

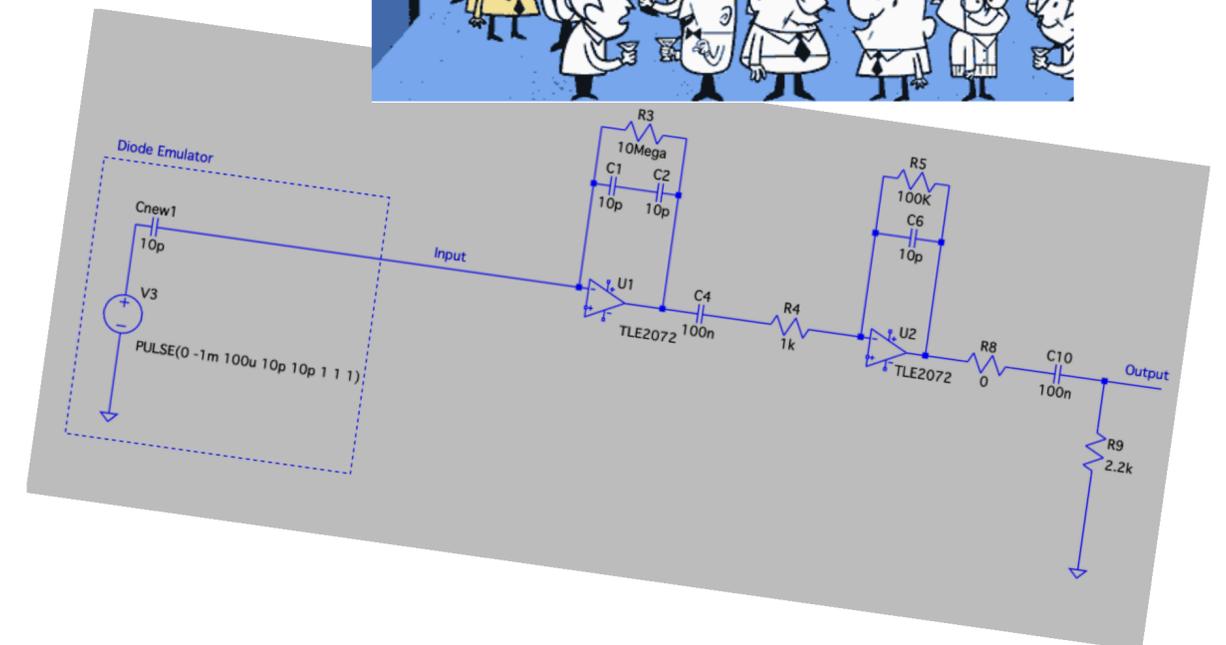
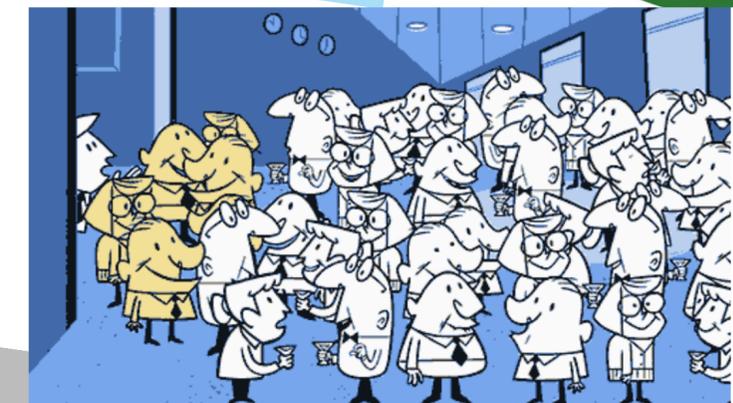
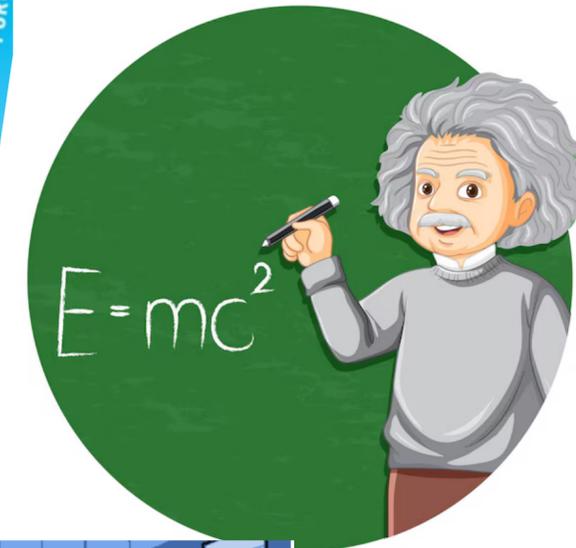
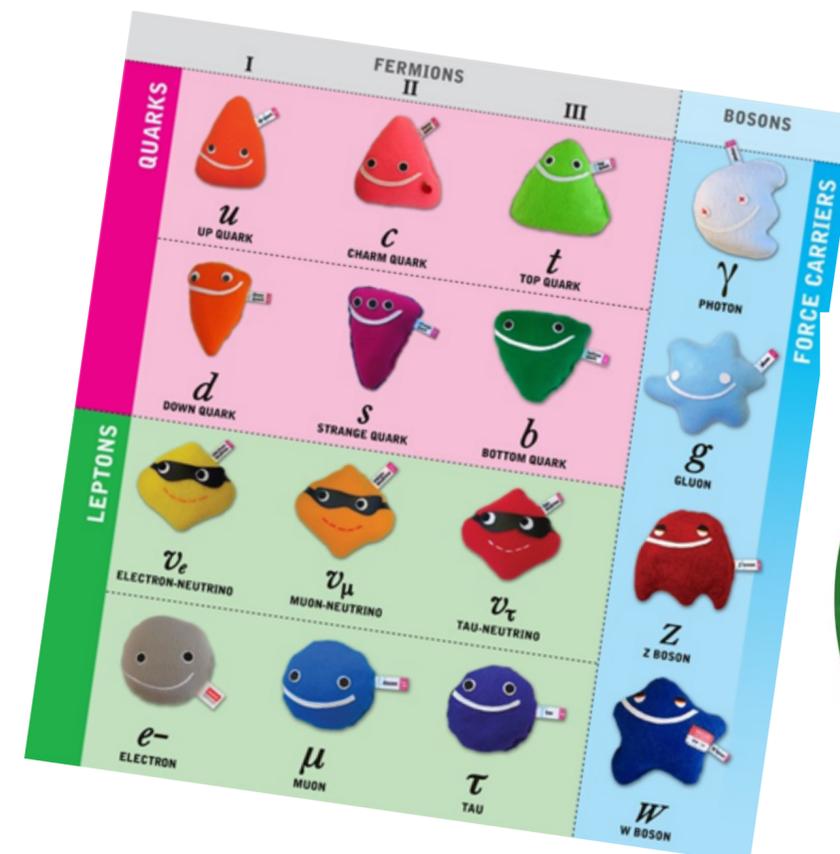
MINT-EC Camp Teilchenphysik

6.-8. November 2024

Maike Hansen, Sebastian Laudage

Ablauf Tag 1

09.00-10.00	Begrüßung & Kennenlernen
10.00-12.00	Vortrag zur Teilchenphysik
12.00-13.00	Mittagspause
13.00-14.00	Einführung Elektronik & Simulationen
14.00-17.00	Hand-On Simulationen



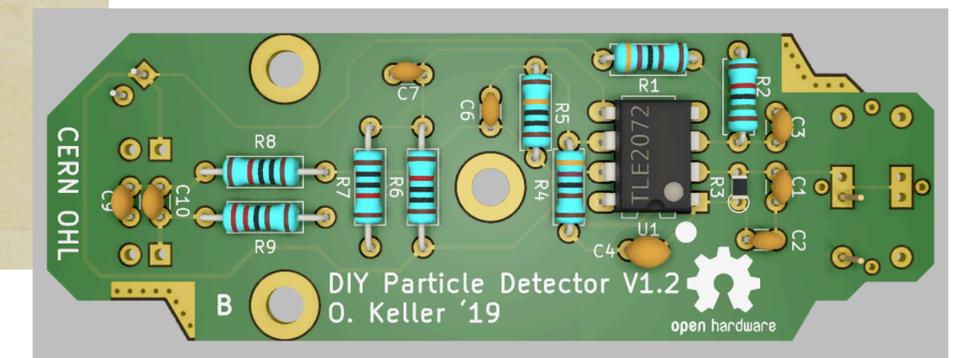
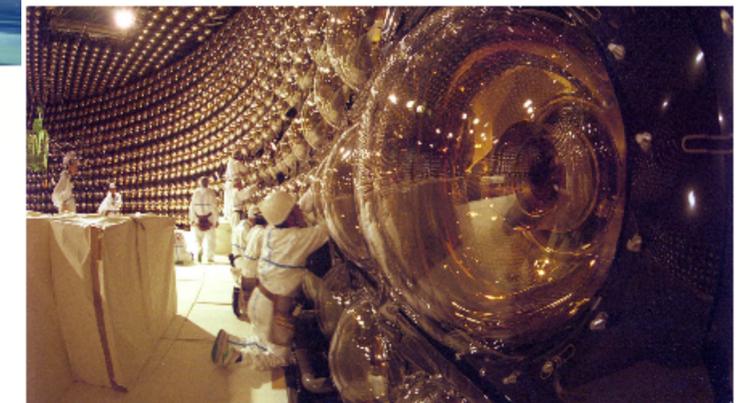
Ablauf Tag 2

09.00-10.15	Vortrag zur Detektorphysik
10.15-10.30	Pause
10.30-12.00	Führungen (ELSA & FTD)
12.00-13.00	Mittagspause
13.00-14.00	Einführung Löten & Detektorbau
14.00-17.00	Hands-On Detektorbau



Test der PbWO_4 -Kristalle für den CMS Detektor am CERN

Die weltweit größten Photomultiplier werden beim Super-Kamiokande Neutrino-Experiment eingesetzt.



Ablauf Tag 3

09.00-09.30	Einführung Messen von Hintergrundstrahlung
09.30-10.30	Nebelkammer Workshop
10.30-12.30	Fertigstellen der Detektoren und verschiedene Messungen in Kleingruppen
12.30-13.00	Präsentation der Ergebnisse
13.00-15.00	Mittagessen & gemütlicher Ausklang



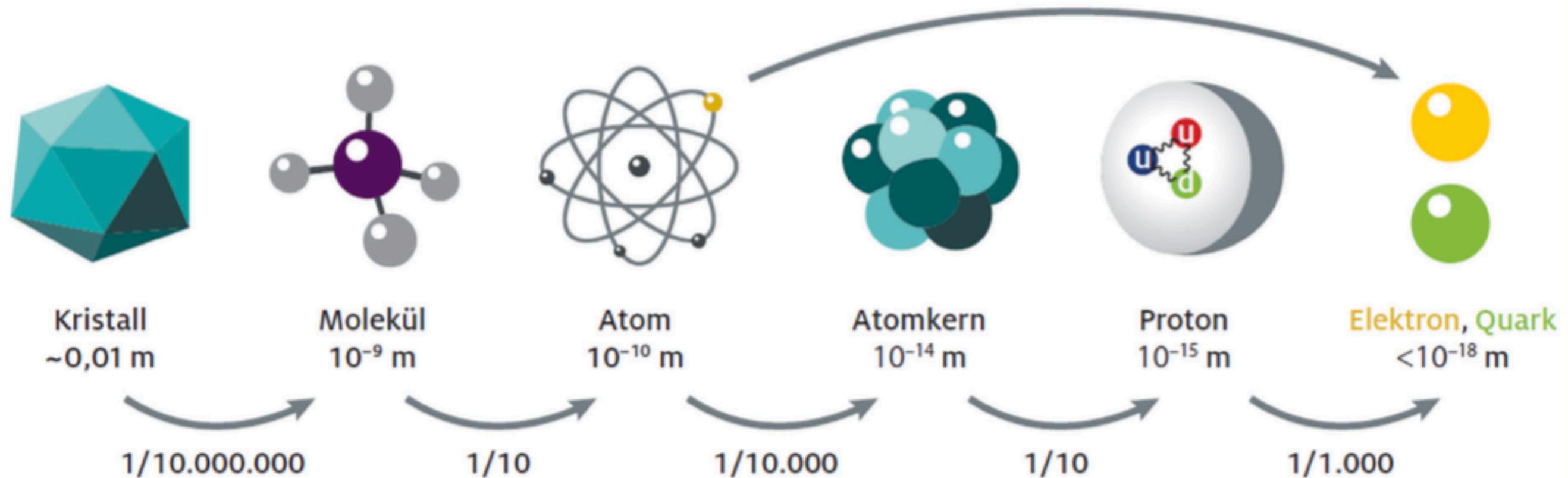
DAS STANDARD MODELL DER TEILCHENPHYSIK

Oder

„Was die Welt im Innersten zusammenhält“

Ordnung auf jeder Skala

Die fundamentalen Bausteine der Materie



Was findet man, wenn man einen Kristall in seine Bausteine zerlegt?

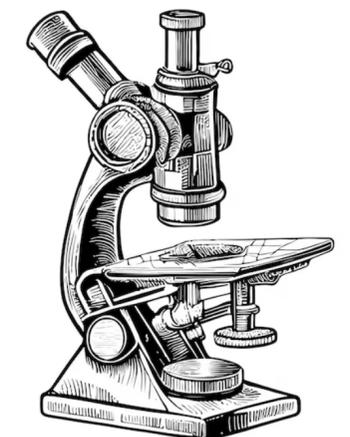
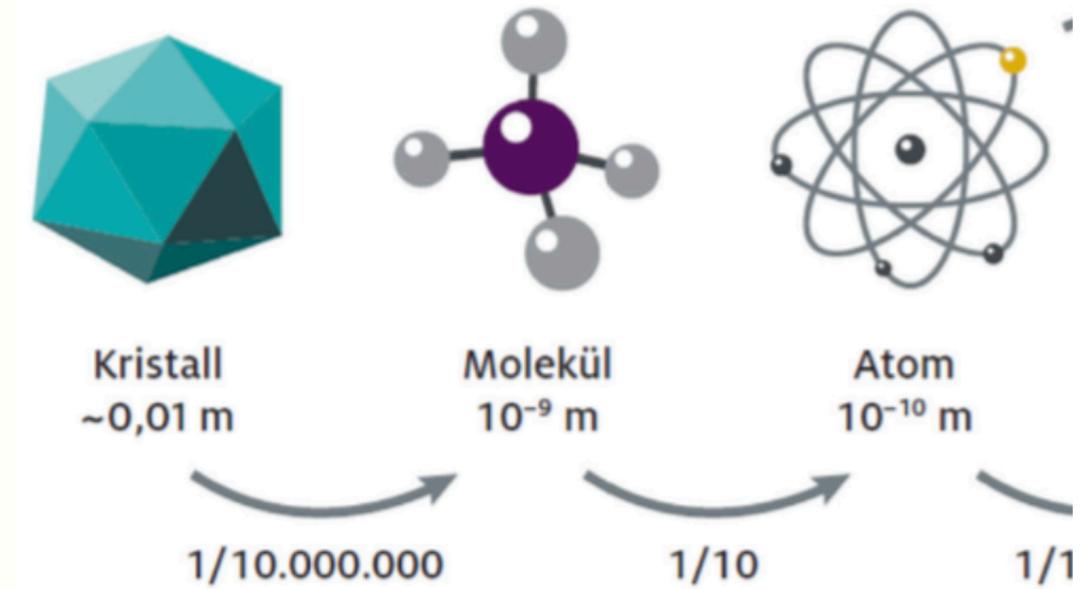
Ordnung auf jeder Skala

Das Periodensystem der Elemente

Gruppe	Hauptgruppen-Elemente		Nebengruppen-Elemente (d-Elemente)										Hauptgruppen-Elemente					Edelgase
	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIII B		IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	1 H 1.0079																	2 He 4.0026
	3 Li 6.941	4 Be 9.0122											5 B 10.81	6 C 12.01115	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984	10 Ne 20.179
	11 Na 22.9898	12 Mg 24.305											13 Al 26.9815	14 Si 28.086	15 P 30.9738	16 S 32.08	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
	19 K 39.09	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.90	23 V 50.941	24 Cr 51.996	25 Mn 54.9380	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.71	29 Cu 63.45	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 75.59	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80
	37 Rb 85.467	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.22	41 Nb 92.9064	42 Mo 95.94	43 Tc 98.906	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.4	47 Ag 107.868	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30
	55 Cs 132.905	56 Ba 137.33	57 La 138.905	72 Hf 178.49	73 Ta 180.947	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
	87 Fr (223)	88 Ra 226.025	89 Ac (227)	104 Rf 261.109	105 Db 262.114	106 Sg 263.118	107 Bh 262.123							114 Uuq				118

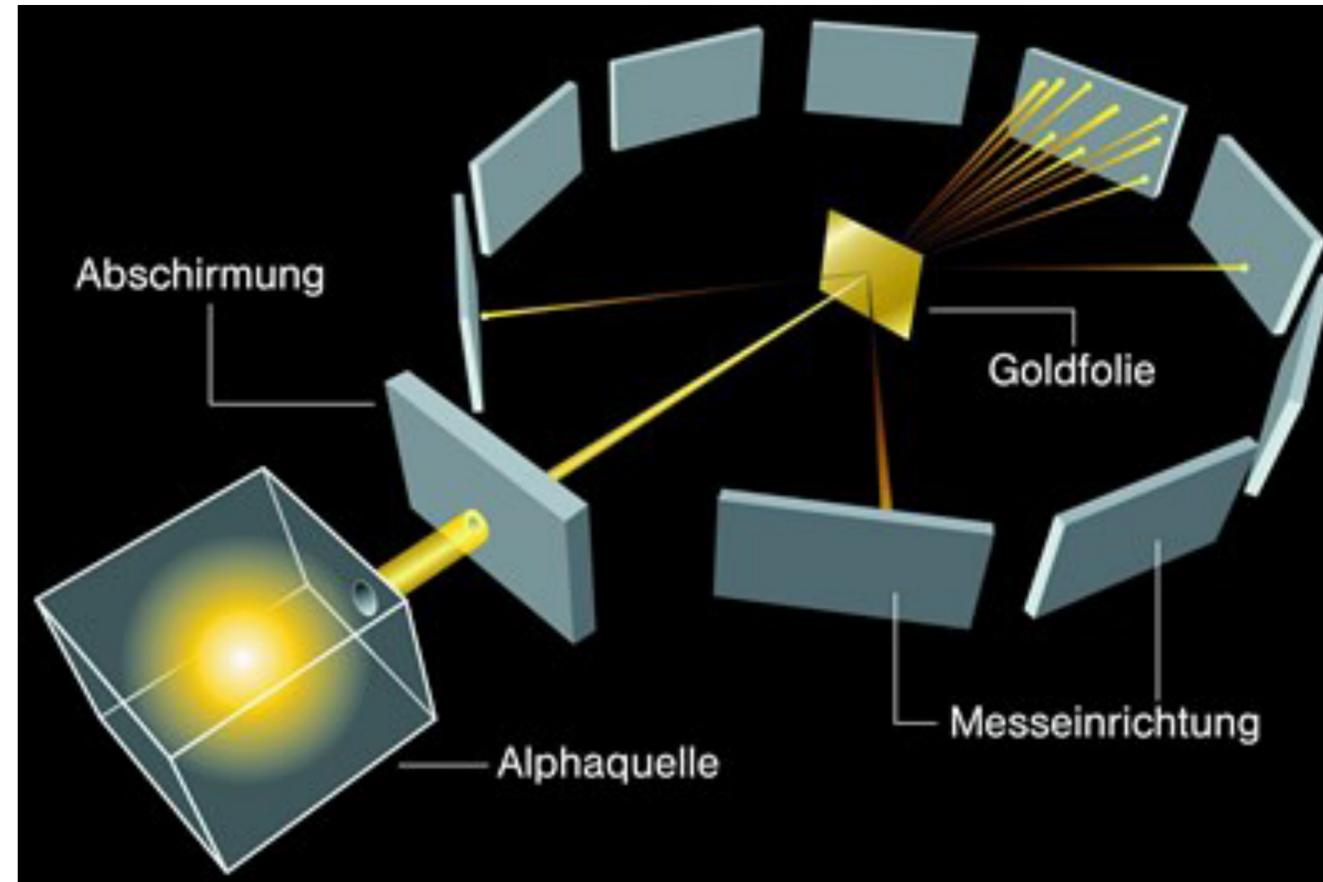
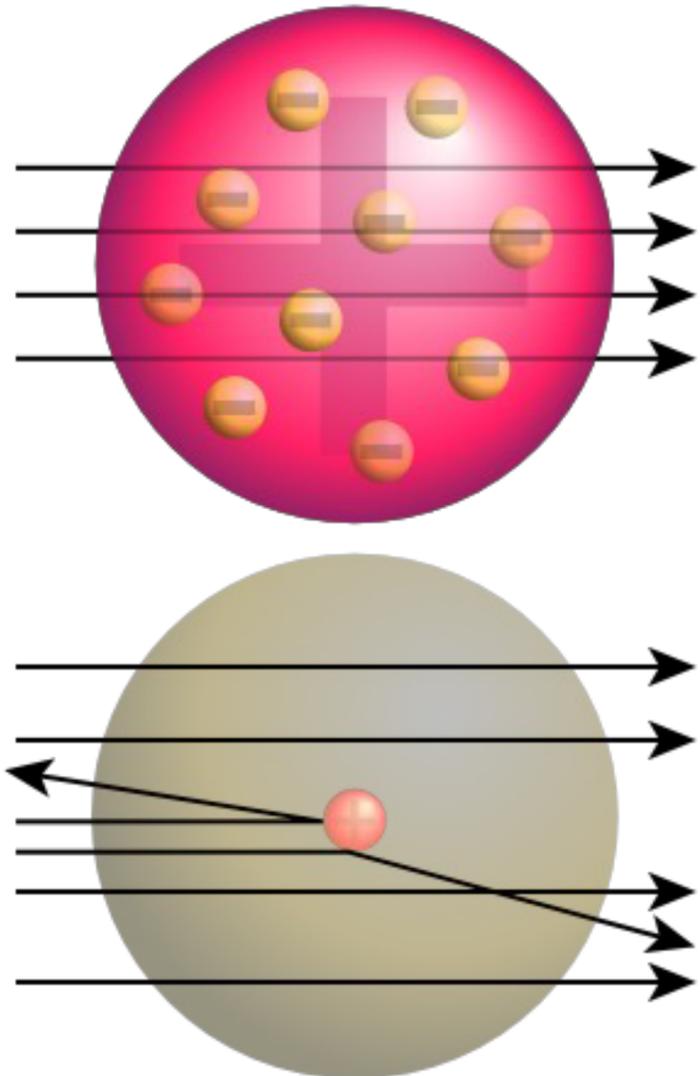
Lanthaniden
Actiniden

f-Elemente (Seltene Erden)													
58 Ce 140.12	59 Pr 140.907	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.4	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.50	67 Ho 164.930	68 Er 167.26	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
90 Th 232.038	91 Pa 231.036	92 U 238.029	93 Np 237.05	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (254)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)



Wie untersucht man sehr kleine Teilchen?

- **Durch Streuexperimente!**
- **Rutherford 1910: Beschuss von Goldfolie mit α -Teilchen**

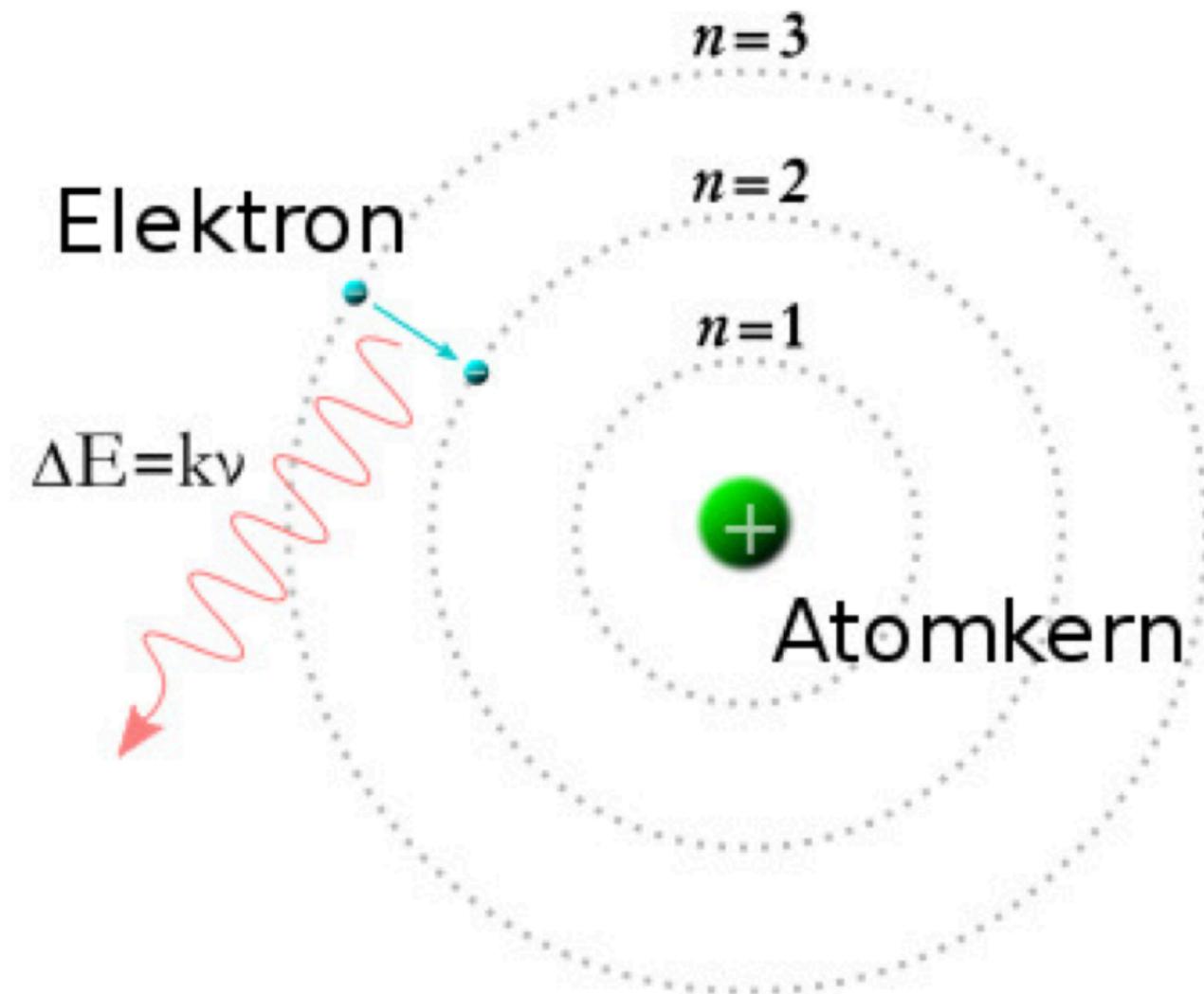


Atome sind nicht elementar sondern haben eine innere Struktur

Sie bestehen aus eine winzigen, schweren, positiv geladenen Kern und einer fast leeren Hülle mit Elektronen

