

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 104 (2013)
Heft: (10)

Artikel: Die praktische Seite der Teilchenphysik
Autor: De Cian, Michel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856538>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 01.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die praktische Seite der Teilchenphysik

Medizinische und materialtechnische Anwendungen

Spätestens seit der Entdeckung des Higgs-Boson im Juli 2012 ist die Teilchenphysik in aller Munde. Dabei lohnt es sich, nicht nur die Ergebnisse der Grundlagenforschung, sondern auch die Anwendungen der Teilchenphysik genauer zu betrachten. Zahlreiche für die Grundlagenforschung entwickelte Methoden und Geräte lassen sich beispielsweise kommerziell für therapeutische Zwecke im Medizinbereich und für Materialuntersuchungen und -optimierungen einsetzen. Zudem gibt es noch zahlreiche potenzielle Einsatzmöglichkeiten.

Michel De Cian

Eines der wichtigsten Anwendungsgebiete der Teilchenphysik ist die Behandlung von Krebs durch ionisierende Strahlung. Die verbreitetste Art der Strahlentherapie setzt entweder Röntgenstrahlung (harte Photonen) oder Elektronen für die Bestrahlung der Tumore ein. Dabei werden die Elektronen durch Glühemission in einer Elektronenkanone erzeugt, ähnlich wie bei einem Röhrenbildschirm, und in einem Linearbeschleuniger auf die benötigte Energie gebracht. Diese liegt im tiefen MeV-Bereich. Durch Magnete werden die Strahlen dann abgelenkt. So wird auch garantiert, dass am Schluss nur Elektronen mit vorbestimmter Energie vorhanden sind. Schliesslich wird der Strahl aufgefächert, um das Volumen des Tumors gleichmässig zu bestrahlen. Die Form des Elektronenstrahls wird dabei durch kleine Blenden so angepasst, dass nur der Tumor selbst und nicht das umgebende Gewebe bestrahlt wird.

Elektronen werden vor allem für Behandlungen nahe der Hautoberfläche eingesetzt, da sie eine relativ geringe Eindringtiefe haben und im Gewebe stark streuen. Linearbeschleuniger können jedoch auch Röntgenstrahlen erzeugen, indem ein Target, etwa aus Blei, in den Strahl gestellt wird. Dabei werden durch Bremsstrahlung harte Photonen erzeugt, die vor allem gegen tieferliegende Tumore eingesetzt werden.

Bei beiden Bestrahlungsarten ist die exakte Positionierung des Patienten wichtig – wobei der Patient sowohl ein Mensch als auch ein Tier sein kann. Im Tierspital Zürich etwa werden Kleintiere ähnlich wie Menschen gegen Krebs mit ionisieren-

der Strahlung behandelt (**Bild 1**). Die Präzision wird dabei durch ein bildgebendes Verfahren unterstützt, das kurz vor der Behandlung ein Röntgenbild des Patienten erstellt und dieses mit einem Bild einer computertomografischen Aufnahme vergleicht, um Tumor und Strahlendosis exakt positionieren und zur Deckung bringen zu können. Die Richtung der Strahlung kann dabei während der Therapie variiert werden, wieder um das Tumolvolumen möglichst genau und homogen zu bestrahlen und das umgebende gesunde Gewebe zu schonen.

Präzise Protonen

Die Technik der Strahlentherapie mit Elektronen und Photonen hat in den

letzten 15 Jahren grosse Fortschritte gemacht. Die Präzision der Bestrahlungen konnte deutlich verbessert werden. Sie hat aber beim Einsatz für die Krebsbehandlung einen grundlegenden physikalischen Nachteil: Die Wirkung der Strahlung nimmt ungefähr exponentiell mit der Eindringtiefe ab. Das bedeutet, dass die höchste Dosis auf oder kurz unter der Hautoberfläche abgegeben wird, wo am meisten Sekundärelektronen entstehen. Befindet sich der Tumor aber tiefer im Körper, wird das Gewebe, das sich auf der Einschussbahn der Strahlung vor dem Tumor befindet, stark mitgeschädigt. Werden jedoch Protonen anstelle von Photonen oder Elektronen verwendet, kann dieses Problem wesentlich reduziert werden. Protonen verlieren den grössten Teil ihrer Energie kurz bevor sie zum Stillstand kommen (**Bild 2**). Dadurch wird das Gewebe hinter dem Tumor nicht bestrahlt und das Gewebe vor dem Tumor erhält eine wesentlich geringere Strahlendosis, als wenn Röntgenstrahlen oder Elektronen verwendet werden. Protonen lassen sich mit Magneten äusserst präzise steuern und haben eine definierte, vorausberechenbare Reichweite, die durch die Dichte des Gewebes, das sie durchlaufen, gegeben ist. Protonen sind aber rund 2000 Mal schwerer als Elektronen. Grosse Magnete, die starke Magnetfelder erzeugen können, sind des-



