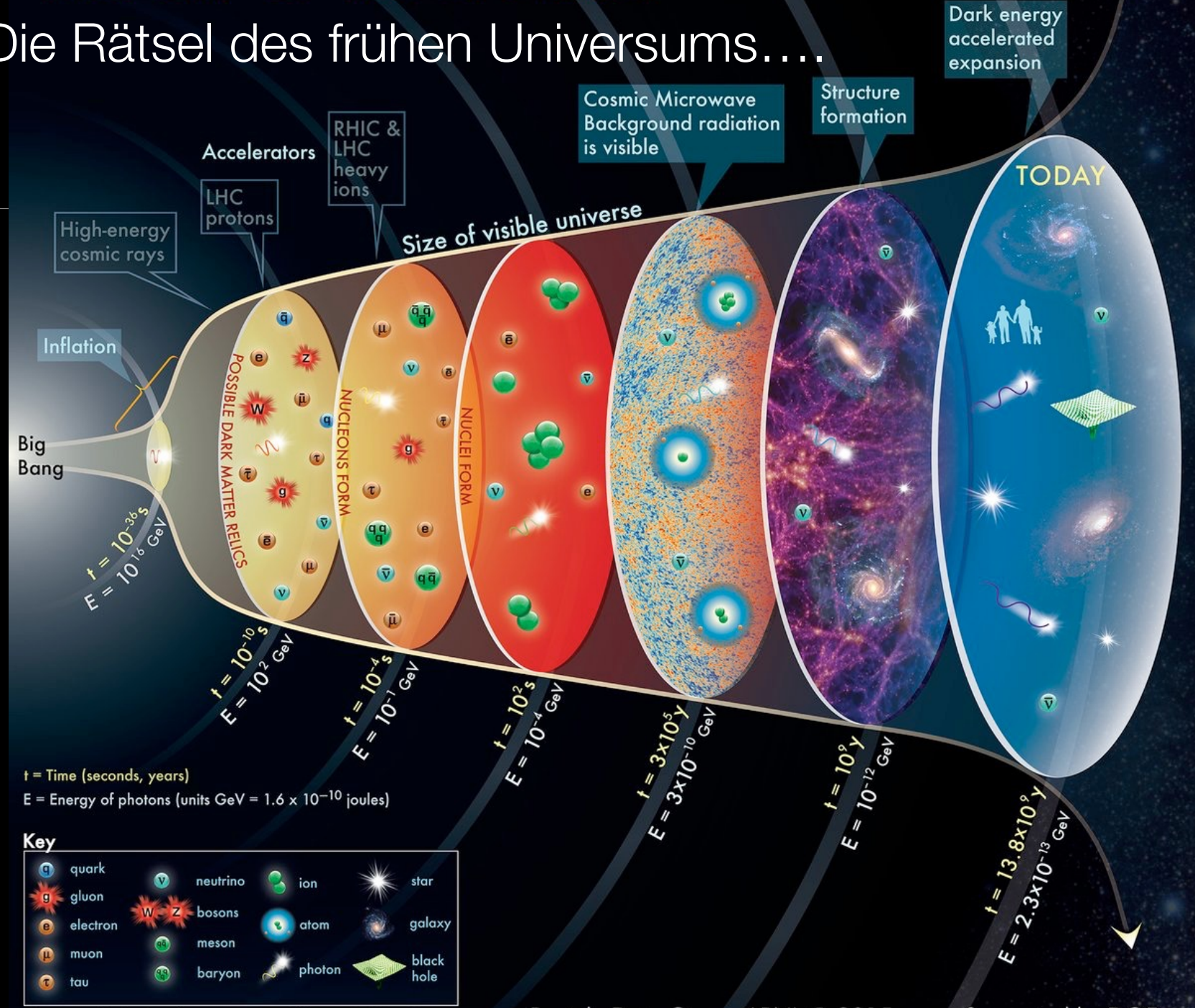
... unser Plan für heute

1. Das frühe Universum, Teilchenphysik und das Higgs-Boson
2. Ideen & Herausforderungen
3. Zusammenfassung und Ausblick

1. Das frühe Universum, Teilchenphysik und Collider

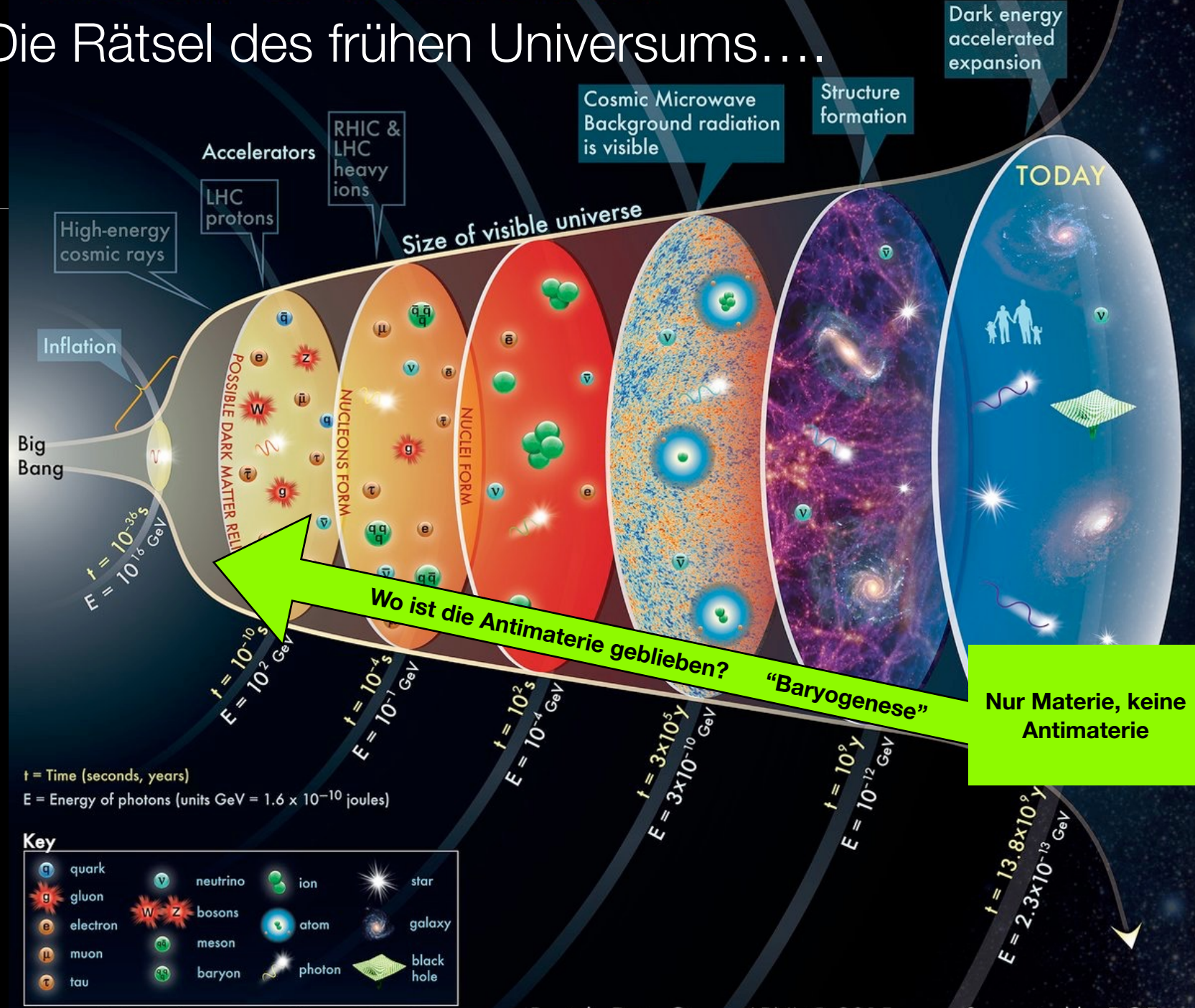


Die Rätsel des frühen Universums....



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Die Rätsel des frühen Universums....



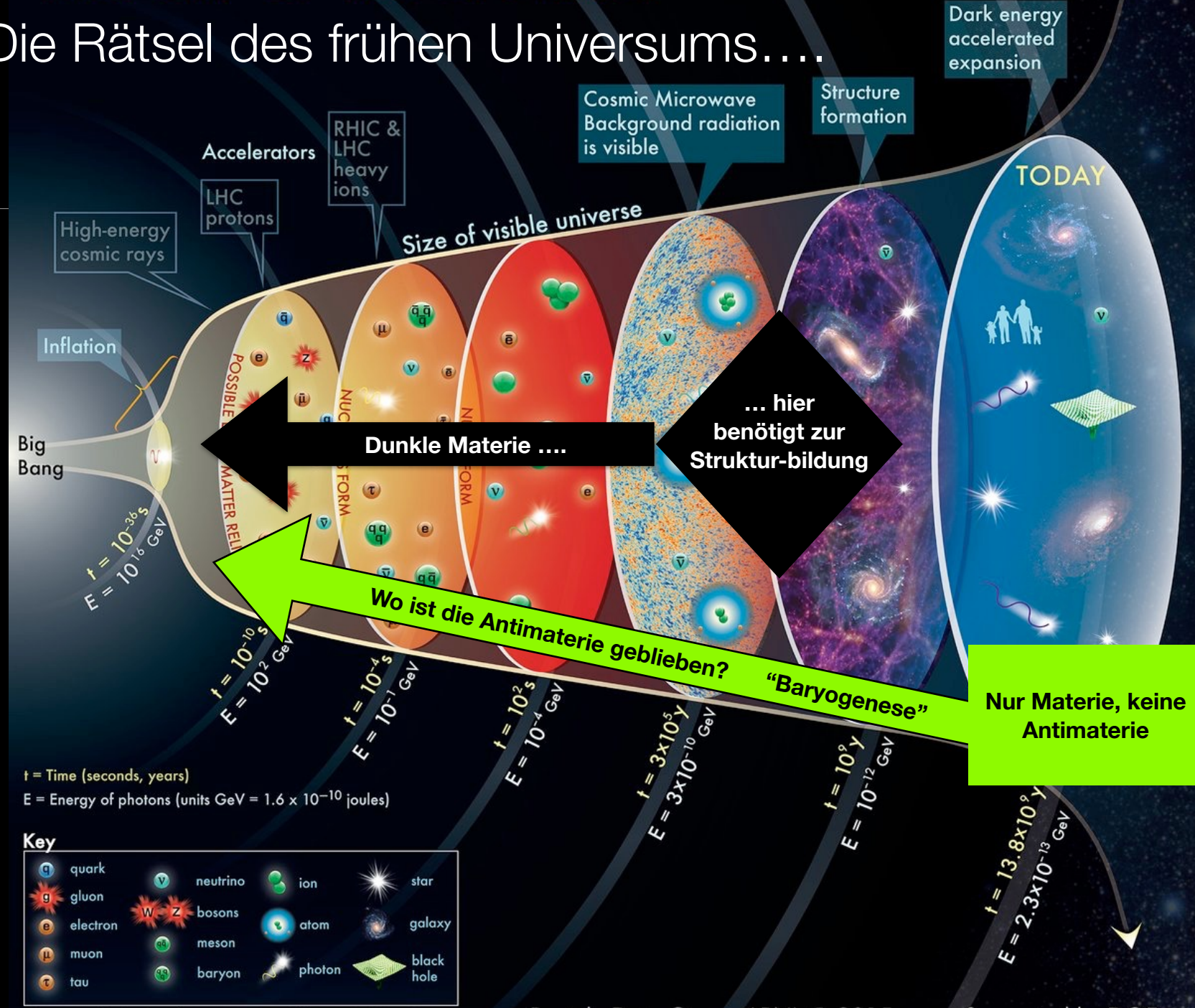
t = Time (seconds, years)
E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

Key

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

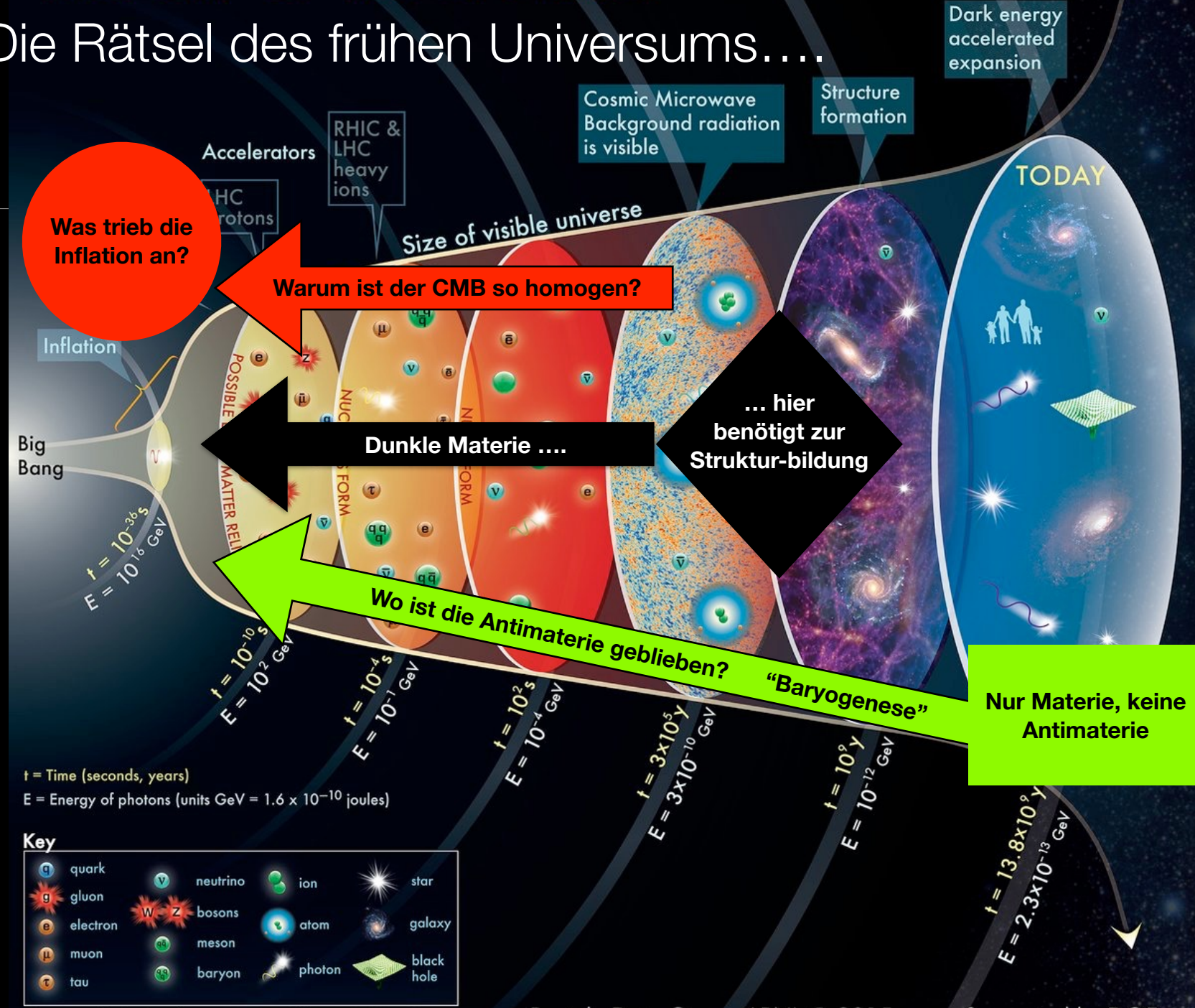
The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Die Rätsel des frühen Universums....



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Die Rätsel des frühen Universums....



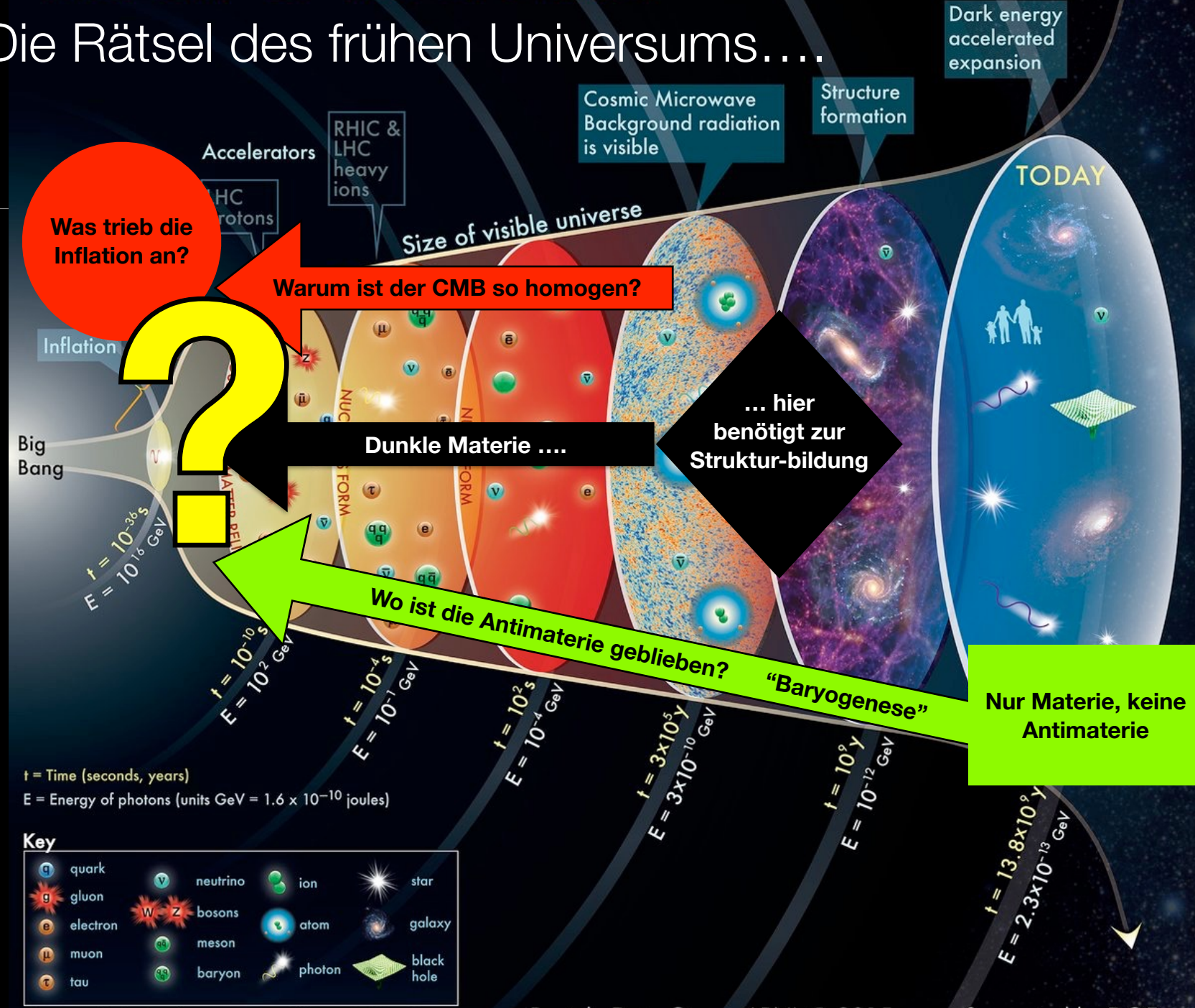
t = Time (seconds, years)
 E = Energy of photons (units GeV = 1.6 x 10⁻¹⁰ joules)

Key

q	quark	v	neutrino	ion	star
g	gluon	W Z	bosons	atom	galaxy
e	electron	meson	photon	black hole	
μ	muon	baryon			
τ	tau				

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Die Rätsel des frühen Universums....



t = Time (seconds, years)
E = Energy of photons (units GeV = 1.6 x 10⁻¹⁰ joules)

Key

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

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

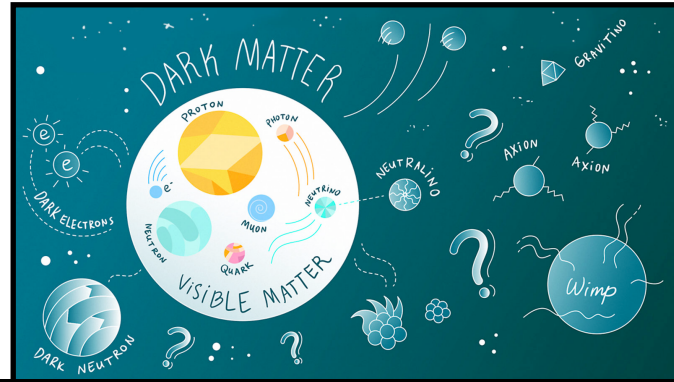
... was wir schon darüber wissen

drei wichtige Zutaten

Dunkle Materie ~ 5mal mehr als sichtbare Materie im Universum:

- elektrisch neutral
- nicht-baryonisch
- stabil
- massiv, "kalt"

=> WIMP? QCD-Axion?.....



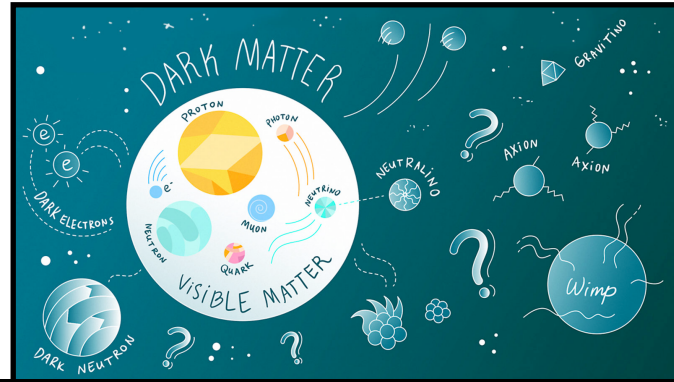
... was wir schon darüber wissen

drei wichtige Zutaten

Dunkle Materie ~ 5mal mehr als sichtbare Materie im Universum:

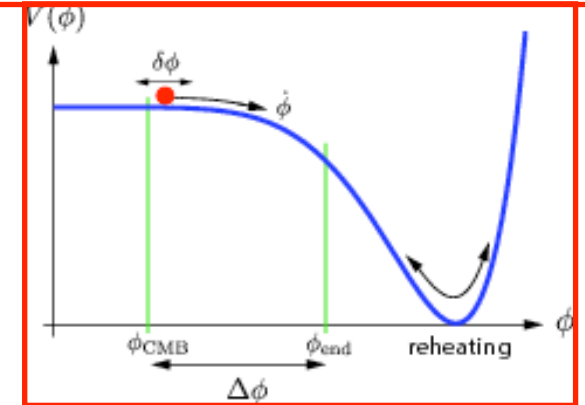
- elektrisch neutral
- nicht-baryonisch
- stabil
- massiv, "kalt"

=> WIMP? QCD-Axion?.....



Inflation: Ausdehnung um Faktor 10^{26}

- angetrieben durch skalares Feld
- Quantenanregung: Inflaton



[Roman Pöschl]

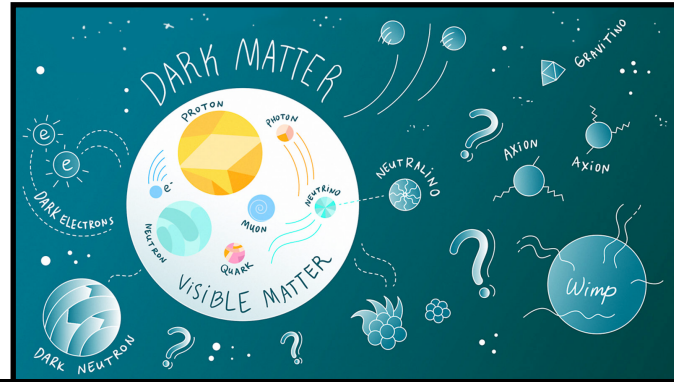
... was wir schon darüber wissen

drei wichtige Zutaten

Dunkle Materie ~ 5mal mehr als sichtbare Materie im Universum:

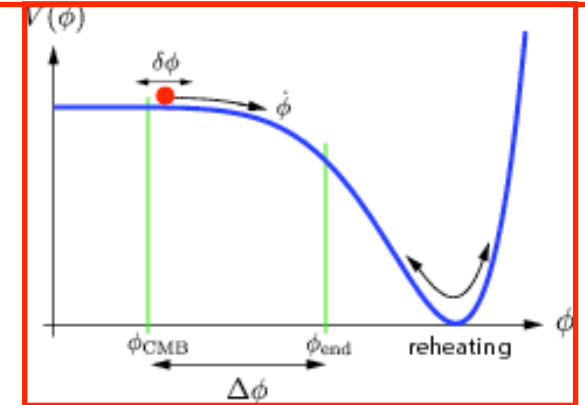
- elektrisch neutral
- nicht-baryonisch
- stabil
- massiv, "kalt"

=> WIMP? QCD-Axion?.....



