



CERN Wissenschaft verbindet Kulturen



# CERN

*Wissenschaft verbindet Kulturen*

Herausgegeben von  
Marilena Streit-Bianchi

Genf  
2019

Titelzeichnungen:

Vorderseite

“Pushing particles near to the speed of light” Justino António Cardoso 2015, *Tusche*

Rückseite

“CERN, Geneva Switzerland” Justino António Cardoso 2015, *Farbtusche*

Das vorliegende Buch ist in Englisch (Originalversion), Deutsch, Französisch, Italienisch, Portugiesisch und Spanisch erhältlich.

Bezugsquellen:

Englisch	DOI: 10.5281/zenodo.1193238
Deutsch	DOI: 10.5281/zenodo.1196815
Französisch	DOI: 10.5281/zenodo.1196811
Italienisch	DOI: 10.5281/zenodo.1196808
Portugiesisch	DOI: 10.5281/zenodo.1196813
Spanisch	DOI: 10.5281/zenodo.1300290

© 2019 [[Die Autoren ]]. Dies ist ein Open Access Buch.

Die Artikel stehen unter der **CC BY Lizenz** (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

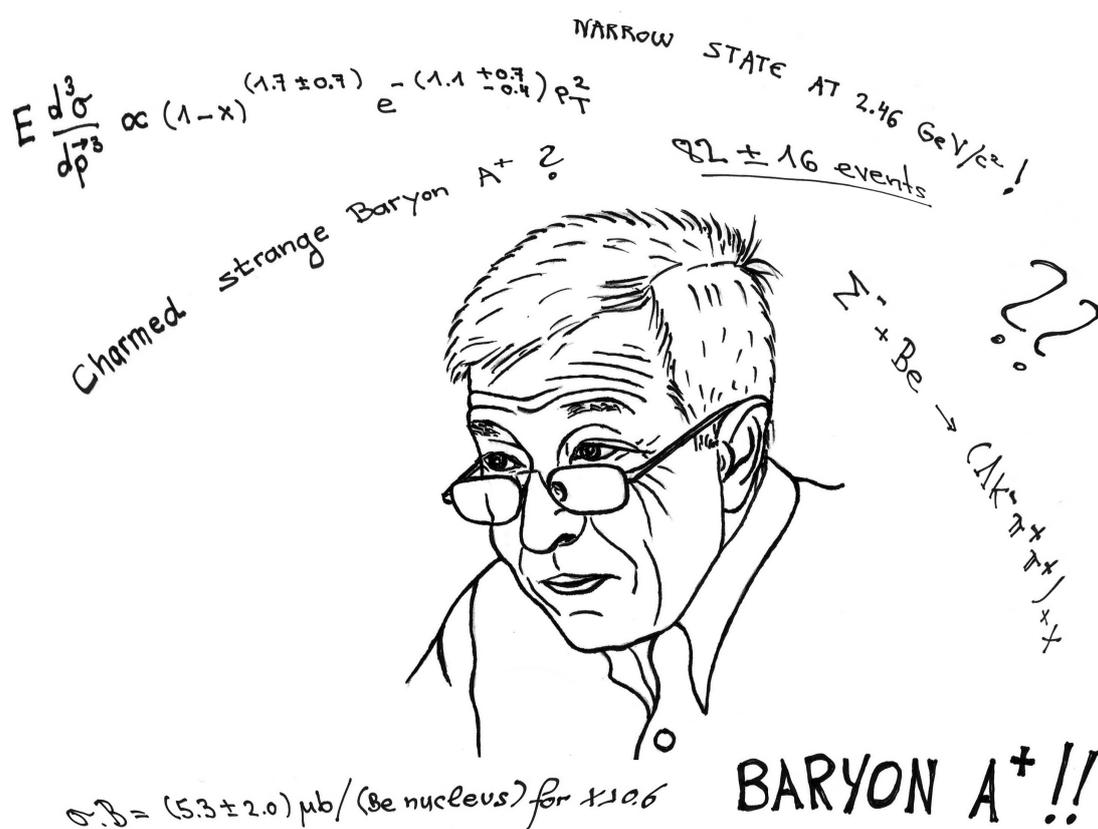
Kunstwerke stehen unter der **Attribution-Non Commercial-ShareAlike 4.0 International Lizenz** (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Zitieren von Artikeln oder Kunstwerken:

[[Name(n) von Autor(en) oder Künstler(n)]], [[Titel des Beitrags oder Kunstwerks]]

in CERN: Wissenschaft verbindet Kulturen, Hrsgb. Marilena Streit-Bianchi, 2018, pp [[Seitenbereich]]

DOI: 10.5281/zenodo.1196815 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.1196815>)



“Peter” Wolfgang Trettnak 2018, Tusche

In Memoriam Dr. Karl - Peter Streit (1945-2014), Physiker der Universität Heidelberg und Assistent von Prof. Volker Soergel. Er war an den Experimenten WA2, WA42 und WA46 beteiligt, in denen die Eigenschaften von Hyperonen untersucht wurden. Die Kollaboration WA62, für die er Wortführer war, zeigte 1983 die Existenz des charmed strange Baryons A<sup>+</sup> (csu) bei 2.46 GeV/c<sup>2</sup> (heute Ξ<sup>+</sup><sub>c</sub> genannt) und 1984 die des charmed doubly strange Baryons T<sup>0</sup> (css) bei 2.74 GeV/c<sup>2</sup> (heute Ω<sup>0</sup><sub>c</sub> genannt) (Z.Phys. C 28, 2, pp.175-185 (1985)). Nach einer Zeit in der Industrie ist er der Gruppe von Prof. Alan Clark am Department für Kern- und Teilchenphysik der Ecole de Physique der Universität Genf beigetreten. Dort arbeitete er an dem Problem der Strahlungshärte des Silizium Pixel Detektors von ATLAS für die zukünftigen Upgrades des ATLAS Trackers (insertable **B-Layer (IBL)** und **High Luminosity - LHC (HL-LHC)**). Er war langjähriges Mitglied der Benutzergruppe am CERN.

CERN war seine berufliche und geistige Heimat für Wissenschaft, Kultur und Humanität.

Marilena Streit-Bianchi und Rolf Heuer

## Vorwort

Ich weiß aus eigener, langjähriger Erfahrung, dass das CERN ein Ort war und bleibt, an dem Wissen, technische Kompetenz und Verständnis ein willkommenes Zuhause finden. Dies ist seit der Gründung der Organisation in den 1950er Jahren der Fall und wird so lange so bleiben, wie es das CERN gibt. Denn diejenigen, die am CERN in Forschung und Betrieb tätig sind, sind motiviert durch den Wunsch, die Grenzen unseres Verständnisses der fundamentalen Naturkräfte zu erweitern, unabhängig davon, woher sie kommen, oder welche kulturelle Einstellung sie auch haben.

Dieses Buch gibt einen Einblick in die Aktivitäten des CERN und beleuchtet verschiedene, weniger bekannte Facetten des Laboratoriums, die aber für die Forschung in der Hochenergiephysik unerlässlich sind. Das CERN ist nicht nur ein Paradebeispiel für Spitzenleistungen in Forschung, Technologie und Innovation, sondern auch ein Schmelztiegel von Kompetenzen und Nährboden für Humanität.

Wissenschaft und Kunst haben Kreativität und offene Fragen gemeinsam. Dieses Buch zeigt, wie diese beiden Welten, die einst eindeutig vereint, jetzt aber als getrennt wahrgenommen werden, in Wirklichkeit aber Manifestationen desselben Geistes sind. Es zeigt, wie KünstlerInnen unterschiedlicher kultureller Herkunft das CERN und die dort geleistete Arbeit wahrnehmen<sup>1</sup>. Die grafische Arbeit von Justino António Cardoso vermittelt einen unverwechselbaren und einzigartigen afrikanischen Touch.

Abschließend möchte ich hinzufügen, dass dieses Buch in seinen verschiedenen Sprachversionen dank der wohlwollenden Arbeit aller Mitwirkenden möglich wurde, die sich neben ihrer täglichen wissenschaftlichen oder künstlerischen Arbeit die Zeit genommen haben, sich an diesem Vorhaben zu beteiligen.

Ich nutze die Gelegenheit, um mich herzlich zu bedanken bei:

Sergio Bertolucci, Professor an der Universität Bologna und ehemaliger Direktor für Forschung und wissenschaftliches Rechnen am CERN, für die Unterstützung von Justino António Cardoso während seines Aufenthalts am CERN.

João Penedones Fernandes Professor für Physik an der **EPFL** (**École Polytechnique Fédérale de Lausanne**), der Justino António Cardoso den Zweck des CERN und die dort geleistete Arbeit erläutert hat.

José Carlos Rasteiro Da Silva Elektronikingenieur vom **LIP** (**Laboratory of Instrumentation and Experimental Particle Physics**) Lissabon, der am Experiment CMS am CERN arbeitet und Führungen durch die CERN-Einrichtungen anbietet.

Für die Unterstützung bei der Übersetzung und Überarbeitung dieses Buches bedanke ich mich herzlich bei Beatrice Bressan, Mar Capeáns Carrido, Melissa Gaillard, James Gillies, Paulo Gomes, Peter Igo-Kemenes, Bettina Hamoudi, João Antunes Pequeno, Pascale Pessy, Délio Duarte Ramos, Klaus Michael Streit und bei Susana Mataix, José Manuel Facal, Margarita Cimadevila sowie Wolfgang Tretnak vom Verein arSciencia.

Marilena Streit-Bianchi

---

<sup>1</sup> Künstler: Davide Angheliddu (Italien), Justino António Cardoso (Mosambik), Margarita Cimadevila (Spanien), Angelo Falciano (Italien), Michael Hoch (Österreich), Karen Panman (Niederlande), Islam Mahmoud Sweity (Palästina), Wolfgang Tretnak (Österreich).

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> <i>Marilena Bianchi-Streit</i> .....	<b>iv</b>
<b>CERN - Das europäische Laboratorium für Teilchenphysik</b> <i>Marilena Streit-Bianchi</i> .....	<b>5</b>
<b>CERN - Wissenschaft für den Frieden</b> <i>Emmanuel Tsesmelis</i> .....	<b>7</b>
<b>Das Standardmodell und die Suche nach neuen Grundlagen der Physik</b> <i>John Ellis</i> .....	<b>13</b>
<b>Beschleuniger: Wie und warum?</b> <i>Lucio Rossi</i> .....	<b>17</b>
<b>Die Physiker und die Experimente</b> <i>Ana Maria Henriques Correia and João Martins Correia</i> ..	<b>27</b>
<b>CERN und Informationstechnologie</b> <i>Frédéric Hemmer</i> .....	<b>35</b>
<b>Wissens- und Technologietransfer</b> <i>Giovanni Anelli</i> .....	<b>39</b>
<b>ClearPEM</b> <i>João Varela</i> .....	<b>41</b>
<b>ARTSCI am CERN</b> <i>Arthur I. Miller</i> .....	<b>43</b>
<b>Wissenschaft, Politik und Gesellschaft</b> <i>Rolf Heuer</i> .....	<b>47</b>

## Künstler und Titel ihrer Werke

*Justino António Cardoso (Mosambik):*

<b>Pushing particles near to the speed of light</b> .....	<b>Vorderseite</b>
<b>Geneva Switzerland</b> .....	<b>Rückseite</b>
<b>CERN, the largest particle physics laboratory in the world</b> .....	<b>3</b>
<b>The evolution of our Universe</b> .....	<b>4</b>
<b>How to extend the Standard Model?</b> .....	<b>6</b>
<b>The forces</b> .....	<b>11</b>
<b>The search is open</b> .....	<b>12</b>
<b>Strings propagate through space and interact</b> .....	<b>15</b>
<b>Energetic protons in a circular collider</b> .....	<b>18</b>
<b>Superconducting coils of a LHC magnet and vacuum beam pipe</b> .....	<b>19</b>
<b>Tanks of liquid helium to cool the LHC</b> .....	<b>19</b>
<b>CERN's accelerator complex</b> .....	<b>23</b>
<b>A look into the future</b> .....	<b>24</b>
<b>Chameleon a hypothetical scalar particle</b> .....	<b>31</b>
<b>Accelerators and detectors to understand the Universe</b> .....	<b>34</b>
<b>A clinical application: ClearPEM</b> .....	<b>39</b>
<b>An innovative technology</b> .....	<b>40</b>

<b>Gargamelle and the neutral currents .....</b>	<b>45</b>
<b>The gravitation law I know .....</b>	<b>46</b>
<b>Knowledge and black holes .....</b>	<b>49</b>
<b>Cosmic microwave background .....</b>	<b>50</b>
<i>Wolfgang Tretnak(Österreich):</i>	
<b>Peter .....</b>	<b>iii</b>
<i>Angelo Falciano (Italien):</i>	
<b>Congetture circolari .....</b>	<b>16</b>
<i>Margarita Cimadevila (Spanien):</i>	
<b>Quarks .....</b>	<b>25</b>
<i>Islam Mahmoud Sweity (Palästina):</i>	
<b>François Englert and Peter Higgs at CERN in 2012 .....</b>	<b>26</b>
<i>Davide Anghelddu (Italien):</i>	
<b>ATLAS Remeshed-Higgs Boson (Skulptur) .....</b>	<b>28</b>
<b>ATLAS Remeshed-Higgs Boson (digital print) .....</b>	<b>28</b>
<i>Michael Hoch (Österreich):</i>	
<b>Matter-Anti-Matter, symmetry 4 .....</b>	<b>29</b>
<i>Karen Panman (Niederlande):</i>	
<b>Strings at the horizon of a black hole .....</b>	<b>44</b>
<i>Paul Gauguin(Frankreich):</i>	
<b>Woher kommen wir/ Wer sind wir/ Wohin gehen wir .....</b>	<b>13</b>
 <i>Photos</i>	
<b>Simon van der Meer and Carlo Rubbia celebrate their awarding of the Nobel Prize in 1984 with a toast at CERN (CERN-PHOTO-8410523) .....</b>	<b>26</b>
<b>Justino António Cardoso im CERN .....</b>	<b>51-52</b>



Das größte Teilchenphysiklaboratorium der Welt  
ist eine der führenden Organisationen bei der  
Schaffung von Wissen





**"The evolution of our Universe"** António Justino Cardoso 2015, Tusche

Die Evolution des Universums, bis hin zu terrestrischem Leben, dauerte mehrere Milliarden Jahre. LHC Physiker untersuchen, was in den  $10^{-12}$  Sekunden nach dem Urknall passierte. Wasserstoff- und Helium-Atome entstanden etwa 380.000 Jahre später.

# CERN - Das europäische Laboratorium für Teilchenphysik

*Marilena Streit-Bianchi*

CERN, die europäische Organisation für Kern- und Teilchenphysik, ist das größte Laboratorium dieser Art in der ganzen Welt und ein Paradebeispiel eines langjährigen europäischen Projekts für Forschung, Ausbildung und Wissenstransfer. Das Laboratorium wurde 1954 auf der französisch-schweizerischen Grenze in der Nähe von Genf gebaut. Ziel war die Gründung eines Forschungszentrums für Physik von Weltrang. Die Abwanderung von Wissenschaftlern in die USA sollte gebremst und Europa in einem Forschungsprojekt vereint werden, das von keinem einzelnen Land allein bewältigt werden konnte. Darüber hinaus wollten die Visionäre aus Wissenschaft und Diplomatie die Verständigung zwischen den Völkern unabhängig von Nationalität, politischer oder geistiger Überzeugung fördern.

Heute ist CERN international ausgerichtet, vor allem durch die wissenschaftlichen Kooperationen von über 600 Instituten und Universitäten aus aller Welt, die die Einrichtungen des CERN nutzen.

CERN ist ein weltweit anerkanntes Spitzenforschungszentrum, das zu wichtigen Entdeckungen auf dem Gebiet der Teilchenphysik beigetragen hat. Es bleibt eine führende Organisation zur Schaffung von Wissen.

Seine Rolle und Bedeutung für Ausbildung und Training von Physikern, Ingenieuren, Computerwissenschaftlern und Technikern wächst ständig. Jedes Jahr erhalten etwa tausend junge Menschen Zertifikate für ihre am CERN geleistete Arbeit.

Im Laufe der Jahre haben sich die positiven Ergebnisse des Wissenserwerbs und -transfers als sehr wichtig erwiesen. Das Laboratorium ist eine Quelle unauhörlicher technologischer Entwicklungen.

Am CERN werden die Ergebnisse der Grundlagenforschung veröffentlicht, frei ausgetauscht, in einer Datenbank publiziert und somit der Welt zugänglich gemacht. In diesen Austausch sind nicht nur Forscher sondern auch Ingenieure, Techniker und Studenten eingebunden. Jeder ist hier in der Lage, seine Interessen und seinen Wissensdurst auszuleben, indem er mit Menschen unterschiedlichster Herkunft, Fachrichtung und Wissensstands zusammenarbeitet.

Die riesigen Infrastrukturen des Laboratoriums und der freie Teamgeist des Lernens und Teilens sind eine große Entdeckung für jeden Neuankömmling. Verwaltung und Koordination haben in den großen Kollaborationen eine Schlüsselfunktion für den Erfolg der wissenschaftlichen Arbeit.

Der Einfluss auf viele Bereiche des Wissens, das in großen und kleinen technischen Forschungsprojekten erworben wurde, ist gut dokumentiert. CERN hat eine lange Tradition in der Pflege von Beziehungen zur Industrie, um innovative Technologien zu entwickeln, die für den Bau von Beschleunigern und Detektoren notwendig sind. Seitdem der Technologie- und Wissenstransfer institutionalisiert und der Aufwand für dessen schnelleren und wirksamen Einsatz erhöht wurden, spielt CERN eine noch aktivere Rolle beim Transfer von Innovationen aus der Grundlagenforschung in die Gesellschaft.



"How to extend the Standard Model?" Justino António Cardoso 2015, Tusche

# CERN - Wissenschaft für den Frieden

*Emmanuel Tsesmelis*

Am Ende des zweiten Weltkriegs hatte die europäische Wissenschaft ihre führende Position verloren. Nach dem Vorbild anderer internationaler Organisationen haben eine Reihe von visionären Wissenschaftlern vorgeschlagen, ein europäisches Kernforschungszentrum zu schaffen. Ein solches Laboratorium würde nicht nur die europäischen Wissenschaftler zusammenführen, auch die steigenden Kosten einer derartigen Einrichtung werden geteilt. Der französische Physiker Louis de Broglie legte den ersten offiziellen Vorschlag für die Schaffung eines europäischen Laboratoriums bei der europäischen Kulturkonferenz vor, die am 9. Dezember 1949 in Lausanne eröffnet wurde. Ein weiterer Anstoß kam von der fünften UNESCO-Generalkonferenz, die im Juni 1950 in Florenz stattfand. Der amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Isidor Rabi legte eine Resolution vor, welche die UNESCO ermächtigte, „die Einrichtung regionaler Forschungslaboratorien anzuregen und zu fördern, um die internationale Forschung zu stärken“.

Während der sechsten Tagung des CERN-Rates in Paris (Juni 1953) wurde das CERN-Übereinkommen zur Gründung der Organisation, vorbehaltlich der Ratifizierung, von zwölf Staaten unterzeichnet. Das Übereinkommen wurde schrittweise von den zwölf Gründungsmitgliedstaaten ratifiziert: Belgien, Bundesrepublik Deutschland, Dänemark, Frankreich, Griechenland, Italien, Jugoslawien, die Niederlande, Norwegen, Schweden, Schweiz und das Vereinigte Königreich. Am 29. September 1954, wurde **CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)** - die Europäische Organisation für Kernforschung - offiziell ins Leben gerufen.

Die CERN Konvention hat sich seit mehr als 60 Jahren bewährt. Sie stellt den Rahmen zur Verfügung, der es der Organisation ermöglicht sich sowohl an ein wandelndes politisches Umfeld als auch an neue wissenschaftliche Entwicklungen anzupassen. Die Konvention ist ein Zeugnis für die Weisheit und Weitsicht der CERN Gründungsväter, und entspricht ihrer Vision, den Frieden in Europa zu sichern. Durch die Schaffung dieses Schwerpunkts wurde die wissenschaftliche Zusammenarbeit in einem nie dagewesenen Ausmaß gefördert, und dies zwischen Nationen, die erst vor ein paar Jahren Krieg gegeneinander geführt hatten.

Seither hat das CERN dazu beigetragen, gegenseitiges Vertrauen über Grenzen hinweg aufzubauen. Während der Zeit des Kalten Krieges war CERN im Jahr 1968 die erste Organisation, die ein Abkommen mit der Sowjetunion schloss, mit dem Ziel der Zusammenarbeit mit dem großen nationalen Laboratorium am Institut für Hochenergiephysik (**IHEP**) in Protwino bei Serpuchow. 1956 wurde in Dubna bei Moskau, das internationale Laboratorium Joint Institute for Nuclear Research (**JINR**) für die Staaten des Warschauer Pakts gegründet - mit dem CERN als Vorbild. Die Zusammenarbeit zwischen JINR und CERN bildete eine der wenigen Brücken für den Austausch von Physikern aus Ost und West während des Kalten Kriegs. Sie spielte eine besonders wichtige Rolle in der Partnerschaft von Wissenschaftlern aus West- und Ostdeutschland, da es zu dieser Zeit für Wissenschaftler beider Länder die einzige Möglichkeit war, zu kooperieren. Die Beziehungen zwischen JINR und CERN wurden in den vergangenen Jahrzehnten verstärkt und haben zu einer Vereinbarung geführt, die dem CERN-Rat und dem JINR gegenseitig einen Beobachterstatus einräumt.

Ein weiteres Beispiel ist die Zusammenarbeit zwischen dem CERN und der Volksrepublik China. Es begann in den 1970er Jahren, zunächst in der Beschleunigertechnologie und in der theoretischen Physik, aber bald darauf folgte auch die Teilnahme am Experimentalphysik-Programm des CERN. Aufbauend auf den in den 1990er Jahren mit der Volksrepublik China geschlossenen Abkommen über internationale Zusammenarbeit, beteiligen sich jetzt Universitäten aus der Volksrepublik China an vier LHC-Experimenten (ALICE, ATLAS, CMS und LHCb), am LHC Computing Grid und an der CLIC-Studie.