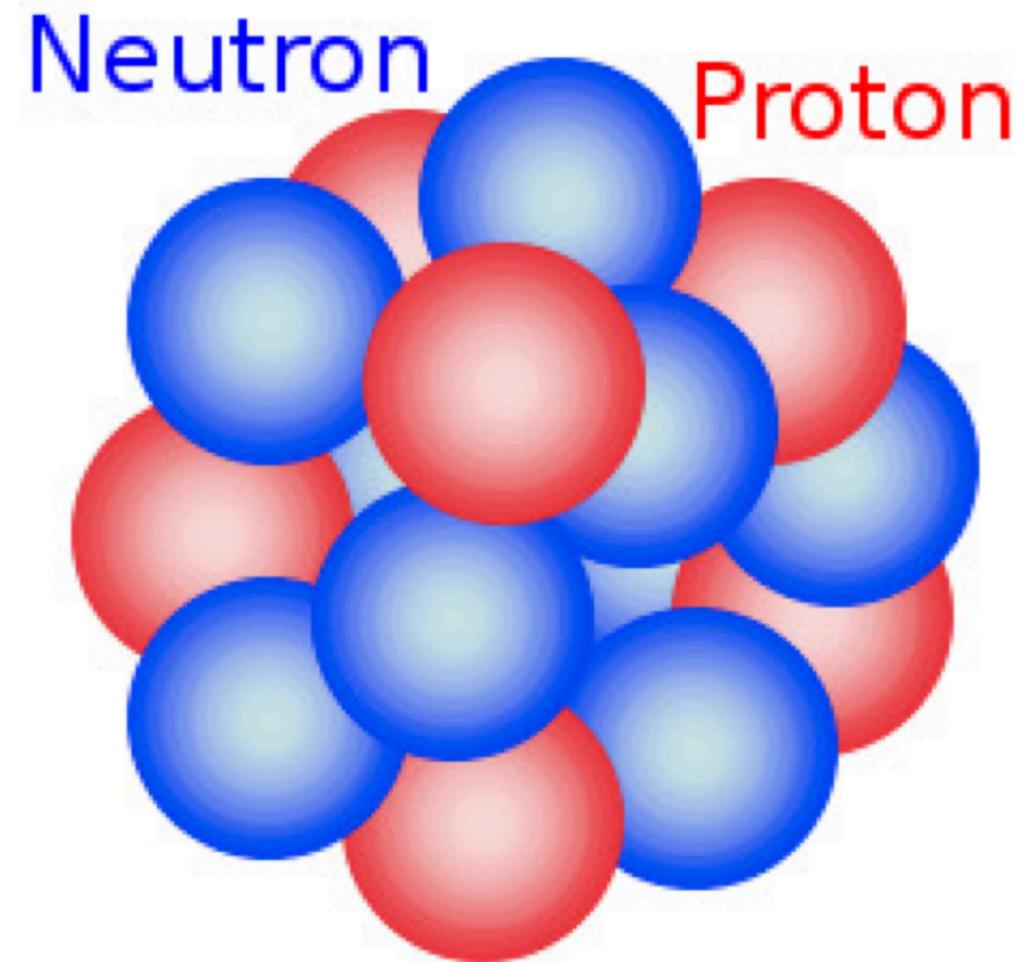
Ordnung auf jeder Skala

Substruktur von Atomen



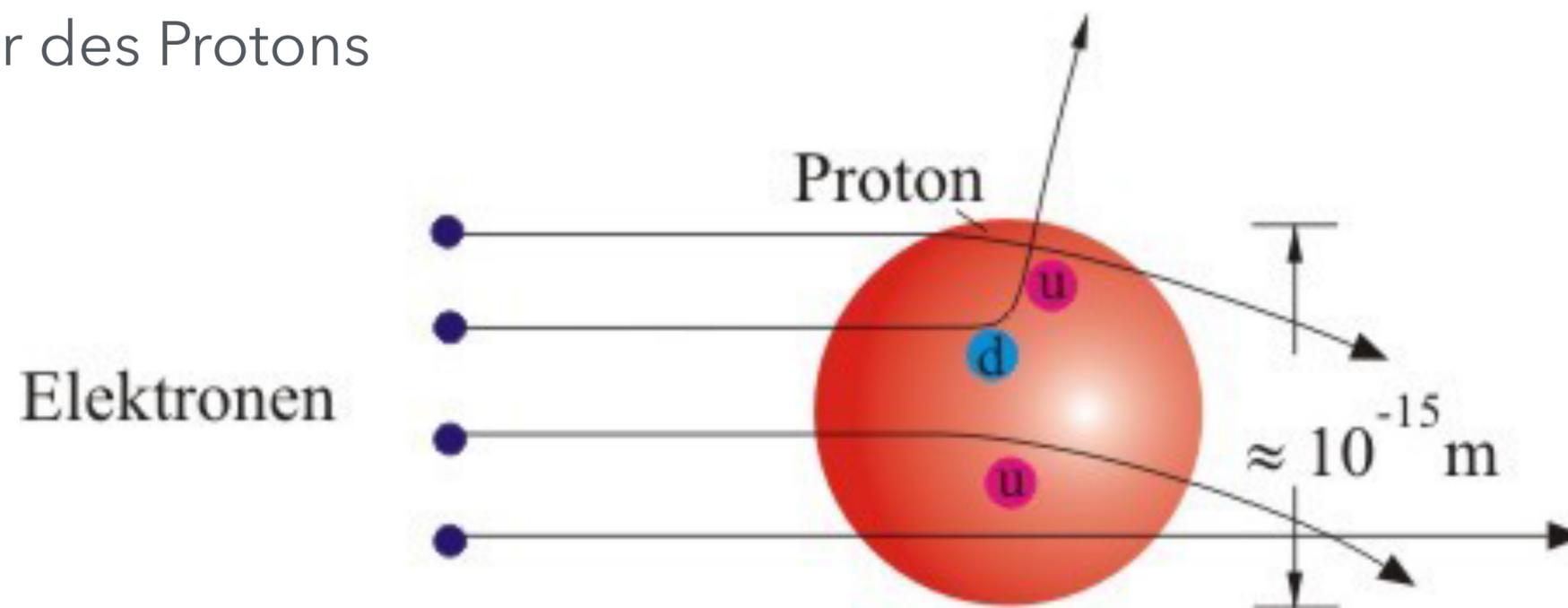
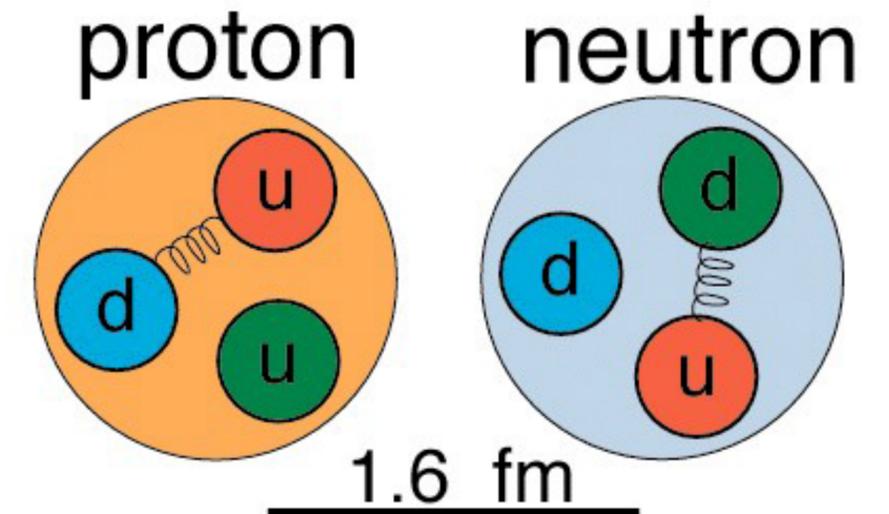
Ordnung auf jeder Skala

Substruktur von Atomkernen



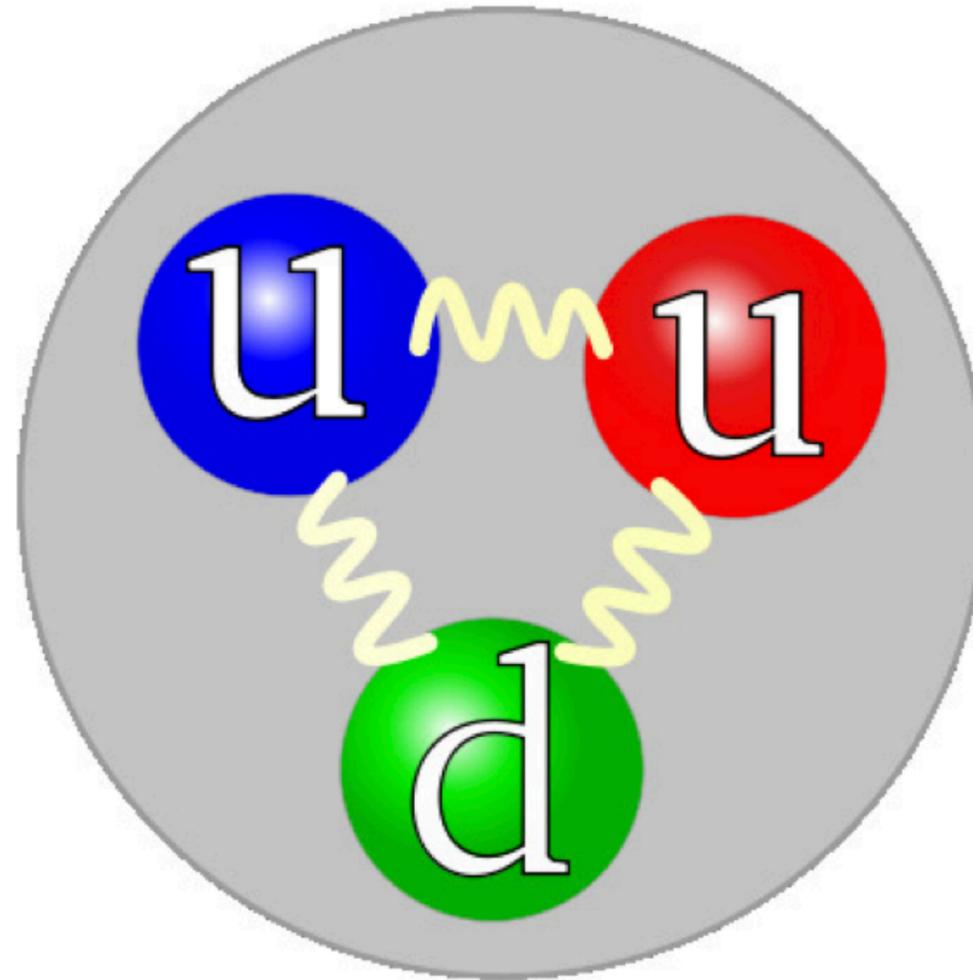
Sind Protonen/Neutronen elementar?

- 1964 Gell-Mann und Zweig postulieren, dass Protonen und alle anderen Hadronen aus kleineren Teilchen, sog. Quarks zusammengesetzt sind
- SLAC(MIT) 1969: Beschieße Protonen mit Elektronen
- Nachweis der Substruktur des Protons



Ordnung auf jeder Skala

Substruktur von Proton & Neutron







Das Standardmodell der Teilchenphysik

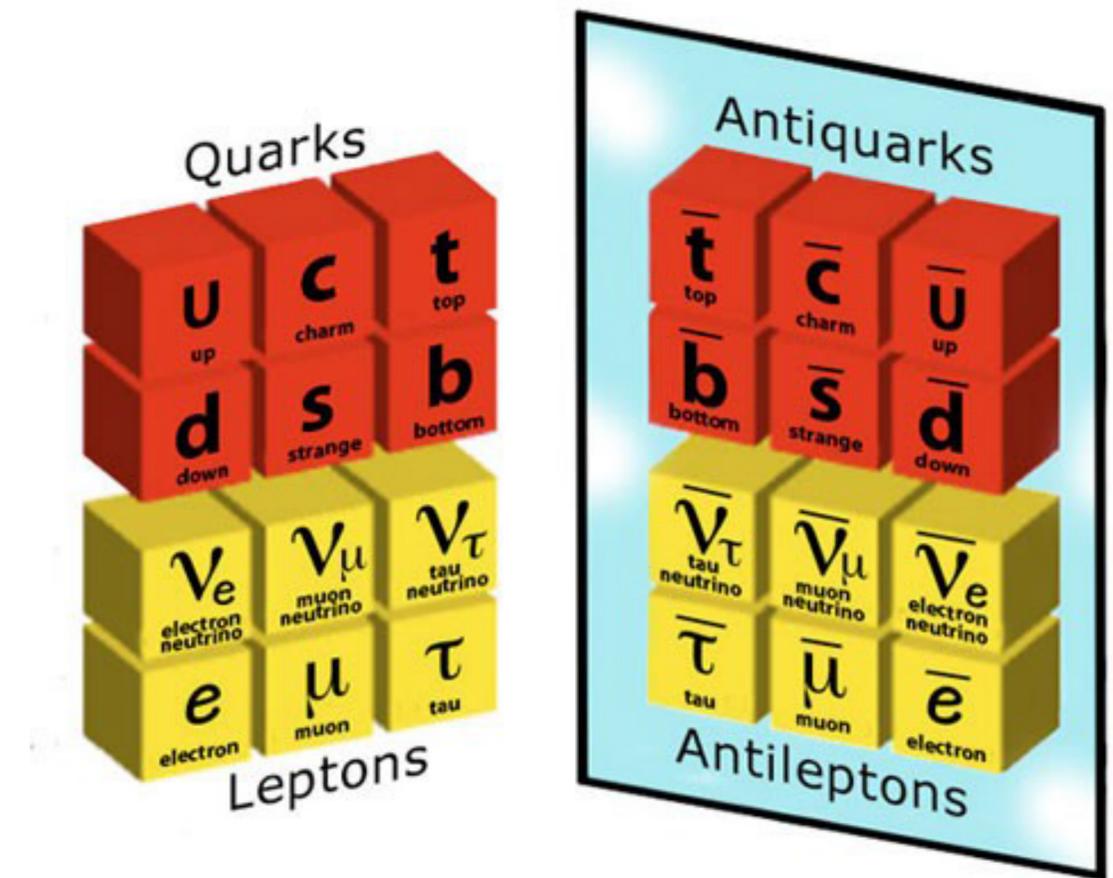
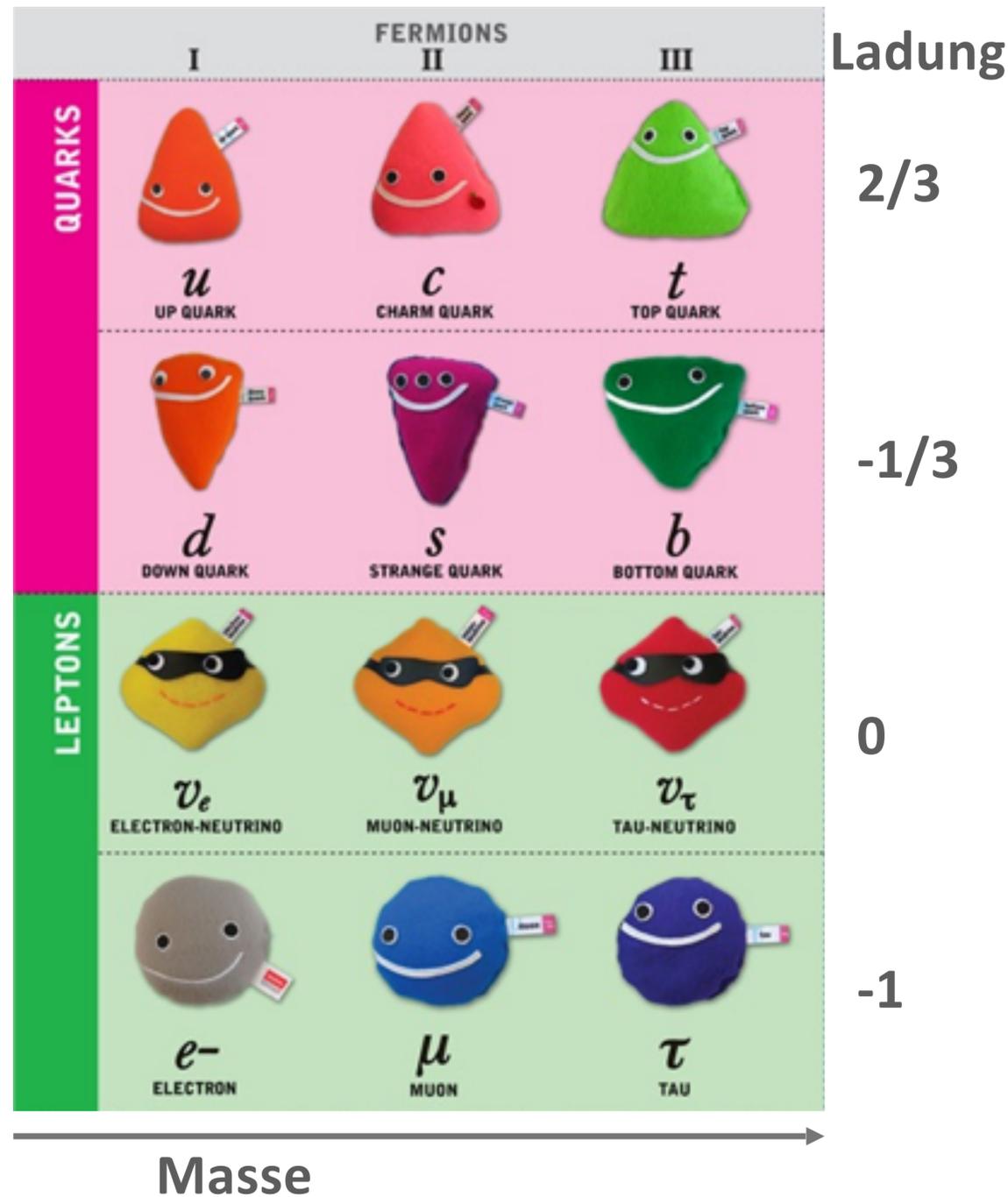
Unser „Periodensystem“

	I	II	III
QUARKS	 u UP QUARK	 c CHARM QUARK	 t TOP QUARK
	 d DOWN QUARK	 s STRANGE QUARK	 b BOTTOM QUARK
LEPTONS	 ν_e ELECTRON-NEUTRINO	 ν_μ MUON-NEUTRINO	 ν_τ TAU-NEUTRINO
	 e^- ELECTRON	 μ MUON	 τ TAU

stabile Materie

- Nach und nach wurden noch mehr kleinste Teilchen an entdeckt
- Unsere **stabile Materie** besteht nur aus der ersten Spalte
- Die zweite und dritte Spalte sind schwerere Kopien der Teilchen in der ersten Spalte!

Das Standardmodell der Teilchenphysik

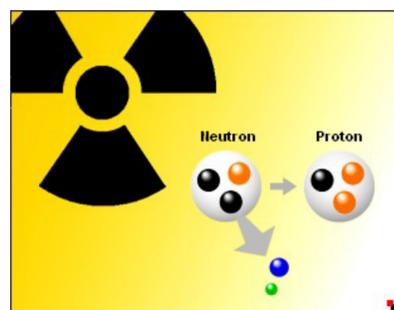
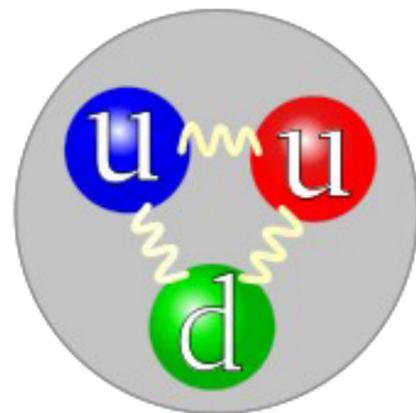


- Weitere Kopien dieser Teilchen mit entgegengesetzter Ladung: **Antimaterie**
- Aber was hält die Teilchen zusammen?

Das Standardmodell - Kräfte

Kraft	Austauschteilchen	Wirkung
?	?	?
Ihr	Seid	Dran!

Das Standardmodell - Kräfte



Kraft	Austauschteilchen	Wirkung
Starke Kraft	Gluon	Hält den Atomkern zusammen/bindet Quarks aneinander
Elektromagnetische Kraft	Photon	Hält Atome und Moleküle zusammen
Schwache Kraft	W/Z-Boson	Radioaktive Zerfälle (wandelt Quarks und Leptonen ineinander um)
Gravitation	Graviton	Masse zieht sich an

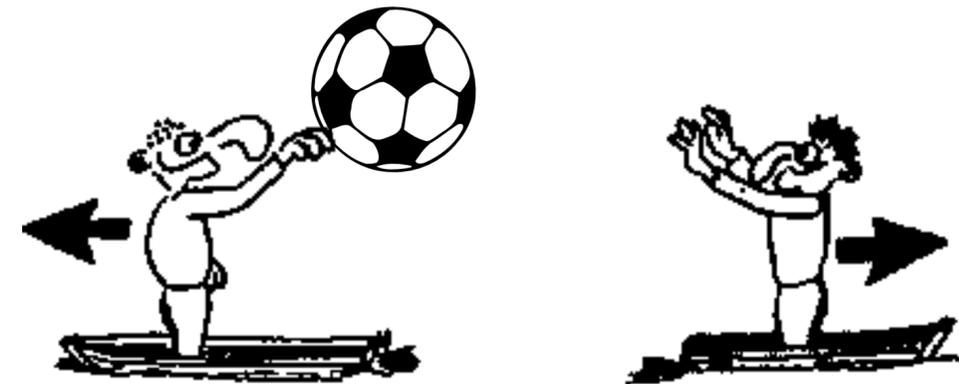


?

Das StandardModell - Kräfte zwischen den Teilchen

	FERMIONS			BOSONS	
	I	II	III		
QUARKS	 u UP QUARK	 c CHARM QUARK	 t TOP QUARK	 γ PHOTON	FORCE CARRIERS
 d DOWN QUARK	 s STRANGE QUARK	 b BOTTOM QUARK	 g GLUON		
LEPTONS	 ν_e ELECTRON-NEUTRINO	 ν_μ MUON-NEUTRINO	 ν_τ TAU-NEUTRINO	 Z Z BOSON	
 e^- ELECTRON	 μ MUON	 τ TAU	 W W BOSON		

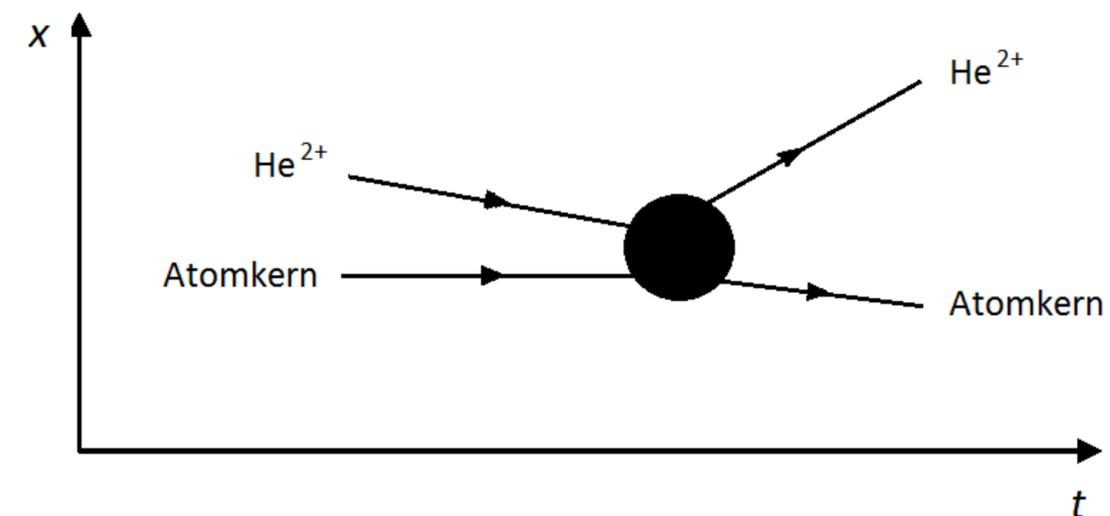
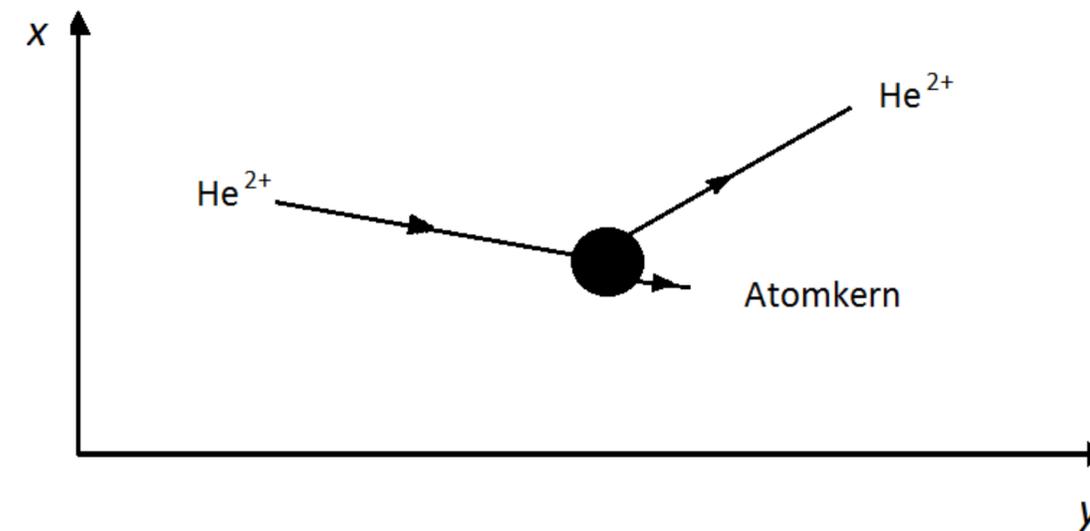
- Kräfte zwischen den Teilchen werden durch spezielle Vermittler-Teilchen übertragen



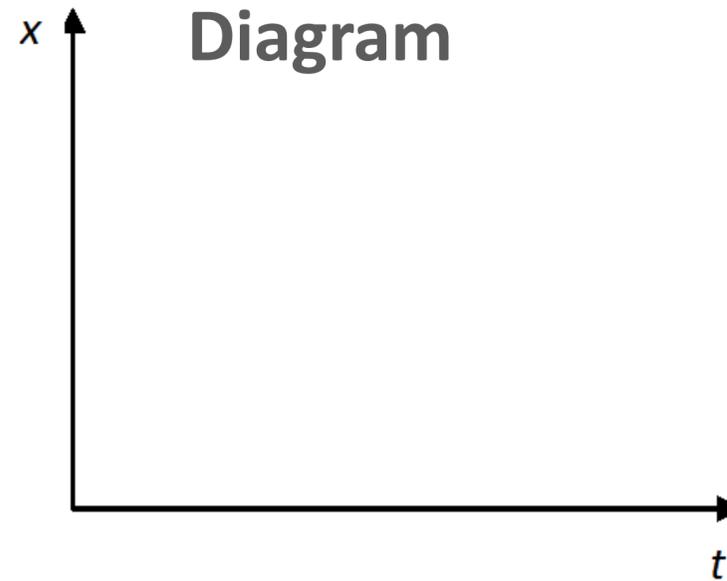
Feynman-Diagramm - Was ist das eigentlich?