Bild 1 Linearbeschleuniger für die Bestrahlung von Tumoren mit Elektronen und Photonen an der Abteilung für Radio-Onkologie der Vetsuisse-Fakultät der Universität Zürich.

Abteilung Radio-Onkologie, Vetsuisse-Fakultät, Universität Zürich

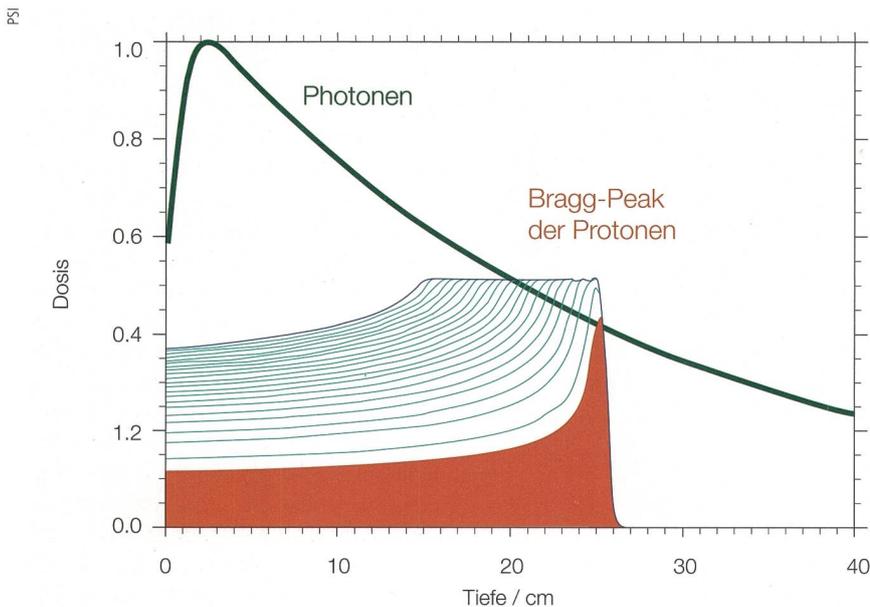


Bild 2 Vergleich der deponierten Dosis für Photonen (grün) und Protonen (rot). Die Protonen geben fast ihre gesamte Energie in einem schmalen Bereich, dem «Bragg-Peak», ab. Um das Tumervolumen gleichmässig zu bestrahlen, wird die Energie der Protonen verändert, was zu einem verschmierten Bragg-Peak führt (blau).

halb notwendig. Zudem muss die Energie der Protonen verändert werden können, damit zusammen mit der magnetischen Ablenkung eine dreidimensionale Abtastung des Tumors möglich wird.

Die Protonen müssen zuerst auf rund 180 000 km/s beschleunigt werden. Für die Beschleunigung der Teilchen wird ein sogenanntes Zyklotron oder Synchrotron benötigt. Der Aufbau dieser Maschinen ist wesentlich grösser und komplexer als der eines Linearbeschleunigers für Elektronen oder Photonen. Sie können deshalb nicht in den Behandlungsapparat integriert werden. Über eine spezielle Strahlführung von 15 bis 20 m werden die beschleunigten Protonen zu den Bestrahlungsplätzen geführt. Ein Behandlungsplatz besteht aus einer drehbaren Bestrahlungsapparatur, einer sogenannten «Gantry», in der der Protonenstrahl zum Bestrahlungskopf des Geräts und von dort zum Tumor des Patienten geführt wird. Die Gantry ist über 100 t schwer.