Die Zusammenarbeit mit Palästina entstand, nachdem die An-Najah National University in Nablus eine Interessensbekundung für das ATLAS-Projekt unterschrieb. Im Dezember 2015 unterzeichnete Palästina ein internationales Kooperationsabkommen und leistete damit einen wichtigen Schritt zur Festigung der Zusammenarbeit mit dem CERN. Im Anschluss daran wurden eine Reihe von Initiativen in Palästina gestartet, darunter Masterclasses, eine Physik-Schule an der Arab American University in Dschenin und die Teilnahme

palästinensischer Lehrer an einem Programm für High-School Lehrer am **SESAME** Projekt (**S**ynchrotron-Light for **E**xperimental **S**cience and **A**pplications in the **M**iddle **E**ast). SESAME ist ein Beschleunigerprojekt das in Jordanien unter der Schirmherrschaft der UNESCO und dem Vorbild des CERN gegründet wurde.

An diesem Beispiel wird deutlich, daß CERN nicht nur ein Vorbild für andere europäische Wissenschaftsorganisationen war, sondern auch für Projekte in der ganzen Welt.

Heute ist der **LHC** (**L**arge **H**adron **C**ollider) das wissenschaftliche Vorzeigeprojekt des CERN. Es hat eine neue Ära der Teilchenphysik eingeläutet und zu zahlreichen Entdeckungen geführt. Experimente am LHC haben die Beobachtung des Higgs-Bosons geliefert und damit den **Brout-Englert-Higgs-Mechanismus (BEH)** bestätigt, eine der bedeutendsten Entdeckungen in der Geschichte der Grundlagenphysik. Die Erwartungen am LHC sind gross: Untersucht werden revolutionäre Perspektiven im Verständnis des Mikrokosmos, verbunden mit einem grundlegenden Wandel unseres Blicks auf das frühe Universum.

Das CERN und seine wissenschaftlichen Großprojekte wie der LHC benötigen sowohl eine große und nachhaltige Infrastruktur als auch eine globale langfristige Zusammenarbeit. Die großen internationalen Kooperationen des LHC bieten ein Umfeld, in dem Menschen lernen gemeinsam zu arbeiten. Sie bieten darüber hinaus auch die Chance, Unterschiede zu erkennen, zu akzeptieren und Respekt vor dieser Vielfalt zu entwickeln.

Das CERN ist auch ein Beispiel für das Zusammenführen von Anstrengungen in ganz verschiedenen Kompetenzfeldern. In dem gemeinsamen Bestreben, die modernste technische Ausrüstung und die für die Forschung erforderlichen Dienstleistungen und Anlagen bereitzustellen, kooperieren Ingenieure, Techniker und Administratoren. Der Aufbau von Forschungsinfrastrukturen mit einer Komplexität wie der des LHC, erfordert Ingenieure, Techniker und Administratoren für Bereiche wie Bauingenieurwesen, Installation, Magnete, Hochfrequenzsysteme, Vakuum, Kryotechnik, Elektrizität, Gesundheit und Sicherheit, Strahlenschutz, Rechtsdienst, Feuerwehr, Logistik, Finanzen, Einkauf und Personalwesen. Diese repräsentieren die große Mehrheit der Belegschaft des CERN, die 2017 etwa 2500 Personen umfasst. Darüber hinaus erbringen rund 1000 Auftragnehmer von externen Unternehmen Dienstleistungen, die nicht zu den Kernkompetenzen des CERN gehören und deshalb ausgelagert werden konnten.

Die Beobachtungen am LHC werden den Weg in die Teilchenphysik der nächsten Jahre weisen. CERN als Hausherr des LHC ist in einer einzigartigen Position, um zu einem weiteren Verständnis der Teilchenphysik auf lange Sicht beizutragen. Vor diesem Hintergrund analysiert das CERN zwei verschiedene, herausfordernde Beschleunigerkonzepte, um sich auf seine Zukunft vorzubereiten - **CLIC** (**C**ompact **L**inear **C**ollider) und **FCC** (**F**uture **C**ircular **C**ollider).

All dies geschieht während Einrichtungen der Hochenergiephysik (wie auch in anderen Wissenschaftszweigen) größer und teurer werden. In vielen Ländern werden aber die Mittel nicht erhöht und der Zeitrahmen für die Projekte wird immer länger. Beides führt dazu, dass weniger Anlagen realisiert werden. Die Teilchenphysik muss sich dieser Entwicklung anpassen. Daraus ergibt sich ein höherer Bedarf an globaler Koordinierung und Zusammenarbeit in vielen Bereichen. Die Teilchenphysik selber muss dafür sorgen, dass die notwendige Kompetenz in allen Regionen aufrechterhalten wird um die langfristige Stabilität und Unterstützung sicherzustellen. Einerseits ist es notwendig, alle Länder mit etablierten Gemeinschaften für Teilchenphysik zusammenzubringen und die sich entwickelnden Strukturen anderer Länder zu integrieren. Andererseits sollten auch die Geldgeber eine globale Sichtweise entwickeln. Die Regierungen müssen den vielseitigen Nutzen der Projekte und ihre Verflechtungen auf allen Ebenen gut verstehen, um ihre Finanzierung vor der Gesellschaft rechtfertigen zu können.

Globales Engagement war von Anfang an ein wichtiger Pfeiler in der wissenschaftlichen Arbeit des CERN. Mittels bilateraler internationaler Abkommen zur Zusammenarbeit (**I**nternational **C**ooperation **A**greement - **ICA**) unterhält die Organisation formelle Beziehungen zu etwa 50 Nichtmitgliedstaaten (**N**on **M**ember **S**tates - **NMS**). Von insgesamt rund 13.000 Nutzern am CERN, gehören etwa 40 % zum NMS Programm.

Die Mehrheit dieser NMS-Nutzer sind Forscher aus den USA und der Russischen Föderation. Die gesamte NMS-Beteiligung an den nicht-LHC-Forschungsprogrammen beträgt derzeit etwa 20 %. Finanzmittel für Forschungsprogramme, insbesondere die Wartungs- und Betriebskosten für die LHC-Experimente, werden zwischen den Mitgliedsstaaten, den assoziierten Mitgliedern und den NMS aufgeteilt. Darüber hinaus wächst das Interesse an einer Zusammenarbeit an Beschleunigerforschung und -entwicklung, wie z. B. Hochfeldmagnete, Beschleunigerkonstruktion und weiteren Technologien. Der Schwerpunkt liegt auf den LHC-Upgrades sowie den FCC- und CLIC-Studien. Die Zahl der Staaten, die an solchen Aktivitäten beteiligt sind, wächst bereits über den engen Kreis derjenigen NMS hinaus, die zum Bau des LHC-Beschleunigers beitragen.

Das zunehmende Interesse am CERN führt auch zu einer steigenden Nachfrage nach CERNs Bildungs- und Ausbildungsprogrammen – jenem Teil der Mission des CERN, beim Aufbau von Kapazitäten in den Ländern zu helfen, die ihre Teilchenphysikgemeinschaft gerade entwickeln.

Die wissenschaftlichen Leistungen des CERN gingen im Laufe der Jahre Hand in Hand mit einer Politik der globalen Vernetzung in den Bereichen Wissenschaft, Technologie und Bildung. Vor diesem Hintergrund billigte der Rat 2010 einen radikalen Paradigmenwechsel in der Mitgliedschaftspolitik, der eingebettet in eine neue Politik der geografischen Erweiterung, eine Vollmitgliedschaft auch für nichteuropäische Staaten ermöglicht. Gleichzeitig führte der Rat das neue Instrument der Assoziierten Mitgliedschaft ein, um den Beitritt neuer Mitglieder zu erleichtern. Dies schließt auch Länder außerhalb Europas ein, die möglicherweise in absehbarer Zeit nicht über ausreichende Mittel für eine Vollmitgliedschaft verfügen.

Heute hat das CERN 23 Mitgliedstaaten<sup>1</sup>, sieben Assoziierte Mitgliedsstaaten<sup>2</sup> und sechs Beobachter<sup>3</sup>. Vor kurzem wurde das Abkommen mit Litauen über eine assoziierte Mitgliedschaft unterzeichnet. Das CERN wartet auf die Mitteilung über den Abschluss des internen Genehmigungsverfahrens für den Beitritt Litauens. Auch Brasilien, Kroatien und die Russische Föderation haben die Assoziierte Mitgliedschaft beantragt.

In einer Zeit, in der das CERN neue Mitgliedstaaten und assoziierte Mitgliedstaaten anzieht, entwickeln sich die formellen Beziehungen zu anderen Nichtmitgliedstaaten, beispielsweise durch den Abschluss neuer internationaler Kooperationsabkommen (ICAs). Heute sind etwa 50 ICAs mit einer breiten und diversifizierten geographischen Verteilung in Kraft, und auch mit vielen anderen wurden wissenschaftliche Kontakte geknüpft<sup>4</sup>. Die Listen der Mitglieder werden im Internet ständig aktualisiert<sup>5</sup>.

Die Politik der geografischen Erweiterung im Jahr 2010 bietet wichtige Chancen für die Zukunft der Organisation. Das CERN hat daraus eine Strategie entwickelt, die dem Rat im März 2016 vorgelegt wurde, um sicherzustellen, dass die geografische Erweiterung die institutionelle Grundlage festigt und damit die langfristigen wissenschaftlichen Ziele des CERN stärkt. Erweiterung ist ja kein Selbstzweck. Vielmehr liegt der Schwerpunkt auf der Stärkung der Beziehungen zu solchen Ländern, die wissenschaftliches und technologisches Fachwissen zum CERN beitragen, von einem engeren Engagement selbst profitieren können, gleichzeitig aber auch dabei helfen, die Entwicklung von Kapazitäten in Ländern mit sich entwickelnden Teil-

---

1 CERN Mitgliedsstaaten 2019: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Israel, Italien, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakische Republik, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich.

2 Zypern und Slowenien sind Assoziierte Mitgliedsstaaten auf der Vorstufe zur Mitgliedschaft. Indien, Litauen, Pakistan, Türkei und Ukraine sind Assoziierte Mitgliedstaaten.

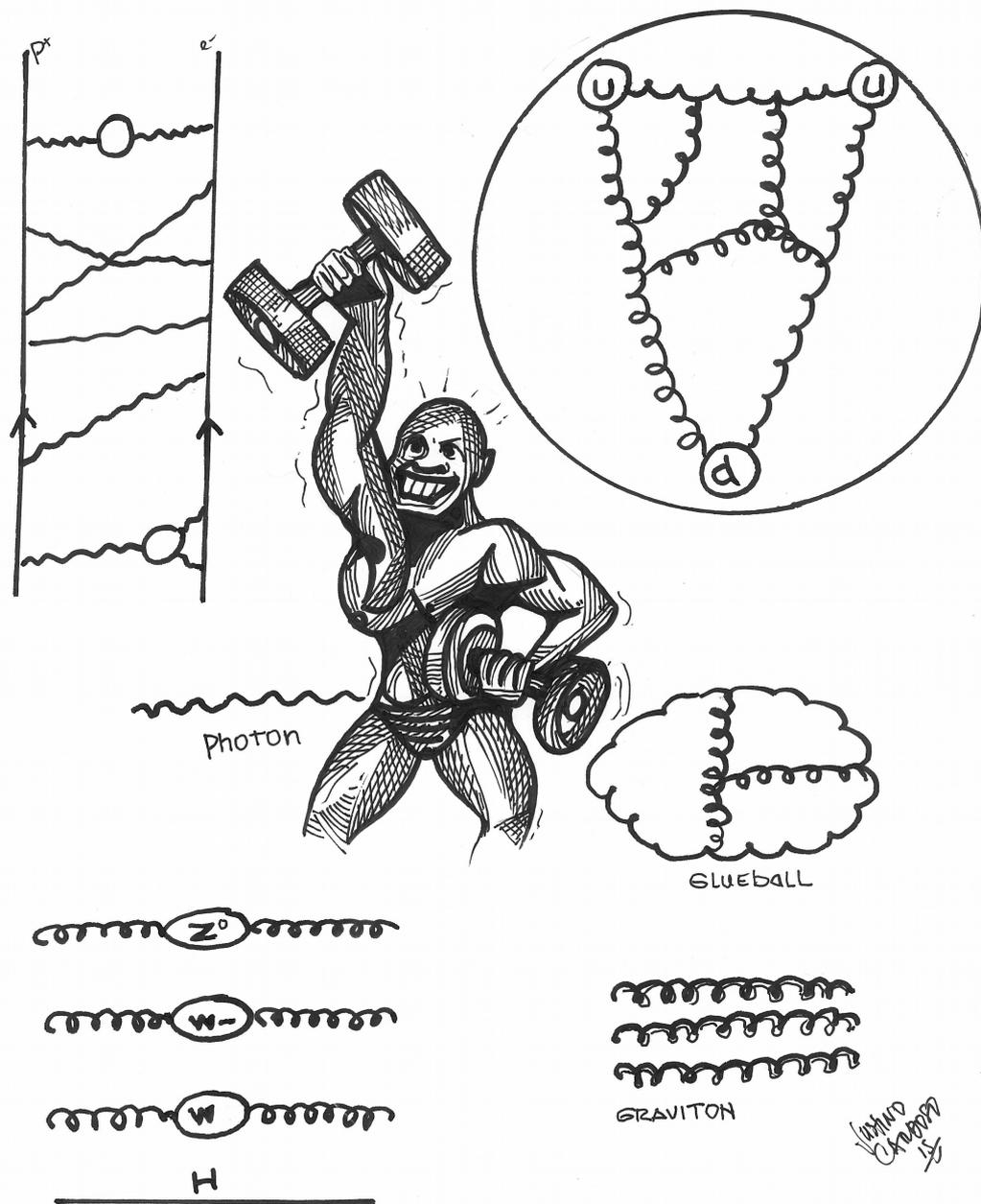
3 Japan, Russische Föderation, Vereinigte Staaten von Amerika, Europäische Union, JINR und UNESCO.

4 Nicht-Mitgliedstaaten, Territorien und Regionen, die mit dem CERN zusammenarbeiten: Ägypten, Albanien, Algerien, Argentinien, Armenien, Aserbaidschan, Australien, Bahrain, Bangladesch, Belarus, Bolivien, Brasilien, Chile, China, Costa Rica, Ecuador, Estland, Georgien, Ghana, Hongkong, Island, Indonesien, Iran, Irland, Jordanien, Kanada, Kasachstan, Katar, Kolumbien, Korea, Kroatien, Kuba, Kuwait, Lettland, Libanon, Madagaskar, Malaysia, Malta, Marokko, Mexiko, Mongolei, Montenegro, Mosambik, Nepal, Neuseeland, Nordmazedonien, Oman, Palästina, Paraguay, Peru, Philippinen, Ruanda, Saudi Arabien, Singapur, Sri Lanka, Südafrika, Taiwan, Thailand, Tunesien, Usbekistan, Vereinigte Arabische Emirate, Vietnam.

5 <http://international-relations.web.cern.ch/stakeholder-relations>

chenphysikgemeinden aufzubauen. Es ist wichtig, dass die Mitgliedschaft und die assoziierte Mitgliedschaft für die Teilchenphysik der jeweiligen Länder von Vorteil ist, und dass die Regierungen weiterhin in das Wachstum der nationalen Gemeinschaften investieren. Gleichzeitig dürfen aber Erweiterungen die Effizienz des Laboratoriums nicht beeinträchtigen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Engagement des CERN in der internationalen Teilchenphysik-Community eindeutig darauf ausgerichtet ist, die Ziele weiter zu verfolgen, die in der CERN-Konvention und der Politik der geografischen Erweiterung festgelegt wurden. Denn die Erforschung der Vereinheitlichung der grundlegenden Naturkräfte erfordert auf lange Sicht die Vereinigung unserer Bemühungen auf globaler Ebene.



"The forces" Justino António Cardoso 2015, Tusche

Es gibt vier bekannte fundamentale Kräfte. Die starke Kraft bindet die Quarks und wird von Gluonen übertragen. Die elektromagnetische Kraft bindet Elektronen an Kerne in Atomen und Atome an Moleküle, sie wird von Photonen übertragen. Der schwachen Kraft unterworfen sind Radioaktivität und Kernreaktionen, übertragen wird sie durch die intermediären Vektorbosonen  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z$ . Die Gravitation ist die anziehende Kraft, die Objekte fallen lässt, Materie in Planeten und Sternen bindet und Sterne in den Galaxien und wird vermutlich durch die (noch nicht entdeckten) Gravitonen übertragen.



"The search is open" Justino António Cardoso 2015, Tusche

# Das Standardmodell und die Suche nach neuen Grundlagen der Physik

John Ellis

## **Woher kommen wir?**

„Woher kommen wir? Was sind wir? Wohin gehen wir?“ Dies sind zeitlose universelle Fragen, die Menschen seit tausenden von Jahren stellen. Berühmt wurden sie durch ihre Darstellung in einem Gemälde Gauguins aus dem Jahr 1897, dem Jahr der ersten Entdeckung eines Elementarteilchens, des Elektrons. Teilchenphysiker interpretieren Gauguins zweite Frage als „Woraus sind wir gemacht?“ und haben darauf eine Antwort gefunden, die als Standardmodell bezeichnet wird. Damit kann die gesamte sichtbare Materie des Universums beschrieben werden. Die wichtigste Bestätigung des Standardmodells war 2012 die Entdeckung des Higgs-Bosons in Experimenten am Large Hadron Collider (LHC). Es war das letzte Teilchen, das im Standardmodell erwartet wurde. Seine Entdeckung gibt auch Einblicke in die Frühgeschichte des Universums und wirft Fragen über seine mögliche Zukunft auf, womit auch Gauguins weitere Fragen im Raum stehen.

Aber das Standardmodell ist unvollständig. Zum Beispiel erklärt es nicht den Ursprung der „Masse“ im Universum, und es erklärt nicht die geheimnisvolle dunkle Materie, die es Galaxien ermöglichte, zu entstehen und immer noch zusammenzuhalten. Am LHC laufen die Experimente weiter, die diese Fragen angehen, aber Teilchenphysiker diskutieren auch darüber, was die nächsten Schritte in der universellen Suche sind, die von Gauguin dargestellt wurde.

Die Kollisionen am LHC und ähnlichen Maschinen stellen Prozesse nach, die sehr früh in der Geschichte des Universum stattgefunden haben. Kollisionen mit höheren Energien als denen des LHC würden es uns ermöglichen, noch weiter in der Zeit zurückblicken. Eine Möglichkeit ist daher, eine leistungsfähigere Version des LHC in einem größeren kreisrunden Tunnel zu bauen. Im LHC kollidieren Protonen (Wasserstoffkerne) mit Energien bis zu etwa dem 14.000fachen ihrer äquivalenten Ruhemasseenergie. Ein Kreisbeschleuniger mit noch höherer Energie wäre in der Lage, Kollisionen mit dem 100.000fachen der Energie der Protonenruhemasse zu erzeugen. Möglicherweise offenbaren diese Kollisionen dann den Ursprung der dunklen Materie im Universum.

Eine andere Möglichkeit wäre, Elektronen mit ihren Antiteilchen kollidieren zu lassen. Solche Kollisionen würden mit bescheideneren Energien stattfinden, aber sie könnten im Prinzip wesentlich präzisere Informationen über die von ihnen erzeugten Partikel bereitstellen. Solche hochpräzisen Studien würden uns helfen, besser zu verstehen, welche Rolle beispielsweise das Higgs-Boson in der Frühgeschichte des Universums spielte und könnten indirekte Hinweise darauf geben, welche neue Physik jenseits des derzeit gültigen Standardmodells der Materie möglich oder nötig wird.

Der nächste Schritt in der Teilchenphysik wird eine wahrhaft globale Herausforderung sein. Sie erfordert die Entwicklung von vielen neuen Technologien, die Ausbildung vieler Ingenieure und Wissenschaftler, sowie bedeutende finanzielle Mittel und eine breite politische Unterstützung. Die benötigten Technologien reichen vom Bauingenieurwesen über Kryotechnik, Materialwissenschaft und Elektronik bis hin zur Informatik. Viele dieser Technologien werden Anwendungen haben, die über die Beantwortung von Gauguins Fragen hinausgehen. Jetzt ist es an der Zeit, gemeinsam nachzudenken, wie man dieser Herausforderung der menschlichen Neugier begegnen kann.

## **Das Standardmodell und die neue Suche**

Die Teilchenphysik hat uns eine Theorie zur Verfügung gestellt, die als Standardmodell bezeichnet wird und erfolgreich die gesamte sichtbare Materie im Universum beschreibt. Doch parallel dazu haben Astrophysiker und Kosmologen festgestellt, dass das Universum viel mehr enthält, als die Augen oder sogar die Teleskope der Astronomen sehen. 1933 entdeckte der Schweizer Astronom Fritz Zwicky, dass Galaxien in der näheren Umgebung des Coma-Clusters von einem viel stärkeren Gravitationsfeld bewegt werden, als dem, das die sichtbare Materie im Cluster erzeugen könnte. Er schlug vor, dass dieses zusätzliche Gravitati-

onsfeld auf eine besondere, unsichtbare ‚dunkle Materie‘ zurückzuführen sei, die kein Licht emittiert.

Diese radikale Idee setzte sich nur langsam durch, aber in den 1970er Jahren wurden durch Messungen der amerikanischen Astronomin Vera Rubin und anderer Personen über die Bewegungen von Sternen in verschiedenen Galaxien entscheidende zusätzliche Beweise erbracht. Im Sonnensystem bewegen sich Planeten langsamer, in Übereinstimmung mit den Gesetzen von Kepler, wenn sie weiter von der Sonne entfernt sind. Im Gegensatz dazu wurde festgestellt, dass sich Sterne, die weiter von den Zentren der Galaxien entfernt sind, viel schneller bewegen als aufgrund der Schwerkraft der sichtbaren Materie zu erwarten wäre, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die derjenigen von Sternen näher am Zentrum ähnelt. Diese Beobachtungen zeigen, dass eine zusätzliche, unsichtbare, dunkle Materie um Galaxien herum sein muss, die ein Vielfaches der sichtbaren Materie umfasst. Viele nachfolgende Beobachtungen haben diese Hypothese der dunklen Materie gestützt.

