



Elementarteilchenphysik im Unterricht

Dr. Jeff Wiener

11 Oktober 2023



PARTICLE
IDENTITIES

cern.ch/identities

“Was ist ein Teilchen?”

Forschungsstand

Quellen für (Fehl)vorstellungen

Alltagserfahrungen

Ungünstige Lernangebote

Illustrationen und Animationen

Dokumentierte Vorstellungen

**Überlagerung von Kontinuum-
und Diskontinuumvorstellung**

**Automatischer Transfer von
makroskopischen Eigenschaften**

**Negierung der ständigen Bewegung
von Teilchen & des leeren Raums**

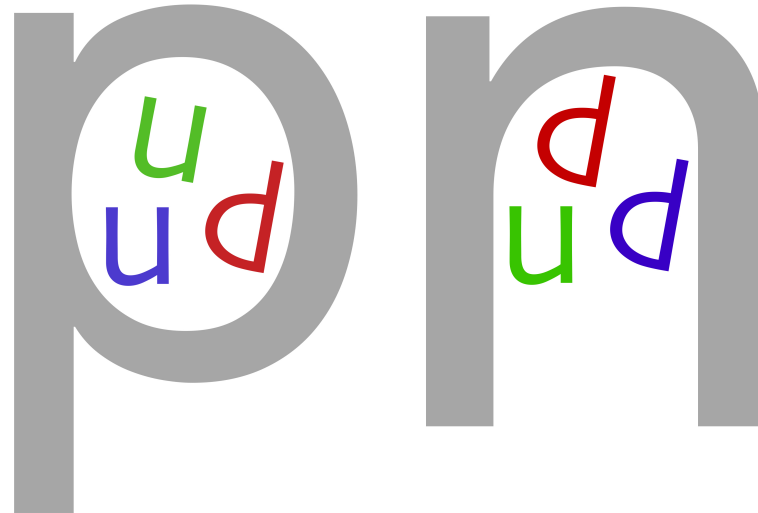
Research-based suggestions

Nature of science

Typographische Illustrationen

Sprachliche Exaktheit

“Mit dem Modell der
Teilchenphysik
beschreiben wir...”



Teilchen
vs.
Teilchen System

Elementarteilchenphysik im Anfangsunterricht

G. Wiener, S. Schmeling u. M. Hopf

1 Einleitung

In den meisten Ländern sind die Kapitel der modernen Physik am Ende des jeweiligen Curriculums platziert – wenn überhaupt [1]. Aber nachdem diese Kapitel, und hier im Speziellen das Standardmodell der Teilchenphysik, die wesentliche Grundlage für eine fundamentale Beschreibung der Natur darstellen, kann dieser Umstand hinderlich für die Entwicklung von kohärenten Wissensstrukturen sein. Gleichzeitig stellt sich die Frage, ob und inwiefern es sinnvoll ist, Aspekte und Inhalte der Elementarteilchenphysik bereits im Anfangsunterricht einzuführen. Um dieser Frage nachzugehen, wurde am CERN ein Unterrichtskonzept entwickelt, welches auf den fundamentalen Grundlagen der Teilchenphysik aufbaut und sich zur Verwendung bereits ab der 6. Schulstufe eignet [2].

Das Unterrichtskonzept besteht im Wesentlichen aus zwei aufeinanderfolgenden Kapiteln. Es beginnt mit einer adäquaten Darstellung des subatomaren Aufbaus der Materie anhand des modernen Atommodells von Elektronen bis zu Quarks. Darauf folgt die Einführung der fundamentalen Wechselwirkungen, welche einerseits das Atommodell vervollständigen und andererseits die Brücke zu weiteren Anknüpfungspunkten schlagen. Integraler Bestandteil des Konzepts ist dabei die Unabhängigkeit von Lehrplänen und vorangeführten Lerninhalten. Denn nachdem jedes physikalische Phänomen auf fundamentale Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen zurückgeführt werden kann, ist die Umsetzung des Unterrichtskonzepts weitestgehend altersunabhängig. Idealerweise kann man so Teilchenphysik bereits im Anfangsunterricht besprechen, um frühzeitig essenzielle Begriffe und Konzepte einzuführen, welche eine anschlussfähige Basis für folgende Kapitel schaffen. Die fundamentalen Grundlagen der Teilchenphysik können dann quasi als roter Faden durch den Physikunterricht laufen.

Die Originalversion des Unterrichtskonzepts basierte, im Sinne eines konstruktivistischen Verständnisses des Physikunterrichts, auf dokumentierten Schüler- und Schülervorstellungen. Durch die Berücksichtigung bekannter Vorstellungen und Strukturen im Lehr- und Lernprozess konnten so bereits vorab Schwierigkeiten aufgrund von etwaig auftretenden inadäquaten Schüler- und Schülervorstellungen vermieden werden [3]. In weiterer Folge wurde das erste Kapitel zum subatomaren Aufbau der Materie als Design-based Research [4] Projekt in mehreren Iterationszyklen weiterentwickelt und mit 12-jährigen im Rahmen von Akzeptanzbefragungen [5] evaluiert. Nach jeder Iteration wurde das Material und die zugehörigen Erklärungen basierend auf den Ergebnissen der Akzeptanzbefragungen modifiziert und für den nächsten Zyklus aufbereitet, bis sich schlussendlich die hier präsentierte Version als verständlich und fachlich angemessen erwies [2].

Im Folgenden werden zunächst die bis dato dokumentierten Schüler- und Schülervorstellungen zusammengefasst, um daran anschließend die essenziellen Inhalte des Unterrichtskonzepts anhand des ersten Kapitels vorzustellen. Abschließend präsentieren wir unsere aktuellen Forschungsergebnisse und daraus folgende Empfehlungen für den Schulalltag.

2 Forschungsstand

Untersuchungen von Schüler- und Schülervorstellungen zum atomaren Modell der Materie finden ihren Ursprung in der Chemiedidaktik-Forschung ab den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts. Bereits seit den frühen Anfängen der Untersuchung von Schüler- und Schülervorstellungen bezüglich des atomaren Aufbaus von Materie konnte gezeigt werden, dass Teilchenmodelle vor allem zur Erklärung von Phänomenen von Gasen ausgeprägt sind [6–8]. Allerdings verwenden nur wenige Schülerinnen und Schüler ein Teilchenmodell im Allgemeinen von sich aus, um Phänomene und Vorgänge in der Physik zu erklären. Speziell bei der Erklärung von Alltagsphänomenen wird nur selten auf ein Teilchenmodell als Hilfsmittel zurückgegriffen [6–8]. Wird es aber als Erklärungs-

möglichkeit angeboten, so akzeptieren und verwenden es die meisten Schülerinnen und Schüler [9, 10]. Ebenso auffällig ist eine signifikante Altersabhängigkeit in Bezug auf die Akzeptanz eines Teilchenmodells: Je älter die Jugendlichen sind, desto eher akzeptieren und verwenden sie das präsentierte Teilchenmodell [6, 11]. Demgegenüber zeigen sich entwickelte Fehlvorstellungen zum atomaren Aufbau der Materie weitestgehend altersunabhängig [7, 12].

Basierend auf der Tatsache, dass Alltagserfahrungen eher eine Kontinuumsvorstellung als eine Teilchenvorstellung der Materie nahelegen, lässt sich selbige auch in anbahnenden Studien zu Schüler- und Schülervorstellungen vom Aufbau der Materie unabhängig voneinander reproduzieren [6, 12–15]. In vielen Untersuchungen zeigen sich zudem Vermischungen und Überlagerungen von Kontinuums- und Diskontinuumsvorstellungen. Man kann dies so interpretieren, dass sich die Lernenden bemühen, das neuartige Teilchenmodell in den Rahmen der bereits vorhandenen Kontinuumsvorstellung zu integrieren [6, 12, 13]. Diese Fehlvorstellungen werden dazu auch noch durch irreführende Illustrationen in Schulbüchern unterstützt. Hier sei als Beispiel das mit H₂O-Molekülen gefüllte Wasserglas angeführt, in welchem über den „Kügelchen“ noch ein Wasserspiegel eingezeichnet ist [13].