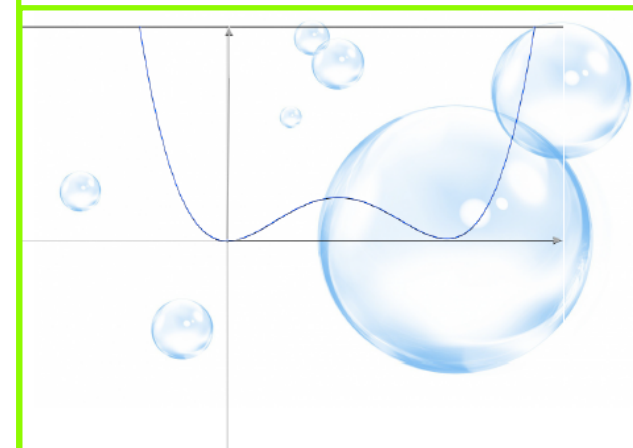
Inflation: Ausdehnung um Faktor 10^{26}

- angetrieben durch skalares Feld
- Quantenanregung: Inflaton



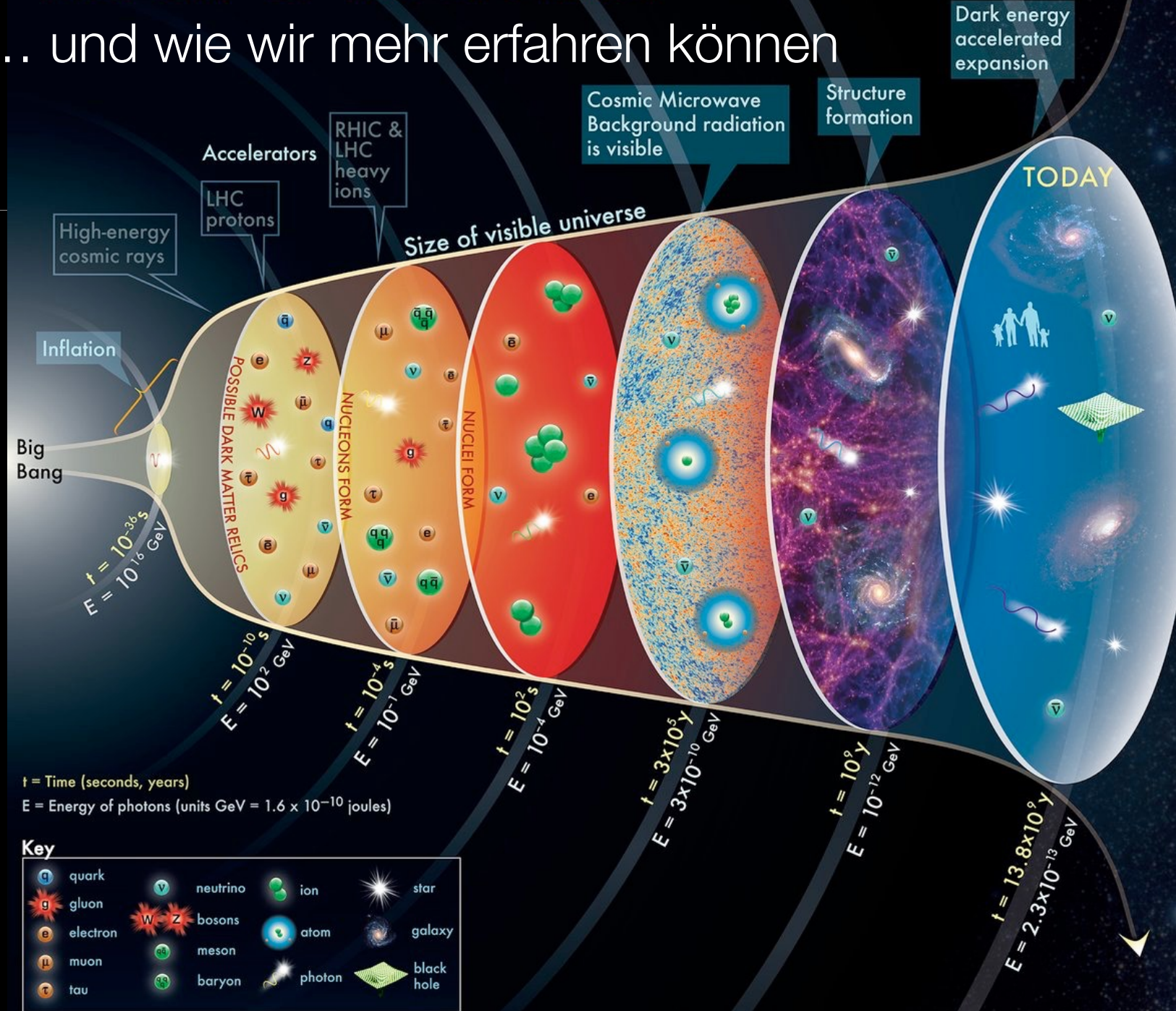
Baryogenese: Erzeugung eines winzigen Überschusses an Materie gegenüber Antimaterie erfordert Sacharow-Bedingungen:

- CP-Verletzung: Materie ist ein *bisschen* anders als Antimaterie
- Baryonzahlverletzung: mehr Baryonen (Protonen, Neutronen) als Antibaryonen
- thermisches Ungleichgewicht: Phasenübergang 1. Ordnung



[Roman Pöschl]

... und wie wir mehr erfahren können



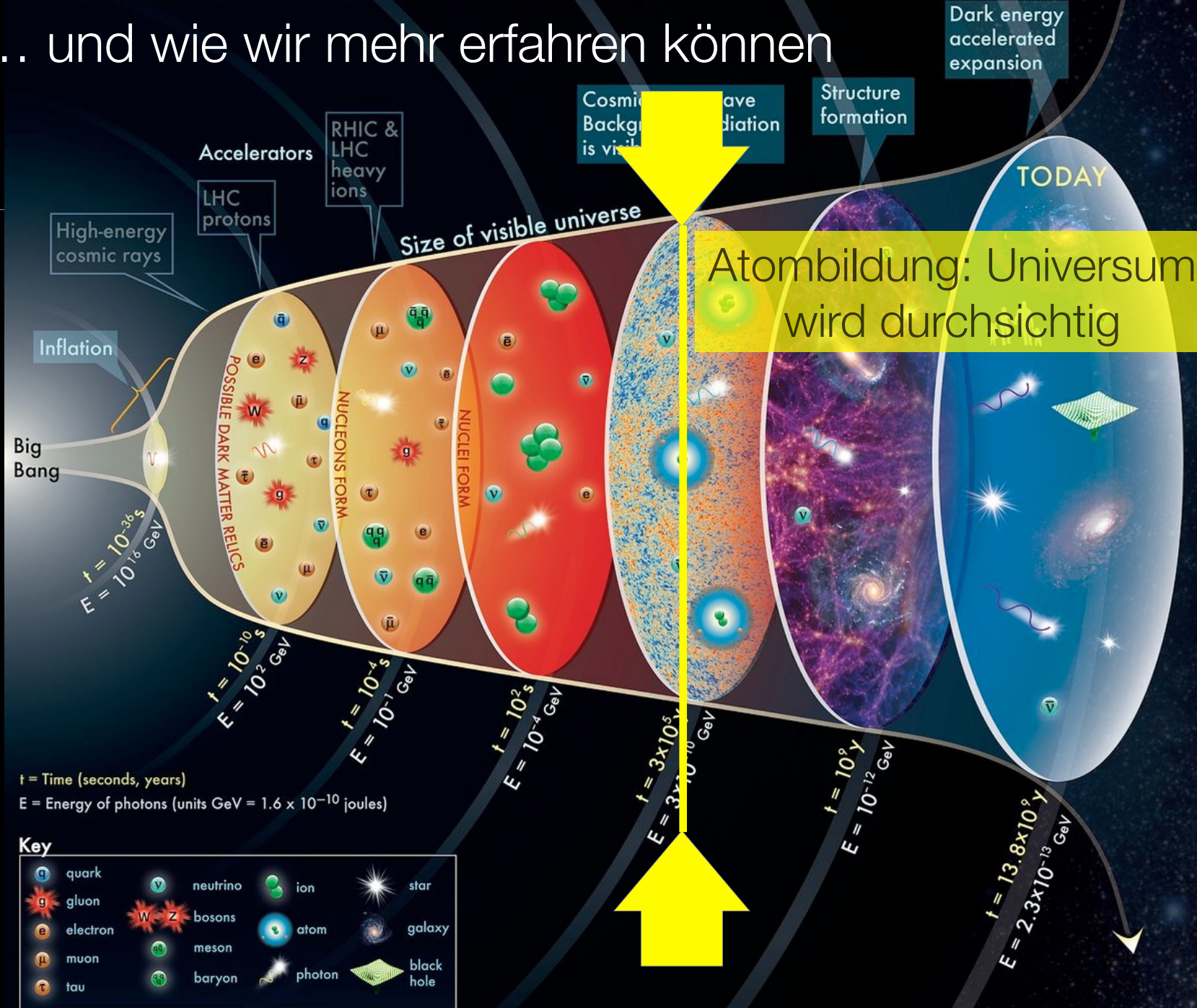
t = Time (seconds, years)
 E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

Key

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

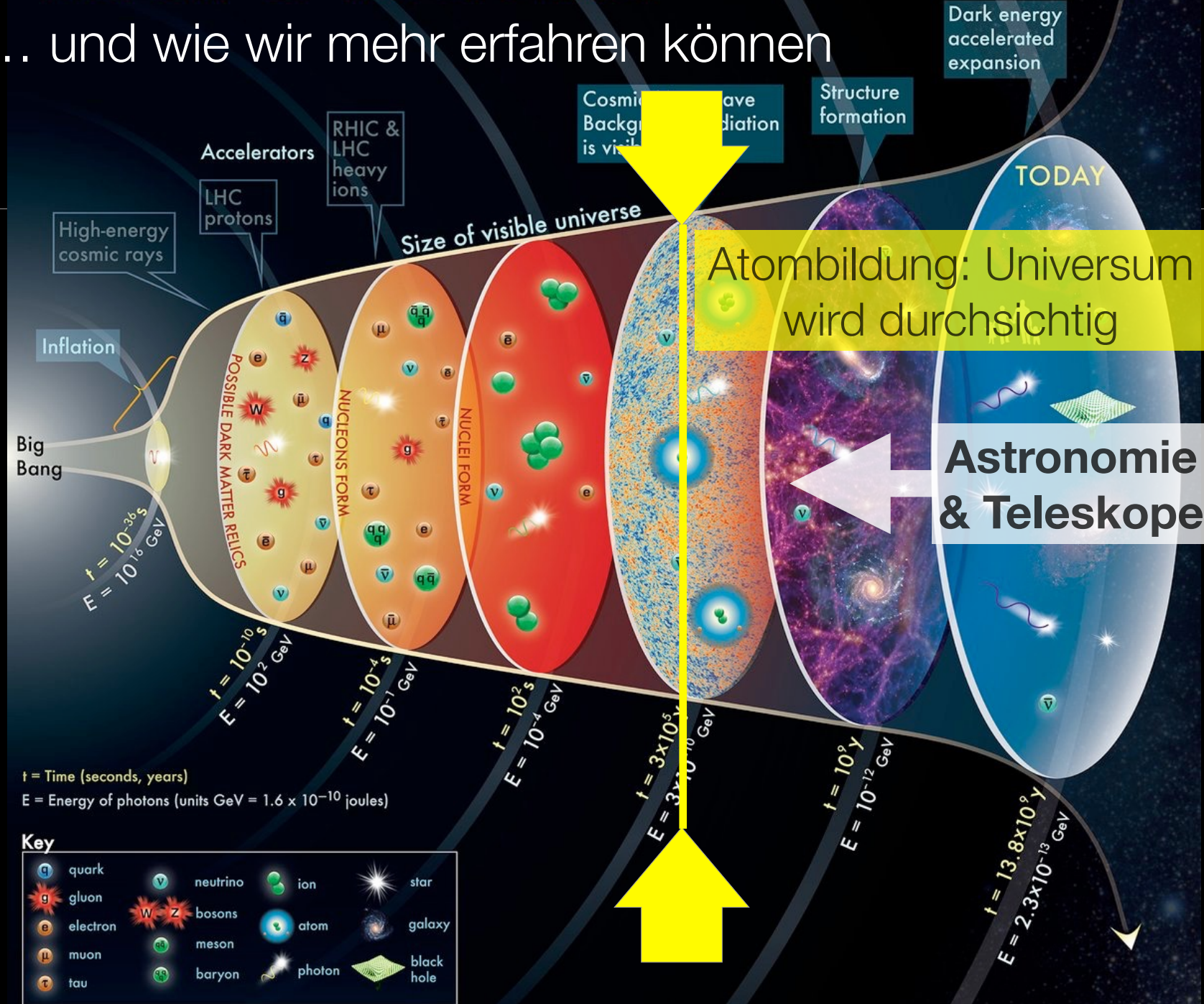
The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

... und wie wir mehr erfahren können



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

... und wie wir mehr erfahren können



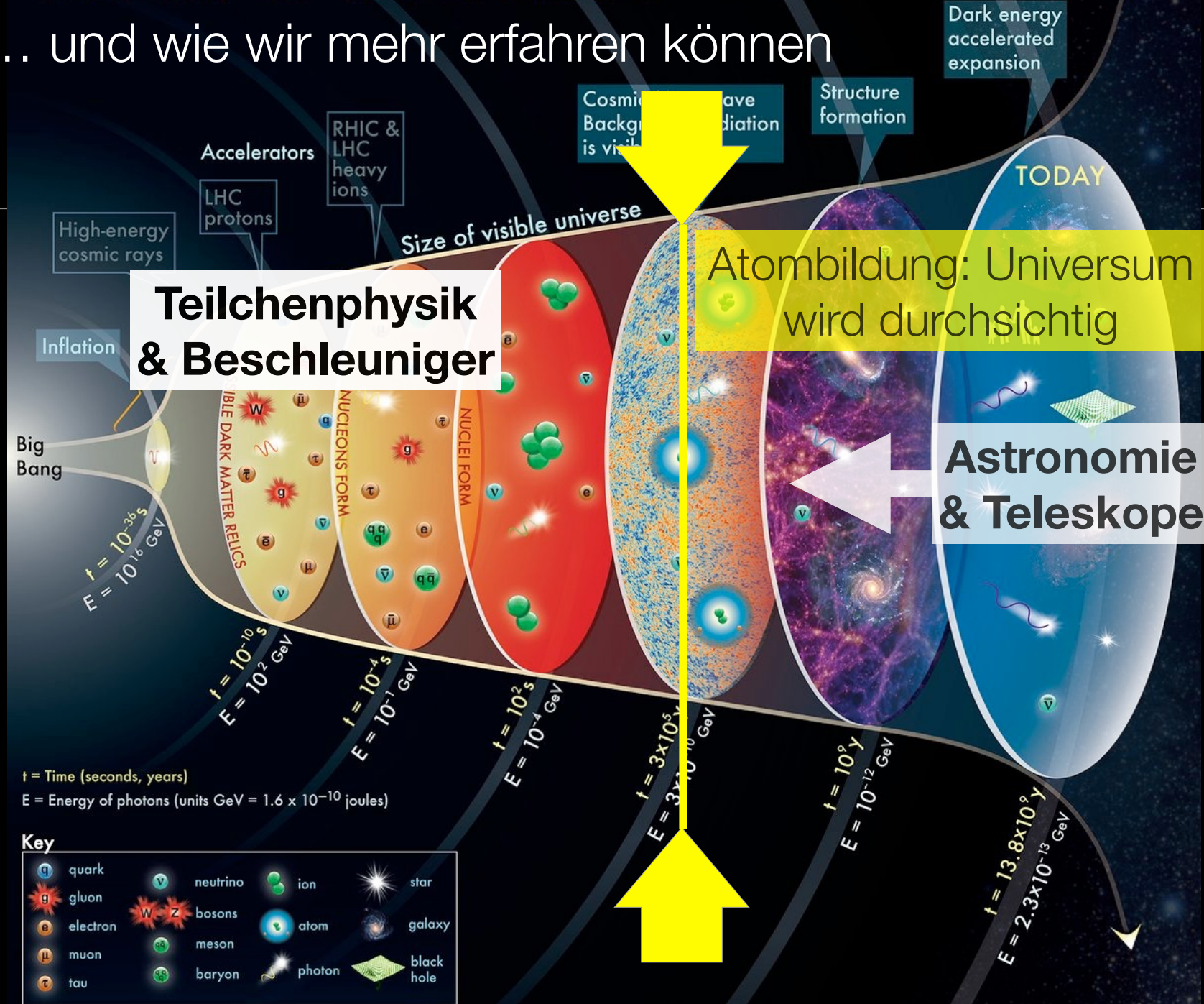
t = Time (seconds, years)
E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

Key

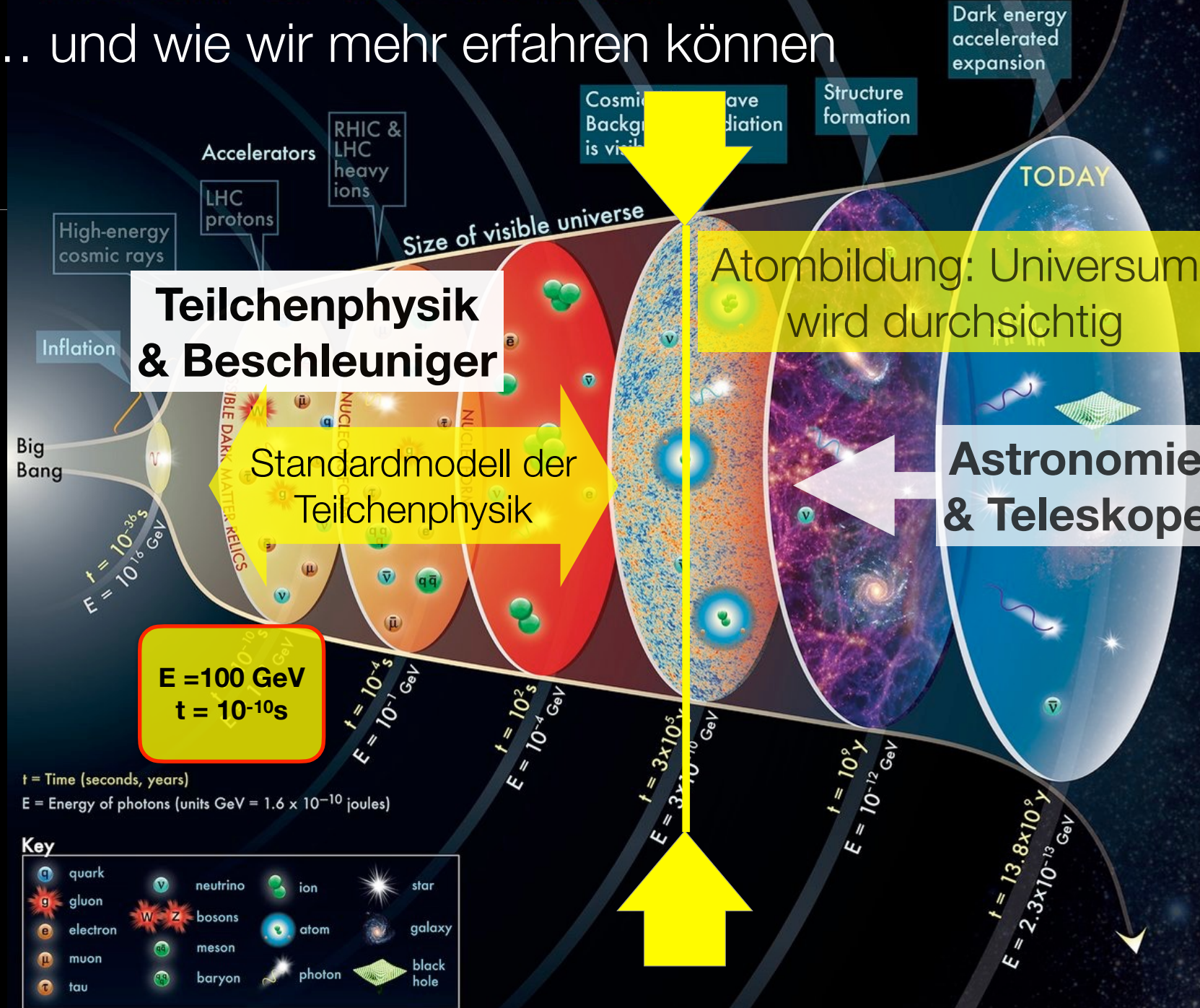
quark	neutrino	ion	star
gluon	bosons	atom	galaxy
electron	meson	photon	black hole
muon	baryon		
tau			

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

... und wie wir mehr erfahren können



... und wie wir mehr erfahren können



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Particle Data Group, LBNL © 2015

Supported by DOE

... und wie wir mehr erfahren können

Higgs



Teilchenphysik & Beschleuniger

Standardmodell der Teilchenphysik

Atombildung: Universum wird durchsichtig

Astronomie & Teleskope



t = Time (seconds, years)

E = Energy of photons (units GeV = 1.6 x 10⁻¹⁰ joules)

Key

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

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Das Standardmodell der Teilchenphysik

Vollständig?!

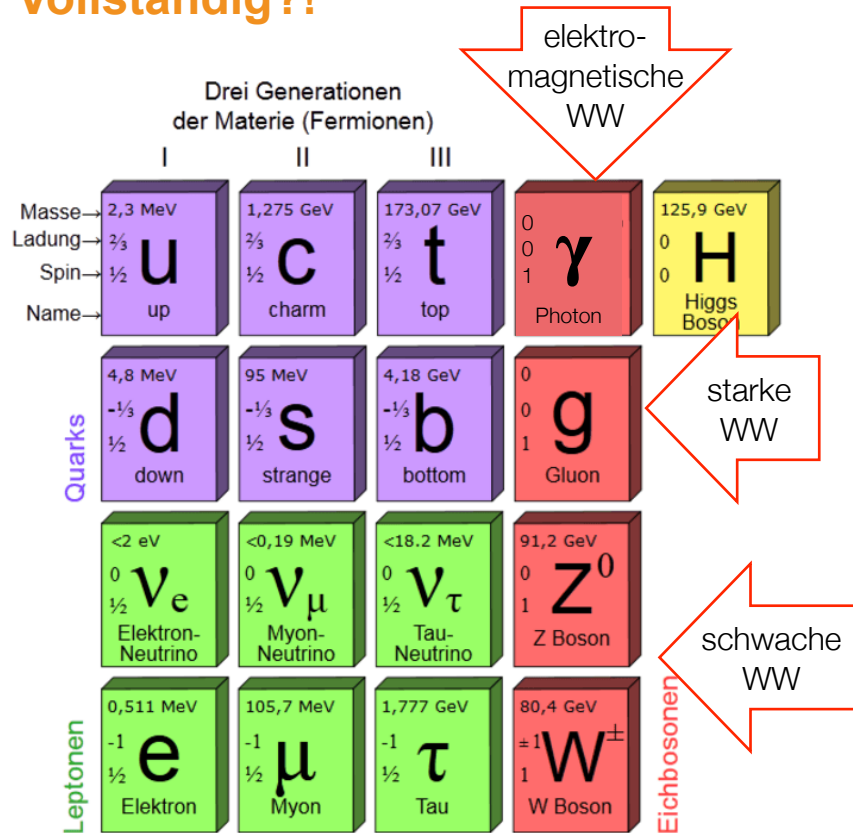
Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,9 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 0 1 g Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 0 1 Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W^{\pm} W Boson	Eichbosonen
Leptonen					

- beschreibt (fast) alle Messungen bis hinunter zum Niveau von Quantenfluktuationen
- basiert auf wenigen fundamentalen Prinzipien:
 - spezielle Relativitätstheorie
 - Quantenmechanik
 - Invarianz unter Eichtransformationen: $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Das Standardmodell der Teilchenphysik

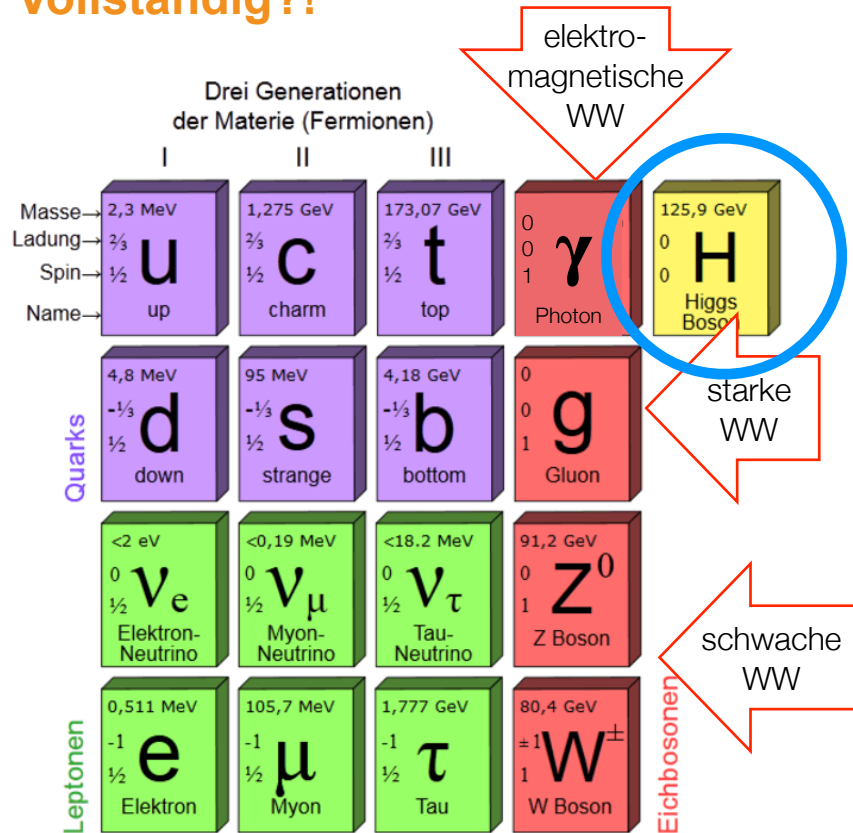
Vollständig?!