Ende der 1990er und Anfang der 2000er Jahre entdeckten Astronomen zu ihrer Überraschung, dass neben der dunklen Materie, die in Galaxien und Clustern verklumpt ist, auch eine zusätzliche Verteilung von Energie im „leeren“ Raum dazwischen vorhanden sein muss. Diese so genannte „dunkle Energie“ bewirkt, dass sich das Universum beschleunigt ausdehnt. Die Gravitationsanziehung der gewöhnlichen und dunklen Materie würde im Gegensatz dazu die Expansion des Universums verlangsamen. Insgesamt muss die Dichte der dunklen Energie etwa drei mal größer sein als die der Materie.

Woraus könnte die dunkle Materie bestehen? Eine verbreitete Idee ist, dass es eine unbekannte Art von massiven, schwach wechselwirkenden Teilchen sein könnte. Das Standardmodell enthält hierfür keine möglichen Kandidaten, jedoch mehrere seiner Erweiterungen. Eine gängige Vermutung ist, dass das dunkle Materiepartikel eine Masse zwischen dem 100fachen und 1000fachen der Protonenmasse besitzt. Dies würde seine Erzeugung in die Reichweite des **Large Hadron Collider (LHC)** am CERN bringen. Die Experimente am LHC haben nach Ereignissen gesucht, bei denen eine große Energiemenge auf Teilchen der unsichtbaren dunklen Materie übertragen wird - bisher ohne Erfolg. Die Suche am LHC wird in Bereichen höherer Energie weitergeführt, aber die Entdeckung der dunklen Materie könnte einen zukünftigen Collider mit wesentlich höherer Energie erfordern. Alternativ dazu suchen auch Experimente der Astrophysik nach dunkler Materie. Ein Beispiel dafür ist das **AMS-Experiment (Alpha Magnetic Spectrometer)** auf der internationalen Raumstation, dessen Regieraum beim CERN untergebracht ist. Bei diesem werden Teilchen gesucht, die möglicherweise durch die Vernichtung von Teilchen der dunklen Materie im interstellaren Raum produziert wurden.

Und was ist mit der dunklen Energie? Die Möglichkeit ihres Auftretens wurde erstmals von Einstein 1917 vorgeschlagen, er nannte sie kosmologische Konstante. Alle Theorien der Grundlagenphysik sagen mögliche Beiträge zur Dichte der dunklen Energie voraus, z. B. über das Higgs-Boson im Standardmodell, also hätte deren Anwesenheit nicht überraschen dürfen. Allerdings sagen diese Theorien typischerweise viel mehr dunkle Energie voraus als von den Astronomen entdeckt wurde. Das Rätsel ist also, warum die Dichte der dunklen Energie so klein ist. Studien des Higgs-Bosons am LHC und zukünftigen Collidern können Licht in dieses dunkle Rätsel bringen. Eine Möglichkeit ist, dass dunkle Energie von einem neuen Teilchen nachgeahmt wird, dessen Masse von der lokalen Dichte der Materie abhängt: Ein solches "Chamäleon" -Teilchen wäre experimentell sehr schwer zu entdecken, genau wie sein farblich wechselnder Namensvetter!



**"Strings propagate through space and interact"** Justino António Cardoso 2015, Tusche

Viele theoretische Physiker sind der Meinung, dass Elementarteilchen auf der grundlegendsten Ebene vielleicht Teile einer schwingenden Saite sind, und versuchen mit Hilfe dieser Idee Modelle der Materie zu konstruieren.  
(Legende von John Ellis)



**“Congettare circolari”** Angelo Falciano 2011, Acryl auf Masonite

*Im Beschleuniger ein Wettrennen der Teilchen: Vom Bekannten zum Unbekannten*

# Beschleuniger: Wie und warum?

Lucio Rossi

Beschleunigen heisst bewegen oder schneller bewegen lassen (Oxford English Dictionary). Seit der Zeit des Manifestes des Futurismus im Jahre 1909 war die Beschleunigung eines der Kennzeichen der heutigen Zeit. Teilchenbeschleuniger, erfunden im 20. Jahrhundert, sind ein typisches Produkt jener Epoche, als Barrieren durchbrochen und neue Grenzen des Wissens überschritten wurden.

Rutherford verstand zuerst, dass die Atomstruktur durch Bombardierung mit Kernteilchen enthüllt werden kann und hat damit den Weg in Richtung Teilchenbeschleuniger bereitet. In seinem berühmten Eröffnungsvortrag von 1927 als Präsident der Royal Society sagte er: „Der Fortschritt der Wissenschaft hängt in hohem Maße von der Entwicklung neuer technischer Methoden und deren Anwendung ab... Vom rein wissenschaftlichen Standpunkt aus betrachtet konzentriert sich das Interesse vor allem auf die Anwendung der grossen Möglichkeiten von Vakuumröhren, um ein reichhaltiges Angebot an Hochgeschwindigkeitselektronen und Hochgeschwindigkeitsatomen zu erhalten... Dies würde ein ungemein interessantes Forschungsgebiet eröffnen, das uns unweigerlich Informationen von grossem Wert, nicht nur bezüglich der Beschaffenheit von Atomkernen, sondern auch in viele andere Richtungen geben kann.“ Es ist heute leicht zu erkennen, was für ein großer Prophet er war!

## Kurzbeschreibung eines Beschleunigers

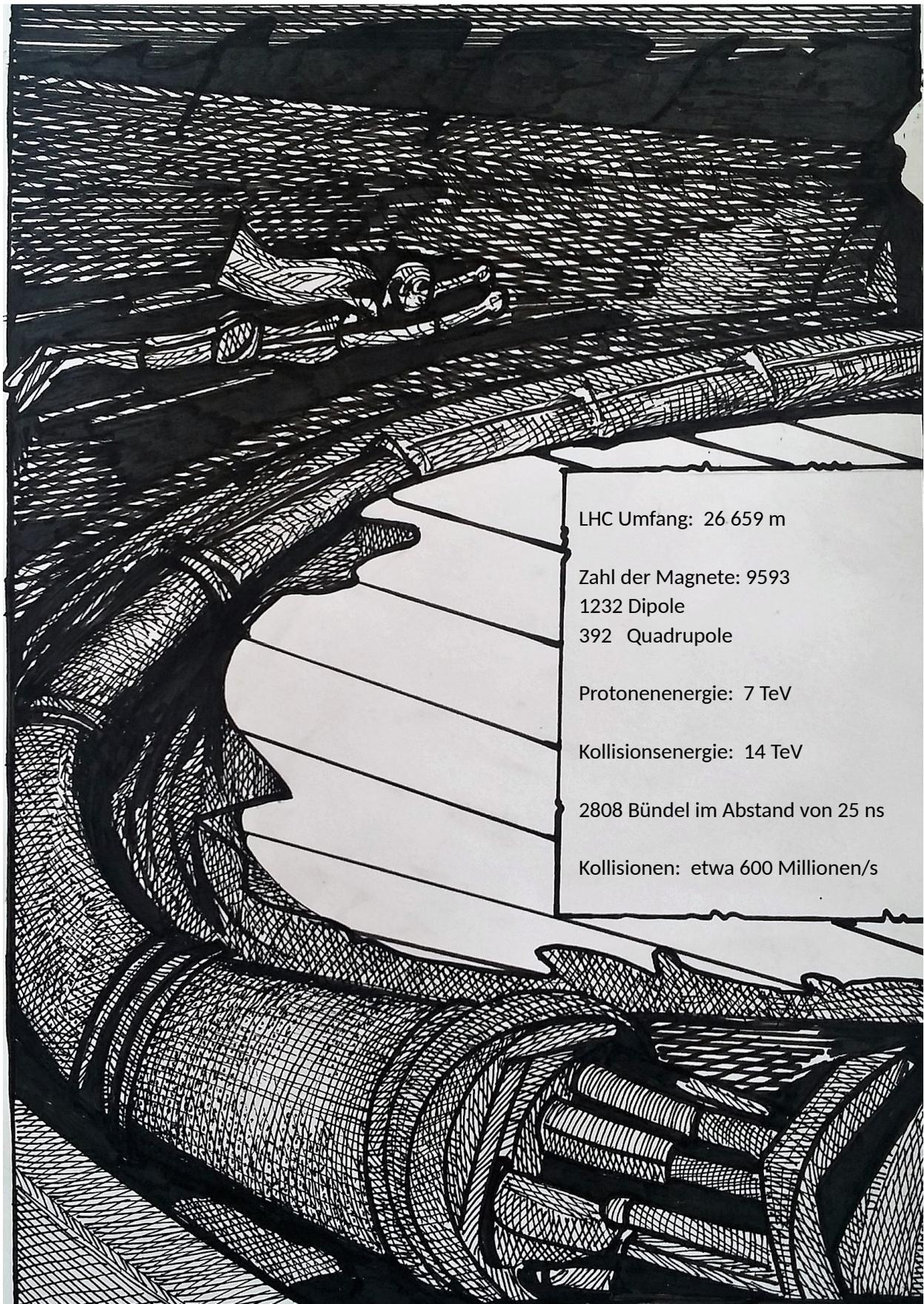
Die Beschleuniger lassen sich in zwei Hauptkonfigurationen unterteilen:

- a) *Linearbeschleuniger - Linacs*, bei denen eine lineare Anordnung von RF-Kavitäten die Mehrfachbeschleunigung liefert. Je mehr Hohlräume, desto höher ist die erreichbare Energie, aber auch die Grösse und die Kosten wachsen entsprechend.
- b) *Ringbeschleuniger*, bei denen der Strahl millionenfach durch die gleichen Hohlräume strömt, bis die maximale Energie erreicht wird. In solchen Maschinen, wie beispielsweise dem LHC, ist der Hohlraumanteil sehr kurz, etwa zehn Meter von 27 km Länge, während der magnetische Teil überwältigend länger ist.

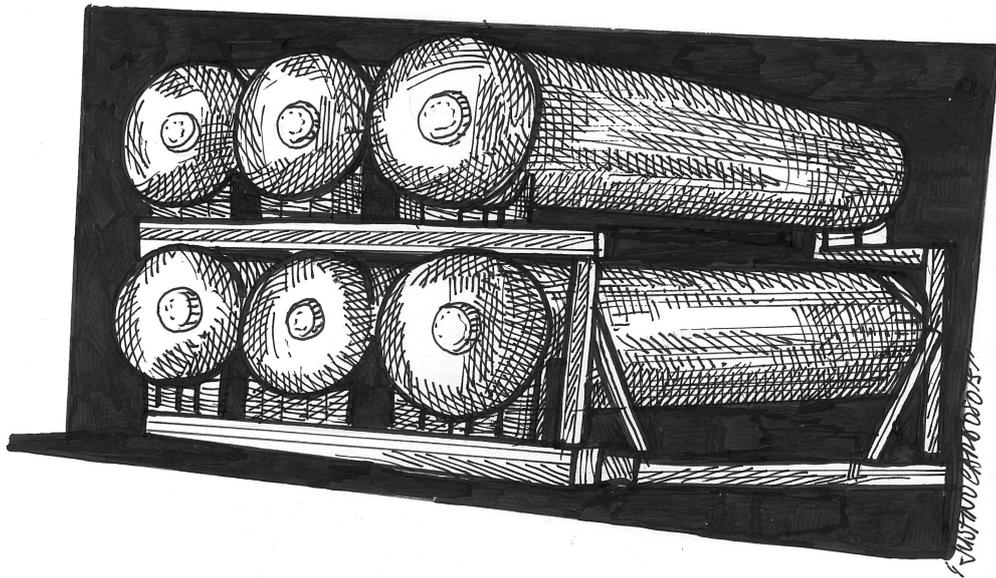
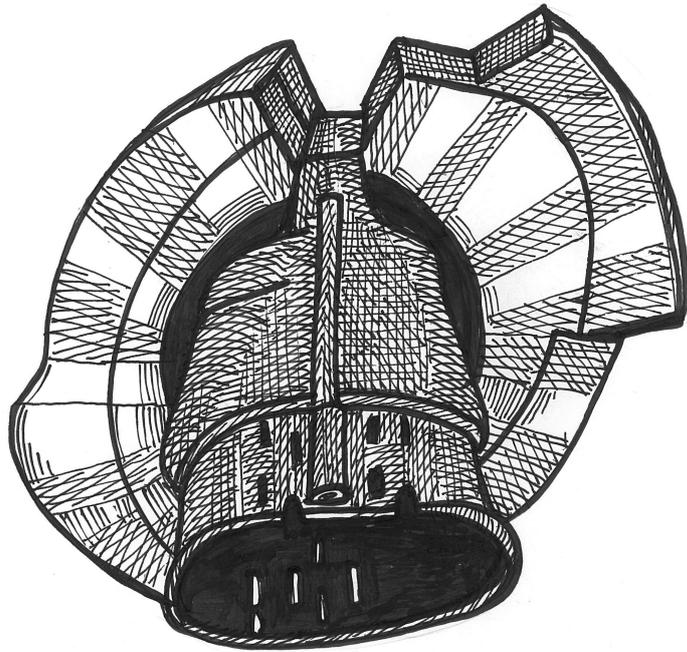
Ein Teilchenbeschleuniger besteht aus vier Hauptkomponenten:

- 1) Der Vakuumkammer, aus der Moleküle und Atome evakuiert werden, bis zu einem Druck von  $10^{-7}$  bis  $10^{-11}$  mbar (d. h. fast eine Million Milliarden mal weniger Moleküle als in der atmosphärischen Luft auf Meereshöhe)
- 2) Einem elektrischen Feld, das die elektrisch geladenen Teilchen auf einer geraden Bahn in Richtung der Feldlinien beschleunigt.
- 3) Einem magnetischen Dipolfeld (erzeugt durch zweipolige Magnete), das die gerade Teilchenbahn in eine Kreisbahn biegt, deren Fläche senkrecht zum Magnetfeld ausgerichtet ist.
- 4) Verschiedene Arten von kompliziert aufgebauten Magnetfeldern wie Quadrupolen (vierpolige Magnete), die den Teilchenstrahl fokussieren, so dass die Partikel nicht auseinander fliegen und schließlich das Vakuumrohr treffen.

In einem Beschleuniger werden zuerst winzige subatomare Teilchen in einer Wolke gesammelt. Daraus wird eine lange dünne Linie gebildet, der so genannte Partikelstrahl. Dieser ist normalerweise nicht durchgehend: Die Partikel werden in Bündeln neu gruppiert. Der beschleunigte Teilchenstrahl kann zur Bombardierung eines feststehenden Targets verwendet werden, üblicherweise eine feste Folie, eine Gaskammer, ein Festkörper oder eine Flüssigkeit. In den 1960er Jahren wurde von Bruno Touschek der erste Collider **AdA** (**A**nello **d**i **A**ccumulazione - Speicherring) in Frascati (Italien) entwickelt. In einem Collider werden zwei Teilchenstrahlen in entgegengesetzter Richtung beschleunigt, so dass die Teilchen frontal aufeinander prallen. Danach wurden fast alle rekordbrechenden Beschleuniger als Collider gebaut.



“Energetic protons in a circular collider” Justino Antonio Cardoso 2015 Tusche



**“Superconducting coils of a LHC magnet and vacuum beam pipe”** Justino António Cardoso 2015, *Tusche*

**“Tanks of liquid helium to cool LHC”** Justino António Cardoso 2015, *Tusche*

Die elektrischen Felder geben den Teilchen Geschwindigkeit (Impuls) zu geben: In der Regel haben sie die Form von elektromagnetischen Wellen, mit einer Frequenz im Bereich der Radio-/TV-Wellen und bis hin zu Mikrowellen. Sie werden alle als Radiofrequenzfelder (RF-Felder) bezeichnet, da früher Frequenzen von 10-200 MHz verwendet wurden. In modernen Beschleunigern werden jedoch Frequenzen von mehreren GHz (bis in den Mikrowellenbereich) eingesetzt. Diese elektromagnetischen Wellen sind in einem metallischen 'leeren' Raum, dem so genannte RF-Hohlraum, eingeschlossen, ähnlich wie eine akustische Welle in einer Orgelpfeife gefangen ist. Jedes Mal, wenn der Strahl den Hohlraum durchdringt, erhält jedes Teilchen einen Kick, vorausgesetzt, dass es mit der richtigen Phase eintritt, so wie ein Surfer vorwärts geschoben wird, wenn er auf dem Wellenkamm verbleibt. Ein Hohlraum kann eine Spannung von 1-10 Millionen V zum Beschleunigen liefern (er erhöht dann die Energie des Teilchen um 1-10 MeV). Um mit GigaVolt (GeV oder 1000 MeV) oder TeraVolt (TeV- oder 1000 MeV – eine Energie wie am LHC) zu beschleunigen, muss man den Strahl tausend- bis millionenfach durch einen Hohlraum führen.

Magnetfelder sind zur Führung der Partikel erforderlich. Der am häufigsten vorkommende Magnettyp, dem wir begegnen, ist der Dipol, bei dem ein gleichförmiges Magnetfeld die Teilchenbahn krümmt. Eine Reihe von Dipolen halten die Partikel in einer kreisförmigen Bahn. Je stärker der Dipolmagnet, desto höher ist die Zentripetalkraft (auch Lorentz-Kraft genannt), die auf das Teilchen in Richtung Kreismitte wirkt. Umso höher ist dann auch die Energie, die das Teilchen erreichen kann. In einem Kreisbeschleuniger wird die Teilchenenergie durch die einfache Beziehung (in relativistischen Näherung)  $E_{\text{Strahl}} = 0,3 \cdot B \cdot R$  bestimmt. B ist der Wert des Magnetfelds und R der Radius des Kreises, dem das Teilchen folgt. Wenn die Parameter der LHC-Magnete eingesetzt werden, 8,3 Tesla und ein Radius von 2,8 km, erhält man die Energie der LHC Protonen, 7 TeV für jeden Strahl, dies entspricht einer Beschleunigung mit einer Spannung von 7 Millionen Millionen Volt! Ein einzelner RF-Hohlraum des LHC bietet jedoch nur ca. 10 MV, so dass der Strahl sie millionenfach passieren muss, um die maximale Energie zu erreichen. Um den Strahl auf seiner Kreisbahn zu halten, werden 1232 Dipole benötigt, die jeweils 15 m lang sind und insgesamt 18 km des 27 km langen Tunnels ausfüllen.

Magnetfelder haben auch die Aufgabe, den Strahl gegen kleine Abweichungen von seiner idealen Flugbahn zu stabilisieren. Beim Autofahren halten Sie das Fahrzeug durch kontinuierliche Feinjustierungen des Lenkrads auf der Spur. Zwischen den Dipolen muss man ein anderes magnetisches Element, die Quadrupole (bestehend aus vier magnetischen Polen), platzieren, um den unvermeidlichen Unvollkommenheiten der Flugbahn entgegenzuwirken. Ohne Quadrupole kann keine Maschine, auch kein Linac, arbeiten, weil der Strahl schnell divergieren und die Wände der Vakuumkammer treffen würde. Im LHC beträgt der Strahldurchmesser dank seiner 400 Quadrupole etwa 1 mm. Der 'Strahl' im LHC ist eine Reihe zylindrischer Bündel mit 1 mm im Durchmesser, jeweils 20-30 cm lang und einem Abstand von 7,5 m, dies entspricht 25 Nanosekunden, voneinander entfernt. Es gibt ca. 2800 Bündel, die jeden der zwei 27 km langen Gegenlaufringe füllen.

Es gibt noch viele andere Arten von Magneten: Sextupole (sechspolig) und so weiter, bis hin zu den Dodekapolen (zwölfpolig). Jeder dieser Magnete kuriert eine spezifische Instabilität des Strahls.

### **LHC Kette**

Der LHC ist die größte und letzte Stufe einer ganzen Kette einzelner Beschleuniger. Am Anfang werden Wasserstoffmoleküle als Gas aus einer Flasche extrahiert, diese werden dann durch eine elektrische Entladung in ein Plasma umgewandelt, d. h. die positiv geladenen Protonen und die negativ geladenen Elektronen, aus denen die Wasserstoffmoleküle bestehen, sind nicht mehr aneinander gebunden, sondern stehen in Form freier Ladungsträger zur Verfügung.

Als nächstes werden die Protonen und Elektronen durch statische elektrische Felder räumlich getrennt. Die Protonen bilden dann den Strahl, der mit einem Linac von etwa 30 m Länge auf eine Energie von 50 MeV beschleunigt wird. Weiter geht es in einem Kreisbeschleuniger, einem 150 m langen Protonen Synchrotron **Booster (PSB)** genannt, das den Strahl auf 1400 MeV (1,4 GeV) beschleunigt. Danach wird der

Strahl in das **Proton Synchrotron (PS)** (mit einem Umfang von 600m) geführt. Dies ist der älteste Beschleuniger des CERN (1959 eingeweiht), der auf 25 GeV beschleunigt. Nächste Stufe ist das 7 km langen **Super Proton Synchrotron (SPS)**<sup>1</sup>, das weiter auf 450 GeV anhebt. Zuletzt werden schließlich die Protonen in den LHC eingeführt: Es werden zwei Strahlen geformt, die gegenläufig kreisen und auf jeweils 7000 GeV (7 TeV) beschleunigt werden. Diese Energie wird beim Aufprall eines Strahls auf ein festes Target freigesetzt. Beim Zusammenstoß der beiden gegenläufigen Strahlen sind es dann im Schwerpunkt 14 TeV.

Die gesamte Kette ist über 40 km lang, davon allein 27 km für den LHC-Tunnel. Die ersten Maschinen befinden sich an der Oberfläche, der SPS jedoch in einem 40 m tiefen Tunnel. Die zwei Injektionstunnel, TI2 und TI8, die SPS mit LHC verbinden, sind jeweils mehr als 3 km lang. Sie müssen die Protonen von einer Tiefe von 40 m auf 100 m unter der Erde transportieren. Jedes einzelne Teil der komplexen Maschine ist ein kompliziertes Wunderwerk. Mehrere zehntausend einzelne Geräte müssen zusammenarbeiten, um die Protonen aus der Wasserstoffflasche in den LHC-Experimenten bei 14 TeV kollidieren zu lassen und das berühmte Higgs-Boson zu erzeugen!