Darstellung von Wechselwirkungen

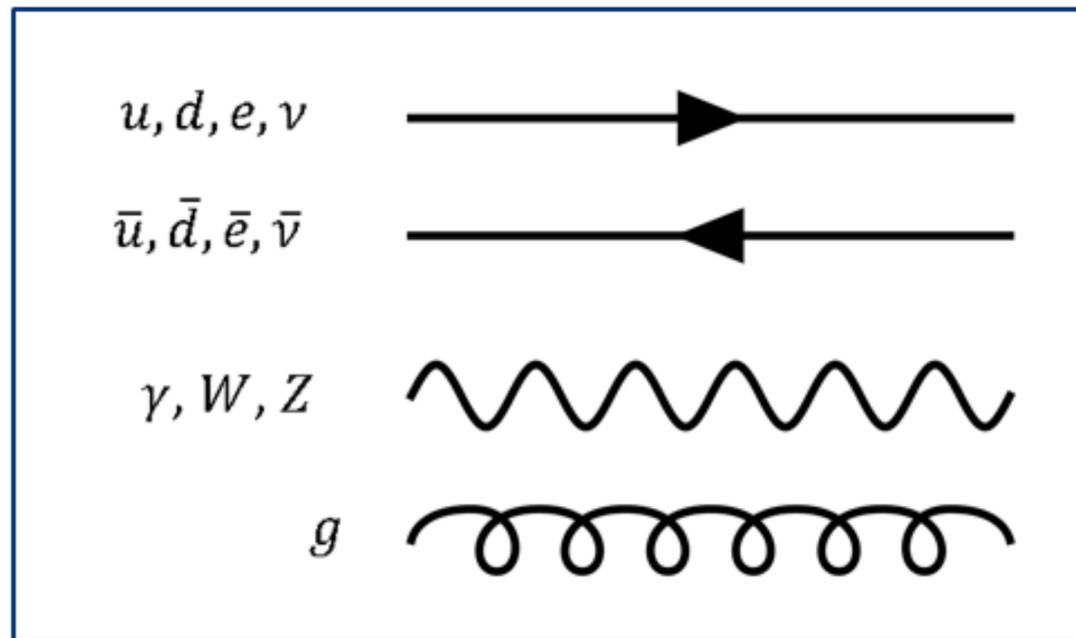
- Analogie: Austausch eines Austauschteilchens
- Anstelle von Feldlinie kann die Wechselwirkung durch den Austausch eines Botenteilchens dargestellt werden
- Eine Vorstufe des Feynman-Diagramms ist das x-y-Diagramm
- Ein Feynman-Diagramm ist ein x-t-Diagramm (Zeitachse nach rechts)



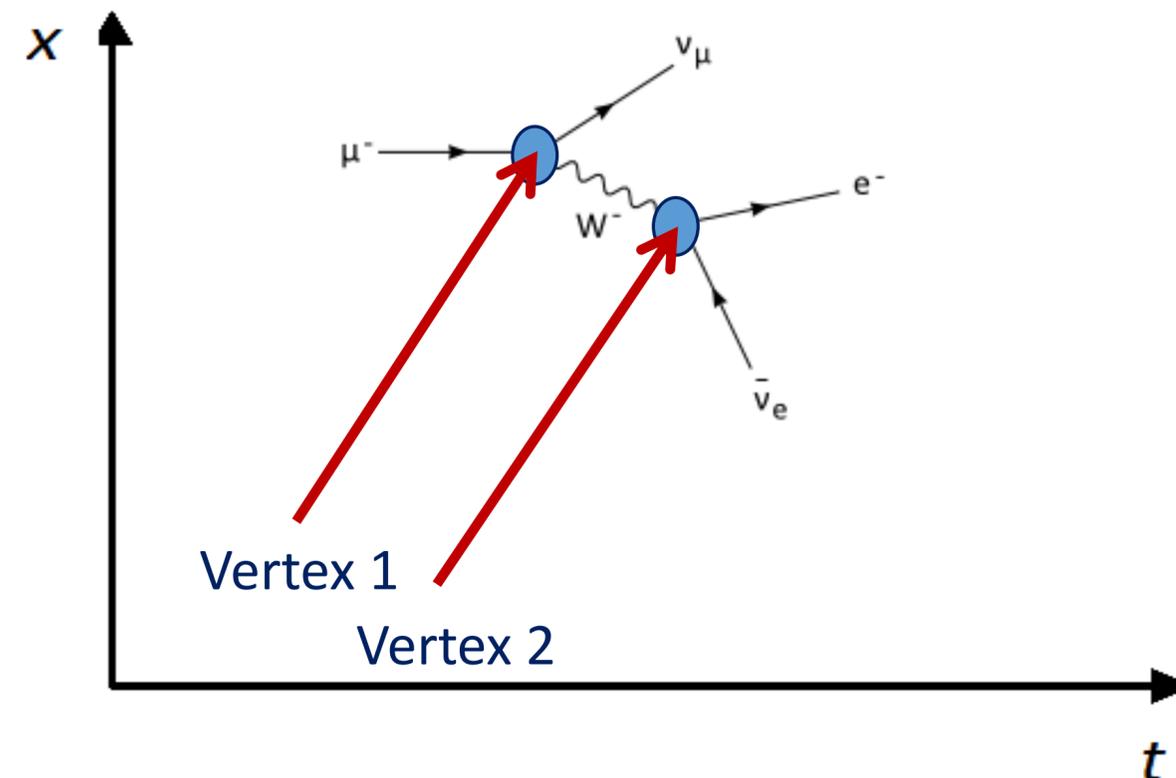
Feynman-Diagramm - Regeln



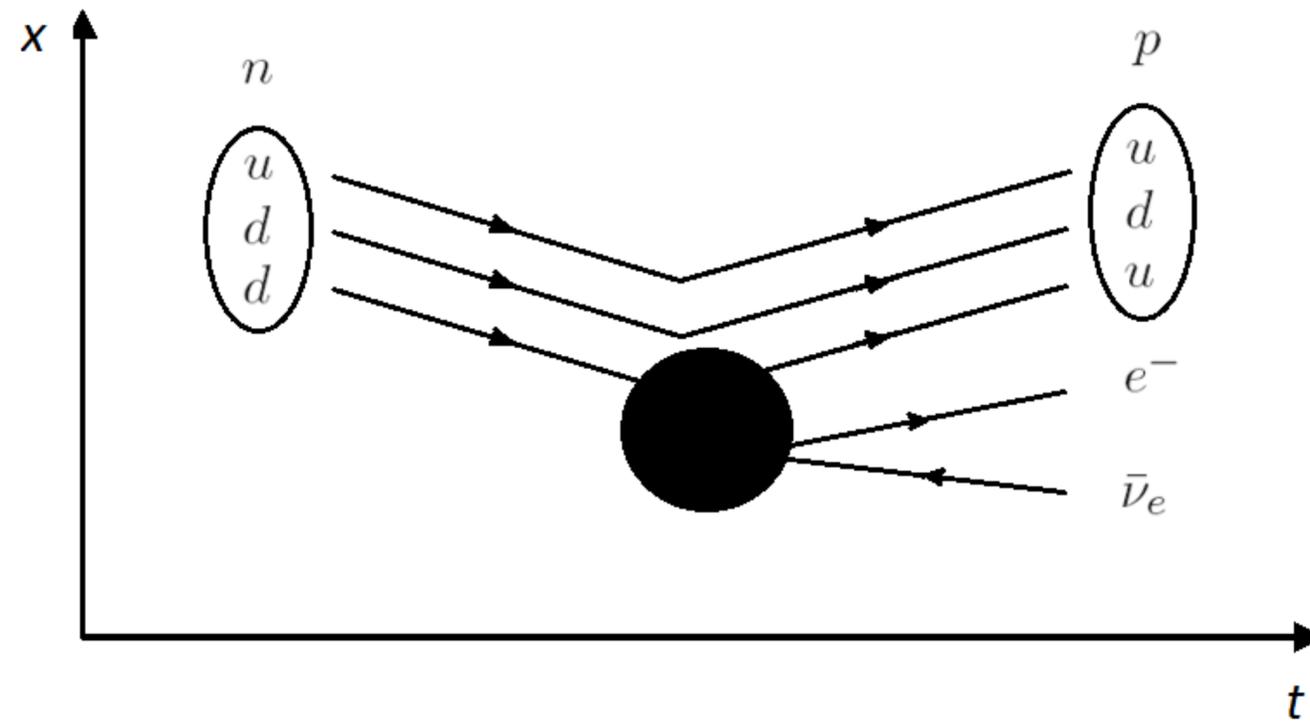
Teilchen



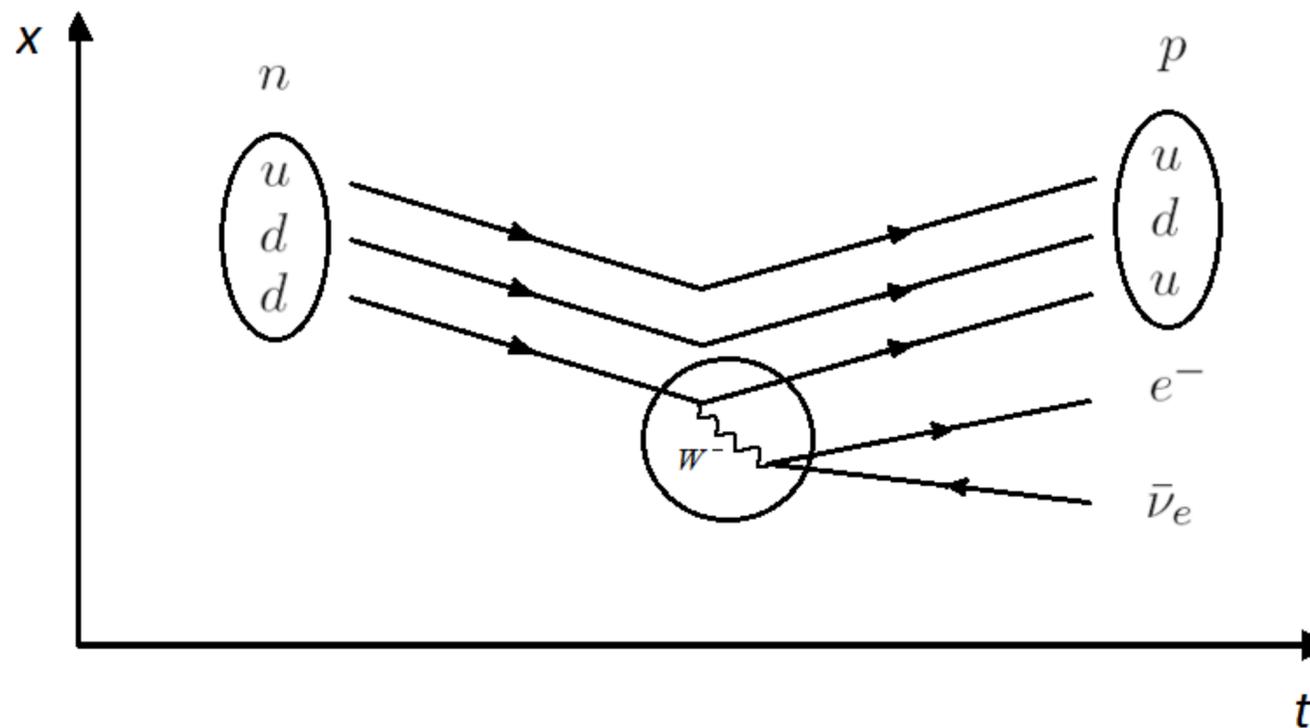
Wechselwirkung



Feynman-Diagramm - Beispiel

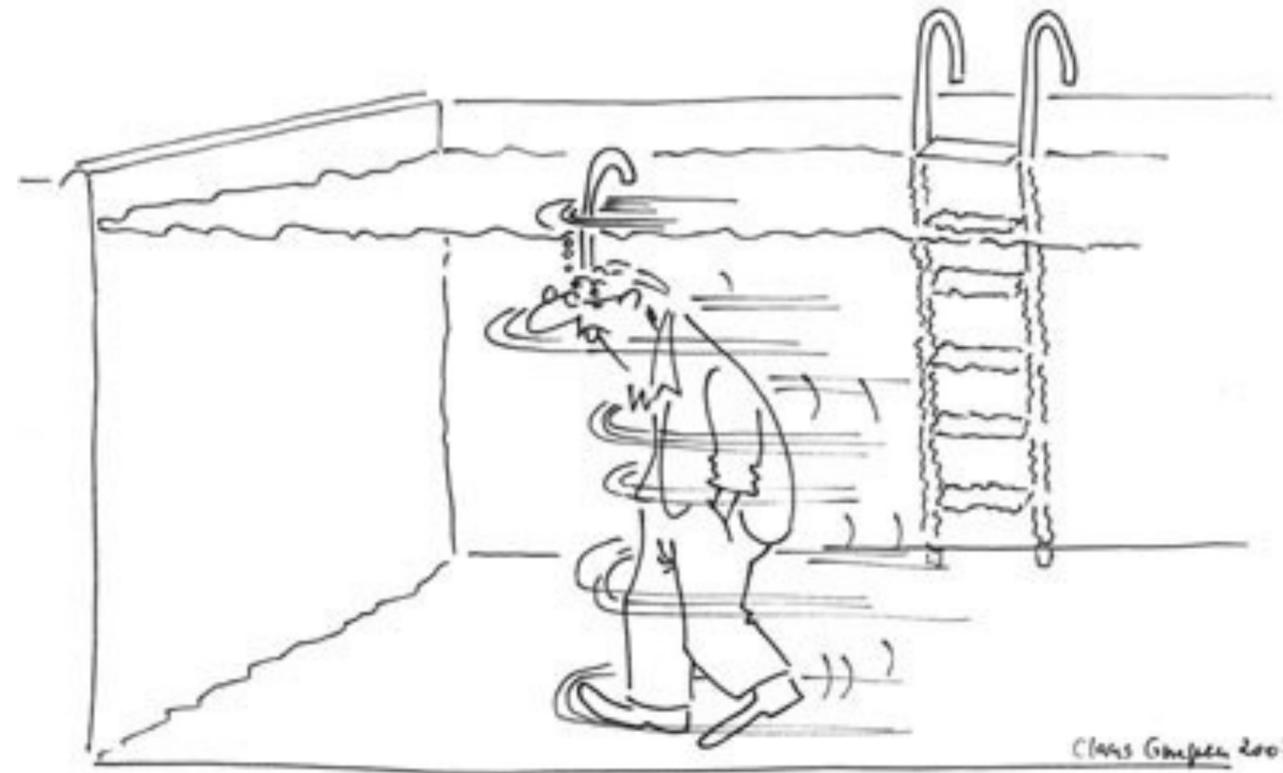


β^- - Strahlung

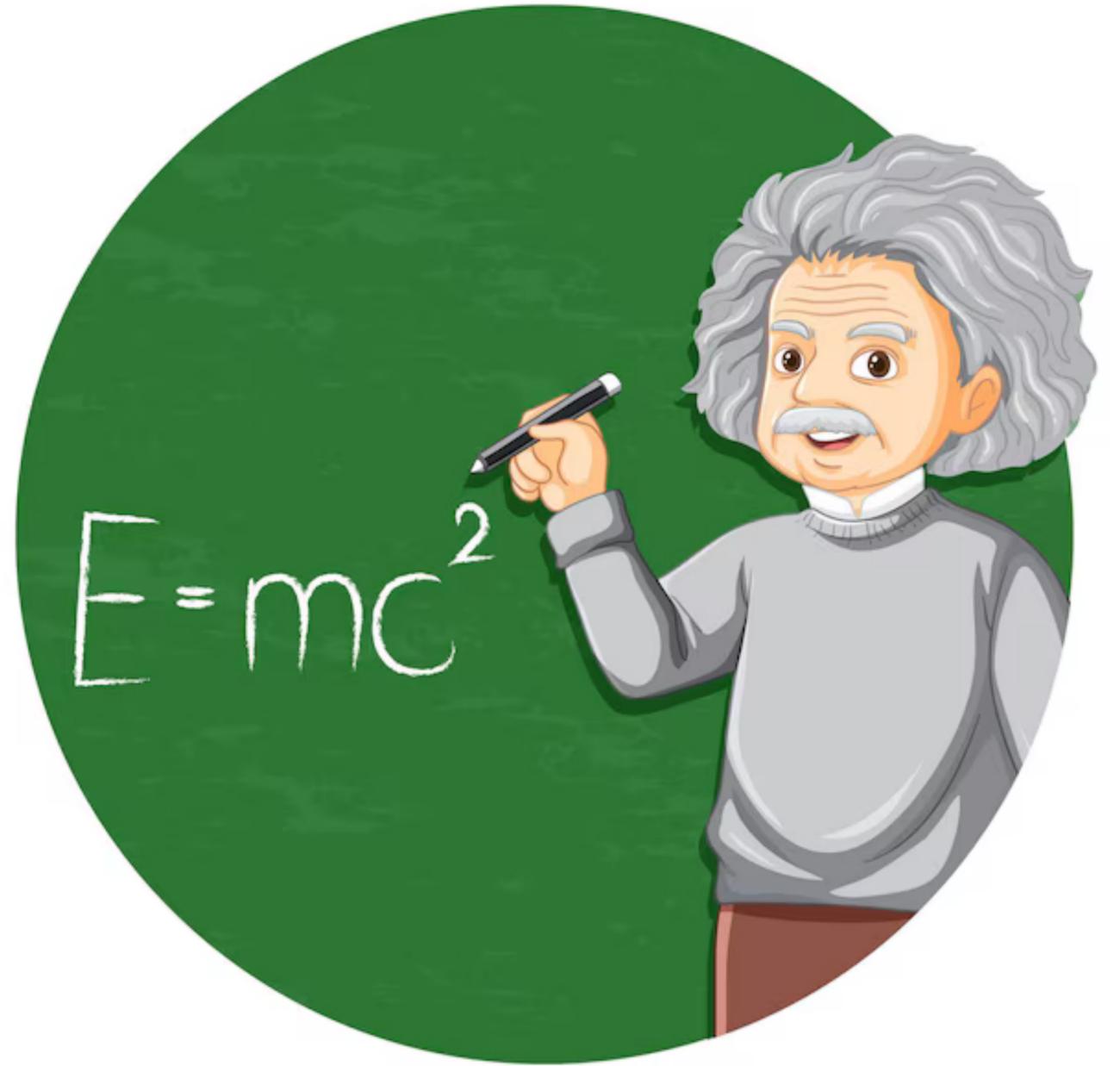


Der Higgs-Mechanismus

- Alle Berechnungen im Standardmodell funktionieren nur, wenn die Elementarteilchen masselos sind
- 1964 Erweiterung des SM um ein allgegenwärtiges Kraftfeld, das die Teilchen abbremst
- Gleicher Effekt als hätten sie Masse:

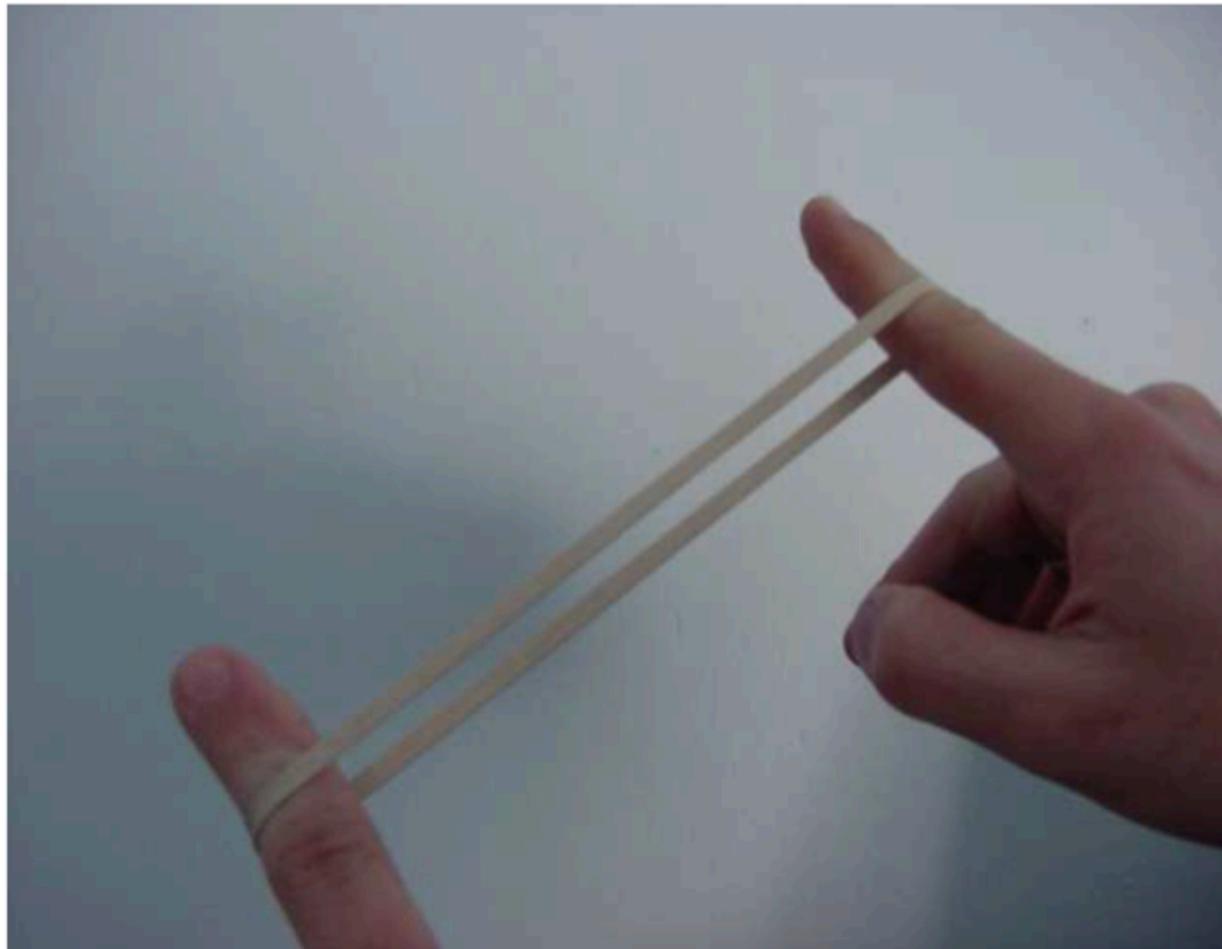


Was ist Masse?



Was ist Masse?

Masse ist gespeicherte Energie



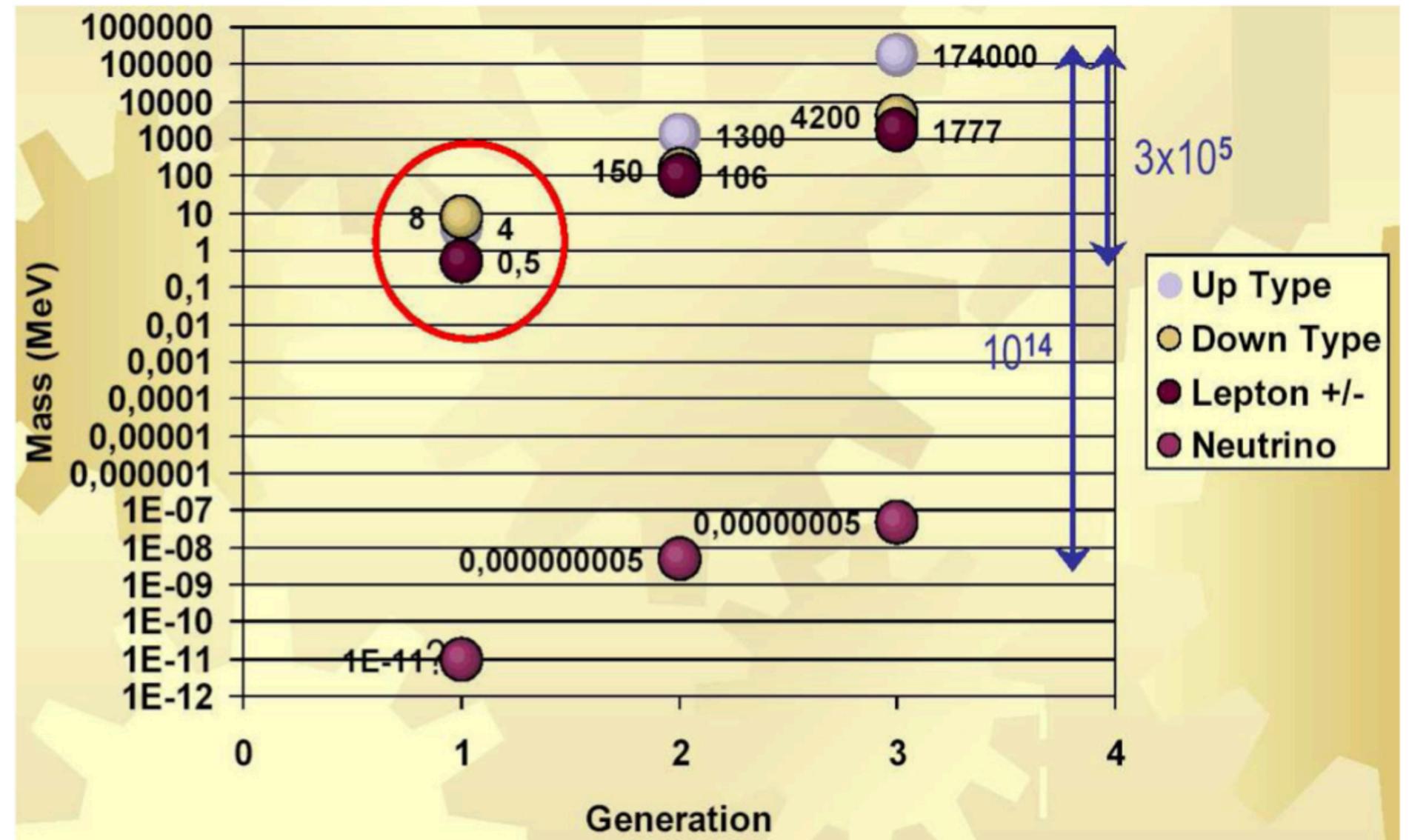
In einer Wechselwirkung



In Bewegung

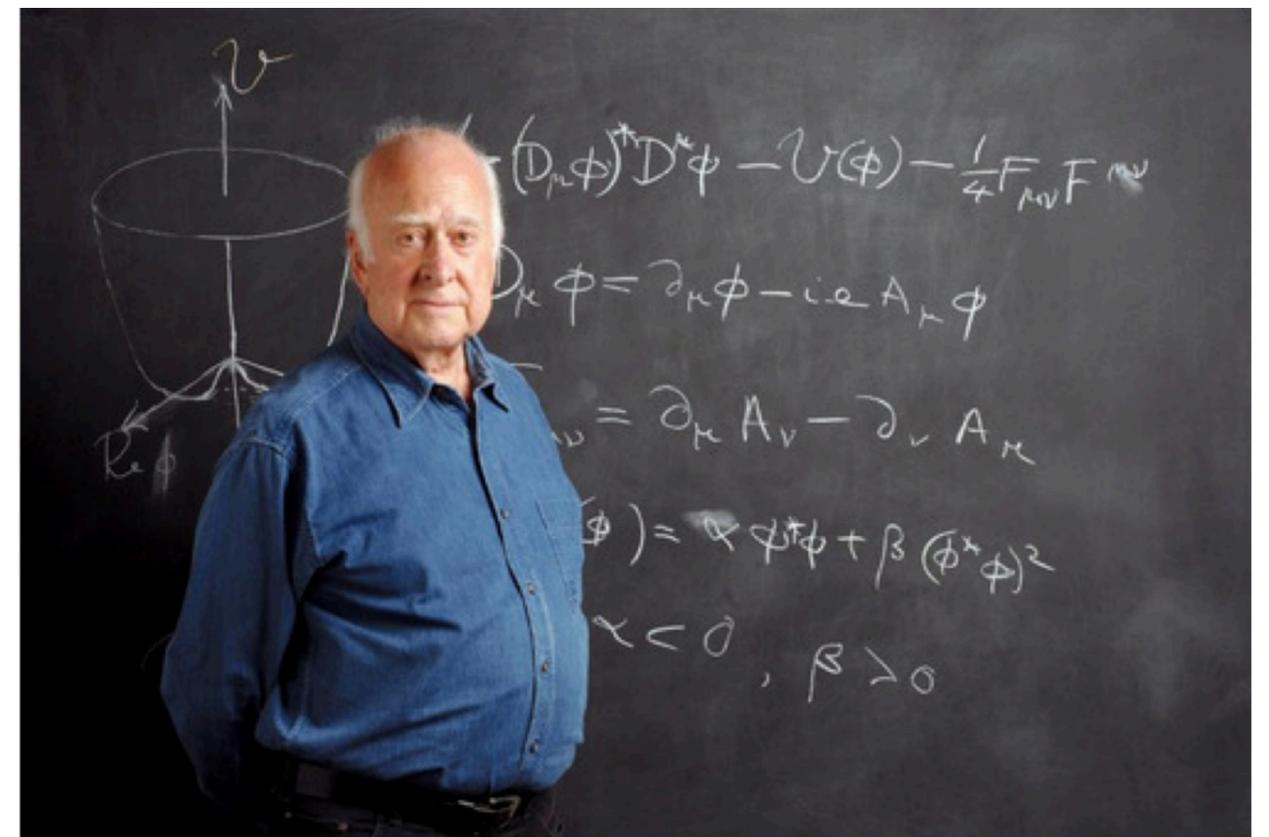
Die Masse der Elementarteilchen

- Folgt einem geordnetes Muster
- Wichtig, dass Muster so aussieht wie es aussieht



Die Masse der Elementarteilchen

- Haben noch nicht viel direkte experimentelle Information darüber, wie die Masse der elementaren Teilchen erzeugt wird
- Aber sehr viel indirekte Information aus der Struktur der beobachteten Wechselwirkungen
- Und wir haben eine Theorie die dies beschreibt:
Der Higgs-Mechanismus



Die Masse der Elementarteilchen

- Eigentlich verlangt die Symmetrie, daß alle Teilchen masselos sind!
- Widerspruch zu unseren Experimenten - die Teilchen haben Masse!
- **Masse eines Teilchens: Energie, die in seiner Wechselwirkung mit dem Higgs gespeichert ist**



Der Higgs-Mechanismus



- Eine bekannte Person betritt den Raum
- Je größer die Masse (Bekanntheit), umso langsamer die Bewegung und umgekehrt

Der Higgs-Mechanismus



- Eine Kellner (=Photon) betritt den Raum
- Keine Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld → Keine Masse

Das Higgs-Boson



- ... ist das Austauscheteilchen des Higgs Feldes
- Das Higgs-Feld interagiert mit sich selbst → das sehen wir als Teilchen!