Selbst wenn das Teilchenmodell von Schülerinnen und Schülern akzeptiert wird, herrschen in der Regel aber nach wie vor mindestens zwei große Fehlvorstellungen vor: Die Annahme der Existenz von Teilchen beinhaltet nicht a priori das ständige In-Bewegung-Sein der Teilchen und geht auch nicht einher mit der Tatsache des hauptsächlich vorherrschenden leeren Raums zwischen den Teilchen. Dieser Aspekt wird nahezu nie reproduziert, geschweige denn ist er vorab als Vorstellung angelegt [7, 11, 13]. Man findet außerdem eine Reihe von Belegen, dass das Unterrichten des Teilchenmodells dazu führt, dass Schülerinnen und Schüler den Teilchen Eigenschaften der Dinge dergewohn-

OPEN ACCESS

Phys. Educ. 52 (2017) 044001 (8pp)

PAPER

iopscience.org/peel

Introducing 12 year-olds to elementary particles

Gerfried J Wiener^{1,2}, Sascha M Schmeling¹ and Martin Hopf²

¹ CERN, European Organization for Nuclear Research, Geneva, Switzerland

² University of Vienna, Austrian Educational Competence Centre Physics, Vienna, Austria

E-mail: jeff.wiener@cern.ch, sascha.schmeling@cern.ch and martin.hopf@univie.ac.at



CrossMark

Abstract

We present a new learning unit, which introduces 12 year-olds to the subatomic structure of matter. The learning unit was iteratively developed as a design-based research project using the technique of probing acceptance. We give a brief overview of the unit's final version, discuss its key ideas and main concepts, and conclude by highlighting the main implications of our research, which we consider to be most promising for use in the physics classroom.

1. Introduction

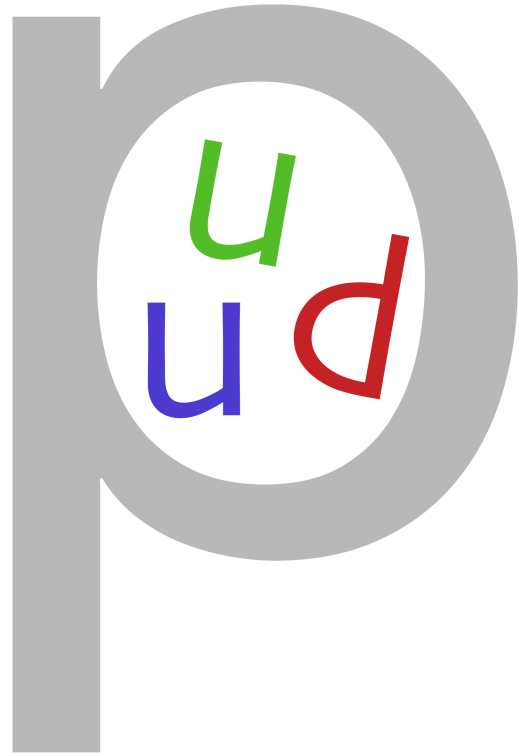
Integrating modern physics into the curriculum is a question that has recently received ever increasing attention. This is especially true since in most countries the topic of modern physics is usually added at the end of physics education—if at all [1]. However, since these chapters—and here especially the Standard Model of particle physics—are considered to be the fundamental basics of physics, this situation might hinder the development of coherent knowledge structures in the physics classroom. Hence, one is faced with the question of whether it makes sense to introduce elementary particle physics early in physics education. Therefore, to investigate this research question, we have developed a learning unit, which aims to introduce 12 year-olds to elementary particles and fundamental interactions [2].

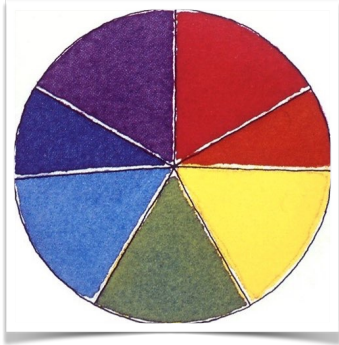
The learning unit consists of two consecutive chapters. It starts with an accurate description of the subatomic structure of matter by showcasing

Original content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

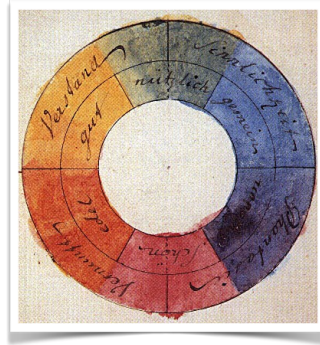
an atomic model from electrons to quarks. This first chapter is followed by the introduction of fundamental interactions, which on the one hand complete the discussion of the atomic model, and on the other hand set up possible links to other physics phenomena. An integral component of the learning unit is its independence from the physics curriculum and students' prior knowledge about particle physics. Indeed, since every physics process can be traced back to fundamental interactions between elementary particles, the use of the learning unit is not restricted to a certain age-group. Ideally, it can even be used at the beginning of physics education to enable an early introduction of key terms and principal concepts of particle physics in the classroom.

Following the framework of constructivism [3], the initial version of the learning unit was based on documented students' conceptions. Taking these into account enabled us to avoid potential difficulties for students, which might occur due to inadequate information input. As a next step, the initial version was developed by means of a design-based research [4] project with frequent adaptations of the learning unit. Here, we used the technique of probing acceptance [5] to conduct one-on-one interviews with 12 year-olds





Newton



Goethe



CMYK

“Ist die Komplementärfarbe von blau nicht orange, von grün rot und von gelb lila?” [Schülerin, 17]

und

und

und

Alternativvorschlag zur graphischen Darstellung von Anti-Farbladungen

Gerfried Wiener*, Sascha Schmeling*, Martin Hopf*

*CERN, Genf, Schweiz; *Universität Wien, Österreichisches Kompetenzzentrum für Didaktik der Physik
gerfried.wiener@cern.ch, sascha.schmeling@cern.ch, martin.hopf@univie.ac.at

Kurzfassung

Um der Forderung nach verstärkter Einbindung der modernen Physik im Unterricht nachzukommen, wurde am CERN ein Unterrichtskonzept entwickelt, welches auf den fundamentalen Grundlagen der Teilchenphysik aufbaut. Unter anderem wurden neuartige typographische Illustrationen von Elementarteilchen und Teilchen-Systemen entwickelt, welche im Kontext des Design Based Research mittels Akzeptanzbefragungen erprobt und adaptiert wurden. Im Zuge dessen wurde auch ein Alternativvorschlag zur graphischen Darstellung von Anti-Farbladungen erarbeitet, der auf die klassische Umsetzung durch Komplementärfarben verzichtet. Um diese Überlagerung mit voraussetzendem Wissen aus der Optik zu vermeiden, werden Anti-Farbladungen stattdessen durch eine gestreifte Musterung dargestellt. Dadurch sollen etwaige Fehlvorstellungen bezüglich des "Aussehens" von Elementarteilchen a priori vermieden werden und gleichzeitig eine eindeutige Unterscheidung zwischen Teilchen und Anti-Teilchen ermöglicht werden. Eine erste Evaluation mit Jugendlichen (Altersgruppe: 16-17 Jahre, n=42) sowie Physiklehrkräften (n=38) bestätigt den Alternativvorschlag als eindeutig vielversprechend und lernförderlich.

1. Einleitung

In den meisten Ländern ist das Kapitel der modernen Physik am Ende des jeweiligen Curriculums platziert – wenn überhaupt [1]. Aber nachdem diese Kapitel, im Speziellen das Standardmodell der Teilchenphysik, die wesentlichen Grundlagen für eine fundamentale Beschreibung der Natur bilden [2], kann dieser Umstand hinderlich für die Entwicklung von kohärenten Wissensstrukturen sein. Um der Forderung nach verstärkter Einbindung der modernen Physik im Unterricht nachzukommen, wurde daher am CERN ein Unterrichtskonzept entwickelt, welches auf den fundamentalen Grundlagen der Teilchenphysik aufbaut [3].

2. Theoretischer Hintergrund

Der Designprozess des Konzepts basierte auf dokumentierten Schülervorstellungen (students' conceptions). Neben der Betonung des permanenten Modellcharakters und damit einhergehender sprachlicher Exaktheit fügt das Konzept zusätzlich auf neuartigen typographischen Illustrationen von Elementarteilchen und Teilchen-Systemen (Abb.1). Der essentielle Charakter dieser Illustrationen begründet sich auf Ergebnissen fachdidaktischer Forschung der 1970er und 1980er Jahre, welche zeigten, dass sorgfältig konstruierte Abbildungen die Lernleistung von Jugendlichen verbessern [4]. Forschungsergebnisse der 1990er Jahre unterstützen diese Behauptung nachdrücklich, wengleich es nach wie vor lernhinderliche Elemente in Illustrationen gibt, wie von

Cook [5] betont wird: "Visual representations are essential for communicating ideas in the science classroom; however, the design of such representations is not always beneficial for learners."

Aktuelle Forschung legt daher den Fokus vermehrt auf die Erforschung und Entwicklung adäquater Illustrationen. In diesem Sinne wurden die typographischen Illustrationen im Kontext des Design Based Research [6] mittels Akzeptanzbefragungen nach Jung [7] erprobt und adaptiert, um lernförderliche sowie lernhinderliche Elemente zu ermitteln.