### **Eine Schlüsseltechnologie: Supraleitung**

Das Streben nach immer höherer Energie kann nicht nur durch immer größere Maschinen befriedigt werden: Es gibt eine Grenze bezüglich der Größe eines Beschleunigers (Seite 20 - Magnetfelder). Will man den Radius klein halten, muss man also das Feld der Magnete erhöhen, was beispielsweise durch größere Ströme in den Spulen erreicht werden kann. Dank der Tatsache, dass in einem Supraleiter der elektrische Widerstand null ist, können wir durch ein supraleitendes Kabel ohne Energieverlust enorme Ströme schicken: Im LHC speisen wir unsere Magnete mit Strömen von 12.000 A, ohne Wärmeentwicklung in der Spule. Dadurch sind die LHC-Magnete fünfmal stärker als die Magnete der Beschleuniger mit klassischer Technologie. Das supraleitende Herzstück des LHC sind die 300.000 km eines 1 mm starken, supraleitenden Drahts, der aus einem Verbundwerk mehrerer Materialien besteht. Zur Erreichung von Supraleitung werden, vereinfacht gesagt, tausende feiner Filamente aus der edlen Nb-Ti-Legierung in eine Matrix aus hochreinem Kupfer eingebettet. Das sind 2100 Millionen Kilometer supraleitende Filamente in den LHC-Magneten, in etwa die 14fache Distanz zur Sonne!

Dieses Wunder hat natürlich seinen Preis: Die supraleitende Legierung für LHC, Nb-Ti, erfordert die extrem niedrige Temperatur von -271 °C, eine Temperatur, viel kälter als der Weltraum. Erreicht wird sie durch Kühlung mit suprafluidem Helium. Der LHC ist die größte Tieftemperaturanlage der Welt, seine riesigen Kühlschränke verbrauchen ca. 50 MW. Das ist ziemlich viel. Aber ein LHC ohne Supraleitung, mit klassischer Magnettechnik hätte einen Ring von 100 - 120 km mit einem Stromverbrauch von 1000 MW zur Folge. Dies ist die Leistung eines Kernkraftwerks mittlerer Größe. Da war die Verwendung von Supraleitung aus technologischer, wirtschaftlicher und ökologischer Sicht sicherlich eine gute Investition!

### **Moderne Physik am Werk. 1 - Relativität**

Ein interessantes Merkmal von Beschleunigern ist die makroskopische Manifestation der 'seltsamen' physikalischen Effekte der modernen Physik. Die Tatsache, dass wir Teilchen sehr nahe an die Lichtgeschwindigkeit beschleunigen, bedeutet, dass wir auf einer makroskopischen Skala Dinge sehen, die von Einstein vorhergesagt wurden. Teilchen die sich der Geschwindigkeit von Licht annähern, beschleunigen immer weniger, je schneller sie fliegen. Ihre Geschwindigkeit saturiert bei der Lichtgeschwindigkeit und ihre Massen werden größer oder genauer gesagt: ihr Impuls. Wir erkennen diesen Effekt sehr leicht, denn wenn wir nicht die notwendigen Gegenmaßnahmen ergriffen, würden wir die Partikel verlieren. Bei Erhöhung ihrer Masse würden sie aus dem Orbit driften, weil Geschwindigkeit, Masse und Feld fein aufeinander abgestimmt sind. Dies passierte seinerzeit Ernest O. Lawrence, als er in den 1930ern anfang, eines der ersten Zyklotrone zu

---

<sup>1</sup> SPS wurde für eine kurze Zeit in einen speziellen Proton-Antiproton Collider umgebaut, der es 1983 erlaubte, die Z und W Vektor Bosonen erstmals zu beobachten. Hierfür wurden 1984 Carlo Rubbia und Simon van der Meer mit dem ersten Nobelpreis für ein CERN Experiment ausgezeichnet.

bauen. Ein weiterer interessanter Effekt ist die Tatsache, dass sich bei der Beschleunigung instabiler - das heißt kurzlebiger - Teilchen, ihre Lebensdauer, gemäß der Vorhersage Einsteins von Annus mirabilis 1905, verlängert.

### **Moderne Physik am Werk. 2 - Mikroskope und Quantenmechanik**

Beschleuniger können als Supermikroskope angesehen werden, die es uns ermöglichen, in die Welt des unendlich Kleinen vorzudringen. Die Auflösung eines Mikroskops, vernachlässigt man alle technischen Grenzen und Unvollkommenheiten, wird durch Beugungseffekte der eingesetzten Lichtwellen begrenzt. Diese Beugungseffekte hängen von der Wellenlänge ab. Sichtbares Licht hat eine Wellenlänge zwischen 400 nm (blau) und 700 nm (rot).

Entsprechend ist auch die Auflösung eines Mikroskops auf diesen Längenbereich beschränkt. Verwenden wir allerdings Röntgenstrahlen, das sind elektromagnetische Wellen wie beim sichtbaren Licht, aber mit einer wesentlich kürzeren Wellenlänge von 0,1 - 1 nm, so können wir Atome dieser Größenordnung darstellen. Quantenmechanik lehrt uns, dass sich Teilchen wie Wellen verhalten. Die Wellenlänge der Partikel beträgt  $\lambda = h \cdot c / E$ , wobei  $h$  die Planck-Konstante,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $E$  die Energie des Teilchens ist. Je größer also die Energie des Teilchens, desto kleiner ist dessen Wellenlänge. Durch die Beschleunigung auf 7 TeV erreicht der LHC eine Wellenlänge von  $10^{-19}$  m, das ist ein Milliardstel der 0,1 nm-Wellenlänge der Elektronenmikroskope. LHC untersucht mit seinen Experimenten Dimensionen die viel kleiner als Atome und Atomkerne sind, wirft Licht auf Größenverhältnisse, zehntausend mal kleiner als selbst das Proton! Aus diesem Grund bringt uns der LHC in das Universum während seiner Kindheit, als es etwa ein Tausendstel einer Milliardstel Sekunde nach dem Urknall noch so jung und klein war!

### **Welche Zukunft haben Beschleuniger der Hochenergiephysik (HEP)**

Beschleuniger werden nicht nur in der Hochenergiephysik (High Energy Physics, **HEP**) eingesetzt. Tausende von Beschleunigern werden in Industrie und Medizin und Hunderte für angewandte Forschung genutzt, hauptsächlich Synchrotron Lichtquellen. Nur einige Dutzend Beschleuniger sind für die Teilchen- und Kernforschung geeignet. Aber zweifellos ist die Teilchenphysik der technologische Innovationsmotor im Beschleunigerbereich.

Also was ist der nächste Schritt nach dem LHC? Zunächst der **High Luminosity LHC, HL-LHC**. Dieses Projekt basiert auf neuen supraleitenden Magneten, die etwa 50 % leistungsfähiger sind als die des LHC. Es ist ein Umbau des LHC mit dem Ziel einer wesentlich höheren Anzahl von Kollisionen. Etwa wie das Einschalten eines stärkeren Lichts, um einen Raum zu beleuchten: Wir können viel besser sehen und Details entdecken, die sonst im Rauschen verborgen bleiben. Der HL-LHC ist jetzt im Bau, wird 2024 - 25 in Betrieb genommen und läuft dann bis etwa 2040.

Mittlerweile arbeitet ein großes Netzwerk von Laboratorien und Institutionen aus aller Welt mit dem CERN zusammen, um neue Maschinen zu untersuchen, die die Ära nach dem LHC/HL-LHC prägen werden.

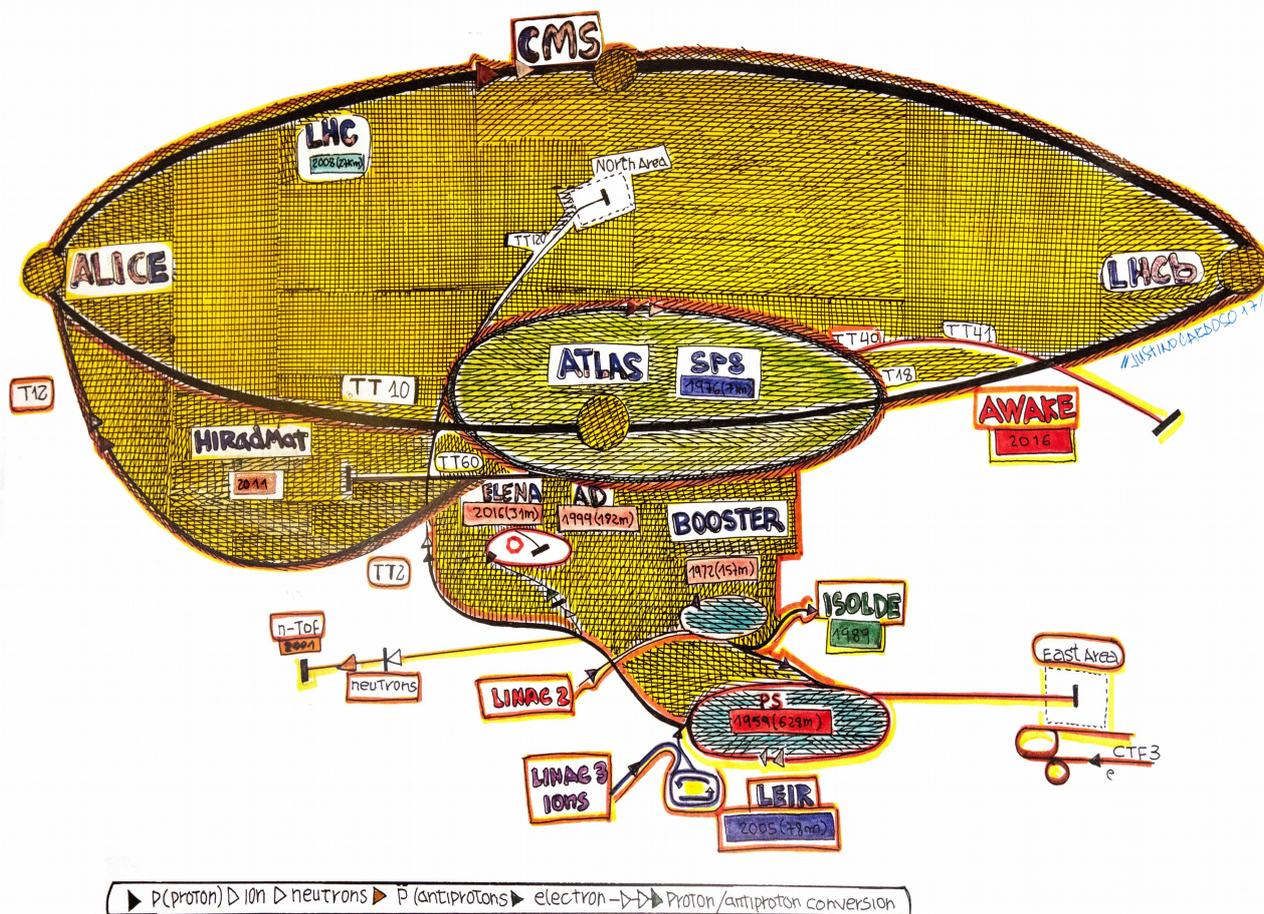
Zwei riesige Projekte scheinen im Rennen vorn zu liegen:

1. **Ein Elektron-Antielektron-Linearcollider**: Zwei Projekte konkurrieren in diesem Bereich. Eines wird **ILC** (International Linear Collider) genannt und ist eine 30 km lange Maschine, die auf supraleitenden Kavitäten basiert. Das andere heißt **CLIC** (Compact Linear Collider) und basiert auf resistiven RF-Kavitäten hoher Frequenz (12 GHz), mit Millimeter-Strahlöffnung und Nanometergenauigkeit über die gesamte Tunnellänge von 50 km. Während ILC auf 0,5-1 TeV begrenzt ist, kann CLIC im Massenmittelpunkt 3 TeV erreichen, jedoch mit einem sehr hohem Leistungsbedarf von 600 MW (keine Supraleitung!).
2. **Ein Future Circular Collider (FCC)**, basierend auf einem kreisförmigen Ring von 100 km. Durch die Verwendung von leistungsfähigen supraleitenden Magneten, doppelt so stark wie die des LHC, werden Proton-Proton-Kollisionen bei 100 TeV Energie im Massenmittelpunkt denkbar. Diese unvorstellbare Energie zu erreichen, ist nach der Entdeckung des Higgs-Bosons der neue heilige Gral von HEP. Der Erfolg hängt stark von

der Entwicklung einer neuen supraleitenden Technologie für Beschleunigermagnete ab. Die neuen Magnete müssen nämlich doppelt so stark sein wie die des LHC. Die Entwicklung der Magnettechnologie für den FCC hat gerade erst begonnen, aufbauend auf der des HL-LHC, dem ersten Schritt über den LHC hinaus.

Welcher dieser beiden Beschleuniger gewinnt das Rennen? Schwer zu sagen. Es ist noch zu früh für eine Antwort.

Um die Aktualisierung einer Europäischen Strategie für die Teilchenphysik 2020 vorzubereiten, hat das CERN eine breit angelegte Studie gestartet. Es ist ein Prozess, der alle großen europäischen Laboratorien einbezieht. Diese Studie schließt auch Überlegungen zu dem FCC mit ein, einem 100 km langen Tunnel, einschließlich der Beurteilung der geologischen und bautechnischen Probleme bei der Unterquerung des Genfer Sees und verschiedener Gebirgsketten. Das Ende dieses Jahrzehnts ist der ideale Zeitpunkt für die Entscheidungsfindung, da bis dahin die Ergebnisse des LHC Run 2 (2015 - 2019) vorliegen werden. Es ist nicht zu früh, schon jetzt die nächste Generation von Beschleunigern für die Zeit nach 2040 vorzubereiten, da diese Projekte Entwicklungszyklen von zwanzig Jahren haben. Inzwischen hoffen wir, dass die neue Technologie, die wir für den High Luminosity LHC entwickeln, sehr bald als technisches Gemeingut zu Verfügung steht, z. B. in der Medizin oder im Bereich der erneuerbaren Energien.



“CERN’s accelerator complex” Justino António Cardoso 2015, farbige Tusche

(from OPEN-PHO-CHART-2013-001-1, Photograph: Marcastel, Fabienne)

Die LHC Kette beinhaltet: Den Linac2, PSB (PS Booster), das PS (Proton Synchrotron) und das SPS (Super PS), das mit dem LHC über die langen T12 und T18 Transfertunnel verbunden ist.



*"A look into the future"* Justino António Cardoso 2015, Tusche



**"Quarks"** Margarita Cimadevila 2006, Acryl, Mischtechnik auf Leinwand

Im traditionellen Quarkmodell aggregieren die stark wechselwirkenden Teilchen (Hadronen) zu Zweier- und Dreiergruppen entweder aus Quark-Antiquark-Paaren (Mesonen) oder drei Quarks (Baryonen). Teilchen, die nicht innerhalb dieses Schemas klassifiziert werden können, heißen exotische Vierquark- und Fünfquark-Teilchen. 2016 bestätigte das LHCb Experiment, dass Quarks auch zu Fünfergruppen kombinieren können.



**“Carlo Rubbia and Simon van der Meer celebrate their awarding of the Nobel Prize with a toast at CERN”** (CERN-PHOTO-8410523 1984)

1984 wurden Carlo Rubbia und Simon van der Meer gemeinsam „für ihre entscheidenden Beiträge zu dem Großprojekt, das zur Entdeckung der Feldteilchen W und Z führte, den Vermittlern der schwachen Wechselwirkung“ mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.



**“Francois Englert and Peter Higgs at CERN in 2012”** Islam Mahmoud Sweity 2014, Kohlezeichnung (von einem Photo von Maximilian Brice/ CERN).

2013 wurden François Englert und Peter Higgs gemeinsam „für die theoretische Entdeckung eines Mechanismus, der zu unserem Verständnis der Entstehung der Masse von subatomaren Teilchen beiträgt, die erst kürzlich durch die Entdeckung des vorhergesagten Elementarteilchens durch die ATLAS und CMS Experimente am LHC des CERN bestätigt wurden“ mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

# Die Physiker und die Experimente

*Ana Maria Henriques Correia and João Martins Correia*

Die kleine Geschichte, die wir Ihnen erzählen, handelt vom CERN mit seinen gigantischen Beschleunigern und riesigen Teilchendetektoren und wie diese weltweit einzigartige Infrastruktur Ideen in anderen Wissenschaftsbereichen umsetzt und gleichzeitig anspruchsvolle Ingenieurleistungen hervorbringt, die auch im täglichen Leben angewendet werden. Wir beginnen mit der Präsentation der Experimente am CERN LHC, dem größten Teilchenbeschleuniger, der im Wesentlichen Teilchen mit sehr (sehr!) hoher Energie aufeinander prallen lässt, um sie zu zerbrechen, zu verschmelzen und dabei die ursprünglichen Bestandteile der Materie freizusetzen. Mit Hilfe von ausgeklügelten Maschinen und Detektoren stellt das CERN Prozesse nach, die sehr früh in der Geschichte des Universums abliefen:

**ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)** und **CMS (Compact Muon Solenoid)** sind die beiden größten der vier Hauptexperimente am LHC. Dies sind universell einsetzbare Experimente der Teilchenphysik, die das volle Entdeckungspotenzial des LHC ausschöpfen sollen. ATLAS hat den größten Volumendetektor, der jemals für einen Partikelcollider konstruiert wurde. Der Zylinder ist 46 m lang, hat einen Durchmesser von 25 m und ist in einer Höhle 100 m unter der Erde untergebracht. Er ist 7.000 Tonnen schwer, das ist etwa die Masse des Eiffelturms. Im Vergleich dazu ist der CMS-Detektor 'nur' 21 Meter lang, 15 Meter im Durchmesser, aber gebaut um eine riesige Magnetspule, die ein Feld von 4 Tesla erzeugt, etwa 100.000mal so groß wie das Magnetfeld der Erde. Das Feld wird durch ein Stahljoch begrenzt, das die Hauptmasse der 14.000 Tonnen des Detektors ausmacht. 14.000 Tonnen Masse, das ist doppelt so viel wie der Eiffelturm! Die Detektoren selbst sind vielschichtig aufgebaute Geräte, die entwickelt wurden, um einige der kleinsten, aber dennoch energiereichsten Partikel zu detektieren, die jemals auf der Erde erzeugt wurden. Sie bestehen aus verschiedenen Subsystemen, die konzentrisch in Schichten um den Kollisionspunkt gewickelt sind, um die Flugbahn, den Impuls und die Energie der Teilchen aufzuzeichnen. Dies erlaubt, sie individuell zu messen und zu identifizieren. Große Magnetsysteme biegen die Pfade der geladenen Teilchen, so dass ihre Impulse so genau wie möglich gemessen werden können.

Vor der Kollision werden die Teilchenstrahlen im 27 km langen LHC Ring beschleunigt und bei Geschwindigkeiten von etwa 99.999999 % des Lichtes in Paketen gespeichert. Von Zeit zu Zeit werden dann die Bahnen der Teilchen so gekrümmt, dass sie im Zentrum der ATLAS- und CMS-Detektoren kollidieren. Wenn dies geschieht, wird ein Teil der Kollisionsenergie in Masse umgewandelt. Bisher unbeobachtete, kurzlebige Partikel - die Hinweise darauf geben könnten, wie sich die Natur auf fundamentaler Ebene verhält - fliegen dann in alle Richtungen in den Detektor. Über eine Milliarde Teilcheninteraktionen finden am Detektor pro Sekunde statt. Diese Datenrate entspricht 20 Telefongesprächen, die von jedem Mensch auf der Erde gleichzeitig geführt werden. Nur eine von einer Million Kollisionen wird als potenziell interessant markiert und zur weiteren Untersuchung aufgezeichnet. ATLAS und CMS verkündeten am 4. Juli 2012 die Entdeckung des Higgs-Bosons bei einer Ruhemassenenergie von 126,5 GeV auf einem Konfidenzniveau von 4,9. CERN LHC-Experimente untersuchen jetzt die Eigenschaften und Charakteristika des Higgs-Bosons weiter, erforschen Bereiche höherer Energie sowie Ereignisse aus Protonen-Blei-Kollisionen. Die Higgs-Bosonen existieren für weniger als ein Tausendstel Milliardstel einer Milliardstel Sekunde, bevor sie in leichtere Teilchen zerfallen. Aber lassen sich exotische, langlebige Partikel finden? Diese Teilchen würden selten mit gewöhnlicher Materie interagieren und ihre Existenz wäre ein Zeichen für eine Physik jenseits des Standardmodells.

Unter den anderen LHC-Experimenten untersucht das **LHCb (Large Hadron Collider beauty)**, was in den ersten Sekunden nach dem Urknall geschah, als die Antimaterie verschwand und nur die uns bekannte Materie zurückblieb. Dadurch entstand die Welt in der wir leben. Für viele von uns unerwartet, ist unsere Welt und unser tägliches Dasein in der Tat ein gewaltiges kosmisches Mysterium! Wenn Antimaterie und Materie in Kontakt kommen, ist das Ergebnis dramatisch. Im Handumdrehen verschwinden sie beide, zerstören sich gegenseitig und hinterlassen einen Energieblitz. Diese explosive Beziehung wirft faszinierende Fragen auf.



**“ATLAS Remeshed-Higgs Boson”** Davide Angheloddu 2016, Glasfasern und Acrylfasern 1,5 m lang.

3D Darstellung eines Higgs Bosons aus einer Computersimulation. Freundlicherweise zur Verfügung gestellt vom ATLAS Experiment. Die Higgs-Bosonen zeigen sich in dem Zwei-Myonen-Zwei-Elektronen-Ereignis, beide sind in Blau dargestellt.

Die Skulptur wird in 3 Schritten hergestellt:

- 1) Ein Netzalgorithmus der Computergraphik berechnet aus den Simulationsdaten ein virtuelles Skulpturmodell.
- 2) Durch Lasersintern wird eine hochpräzise Nylonform erstellt.
- 3) Mit Hilfe des herkömmlichen Wachsaußschmelzverfahrens kann die endgültige Skulptur in einem wählbaren Material ausgeführt werden.

Präsentiert im Juli 2016 in der Ausstellung „Extrem. Auf der Suche nach Teilchen“ (“Extreme. In search of particles”), entworfen und produziert vom Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo da Vinci in Mailand, in Zusammenarbeit mit CERN und INFN.