Um die meist amorphe Form des Tumors möglichst präzise zu bestrahlen, wird bei der neusten Protonentherapie-Technik, die am Paul Scherrer Institut entwickelt wurde, das Tumervolumen «abgescannt». Dabei werden in Schritten von etwa 5 mm über den ganzen Tumor verteilt einzelne Protonen-«Spots» mit mehreren Mia. Protonen gesetzt. Rund 10 000 «Spots» pro Liter Tumervolumen sind nötig, um die Strahlendosis optimal im Tumervolumen zu deponieren.

Die präzise Behandlung mit Protonenstrahlen erfordert aufwendige Apparaturen. Dies führt zu hohen Investitions- und Betriebskosten und somit zu hohen Behandlungskosten. Deshalb wird die Protonentherapie bis heute nur für eine kleine Anzahl von Tumorindikationen verwendet, nämlich dort, wo der bessere klinische Nutzen die höheren Kosten rechtfertigt.

Bewegliche Technik

Mit der heute vorhandenen Scanning-Technik können nur Tumore bestrahlt werden, die sich während der Bestrah-

lung nicht bewegen, beispielsweise solche im Bereich des Schädels oder der Wirbelsäule. Ein zukünftiges Ziel ist die Behandlung von Tumoren, die sich durch die Atmung oder den Herzschlag im Körper während der Bestrahlung bewegen.

Verschiedene Möglichkeiten werden studiert, um auch in solchen Situationen eine homogene Dosisverteilung im Tumervolumen zu erzielen. Das Tumervolumen kann beispielsweise mit geringen Einzeldosen mehrmals sehr schnell abgescannt werden. Die Tumorbewegungen können vor der Behandlung zudem mit einem bildgebenden Gerät (z.B. MRI) genau erfasst und ausgemessen werden. Das Ergebnis kann anschliessend in die Therapieplanung und den Bestrahlungsprozess einfließen. Besonders attraktiv ist es, die Tumorbewegung während der Bestrahlung dreidimensional zu erfassen und den Teilchenstrahl dem sich bewegenden Tumervolumen in Echtzeit nachzuführen. Die am PSI gebaute neue Bestrahlungseinrichtung «Gantry 2» (Bild 3) ist dafür ausgelegt, dass sie das Tumervolumen sehr schnell dreidimensional mehrmals scannen kann. Sie ermöglicht einen sehr schnellen Energiewechsel des Protonenstrahls von nur gerade 80 ms, mit dem die Eindringtiefe in den Tumor gesteuert wird. Eine Echtzeit-Nachführung des Protonenstrahls entsprechend der Tumorbewegung wäre mit dieser Apparatur prinzipiell möglich, jedoch fehlen heute noch die bildgebenden Geräte, die die Tumorbewegungen während der Bestrahlung gleichzeitig auch in Echtzeit verarbeiten und darstellen können.



Bild 3 Bestrahlungsgerät «Gantry 2» am PSI: In der linken Bildhälfte ist die drehbare Gantry mit Bestrahlungskopf und Patientenliege zu sehen, rechts im Bild ein CT-Scanner, der für die Bestrahlungsplanung und zur genauen Positionierung eingesetzt wird. (Die abgebildete Person ist kein Patient.)

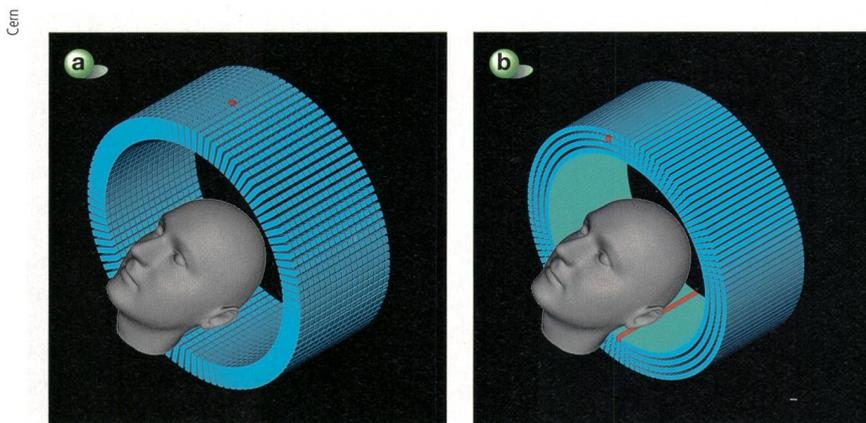


Bild 4 (a) Radiale (klassische) Anordnung der Szintillatoren und (b) neue, axiale Anordnung der Szintillatoren in einem PET-Gerät.