Der Higgs Mechanismus

- Wenn die Party leer ist, haben alle Teilchen keine Masse!
- Kann nicht sein ...
- Warum ist die Cocktail Party voller Leute?

Der Higgs Mechanismus

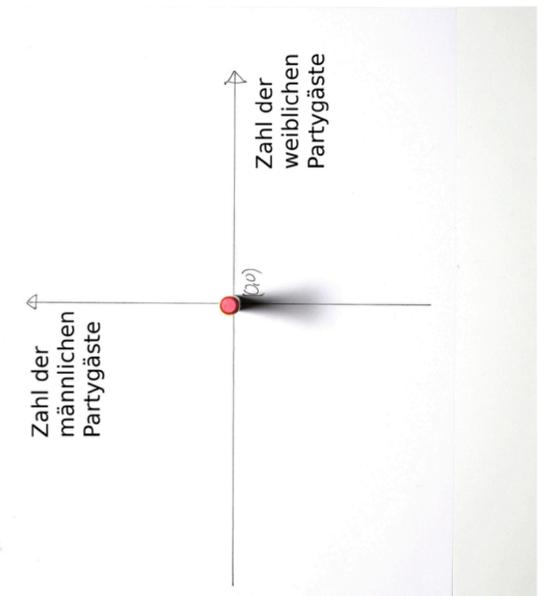
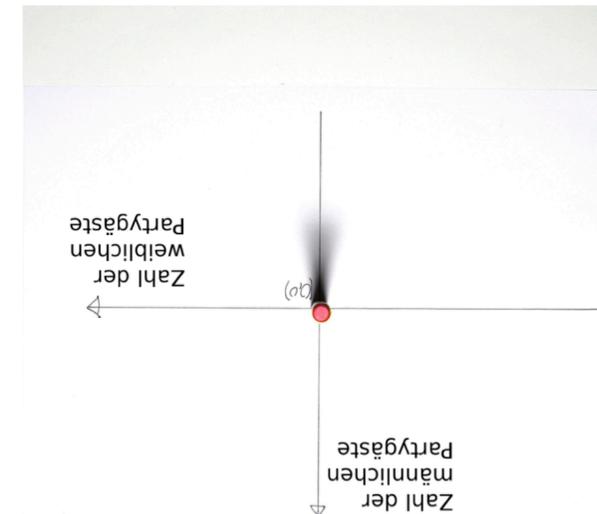
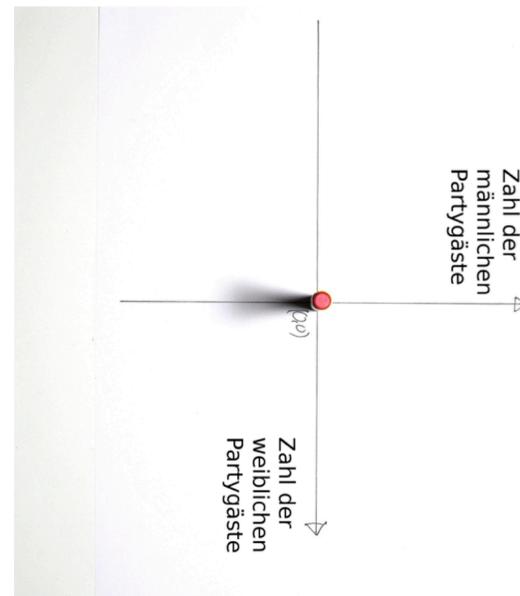
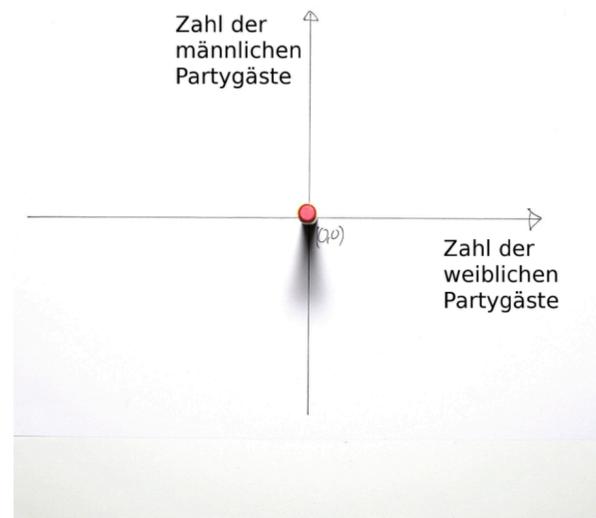
Oder warum ist die Party voller Leute?



Der Higgs Mechanismus

Oder warum ist die Party voller Leute?

Quelle: P.Beckhite

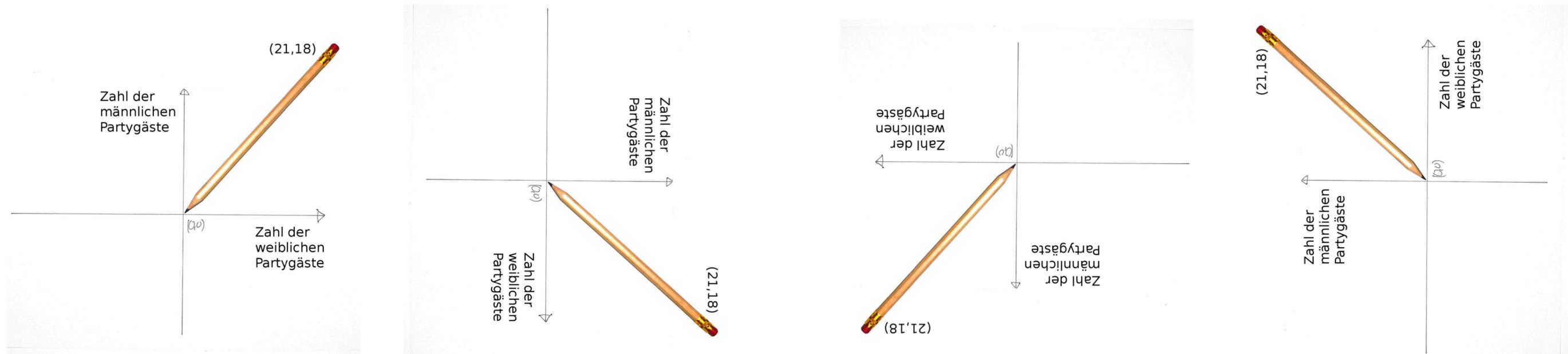


- Der **instabile Ausgangszustand** erfüllt die Symmetrie, aber es ist niemand auf der Party!

Der Higgs Mechanismus

Oder warum ist die Party voller Leute?

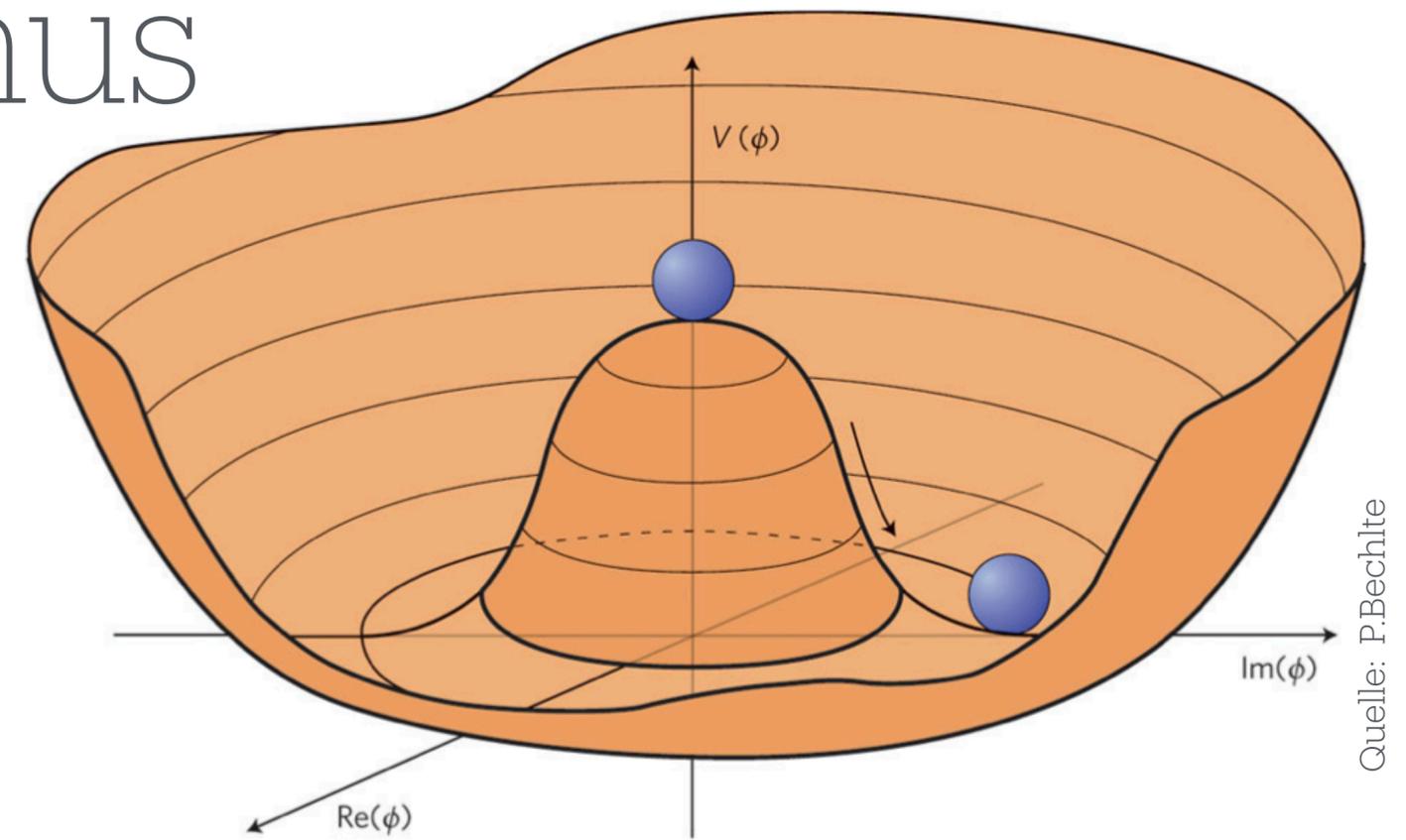
Quelle: P.Beckhlt



- Der **stabile Grundzustand** verletzt die Symmetrie spontan, ohne daß die Theorie die Symmetrie verletzt! Und er füllt die Party!

Der Higgs Mechanismus

Darum ist die Party voller Leute!



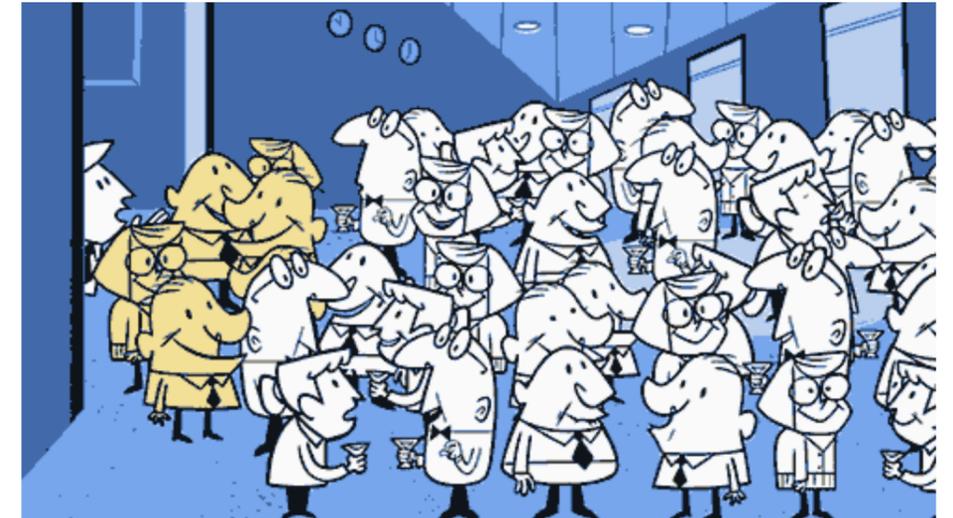
Quelle: P.Beichte

- Das nennt man "**Spontane Symmetriebrechung**", der Schlüssel zur gesamten Struktur der Materie und ihrer Wechselwirkungen!
- Wir postulieren die Symmetrien und die spontane Symmetriebrechung, und erklären damit die Struktur der Wechselwirkungen des Standardmodells. Aber wodurch erklärt sich die spontane Symmetriebrechung?

Über die Wechselwirkungsstärken/ Kopplungskonstanten!

Higgs Mechanismus

Beispiel für spontane Symmetriebrechung



- Beim Higgs Mechanismus bestimmt die "Berühmtheit" g des Teilchens seine Masse:

$$h \begin{array}{c} \gamma \\ \text{---} \{ g_{h\gamma\gamma} \\ \gamma \end{array}$$

$$h \begin{array}{c} Z^{0*}, W^{\mp*} \\ \text{---} \{ g_{hZZ^*}, hWW^* \\ Z^0, W^{\pm} \end{array}$$

$$h \begin{array}{c} \tau^{\mp}, \bar{b} \\ \text{---} \{ g_{h\tau\tau}, hb\bar{b} \\ \tau^{\pm}, b \end{array}$$

Das Standardmodell - Alles klar?



- Das fehlende Puzzlestück im Standardmodell wurde 2012 entdeckt
- Modell beschreibt die experimentellen Ergebnisse sehr genau



Das Standardmodell - Alles klar?



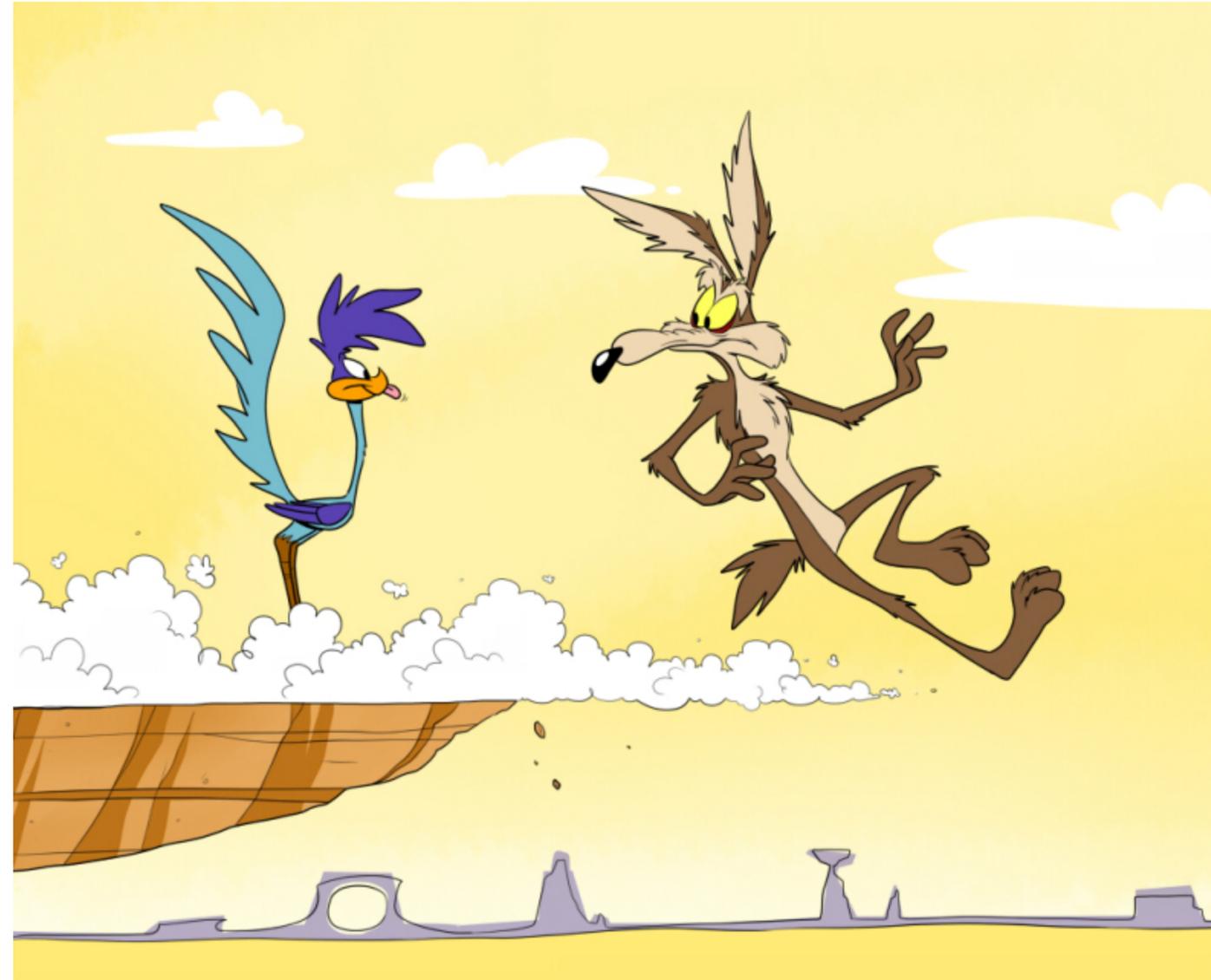
- Das fehlende Puzzlestück im Standardmodell wurde 2012 entdeckt
- Modell beschreibt die experimentellen Ergebnisse sehr genau



Noch lange nicht!!!

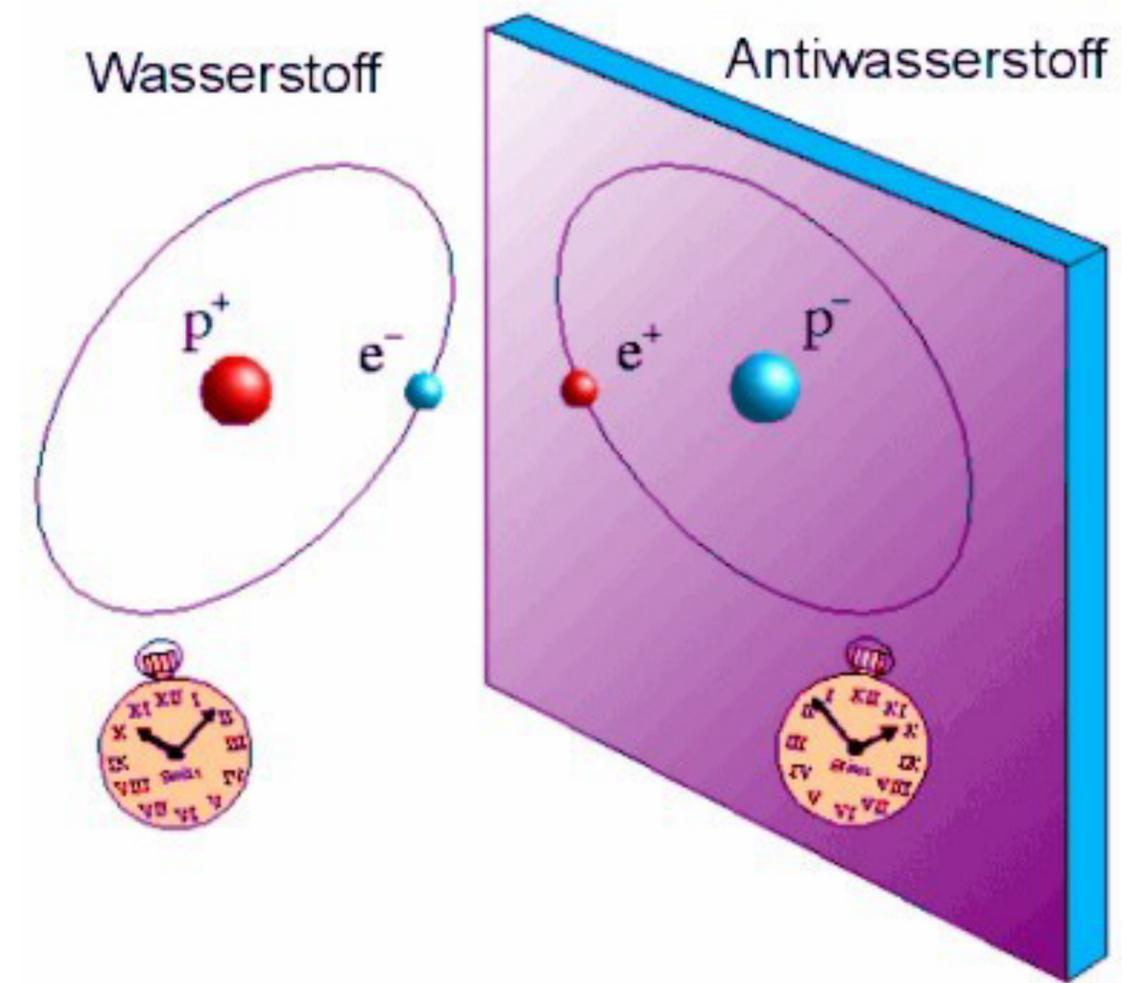
Gravitation

- Anziehung von massiven Objekten
Schwerkraft
- Die Gravitation ist viel schwächer
als die anderen fundamentalen WW
- Makroskopisch: Gravitation viel stärker
→ Gravitation wird nicht abgeschirmt!
- Schwerkraft wird beschrieben durch Einsteins „Allgemeine Relativitätstheorie“ (1915)
- Bis heute keine konsistente Theorie der Quantengravitation



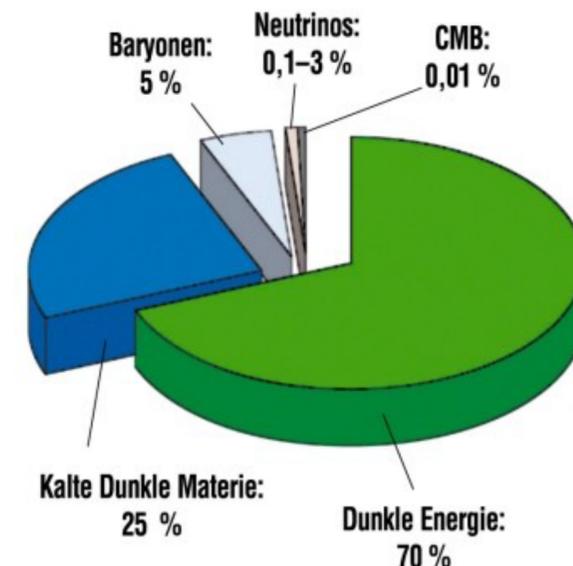
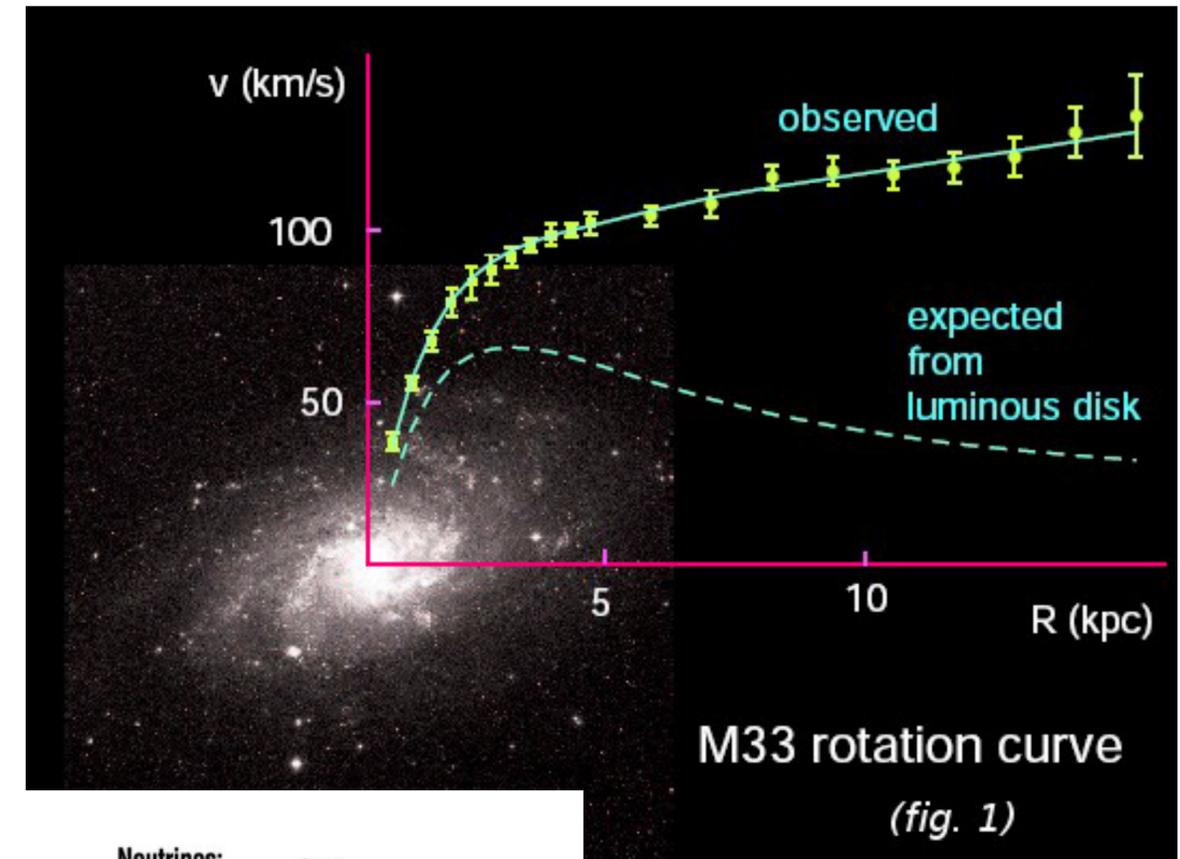
Warum gibt es das Universum überhaupt?