- beschreibt (fast) alle Messungen bis hinunter zum Niveau von Quantenfluktuationen
- basiert auf wenigen fundamentalen Prinzipien:
 - spezielle Relativitätstheorie
 - Quantenmechanik
 - Invarianz unter Eichtransformationen: $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Das Standardmodell der Teilchenphysik

Vollständig?!



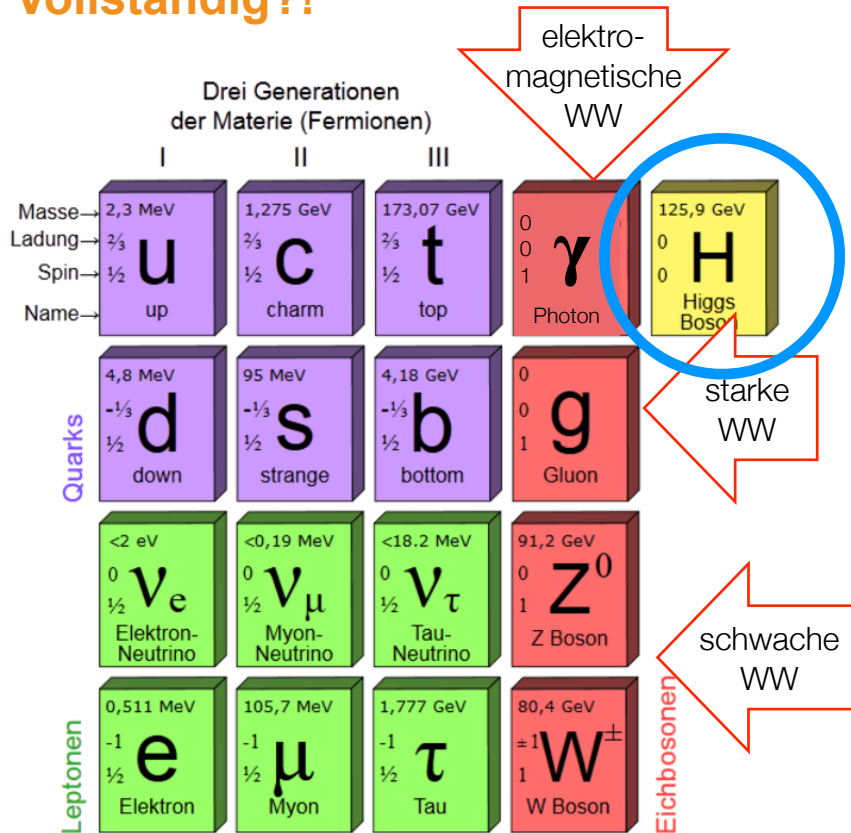
- beschreibt (fast) alle Messungen bis hinunter zum Niveau von Quantenfluktuationen
- basiert auf wenigen fundamentalen Prinzipien:
 - spezielle Relativitätstheorie
 - Quantenmechanik
 - Invarianz unter Eichtransformationen: $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Jüngster Triumph (2012):
Entdeckung eines
Higgs-Bosons am LHC!



Das Standardmodell der Teilchenphysik

Vollständig?!



- beschreibt (fast) alle Messungen bis hinunter zum Niveau von Quantenfluktuationen
- basiert auf wenigen fundamentalen Prinzipien:
 - spezielle Relativitätstheorie
 - Quantenmechanik
 - Invarianz unter Eichtransformationen: $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Jüngster Triumph (2012):
Entdeckung eines
Higgs-Bosons am LHC!



Sind damit alle unsere Fragen beantwortet?

Das Higgs-Boson als Schlüssel...

...zu neuer Erkenntnis

Dunkle Materie:

- kein Kandidat im SM (Neutrinos zu leicht)
- viele Ideen in Erweiterungen des SM
- ist das Higgs-Boson das Portal zu einem dunklen Sektor?

Inflation:

- das SM-Higgs-Boson wäre das erste elementare Spin-0-Teilchen
- könnte das Higgs-Feld die Inflation treiben?

Baryogenese im SM:

- CP-Verletzung: Ja!
wichtiges Ergebnis der B-Fabriken: Es gibt CP-Verletzung im Quark-Sektor - aber viel zu wenig!
- Baryonzahlverletzung: Nein!bisher auch kein Protonzerfall beobachtet
- Phasenübergang 1. Ordnung:
Könnte es der elektroschwache Phasenübergang sein? D.h. könnte das Higgs verantwortlich sein?

Das Higgs-Boson als Schlüssel...

...zu neuer Erkenntnis

Dunkle Materie:

- kein Kandidat im SM (Neutrinos zu leicht)
- viele Ideen in Erweiterungen des SM
- ist das dunkle

Inflation:

- das SM-Higgs-Boson wäre das Teilchen der Inflation

**Ist das *Higgs-Boson*
das Licht am Ende des Tunnels?
- oder ein entgegenkommender Zug?**

Baryogenese

- CP-Verletzung: Ja. Wichtiges Ergebnis der B-Fabriken: Es gibt CP-Verletzung, aber zu wenig!
- Baryonzahlverletzung: Nein!bisher auch kein Protonzerfall beobachtet
- Phasenübergang 1. Ordnung: Könnte es der elektroschwache Phasenübergang sein? D.h. könnte das Higgs verantwortlich sein?



[Dave Gringich]

Das Higgs-Boson als Schlüssel...

...zu neuer Erkenntnis

Dunkle Materie:

- kein Kandidat im SM (Neutrinos zu leicht)
- viele Ideen in Erweiterungen des SM
- ist das dunkle

Inflation:

- das SM-Higgs-Boson wäre das Teilchen der Inflation

**Ist das *Higgs-Boson* das Licht am Ende des Tunnels?
- oder ein entgegenkommender Zug?**

nur genau Vermessung des Higgs- Bosons kann dies klären!

Baryogenese

- CP-Verletzung: ...wichtiges Ergebnis der B-Fabriken: Es gibt CP-Verletzung zu wenig!
- Baryonzahlverletzung: Nein!bisher auch kein Protonzerfall beobachtet
- Phasenübergang 1. Ordnung: Könnte es der elektroschwache Phasenübergang sein? D.h. könnte das Higgs verantwortlich sein?



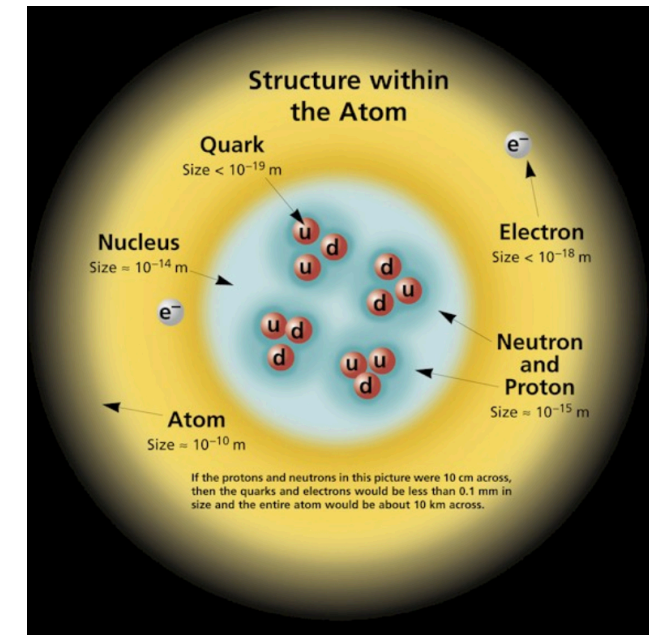
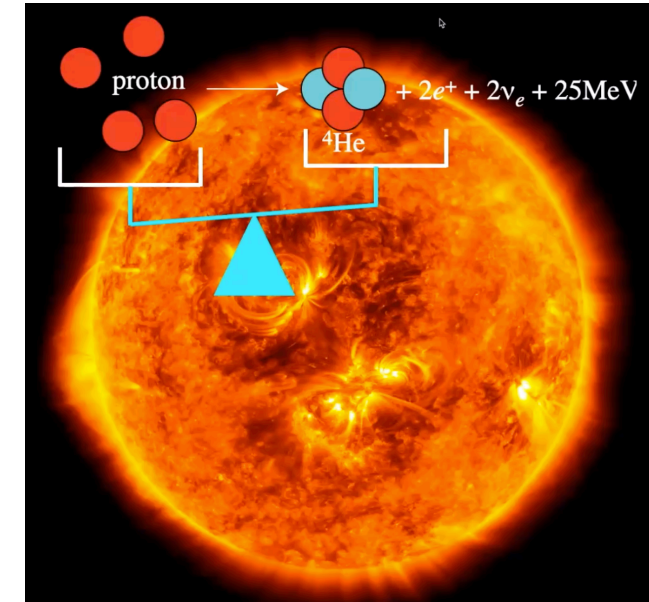
[Dave Gringich]

Und wenn uns das frühe Universum egal ist?

...was das Higgs noch für uns tut

Vermutung im SM: das Higgs-Boson gibt den Eichbosonen und Fermionen ihre Massen

- Massen von W und Z Boson bestimmen die kurze Reichweite der schwachen Wechselwirkung - essentiell für Energiegewinnung der Sterne:
 - etwas kürzere Reichweite: Kernfusion in Sternen nicht möglich, keine schwereren Elemente als H and He im Universum
 - etwas längere Reichweite: das Universum wäre so radioaktiv, dass kein Leben möglich
- Mass des Elektrons
 - masselose Elektronen flögen sie stets mit Lichtgeschwindigkeit => keine stabilen Atomhüllen
 - andere Elektronmasse: völlig andere Atomstruktur & Chemie
- Masse der Quarks
 - up-Quark minimal leichter als down-Quark => Proton stabil => Atome stabil
 - wenn Kopplung des Higgs-Bosons an u /d Quarks minimal anders, gäbe uns alle nicht



Und wenn uns das frühe Universum egal ist?

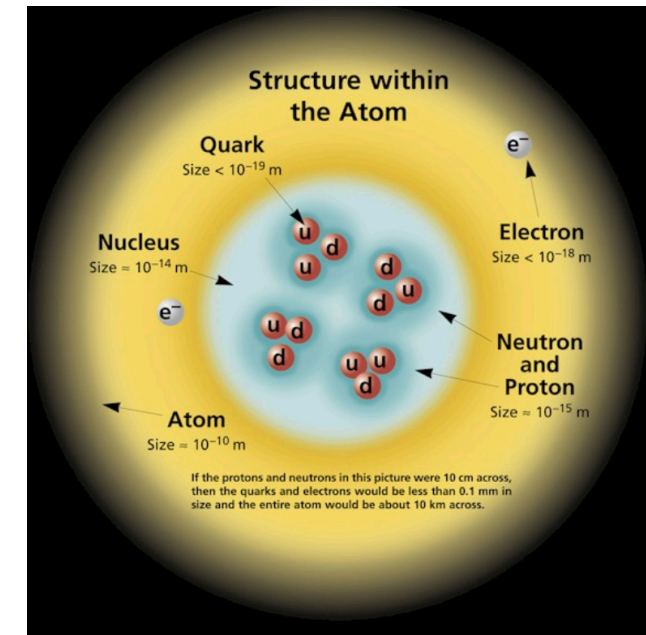
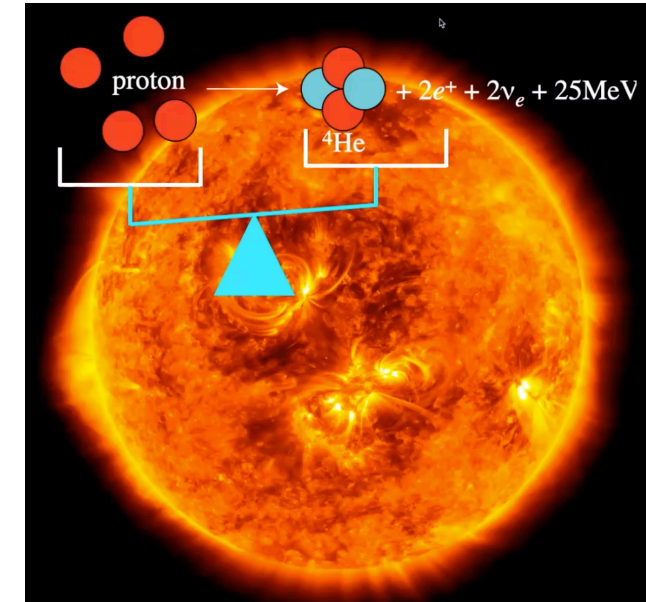
...was das Higgs noch für uns tut

Vermutung im SM: das Higgs-Boson gibt den Eichbosonen und Fermionen ihre Massen

- Massen von W und Z Boson bestimmen die kurze Reichweite der schwachen Wechselwirkung - essentiell für Energiegewinnung der Sterne:
 - etwas kürzere Reichweite: Kernfusion in Sternen nicht möglich, keine schwereren Elemente als H and He im Universum
 - etwas längere Reichweite: da keine stabile Neutronen, kein Leben möglich
- Mass des Elektronen

Das Higgs-Boson ist der Schlüssel zum Verständnis unserer Existenz:
• wir wissen, dass das Higgs existiert
• aber wir haben keine blasse Ahnung, warum es genau diese Eigenschaften hat
=> Higgs-Boson genauer vermessen, als jemals mit dem LHC möglich
• wenn Kopplung des Higgs-Bosons an u /d Quarks minimal anders, andere Atomstruktur & Chemie
• wenn Kopplung des Higgs-Bosons an u /d Quarks minimal anders, Proton stabil => keine Atome

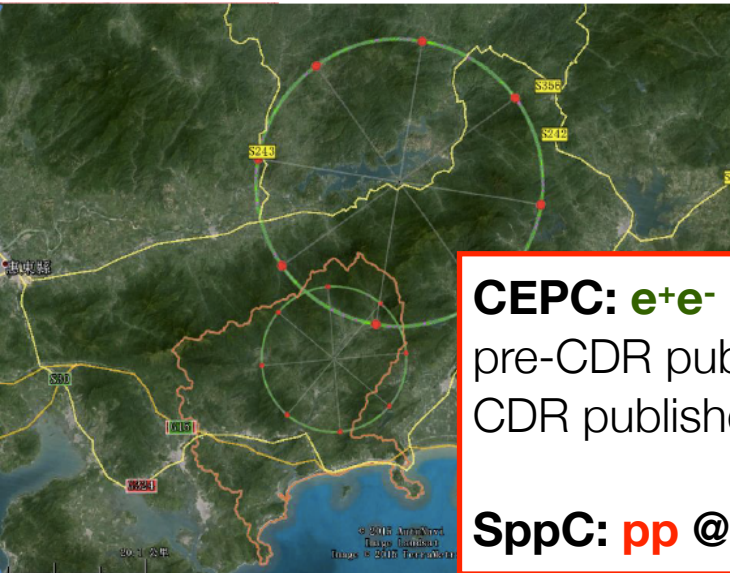
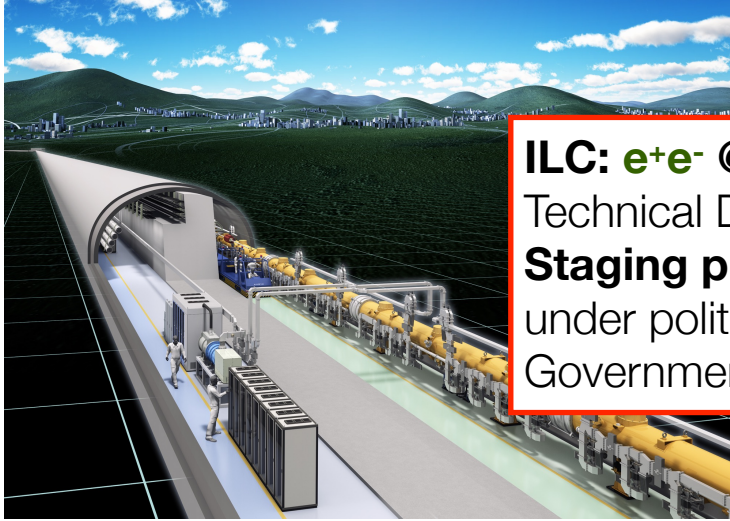
- wenn Kopplung des Higgs-Bosons an u /d Quarks minimal anders, gäbe uns alle nicht



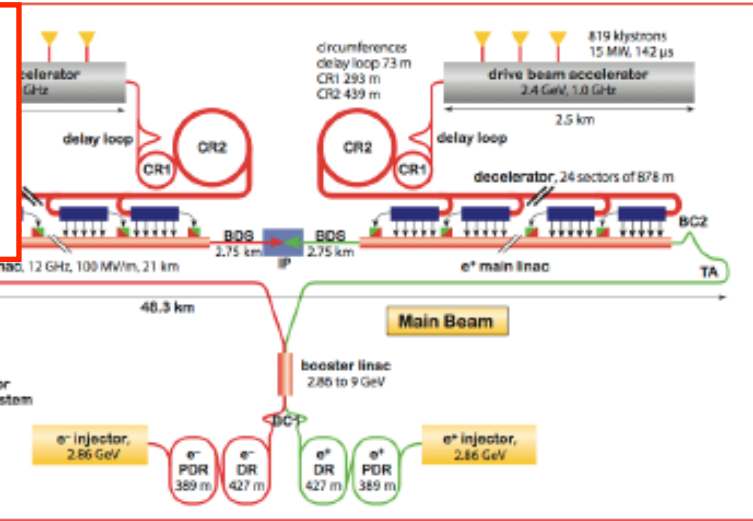
2. Ideen & Herausforderungen

Future Colliders

viele Ideen...



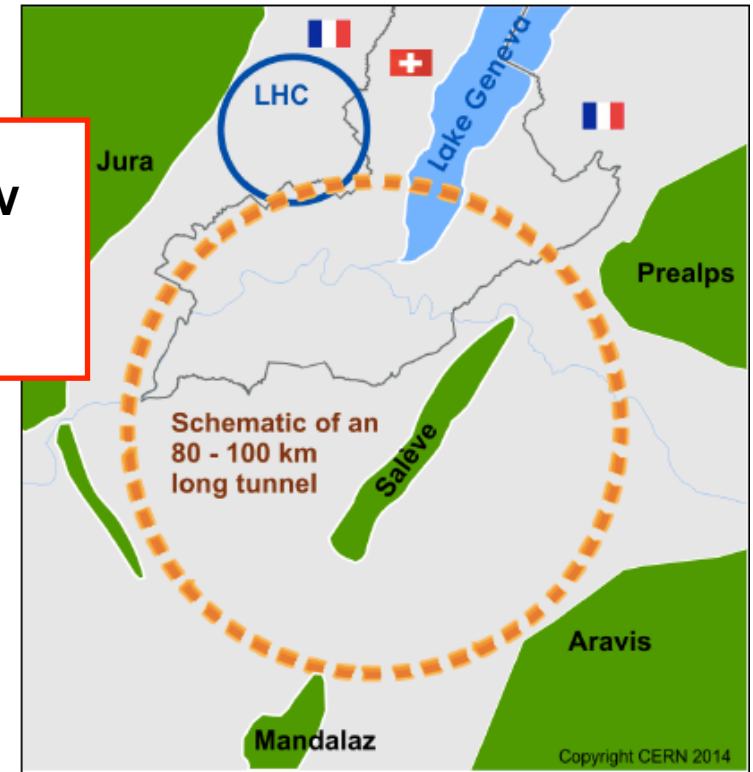
CLIC: e^+e^- @ 0.38, 1.4, 3 TeV
 Conceptual Design **2013**
 Updated Baseline in **2017**



ILC: e^+e^- @ 200-500 GeV (-1TeV)
 Technical Design Rep. in **2012**
Staging proposal 2017: start at 250 GeV
 under political consideration by Japanese Government as a global project

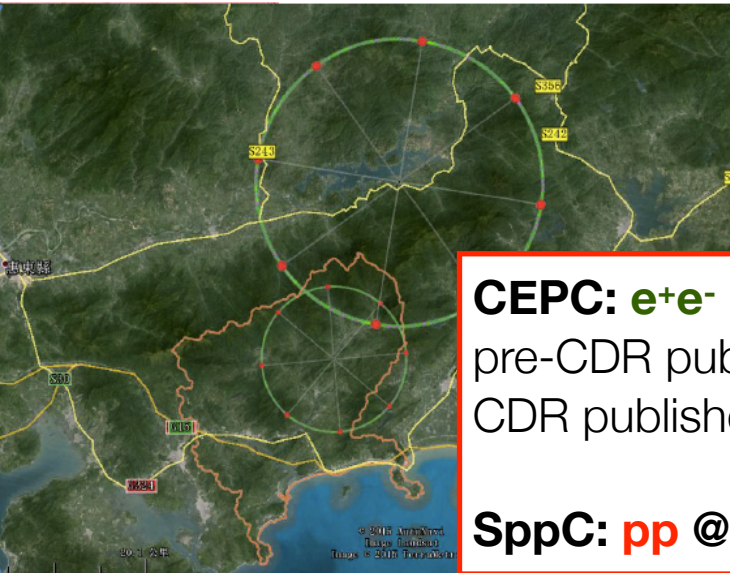
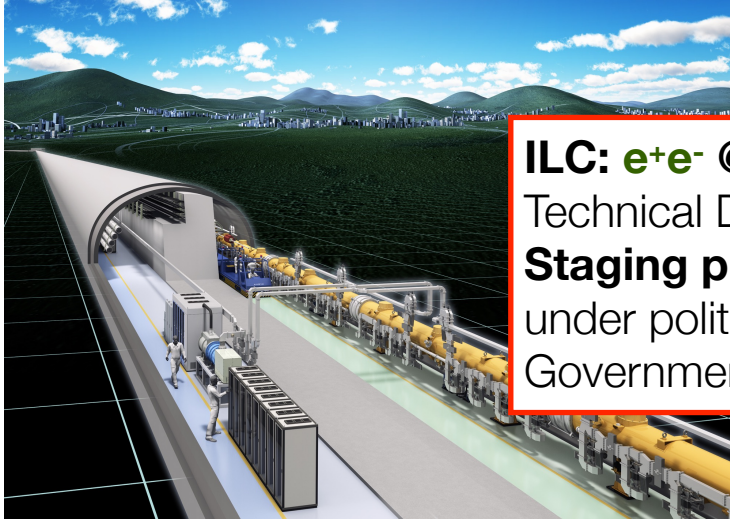
FCC: pp @ ~100 TeV
 & precursor **FCCee e^+e^- @ 90-350 GeV**
 Conceptual Design Rep. in **2018**
Currently: FCC Feasibility Study

CEPC: e^+e^- @ 240 GeV
 pre-CDR published in **2014**
 CDR published **2018**
SppC: pp @ 50-70 TeV

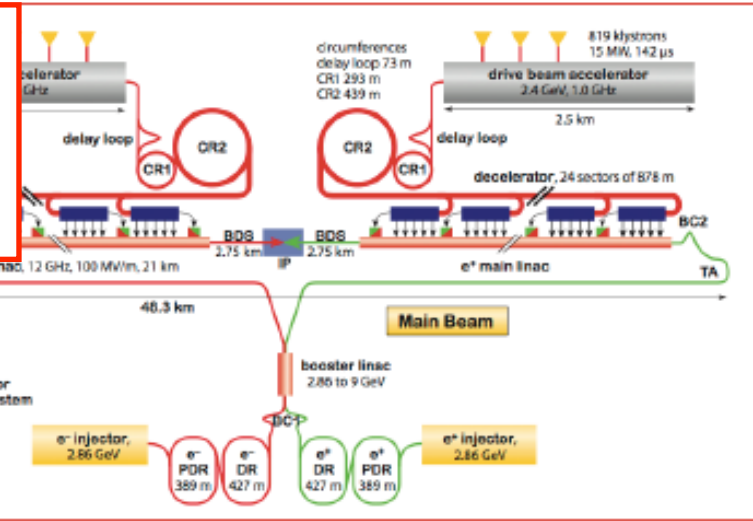


Future Colliders

viele Ideen...