Abb.1: Typographische Illustration von Proton & Neutron

Im Zuge der Konzeptentwicklung wurde auch ein Alternativvorschlag zur graphischen Darstellung von Anti-Farbladungen erarbeitet, der auf die weit verbreitete Darstellung von Anti-Farbladungen durch die jeweiligen Komplementärfarben von rot, grün und blau verzichtet.

An Alternative Proposal for the Graphical Representation of Anticolor Charge

Gerfried J. Wiener, CERN, European Organization for Nuclear Research, Geneva, Switzerland, and Austrian Educational Competence Centre Physics, University of Vienna, Austria

Sascha M. Schmeling, CERN, European Organization for Nuclear Research, Geneva, Switzerland

Martin Hopf, Austrian Educational Competence Centre Physics, University of Vienna, Austria

We have developed a learning unit based on the Standard Model of particle physics, featuring novel typographic illustrations of elementary particles and particle systems.¹ Since the unit includes antiparticles and systems of antiparticles, a visualization of anticolor charge was required. We propose an alternative to the commonly used complementary-color method, whereby antiparticles and antiparticle systems are identified through the use of stripes instead of a change in color. We presented our proposal to high school students and physics teachers, who evaluated it to be a more helpful way of distinguishing between color charge and anticolor charge.

Education research shows that carefully designed images can improve students' learning.² However, in practice, illustrations commonly contain elements limiting students' learning, as underlined by Cook³: "Visual representations are essential for communicating ideas in the science classroom; however, the design of such representations is not always beneficial for learners." To determine what aspects of the typographic representations used in our learning unit (Fig. 1) hinder or promote learning, we tested and adapted them in the context of design-based research⁴ using Jung's technique of probing acceptance.⁵ In the course of developing our unit, we also formulated this proposal regarding the graphical representation of anticolor charge.

In the Standard Model of particle physics, elementary particles are sorted according to their various charges. A "charge" in this context is the property of a particle whereby it is influenced by a fundamental interaction. In quantum field theory, the electromagnetic, weak, and strong interactions are each associated with a fundamental charge. The abstract naming of the strong interaction's associated charge as "color charge" originated in the work of Greenberg⁶ and Han & Nambu⁷ in the 1960s. They introduced red, green, and blue as the "color charged" states of quarks and antired, antigreen, and antiblue for antiquarks. According to this model, quarks have a color charge, whereas antiquarks are defined by having an anticolor charge. In addition, particle systems must be color neutral, i.e., "white". This includes mesons, composed of two quarks each, and baryons, made of three. In each case, the distribution of color charge must "balance out" among the quarks. For mesons, this can only be achieved if a color charged quark is bound to an antiquark with the respective anticolor charge. In the case of baryons, all three (anti)color charge states must be

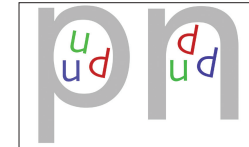


Fig. 1. Typographic illustrations of a proton and an antiproton.

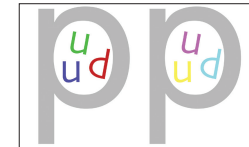


Fig. 2. Traditional illustrations of a proton and an antiproton, relying on readers' prior knowledge of the relevant color wheel. Obviously, using colors complementary to the quarks' red, green, and blue presents a challenge for identifying anticolor charges, e.g., cyan as antired.

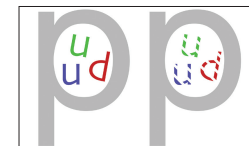
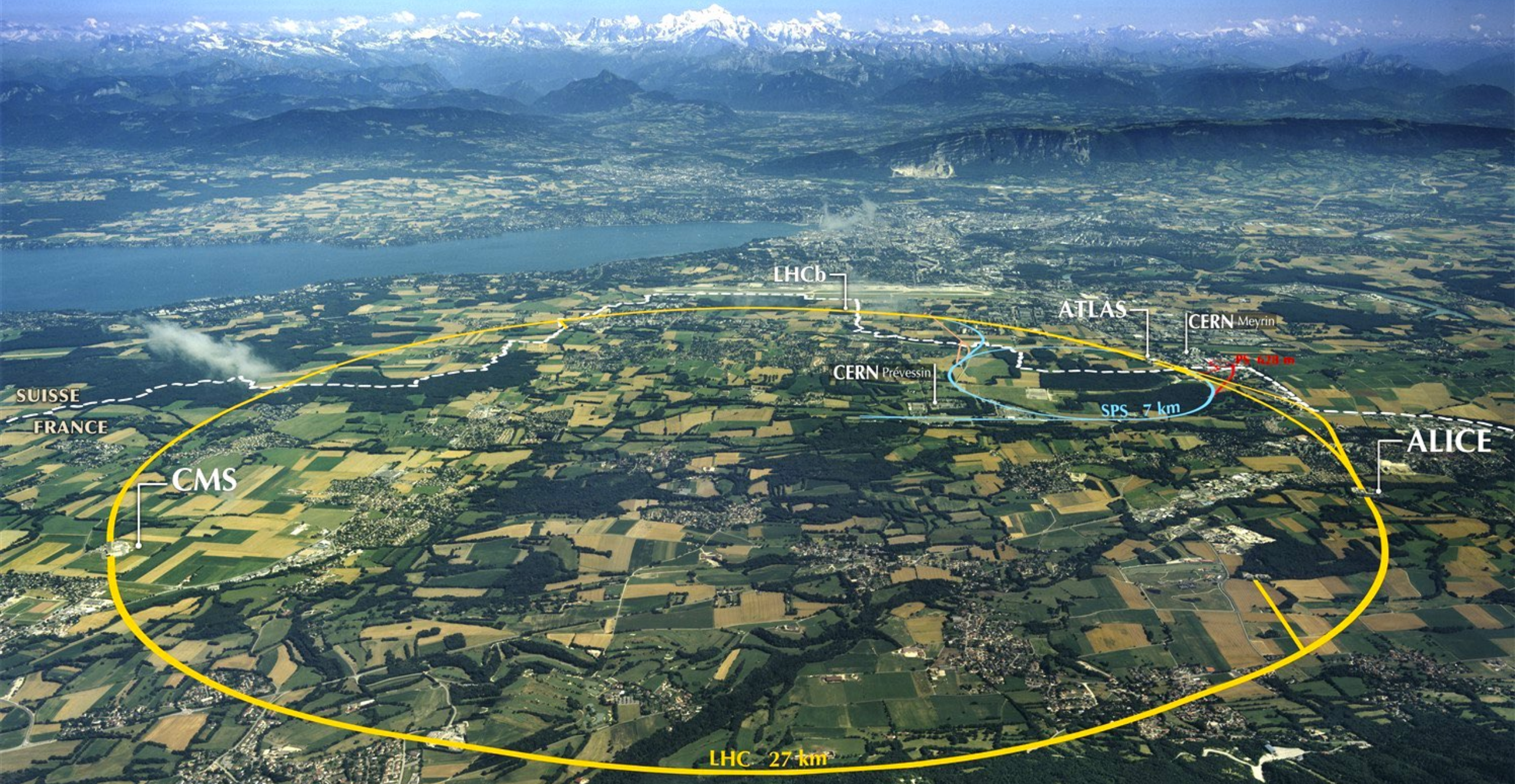


Fig. 3. Alternative illustrations of a proton and an antiproton, using a stripe pattern to denote anticolor charge. This representation clearly shows corresponding color and anticolor charge states while doing away with any requirement for prior knowledge of complementary colors.