- Unser Universum besteht aus Materie
- Materie kann nur mit Antimaterie zusammen erzeugt werden
- Eigentlich wollte es genauso viel Antimaterie wie Materie geben (exakte Symmetrie)
- Aber wo ist die Antimaterie hin?
- Ist die Symmetrie gebrochen?



Was ist dunkle Materie/Energie?

- Galaxien rotieren schneller als aus ihren Leuchtkurven berechnet!
- Es muss zusätzliche unsichtbare Masse geben (Dunkle Materie)!
- Beschleunigte Ausdehnung des Universums!
- Es gibt eine unbekannte Kraft, die alles auseinander treibt (Dunkle Energie)!



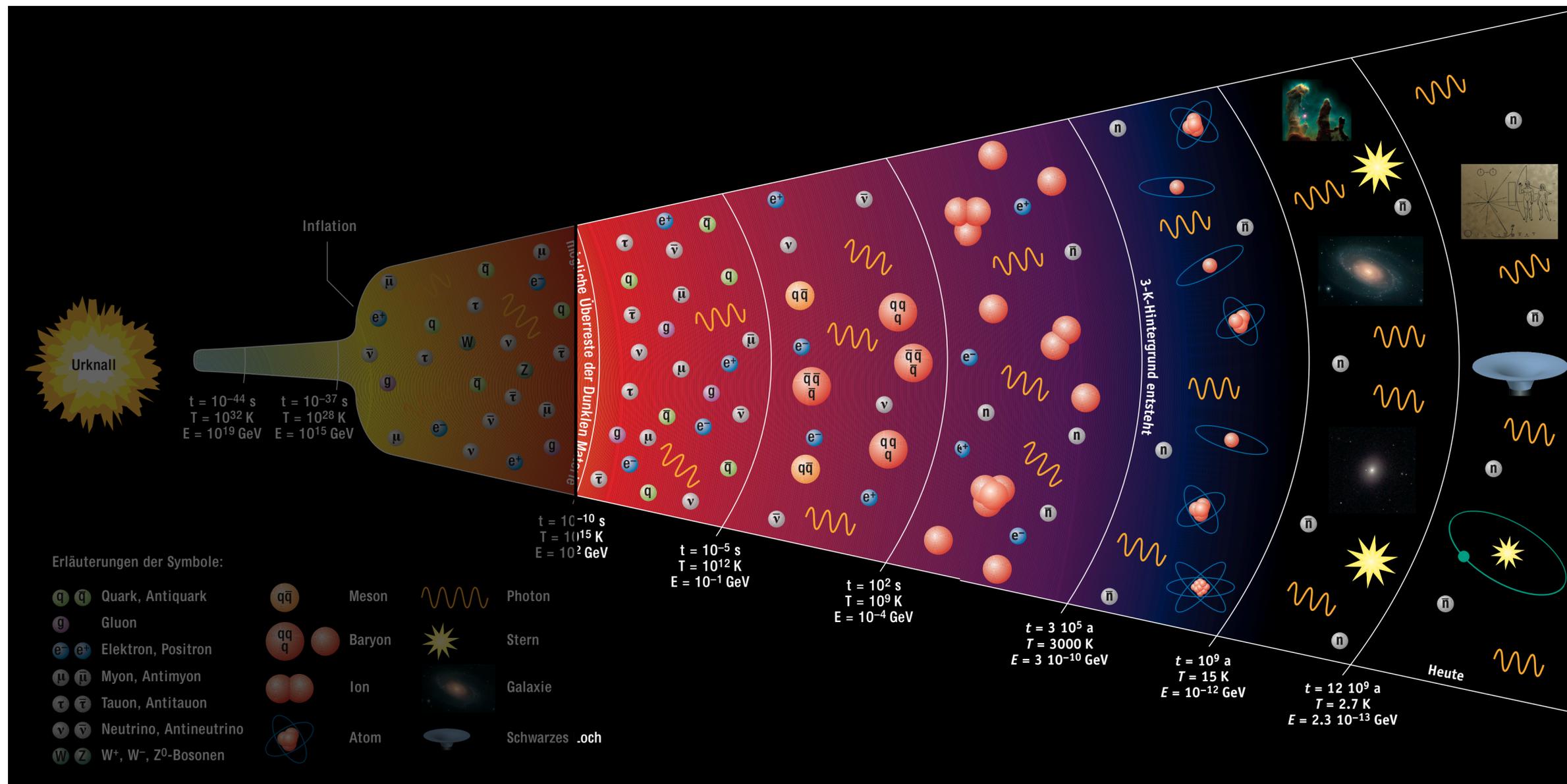
Das Standardmodell - Noch Längst nicht Alles klar!



- Wie können wir die Gravitation mit unserem SM vereinen?
- Wieso ist die Materie-Antimaterie Symmetrie gebrochen?
- Aus welchen Teilchen besteht dunkle Materie?

- Wie können wir solche Fragen beantworten?

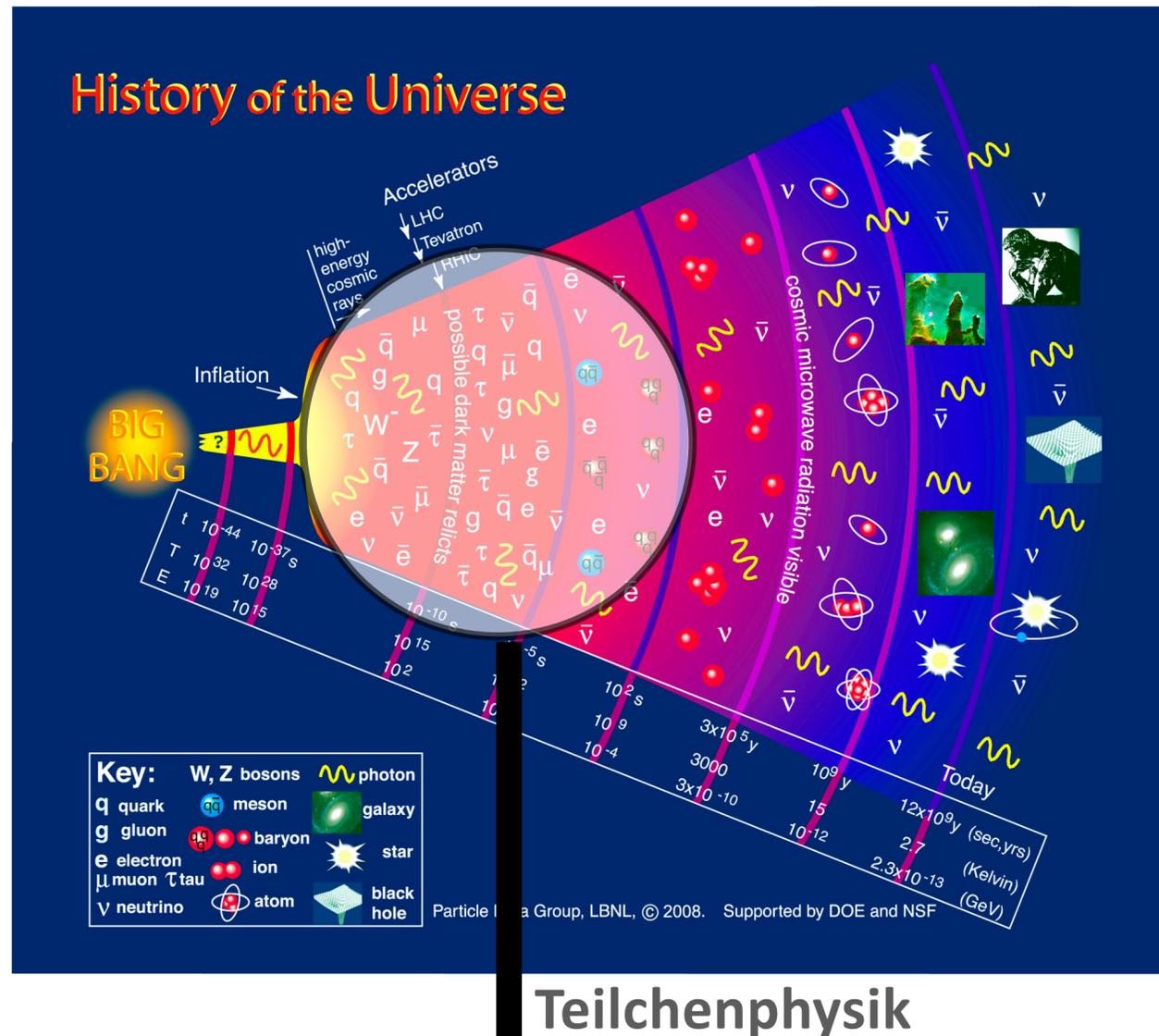
Geschichte des Universums



Theorie

Experiment

Was hat das mit Teilchenphysik zu tun?



- Mit starken Teilchenbeschleunigern erzeugen wir an einem winzigen Punkt für eine ganz kurze Zeit eine Umgebung, wie es sie im frühen Universum, kurz nach dem Urknall gab
- So wollen wir herausfinden „was die Welt im Innersten zusammenhält“

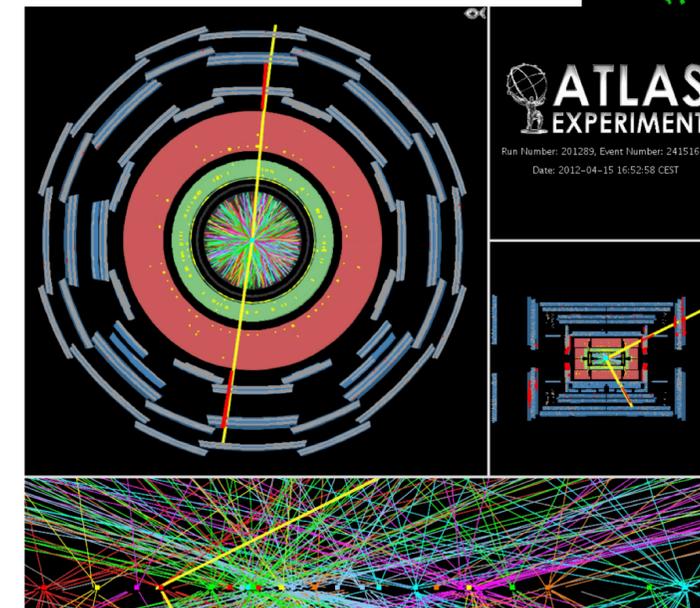
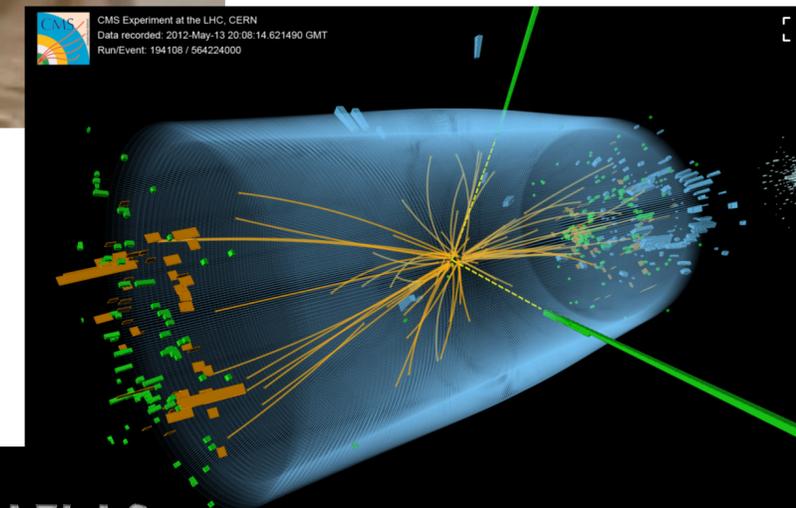
Zusammenfassung

- Das "Standardmodell" beschreibt bisherige Experimente mit hervorragender Genauigkeit: 3 Familien von Quarks und Leptonen. Sie lassen sich aufgrund ihrer Eigenschaften in einem System anordnen.
- Kräfte zwischen Teilchen werden durch Austauschteilchen übertragen. Diese Austauschteilchen sind ebenfalls Elementarteilchen.
- Offene Fragen bleiben:
 - Was ist dunkle Materie?
 - Was ist dunkle Energie?
 - Warum ist nach dem Urknall nur Materie übrig geblieben?
 - Ist das entdeckte Teilchen tatsächlich das lange gesuchte Higgs-Boson? usw...
- Für Antworten benötigen weitere Forschung

Experimente & Forschungs- Methoden

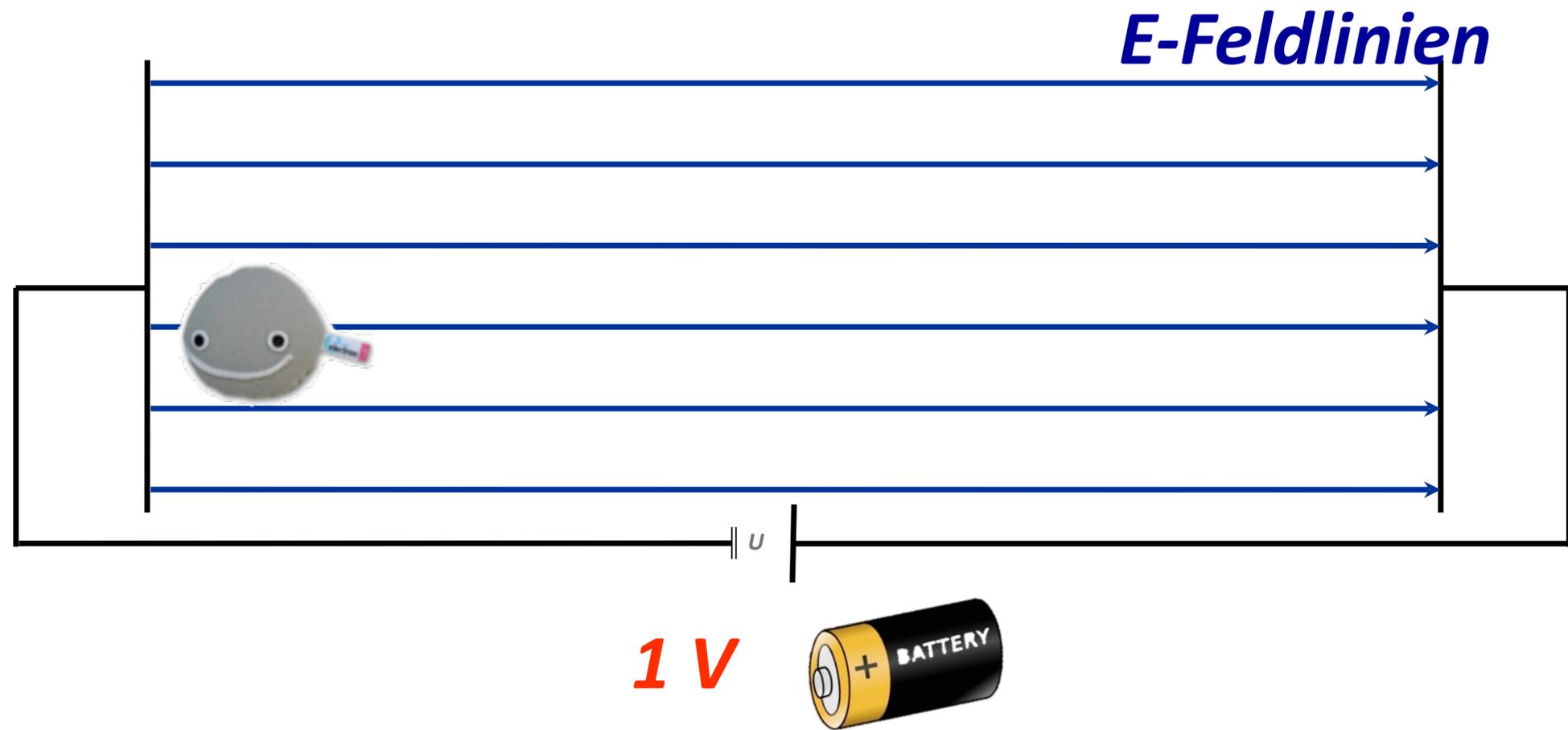
Grundprinzipien der Experimente

- Teilchen werden
 - beschleunigt -> erhalten kinetische Energie E
 - zur Kollision gebracht -> Umwandlung in Masse ($E=mc^2$)
- Neue Teilchen
 - entstehen
 - werden aufgezeichnet -> Detektoren
 - werden identifiziert -> statistische Analyse