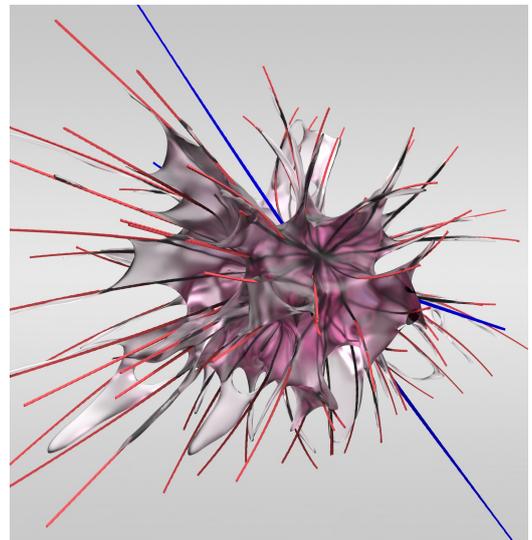
Die Skulptur und das Video, das den Prozess der Gitterberechnung zeigt, wurde in der Grunwald Art Gallery, Indiana University, Bloomington, im November 2016 präsentiert.

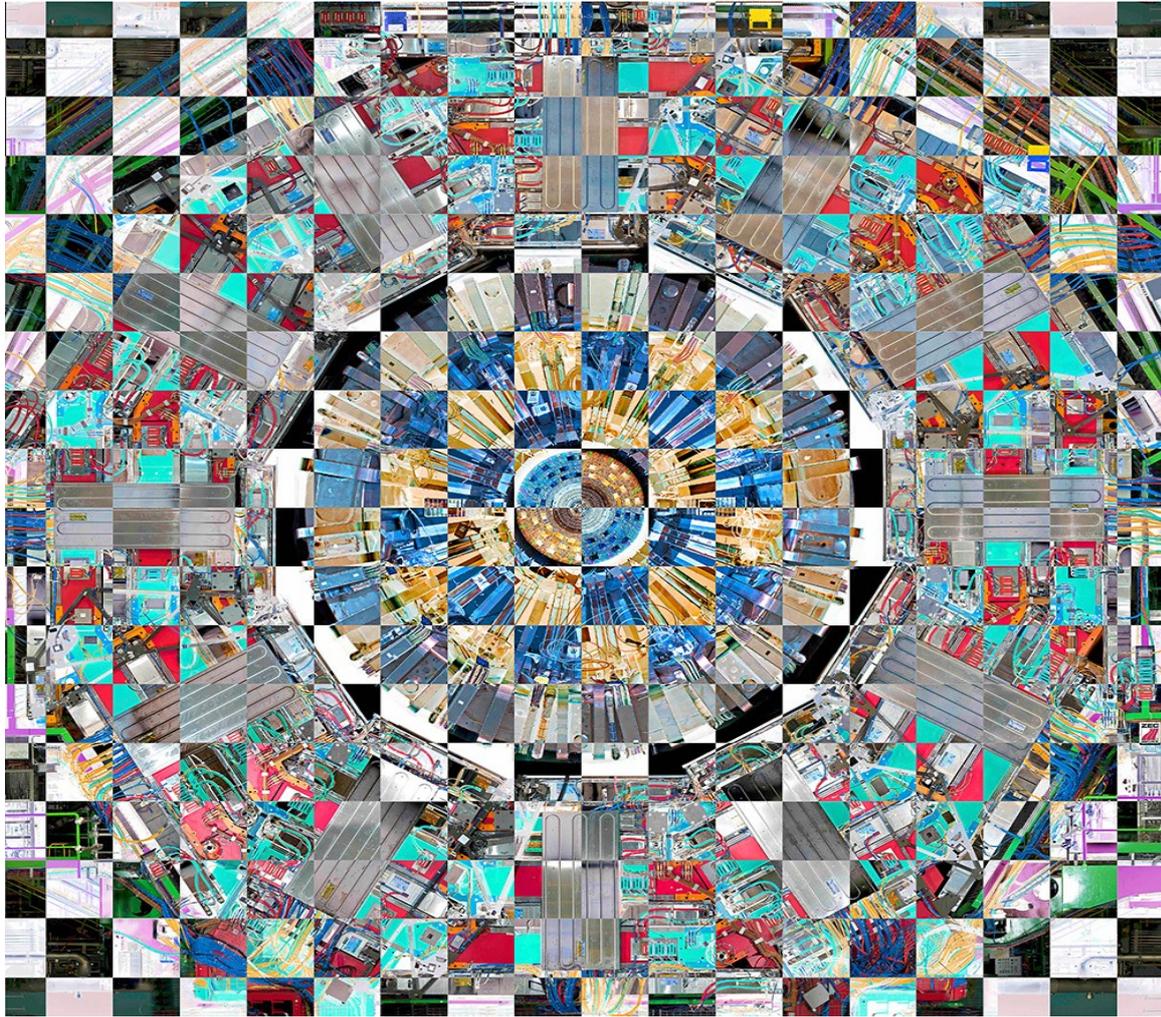
Weitere Informationen bei

[www.davideangheleddu.weebly.com](http://www.davideangheleddu.weebly.com)

**“ATLAS Remeshed-Higgs Boson”**

Davide Angheloddu 2015, Photodruck





**“Matter-Anti-Matter, symmetry4”** Michael Hoch, 2012 Fotocollage auf Al Dibond 100 cm x 100 cm, basierend auf dem CMS (Compact Muon Solenoid) Detektor.

CMS ist einer der LHC Allzweckteilchendetektoren und hat die Größe eines sechsgeschossigen Bürogebäudes. Er enthält Sensoren, die in einigen Fällen die Breite eines menschlichen Haars haben.

Auf der EPS-HEP 2017-Konferenz in Venedig erhielt Michael Hoch, Gründer von art@CMS, den Outreach-Preis 2017 der Abteilung für Hochenergie und Teilchenphysik der europäischen physikalischen Gesellschaft für „Initiativen, die die konzeptionelle und physische Schönheit der Hochenergiephysik und die inspirierenden Qualitäten hervorheben, die in Wissenschaft und Kunst gemeinsam sind“. Das Komitee würdigte „Michael Hochs außergewöhnliches Talent, wissenschaftliche Gedanken in das Bewusstsein der Öffentlichkeit zu bringen...“.

art@CMS ist ein Bildungs- und Engagementprogramm des CMS-Experiments am Large Hadron Collider (LHC) des CERN. Es ist eine Zusammenarbeit zwischen der wissenschaftlichen Gemeinschaft der Hochenergiephysik, Künstlern und Kunstgemeinschaften, Museen, Kunstlehrern und Wissenschaftslehrern. Das Projekt begann mit dem Versuch, Brücken zwischen Kunst und Wissenschaft zu schlagen und gleichzeitig als Sprachrohr die Arbeit von CMS und CERN einem breiteren Publikum zu vermitteln.

Es besteht aus zwei sich ergänzenden Modulen:

art@CMS exhibition um den Dialog zwischen der HEP-Wissenschaftsgemeinschaft und den Kunstgemeinschaften zu fördern. Seine Aufgabe ist, Kunstwerke von kooperierenden Künstlern erschaffen zu lassen, sie auszustellen, sowie Gruppen- und Einzelausstellungen weltweit zu ermöglichen.

SciArt Workshops (Science&Art@School): ist ein interdisziplinärer Workshop, der Schüler, und Studenten der Kunst und der Wissenschaften in die Welt der Teilchenphysik und der Grundlagenforschung durch künstlerische Recherche und einen interdisziplinären Ansatz einführt.

Als Ideenschmiede baut art@CMS auf einer Plattform des Lernens und des Teilens auf.

<https://artcms.web.cern.ch> ~

Zum Beispiel, wenn Materie und Antimaterie in gleichen Mengen während des Urknalls entstanden sind, warum sind wir selbst lebendig in einem Universum, das nur aus Materie besteht? Könnte ein unbekannter Mechanismus eingegriffen haben, um zu verhindern, dass Materie und Antimaterie sich gegenseitig völlig vernichten? LHCb wurde eingerichtet, um die geringfügigen Asymmetrien zwischen Materie und Antimaterie zu untersuchen. Dazu werden Partikel verwendet, die als Beauty-Quarks bekannt sind. Obwohl heute nicht mehr im Universum vorhanden, waren Beauty-Quarks nach dem Urknall weit verbreitet und werden zu Milliarden innerhalb des LHCb zusammen mit ihren Gegenstücken aus Antimaterie, den Anti-Beauty-Quarks, erzeugt.

Indem LHCb den leichten Unterschied im Zerfall zwischen dem Beauty-Quark und seinem Antipartikel mit einer beispiellosen Präzision untersucht, wirft es Licht auf eines der grundlegendsten Mysterien des Universums. LHCb berichtete vor kurzem von der Beobachtung von  $\Xi_{cc}^{++}$  ( $\Xi_{cc}^{++}$ ), einem neuen Teilchen, das aus zwei Charme-Quarks und einem Up-Quark besteht. Die Masse des neu identifizierten Teilchens, einem doppelt schweren Baryon, beträgt etwa 3621 MeV und ist damit fast viermal so schwer wie das Proton.

Auf der Suche nach der Entstehung des Quark-Gluonen-Plasmas untersucht **ALICE (A Large Ion Collider Experiment)**, ein weiteres LHC-Experiment, das Vorhandensein und die Eigenschaften der Fusion von Protonen und Neutronen bezüglich Temperatur und Dichte. Beide lösen unter extremen Bedingungen die Bindung ihrer Quarks und Gluonen auf, was zur Bildung eines Quark-Gluonen Plasmas führt. Dessen Entstehung zu verstehen gehört zu den Zielen von ALICE. Gewöhnliche Materie besteht aus Atomen. Jedes Atom besteht aus einem Kern, der von einer Elektronenwolke umgeben ist. Kerne wiederum sind aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt, diese wiederum aus Quarks. Die Kraft, die die Quarks verbindet, wird als starke Wechselwirkung bezeichnet. Vermittelt wird diese Kraft durch den Austausch von Teilchen, die als Gluonen bezeichnet werden. Es wurde noch nie ein Quark (oder Gluon) isoliert beobachtet: Die Quarks wie die Gluonen scheinen fest miteinander verbunden und in Kompositpartikeln (wie Protonen und Neutronen) eingeschlossen zu sein. Dieses wird als Gefangenschaft (confinement) bezeichnet. Obwohl Vieles der Physik der starken Wechselwirkung gut verstanden ist, bleiben zwei grundlegende Fragen ungelöst: der Ursprung der Gefangenschaft und der Mechanismus der Massenerzeugung. Protonen und Neutronen bestehen bekanntlich aus drei Quarks, aber durch Addition der Massen der drei Quarks erhält man nur ca. 1 % der Protonen- oder Neutronenmasse. Woher kommen die restlichen 99 %?

Die aktuelle Theorie der starken Wechselwirkung, Quantenchromodynamik genannt, sagt voraus, dass bei sehr hohen Temperaturen und sehr hohen Dichten Quarks und Gluonen nicht mehr in Verbundpartikeln eingeschlossen sein sollten. Stattdessen sollten sie frei in einem neuen Zustand der Materie, bekannt als Quark-Gluon-Plasma, existieren. Ein solcher Übergang sollte auftreten, wenn die Temperatur einen kritischen Wert überschreitet, der geschätzt 100.000 mal heißer ist als der Kern der Sonne! Solche Temperaturen gab es seit der Geburt des Universums nicht mehr in der Natur. Bringt man mittels des LHC schwere Kerne (beispielsweise Kerne von Bleiatomen) auf eine Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit und lässt diese frontal aufeinander prallen, sollten wir ein solches Plasma erzeugen können, wenn auch nur in einem sehr kleinen Volumen, etwa der Größe eines Atomkerns. Nur für einen flüchtigen kurzen Zeitraum erhalten wir einen Tropfen solcher Urmaterie und können beobachten, wie sie sich durch Expansion und Kühlung in gewöhnliche Materie zurückverwandelt. Dann sollte ALICE uns ermöglichen, tief in die Physik der Gefangenschaft einzudringen, die Erzeugung von Masse in starken Wechselwirkungen zu untersuchen und einen Blick auf das Verhalten der Materie unmittelbar nach dem Urknall zu werfen.

Wenn die Protonen am LHC frontal aufeinandertreffen, sorgen die Kollisionen zusätzlich für ein Mikrolaboratorium, in dem man viele Phänomene untersuchen kann, einschließlich der Protonen selbst. Das **TOTEM Experiment (TOTal cross section, Elastic scattering and diffraction dissociation Measurement** – Messung des totalen Querschnitts, der elastischen Streuung und der Beugungsdissoziation) wurde speziell entwickelt um eine Physik zu untersuchen, die für andere LHC-Experimente nur schwer zugänglich ist. Durch präzise Messungen an Partikeln, die aus Kollisionen in unmittelbarer Nähe der Richtung der LHC-Strahlen -

der Vorwärtsrichtung – entstehen, misst TOTEM die Gesamtwahrscheinlichkeit, auch 'Querschnitt' genannt, für die Proton-Proton-Wechselwirkungen. Dies ist in gewisser Weise die Gesamtgröße, die ein Proton als 'Target' darstellt. Das Experiment untersucht auch Streuphänomene analog zur Lichtbeugung.

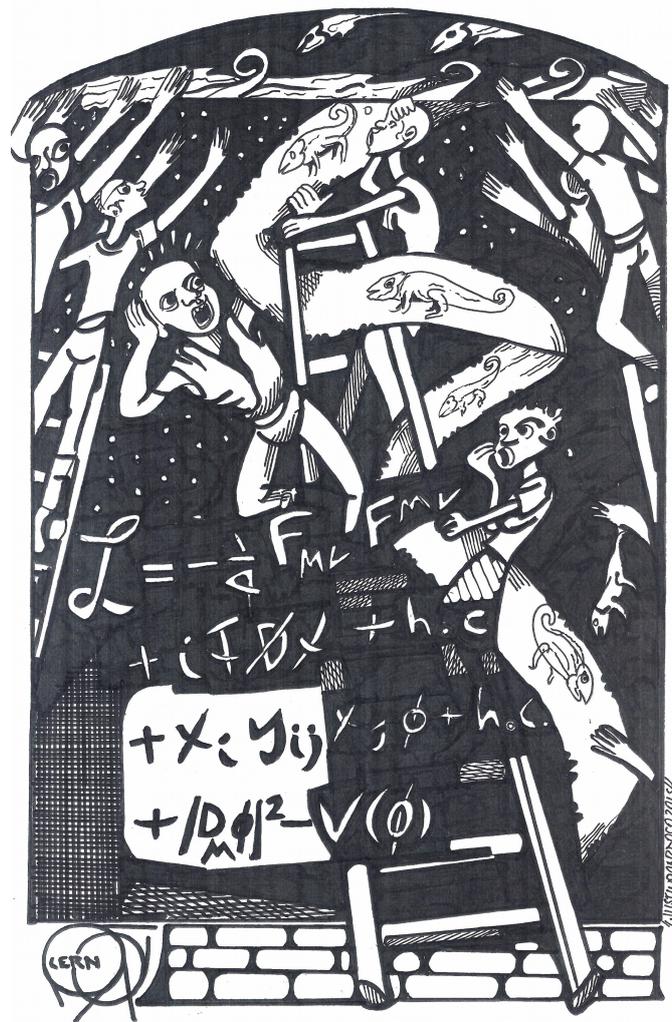
Rund zwanzig weitere unterschiedliche Versuchsanlagen und Projekte profitieren von beschleunigten Protonen, der Technologiekompetenz und der Innovationskraft des CERN. Diese greifen zum Beispiel auf die langjährige Tradition des CERN in der Neutrinophysik zurück. CERN beherbergt jetzt Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen für Detektoren zukünftiger Neutrino-Experimente auf der ganzen Welt.

Das CERN forscht seit vielen Jahren auch an der Antimaterie im Antiprotonenverzögerer (**Antiproton Decelerator AD**). Vor kurzem wurde ein **Extra Low Energy Antiproton (ELENA)** Ring eingeweiht, der Antiprotonen, die von der AD-Einrichtung (5,3 MeV) geliefert werden, auf 100 KeV abbremst. Die Physiker werden in der Lage sein, nicht nur Antimaterieatome zu erzeugen und einzufangen, sondern auch die fundamentalen Eigenschaften und Wechselwirkungen von Anti-Wasserstoff, antiprotonischem Helium und Anti-Wasserstoff-Ionen in freiem oder in gebundenem Zustand genauer zu untersuchen. Sie werden dabei auch erfahren, ob eine Welt, die vollständig aus Antimaterie gemacht ist, zu 100 % gleichwertig wäre, also wie ein Spiegelbild unserer eigenen Welt.

In der Nordhalle des SPS-Beschleunigers sucht das **NA64** Experiment nach dem sichtbaren und unsichtbaren Zerfall dunkler Photonen, einem hypothetischen Elementarteilchen, das vorgeschlagen wurde als Träger der elektromagnetischen Kraft für dunkle Materie. Diese Untersuchungen werden unter Verwendung von Elektronenstrahlen und dem **CERN Axion Solar-Teleskop CAST** durchgeführt.

Die Forscher versuchen, Axione oder solare Chamäleons nachzuweisen die eventuell aus dem 16 Millionen Grad heißen Plasma im Inneren der Sonne erreichen. Es sind theoretische Teilchen, die, wenn sie existieren, für die dunkle Materie bzw. dunkle Energie verantwortlich sein könnten, die über 95 % des gesamten Universums ausmachen.

Ein ganz anderer Forschungszweig, kleiner, aber trotzdem wichtig, wird am **ISOLDE** Isotopenmassenseparator betrieben. Etwa 50 Experimente werden hier pro Jahr durchgeführt. Dies ist eine weltweit einzigartige Anlage, die online eine Vielzahl radioaktiver Kerne produziert. Hierfür werden energiereiche Protonen aus dem CERN Booster Beschleuniger auf verschiedene fixierte Zielmaterialien geschossen. Damit spielt ISOLDE quasi die Rolle von Sternen und liefert exotische radioaktive Kerne für Forscher, die sich mit Kern- und Atomphysik, Festkörperphysik,



**"Chameleon a hypothetical scalar particle"** Justino António Cardoso 2015, Tusche

Chamäleon Teilchen wurden 2003 von Justin Khoury und Amanda Weltman vorgeschlagen.

Materialwissenschaften, Werkstoffkunde und Biowissenschaften beschäftigen. ISOLDE wurde kürzlich energetisch aufgewertet, indem es die radioaktiven Kerne nachbeschleunigt und damit die Reaktionsbedingungen ihrer Synthese in den Sternen anregt und rekonstruiert. ISOLDE, obwohl eine der ältesten Einrichtungen des CERN, bleibt damit Spitzenreiter in der Entwicklung grundlegender Kernforschung sowie der Anwendung einzigartiger radioaktiver Kerntechniken. Speziell zur Optimierung der Krebsdiagnostik und -therapie werden die Fähigkeiten von ISOLDE mit dem laufenden Bau der CERN-MEDICIS-Anlage (**Medical Isotopes Collected from ISOLDE**) erweitert. Dies geschieht im Rahmen des Konzepts der **MEDICIS-PROMED**-Zusammenarbeit (**MEDICIS-produced radioisotope beams for medicine**) die eine neue Generation von unternehmerisch denkenden Wissenschaftlern ausbildet, die verschiedene Disziplinen überbrücken können, quer über Institutionen der Grundlagenforschung, Privatunternehmen und Krankenhäuser hinweg. Dies wird zur schnellen Anwendung neuartiger Geräte in Unternehmen und von Radiopharmaka zur Krebsbehandlung in Krankenhäusern führen. Bei der Umsetzung kommen radioaktive Ionenstrahlen zum Einsatz, die bisher noch nie für die Herstellung von speziellen medizinischen Chargen für Radiopharmaka verwendet wurden. 2017 hat die Anlage zum ersten Mal Radioisotope für die medizinische Forschung produziert.

Das CERN **CLOUD**-Experiment (**Cosmics Leaving Outdoor Droplets**) untersucht den Einfluss 'kosmischer Strahlen' auf die Wolkenbedeckung. 'Kosmische Strahlen' bestehen im Wesentlichen aus hochenergetischen Protonen, Elektronen und ionisierten Atomen, also geladenen Teilchen, mit denen die Erdatmosphäre vom Weltraum aus bombardiert wird. Sie beeinflussen die Wolkenbedeckung entweder durch die Bildung neuer Aerosole (kleine Partikel, die in der Luft schweben und zu Keimen für Wolkentröpfchen heranwachsen können) oder durch direkte Einwirkung auf die Wolken selbst. Wolken haben viel Einfluss auf die Energiebilanz der Erde, Veränderungen von nur wenigen Prozent haben einen großen Effekt. Trotz ihrer Bedeutung für das Klima ist die Aerosolbildung noch immer kaum verstanden. Messungen der zugrundeliegenden Mikrophysik unter kontrollierten Laborbedingungen sind wichtig für ein besseres Verständnis der atmosphärischen Aerosole und sind der Schlüssel zum Verständnis der möglichen Verbindung zwischen den 'kosmischen Strahlen' und Wolken. Das Protonen-Synchrotron stellt eine künstliche Quelle der 'kosmischen Strahlung' zur Verfügung und simuliert die natürlichen Bedingungen zwischen dem Boden und der Stratosphäre. Ein Strahl von Teilchen wird durch die Nebelkammer geleitet und deren Auswirkungen auf die Aerosolbildung oder auf Flüssigkeits- und Eiswolken in der Kammer werden aufgezeichnet und analysiert.