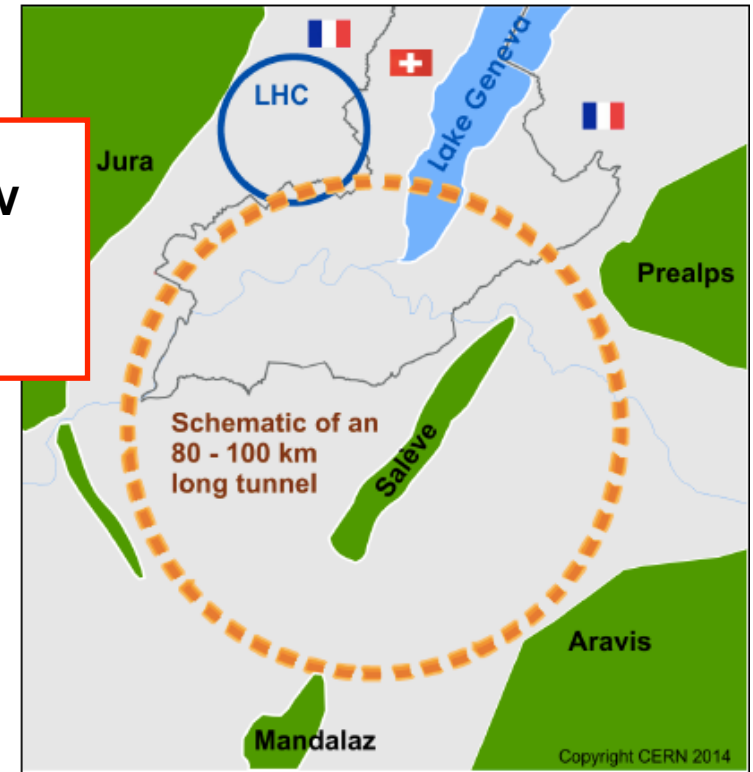
CLIC: e^+e^- @ 0.38, 1.4, 3 TeV
 Conceptual Design **2013**
 Updated Baseline in **2017**



ILC: e^+e^- @ 200-500 GeV (-1TeV)
 Technical Design Rep. in **2012**
Staging proposal 2017: start at 250 GeV
 under political consideration by Japanese Government as a global project

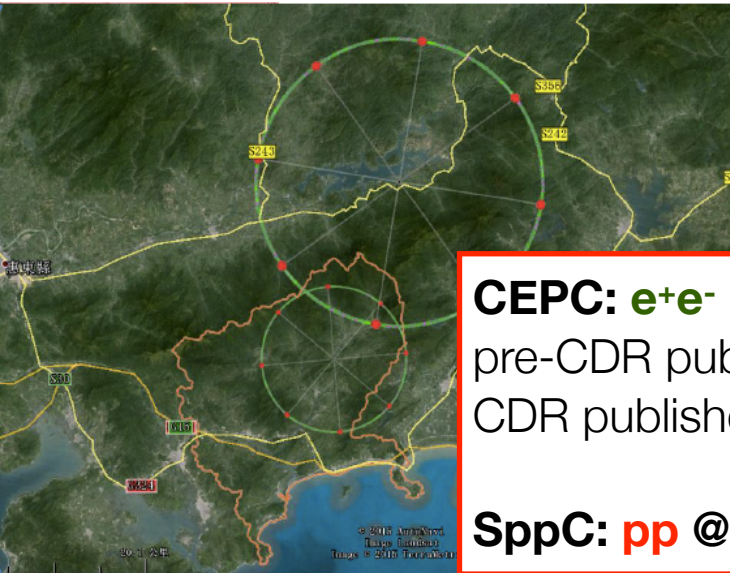
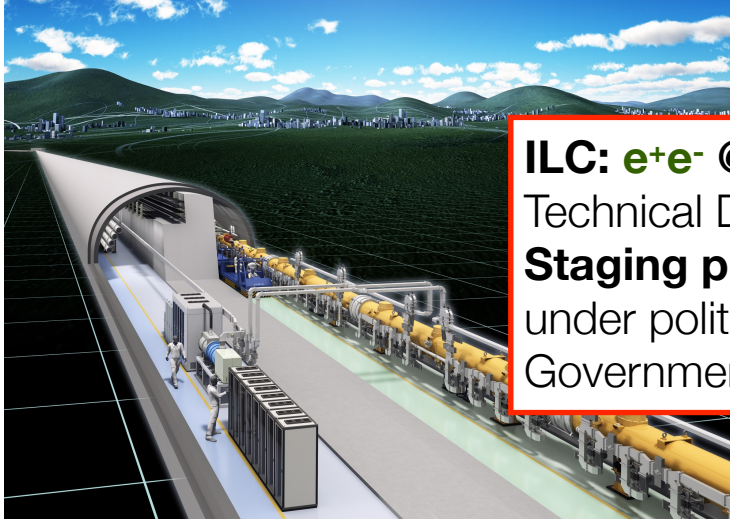
FCC: pp @ ~100 TeV
 & precursor **FCCee e^+e^- @ 90-350 GeV**
 Conceptual Design Rep. in **2018**
Currently: FCC Feasibility Study

CEPC: e^+e^- @ 240 GeV
 pre-CDR published in **2014**
 CDR published **2018**
SppC: pp @ 50-70 TeV

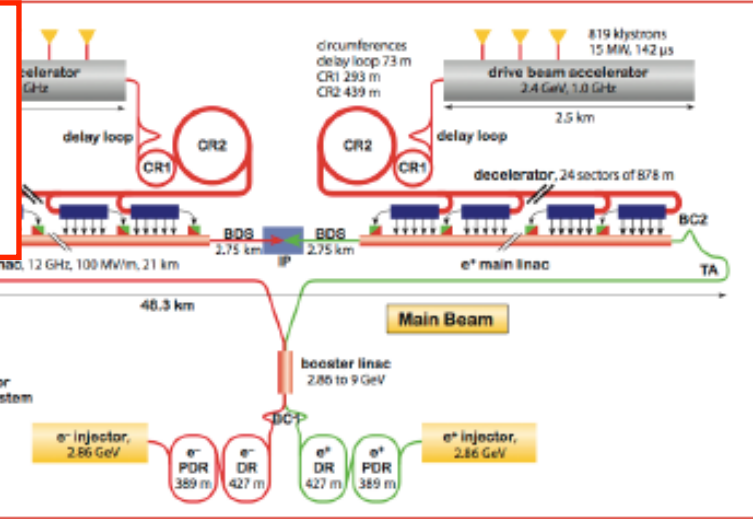


Future Colliders

viele Ideen...



CLIC: e^+e^- @ 0.38, 1.4, 3 TeV
 Conceptual Design **2013**
 Updated Baseline in **2017**

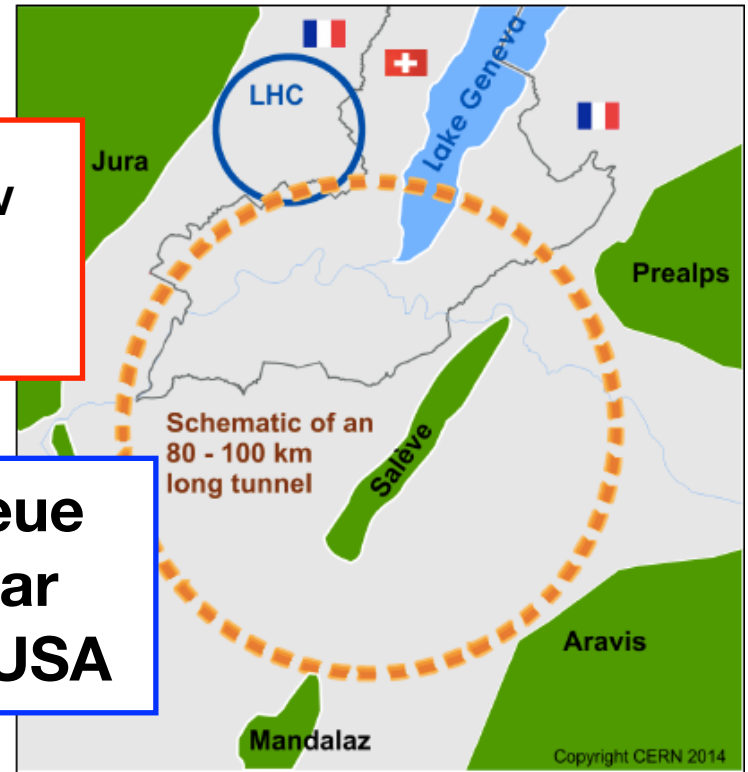


ILC: e^+e^- @ 200-500 GeV (-1TeV)
 Technical Design Rep. in **2012**
Staging proposal 2017: start at 250 GeV
 under political consideration by Japanese
 Government as a global project

FCC: pp @ ~100 TeV
 & precursor **FCCee e^+e^- @ 90-350 GeV**
 Conceptual Design Rep. in **2018**
Currently: FCC Feasibility Study

CEPC: e^+e^- @ 240 GeV
 pre-CDR published in **2014**
 CDR published **2018**
SppC: pp @ 50-70 TeV

**Und weitere neue
 Ideen für Linear
 Collider in den USA**



Gemeinsamkeiten & Unterschiede

...worauf es ankommt

- alle Vorschläge starten mit einem Elektron-Positron-Collider nahe der minimalen Energie, um Higgs-Bosonen zu produzieren - aka “Higgs-Fabrik”
=> als Priorität in den derzeitigen Europäischen, US-amerikanischen und japanischen Teilchenphysik-Strategien benannt
- offene Fragen:
 - was ist die beste Collider-Technologie?
 - sollte man auf ein langfristiges Elektron-Positron-Collider-Programm setzen, mit Ausbaubarkeit zu höheren Energien?
 - oder lieber nach einem minimalen Elektron-Positron-Collider-Programm einen Proton-Proton-Collider in den selben Tunnel bauen?
 - und wo könnte man so einen Collider bauen, und wer bezahlt das?
 - und wie kann man einen Collider nachhaltig bauen?

Gemeinsamkeiten & Unterschiede

...worauf es ankommt

- alle Vorschläge starten mit einem Elektron-Positron-Collider nahe der minimalen Energie, um Higgs-Bosonen zu produzieren - aka “Higgs-Fabrik”
=> als Priorität in den derzeitigen Europäischen, US-amerikanischen und japanischen Teilchenphysik-Strategien benannt
- offene Fragen:
 - was ist die beste Collider-Technologie?
 - sollte man auf ein langfristiges Elektron-Positron-Collider-Programm setzen, mit Ausbaubarkeit zu höheren Energien?
 - oder lieber nach einem minimalen Elektron-Positron-Collider-Programm einen Proton-Proton-Collider in den selben Tunnel bauen?
 - und wo könnte man so einen Collider bauen, und wer bezahlt das?
 - und wie kann man einen Collider nachhaltig bauen?

- **Europa plant eine Aktualisierung seiner Strategie für Teilchenphysik in 2026/27**
- **Fakten als Basis müssen bis Ende 2025 vorliegen**
=> **Suche nach Antworten muss jetzt beginnen!**

Einzigartige Messung einer e^+e^- Higgs-Fabrik

Ein (!) konkretes Beispiel

- Higgs-Produktionsprozess bei ~ 250 GeV: $e^+e^- \rightarrow ZH$
- **dieser Prozess erlaubt die Messung des totalen Wirkungsquerschnitts: *der Schlüssel*** zur modelunabhängigen Bestimmung der absoluten Kopplungen
- messbar unabhängig vom Zerfall des Higgs-Bosons mittels via **Rückstoß-Technik**
- nur an einem e^+e^- Collider möglich **da Impuls der kollidierenden Teilchen bekannt!**
- ermöglicht eine Vielzahl weiterer Präzisionsmessungen

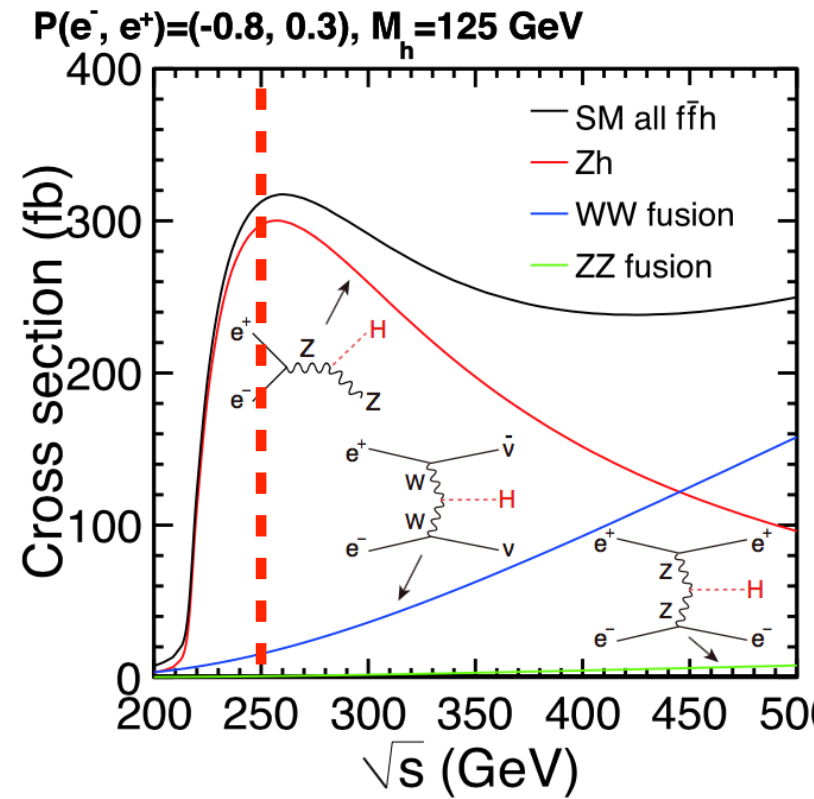
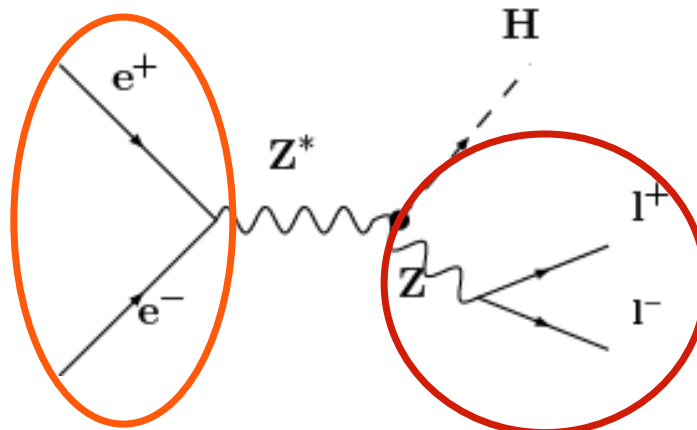


Image courtesy of Stuart Miles at FreeDigitalPhotos.net



$$M_H^2 = M_{recoil}^2 = s + M_Z^2 - 2E_Z\sqrt{s}$$

Einzigartige Messung einer e^+e^- Higgs-Fabrik

Ein (!) konkretes Beispiel

- Higgs-Produktionsprozess bei ~ 250 GeV: $e^+e^- \rightarrow ZH$
- **dieser Prozess erlaubt die Messung des totalen Wirkungsquerschnitts: *der Schlüssel*** zur modelunabhängigen Bestimmung der absoluten Kopplungen
- messbar unabhängig vom Zerfall des Higgs-Bosons mittels via **Rückstoß-Technik**
- nur an einem e^+e^- Collider möglich **da Impuls der kollidierenden Teilchen bekannt!**
- ermöglicht eine Vielzahl weiterer Präzisionsmessungen

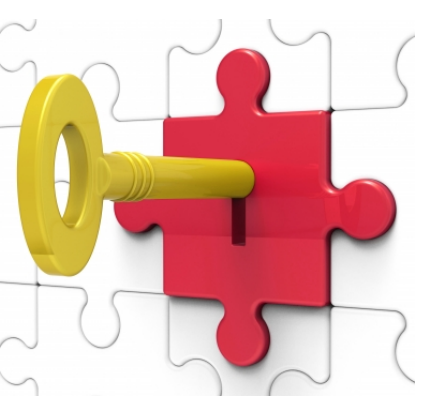
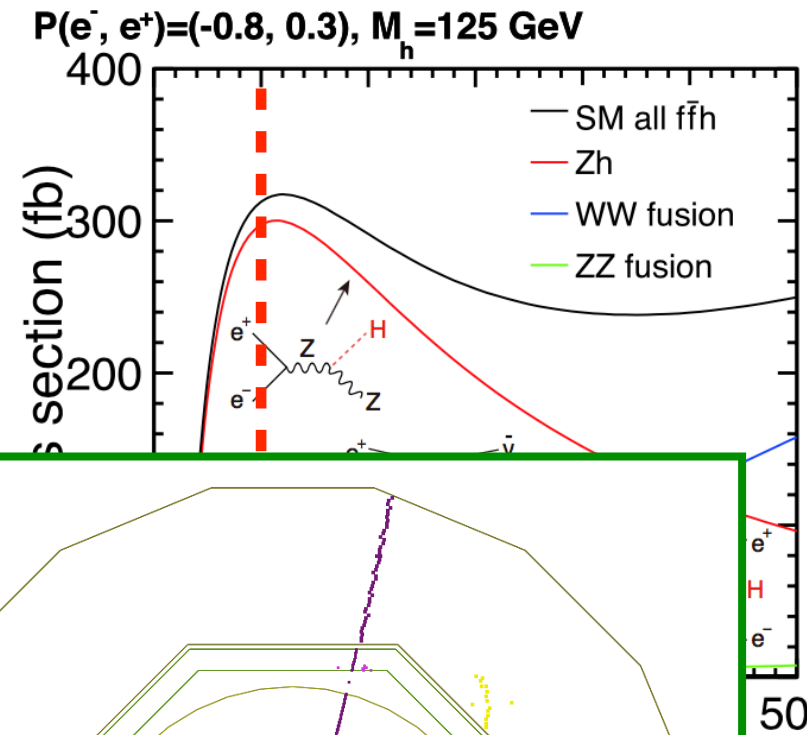
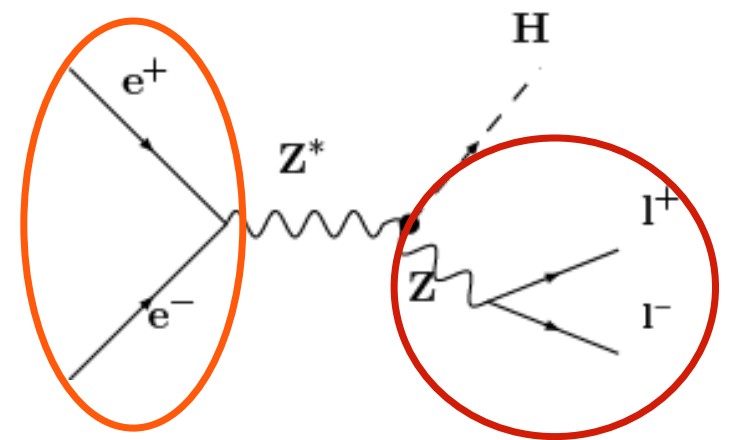
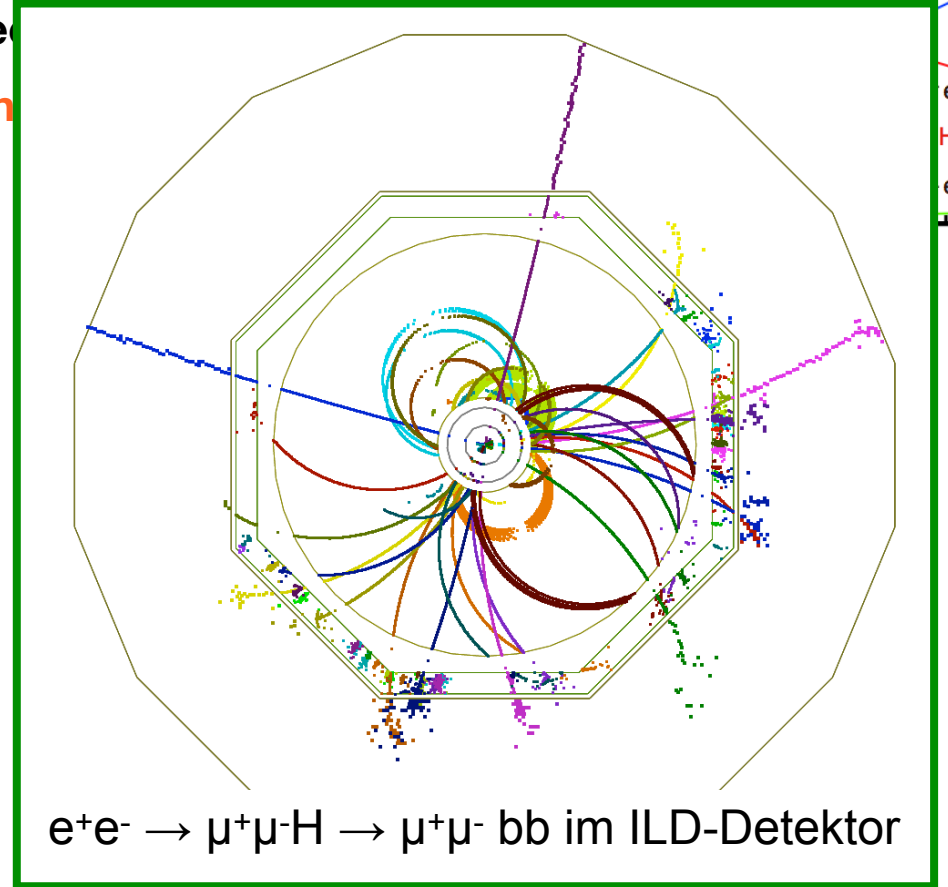