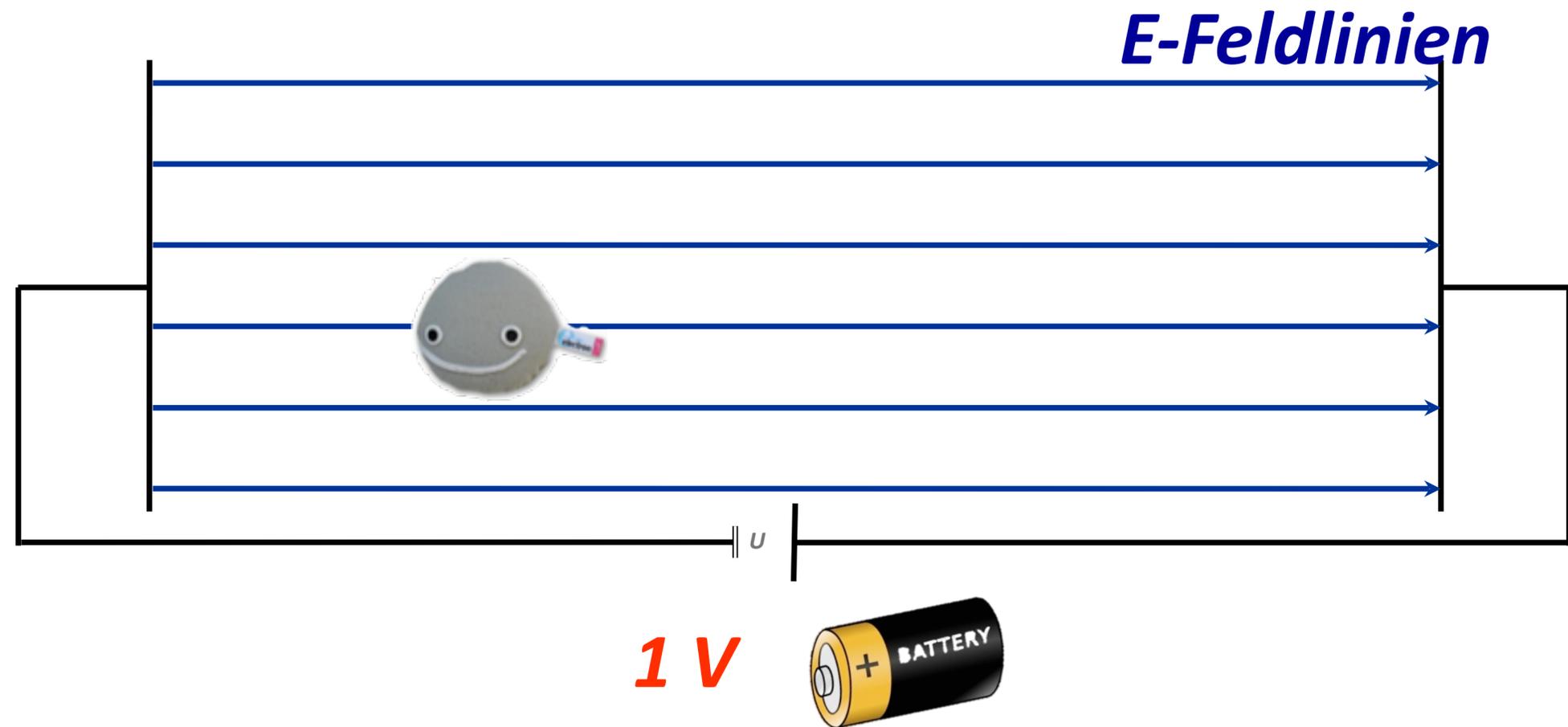
Teilchen beschleunigen

- ▶ geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt



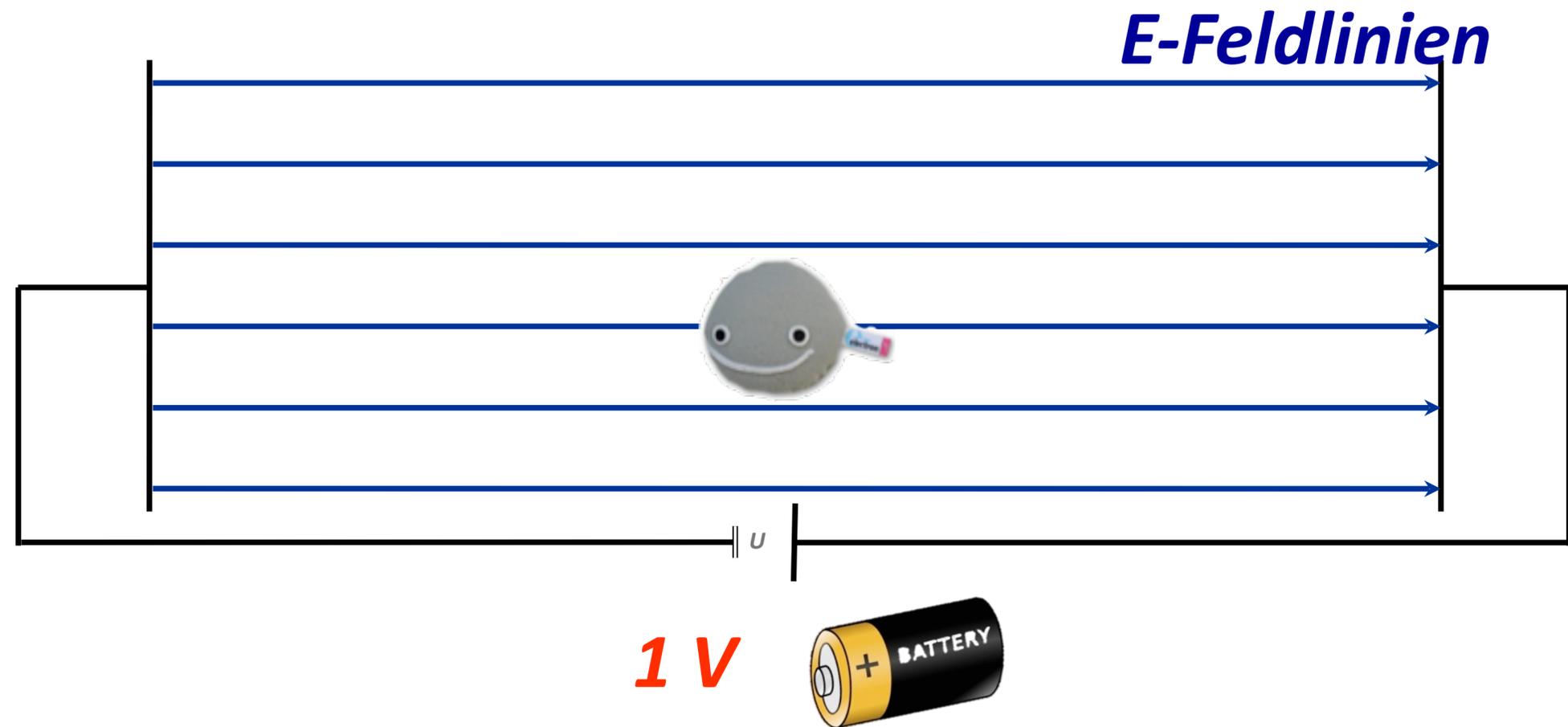
Teilchen beschleunigen

- ▶ geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt



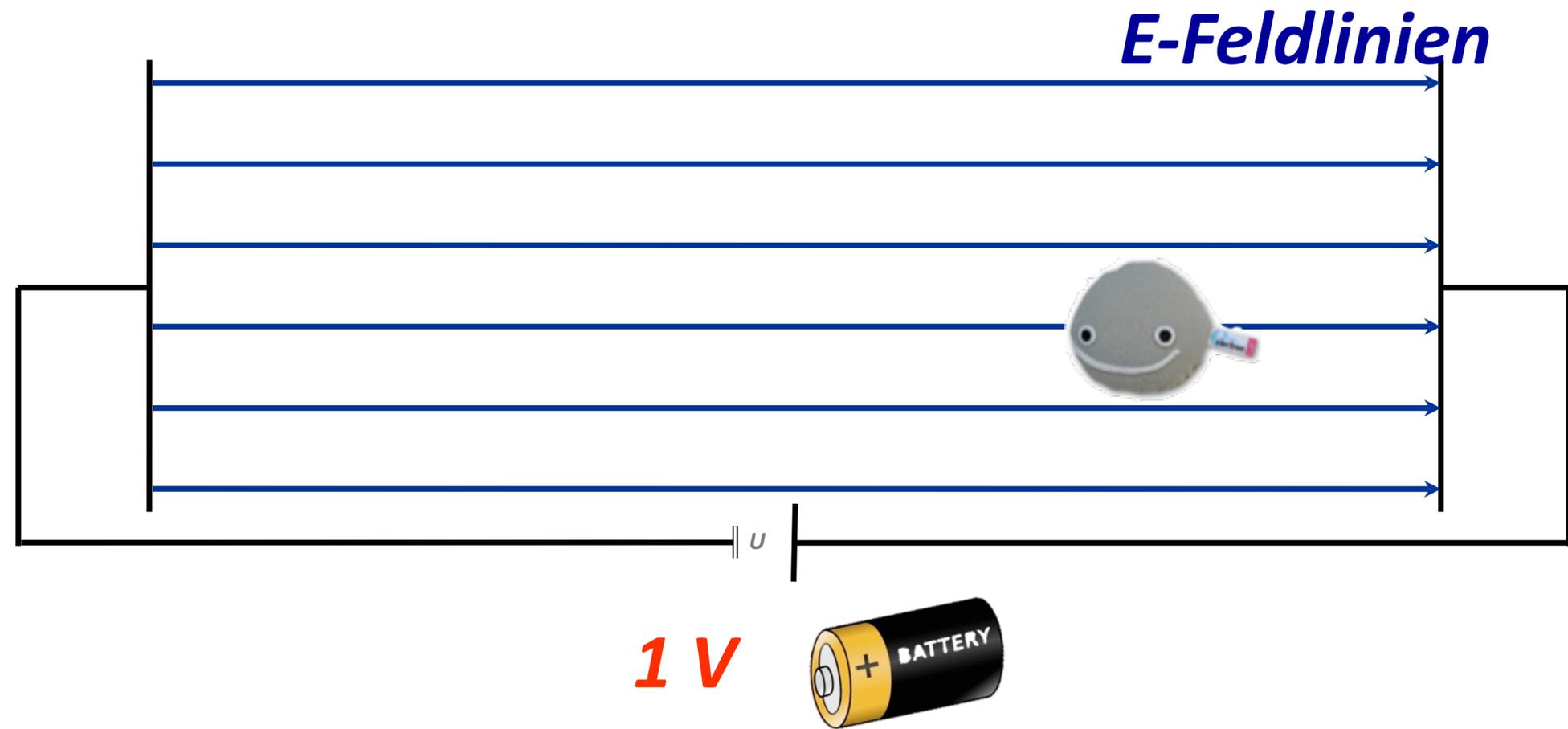
Teilchen beschleunigen

- ▶ geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt



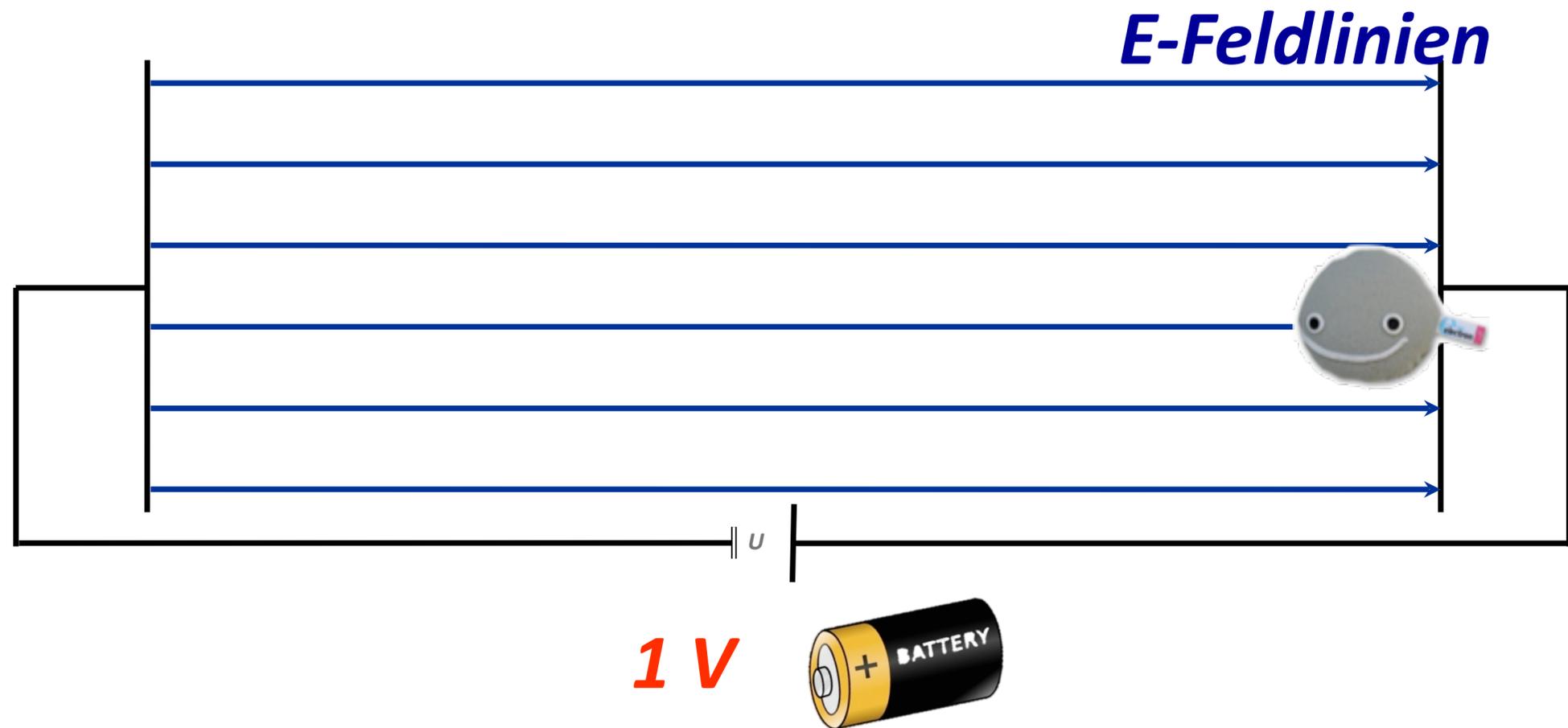
Teilchen beschleunigen

- ▶ geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt



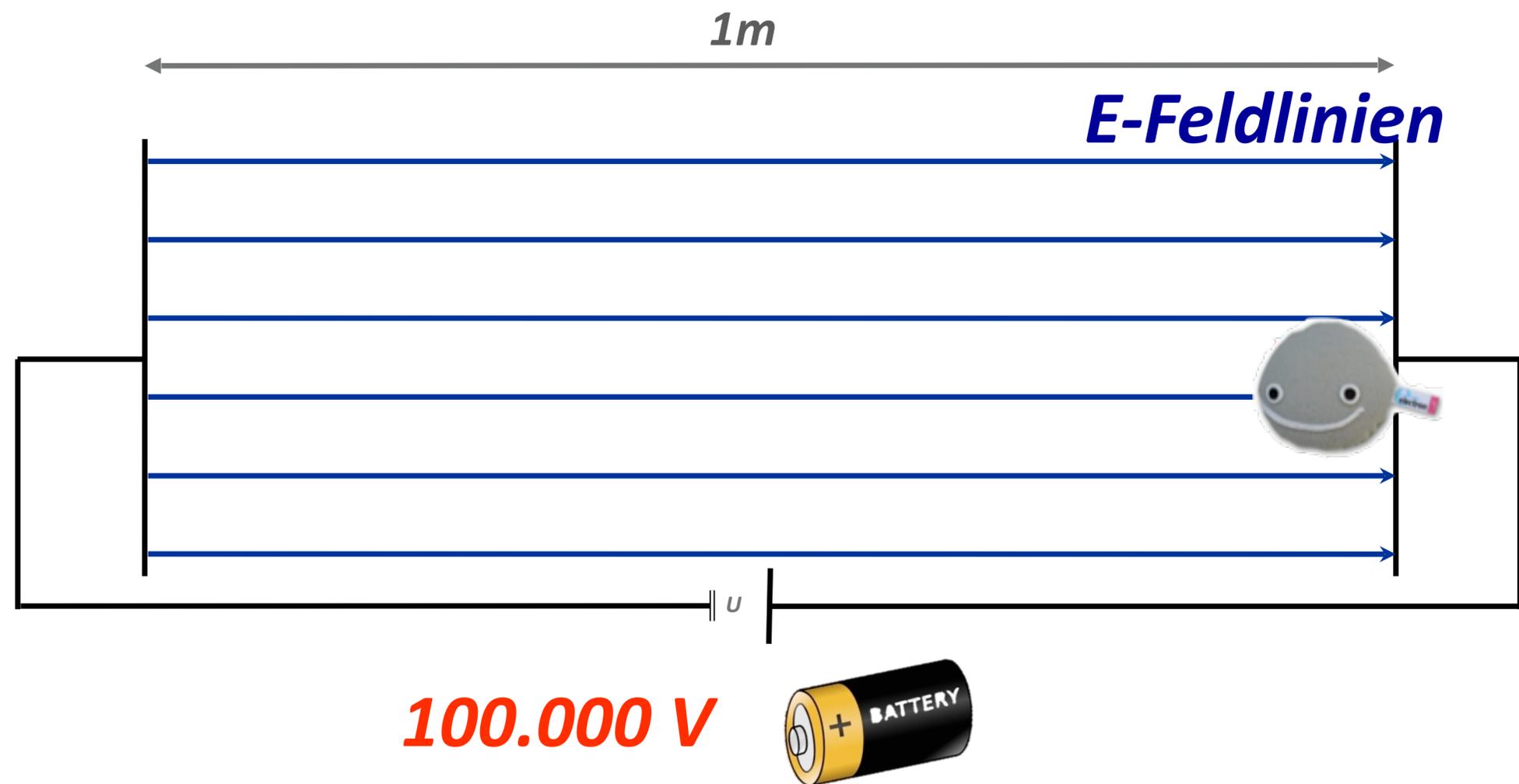
Teilchen beschleunigen

- geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt
- ...und erhalten die Energie $E = q \cdot U$ hier: 1 eV



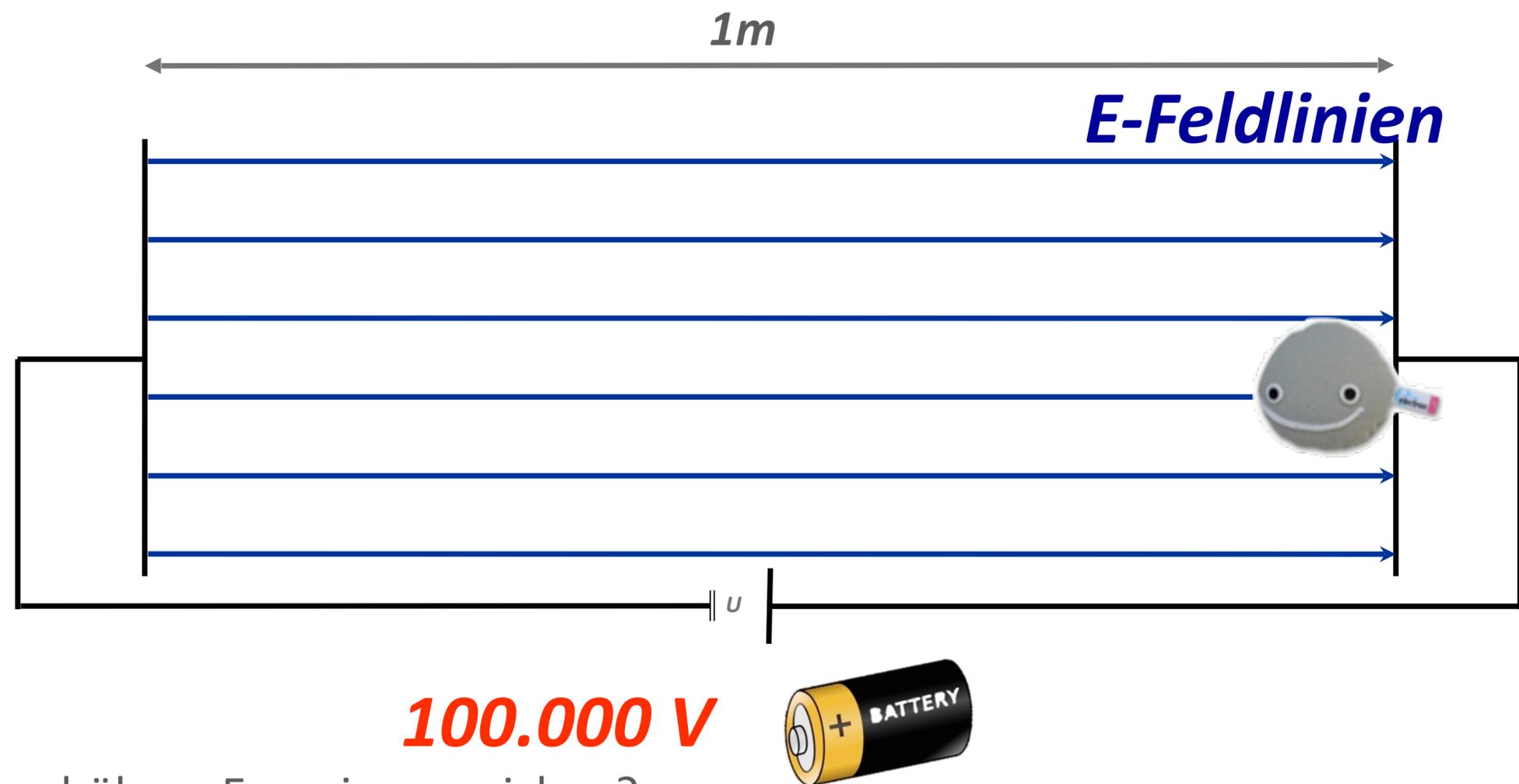
Teilchen beschleunigen

- geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt
- ...und erhalten die Energie $E = q \cdot U$ hier: 100 keV



Teilchen beschleunigen

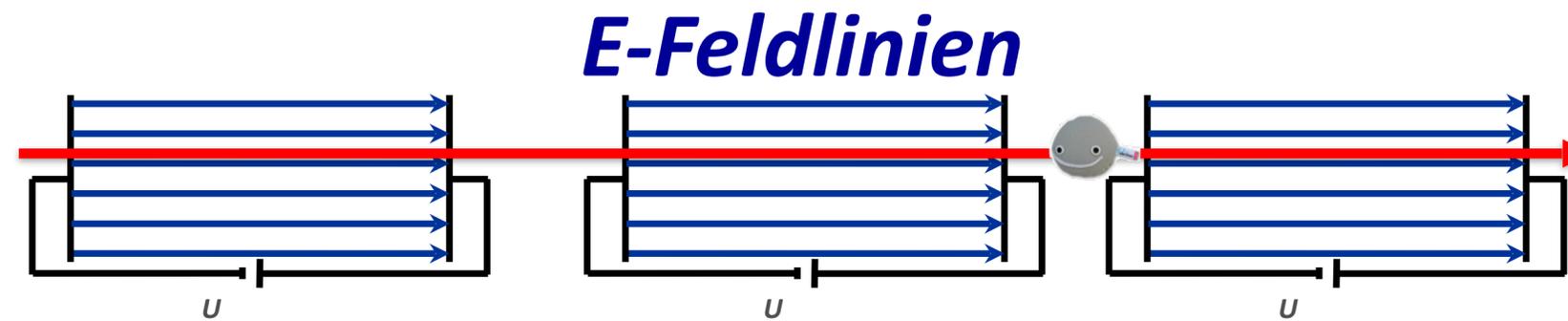
- geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden im E-Feld entlang der Feldlinien beschleunigt
- ...und erhalten die Energie $E = q \cdot U$ hier: 100 keV



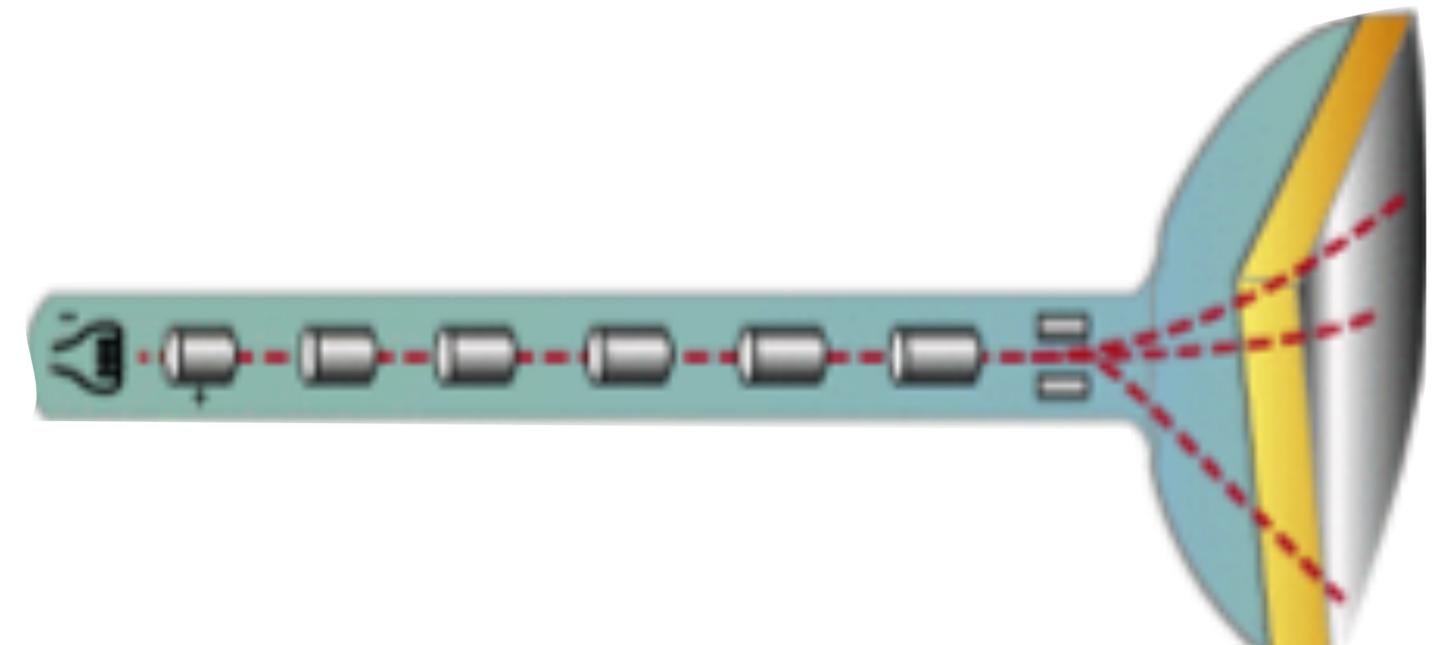
- Wie könnte man höhere Energien erreichen?

Linear Beschleuniger

Viele E-Felder hintereinander



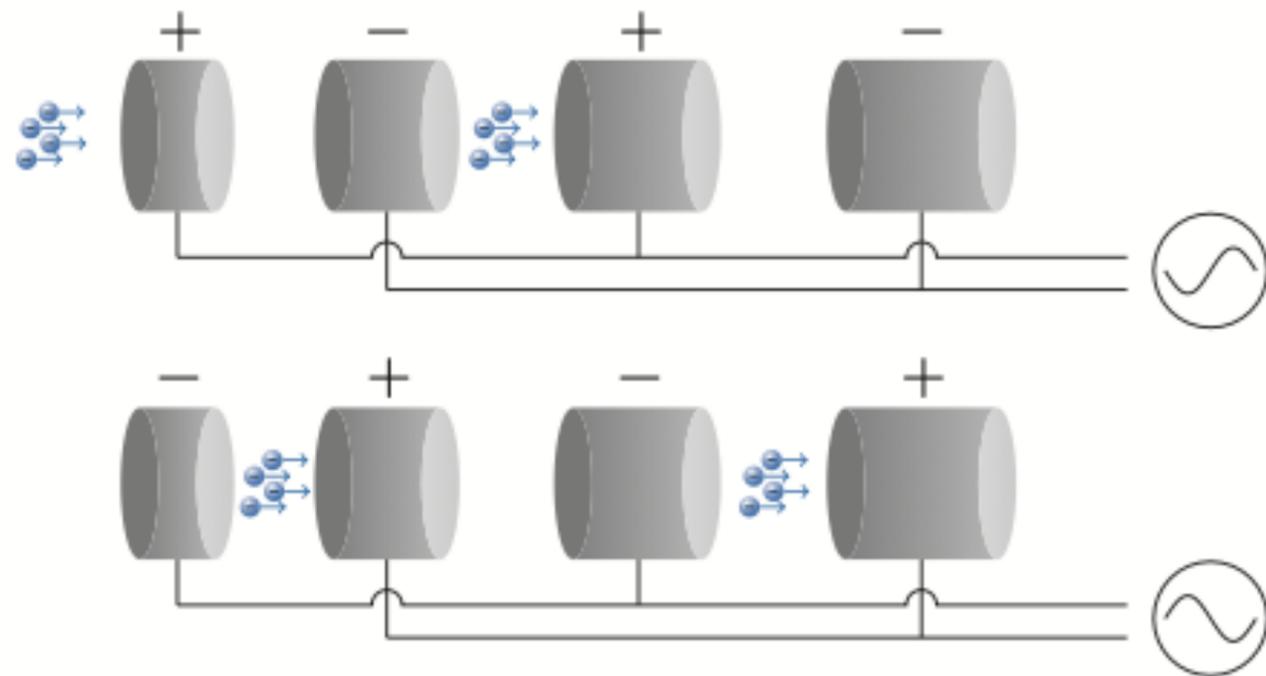
Bsp. alter Röhrenfernseher



Linear Beschleuniger

Wie funktioniert das genau?

- Beschleunigung in Hochfrequenz (HF)-Kavitäten (Metallkammer, die ein elektromagnetisches Feld enthält)
- Teilchen werden in kleinen Paketen beschleunigt
- Elektrisches Feld der Kavität wird mit Frequenz f umgepolt, sobald ein Packet die Kavität passiert hat.

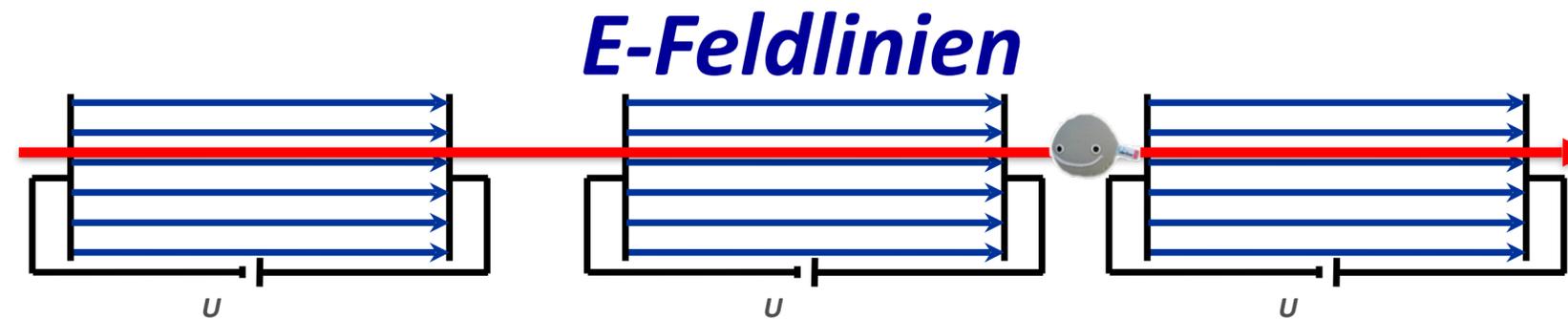


Assembly of cavities for the HIE-ISOLDE accelerator (Image: Maximilien Brice/CERN)



Assembly of two crab cavities for the High-Luminosity LHC (Image: Julien Ordan/CERN)

Linear Beschleuniger

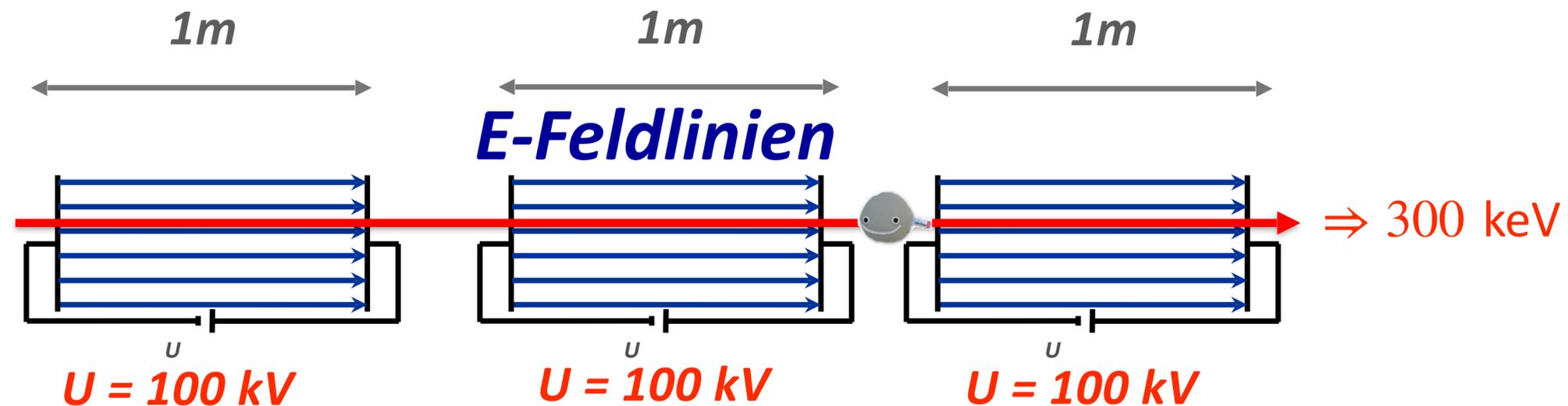


Aber: Wie lang muss ein solcher Beschleuniger mindestens werden, um ein Higgs produzieren zu können?



$$M_H = 125 \text{ GeV}/c^2 = 125.000.000 \text{ keV}/c^2$$

Linear Beschleuniger

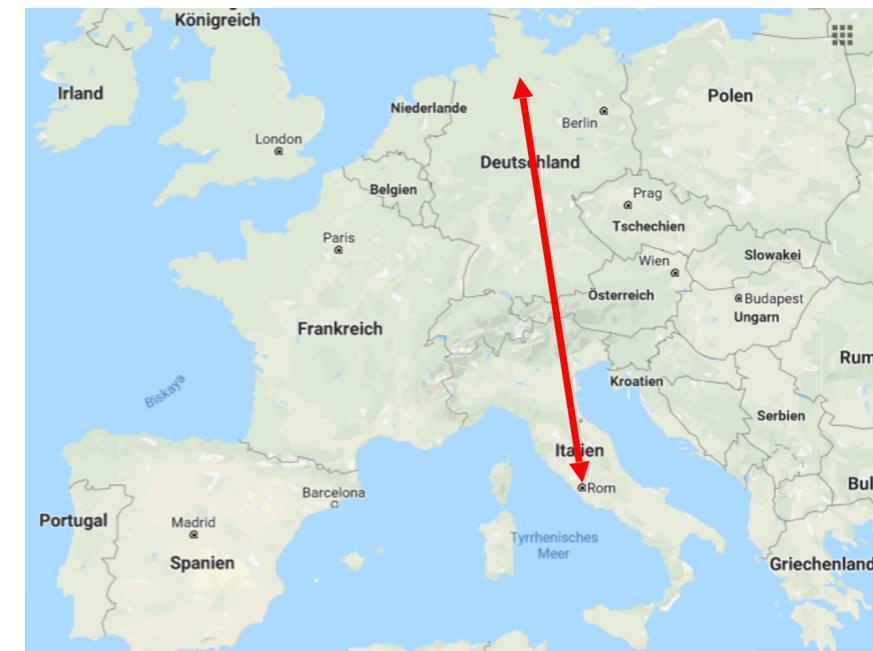


Aber: Wie lang muss ein solcher Beschleuniger mindestens werden, um ein Higgs produzieren zu können?



$$M_H = 125 \text{ GeV}/c^2 = 125.000.000 \text{ keV}/c^2$$

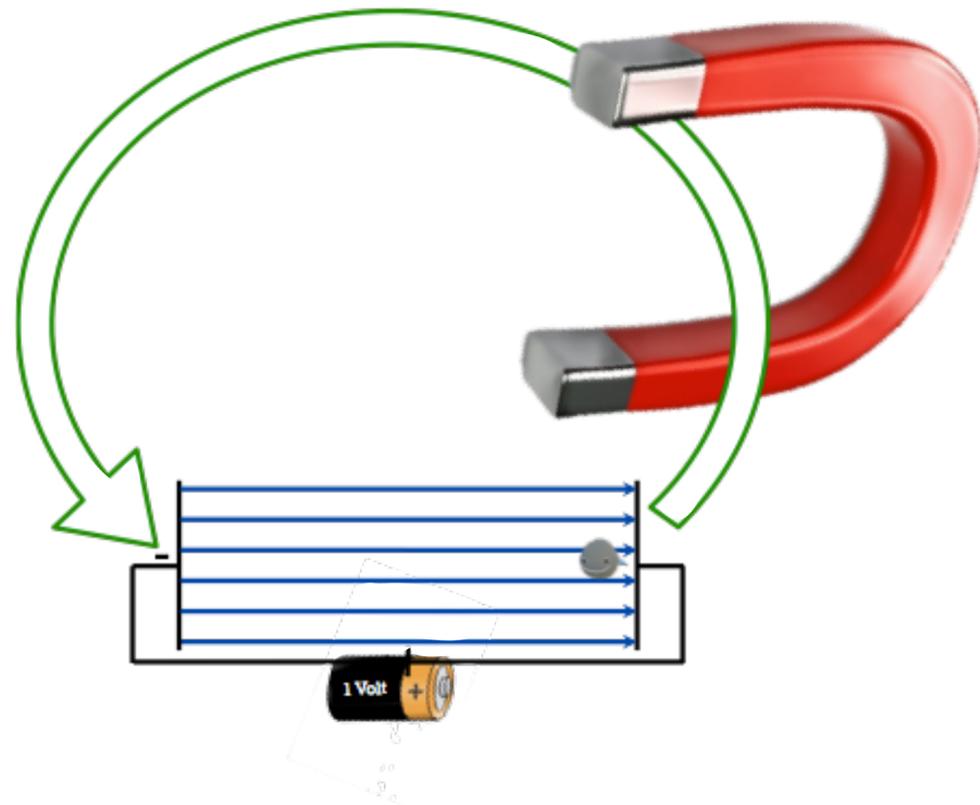
$\Rightarrow 1.250 \text{ km}$ ca. Strecke: Hamburg \leftrightarrow Rom



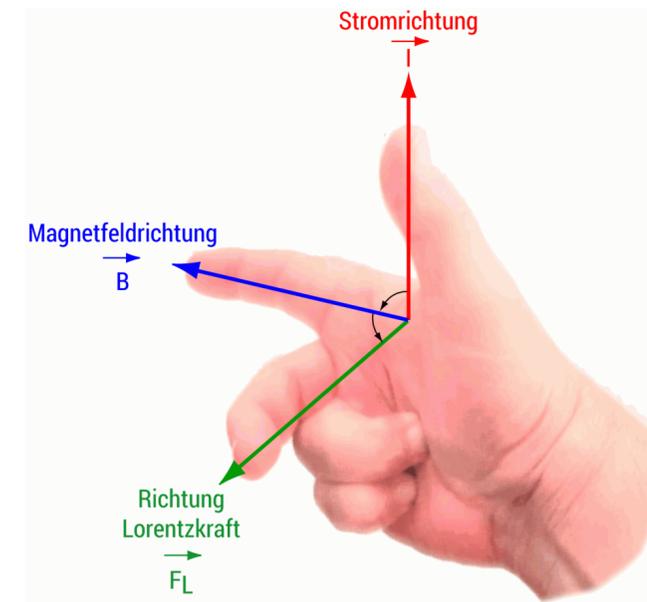
Was könnte man
stattdessen machen?