Ein weiteres Zeichen der globalen Nutzung und Nützlichkeit des CERN ist das Computing Grid des LHC. Im Vergleich mit der Zeit der ersten Kollisionen werden heute Daten mit einer beispiellosen Geschwindigkeit produziert. Es sind Dutzende von Petabyte pro Jahr ( $1\text{pB} = 1.000.000.000.000.000\text{ B}$  das sind etwa zweitausend 500 GB PC-Festplatten). Dies stellte eine große Herausforderung dar, die durch den Einsatz einer Grid-basierten Computernetzwerk-Infrastruktur gelöst wurde, die bis 2012 140 Rechenzentren in 35 Ländern miteinander verband. Das daraus resultierende **Worldwide LHC Computing Grid WLCG**, ist heute das weltweit größte verteilte Computing Grid und umfasst über 170 Rechenzentren in einem weltweiten Netzwerk in 42 Ländern. Die Hauptaufgabe des WLCG-Projekts besteht darin, global Rechnerkapazitäten bereitzustellen, um die vielen Petabyte an Daten, die vom LHC erzeugt werden, zu speichern, zu verteilen und zu analysieren. Im Jahr 2017 wurden 12,3 Petabyte in nur einem Monat gespeichert. Die Aktivitäten des Netzes erstrecken sich darüber hinaus auf viele Projekte im öffentlichen Bereich, darunter Katastrophenschutz, Geowissenschaften, Computational Chemistry und auch Biowissenschaften durch die Bereitstellung von Rechenleistung für die Datenverwaltung und -analyse medizinischer Daten.

Die einzige Möglichkeit, solche herausfordernde Projekte zu realisieren, mit den notwendigen intellektuellen und finanziellen Ressourcen zu versorgen und den wissenschaftlichen Output zu maximieren, sind große internationale Kooperationen mit vielen tausend Mitarbeitern. Das Kennzeichen einer solchen Vorgehensweise ist der universelle Charakter der Experimente am LHC, der Teilnehmer aus über 100 Nationen aller Kontinente, einschließlich Afrika, angezogen hat. Umfangreiche Projektmittel stammen von Förderinstitutionen in beteiligten Ländern. Bei den größten Experimenten, ATLAS und CMS, kommen Beiträge

auch vom CERN und den Ressourcen einzelner Universitäten.

Um das alles am Laufen zu halten, statten ATLAS und CMS ihre Führungskräfte mit einer Organisationsstruktur aus, die es Teams ermöglicht, sich selbst zu verwalten und Mitglieder direkt in Entscheidungsprozesse einzubinden.

Wissenschaftler arbeiten in der Regel in kleinen Gruppen und wählen die für sie interessanten Forschungsgebiete und Daten aus. Alle Ergebnisse der Zusammenarbeit werden von allen Mitgliedern gemeinsam genutzt und vor der Veröffentlichung einer strengen Revision und Sachverhaltsprüfung unterzogen. Der Erfolg der Zusammenarbeit ist daher an das individuelle Engagement und die Aussicht auf spannende neue Ergebnisse gebunden. Möglich wird dies nur durch eine lückenlose und kohärente Zusammenarbeit von Wissenschaftlern, unzähligen Ingenieuren, Technikern und Verwaltungsmitarbeitern.

Obwohl eine einzigartige Welt des Wissens, der Vielfalt und der Komplementarität, die in hohem Maße zu Wissenschaft, Bildung und Verbreitung des neuesten Standes von Wissenschaft und Technologie beiträgt, blickt CERN bereits in die Zukunft. Neben der kontinuierlichen Suche nach Möglichkeiten, die vorhandenen Forschungseinrichtungen optimal zu nutzen, ist das CERN auch führend bei der Erforschung strategischer Konzepte für zukünftige Hochenergiephysikanlagen. Das Laboratorium untersucht durch die 'Studiengruppe Physik jenseits von Ringbeschleunigern' (Physics Beyond Colliders Study Group) auch die zukünftigen Möglichkeiten, sein Forschungsportfolio zu diversifizieren. All dies ist notwendig, da das Standardmodell der Teilchenphysik mehrere Beobachtungen nicht erklären kann, wie beispielsweise: Hinweise auf die dunkle Materie, die Vorherrschaft der Materie über die Antimaterie und die Neutrinomassen.

Mit den Worten von CERN-Generaldirektorin Fabiola Gianotti, im Januar 2017: *„Wir wissen, dass es eine neue Physik gibt, wir wissen nicht, wo sie sich in Bezug auf die Energieskala und/oder Kopplungen befindet, aber wir müssen in unserem Forschungsansatz so breit wie möglich sein, denn wissenschaftliche Vielfalt ist ein MUSS. Durch die Nutzung der einzigartigen Fähigkeiten des Beschleuniger-Komplexes und der Infrastruktur des CERN ergänzen wir die anderen Bemühungen in der Welt und optimieren die Ressourcen des Feldes weltweit.“*

Um den physikalischen Rahmen für neue, beispiellose Experimente zu entwickeln, und dabei die erforderlichen Beschleunigungsparameter einzuhalten, sind Kreativität und Innovationskraft gefragt. Die Planung und der Bau eines Großbeschleunigers erfordert einen immensen, koordinierten Aufwand. Man rechnet mit einer Vorlaufzeit von etwa zwanzig Jahren bis zum Start der neuen Maschine. Das Ziel ist die nahtlose Fortführung des weltweiten Teilchenphysikprogramms nach der LHC-Ära. Der **LHC** mit seinem **High Luminosity-upgrade (HL-LHC)** wird bis 2035 das weltweit wichtigste Instrument bleiben, um Forschung bis zur derzeitig erreichbaren Energieobergrenze zu betreiben. Dies definiert das Zeitfenster, um eine Infrastruktur für die Hochenergiephysik der Post-LHC-Ära vorzubereiten.



"Accelerators and detectors to understand the Universe" Justino António Cardoso 2015, Tusche

# CERN und Informationstechnologie

*Frédéric Hemmer*

## **Ein Blick in die Vergangenheit**

Die Geschichte der Informatik am CERN reicht fast bis zu den Anfängen der Organisation zurück. Der Vorschlag, einen elektronischen Computer zu kaufen, wurde bereits auf der dritten Sitzung des CERN Scientific Policy Committee im November 1955 diskutiert. Den Vorsitz hatte Werner Heisenberg, einer der Pioniere der Quantenmechanik. Der erste Computer, der am CERN installiert wurde, war der Ferranti Mercury, für dessen Bau die Ferranti Ingenieure zwei Jahre brauchten. Er wurde im Sommer 1958 installiert und füllte den gesamten Computerraum. Er hatte einen Taktzyklus von 60 Mikrosekunden. Heutige CPU-Kerne sind hunderttausendmal schneller!

Der nächste bedeutsame Schritt in der Computergeschichte des CERN war im Jahr 1961 die Anschaffung des IBM 709. Dies war immer noch eine Vakuumröhrenmaschine, aber der erste Computer, der mit FORTRAN als Programmiersprache ausgestattet war. Der 709 wurde später zu seiner Transistorversion aufgerüstet, dem 7090. Im selben Zeitraum kamen Minicomputer hinzu, also Rechner, die klein genug waren, um vor Ort installiert und direkt mit der Ausrüstung in den Experimentierhallen verbunden zu werden. Die Datenaufzeichnung erfolgte auf Magnetbändern, die zur Analyse zum Computerzentrum gebracht wurden. Ende der 1960er Jahre waren über 50 dieser Minis auf dem Gelände verteilt.

Bemerkenswert ist, dass schon damals versucht wurde, die zentralen Computer mit den Experimentierzonen durch hausgemachte Netzwerksysteme zu verbinden. Was man liebevoll als Fahrrad-Online-Verfahren bezeichnete, um die Bänder zum Rechenzentrum zu transportieren und dort vorrangig verarbeiten zu lassen, sollte ersetzt werden um eine schnellere Rückmeldung über die Experimente zu erhalten.

Im gleichen Zeitraum wurden auch die ersten **CDC**-Maschinen (**C**ontrol **D**ata **C**orporation) installiert, deren Einführung vor allem wegen des Fehlens eines stabilen Betriebssystems, viel Zeit in Anspruch nahm. Der Anfang der 1970er Jahre war gekennzeichnet durch die Installation des ersten Timesharing-Mainframes, des CDC 7600. In den nächsten 15 Jahren wurde der 7600 zu verschiedenen Cybermodellen aufgerüstet, während IBM-Systeme (370/168,3081, 3050, ES9000 etc.) gekauft oder gemietet wurden, um die für die Experimente benötigte Rechenkapazität zu ergänzen. Ein XMP-Supercomputer von Cray löste 1988 schließlich die CDC-Maschinen ab. Nachdem ab 1982 die **D**igital **E**quipment **C**orporation (**DEC**) etliche 100 **PDPs** (**P**rogrammed **D**ata **P**rocessors) und **VAXen** (**V**irtual **A**dress **e**Xtension) auf dem Gelände installiert hatte, hielt die Firma Einzug in das CERN-Rechenzentrum mit zentralen VAX-basierten Diensten.

Anfang der 1990er Jahre erschienen RISC Workstations von Apollo, DEC, HP, SGI, SUN und anderen. Diese lösten einige Jahre später die Großrechner ab, da sie ein erheblich besseres Preis-Leistungs-Verhältnis anboten, nicht nur bezüglich der Prozessorgeschwindigkeit, sondern was sogar noch wichtiger ist, bezüglich des Plattenspeichers. Langsam aber sicher wuchs die Zahl der Computer im CERN-Rechenzentrum von ein paar Zehn in den 1970ern Jahren auf mehrere Hundert Ende der 1990er Jahre.

In der gleichen Zeit, wurden die Verarbeitungsgeschwindigkeiten der Intel-basierten Personal Computer schnell genug (200 MHz im Jahr 1997), um sie für die physikalische Datenverarbeitung zu berücksichtigen. Schließlich übernahmen allgemein erhältliche Rechner das gesamte Rechenzentrum, das nun aus über 14.000 Servern, 200.000 CPU-Kernen und 200 PB auf Band besteht.

*In Richtung Gegenwart*

## **Rechnernetze**

Bereits in den 1960er Jahren begann das CERN mit der Entwicklung von Computer-Kommunikationssystemen und entwickelte mehrere Systeme (FOCUS, OMNET, CERNET), bevor es den Ethernet Industriestandard übernahm, der heute alle Büros, Beschleuniger und Detektoren unter Einsatz des TCP/IP-Protokolls verbindet.

Im Laufe der Jahre hat sich in Sachen Vernetzung eine Wende vollzogen. Anfang der 1980er Jahre gab es nur Verbindungen von etlichen Kbit/s und sie verbanden nur eine Handvoll Anlagen miteinander. In den 1990er Jahren standen Kapazitäten von mehreren 100 Mbit/s zur Verfügung, und das CERN wurde sogar zum größten Internetaustauschpunkt in Europa, der 80 % der europäischen Internetkapazität belegte. Heutzutage sind die Institute der **Hochenergiephysik (HEP)** typischerweise mit Gigabit pro Sekunde an das CERN angeschlossen, einige ihrer Anlagen sogar mit mehreren 100 Gbit/s.

Die Kapazität des Computernetzwerks ist für die HEP-Gemeinschaft von entscheidender Bedeutung, um mit dem CERN oder vom CERN aus zu arbeiten, ohne dass eine physische Präsenz notwendig ist. Die LHC-Daten werden weltweit rund um die Uhr 24x7 in anderen Rechenzentren repliziert, so dass immer eine aktuelle Kopie zur Verfügung steht.

### **Das Web**

Natürlich ist es unmöglich, über Computer am CERN zu sprechen, ohne das Web zu erwähnen. Für Tausende von HEP-Wissenschaftler, die über die gesamte Welt verteilt sind, ist es ein tägliches Werkzeug. Kombiniert mit der Entstehung neuer Technologien wie z. B. schnellem globalem Internet, dem Aufkommen von Grafik-Workstations und später von Macs & PCs, die für jedermann zugänglich sind, wurde Tim Berners-Lees Vision vom World Wide Web zu einer globalen Revolution.

### **Verteiltes Rechnen**

Das **Worldwide LHC Computing Grid (WLCG)** ist das größte wissenschaftliche Projekt, das sich der gemeinsamen Nutzung von Computerressourcen weltweit widmet. Das Projekt begann am Anfang dieses Jahrhunderts mit ersten Ideen und Umsetzungen in Argonne und an der University of California Santa Cruz, mit Beiträgen der Europäischen Kommission und von HEP-Instituten aus aller Welt. Es wuchs dann zu einem robusten und widerstandsfähigen verteilten System, das auf mehr als 170 Standorte verteilt ist, wodurch eine halbe Million Rechnerkerne und 500 Petabytes an Daten für die LHC-Analyse zur Verfügung stehen, die alle mit Hochgeschwindigkeitsverbindungen von vielen Gbit/s verbunden sind.

Das WLCG verarbeitet nun routinemäßig eine halbe Million Rechenjobs gleichzeitig: eine deutliche Steigerung, verglichen mit dem einzigen zu dem der Ferranti vor fast 60 Jahren fähig war.

### **Datenerhaltung**

Die Herausforderung der letzten 50 Jahre bestand darin, die Daten von Beschleunigerexperimenten überhaupt verarbeiten zu können. Aber was passiert, wenn die Experimente enden und die Detektoren demontiert werden? Bleiben die Daten für immer auf Band? Können die FORTRAN-Programme von 1960 noch diese Daten verstehen und verarbeiten? Werden die Anwender immer noch verstehen, was das Programm gemacht hat und welche Annahmen der Autor getroffen hat? Hier setzt die Datenerhaltung an, und es bleibt für HEP eine ungelöste Herausforderung. Meiner Meinung nach ist es eigentlich ein viel größeres und hoch unterschätztes Problem, das weit über den Bereich der HEP hinausgeht: Sind Sie sicher, dass Sie immer noch die Filme ihrer Kinder, die vor zehn Jahren mit einer Digitalkamera aufgenommen wurden, ansehen können? Können Sie die Medien noch lesen, auf denen sie gespeichert sind? Kann man noch Word-Dokumente lesen, die Mitte der 1990er Jahre geschrieben wurden? Kann man sie überhaupt noch finden?

### **Freier Zugang (OpenAccess) (Publikationen, Daten und Code)**

CERN hat sich dem freien Zugang zu Wissen verpflichtet, da er Werten entspricht, die seit mehr als 60 Jahren in der Konvention der Organisation verankert sind. Dieser wird auch immer wichtiger für die Mitgliedsstaaten des CERN, der Europäischen Kommission und anderen institutionellen Partnern weltweit. Seit mehr als zwanzig Jahren werden die meisten physikalischen Veröffentlichungen – in der Form von CERN-Preprints – sofort und öffentlich zugänglich online zur Verfügung gestellt, noch vor der Veröffentlichung in Fachzeitschriften. Dies wird allgemein als Green Open Access bezeichnet.

Gold Open Access Zeitschriften stellen den Lesern ihrer Zeitschriften Peer-Review-Artikel kostenlos

zur Verfügung. Solche Zeitschriften werden in der Regel durch eine Veröffentlichungsgebühr für jeden Artikel finanziert, die sogenannte **Article Processing Charge (APC)**. Bis 2013 übernahm der wissenschaftliche Informationsdienst des CERN diese Gebühren zentral. Durch Partnerschaften mit den meisten großen Verlagen werden seit dem Jahr 2010 Artikel über experimentelle Ergebnisse der LHC Kooperationen systematisch als Golden Open Access publiziert. Von CERN Autoren wird erwartet, alle Ergebnisse in Golden Open Access Journalen zu veröffentlichen.

Im Hinblick auf einen offenen Zugang werden mehrere CERN-Technologien entwickelt. **Invenio** ist ein Open Source Bibliotheksverwaltungspaket, das aus internationalen Beiträgen der beteiligten Institute entstand. Invenio wird typischerweise für digitale Bibliotheken verwendet. Das CERN, das durch die europäische Kommission kofinanziert wird, hat auch schon seit langem in ein freies Open-Data Repository investiert, das auch über die HEP Gemeinde hinaus genutzt wird: **Zenodo** (abgeleitet von „Zenodotos von Epheesos“ dem ersten Leiter der großen Bibliothek von Alexandria).

### **Zusammenarbeit mit der Industrie: CERN openlab**

Das **CERN openLab** ist eine einzigartige öffentlich-private Partnerschaft, die Entwicklungen hochmoderner Lösungen für die weltweite LHC Gemeinde und allgemein die wissenschaftliche Forschung beschleunigt. Durch das CERN OpenLab arbeitet CERN mit führenden **IKT** Firmen (Informations- und Kommunikationstechnik) und Forschungsinstituten zusammen.

CERN openLab wurde 2001 gegründet und kommt 2018 in die sechste seiner dreijährigen Phasen. Sie befasst sich, wie die fünfte Phase, mit ehrgeizigen Herausforderungen der IT-Infrastruktur. Sie deckt wichtige Anforderungen ab, wie beispielsweise Datenerfassung, Rechnerplattformen, Datenspeicherarchitekturen, Bereitstellung und Management von Computernetzwerken und -kommunikation sowie Datenanalyse.

Innerhalb dieses Rahmens bietet das CERN Zugang zu seiner komplexen IT-Infrastruktur und seinen ingenieurtechnischen Erfahrungen, der zum Teil sogar auf kooperierende Institute weltweit ausgedehnt wird. Die Durchführung von Tests in dem anspruchsvollen Umfeld des CERN liefert den Partnern der IKT Branchen wertvolles Feedback zu ihren Produkten. Dem CERN erlaubt es dafür, die Vorteile neuer Technologien in den frühen Phasen ihrer Entwicklung für eine mögliche spätere Nutzung zu beurteilen. Dieser Rahmen bietet auch eine neutrale Grundlage zur Durchführung von fortgeschrittener Forschung und Entwicklung mit mehr als einem Unternehmen.

### **Ausbildung**

Die **CERN School of Computing (CSC)** ist eine Sommeruniversität, die jedes Jahr zwei Wochen lang eine Reihe von Vorlesungen mit praktischen Übungen anbietet. Bei einem erfolgreichen Abschluss des CSC Examens erhält man ein offizielles CSC-Diplom (oft auch **ECTS-Credits (European Credits Transfer System)**). Die Schule steht Doktoranden und Wissenschaftlern offen, die am CERN oder externen Instituten arbeiten und über ein paar Jahre Erfahrung in Elementarteilchenphysik, Informatik oder verwandten Gebieten verfügen.

Die Teilnehmer kommen aus Laboratorien und Universitäten aus aller Welt, sogar außerhalb der Teilchenphysik. Sie werden von dem generell hohen Niveau der Themen angezogen, die hier gelehrt werden. Es nehmen etwa 60 bis 80 Studenten aus 15 bis 30 Nationen teil. In den letzten 10 Jahren haben Menschen aus 60 Nationen teilgenommen. Etwa 80 % der Studierenden kommen aus europäischen Ländern.

### **Ein Blick in die Zukunft**

Die WLCG Kollaboration blickt weiter in die Zukunft und konzentriert sich bereits auf die beiden Phasen der für den LHC geplanten Upgrades. Die erste Phase (2019 - 2020) dient der Aufrüstung der ALICE und LHCb Experimente und der Erhöhung der Luminosität des LHC. Die zweite Phase, das **High Luminosity LHC** Projekt (**HL-LHC**), im Moment für die Jahre 2024 - 2025 geplant, wird den LHC auf eine viel höhere Luminosität aufrüsten und die Genauigkeit der ATLAS und CMS Detektoren wesentlich erhöhen.

Die Anforderungen an Daten und Datenverarbeitung werden in dieser Zeit dramatisch ansteigen. Man rechnet mit einer Steigerung für den HL-LHC von 500 PByte/Jahr. Der Bedarf für die Weiterverarbeitung wird voraussichtlich mehr als das Zehnfache über das hinausgehen, was die technische Evolution erwartungsgemäß bieten wird. Dies sind alles wichtige und spannende Herausforderungen. Es ist klar, dass sich die Datenverarbeitung des LHC weiter entwickeln wird und dass in zehn Jahren die Dinge ganz anders aussehen werden, während die Funktionen des CERN erhalten bleiben, die eine globale Zusammenarbeit ermöglichen.

Langfristig haben Computerspezialisten, Physiker und Ingenieure bereits in enger Zusammenarbeit begonnen die Anforderungen sowohl für die Energieversorgung als auch für das Netzwerk des **Future Circular Collider (FCC)** abzuschätzen. Ein solches Großprojekt erfordert spezifische Management-, Finanz- und Verwaltungsplanung. Die Lösungen in vielen technischen Bereichen, einschließlich Informatik, von der Anlagensteuerung bis hin zur Datenanalyse, müssen erst noch entwickelt werden.

# Wissens- und Technologietransfer

Giovanni Anelli

Um seine ehrgeizigen Forschungsziele zu verfolgen, muss das CERN ständig fortschrittliche Instrumente und innovative technologische Lösungen entwickeln, vor allem auf Feldern, die mit Teilchendetektoren, Beschleuniger- und Informationstechnologien zusammenhängen. Dazu gehören viele Bereiche wie z. B. Mikroelektronik, Supraleitung, Tieftemperaturtechnik oder Hochleistungsmaterialien.

Diese Technologien und vor allem das Wissen, das dahinter steckt, sind wichtige Aktivposten der Organisation, und es ist von allergrößter Wichtigkeit, dass die Gesellschaft als Ganzes davon profitieren kann.

Das CERN erforscht seit vielen Jahren aktiv mögliche Anwendungen seiner Innovationen in anderen Bereichen als der Hochenergiephysik und hat verschiedene Verfahren entwickelt, um sein Know-how und seine Expertise an Unternehmen und andere Forschungseinrichtungen weiterzugeben. Beispiele hierfür sind die CERN Open Hardware Lizenz, Partnerschaften mit der Industrie, Lizenzen, Service- und Beratungsverträge, weiterhin ein Netzwerk von Gründerzentren in den Mitgliedsstaaten des CERN, um Start-up-Unternehmen bei der Einführung von CERN-Technologien zu unterstützen.