Ein neues Design für den PET-Scanner

Teilchendetektoren in der Teilchenphysik sind im Grunde grosse Fotoapparate. Sie erfassen so viele Informationen von den Zerfallsprodukten nach der Kollision wie möglich. Eine Art Teilchendetektoren sind Szintillatoren: Werden sie von einem geladenen Teilchen durchquert, regt die entstehende Ionisation das Material zum Leuchten an. Dieses Licht, entweder im sichtbaren oder im ultravioletten Bereich, kann registriert werden, um die Energie des durchquerenden Teilchens zu bestimmen.

Szintillatoren werden jedoch nicht nur bei Hochenergiephysik-Experimenten wie etwa am LHC eingesetzt, sondern auch in medizinischen Diagnosegeräten. Bei der Positron-Emissions-Tomographie (PET) wird dem Patienten ein radioaktives Isotop in den Körper injiziert, etwa das Fluor-Isotop ^{18}F . Dieser Betastrahler sendet dann im Körper Positronen aus, die eine kurze Distanz durch das Gewebe fliegen und danach mit einem Elektron zu zwei Photonen annihilieren. Die Photonen verlassen dann den Körper und können von Szintillationsdetektoren registriert werden. Dabei sind zwei Eigenschaften der Detektoren wichtig: Einerseits muss ihre Energieauflösung so gut wie möglich sein: Die zwei Photonen haben eine definierte Energie von 511 keV und können so vom «Hintergrund» unterschieden werden. Andererseits muss die räumliche Auflösung so gut wie möglich sein, um ein möglichst detailliertes Bild des Organs oder des Gewebes zu erstellen – vor allem sollten Parallaxenfehler so gut wie möglich vermieden werden.

Ein neues Konzept versucht, beide Parameter gleichzeitig zu verbessern. Dafür

wurde die Anordnung der Szintillatoren geändert. Während die Szintillator-Stäbe bis jetzt in die Richtung des Patienten zeigten (**Bild 4a**), sind sie in der neuen Anordnung (**Bild 4b**) zylinderförmig um ihn angeordnet. Dadurch wird eine sehr hohe Auflösung in zwei Dimensionen erreicht. Um die Auflösung entlang der Achse des Szintillator-Stabes zu verbessern, wird eine Eigenschaft des Materials ausgenutzt: Die Stäbe werden mit Streifen von Wellenlänge-Schiebern beklebt. Erzeugt nun ein Photon Szintillationslicht im Kristall, wird ein Teil davon nicht vollständig im Kristall zurückgestreut und von einem Streifen aufgefangen, der das Licht an einen Photodetektor weiterleitet. Der Rest des Lichtes wandert bis ans Ende des Kristalls und wird dann ebenfalls von einem weiteren Photodetektor ausgelesen. Dadurch kann die

dreidimensionale Position des Eintrittspunktes des Photons und seine Energie bestimmt werden. Um schliesslich eine möglichst gute Energieempfindlichkeit zu gewährleisten, werden mehrere Lagen von Kristallen konzentrisch übereinander platziert.

Am Institut für Teilchenphysik der ETH Zürich wurde in Zusammenarbeit mit mehreren internationalen Instituten, u.a. auch mit Wissenschaftlern des Cern, in den letzten Jahren ein Prototyp dieses AX-PET, eines solchen axialen PET-Gerätes, mit zwei Kristall-Modulen aufgebaut (**Bild 5**). Ein erster Test an Mäusen und Ratten ergab, dass die Auflösung im selben Bereich ist wie ein kommerzieller PET-Scanner. «Der Vorteil unseres Modells ist jedoch, dass wir beide Parameter, die räumliche Auflösung und die Energieauflösung unabhängig voneinander verbessern können», sagt Chiara Casella, Forscherin am Institut für Teilchenphysik der ETH Zürich und am AX-PET Projekt beteiligt. Damit ist es in Zukunft etwa möglich, kleinere Kristalle zu verwenden, um die Bildqualität ohne Beeinträchtigung der Energieauflösung weiter zu verbessern.