Felder mehrfach nutzen

Teilchen mit Lorentzkraft auf Kreisbahn lenken

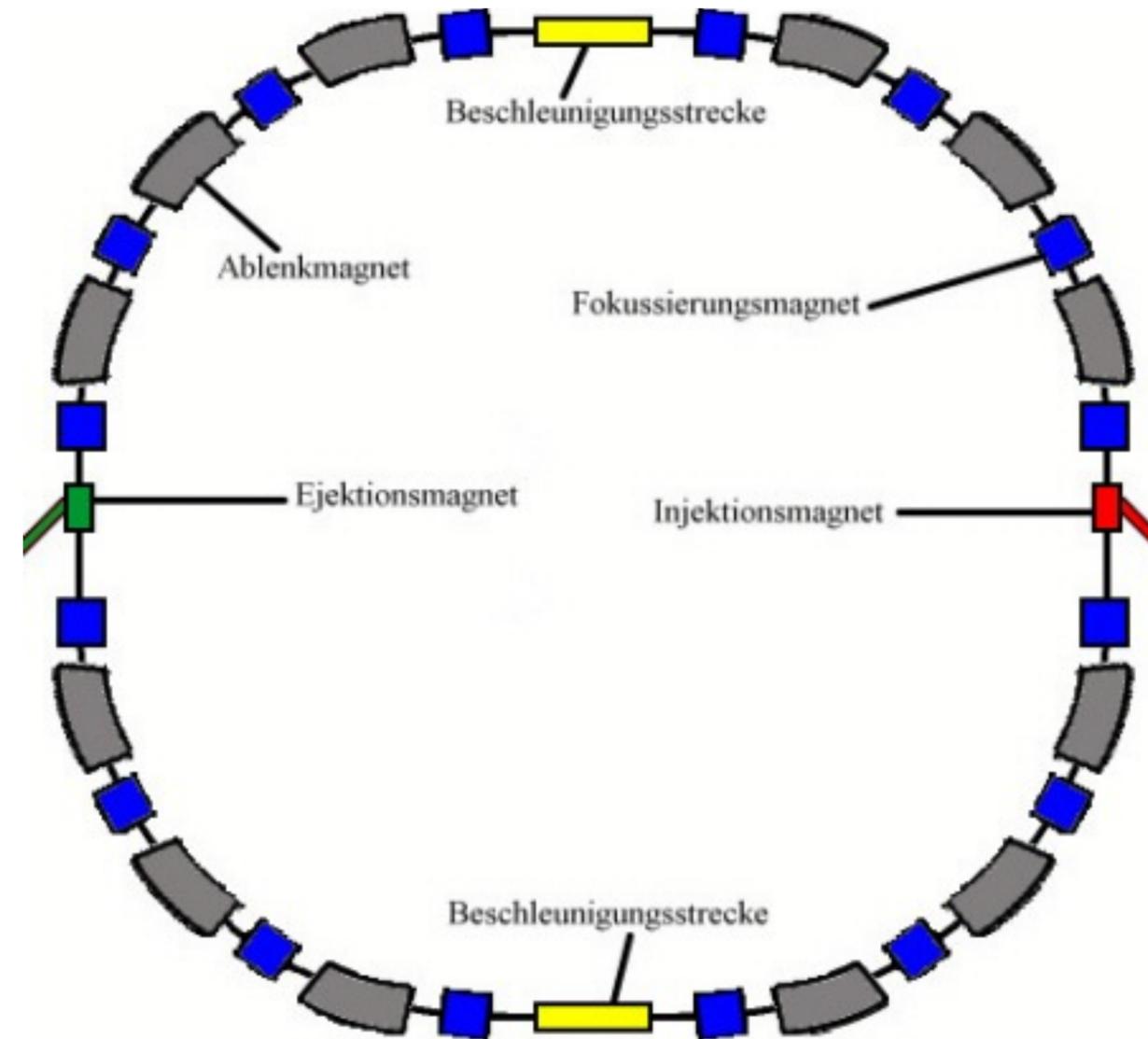


Rechte-Hand-Regel

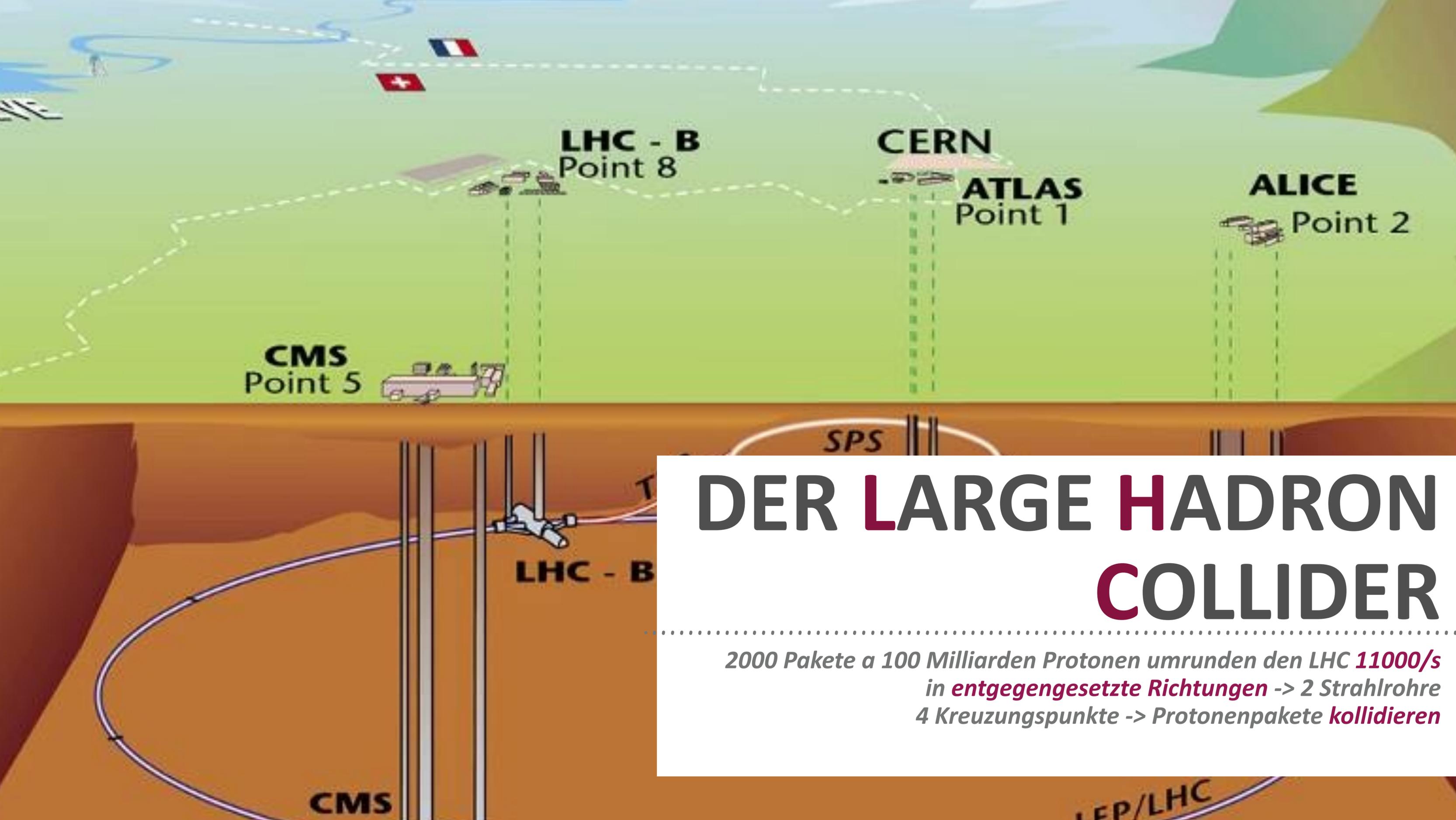


Ringbeschleuniger

- Ablenkmagnete lenken Teilchen auf Kreisbahn
- Beschleunigung auf den geraden Strecken bei jedem Durchlauf



Kennt ihr Beispiele für Ringbeschleuniger?



DER **L**ARGE **H**ADRON **C**OLLIDER

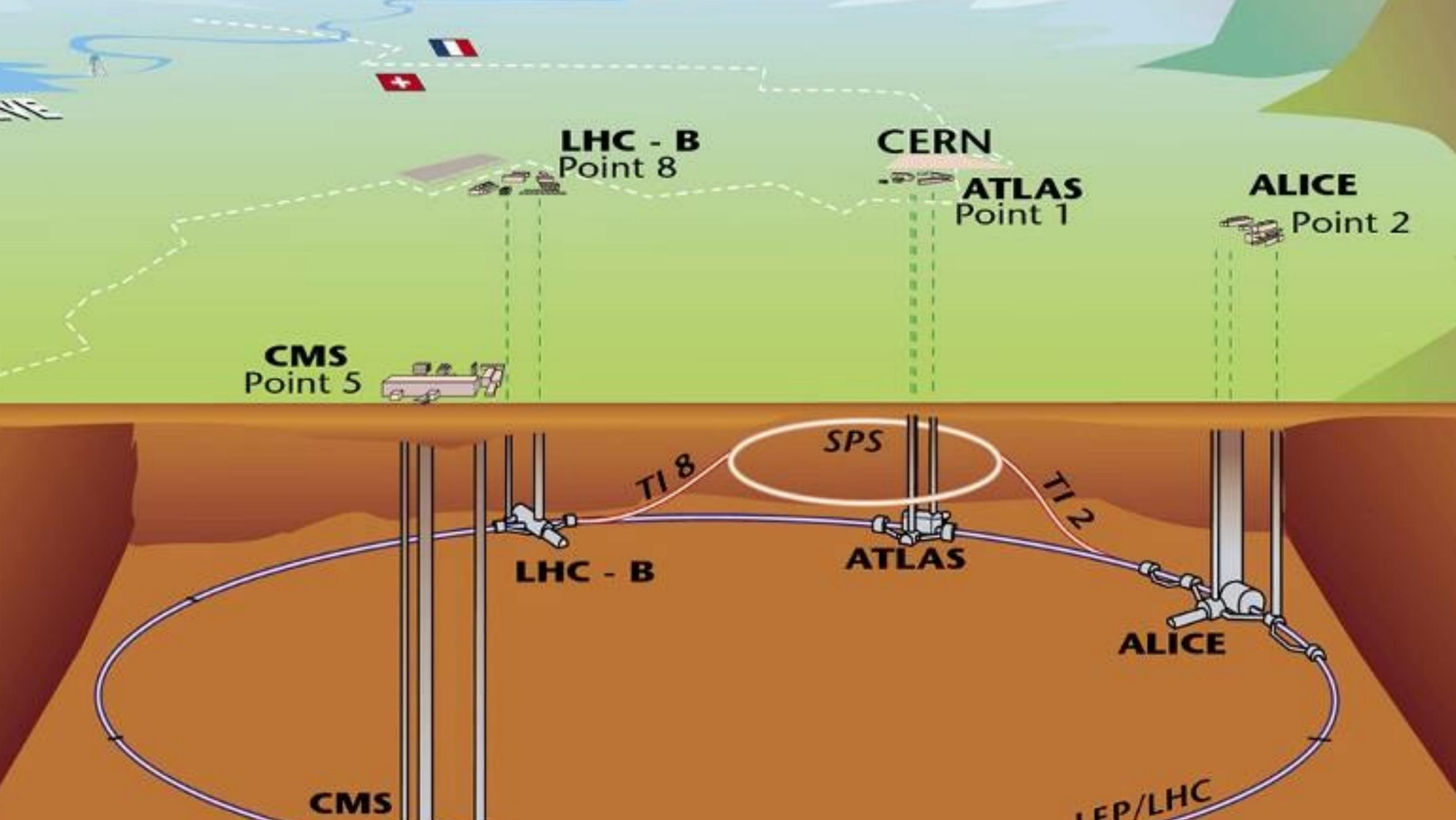
*2000 Pakete a 100 Milliarden Protonen umrunden den LHC **11000/s**
in **entgegengesetzte Richtungen** -> 2 Strahlrohre
4 Kreuzungspunkte -> Protonenpakete **kollidieren***

CMS

LHC - B

SPS

LEP/LHC

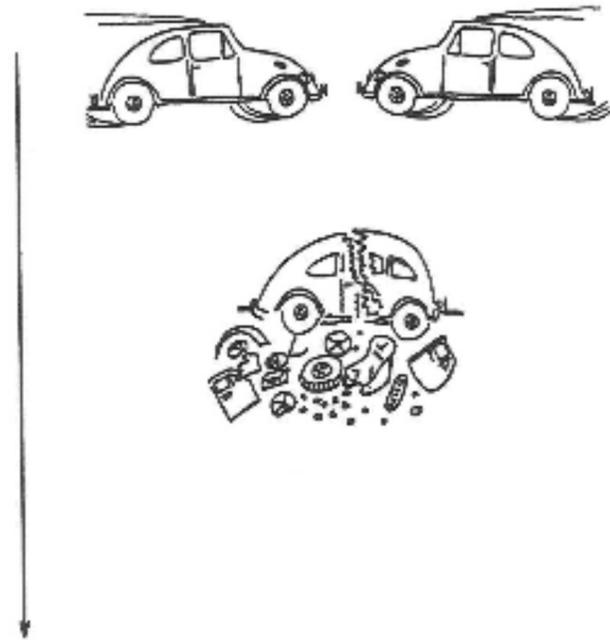




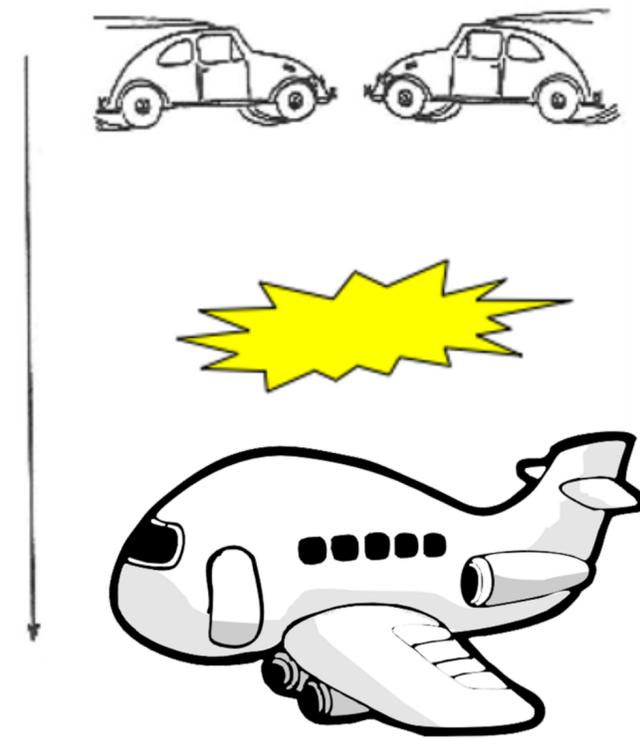
DER LARGE HADRON COLLIDER

- 27 km Umfang
- 100 m unter Erde
- Protonen erreichen Energie von 6,5 TeV
- LHC-Strahl Energie eines ICEs
- Magnete: supraleitend bei $1,9 \text{ K} < (\text{Universum}) = 2,7 \text{ K}$
- Vakuum im Strahlrohr 10x leerer als auf dem Mond

Wenn Teilchen kollidieren...



... entstehen neue Teilchen



A photograph of a chalkboard with the equation $E = mc^2$ written in white chalk. A hand is visible on the right side, holding a piece of chalk.

mehr Energie



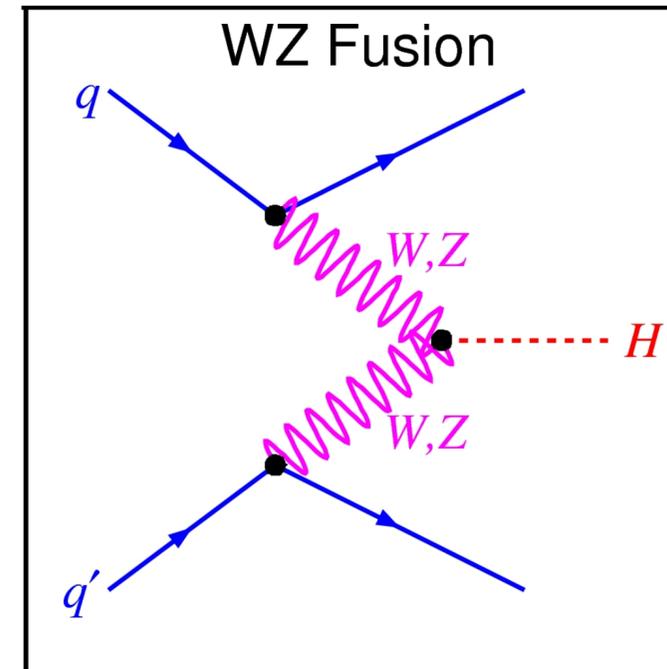
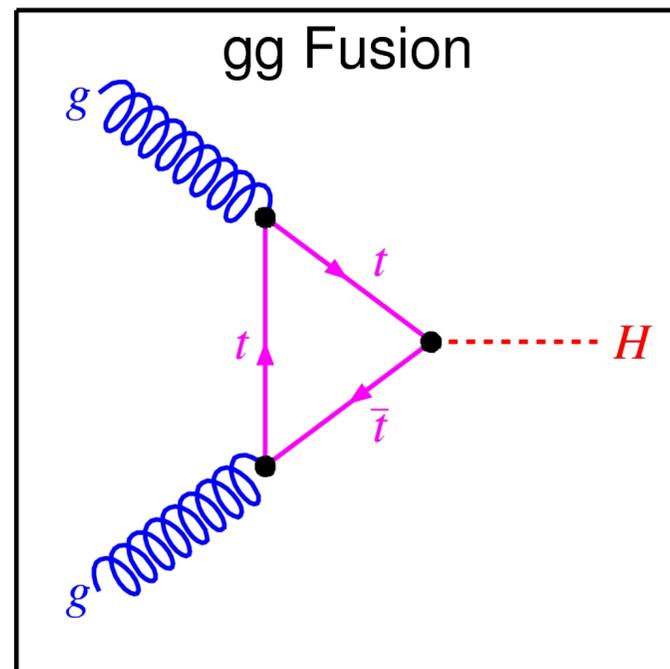
mehr/schwerere Teilchen

Live-Webcam: LHC, ATLAS-Experiment:



Wie können wir neue Teilchen aus zwei Protonen erzeugen?

- Kollision von einzelnen Gluonen und Quarks



+ weitere aber weniger wichtige Produktionskanäle

Wie oft entsteht ein Higgs Boson?



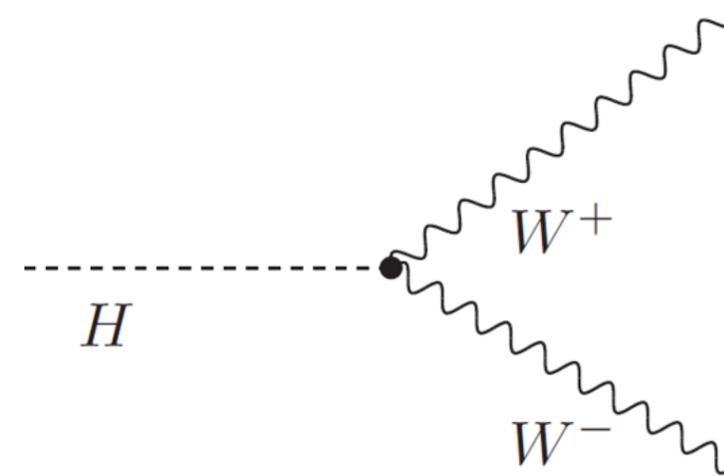
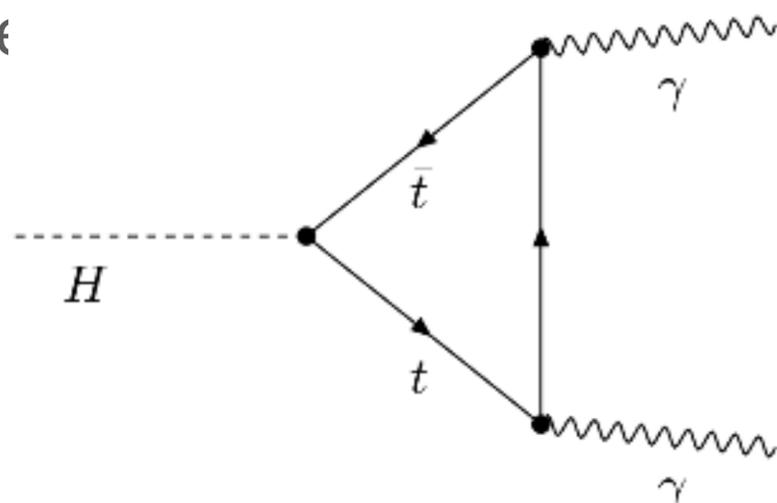
... etwa alle 10 Milliarde Ereignisse 1x ...

Wie findet man das Higgs?

Was sagt die Theorie über das Higgs?

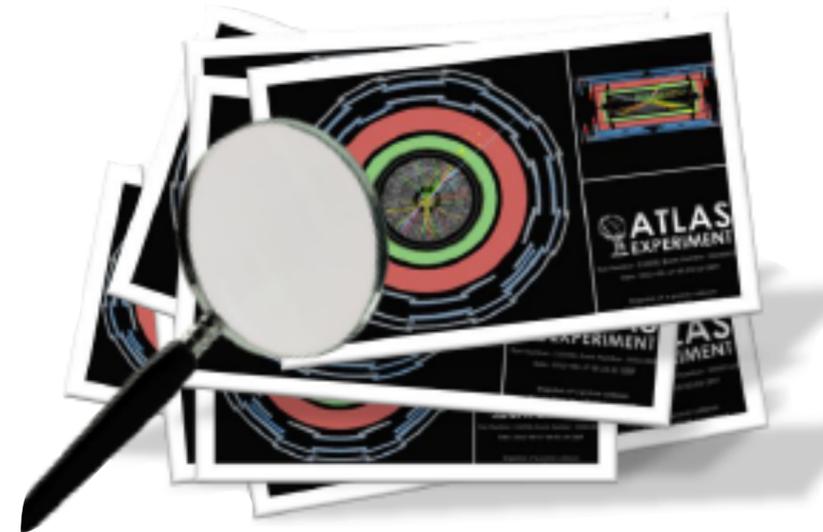
-> Das Higgs zerfällt sofort wieder

- in 2 Photonen oder
- in 2 W-Bosonen (die zerfallen wieder) oder
- und so weiter



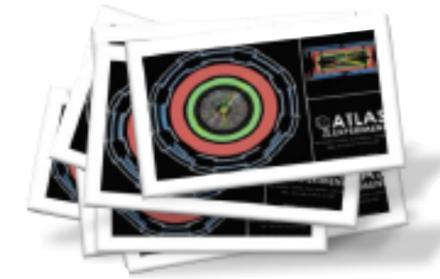
Wie findet man das Higgs?

- Jede*r Forscher*in wählt einen “Zerfallskanal”, den er für vielversprechend hält
 - ➔ Wie sieht “mein” Zerfall im Detektor aus?
 - ➔ Welche anderen Prozesse gibt es, die genauso aussehen?
 - ➔ Suche nach Kollisionen, welche die Kriterien erfüllen
 - ➔ Wie viele finden wir?



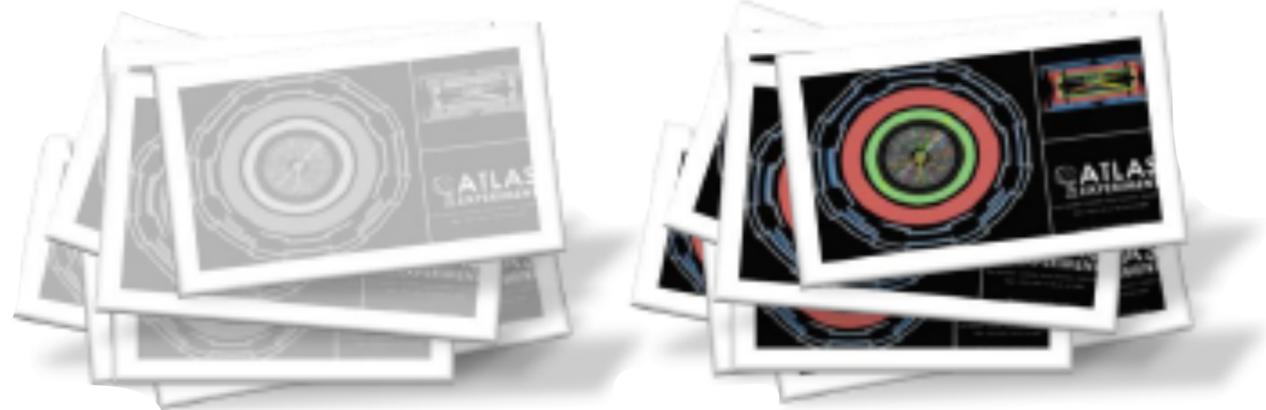
Wie findet man das Higgs?