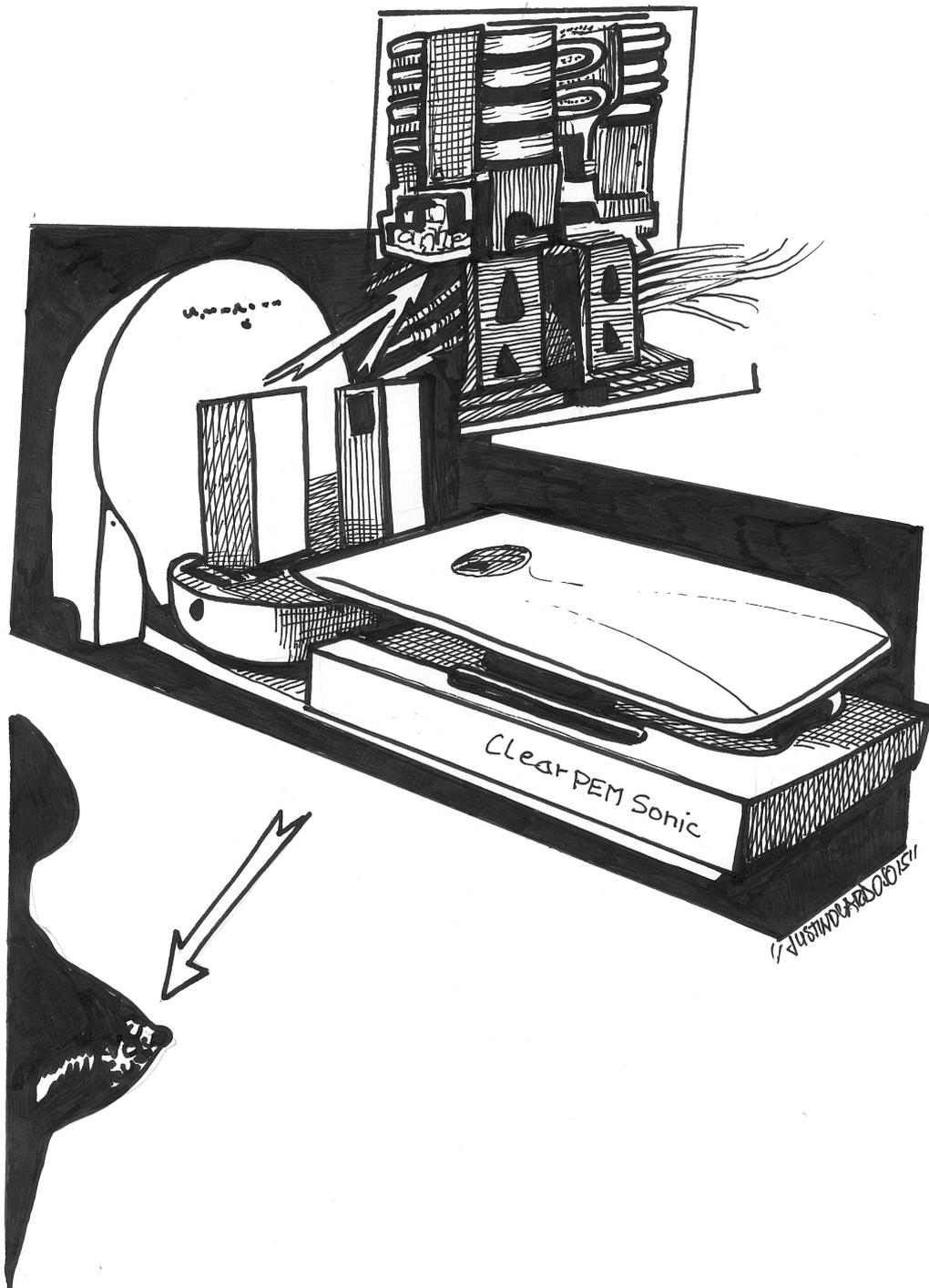
Wissenstransfer in die Industrie erfolgt auch durch Beschaffung von Hightech-Komponenten und durch die Mobilität von Menschen: Viele Studenten und junge Forscher, die zu Beginn ihrer Karriere im CERN gearbeitet haben, wechseln in die Industrie und profitieren von dem Wissensschatz, den sie während ihrer Tätigkeit für die Organisation erworben haben.

Die Beziehungen zur Industrie sind für die Organisation lebenswichtig. CERN braucht die Industrie für seine hochentwickelte Ausrüstung, und hilft ihr andererseits bei der Entwicklung neuer Produkte und Dienstleistungen, indem es gleichzeitig Kunde und Anbieter von Technologien und Know-how ist.

CERN betreibt die größte Forschungsinfrastruktur auf dem Gebiet der Hochenergiephysik, hat einzigartige Anforderungen und entwickelt einzigartige Technologien. Es gibt viele Beispiele dafür, wie sich das am CERN generierte Wissen auf die Gesellschaft ausgewirkt hat, und zwar in so unterschiedlichen Bereichen wie medizinische Bildgebung, Krebsbehandlung, Dosimetrie, Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, Energieerzeugung, Datenspeicherung und Datenanalyse. Auf den folgenden Seiten ein Beispiel für eine aktuelle Praxisanwendung in präklinischen Studien von Krankenhäusern: **ClearPEM**.



"A clinical application: ClearPEM" Justino António Cardoso 2015, Tusche



*"An innovative technology" Justino António Cardoso 2015, Tusche*

ClearPEM ist ein neuartiger hochauflösender Positronen-Emissions-Mammographie-Scanner, der von der Crystal Clear Kollaboration am CERN zur Erkennung von Brustkrebsläsionen entwickelt wurde. Er ist eine praktische Anwendung verschiedener technologischer Entwicklungen für das CMS-Experiment am LHC.

# ClearPEM

*João Varela*

**ClearPEM** ist ein Positronen-Emissions-Mammographie-Scanner mit hoher Ortsauflösung (1,4 mm) und hoher Spezifität zum Nachweis von Brustkrebsläsionen, der von der **Crystal Clear** Kollaboration am CERN entwickelt wurde. Er verwendet ein bildgebendes Verfahren, das auf einem Positronen emittierenden Radioisotop basiert. Dies ist mit einem Molekül markiert, das sich an Krebszellen bindet. Da sich der Tracer nach der Injektion in den Blutkreislauf in den Krebsläsionen konzentriert, ist es möglich, ein Bild seiner räumlichen Verteilung im Körper zu rekonstruieren. Hierzu werden Photonenpaare detektiert, die aus der Vernichtung der Positronen mit Elektronen in der Materie des menschlichen Körpers resultieren. Das Positron ist das Antiteilchen des Elektrons. Wenn die beiden sich näher kommen, vernichten sie sich gegenseitig und erzeugen zwei energiereiche Photonen, die in entgegengesetzter, aber zufälliger Richtung emittiert werden. In der Positronen-Emissions-Tomographie, allgemein als **PET** bekannt, werden viele dieser Ereignisse von externen Photonendetektoren aufgezeichnet, die es ermöglichen, ihre Emissionsrichtung zu rekonstruieren und mithilfe von ausgeklügelten Algorithmen ein 3D-Bild des Tumors zu erstellen. Knapp ein Jahrhundert nach der Entdeckung des Positrons entpuppt sich PET als spektakuläre praktische Anwendung dieser seltsamen Form der Materie.

Der ClearPEM-Scanner ist das Ergebnis langjähriger Entwicklungen an den Kristalldetektoren, den Fotosensoren und der Ausleseelektronik für das CMS-Experiment am LHC. Ein großer Photonendetektor, mit ca. 80.000 Bleiwolframatkristallen, bekannt als **ECAL (Electromagnetic Calorimeter)**, wurde von der CMS-Kollaboration gebaut. Er ist seit 2009 in Betrieb, und misst mit hoher Genauigkeit Photonen, die bei den Protonenkollisionen am LHC produziert wurden. Es wurde erwartet, dass Photonenpaare aus dem Zerfall eines neuen hypothetischen Teilchens, dem Higgs-Boson, entstehen. Dieses wurde tatsächlich 2012 unter anderem durch die Beobachtung von Zwei-Photonen-Ereignissen entdeckt. Es gibt jedoch einen großen Unterschied zwischen den Photonen aus dem Higgs-Zerfall und den Photonen aus der Positron-Elektron-Vernichtung: erstere sind hunderttausendmal energiereicher! Eine wichtige Folge ist, dass der Photonendetektor viel kleiner sein kann als der von ECAL, so dass er sich für die Brustuntersuchung eignet.

Das von den Physikern erworbene Wissen und Verständnis veranlasste die Gründung eines Konsortiums zur Nutzung der neuen Technologien für diese wichtige praktische Anwendung. Es bewilligte die Konzeption und den Bau eines Gerätes, das Detektorköpfe auf der Basis von 6144 LYSO-Lutetium mit einer Größe von 2 x 2 x 20mm umfasst, um die Photonen zu messen, die von dem in der Läsion akkumulierten Radioisotop emittiert werden. Erstmals wurden die für ECAL entwickelten Silizium-Photosensoren, eine Lawinenphotodiode (**Avalanche Photo Diode (APD)**) anstelle der herkömmlichen Photovervielfacher eingesetzt, um in einem PET-Scanner die in den Kristallen erzeugten Lichtblitze zu messen. Verbunden mit einem neuen dezidierten Mikrochip erlaubten die APDs den Bau sehr kompakter Detektorköpfe, die eng um die Brust herum platziert werden konnten.

Das System verfügt über eine hohe Nachweisempfindlichkeit, so dass nicht nur der Ort der Läsion(en), sondern auch deren metabolische Aktivität bestimmt werden kann. Dadurch wird eine genauere Beurteilung vom Ausmass der Erkrankung ermöglicht, sowie eine bessere Abgrenzung zwischen gutartigen und bösartigen Läsionen. Dies kann natürlich für die nachfolgende Planung der Behandlung ausschlaggebend sein und somit auch für deren Erfolg.

Es wurden zwei ClearPEM-Maschinen gebaut. Eine ist jetzt an der Universitätsklinik von Coimbra (**ICNAS, Instituto de Ciências Nucleares Aplicadas à Saude**) in Portugal installiert. Eine weitere ist in Betrieb am Krankenhaus San Gerardo in Monza (Italien). Die Leistungsfähigkeit der Geräte wurde für Patientinnen mit Brustkrebs validiert, der mittels der Standardverfahren und -untersuchungen sowohl vor als auch nach der Behandlung diagnostiziert wurde. Ein Vergleich der Bilder der gleichen Patientinnen, die mit handelsüblichen PET-Scannern und ClearPEM erstellt wurden, zeigt die Vorteile der hohen räumlichen Auflösung, die

durch letzteren erreicht wird.

In einem Laboratorium, in dem Physiker den Ursprung unseres Universums erforschen und versuchen, die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie zu verstehen sowie das Geheimnis der dunklen Materie aufzudecken, hat ein Projekt wie ClearPEM unsere Phantasie angeregt. Tatsächlich zeigt dieses Beispiel, wie Grundlagenforschung in der Teilchenphysik auf direktem Weg zu wichtigen Durchbrüchen in Bezug auf Innovation und technologischen Transfer zum Wohl unseres täglichen Lebens führte.

# ARTSCI am CERN

Arthur I. Miller

CERN ist weltweit führend in der Erforschung der geheimnisvollen Welt der Elementarteilchen. Es ist auch ein hervorragender Ort für das aufkeimende Feld der Kunstwissenschaft (ArtSci), in dem Künstler und Wissenschaftler zusammenarbeiten, um das Universum, in dem wir leben, neu zu deuten. Dies begann um das Jahr 2000, als der Londoner Künstler Ken McMullen einen Kreis etablierter Künstler zum CERN brachte. Die Künstler besuchten das CERN für kurze Zeit, kehrten dann in ihre Ateliers zurück, um an Ideen zu arbeiten, die von Gesprächen mit CERN-Wissenschaftlern inspiriert waren. Die daraus resultierende Ausstellung „*Signatures of the Invisible*“ umfasste Gemälde und Skulpturen. Sie wurde 2001 in der Londoner Atlantis Gallery mit großem Erfolg eröffnet und in Stockholm, Lissabon, Paris und dem MOMA PS1 in New York gezeigt, um nur einige Ausstellungsorte zu nennen.

In den folgenden Jahren war CERN weiterhin in den Nachrichten. Im Jahr 2009 wurde dort teilweise Dan Browns Blockbuster-Roman „Angels and Demons“ (in Deutschland „Illuminati“) gedreht, dessen Entwurf von Geheimgesellschaften, Symbolik und der surrealen Zugabe einer am CERN hergestellten Antimateriebombe überfüllt ist. CERN machte deutlich, dass sowohl die Geschichte als auch die Bombe reine Fiktion sind. Kurz darauf gründete Robert Harris seinen Thriller „Fear Index“ (deutsch „Angst“) auf der Figur eines Wissenschaftlers, der früher am CERN gearbeitet hat.

Im Hinblick auf die Förderung der Kunst am CERN war das wichtigste Ereignis des Jahres 2009 die Ankunft von Ariane Koek, einer Londoner Produzentin von Kulturprogrammen bei der BBC, die ein Programm für Kunstaufenthalte (arts residency) ins Leben rief. Sie nannte es **Collide@CERN** (Collide at CERN), finanziert zum Teil von Ars Electronica, mit Sitz in Linz (Österreich).

Der Residenzkünstler (artist in residence) wird in einem formellen Wettbewerb ausgewählt, um zwei Monate am CERN und einen Monat am Ars Electronica Center zu verbringen. In dieser Zeit soll eine Arbeit entwickelt werden, die vom CERN inspiriert ist. Dies unterschied sich von McMullens Programm, in dem Künstler eine kurze Zeit am CERN verbringen, aber ihre Arbeit in ihren eigenen Ateliers verrichten. Am CERN trifft sich der ausgewählte Künstler mit einem Wissenschaftler mittels ‚Speed Dating‘. Die Idee besteht darin, so viele Wissenschaftler wie möglich zu treffen, wobei jeder dem Künstler seine Arbeit erklärt. Heute wird dieses Programm von der spanischen Kunstkritikerin und Kuratorin Monica Bello geleitet. Das Problem dabei ist, dass die Welt des Wissenschaftlers für den Künstler oft beunruhigend ist und umgekehrt ebenso, und manchmal fast noch schlimmer, der Künstler nur sehr wenig von Wissenschaft versteht.

Von den Künstlern, die das Programm durchlaufen haben, möchte ich mich auf den japanischen Datenvisualisierungskünstler Ryoji Ikeda konzentrieren. Datenvisualisierungskünstler verwenden Algorithmen, um riesige Datenvorräte zu durchforsten und ästhetisch darzustellen. Wie Wissenschaftler suchen sie nach Mustern, weil Muster in Daten die DNA der Natur sind. Daten sind das Geschäft des CERN, sein Lebensblut, und Ikeda lebt und atmet in dieser Welt. Seine Installationen verwenden Echtzeit-Computerprogramme, um eine riesige Datenmenge mit funkelnden Lichtpunkten in bunten Mustern und einer hypnotischen Tonspur darzustellen. Sie sind im wahrsten Sinne des Wortes atemberaubend und fangen die Spannung der Daten aus der submikroskopischen Welt ein, die von Mammutdetektoren erfasst wurden.

CERN besitzt das Prestige, um hochkarätige Künstler anzuziehen, die meiner Meinung nach für ihre Dienste eingeladen und bezahlt werden sollten, mit der Maßgabe, dass sie ein Werk für eine Ausstellung vor Ort entwickeln. Stellen Sie sich das vor – eine Kunstgalerie am CERN. Da die Forschung am CERN das Unsichtbare sichtbar machen will, sollten Künstler, die sich auf Abstraktionen spezialisiert haben, bevorzugt werden. So z.B. der etablierte englische Künstler Keith Tyson, der 2002 mit dem renommierten Turner-Preis ausgezeichnet wurde. Sein Werk – Gemälde und Skulpturen – umfasst generative Systeme und umfasst die Komplexität und Verflechtung des Daseins. So ist es nicht verwunderlich, dass die CERN Theory Group sehr beeindruckt von ihm war, als er dem CERN einen Besuch abstattete. Die Wissenschaftler des CERN sind Elite

und sollten sich mit hochrangigen Künstlern beschäftigen, die kommen und gehen können, wie es ihnen gefällt.

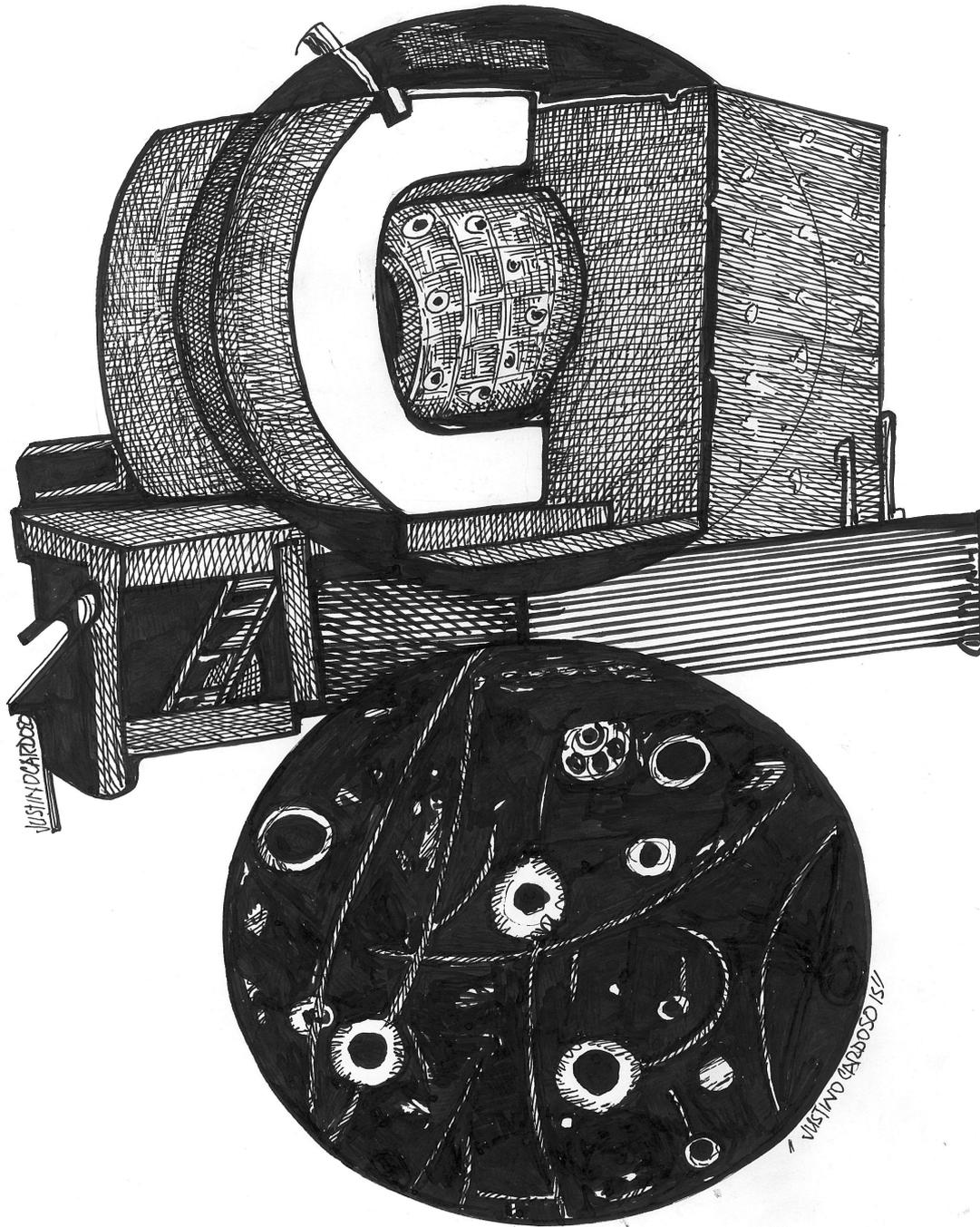
In meinem Buch „*Colliding Worlds: How Cutting-Edge Science Has Redefined Contemporary Art*“<sup>1</sup> diskutiere ich ausführlich das Collide@CERN-Programm. Auf der Grundlage von über hundert Interviews mit Künstlern des 21. Jahrhunderts wurde deutlich, dass Kunst, Wissenschaft und Technologie, wie wir sie kennen, verschwinden und sich zu einer, wie ich sie nenne, dritten Kultur, einer neuen Avantgarde, verschmelzen. Seine Bewohner sind eine neue Generation von Künstlern – Künstler, Wissenschaftler und Technologie in einem. Diese hybriden Geschöpfe finden sich in dem aufregenden und viel diskutierten Feld der Kunst, das mittels Künstlicher Intelligenz (KI) entsteht. CERN sollte diese neue Art von Künstler einladen.



“Strings at the horizon of a black hole” Karen Panmann 2014, *Bemalte Keramik und Plastiksaiten*

---

<sup>1</sup> Für mehr Informationen: [www.arthurimiller.com](http://www.arthurimiller.com) und [www.collidingworlds.org](http://www.collidingworlds.org) oder [a.miller@ucl.ac.uk](mailto:a.miller@ucl.ac.uk)



**"Gargamelle and the neutral currents"** Justino António Cardoso 2015, Tusche

Im Juli 1973 wurde von André Lagarrigue und seinen Kollegen der Gargamelle-Gruppe eine bahnbrechende Entdeckung im Hauptauditorium des CERN bekannt gegeben. Am CERN Protonen-Synchrotron PS fanden sie Beweise für neutrale Strömungen in Bildern der Gargamelle-Blasenkammer. Die Entdeckung bestätigte die elektroschwache Theorie. Gargamelle, deren 'Körper' nun im Garten des Mikrokosmos ruht, war eine riesige Blasenkammer mit einem Gewicht von rund 1000 Tonnen, gefüllt mit 18 Tonnen flüssigem Freon.



**“The gravitation law I know”** Justino António Cardoso 2015, Tusche

Im Jahr 1687 veröffentlichte Isaac Newton in „Principia“ das Gesetz der universellen Gravitation. Die Schwerkraft ist die schwächste der vier fundamentale Wechselwirkungen der Natur. Zusätzliche Dimensionen könnten erklären, warum die Schwerkraft so schwach ist. Mit der „Theorie von Allem“ sind Physiker auf der Suche nach der Vereinigung aller fundamentalen Wechselwirkungen der Natur: Gravitation, die starke Wechselwirkung, die schwache Wechselwirkung und Elektromagnetismus.

# Wissenschaft, Politik und Gesellschaft

Rolf Heuer

Fortschritt ist ein komplexes Ungeheuer, aber eines ist sicher: Er beruht auf der grundlegenden Eigenschaft der menschlichen Neugier. Ohne sie wäre die Menschheit immer noch im Großen Grabenbruch. Mit ihr haben wir unsere Welt gemeistert, erforschen andere, haben uns in die Lage versetzt, über die Natur unseres Universums nachzudenken, und wir haben unser aller Leben unvorstellbar verbessert.