Image courtesy of Stuart Miles at FreeDigitalPhotos.net



$$M_H^2 = M_{recoil}^2 = s + M_Z^2 - 2E_Z\sqrt{s}$$

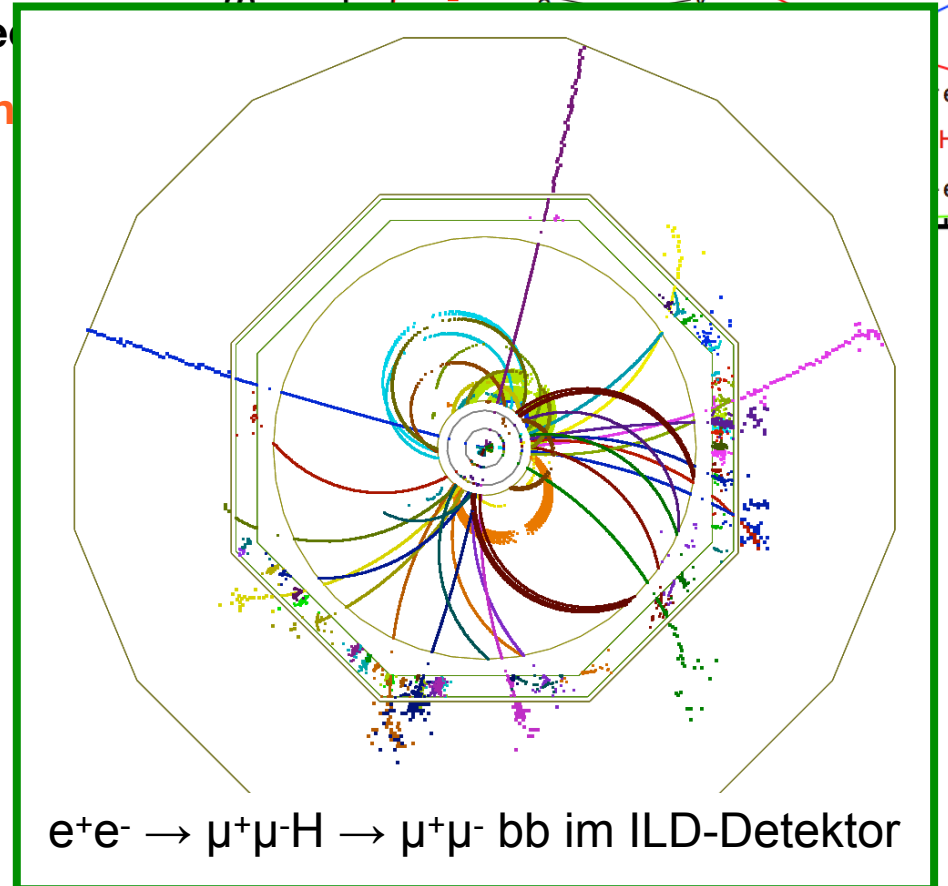
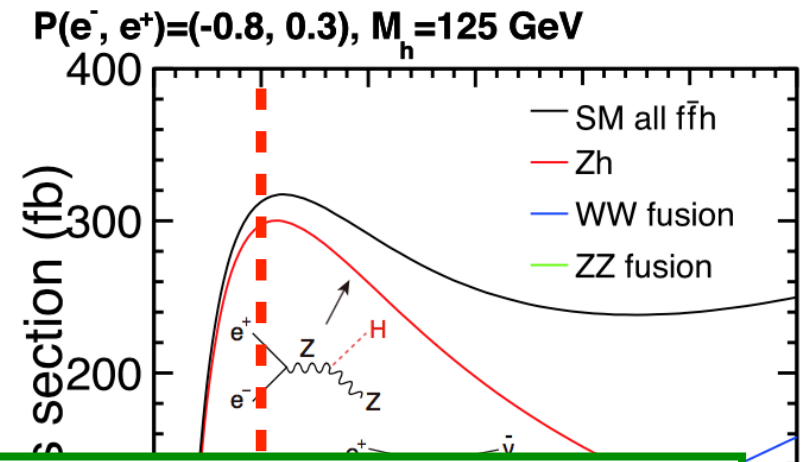
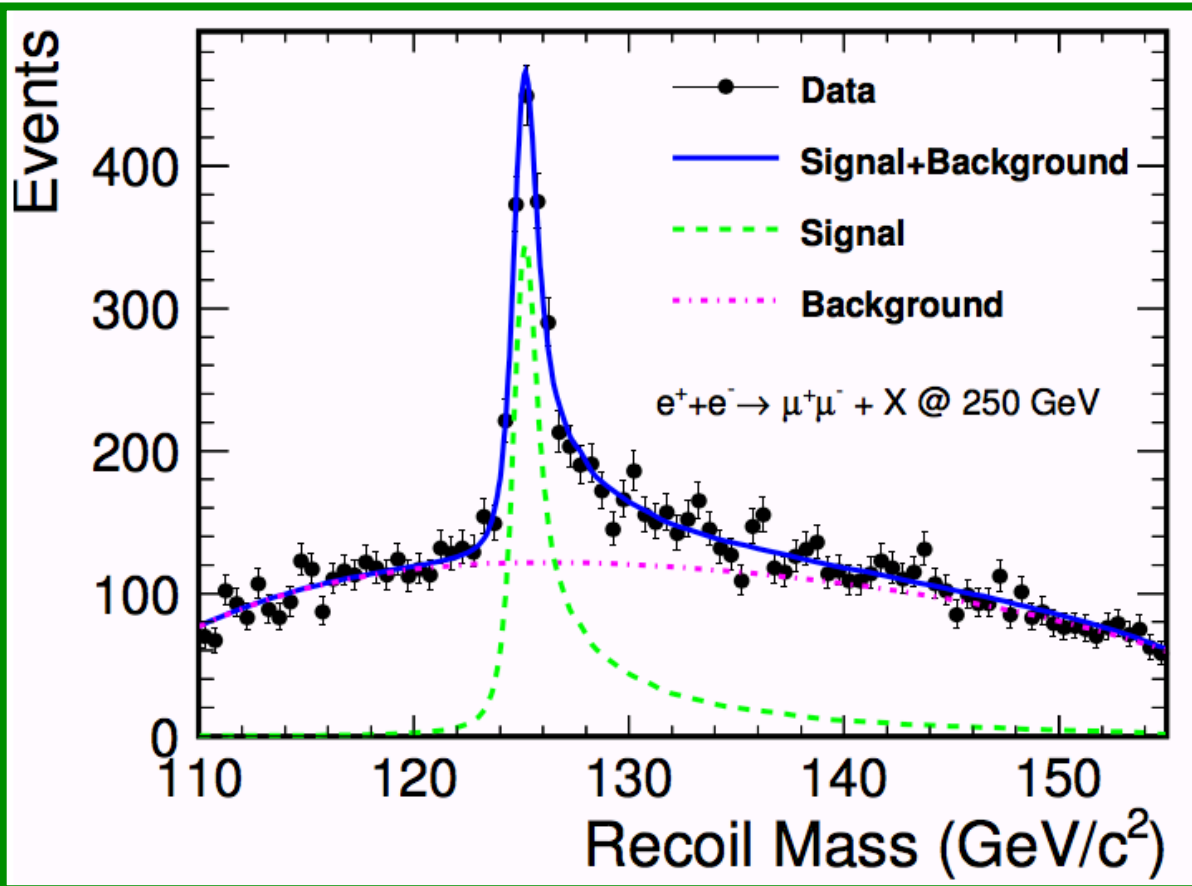


Einzigartige Messung einer e^+e^- Higgs-Fabrik

Ein (!) konkretes Beispiel

- Higgs-Produktionsprozess bei ~ 250 GeV: $e^+e^- \rightarrow ZH$
- **dieser Prozess erlaubt die Messung des totalen Wirkungsquerschnitts:**
der Schlüssel zur modelunabhängigen Bestimmung der absoluten Kopplungen

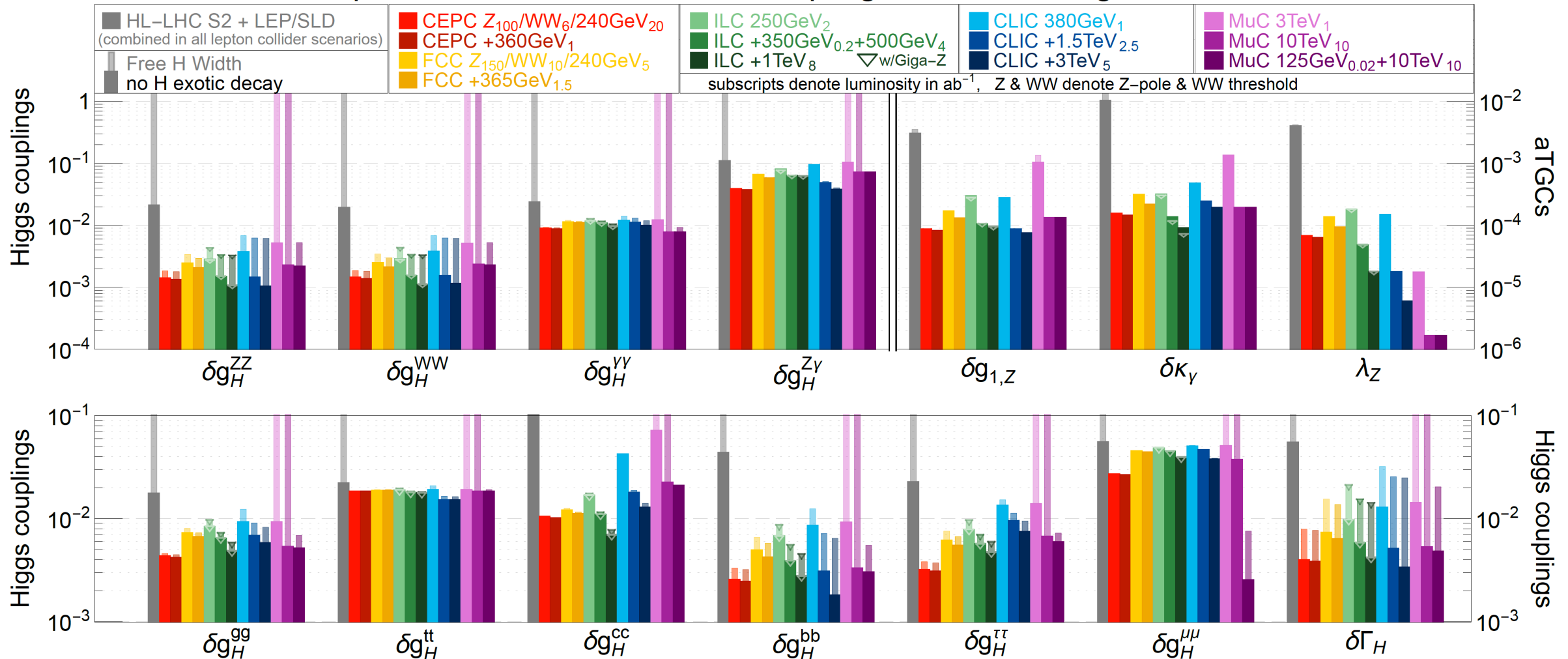
- messbar u
- nur an einer
- **bekannt!**
- ermöglicht



Viele, viele (hypothetische) Messungen - gemeinsam interpretiert

auf der Suche nach Abweichungen von den SM-Vorhersagen

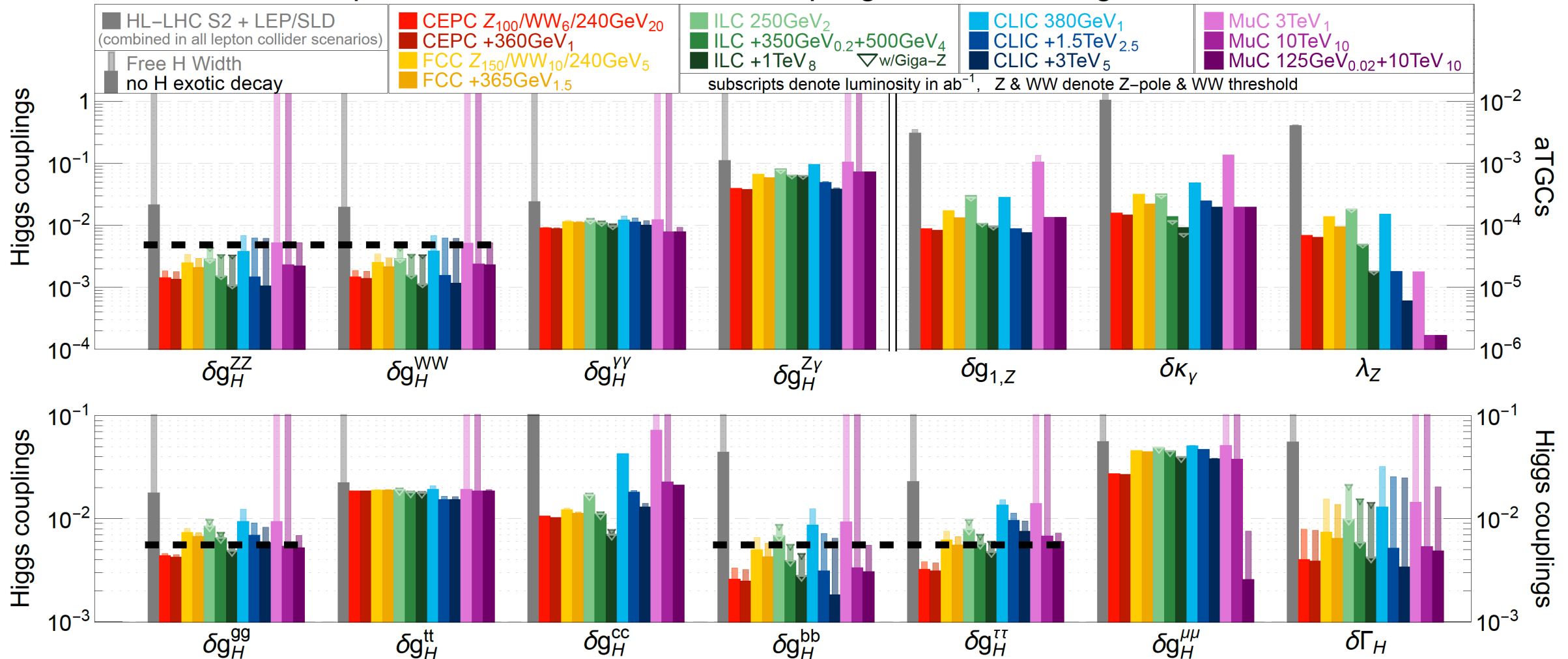
precision reach on effective couplings from SMEFT global fit



Viele, viele (hypothetische) Messungen - gemeinsam interpretiert

auf der Suche nach Abweichungen von den SM-Vorhersagen

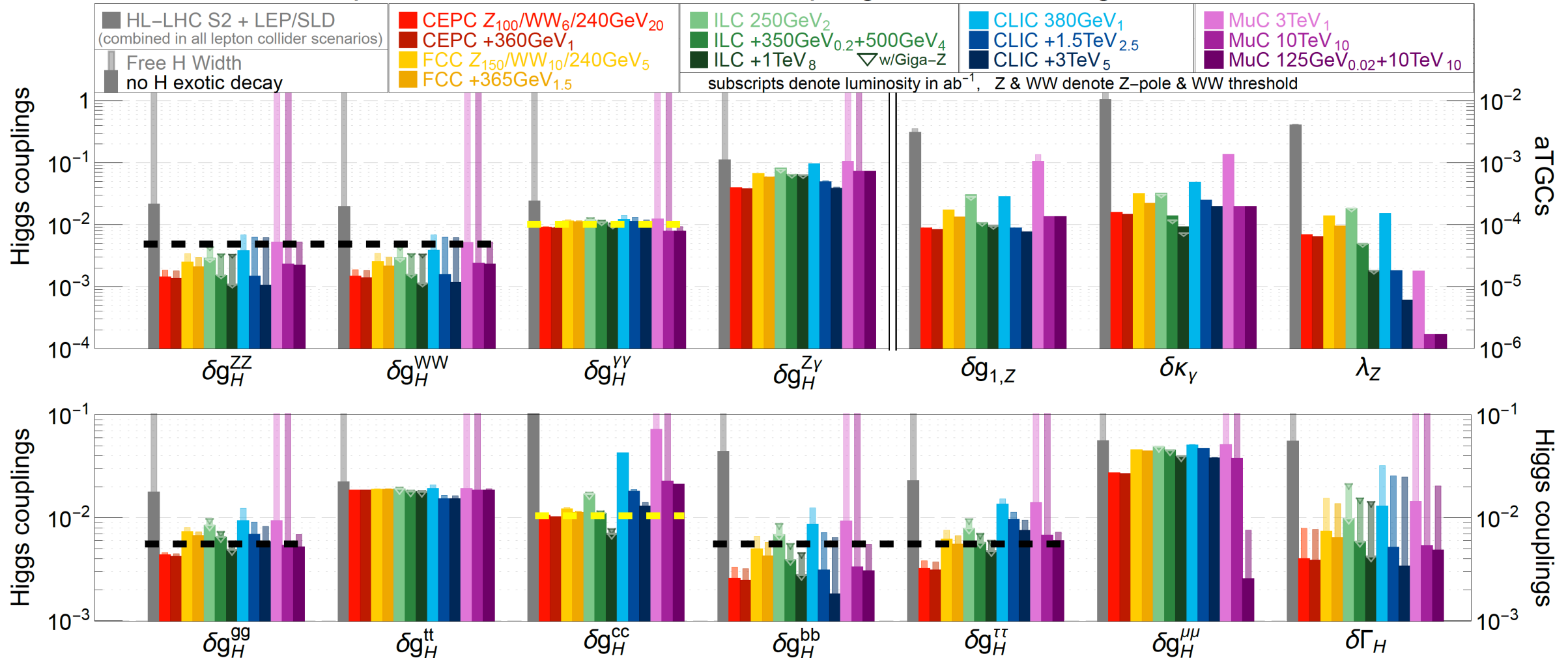
precision reach on effective couplings from SMEFT global fit



Viele, viele (hypothetische) Messungen - gemeinsam interpretiert

auf der Suche nach Abweichungen von den SM-Vorhersagen

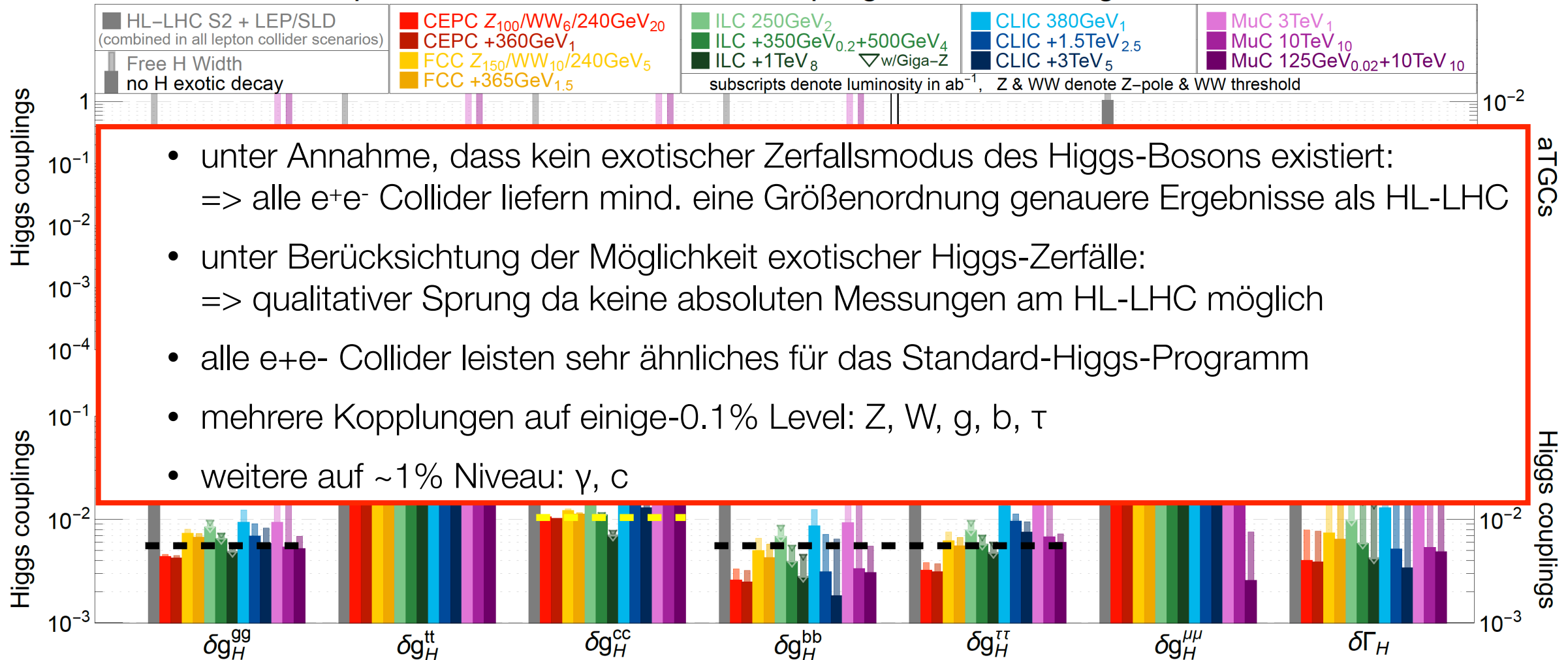
precision reach on effective couplings from SMEFT global fit



Viele, viele (hypothetische) Messungen - gemeinsam interpretiert

auf der Suche nach Abweichungen von den SM-Vorhersagen

precision reach on effective couplings from SMEFT global fit



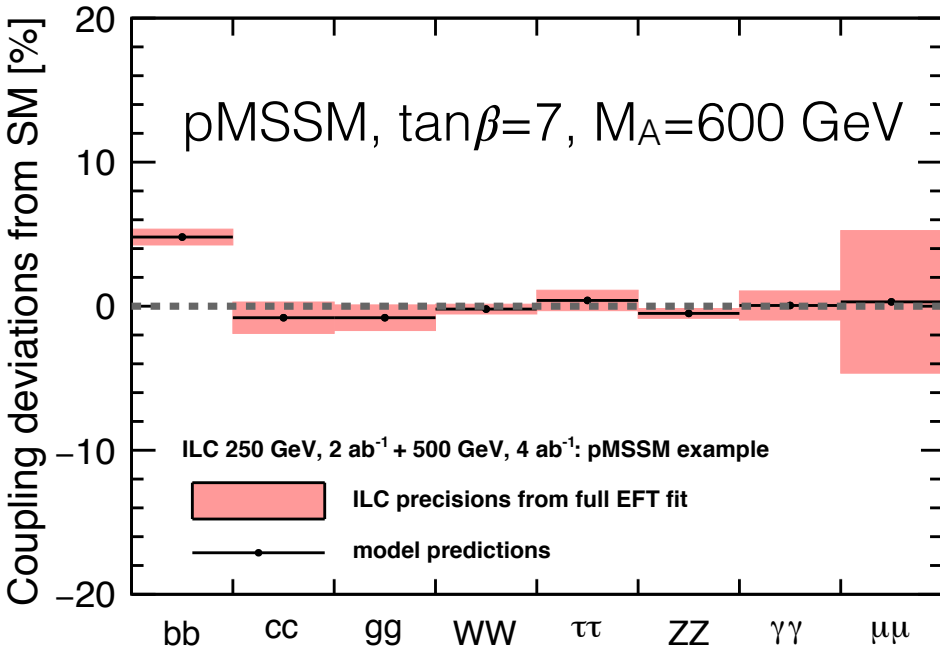
- unter Annahme, dass kein exotischer Zerfallsmodus des Higgs-Bosons existiert:
=> alle e⁺e⁻ Collider liefern mind. eine Größenordnung genauere Ergebnisse als HL-LHC
- unter Berücksichtigung der Möglichkeit exotischer Higgs-Zerfälle:
=> qualitativer Sprung da keine absoluten Messungen am HL-LHC möglich
- alle e⁺e⁻ Collider leisten sehr ähnliches für das Standard-Higgs-Programm
- mehrere Kopplungen auf einige-0.1% Level: Z, W, g, b, τ
- weitere auf ~1% Niveau: γ, c

Der Fingerabdruck des Higgs-Boson

Ist es **WIRKLICH** genau das SM Higgs-Boson?