SUISSE
FRANCE

CMS

LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

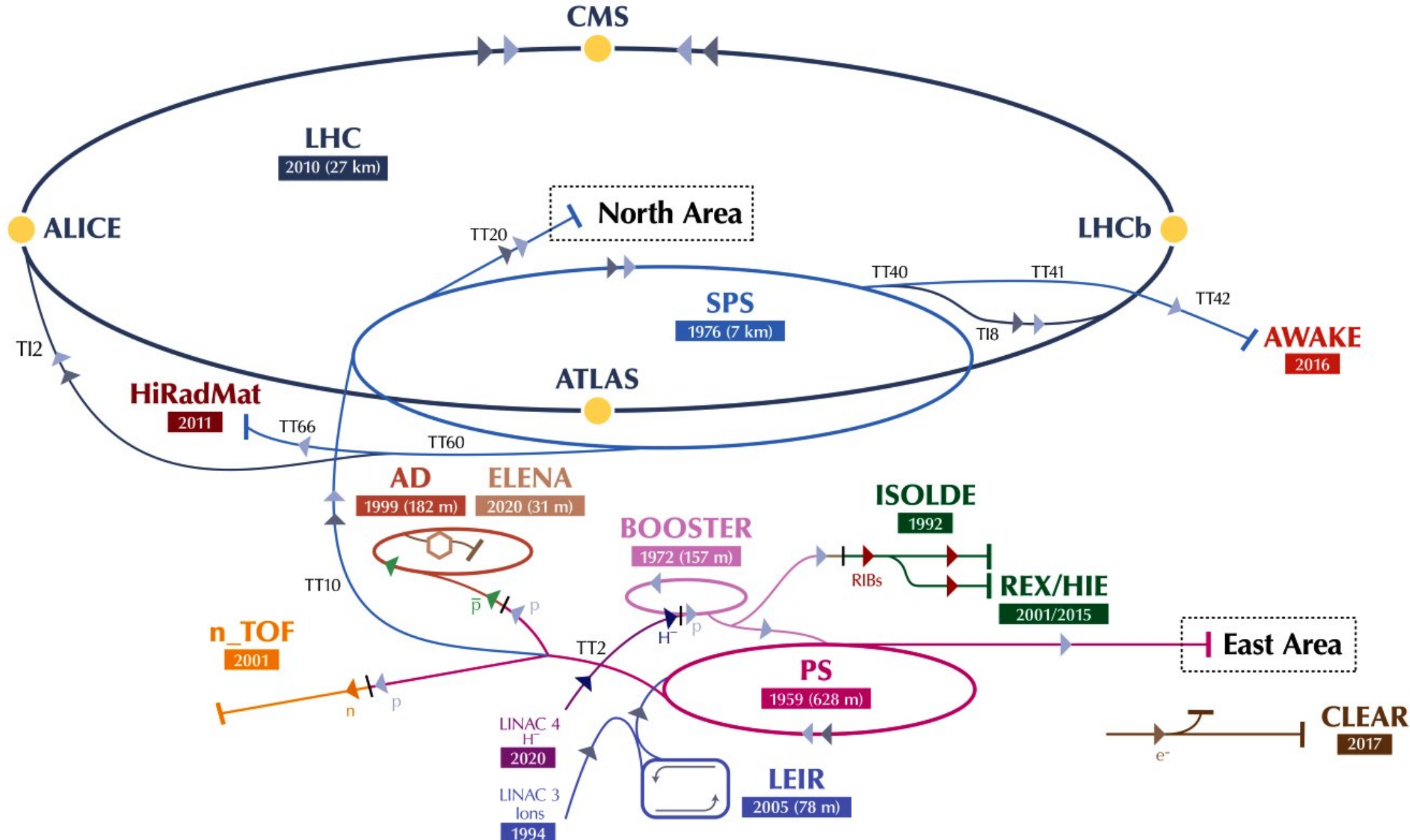
CERN Préessin

SPS 7 km

PS 628 m

ALICE

LHC 27 km



Wie passt der LHC in den Physikunterricht?

G. Wiener, J. Woithe, A. Brown u. K. Jende

1 Einleitung

Anfang 2015 erwartete der Large Hadron Collider (LHC) am CERN aus einem fast zweijährigen Shutdown, um kurz darauf mit bisher unübertroffenen Strahlenergien und -intensitäten seinen „Run 2“ zu beginnen. Mittlerweile wurden bereits jegliche Erwartungen übertroffen und alle Rekorde wie zum Beispiel die durchschnittliche Kollisionsrate oder die maximale Strahlleistung gebrochen. Und auch wenn sich der sogenannte „Di-Photon-Bump“, eine anfangs vielversprechende Anomalie bei 750 GeV, im August 2016 lediglich als statistische Fluktuation erwies, wird die Analyse der bisher gesammelten Daten aller LHC-Experimente die Physikerinnen und Physiker am CERN noch für eine sehr lange Zeit beschäftigen.

Angesichts dieser spannenden Zeit für die Hochenergiephysik kann es daher lohnend sein, den LHC als aktuelles und prominentes Beispiel der Grundlagenforschung im Unterricht zu behandeln. Ziel dieses Artikels ist es, einen kurzen Überblick über die Komponenten und die Funktionsweise des LHC zu geben und gleichzeitig auf nützliche Ressourcen sowie Anbindungen zum Curriculum zu verweisen. [1] Idealerweise finden so die verschiedenen Aspekte des LHC ihren Weg in den aktuellen Physikunterricht.

2 Wie funktioniert der LHC?

Das ultimative Ziel des LHC ist es, elektrisch geladene Teilchen im Inneren von riesigen Teilchendetektoren zur Kollision zu bringen. Dort werden die Kollisionen detektiert und ihre Analyse ermöglicht in weiterer Folge Rückschlüsse auf die subatomare Struktur der Materie, erweitert das Verständnis von Prozessen des frühen Universums und führt idealerweise zur Entdeckung von neuen, unbekanntem Teilchen.

2.1 Teilchenpakete

Die historisch gewachsene Beschleunigerkette am CERN stellt in der Regel beschleunigte Pakete von Protonen zur Verfügung. Zusätzlich werden für etwa einen Monat pro Jahr auch Blei-Ionen beschleunigt, um so entweder Pb-Pb-Kollisionen oder auch

hin und wieder Pb-p-Kollisionen studieren zu können. Mithilfe der miteinander verbundenen Teilchenbeschleuniger kann am CERN momentan eine maximale Teilchenenergie von 6,5 TeV erreicht werden. Der finale Schritt zur Design-Energie des LHC von 7 TeV soll in den kommenden Jahren erfolgen.

Tipp: Bei der Diskussion des LHC lassen sich Missverständnisse vermeiden, wenn man bereits frühzeitig zwischen der Teilchenenergie, der Strahlenergie und der Kollisionsenergie unterscheidet. Die Teilchenenergie ist die Energie jedes Teilchens (zum Beispiel jedes Protons) in einem Teilchenpaket. Unter der Strahlenergie versteht man die gesamte Energie der zwei Teilchenstrahlen, also die Summe aller Teilchenenergien. Die Kollisionsenergie hingegen ist die Summe der Teilchenenergien zweier kollidierender Teilchen, zur Zeit maximal 13 TeV.

Am Beginn der Beschleunigerkette befinden sich momentan zwei spezielle „Teilchenquellen“, die separat Protonen oder Blei-Ionen liefern. Im Falle der Blei-Ionen wird Blei abgedampft, welches in den folgenden Schritten gleichzeitig beschleunigt und dabei vollständig ionisiert wird. Um

Protonen zu erhalten, bedient man sich einer simplen Gas-Flasche, in der sich molekularer Wasserstoff befindet. Dieser wird zunächst ionisiert, um dann mittels elektrischer Felder einen kontinuierlichen Protonen-Strahl durch eine Vakuumröhre in den ersten Beschleuniger, den Linearbeschleuniger LINAC2, zu schicken. Beim Durchlauf der darauffolgenden Kreisbeschleuniger Booster und Proton Synchrotron wird der Protonen-Strahl zudem durch Frequenzmodulationen in einzelne Protonen-Pakete aufgeteilt, welche dann in den letzten Vorbeschleuniger, das Super Proton Synchrotron, injiziert werden. Schlussendlich werden im LHC dann zwei in entgegengesetzte Richtungen laufende Protonen-Strahlen, die jeweils aus bis zu 2800 Paketen bestehen, beschleunigt. Jedes Protonen-Paket wird aus etwa 100 Milliarden Protonen gebildet und ist nur wenige Zentimeter lang (Abb. 1). Die Breite der Protonen-Pakete variiert je nach Kollisionsmodus und Konfiguration des LHC zwischen einigen Millimetern und wenigen Mikrometern. Im Teilchenpaket für mehrere Stunden im LHC kreisen zu lassen, ist ein Ultrahochvakuum unerlässlich. In den Strahlrohren des LHC herrscht daher ein Druck von etwa 10^{-10} mbar.

In den vergangenen Jahren wurden bereits mehrere Artikel veröffentlicht, die ver-

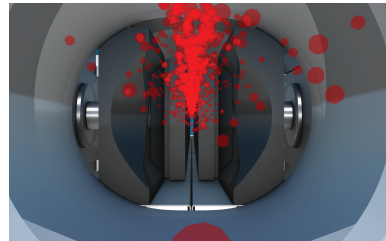


Abb. 1: Graphische Illustration eines Teilchenpaketes. © CERN

5

OPEN ACCESS

Phys. Educ. 51 (2016) 035001 (7pp)

PAPERS

iopscience.org/ped

Introducing the LHC in the classroom: an overview of education resources available

Gerfried J Wiener^{1,2}, Julia Woithe^{1,3}, Alexander Brown^{1,4} and Konrad Jende^{1,5}

¹ CERN, European Organization for Nuclear Research, Geneva, Switzerland

² Austrian Educational Competence Centre Physics, University of Vienna, Austria

³ Department of Physics/Physics Education Group, University of Kaiserslautern, Germany

⁴ Institut Universitaire pour la Formation des Enseignants, University of Geneva, Switzerland

⁵ Institute of Nuclear and Particle Physics, TU Dresden, Germany



CrossMark

E-mail: gerfried.wiener@cern.ch, julia.woithe@cern.ch, alexander.brown@cern.ch and konrad.jende@cern.ch

Abstract

In the context of the recent re-start of CERN's Large Hadron Collider (LHC) and the challenge presented by unidentified falling objects (UFOs), we seek to facilitate the introduction of high energy physics in the classroom. Therefore, this paper provides an overview of the LHC and its operation, highlighting existing education resources, and linking principal components of the LHC to topics in physics curricula.