Heute leben wir in einer Zeit, in der die von Neugierde angetriebene Wissenschaft fast jeden Aspekt unseres Lebens berührt, während die Wissenschaft sich seit Jahrzehnten von Gesellschaft und Kultur wegbewegt. Das ist wichtig, weil die Menschen immer mehr dazu aufgerufen werden, wissenschaftlich fundierte Entscheidungen zu treffen, und wenn die wissenschaftliche Gemeinschaft nicht hilft, sie dafür zu befähigen, dann versagen wir als Wissenschaftler in unserer Pflicht. Wenn wir in unseren Elfenbeintürmen klösterlich bleiben, dann machen wir einfach nicht unseren Job. Dies ist eine wichtige Aufgabe der Wissenschaft: den Menschen dabei zu helfen, in ihrem täglichen Leben rationale Entscheidungen zu treffen.

Für Menschen wie mich, die in öffentlich finanzierten Wissenschaften arbeiten, besteht auch eine moralische Verpflichtung, die Öffentlichkeit einzubinden. Am CERN betreiben wir Grundlagenforschung. Unser Hauptergebnis ist Wissen über das Universum. Auf dem Weg dorthin entwickeln Wissenschaftler und Ingenieure des CERN Technologien, die vom World Wide Web über Detektoren für medizinische Scanner bis hin zu Ultrahochvakuumtechniken für Anwendungen in der Solarenergiespeicherung und Teilchenbeschleunigern für die Krebstherapie reichen. Aber es ist das Wissen, für das wir hier sind, und nach meiner Erfahrung befriedigt das Wissen, das wir liefern, das grundlegende menschliche Bedürfnis zu lernen. Grundlagenwissenschaft nährt den Geist. Und lassen Sie mich nur hinzufügen, dass die Öffentlichkeit, die uns finanziert, das Recht hat, zu wissen, was wir tun, und zu wissen, dass wir ihr Geld gut anlegen.

Bei CERN wird diese Verantwortung ernst genommen: Wir haben die Inbetriebnahme des Large Hadron Collider (LHC), des leistungsstärksten Teilchenbeschleunigers der Welt, wirksam eingesetzt, um unser Profil zu schärfen und ein breites Publikum anzusprechen. Von Grundschulkindern bis zu Entscheidungsträgern, von Künstlern bis zu Weltreligionen haben wir Gespräche begonnen, die etwas bewegen.

Dies ist meine erste Kernaussage: Es ist heute wichtiger denn je, dass die Wissenschaft die Gesellschaft einbindet, weil wir alle von der Wissenschaft abhängen, unsere Zukunft hängt von der Wissenschaft ab und Wissenschaft hat eine moralische Verpflichtung, sich zu engagieren.

Meine zweite Kernaussage lautet, dass es ebenso wichtig ist, dass Wissenschaft nicht isoliert, sondern in Zusammenarbeit betrieben wird. Dies wurde in Europa nach dem Zweiten Weltkrieg von einer kleinen Gruppe visionärer Wissenschaftler und visionärer Diplomaten erkannt, die Wissenschaft und Bildung miteinander verbanden, um eine Resonanz zu schaffen, die die Art und Weise, wie grenzüberschreitende Wissenschaft betrieben wird, für immer verändern würde. Am 29. September 1954 wurde aus dieser Resonanz das CERN und damit auch eine Blaupause für langfristige, internationale Zusammenarbeit in der Wissenschaft geschaffen.

Die Gründerväter des CERN schufen ein stabiles System für den öffentlichen Sektor, um die Grundlagenforschung zu unterstützen. Seitdem hat die Welt wirtschaftliche Höhen und Tiefen erlebt, aber am CERN wurde immer Grundlagenforschung betrieben. Wenn die gesamte Grundlagenforschung nach dem CERN-Modell durchgeführt werden könnte: international, kooperativ und offen, mit einer stabilen Finanzierungsstruktur durch den öffentlichen Sektor, so wäre unser Fortschritt gesichert. Und die Welt könnte ein wenig rezessionssicherer werden, als sie heute ist.

CERN ist eine europäische Organisation, die auf den Grundsätzen von Fairness gegenüber ihren Mitgliedern und Offenheit gegenüber der Welt beruht. Dementsprechend gibt ihr Führungsmodell allen Mitgliedstaaten, großen wie kleinen, eine angemessene Stimme. Sein Finanzierungsmodell ermöglicht es den Mitgliedstaaten, einen Beitrag nach ihren Möglichkeiten zu leisten. Und sein Forschungsmodell begrüßt

Wissenschaftler aus der ganzen Welt, die einen positiven Beitrag zu den Forschungsprogrammen des Laboratoriums leisten können.

Durch diese Grundprinzipien ist das CERN ein Musterbeispiel für eine stabile, grenzüberschreitende Zusammenarbeit innerhalb Europas, ein koordiniertes europäisches Engagement mit der übrigen Welt und eine Blaupause für eine Führungsrolle auf dem Gebiet der Teilchenphysik. Insgesamt ist CERN heute die unbestrittene Drehscheibe einer globalen Gemeinschaft von Wissenschaftlern, die die Grenzen des Wissens vorantreiben. Es ist ein leuchtendes Beispiel dafür, was Menschen erreichen können, wenn sie zusammenarbeiten.

Heute müssen wir dieses Modell breiter einsetzen. Die Wissenschaft wird immer globaler, und die Teilchenphysik steht an der Spitze dieser Entwicklung. Es war daher nur natürlich, dass das CERN 2010 über die Grenzen Europas hinausging und allen Staaten unabhängig von ihrer geographischen Lage die Möglichkeit einer Mitgliedschaft oder assoziierten Mitgliedschaft eröffnete.

Folglich ist das Ideal des CERN von Frieden und Völkerverständigung, vermittelt durch die universelle Sprache der Wissenschaft, rund um den Globus sichtbar. Dazu kommt die Freude an der gemeinsamen menschlichen Neugier und der praktische Nutzen von Bildung, Innovation und Zusammenarbeit.

Eine Institution wie das CERN kann eine wichtige Rolle in der Bildung spielen. Beginnen wir mit den Jüngsten unserer Akteure. Umfragen in der Industrie zeigen regelmäßig, dass es einen Mangel an Absolventen natur- und ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge gibt. Wie gehen wir das Problem an? Meiner Meinung nach: indem wir die ganz Kleinen begeistern. Als wir 2009 nach der Meinung über CERN in der Region Genf fragten, kamen die Ergebnisse nicht überraschend. Unsere Nachbarn erkannten die lokalen wirtschaftlichen Auswirkungen einer großen zwischenstaatlichen Organisation vor ihrer Haustür, aber sie waren uns gegenüber misstrauisch. Also fragten wir sie, wie wir bessere Nachbarn sein könnten. Zu den Themen, die sich herauskristallisierten, gehörte die Einführung der Wissenschaft in die Klassenzimmer der Grundschulen.

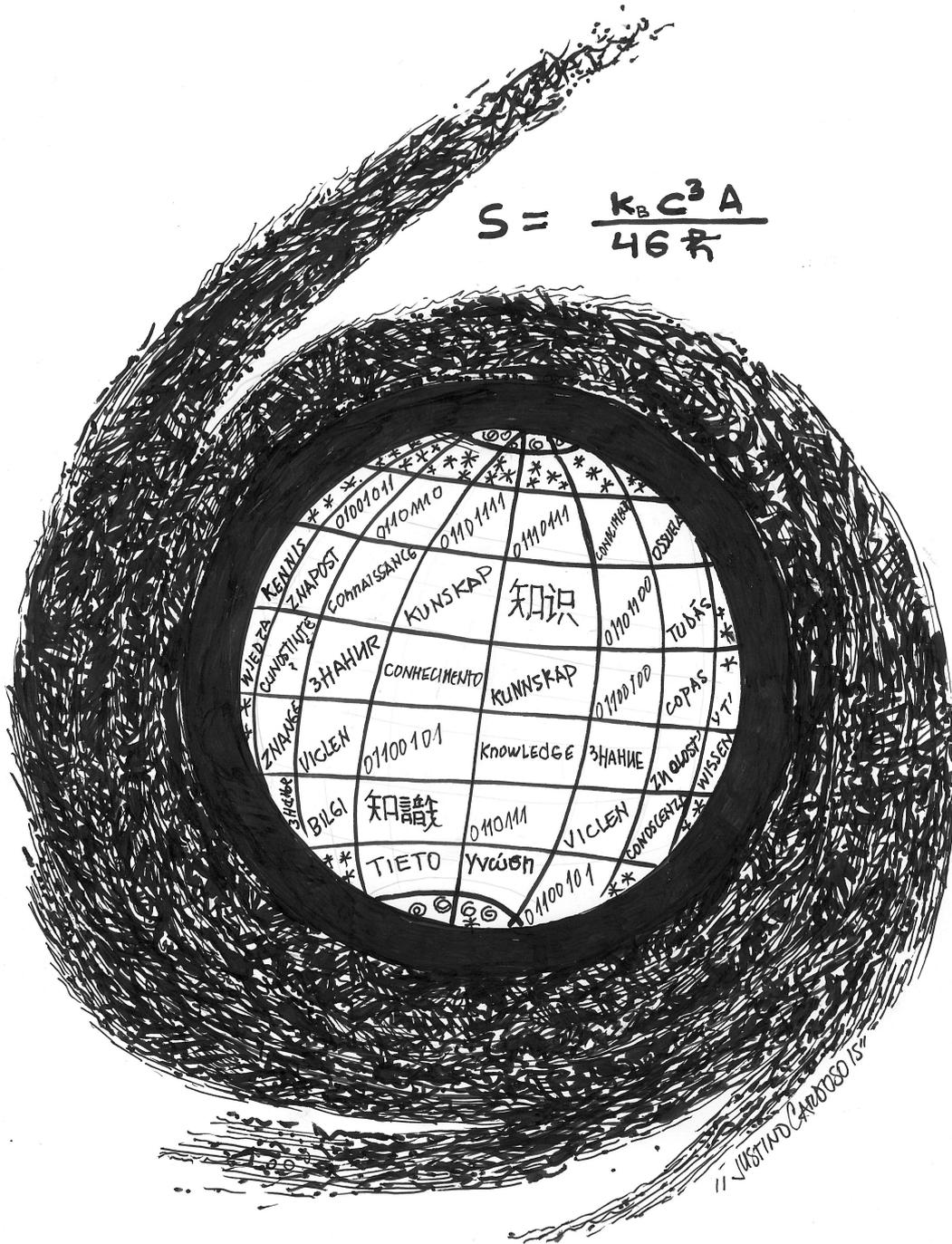
Wir arbeiteten mit den Bildungsbehörden in Frankreich und dem Schweizer Kanton Genf zusammen, aber auch mit der Universität Genf, um ein Forschungsprojekt für Kinder zu entwerfen. Einfach ausgedrückt, erhalten Schulklassen einen versiegelten Kasten und müssen durch wissenschaftliche Argumentation erschließen was enthalten ist. Sie bekommen ein paar Hinweise, dürfen aber nicht hineinschauen. Das Projekt wurde auf Konferenzen vorgestellt, in andere Sprachen übersetzt und bis nach Mexiko eingesetzt. Es ist noch zu früh, um zu sagen, ob dies mehr junge Menschen ermutigen wird, sich der Wissenschaft zuzuwenden und der Industrie qualifizierte Arbeitskräfte zur Verfügung zu stellen. Aber selbst wenn es Kinder nur ermutigt, ihre Neugierde nicht zu verlieren, wird es sich gelohnt haben.

Nun zur Politik, zu den Entscheidungsträgern. Hier ist meine dritte Kernaussage: Es ist von entscheidender Bedeutung für die wissenschaftliche Gemeinschaft, sich mehr in politischen Kreisen zu engagieren.

Wie oft haben wir Politiker gesehen, die auf Grund einer schlechten wissenschaftlichen Argumentation die falsche Entscheidung getroffen haben? Angesichts so wichtiger Themen wie des Klimawandels, die dringende Maßnahmen erfordern, ist es wichtig, dass diejenigen, die wir mit der Entscheidungsfindung betrauen, in der Lage sind, die Wissenschaft gut zu bewerten. Deshalb hat das CERN einen ständigen Beobachterstatus bei der UNO beantragt und erhalten, wo wir eine wichtige Botschaft für die Politiker propagiert haben: Es ist Ihre Aufgabe als Hüter der öffentlichen Finanzen, eine gesunde wissenschaftliche Basis aufrechtzuerhalten. Genau das hat Europa vor über 60 Jahren mit der Gründung des CERN und seither sieben weiteren weltweit führenden europäischen zwischenstaatlichen Forschungsorganisationen erreicht.

Das Bemühen um eine wissenschaftlich gebildete Regierungsklasse und einen gesunden Zustrom von Absolventen der Natur- und Ingenieurwissenschaften kann als klare Zielsetzung für das CERN angesehen werden. Aber was ist mit anderen Gruppen? Kunst? Bedeutende Weltreligionen? Während meiner Amtszeit als Generaldirektor des CERN haben wir ein Programm für Künstleraufenthalte ins Leben gerufen. Zwischen zwei scheinbar gegensätzlichen Enden des kulturellen Spektrums wurde dadurch bereits ein bemerkenswerter Austausch angeregt. Wir stellen fest, dass Künstler und Wissenschaftler viel gemeinsam ha-

$$S = \frac{k_B c^3 A}{4G\hbar}$$



## BLACK HOLE ENTROPY

"Knowledge and black holes" Justino António Cardoso 2015, Tusche

Nach dem Verständnis der Physiker von Schwarzen Löchern gehen Informationen verloren, wenn Materie in ein Schwarzes Loch fällt. Aber gibt es eine Möglichkeit, dieses verlorene Wissen zu rekonstruieren?  
(Legende von John Ellis)

ben. Sie sind beide neugierig auf die Welt, in der sie leben, und sie sind beide sehr kreativ. Der mosambikanische Künstler Justino Cardoso beispielsweise schuf die Arbeiten für dieses Buch bei seinem ersten Besuch außerhalb Afrikas. Er hatte vorher nie irgendeinen Kontakt mit Physik oder Physikern gehabt, bevor er zum CERN kam. Das Zusammentreffen von künstlerischer und wissenschaftlicher Kreativität hat einige bemerkenswerte Ergebnisse hervorgebracht. Dem werden Sie sicher zustimmen.

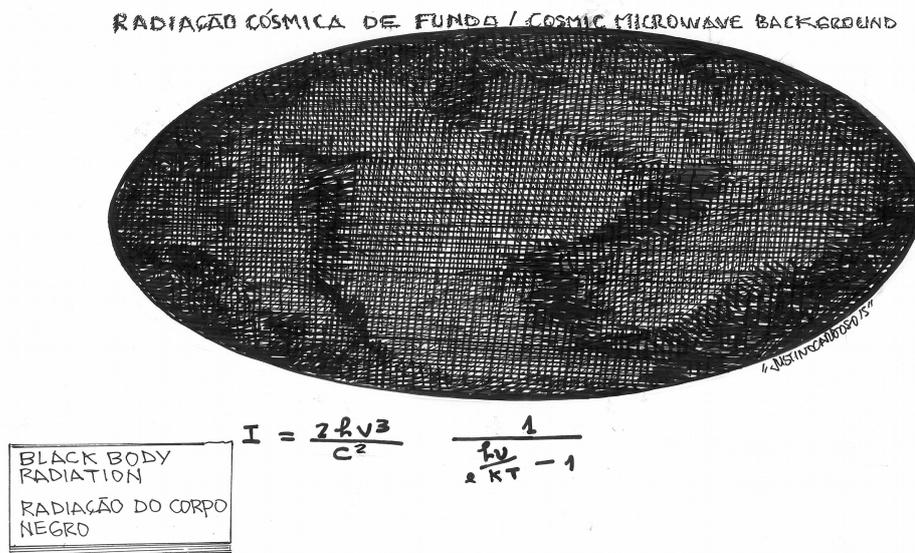
Die Auseinandersetzung mit den Künsten ermöglicht es dem CERN, ein Publikum zu erreichen, das wir sonst nicht erreichen würden. Wenn wir eine Tanzperformance inszenieren, die von der Wissenschaft am CERN inspiriert ist, erreichen wir Leute, die normalerweise nicht davon träumen würden, einen Fuß in ein Physiklaboratorium zu setzen. Als wir einen Theaterabend abhielten, um einen etwas anderen Punkt auf der künstlerischen Skala anzuführen, sagte uns mehr als die Hälfte des Publikums, dass sie noch nie zuvor am CERN waren. Aber sie werden wahrscheinlich wiederkommen.

Und hier ist meine vierte Kernaussage: Für Wissenschaft und Kunst braucht man eine offene Atmosphäre in der Gesellschaft.

Wir brauchen Freiheit und Vertrauen, um Leistung zu erbringen, zu denken und uns auszudrücken. Wissenschaft und Kunst brauchen diese Dinge. Tim Berners-Lee zum Beispiel hatte die Freiheit und das Vertrauen, etwas zu entwickeln. Das Institut, für das er arbeitete, gab ihm diese Freiheit. Was er tat, war genauso kreativ wie ein Kunstwerk. Er hätte alles entwickeln können. Was entstand, war das World Wide Web.

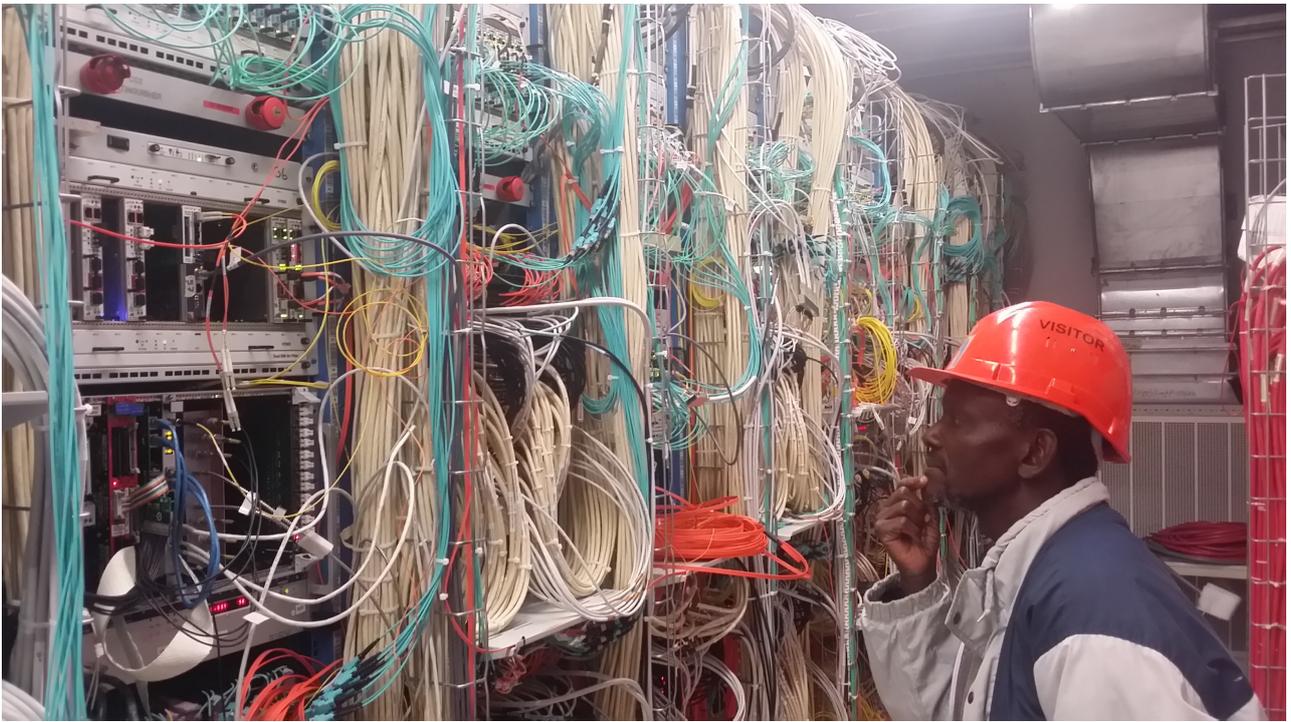
Abschließend möchte ich sagen: Die Wissenschaft hat die Verantwortung, sich in den Mainstream der Populärkultur einzubringen, sich an der öffentlichen Debatte über wichtige, wissenschaftlich basierte Themen zu beteiligen und diese mitzugestalten. Sie hat die Verantwortung über sich Rechenschaft abzugeben, insbesondere wenn sie aus öffentlichen Mitteln finanziert wird. Und sie hat die Pflicht, nach den höchstmöglichen ethischen Standards zu arbeiten. Wissenschaft untermauert fast jeden Aspekt des modernen Lebens, sei es wirtschaftlicher, sozialer, kultureller oder humanitärer Natur, und sie ist blind für Ethnie, Geschlecht, Sprache und Religion.

Kurz gesagt, die Wissenschaft repräsentiert das Beste der Menschheit.



“Cosmic microwave background” Justino António Cardoso 2015, Indian Ink

Das Universum ist voll von Mikrowellenhintergrund, der emittiert wurde, als das Universum sehr jung war: Unregelmäßigkeiten in dieser Strahlung kartieren die Ursprünge der Strukturen im Universum. (Legende von John Ellis)



**Justino António Cardoso am CERN, zu Besuch am CMS (Photo : José Carlos Rasteiro Da Silva)**



**Justino António Cardoso am CERN mit Prof. Sergio Bertolucci and Marilena Streit-Bianchi (Photo: Bettina Hamoudi)**



**Justino António Cardoso mit John Ellis (Photo: Marilena Streit-Bianchi)**



**Justino António Cardoso with João Penedones Fernandes (Photo: Marilena Streit-Bianchi)**



**Justino António Cardoso am CERN zu seiner Rechten Jack Steinberger (Nobel Preis für Physik 1988 mit Leon Lederman und Melvin Schwartz) und zu seiner Linken Jean Michel Laurent (Physiker der Kollaboration CAST)  
(Photo: Marilena Streit-Bianchi)**