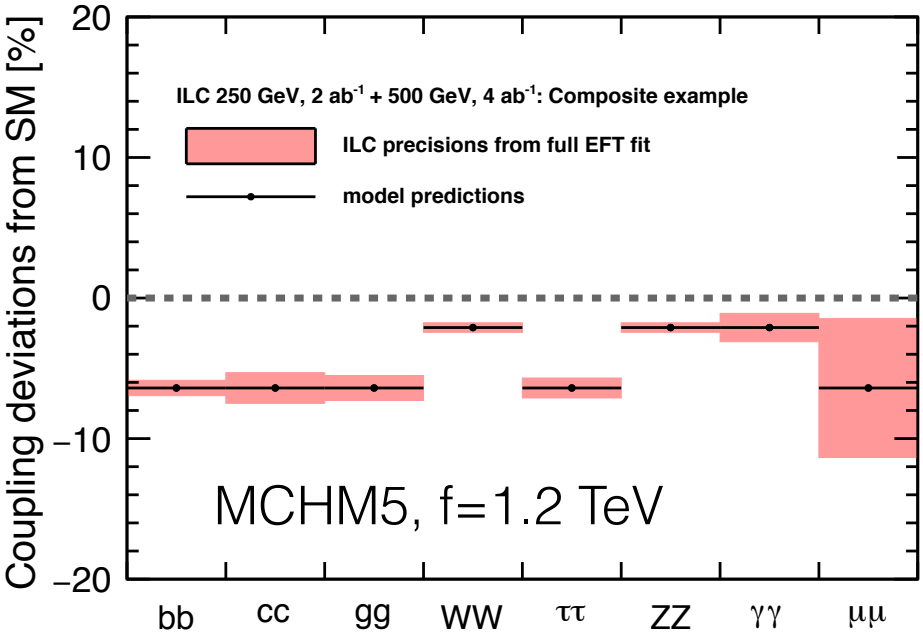
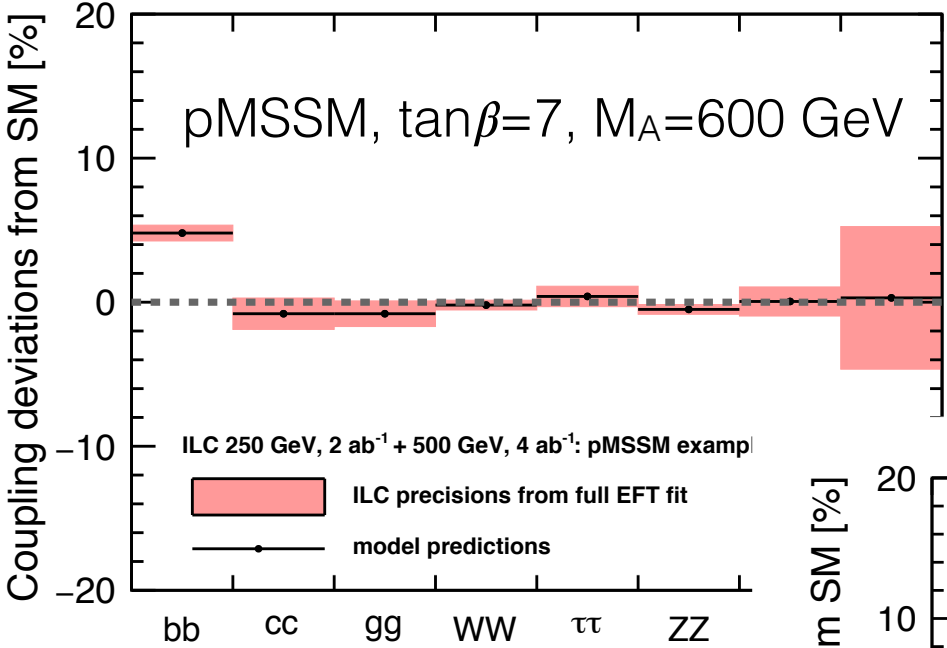
Der Fingerabdruck des Higgs-Boson

Ist es WIRKLICH genau das SM Higgs-Boson?



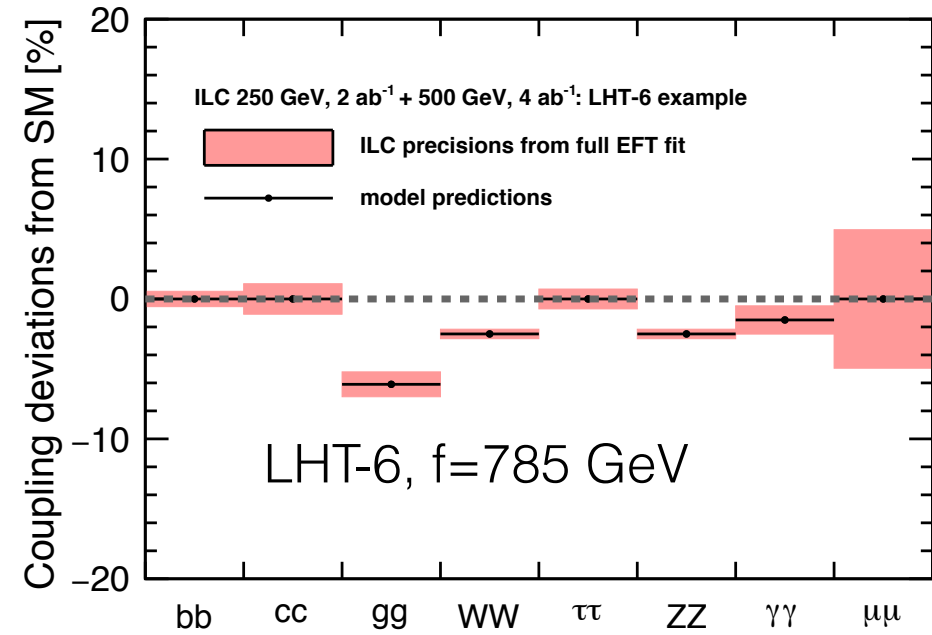
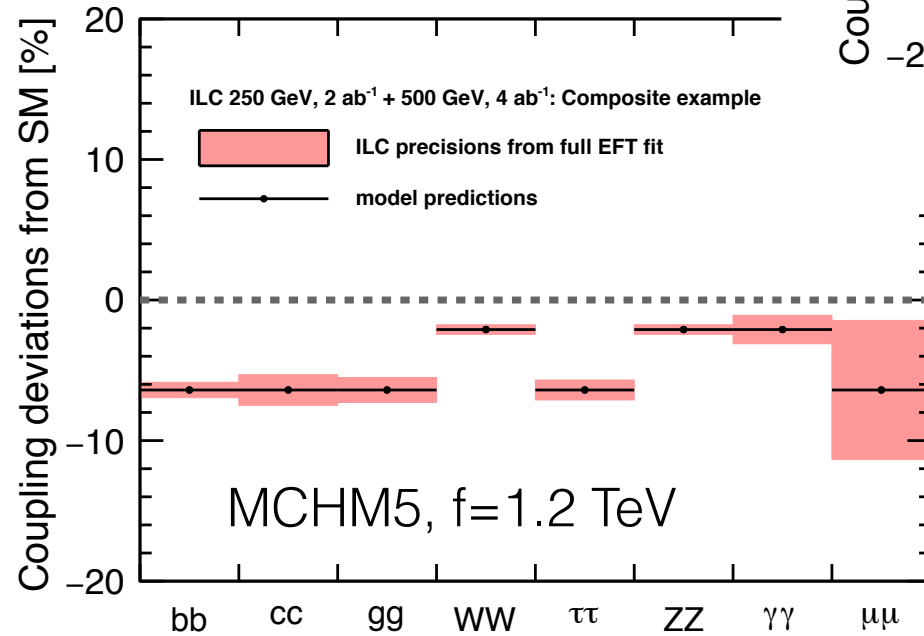
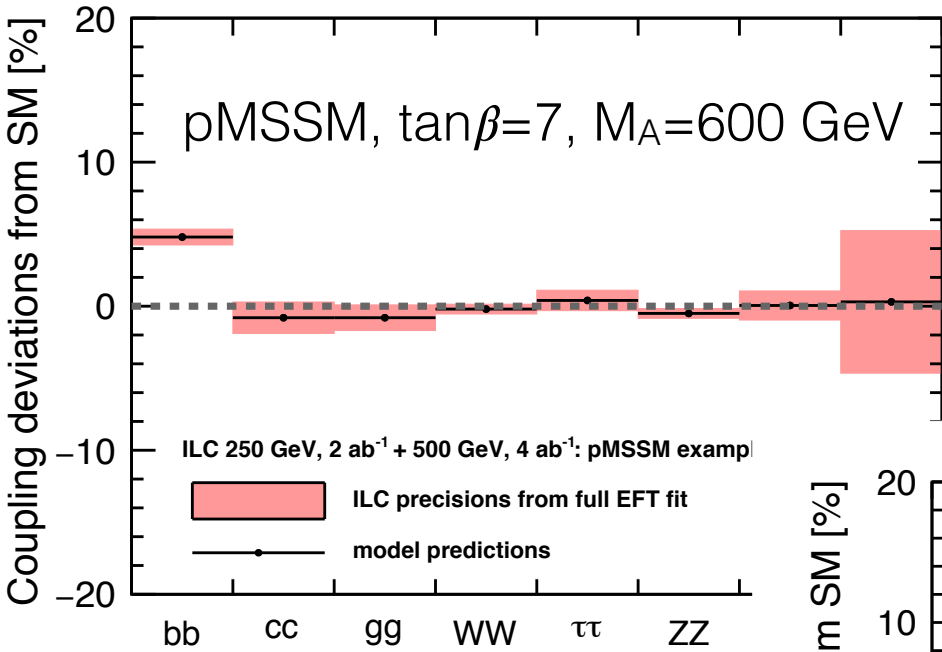
Der Fingerabdruck des Higgs-Boson

Ist es WIRKLICH genau das SM Higgs-Boson?



Der Fingerabdruck des Higgs-Boson

Ist es WIRKLICH genau das SM Higgs-Boson?



Herausforderungen für Detektortechnologie

im Vergleich zum LHC

Um **physicalische Ziele** zu erreichen:

- **p_t Auflösung** (totaler ZH Wirkungsquerschnitt)

$$\sigma(1/p_t) = 2 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-1} \oplus 1 \times 10^{-3} / (p_t \sin^{1/2} \theta) \approx \text{CMS} / 40$$

- **Vertexposition** ($H \rightarrow bb/cc/\tau\tau$)

$$\sigma(d_0) < 5 \oplus 10 / (p[\text{GeV}] \sin^{3/2} \theta) \mu\text{m} \approx \text{CMS} / 4$$

- **Jetenergie-Auflösung** ($H \rightarrow \text{invisible}$) 3-4%

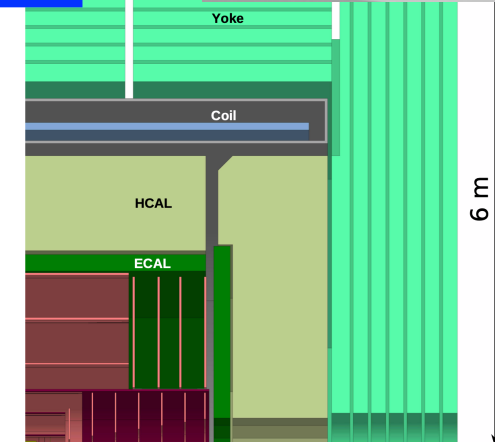
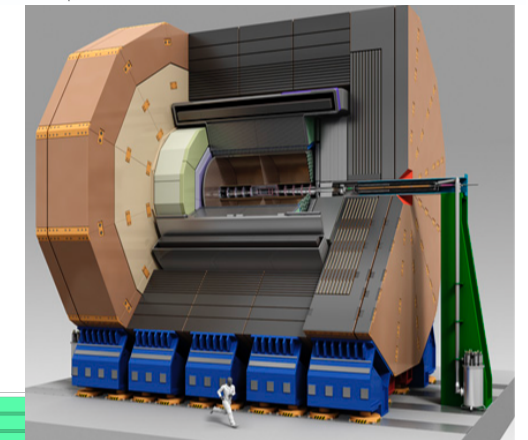
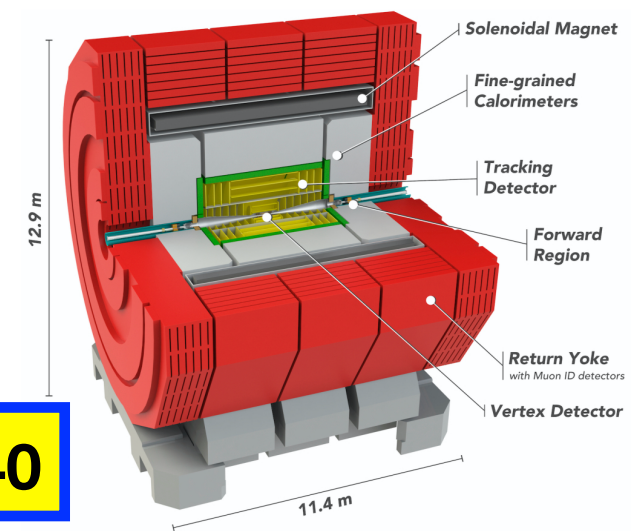
$$\approx \text{ATLAS} / 2$$

- **Hermitizität** ($H \rightarrow \text{invis, BSM}$) $\theta_{\min} = 5 \text{ mrad}$

$$\approx \text{ATLAS} / 3$$

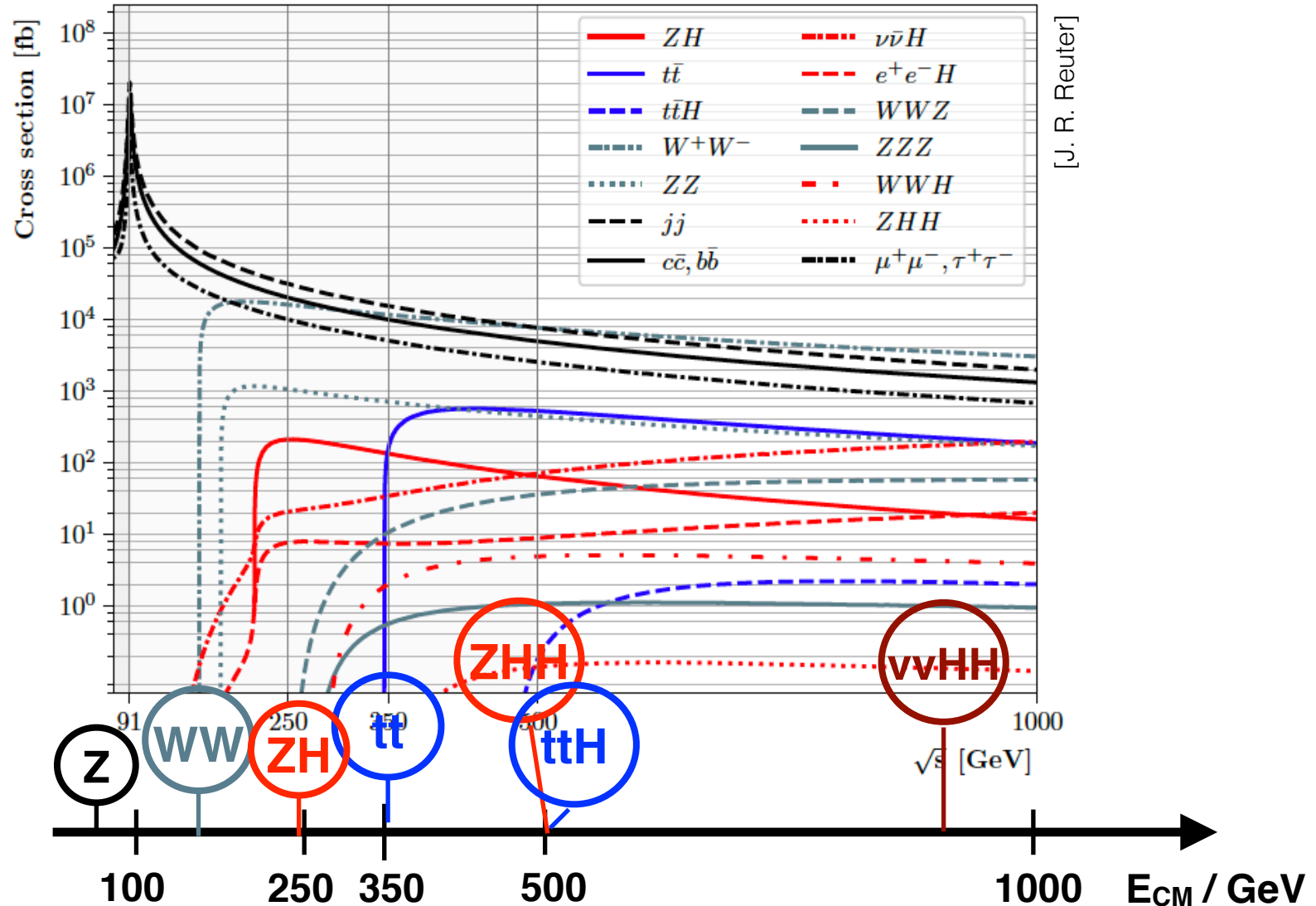
Andorderungen an die **Detektoren** z.B.:

- **low mass tracker**
eg VTX: 0.15% rad. length / layer)
- **high granularity calorimeters**
optimised for particle flow



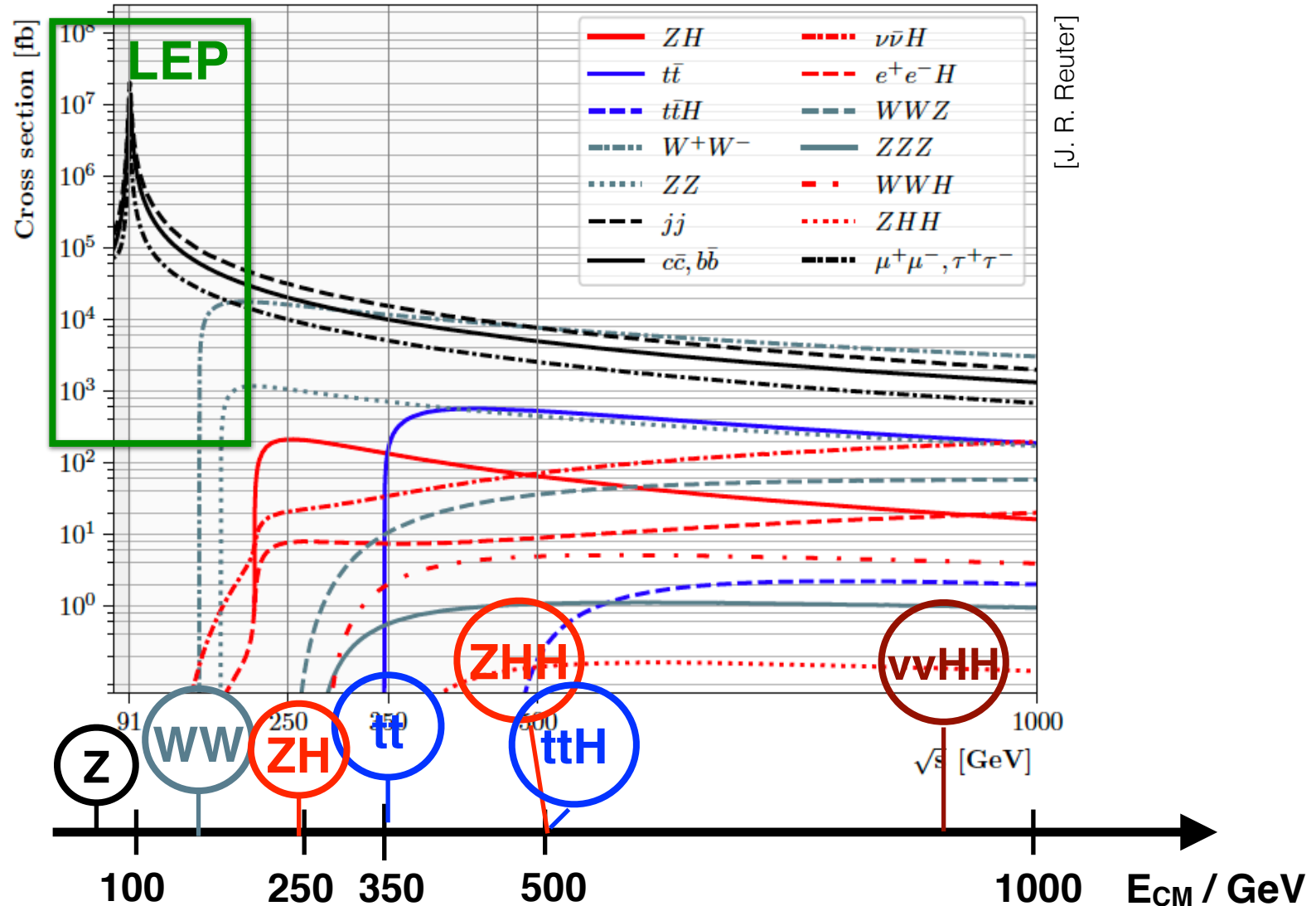
Und über die Higgs-Fabrik hinaus?

Mehrere interessante Möglichkeiten...



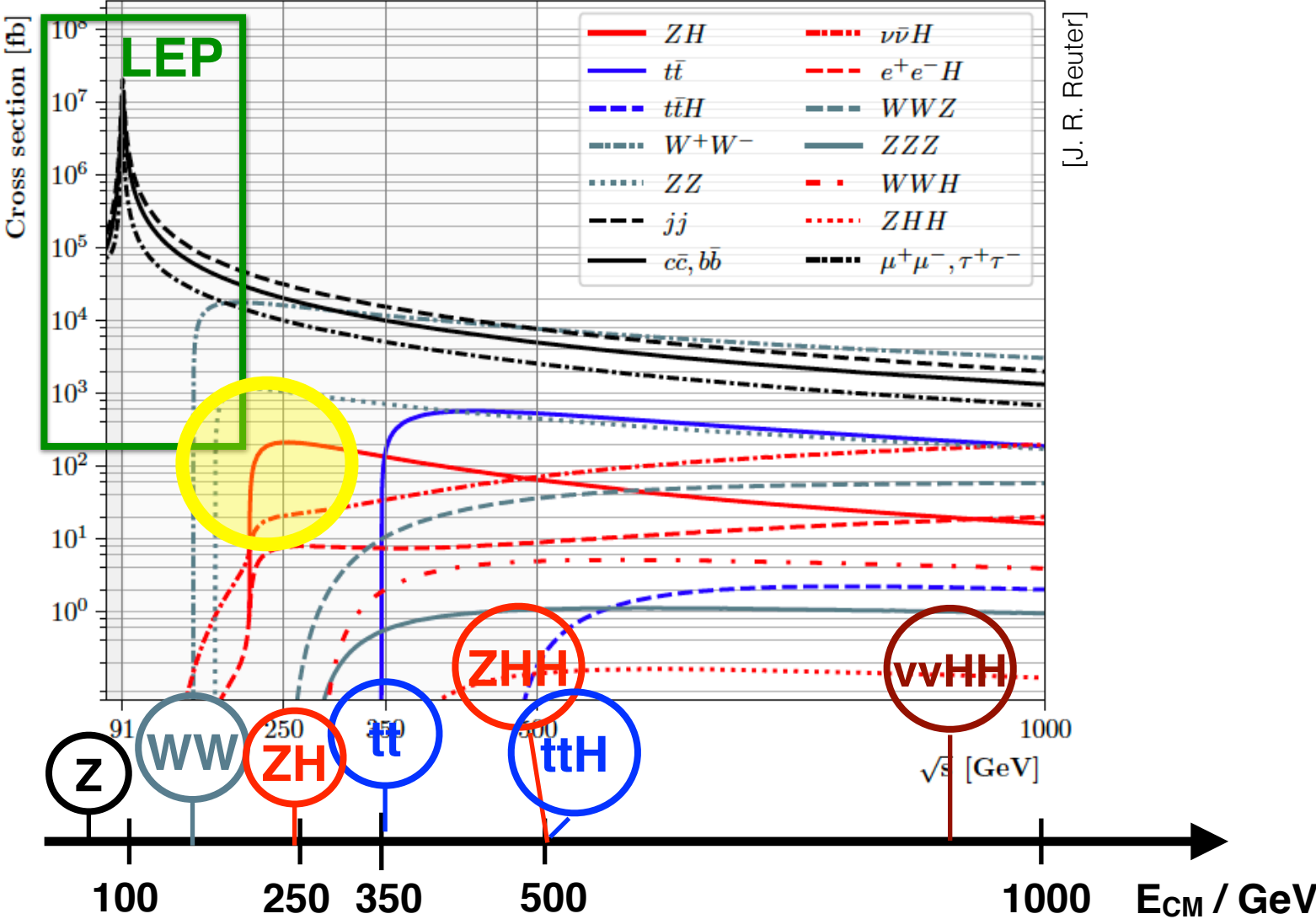
Und über die Higgs-Fabrik hinaus?

Mehrere interessante Möglichkeiten...



Und über die Higgs-Fabrik hinaus?