Introduction

Early in 2015, CERN's Large Hadron Collider (LHC) was awoken from its first long shutdown to be re-ramped for Run 2 at unprecedented beam energy and intensity. Intense scrutiny was required to verify the full and proper functioning of all systems. This included a special run of the machine to ensure a well-scrubbed LHC [1]. However, due to the increased beam currents, a critical but familiar issue reared its head during the run. Interactions between the beams and unidentified falling objects—so called UFOs—led to several premature protective beam dumps (see figure 1). These infamous UFOs are presumed to be micrometre-sized

Original content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

dust particles and can cause fast, localised beam losses with a duration on the order of 10 turns of the beam. This is a known issue of the LHC which has been observed before. Indeed, between 2010 and 2011, about a dozen beam dumps occurred due to UFOs and more than 10000 candidate UFO events below the dump threshold were detected [2]. Thus, UFOs presented more of an annoyance than a danger to the LHC, by reducing the operational efficiency of the machine. However, as beam currents increase, so does the likelihood of UFO-induced magnet quenches at high energy, creating a possible hazard to the machine. Therefore, particular care is taken to keep an eye on the timing and frequency of UFO occurrences. As the number of UFOs during Run 1 decreased over time, it is hoped that this will be the same in Run 2.

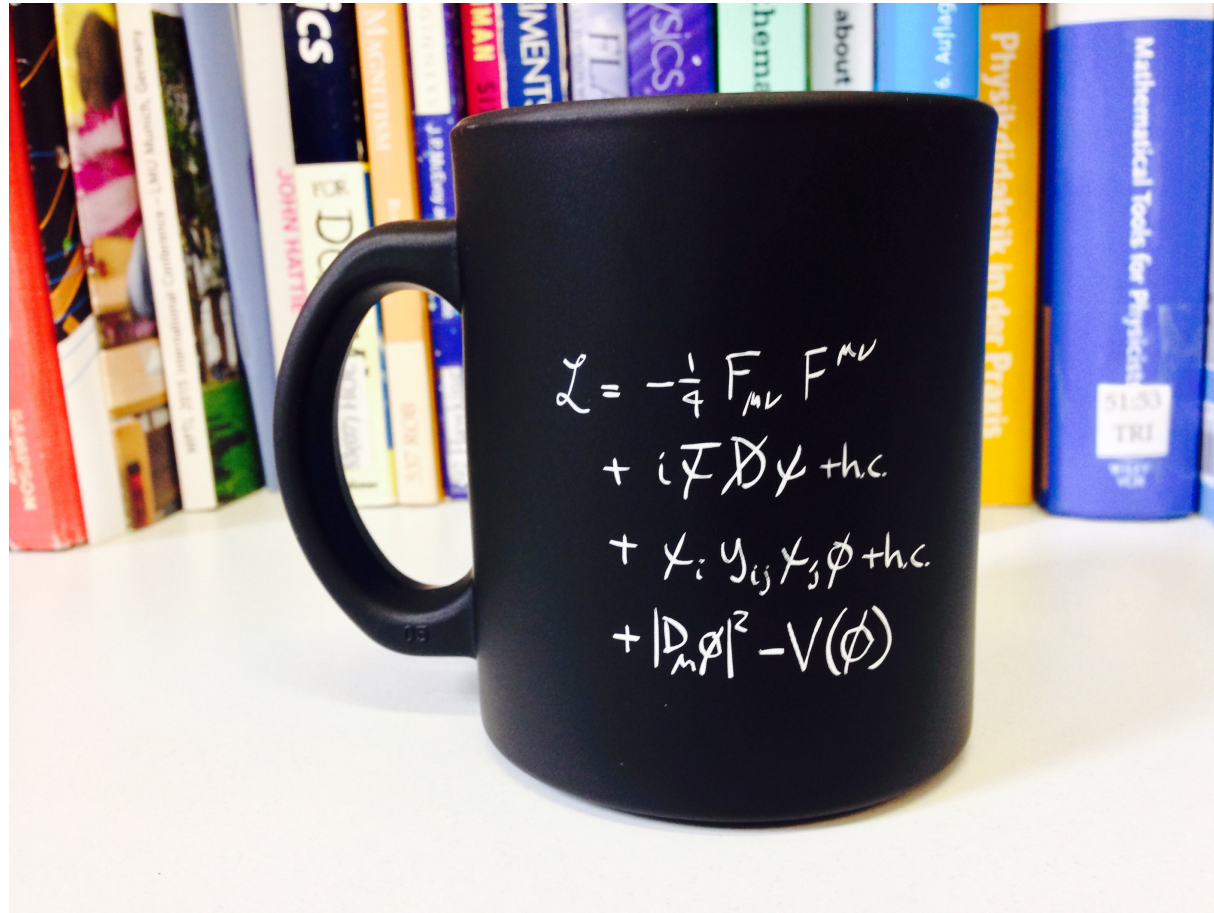
The recent re-start of the LHC at higher collision energies and rates presents high school

0031-9120/16/035001+7\$33.00

1

© 2016 IOP Publishing Ltd

cern.ch/PER



Der Lagrangian entmystifiziert

Kaffeeeklatsch mit dem Standardmodell der Teilchenphysik

J. Woithe u. G. Wiener

1 Einleitung

Die bisher wichtigste Errungenschaft der Hochenergiephysik ist die Formulierung des sogenannten Standardmodells der Teilchenphysik. Dabei handelt es sich um eine äußerst elegante und bisher unbertroffene Theorie der Elementarteilchen und ihrer fundamentalen Wechselwirkungen, die beschreibt, wie Elementarteilchen aufgrund ihrer jeweiligen Ladungen interagieren. Dabei bezeichnet man mit Ladung eine charakteristische Eigenschaft eines Teilchens, die bestimmt, von welcher fundamentalen Wechselwirkung es beeinflusst wird. Mit Ausnahme der Gravitation ist im Rahmen der Quantenfeldtheorie, auf der das Standardmodell basiert, jede fundamentale Wechselwirkung mit einer fundamentalen Ladung assoziiert; elektrisch geladene Teilchen unterliegen der elektromagnetischen Wechselwirkung, schwach geladene Teilchen der schwachen Wechselwirkung, und stark geladene beziehungsweise farbgeladene Teilchen der starken Wechselwirkung. Vermittelt werden diese fundamentalen Wechselwirkungen durch die jeweiligen Wechselwirkungsteilchen: Photon, W^+ - und Z -Bosonen sowie Gluonen. Elementarteilchen können auch von mehreren Wechselwirkungen beeinflusst werden, so unterliegt zum Beispiel ein Myon aufgrund seiner elektrischen und schwachen Ladung sowohl der elektromagnetischen als auch der schwachen Wechselwirkung.

2 Das Standardmodell der Teilchenphysik

Das Standardmodell der Teilchenphysik wurde bereits in den 1970er Jahren entwickelt und hielt bisher allen experimentellen Überprüfungen stand. Der vorerst letzte Triumph war die Verifizierung des Brout-Englert-Higgs-Feldes durch den erfolgreichen Nachweis der quantisierten Anregung dieses Feldes, des sogenannten Higgs-Bosons, durch ATLAS und CMS am LHC im Jahr 2012. Dadurch wurde der Higgs-Mechanismus, welcher Elementarteilchen eine Masse zuschreibt, bestätigt.

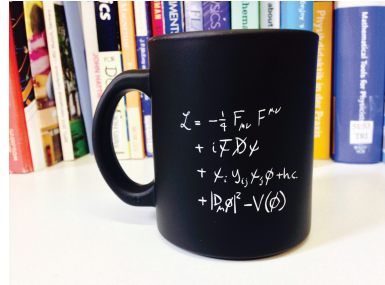


Abb. 1: Lagrangian auf einer Kaffeetasse.