Ein (fiktives) Beispiel



- Wir finden 200 Bilder, die wie ein Higgs aussehen
- Wir erwarten 150 Bilder, die genau so aussehen, ABER KEIN Higgs sind
- Bleiben 50 Kandidaten für ein Higgs-Teilchen

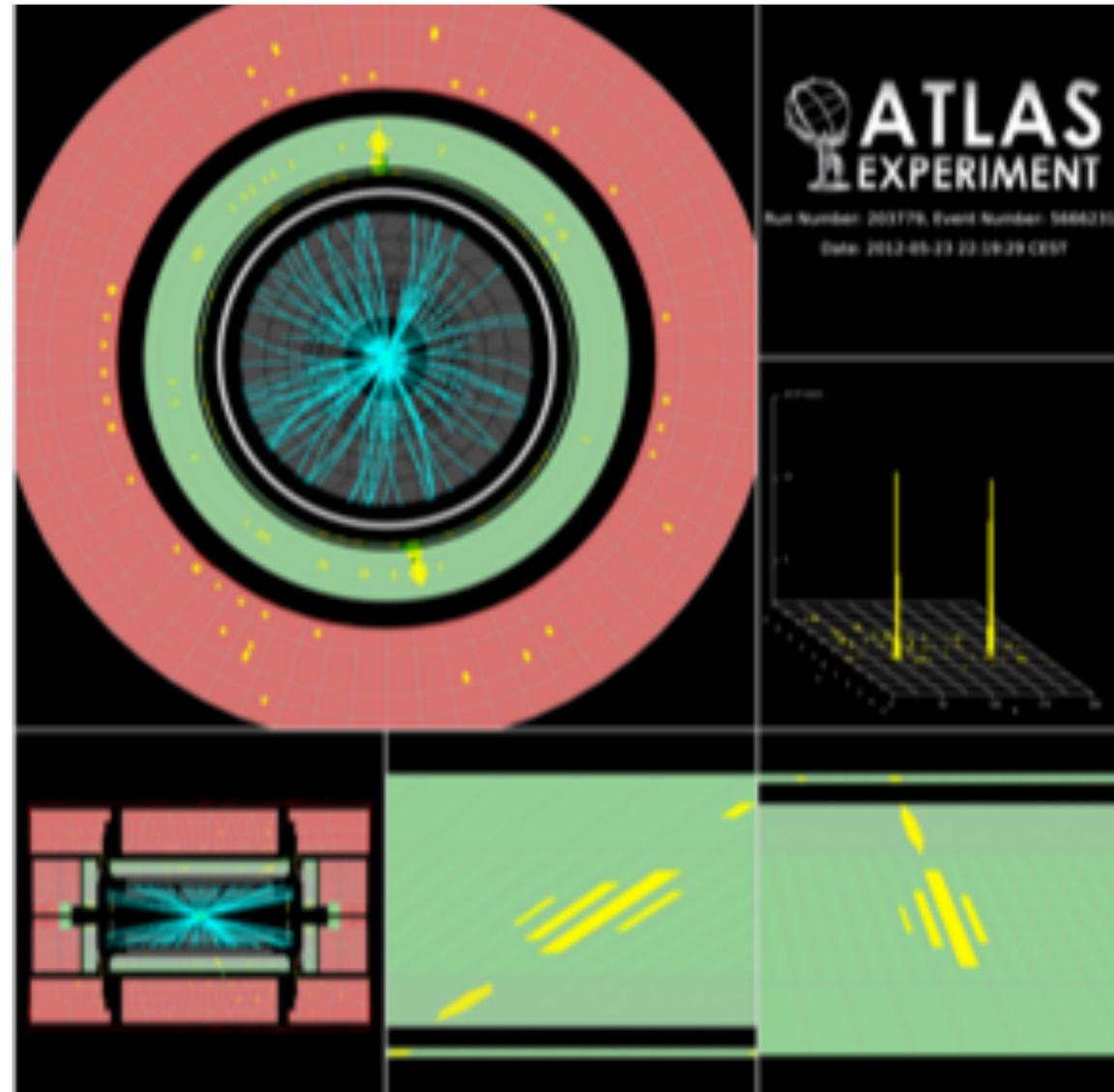
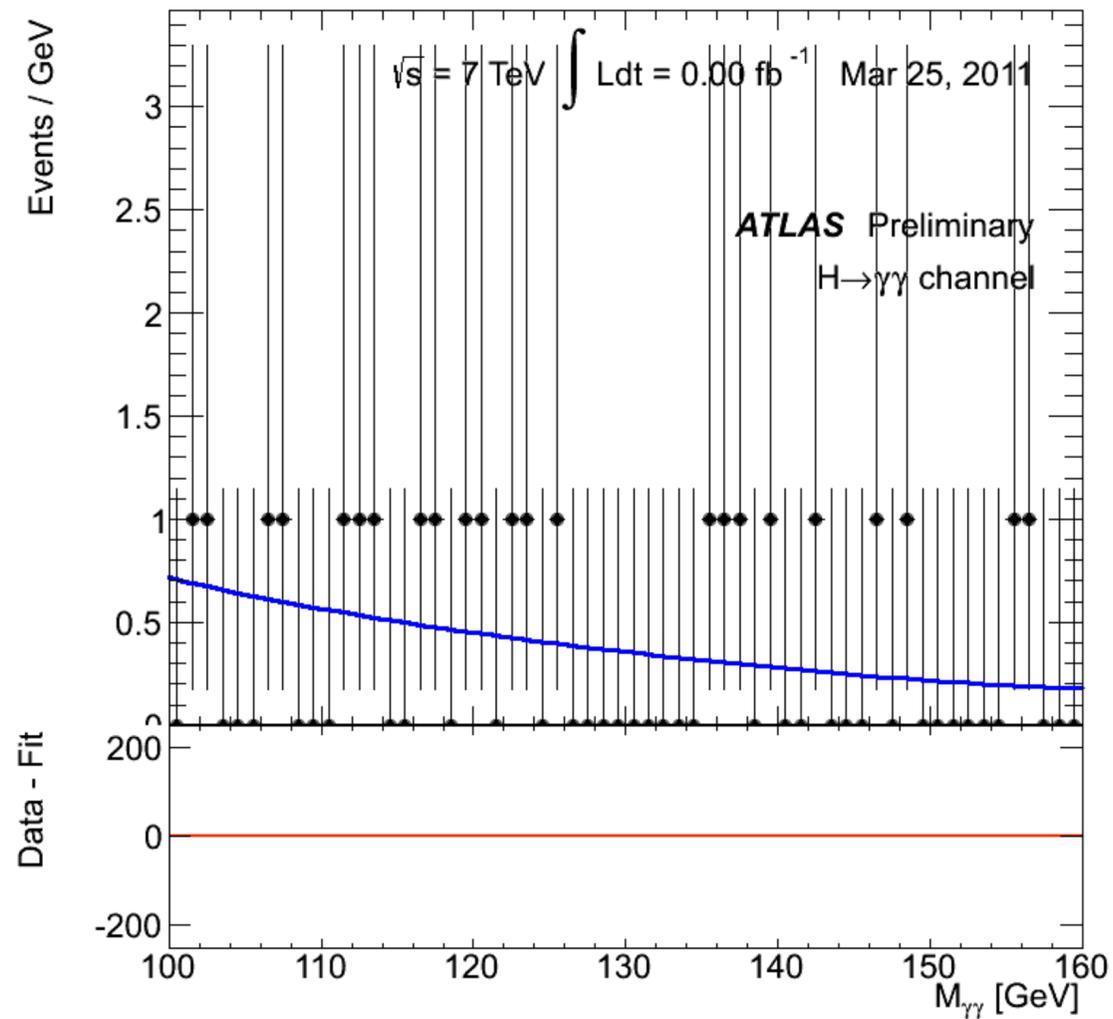
**150x
kein Higgs**



**50x
Higgs**

Beispiel 2: $H \rightarrow \gamma\gamma$

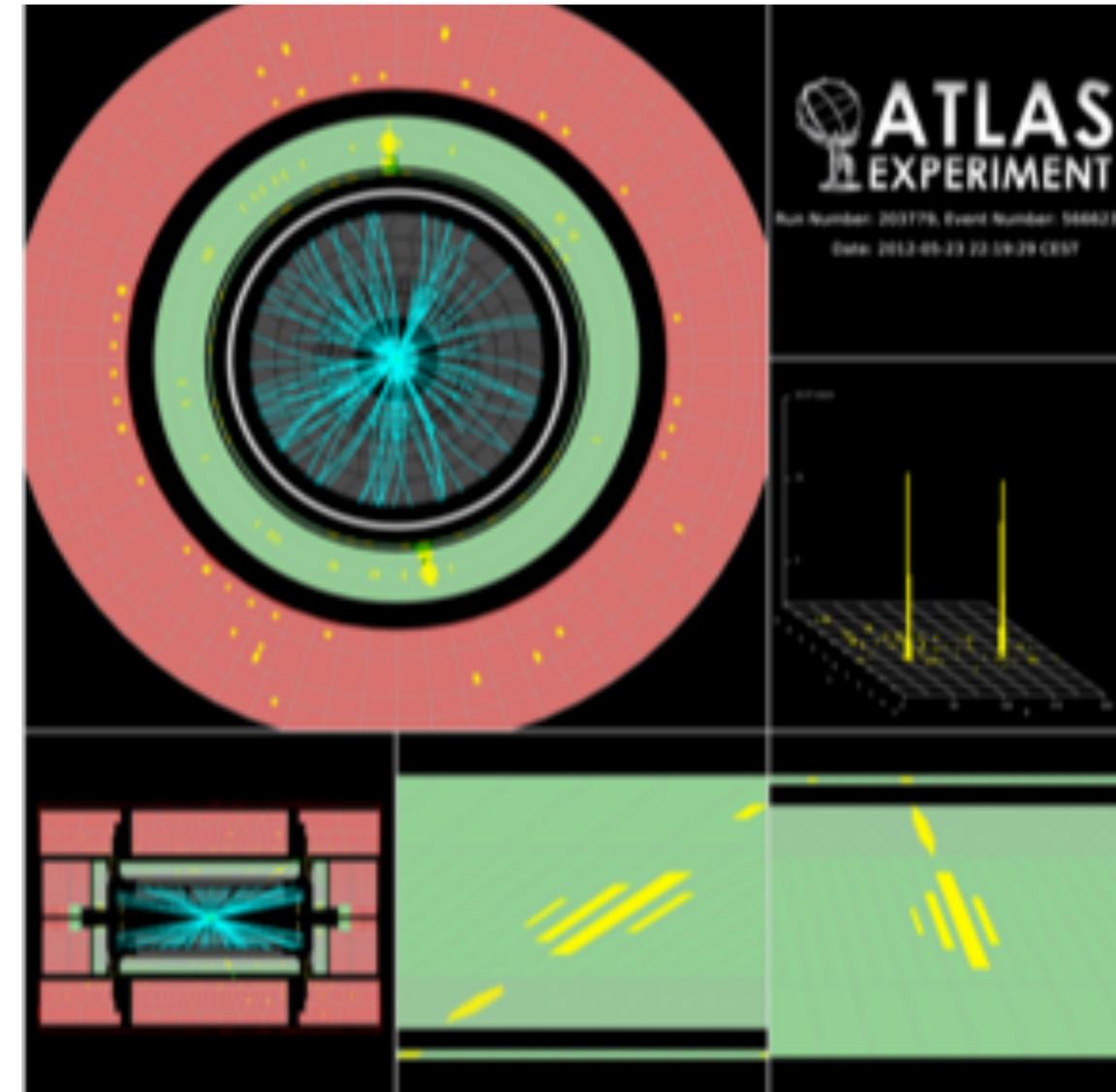
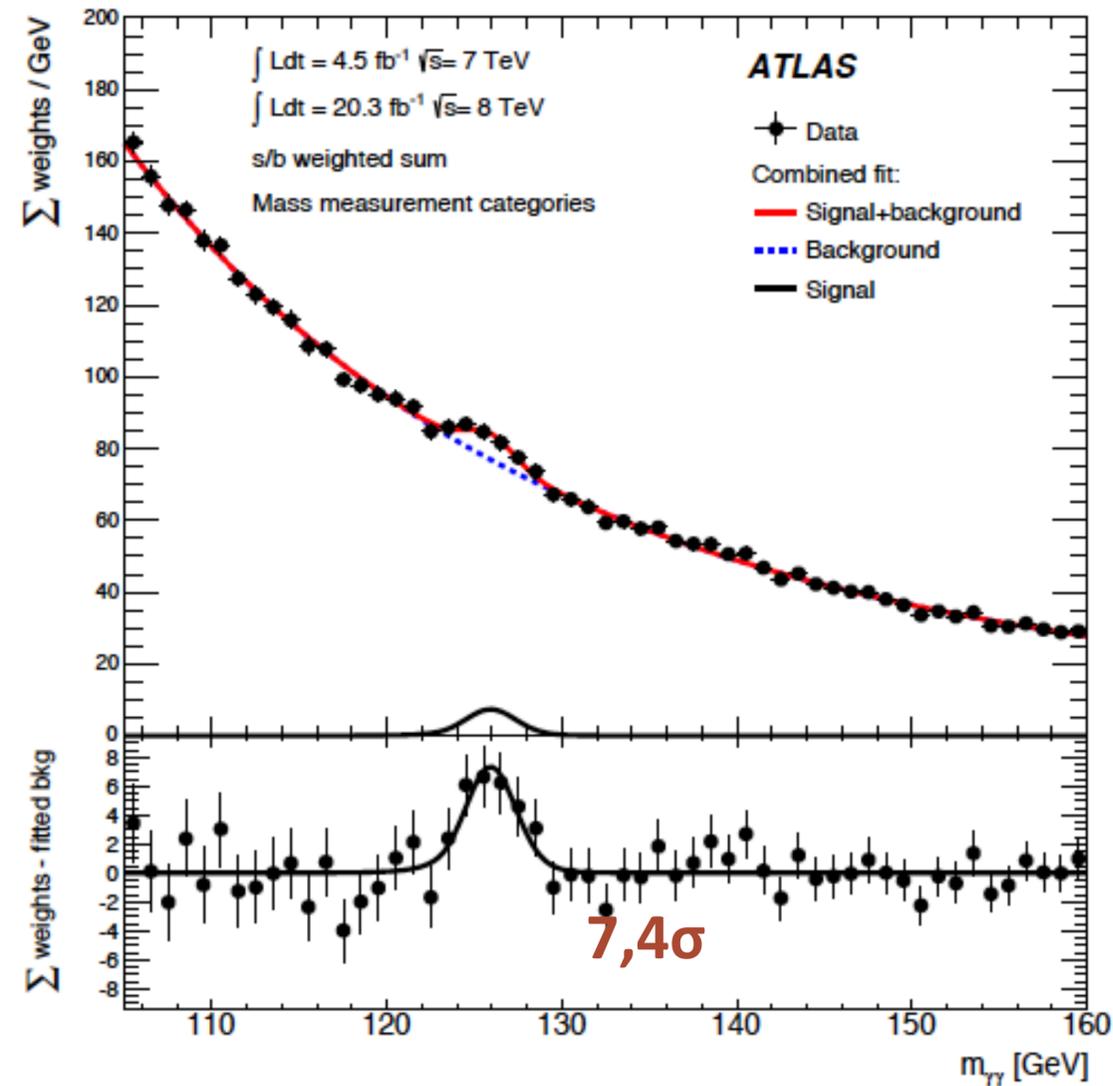
<http://arxiv.org/abs/1406.3827>



7σ - Wahrscheinlichkeit eines Zufalls $\approx 1: 400.000.000.000$

Beispiel 2: $H \rightarrow \gamma\gamma$

<http://arxiv.org/abs/1406.3827>

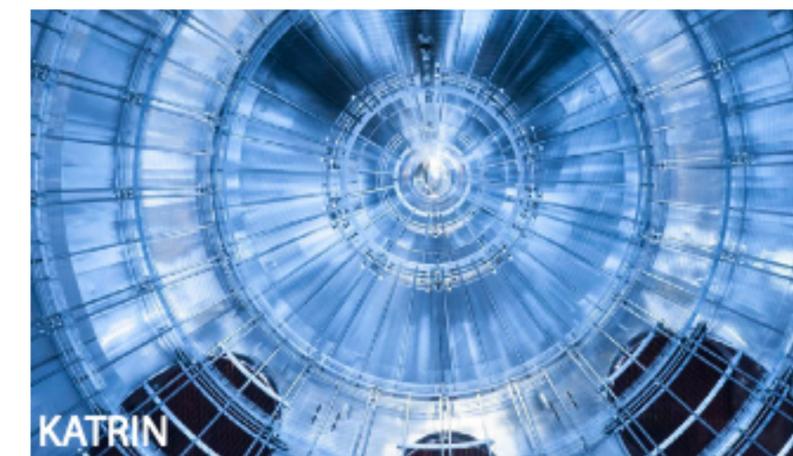
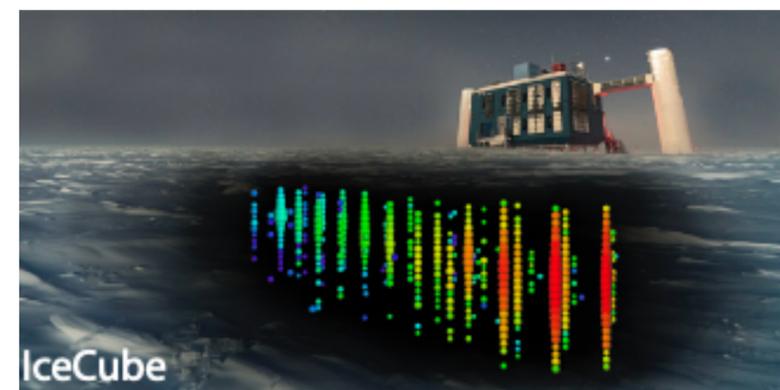
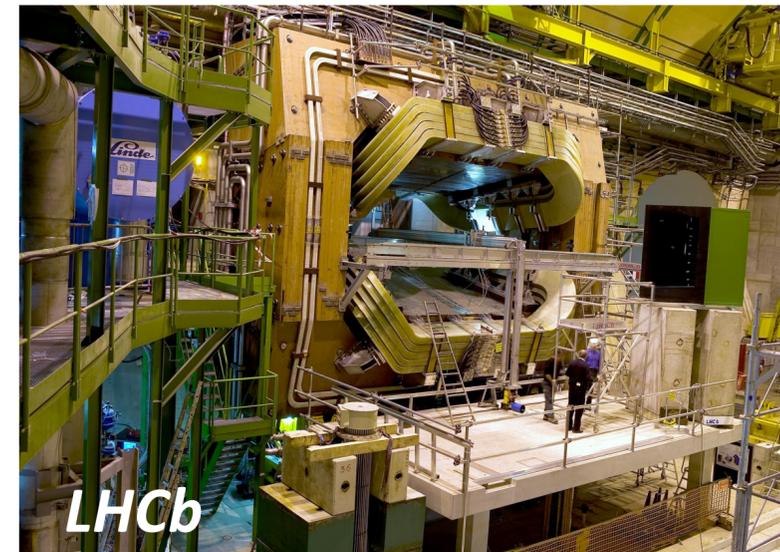
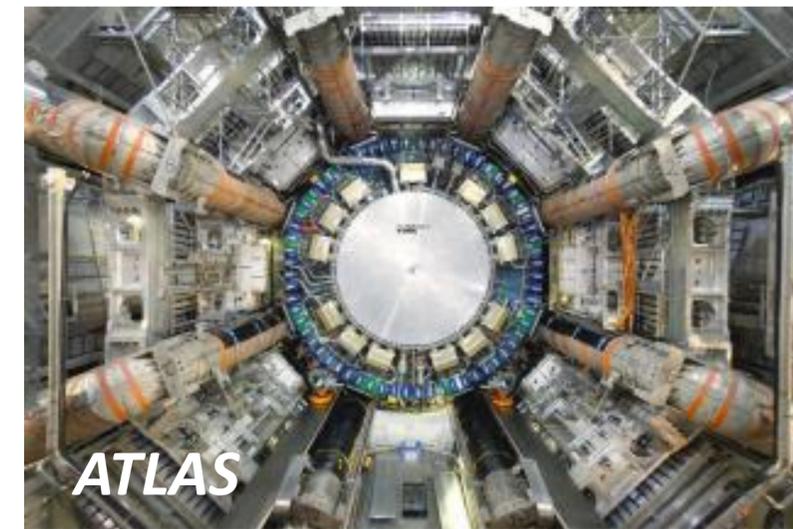
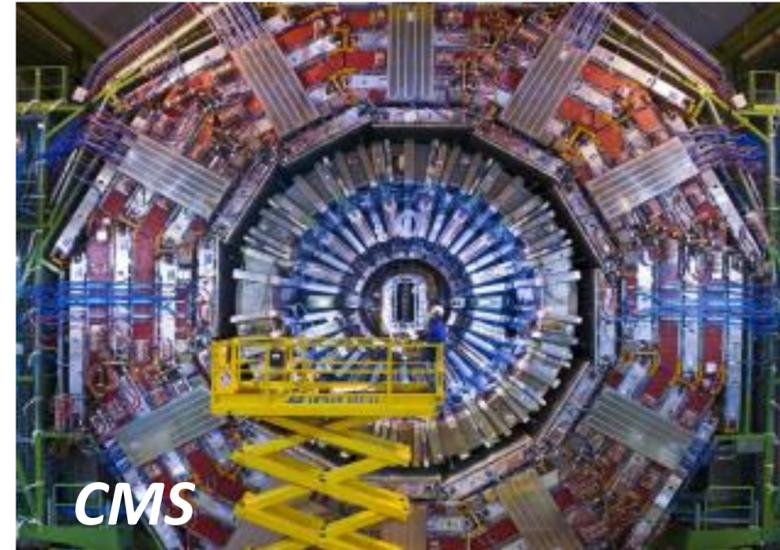


7σ - Wahrscheinlichkeit eines Zufalls $\approx 1: 400.000.000.000$

Wie können wir die neuen
Teilchen nachweisen?

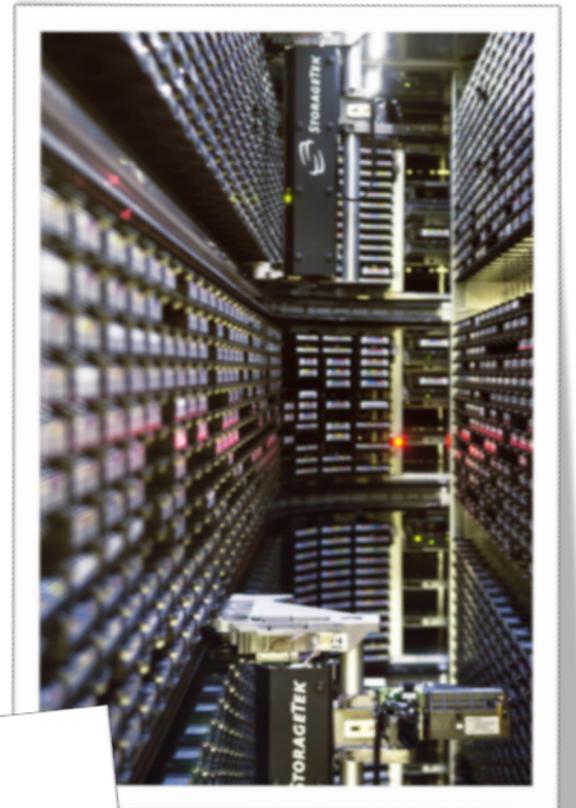
Teilchendetektoren.

- sind „Kameras“, die Kollisionen aufzeichnen
- vermessen die entstandenen Teilchen:
 - Welche Teilchen?
 - Wo lang geflogen?
 - Energie / Impuls?



Daten verarbeiten, analysieren & speichern

- Insgesamt 40 Millionen Kollisionen/s (80 TB/s)
→ Wir müssen filtern!!
- 90 Petabyte (90 Millionen GB) Daten pro Jahr
- Interessante (z.B. Higgs ähnliche) Ereignisse lösen Trigger aus → das Foto wird gespeichert!
- Cern hat ein extrem rechenstarkes Computergrid
- Vernetzt 200 Computerzentren überall auf der Welt



Und in Zukunft?

Brauchen wir neue Experimente, Beschleuniger und Detektoren!

- e^+e^- - Beschleuniger am CERN: Linear- oder Ringbeschleuniger (100km?)
- proton-proton Ringbeschleuniger (als Follow up?)
- $\mu^+\mu^-$ Beschleuniger?
- Und/oder e^+e^- Beschleuniger in China / $\mu^+\mu^-$ Beschleuniger in den Vereinigten Staaten?

Brauchen wir euch - ihr seid die Zukunft!

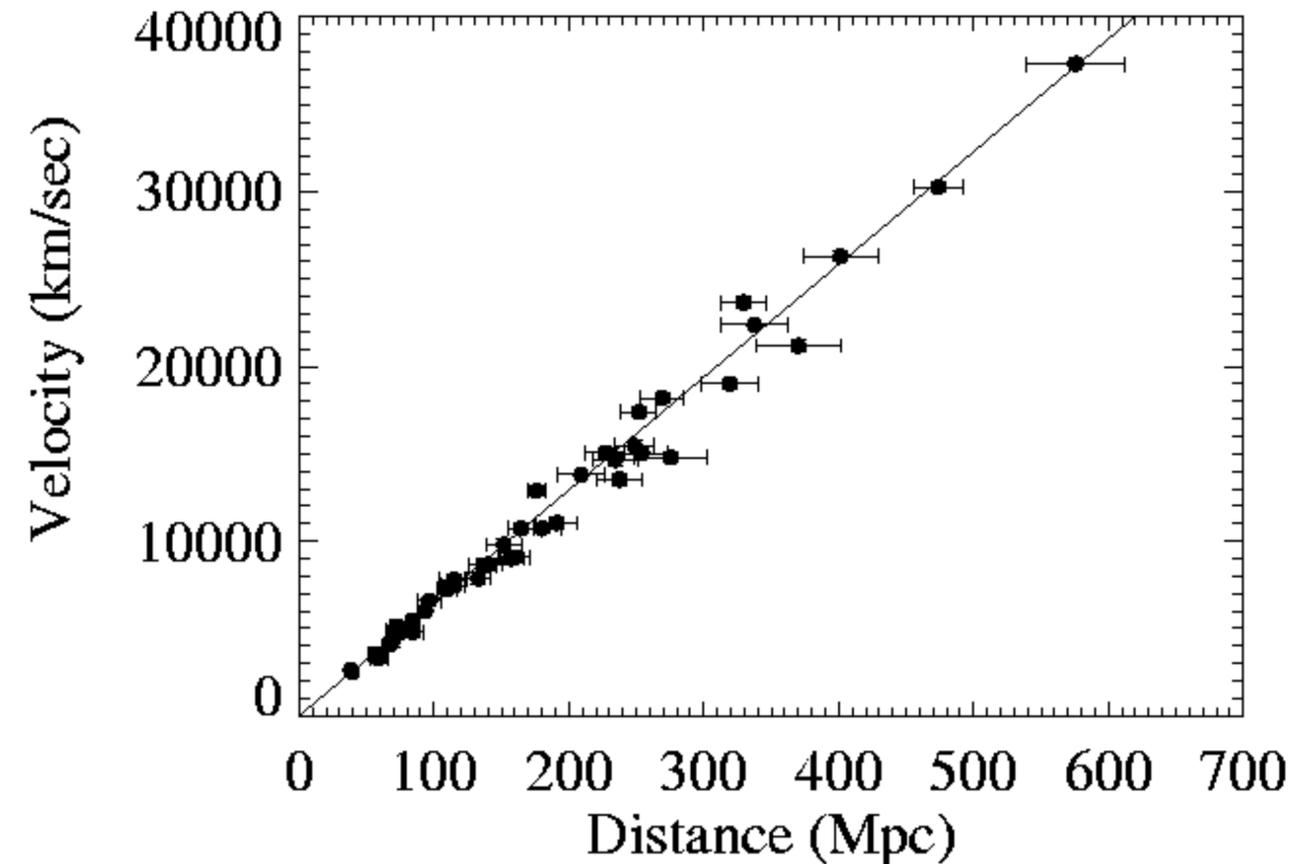
Fragen?

Backup

VERBINDUNG ZWISCHEN TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

- Ausdehnung des Universums (Edwin Hubble, 1929)
- größere Entfernung entspricht größerer Fluchtgeschwindigkeit

$$v = H_0 \cdot d$$



- Das Universum hatte einen Anfang (Urknall, Big Bang)
- Kann das Alter des Universums abschätzen. Ca. 13 Mrd. Jahre
- Frühe Phase ist gekennzeichnet durch kleine Abstände und hohe Temperaturen, d.h. hohe Energien



Ursuppe aus Elementarteilchen