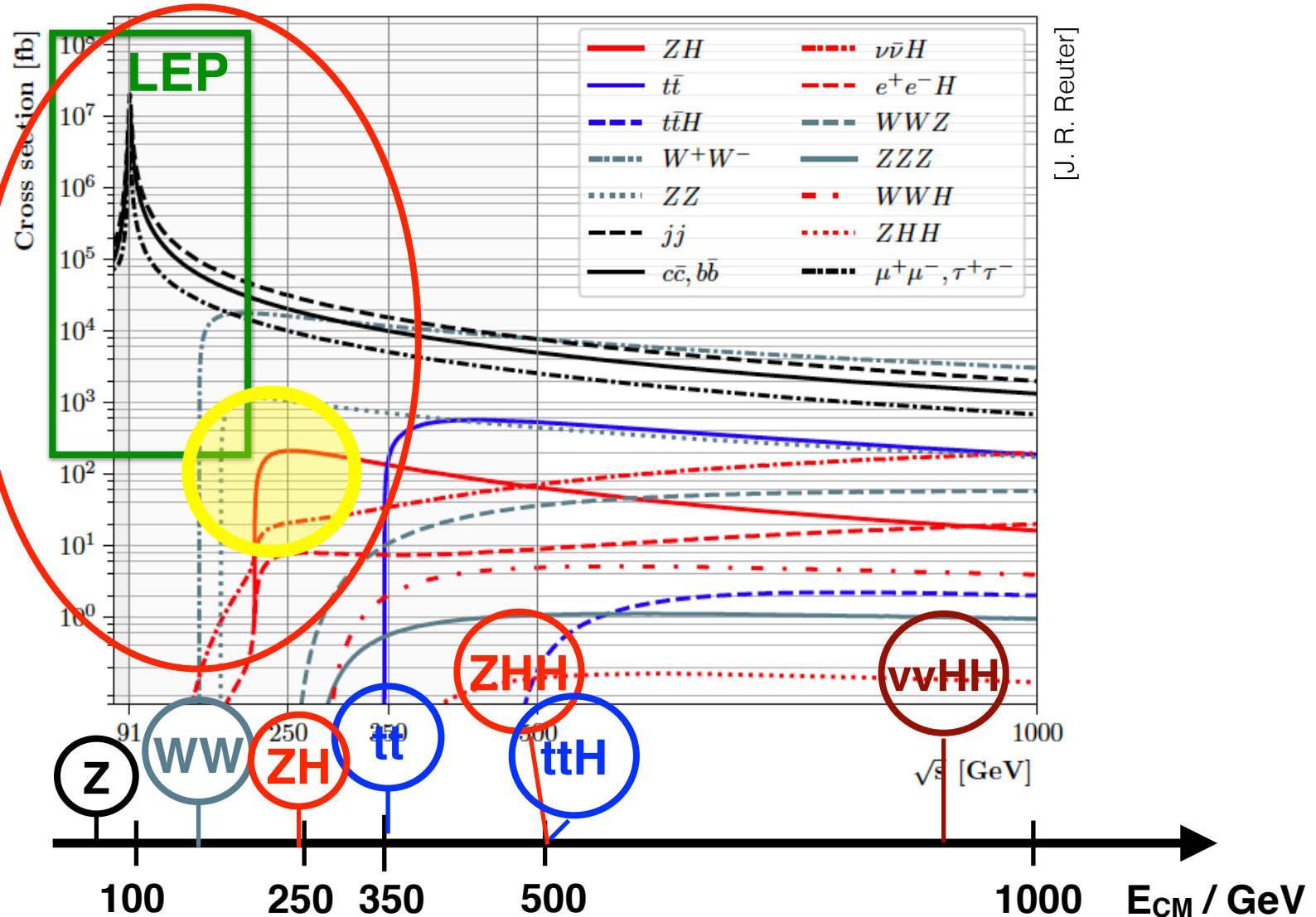
Mehrere interessante Möglichkeiten...



Und über die Higgs-Fabrik hinaus?

Mehrere interessante Möglichkeiten...

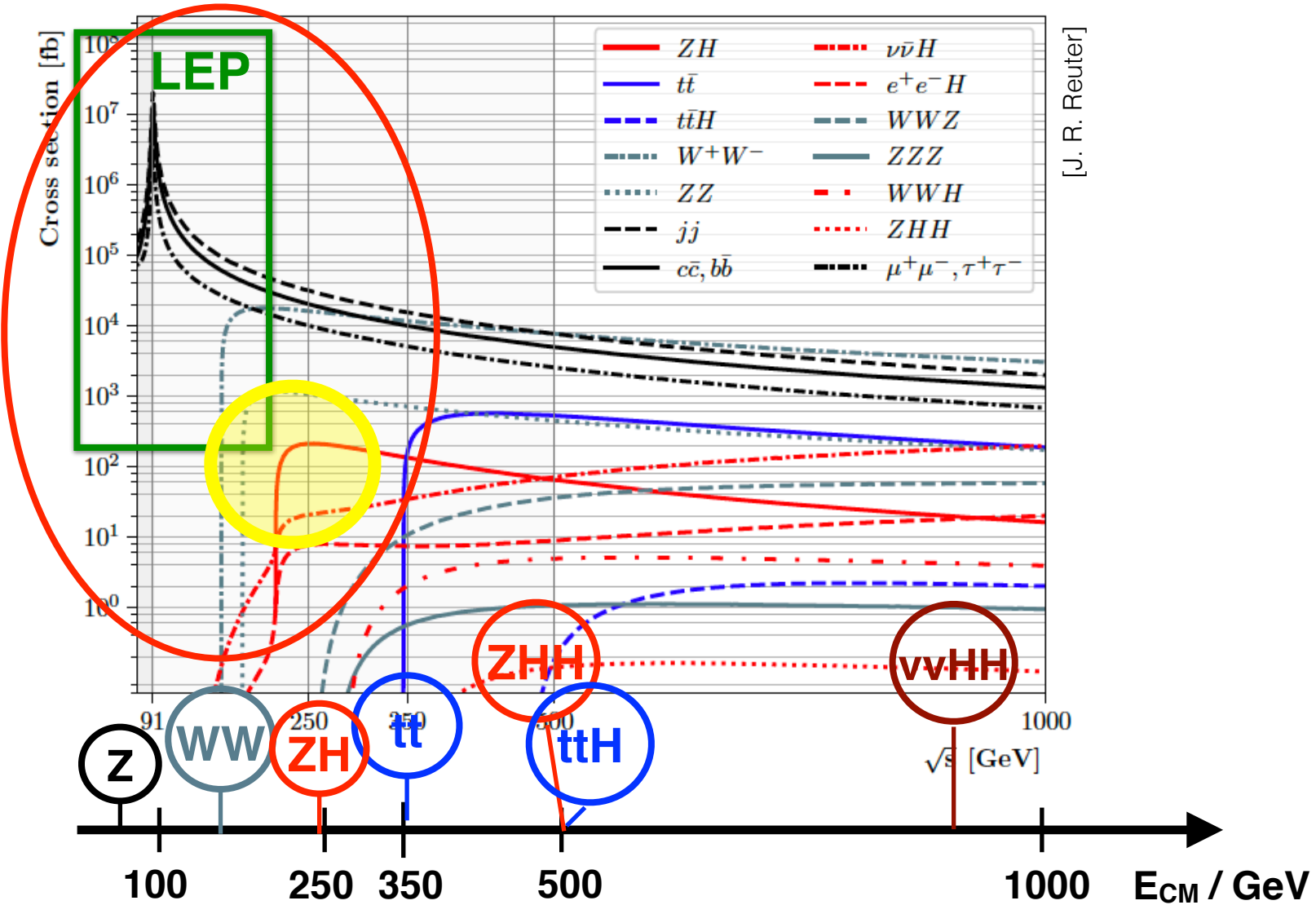
Alle vorgeschlagenen e^+e^- Projekte



Und über die Higgs-Fabrik hinaus?

Mehrere interessante Möglichkeiten...

Alle vorgeschlagenen e^+e^- Projekte

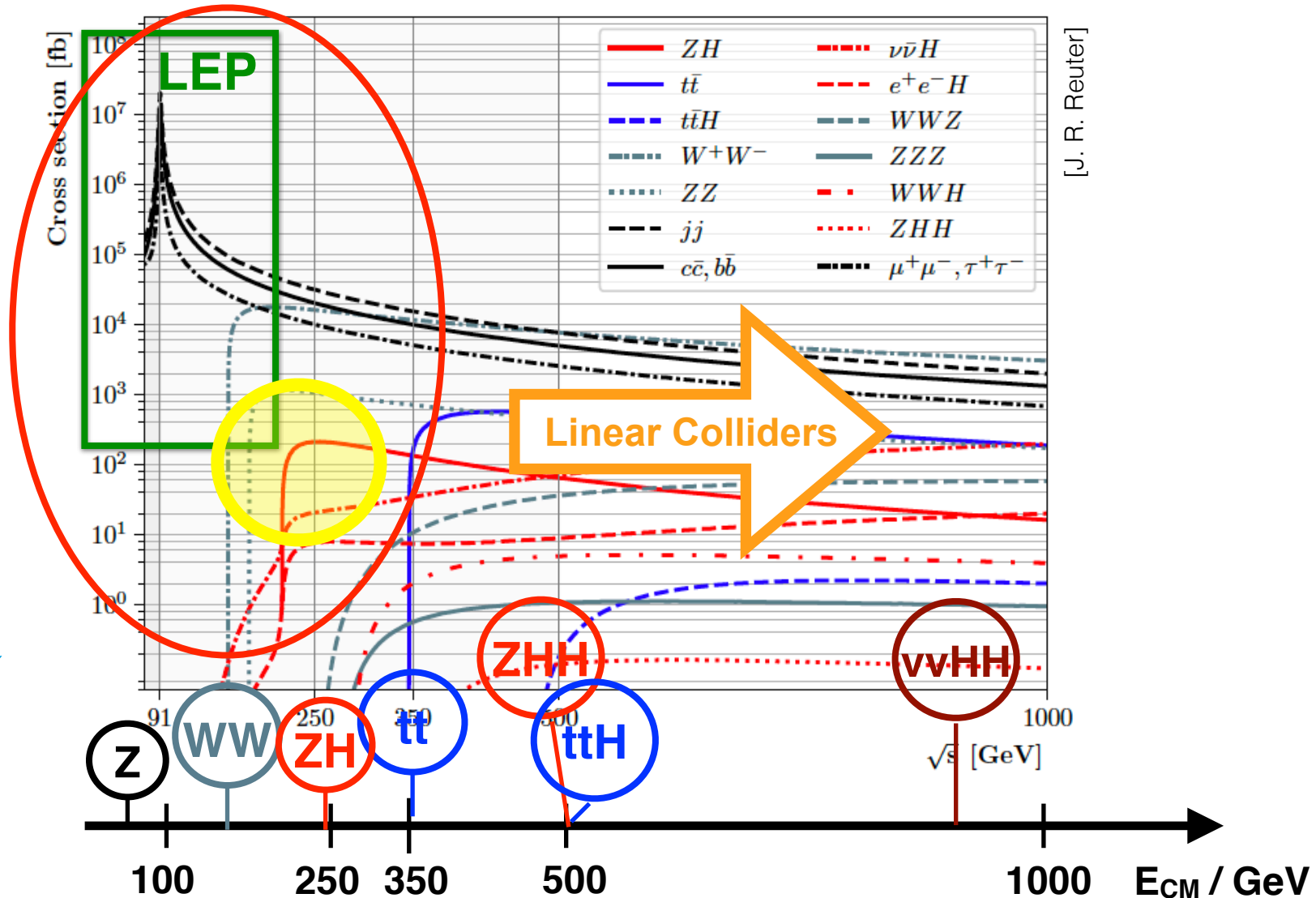


[J. R. Reuter]

Und über die Higgs-Fabrik hinaus?

Mehrere interessante Möglichkeiten...

Alle vorgeschlagenen e^+e^- Projekte

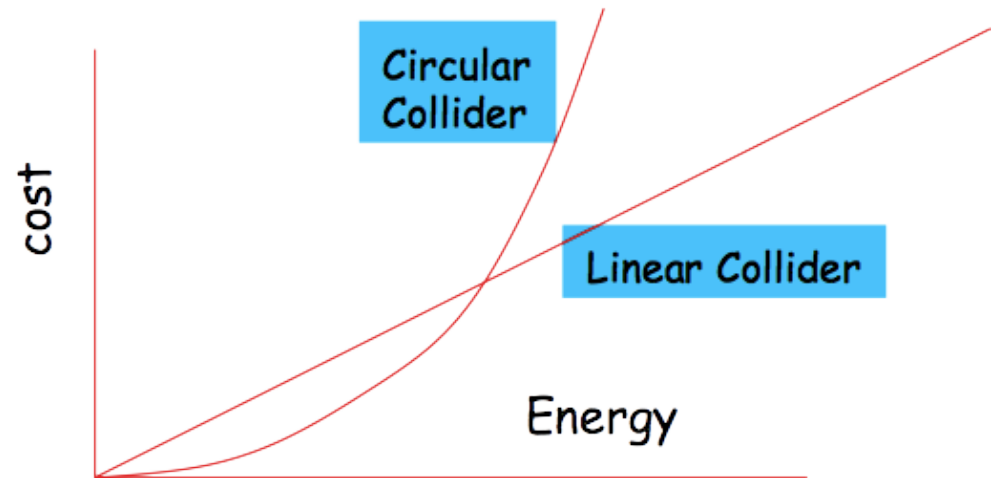


[J. R. Reuter]

Linear oder zirkular?

beschleunigte Ladungen emittieren Strahlung....

- **Synchrotronstrahlung:**
 - $\Delta E \sim (E^4 / m^4 R)$ pro Umlauf \Rightarrow 2 GeV at LEP2
- **Kosten im Hochenergielimit:**
 - **zirkular** : $$$ \sim a R + b \Delta E \sim a R + b (E^4 / m^4 R)$
 Optimierung $\Rightarrow R \sim E^2 \Rightarrow $$ \sim E^2$
 - **linear** : $$$ \sim L$, with $L \sim E \Rightarrow $$ \sim E$



LIMITATIONS ON PERFORMANCE OF e^+e^- STORAGE RINGS AND
 LINEAR COLLIDING BEAM SYSTEMS AT HIGH ENERGY

J.-E. Augustin^{*}, N. Dikanski[†], Ya. Derbenev[†], J. Rees[‡],
 B. Richter[‡], A. Skrinski[†], M. Tigner^{**}, and H. Wiedemann[‡]

Introduction

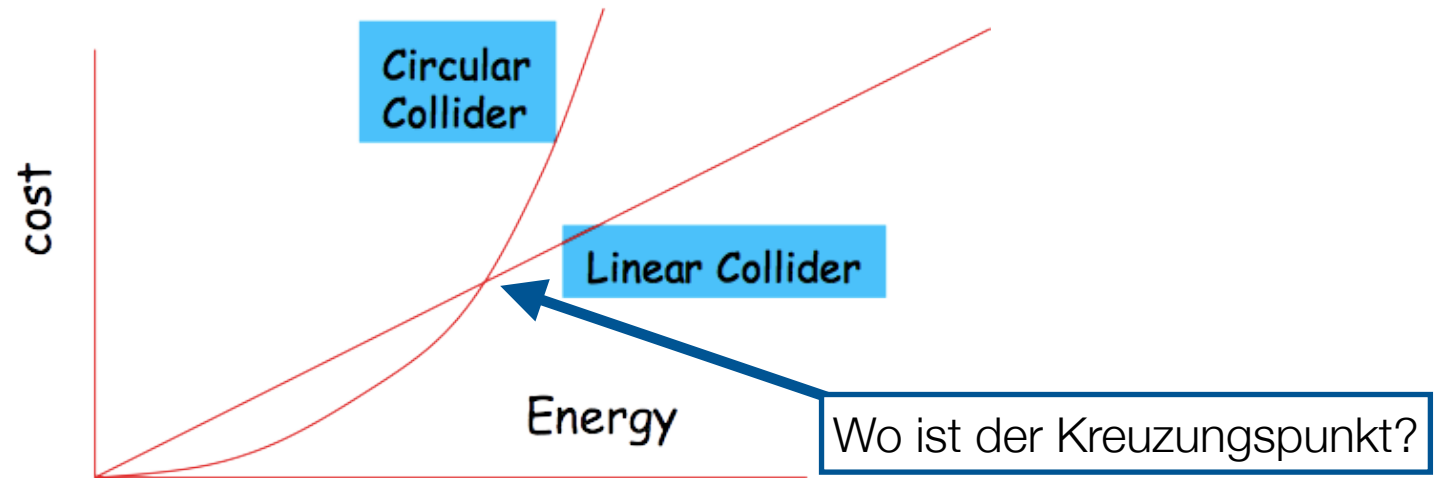
This note is the report of working Group I (J. Rees - Group Leader). We were assisted at times by U. Amaldi and E. Keil of CERN. We concerned ourselves primarily with the technical limitations which might present themselves to those planning a new and higher-energy electron-positron colliding-beam facility in a future era in which, it was presumed, a 70-GeV to 100-GeV LEP-like facility would already exist. In such an era, we reasoned, designers would be striving for center-of-mass energies of at least 700-GeV to 1-TeV. Two different approaches to this goal immediately came to the fore: one, a storage ring based on the principles of PEP, PETRA, and LEP and the other, a system in which a pair of linear accelerators are aimed at one another so that their beams will collide. We realized early in the study that a phenomenon which has been negligible in electron-positron systems designed to date would become important at these higher energies - synchrotron radiation from a particle being deflected by the collective electromagnetic field of the opposing bunch - and we dubbed this phenomenon "beam-strahlung." During the rest of the week we investigated the scaling laws for these two colliding-beam systems taking beam-strahlung into consideration.

1) allererstes Papier zum Thema: M.Tigner 1965

Linear oder zirkular?

beschleunigte Ladungen emittieren Strahlung....

- **Synchrotronstrahlung:**
 - $\Delta E \sim (E^4 / m^4 R)$ pro Umlauf \Rightarrow 2 GeV at LEP2
- **Kosten im Hochenergielimit:**
 - **zirkular** : $$$ \sim a R + b \Delta E \sim a R + b (E^4 / m^4 R)$
 Optimierung $\Rightarrow R \sim E^2 \Rightarrow $$ \sim E^2$
 - **linear** : $$$ \sim L$, with $L \sim E \Rightarrow $$ \sim E$



LIMITATIONS ON PERFORMANCE OF e^+e^- STORAGE RINGS AND
 LINEAR COLLIDING BEAM SYSTEMS AT HIGH ENERGY

J.-E. Augustin^{*}, N. Dikanski[†], Ya. Derbenev[†], J. Rees[‡],
 B. Richter[‡], A. Skrinski[†], M. Tigner^{**}, and H. Wiedemann[#]

Introduction

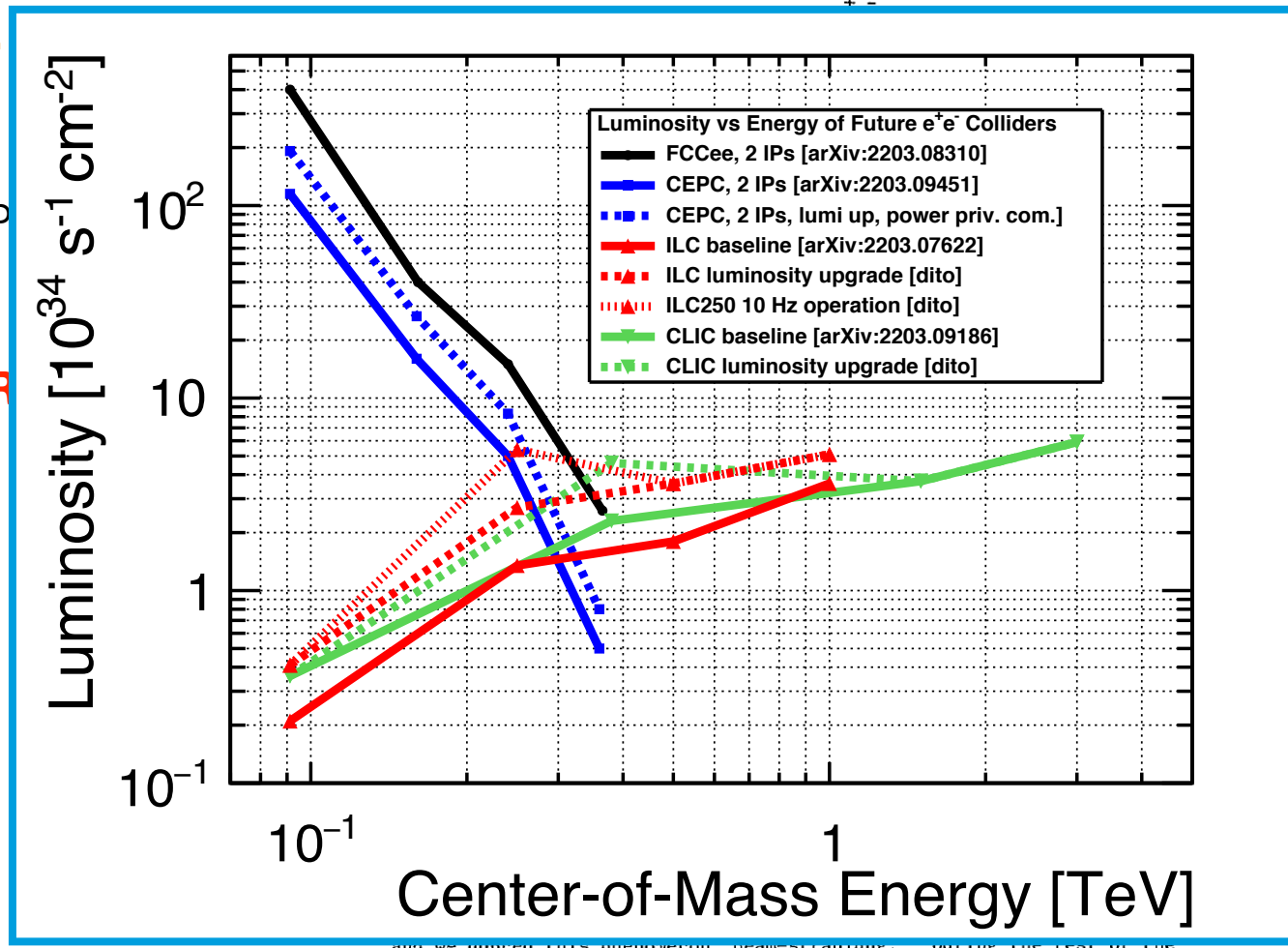
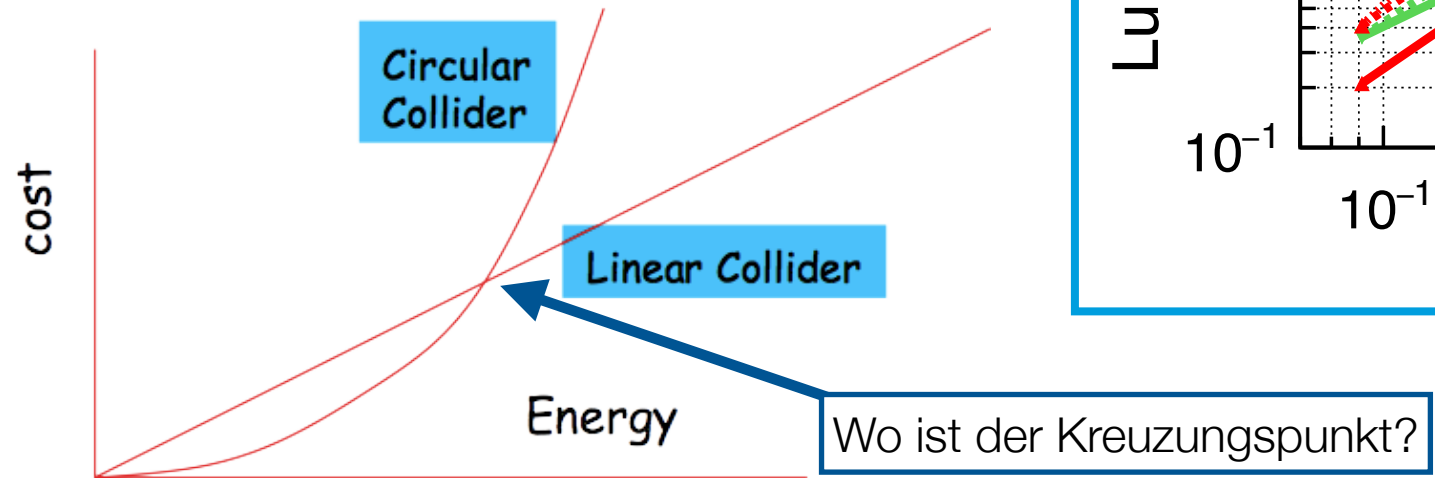
This note is the report of working Group I (J. Rees - Group Leader). We were assisted at times by U. Amaldi and E. Keil of CERN. We concerned ourselves primarily with the technical limitations which might present themselves to those planning a new and higher-energy electron-positron colliding-beam facility in a future era in which, it was presumed, a 70-GeV to 100-GeV LEP-like facility would already exist. In such an era, we reasoned, designers would be striving for center-of-mass energies of at least 700-GeV to 1-TeV. Two different approaches to this goal immediately came to the fore: one, a storage ring based on the principles of PEP, PETRA, and LEP and the other, a system in which a pair of linear accelerators are aimed at one another so that their beams will collide. We realized early in the study that a phenomenon which has been negligible in electron-positron systems designed to date would become important at these higher energies - synchrotron radiation from a particle being deflected by the collective electromagnetic field of the opposing bunch - and we dubbed this phenomenon "beam-strahlung." During the rest of the week we investigated the scaling laws for these two colliding-beam systems taking beam-strahlung into consideration.