Man könnte annehmen, dass ob dieser ständigen Erfolge Zufriedenheit in der Physikergemeinde herrscht, doch das genaue Gegenteil ist der Fall. Denn wenn gleich das Standardmodell der Teilchenphysik eine einzigartige Beschreibung der fundamentalen Wechselwirkungen liefert, geht man davon aus, dass es sich um eine effektive Feldtheorie, also eine Approximation einer zugrunde liegenden größeren Theorie handelt. Dieser Umstand spiegelt sich vor allem darin wider, dass mit dem Standardmodell der Teilchenphysik nur etwa 5% des Universums beschrieben werden können. Eine Beschreibung der sogenannten Dunklen Materie, die etwa 25% des Universums ausmacht, oder der Dunklen Energie, die die restlichen 70% beiträgt, kann bestenfalls von Theorien geliefert werden, die über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausgehen. Jegliche Abweichung von den Vorhersagen des Standardmodells der Teilchenphysik würde daher mit Freude nachgewiesen werden, böte sich so doch die Möglichkeit, die aktuelle Beschreibung der Natur zu erweitern.

3 Der Lagrangian

Die mathematische Formulierung des Standardmodells der Teilchenphysik ist komplex. Es gibt aber eine kompakte mathematische Darstellung als Lagrangiedichte-Funktion, der sogenannte „Lagrangian“. Doch selbst dieser Lagrangian nimmt bei Niederschrift noch mehrere Seiten in Anspruch [1], weswegen sich zusätzlich auch noch eine stark verknappte Version etabliert hat, die mit nur vier Zeilen auskommt. Von dem Lagrangian geht eine enorme Faszination aus und wer bei einem Ausflug nach Genf dem CERN-Shop einen Besuch abstattet, kann sich dort sogar mit T-Shirts und Kaffeetassen (Abb. 1) eindecken, auf denen diese Kurzform des Lagrangians abgedruckt ist. Spätestens nach einem Besuch am CERN stehen Lehrpersonen aber meistens vor der schwer lösbaren Aufgabe, interessierten Jugendlichen die Inhalte des Lagrangian erklären zu sollen.

Um hier Abhilfe zu leisten, wollen wir in diesem Artikel eine qualitative Erklärung der einzelnen Terme des Lagrangians geben und diese jeweils mit zugehörigen

9

Let's have a coffee with the Standard Model of particle physics!

Julia Woithe^{1,2}, Gerfried J Wiener^{1,3} and Frederik F Van der Veken¹

¹ CERN, European Organization for Nuclear Research, Geneva, Switzerland

² Department of Physics/Physics Education Group, University of Kaiserslautern, Germany

³ Austrian Educational Competence Centre Physics, University of Vienna, Austria

E-mail: julia.woithe@cern.ch, jeff.wiener@cern.ch and frederik.van.der.veken@cern.ch



CrossMark

Abstract

The Standard Model of particle physics is one of the most successful theories in physics and describes the fundamental interactions between elementary particles. It is encoded in a compact description, the so-called ‘Lagrangian’, which even fits on t-shirts and coffee mugs. This mathematical formulation, however, is complex and only rarely makes it into the physics classroom. Therefore, to support high school teachers in their challenging endeavour of introducing particle physics in the classroom, we provide a qualitative explanation of the terms of the Lagrangian and discuss their interpretation based on associated Feynman diagrams.

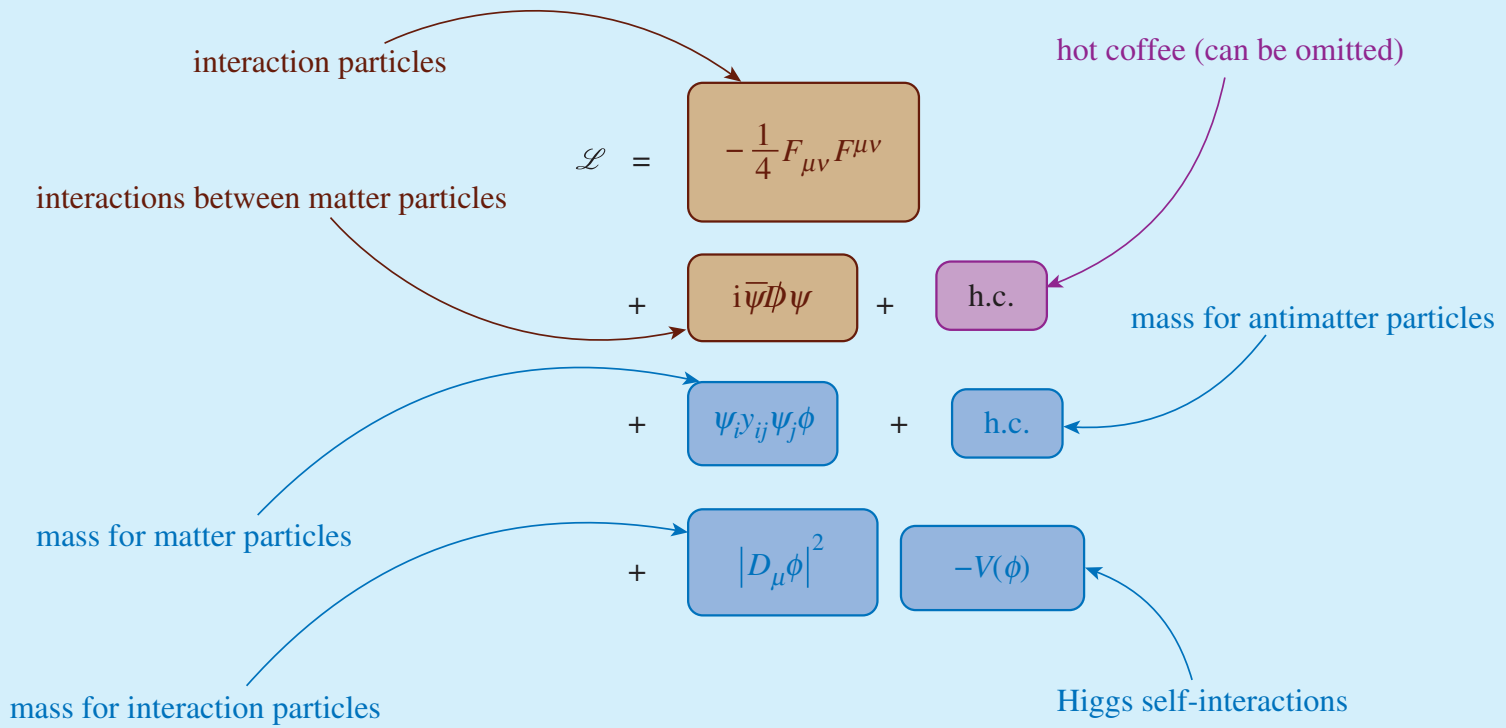
1. Introduction

The Standard Model of particle physics is the most important achievement of high energy physics to date. This highly elegant theory sorts elementary particles according to their respective charges and describes how they interact through fundamental interactions. In this context, a charge is a property of an elementary particle that defines the fundamental interaction by which it is influenced. We then say that the corresponding interaction particle ‘couples’ to a certain charge. For example, gluons, the interaction particles of the strong interaction, couple to colour-charged particles. Of the four