Eine weitere Möglichkeit, die im Moment studiert wird, ist eine Flugzeitmessung: Da das Photonenpaar nicht im selben Abstand zu den zwei Detektoren entsteht, benötigen die Photonen unterschiedlich lange, bis sie im Detektor ankommen. Durch die Flugzeitdifferenz lässt sich der Entstehungsort der Photonen bestimmen und damit die Auflösung

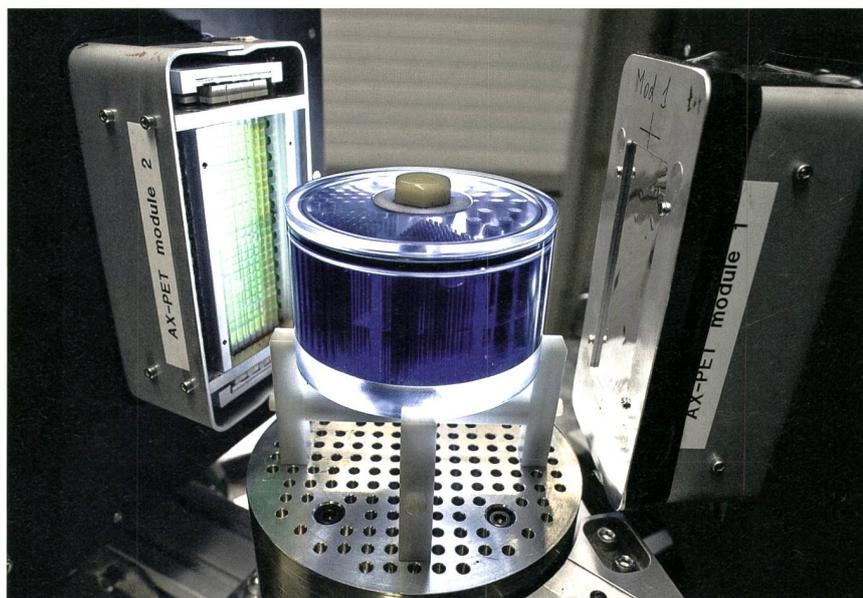


Bild 5 Testanordnung von 2 AX-PET-Detektoren (ausser) und einem Phantom (Mitte), mit dem sich die Eigenschaften der Detektoren testen lassen.



Bild 6 Massenspektrometer BiOMICADAS des Labors für Ionenstrahlphysik der ETH Zürich. Die Ionen werden in der Ionenquelle (rechts) erzeugt, beschleunigt und abgelenkt (linke Bildhälfte). Das ^{14}C wird dann in einem Detektor (Mitte oben) gemessen.

des Scanners verbessern. Der neue Photonendetektor, der dafür benötigt würde, hätte noch einen weiteren Vorteil: Er könnte für ein Kombigerät aus PET und MRI-Scanner eingesetzt werden, eine Kombination, die in Zukunft verstärkt zum Einsatz kommen könnte.

Geschichtliche Erkenntnisse durch Ionen

Die Anwendungen der Teilchenphysik beschränken sich jedoch nicht nur auf die Medizin. Selbst Historiker können von gewissen teilchenphysikalischen Verfahren profitieren.

Bei der sogenannten Ionenstrahlphysik werden geladene Teilchen auf mittlere Energien (keV bis MeV) beschleunigt. Eine wichtige Anwendung ist dabei die Radiokarbondatierung. Dabei wird das Verhältnis der Isotope ^{14}C und ^{12}C ausgenutzt, um das Alter eines Gegenstandes zu bestimmen. Das Prinzip: Im Laufe ihres Lebens nehmen Tiere und Pflanzen kontinuierlich das radioaktive Kohlenstoff-Isotop ^{14}C (neben dem normalen Kohlenstoff ^{12}C) aus der Umwelt auf. Nach ihrem Tod versiegt diese Quelle und der Anteil von ^{14}C nimmt gemäss dem radioaktiven Zerfallsgesetz exponentiell ab, wobei die Halbwertszeit ungefähr 5730 Jahre beträgt. Misst man nun den Anteil von ^{14}C in organischem Material, kann der Zeitpunkt des Todes des Tieres oder die Entstehungszeit des Materials (zum Beispiel Holz) bestimmt werden.