1) allererstes Papier zum Thema: M.Tigner 1965

Linear oder zirkular?

beschleunigte Ladungen emittieren Strahlung....

- **Synchrotronstrahlung:**
 - $\Delta E \sim (E^4 / m^4 R)$ pro Umlauf \Rightarrow 2 GeV at LEP
- **Kosten im Hochenergielimit:**
 - **zirkular** : $$$ \sim a R + b \Delta E \sim a R + b (E^4 / m^4 R)$
 Optimierung $\Rightarrow R \sim E^2 \Rightarrow $$ \sim E^2$
 - **linear** : $$$ \sim L$, with $L \sim E \Rightarrow $$ \sim E$



and we dubbed this phenomenon "beam-strahlung". During the rest of the week we investigated the scaling laws for these two colliding-beam systems taking beam-strahlung into consideration.

1) allererstes Papier zum Thema: M.Tigner 1965

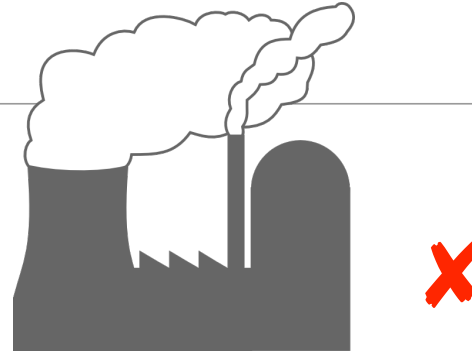
Nachhaltigkeit

2016

Zusätzliche Randbedingungen

- **Stromverbrauch:**

- öffentliche Akzeptanz für große Projekte gering wenn (nahezu) zusätzliches Kraftwerk erforderlich!



- **ILC-Design geprägt von einer *selbstaufgelegten* Obergrenze der Gesamtanschlussleistung:**

- **200 MW bei 500 GeV**
- **300 MW bei 1 TeV**



- **Kostenbewusstsein:**

- vom RDR zum TDR erfolgte kritische Überprüfung des Designs um die Kosten zu reduzieren
- value engineering
- Reduzierung der Leistung durch stärkere Fokussierung der Strahlen



- **am Ende des Tages: Luminosität ~ Leistung ~ Geld**

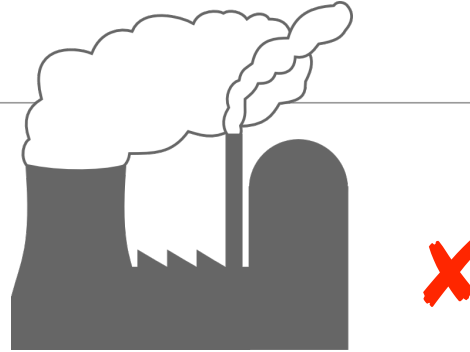
Nachhaltigkeit

2016

Zusätzliche Randbedingungen

- **Stromverbrauch:**

- öffentliche Akzeptanz für große Projekte gering wenn (nahezu) zusätzliches Kraftwerk erforderlich!
- **ILC-Design geprägt von einer *selbstaufgelegten* Obergrenze der Gesamtanschlussleistung:**
 - **200 MW bei 500 GeV**
 - **300 MW bei 1 TeV**



- **Kostenbewusstsein**

- vom RDR zum Design
- value engineering
- Reduzierung der Leistung durch stärkere Fokussierung der Strahlen

• Minimaler Ressourcen-Einsatz schon immer ein Design-Kriterium für ernsthafte Projekte
• Aber eine reine Reduktion des Energiebedarfs reicht nicht (mehr) aus
• Paradigmen-Wechsel:
=> Das nächste Collider-Projekt muss von grundauf nachhaltig gedacht werden!

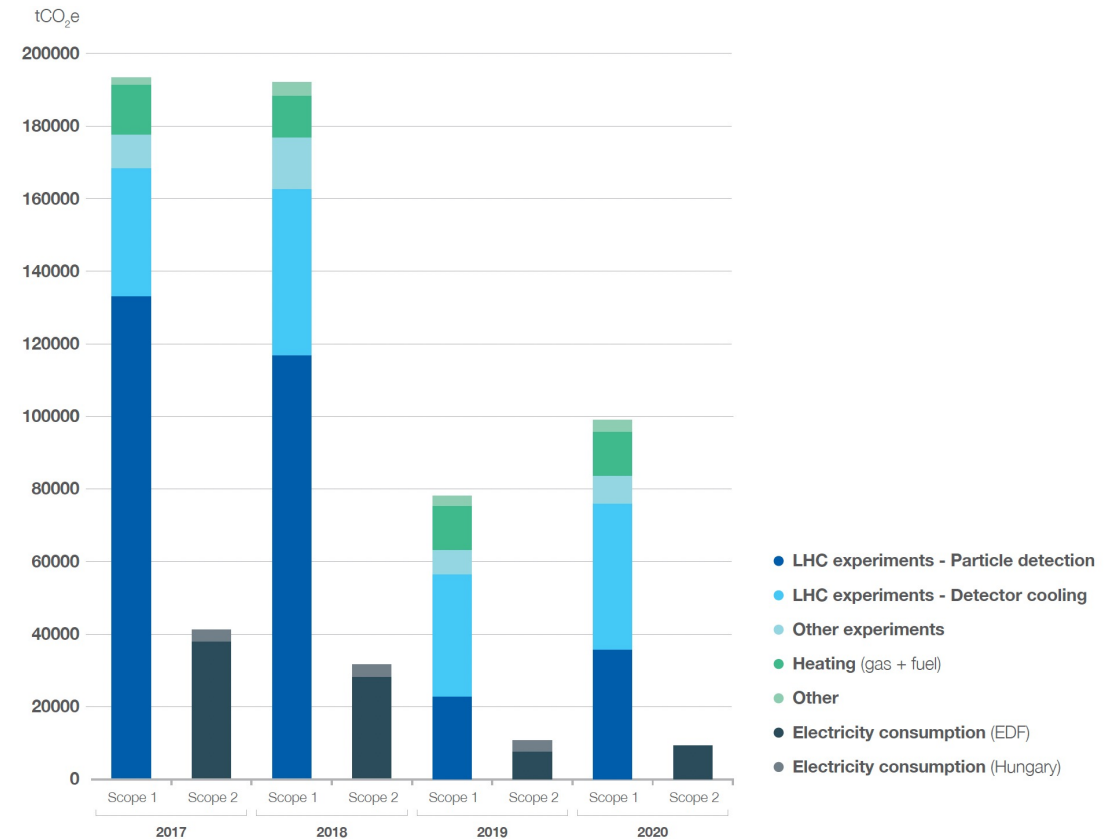
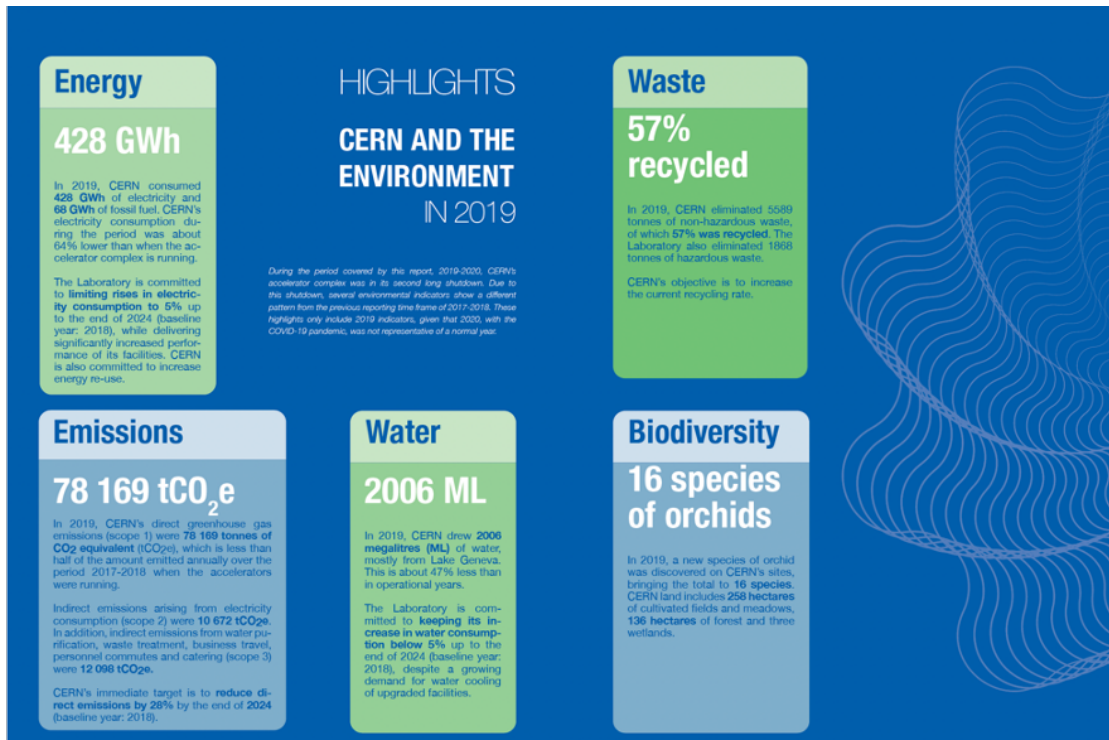


• **am Ende des Tages: Luminosität ~ Leistung ~ Geld**

... und heute: Nachhaltigkeit in Beschleunigerlaboren

Beispiel CERN

- CERN publiziert alle zwei Jahre einen Umweltbericht: <https://hse.cern/environment-report-2019-2020>
- Umwelt-Workshop 2022: <https://indico.cern.ch/event/1193771/>
- Entwickelt sich in Richtung
 - Systematisches Energiemanagement (ISO 500001)
 - Verantwortungsvolle Beschaffung (ISO 20400)



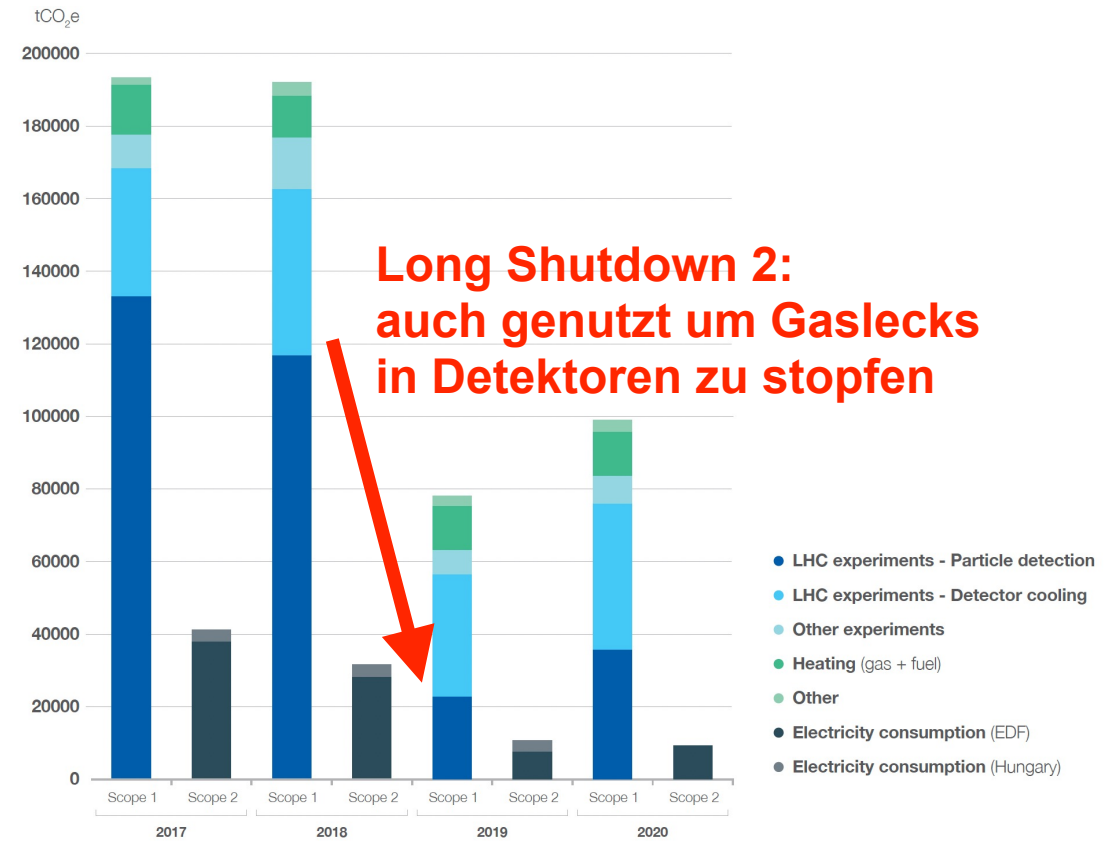
CERN SCOPE 1 AND SCOPE 2 EMISSIONS FOR 2017-2020 BY CATEGORY.

Other includes air conditioning, electrical insulation, emergency generators and CERN vehicle fleet fuel consumption. Emission factors for electricity: EDF Bilan des émissions de GES 2002-2020 for EDF and Bilan Carbone® V8 for Hungary.

... und heute: Nachhaltigkeit in Beschleunigerlaboren

Beispiel CERN

- CERN publiziert alle zwei Jahre einen Umweltbericht: <https://hse.cern/environment-report-2019-2020>
- Umwelt-Workshop 2022: <https://indico.cern.ch/event/1193771/>
- Entwickelt sich in Richtung
 - Systematisches Energiemanagement (ISO 500001)
 - Verantwortungsvolle Beschaffung (ISO 20400)



CERN SCOPE 1 AND SCOPE 2 EMISSIONS FOR 2017-2020 BY CATEGORY.

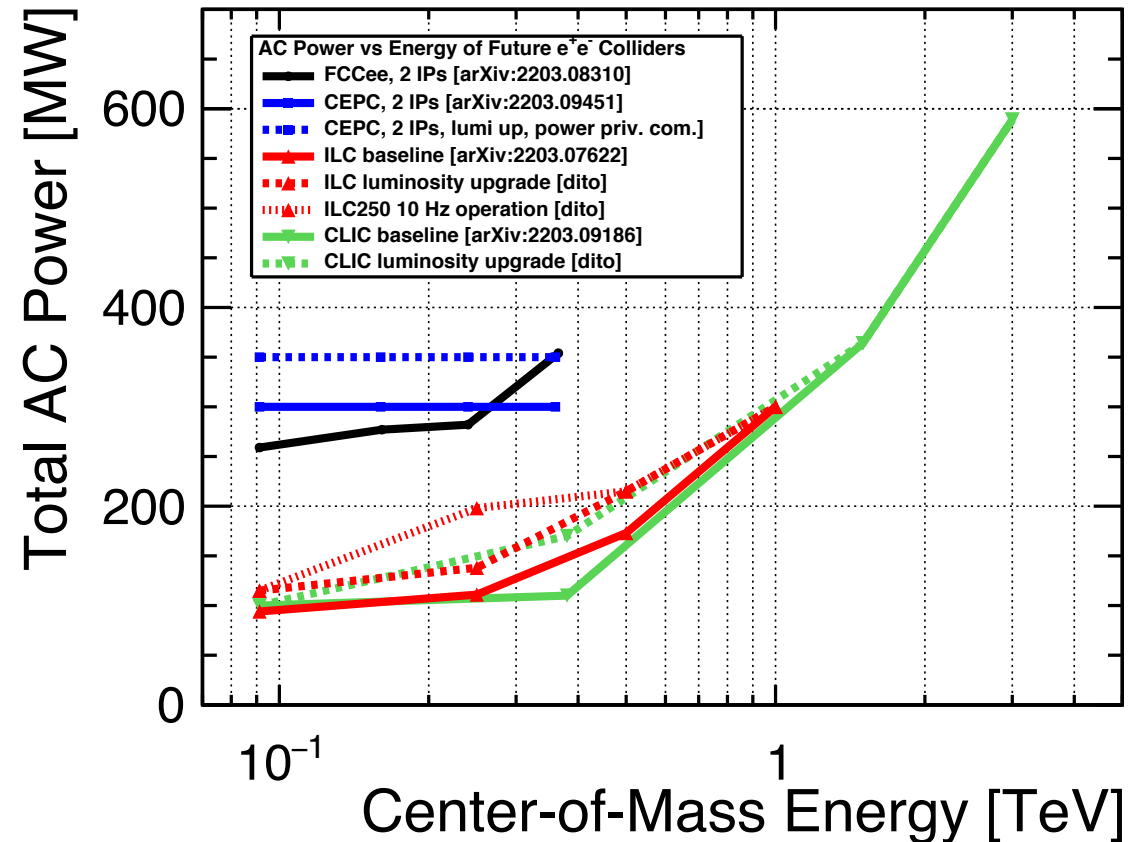
Other includes air conditioning, electrical insulation, emergency generators and CERN vehicle fleet fuel consumption. Emission factors for electricity: EDF Bilan des émissions de GES 2002-2020 for EDF and Bilan Carbone® V8 for Hungary.

... und morgen: Nachhaltigkeit von neuen Beschleunigern

Weit mehr als CO₂-Äquivalente...

Minimierung des Gesamtressourcen-Einsatzes um physikalische Ziele zu erreichen

- Betrieb -> **elektrische Gesamtanschlussleistung:**
 - **minimieren:**
 - selbst wenn - oder gerade wenn - in 10-20 Jahren aller Strom aus regenerativen Energiequellen kommt, so steht doch für Forschung benötigter Strom in Konkurrenz zu allen anderen Anwendungen!
 - alle Komponenten auf Energieeffizienz optimieren
 - **flexibilisieren:**
 - muss mit variabler Verfügbarkeit von regenerativem Strom umgehen können
 - können z.B. Kühlkapazitäten gesellschaftlich sinnvoll als Zwischenspeicher genutzt werden?
- Tunnelbau, Beton etc:
 - **Tunnellänge so kurz wie möglich**
 - CO₂-armen Beton verwenden
 - Einsatz Seltener Erden und anderer problematischer Stoffe vermeiden

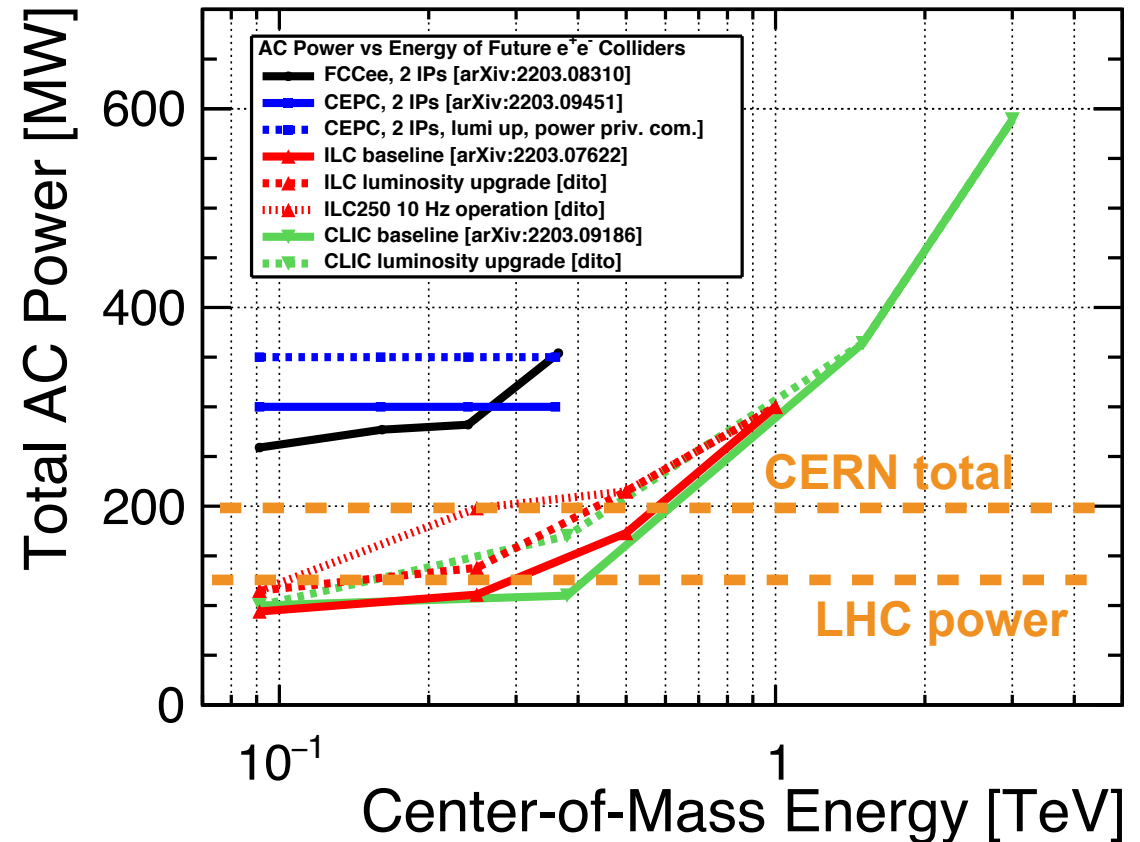


... und morgen: Nachhaltigkeit von neuen Beschleunigern

Weit mehr als CO₂-Äquivalente...

Minimierung des Gesamtressourcen-Einsatzes um physikalische Ziele zu erreichen

- Betrieb -> **elektrische Gesamtanschlussleistung:**
 - **minimieren:**
 - selbst wenn - oder gerade wenn - in 10-20 Jahren aller Strom aus regenerativen Energiequellen kommt, so steht doch für Forschung benötigter Strom in Konkurrenz zu allen anderen Anwendungen!
 - alle Komponenten auf Energieeffizienz optimieren
 - **flexibilisieren:**
 - muss mit variabler Verfügbarkeit von regenerativem Strom umgehen können
 - können z.B. Kühlkapazitäten gesellschaftlich sinnvoll als Zwischenspeicher genutzt werden?
- Tunnelbau, Beton etc:
 - **Tunnellänge so kurz wie möglich**
 - CO₂-armen Beton verwenden
 - Einsatz Seltener Erden und anderer problematischer Stoffe vermeiden



3. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

...und Ausblick

- Das Higgs-Boson ist ein einzigartiges Teilchen und von besonderer Bedeutung für die Frage, woher wir kommen und warum es uns gibt
- Wir wissen, dass es existiert, aber wir verstehen nichts über die tieferen Zusammenhänge rund um das Higgs-Boson, die letztlich unsere Existenz ermöglichen
- Das nächste große Ziel der Teilchenphysik ist es, das Higgs-Boson mit äußerster Präzision und möglichst vorurteilsfrei zu vermessen
- Dazu braucht man einen neuen Elektron-Positron-Collider, der frühestens in ca 15 Jahren Daten nehmen könnte - für mindestens ca 20 Jahre
- Es gibt mehrere Vorschläge, und in den nächsten 3-5 Jahren erhofft man eine Entscheidung
- Bis dahin gilt es, durch Berechnungen, Simulationen und Technologie-Entwicklung diese Entscheidung auf eine solide Basis zu stellen - es gibt keinen zweiten Versuch!
- Neben allen technologischen Herausforderungen spielt Nachhaltigkeit eine große Rolle bei der Planung eines solchen Großprojektes
- Das Universum zu verstehen ist ein Generationenprojekt - nur gemeinsam können wir die nächste Etappe erreichen!

Zusammenfassung

...und Ausblick

- Das Higgs-Boson ist ein einzigartiges Teilchen und von besonderer Bedeutung für die Frage, woher wir kommen und warum es uns gibt
- Wir wissen, dass es existiert, aber wir verstehen nichts über die tieferen Zusammenhänge rund um das Higgs-Boson, die letztlich unsere Existenz ermöglichen
- Das nächste große Ziel der Teilchenphysik ist es, das Higgs-Boson mit äußerster Präzision und möglichst vorurteilsfrei zu vermessen
- Dazu braucht man einen neuen Elektron-Positron-Collider, der frühestens in ca 15 Jahren Daten nehmen könnte - für mindestens ca 20 Jahre
- Es gibt mehrere Vorschläge, und in den nächsten 3-5 Jahren erhofft man eine Entscheidung
- Bis dahin gilt es, durch Berechnungen, Simulationen und Technologie-Entwicklung diese Entscheidung auf eine solide Basis zu stellen - es gibt keinen zweiten Versuch!
- Neben allen technologischen Herausforderungen spielt Nachhaltigkeit eine große Rolle bei der Planung eines solchen Großprojektes
- Das Universum zu verstehen ist ein Generationenprojekt - nur gemeinsam können wir die nächste Etappe erreichen!

Kontakt: jenny.list@desy.de