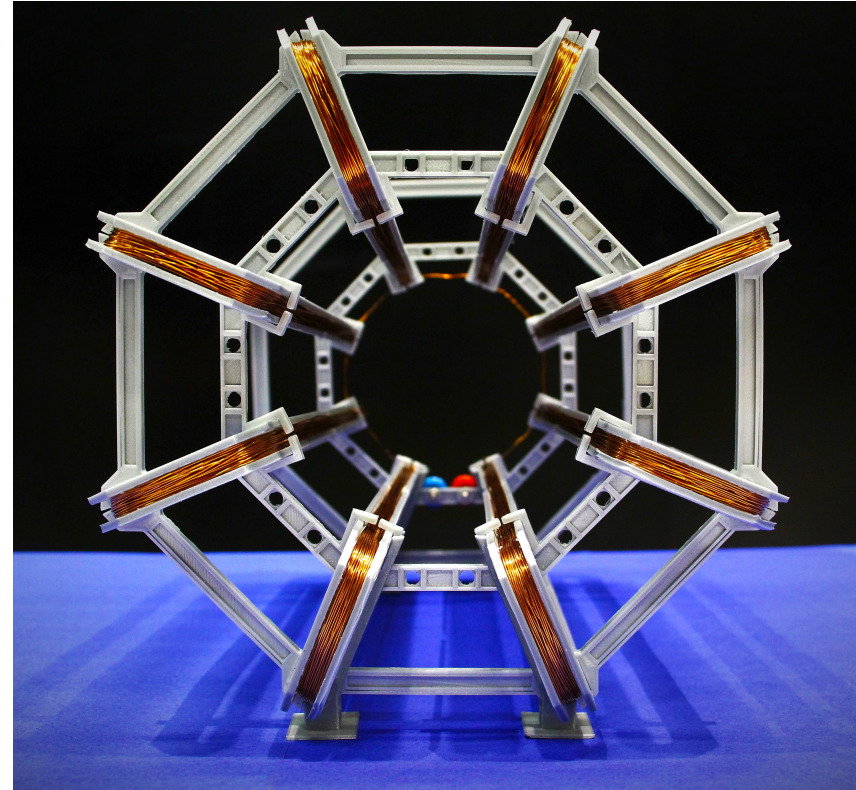
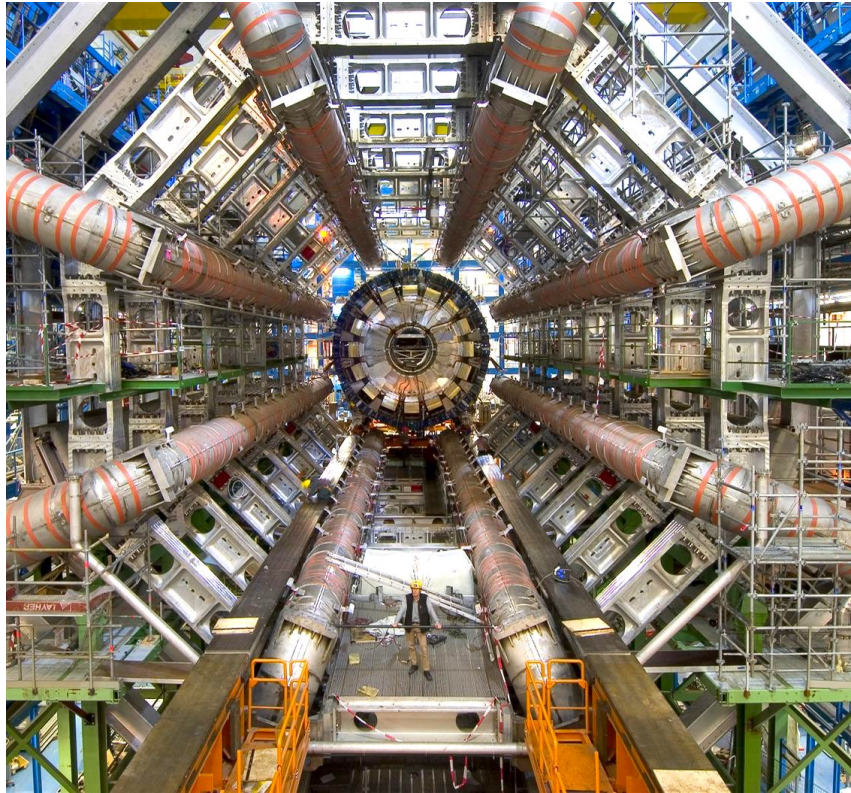
Original content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

fundamental interactions in nature, all except gravity are described by the Standard Model of particle physics; particles with an electric charge are influenced by the electromagnetic interaction (quantum electrodynamics, or QED for short), particles with a weak charge are influenced by the weak interaction (quantum flavour dynamics or QFD), and those with a colour charge are influenced by the strong interaction (quantum chromodynamics or QCD). Contrary to the fundamental interactions, the Brout-Englert-Higgs (BEH) field acts in a special way. Because it is a scalar field, it induces spontaneous symmetry-breaking, which in turn gives mass to all particles with which it interacts (this is commonly called the Higgs mechanism). In addition, the Higgs particle (H) couples to any other particle which has mass (including itself).

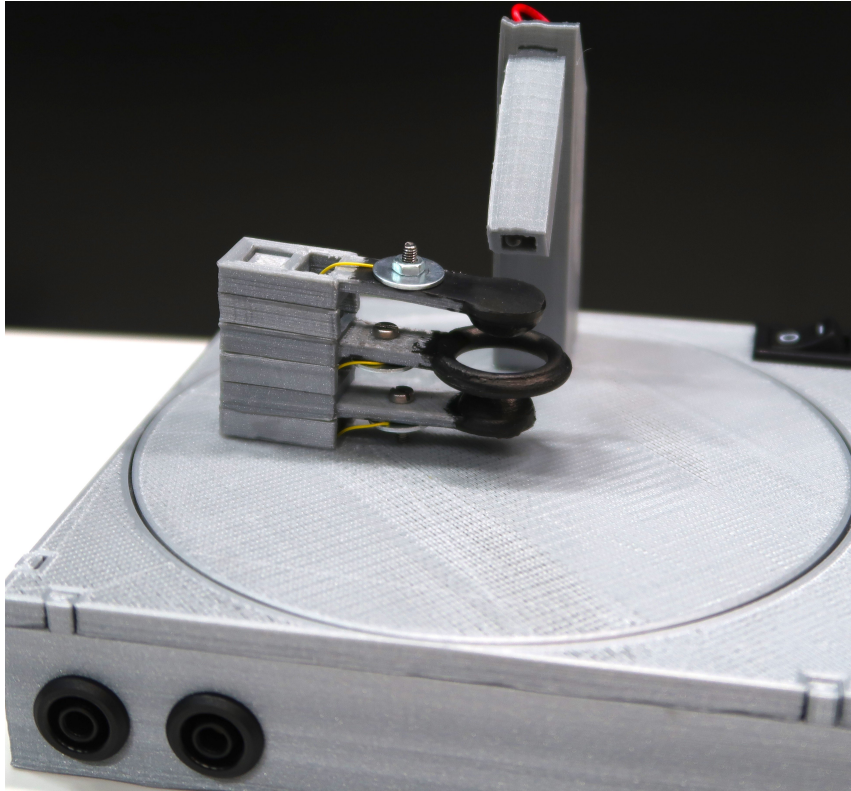
Interactions are mediated by their respective interaction particles: photons (γ) for the



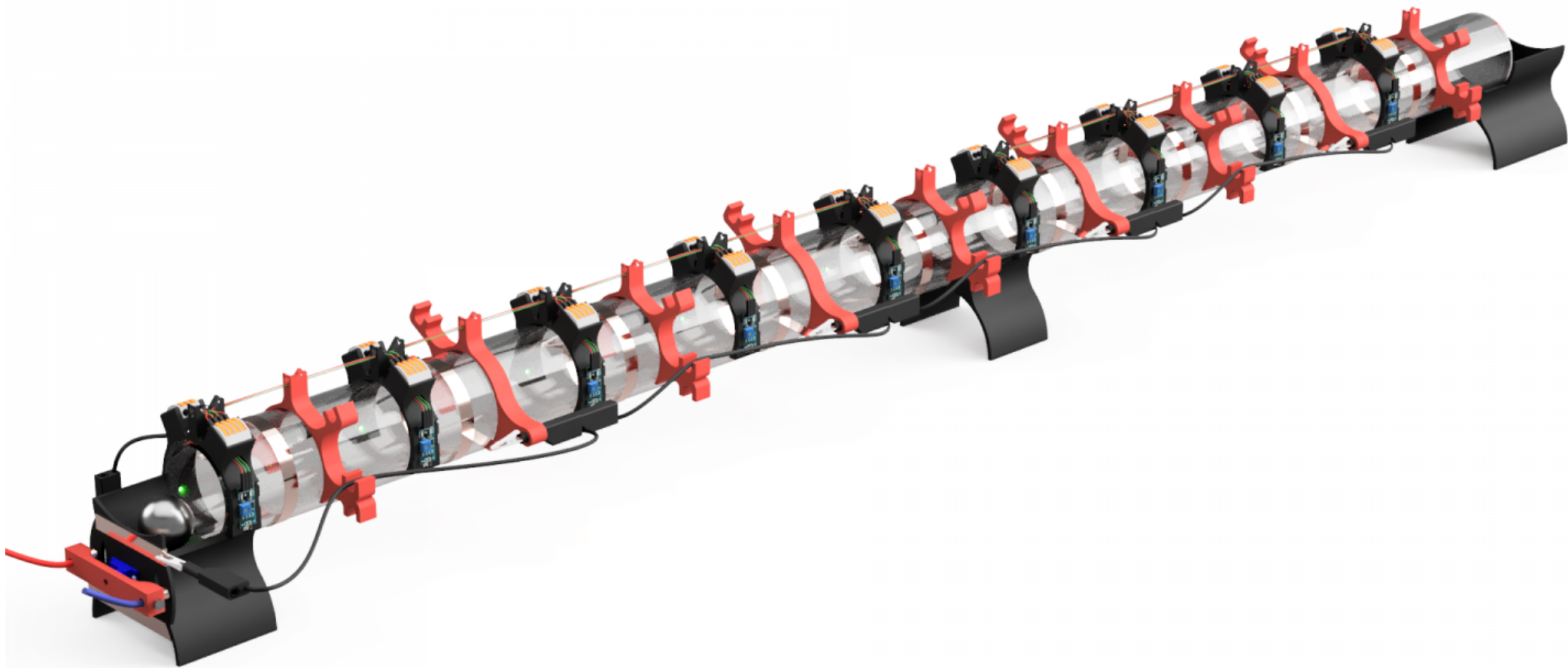




cern.ch/PER



cern.ch/PER



cern.ch/PER

Merci bien!

Questions?

Backup Slides

The subatomic structure of matter

Annotated learning unit

Key Idea I Matter is everything that can be touched, practically or theoretically.

Matter is everything that can be touched. For example, a table, a chair, we humans, everything is matter. Everything that can be touched, practically or theoretically, is matter. Even air is matter. Indeed, this might sound a little bit strange, but we touch air all the time. We might not notice it every time, but on a windy day, one can easily see that we can touch the air and thus it is also matter.

Everyday examples of matter
Air as a less concrete example of matter

But what is matter? How can we picture what matter is made of?

Key Idea II Reality is described through models. For example the model of particle physics.

This question has been with us for more than 2500 years. At that time, as now, we could only use models to explain and describe nature. In ancient Greece, the philosopher *Democritus* came up with the best model so far to describe what matter is. According to his model, matter consists of indivisible units, which he called atoms. In Greek, "átomos" means indivisible, and that is how Democritus imagined these atoms. Everything consists of tiny, indivisible atoms that can connect with each other.

Multiple references to the model aspect of particle physics as one of the main pillars of the learning unit
Embedding in historical context and etymological explanation

Key Idea III In the model of particle physics, there are atoms, which may combine to form compounds.

Key Idea IV In this model, atoms are divided into two areas: the nucleus space and the orbital space.

This model is now very old, but as it has been proven to be very accurate, it is still used in particle physics. However, we have already discovered that atoms are not indivisible. Indeed, atoms can be divided into two areas. According to the model of particle physics, we can distinguish between a tiny nucleus space and a relatively large orbital space all around.

Linguistic accuracy: "nucleus space" instead of "the nucleus", "orbital space" instead of "the atomic shell"

orbital

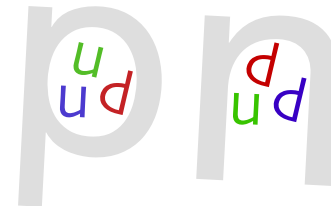
Qualitative distinction of the two areas by means of a typographic illustration of the atomic model

Key Idea V In the nucleus space, protons and neutrons are located.

In the tiny nucleus space, so-called protons and neutrons are located. These are particle systems that are only found in the nucleus space. According to the model, these protons and neutrons are each made of three particles. These particles are called quarks. And according to the current state of research, they are indivisible. Therefore, in the model of particle physics, they are called elementary particles.

Key Idea VI Protons and neutrons are particle systems, which are made of quarks.

Key Idea VII Quarks are indivisible. In this model, these are called elementary particles.



Linguistic accuracy: protons and neutrons as "particle systems, which are made of particles" instead of particles containing particles

Typographic illustration of proton and neutron as particle systems

Elementary particles are drawn in colour, while particle systems are grey. Red, green, and blue are reserved for quarks, to set up the notion of colour charge

Key Idea VIII In the orbital space, it is likely to find electrons.

In the huge orbital space, it is likely to find other particles, called electrons. As far as we know, these electrons, like quarks, are indivisible. They are, therefore, also called elementary particles. These electrons are always located somewhere in the orbital space, while the quarks are always found in the nucleus space.

Key Idea IX Electrons are indivisible. In this model, these are called elementary particles.

Linguistic accuracy: "in the orbital space, it is likely to find electrons" instead of electrons are in the atomic shell



After all, an atom, as *Democritus* had imagined it more than 2500 years ago, is not indivisible. But it is made of indivisible particles. It is made of the quarks that form the protons and neutrons in the nucleus space, and of the electrons that can be found somewhere in the orbital space.

Short summary and final review on *Democritus*

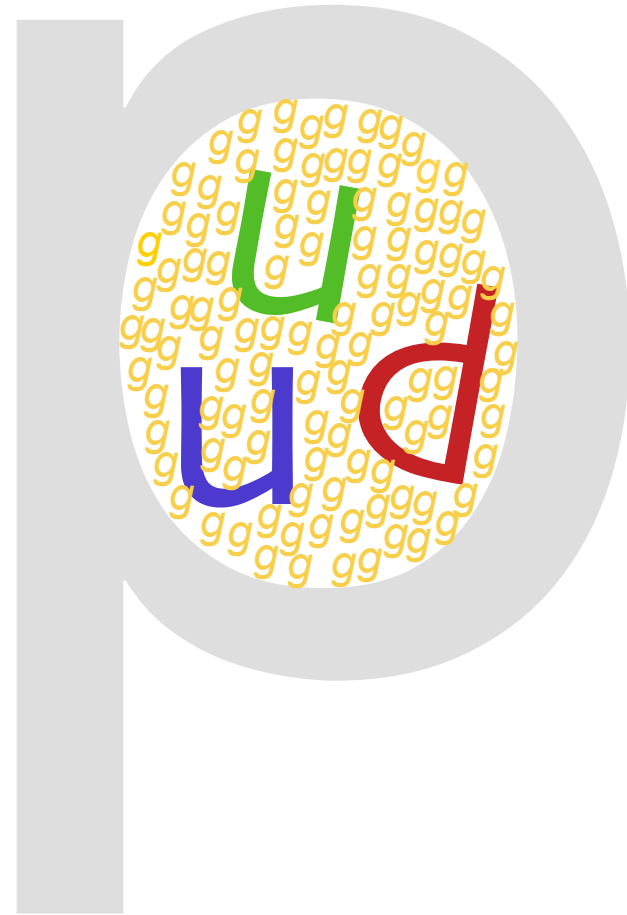
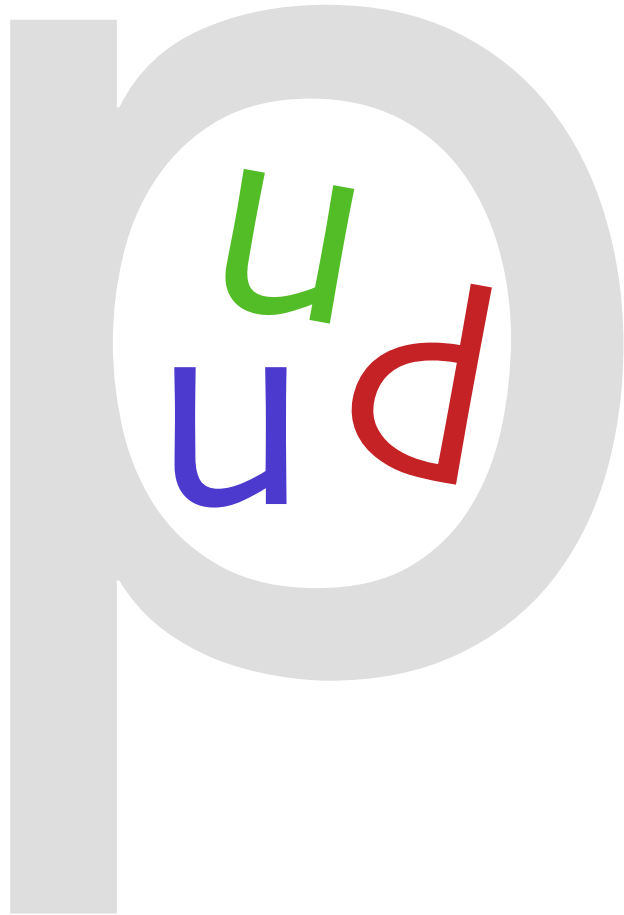
Key Idea X In this model, apart from particles, there is only empty space.

According to the model of particle physics, apart from these tiny, indivisible particles, there is only empty space. Nothingness. Everything, the table, the chairs, we humans, the earth, everything is made of an incredible amount of elementary particles and much more emptiness.

Introduction of empty space as "opponent" of elementary particles

Jeff Wiener
CERN 2017
cern.ch/jeff.wiener

- I. Matter is everything that can be touched, practically or theoretically.**
- II. Reality is described through models. For example the model of particle physics.**
- III. In the model of particle physics, there are atoms, which may combine to form compounds.**
- IV. In this model, atoms are divided into two areas: the nucleus-space and the orbital-space.**
- V. In the nucleus-space, protons and neutrons are located.**
- VI. Protons and neutrons are particle systems, which are made of quarks.**
- VII. Quarks are indivisible. In this model, these are called elementary particles.**
- VIII. In the orbital-space, it is possible to find electrons.**
- IX. Electrons are indivisible. In this model, these are called elementary particles.**
- X. In this model, apart from particles, there is only empty space.**





cern.ch/jeff.wiener