Die Radiokarbondatierung ist seit Ende der 1940er-Jahre bekannt. In der Anfangszeit wurde der Kohlenstoff ver-

brannt, um ihn in Kohlendioxid umzuwandeln. Danach konnten die radioaktiven Zerfälle von ^{14}C gezählt werden. Dieses Verfahren ist zwar relativ simpel, hat jedoch einen entscheidenden Nachteil: Es benötigt eine grosse Menge der Probe, um eine hohe Genauigkeit zu erreichen. Hier kommt nun die Beschleuniger-Massenspektroskopie ins Spiel: Bei ihr werden die Teilchen selbst untersucht und man ist nicht auf seltene radioaktive Zerfälle angewiesen. Zuerst werden kleinste Mengen des zu untersuchenden Materials verdampft und ionisiert – für Holz beispielsweise reichen schon 15 bis 30 mg. Die Ionen werden dann beschleunigt und in einem Magnetfeld abgelenkt. Die Beschleunigung durch eine Kammer mit Helium (oder einem anderen Gas) ist nötig, um Moleküle aufzubrechen, die viel häufiger vorkommen als ^{14}C und die

die Messung stören könnten. Die Ablenkung in einem weiteren Magnetfeld nach dem Beschleuniger führt zur Trennung von ^{14}C und ^{12}C . Durch die unterschiedliche Stärke der Lorentzkraft haben die ^{12}C -Atome einen kleineren Radius bei der Ablenkung als die ^{14}C -Atome. Durch die Bestimmung der relativen Häufigkeit mittels Detektoren kann danach das Alter des Gegenstandes bestimmt werden.

Die Radiokarbondatierung wird heutzutage an vielen Orten angewandt: So wurde beispielsweise die Entstehung des Bundesbriefes auf den Zeitraum 1265 – 1295, auf eine Standardabweichung genau, bestimmt. Aber auch viele geologische Untersuchungen greifen auf diese Methode zurück. Das Labor für Ionenstrahlphysik der ETH Zürich hat deshalb vor kurzem ein Projekt gestartet, um kleine Beschleuniger-Massenspektrometer (**Bild 6**) zu entwickeln, die an anderen Universitäten und bei privaten Kunden eingesetzt werden können. Die Idee dabei ist, ein kompaktes Gerät zur Verfügung zu haben, das an Universitäten zum Beispiel für umweltwissenschaftliche Datierungen oder die Datierung von Kunstgegenständen eingesetzt werden kann.

Materialanalysen

Ionenstrahlen dienen nicht nur der effizienteren Datierung von Objekten, sie können auch als Hilfsmittel für Materialuntersuchungen eingesetzt werden. Eine beliebte Methode ist, das zu untersuchende Material mit einem Ionenstrahl zu bombardieren und die dabei entstehende Röntgenstrahlung zu messen (PIXE = Particle Induced X-ray emission). Meistens werden dabei Protonen auf ungefähr 3 MeV beschleunigt und danach zum untersuchenden Sample geleitet. Dort schleu-

Résumé

L'aspect pratique de la physique des particules

Applications pour la médecine et la technique des matériaux

La physique des particules n'a pas attendu la découverte du Boson de Higgs au mois de juillet 2012 pour alimenter toutes les conversations. Non seulement elle fournit des résultats concrets à la recherche fondamentale, mais elle propose également plusieurs applications différentes. En effet, un grand nombre de méthodes et d'appareils conçus pour la recherche fondamentale peuvent être employés par exemple d'un point de vue commercial à des fins thérapeutiques dans le domaine médical (appareils de diagnostic, tels que la tomographie par émission de positons et la radiothérapie destinée aux personnes et aux animaux), ainsi que pour des analyses historiques (datation par le carbone 14 au moyen d'un spectromètre de masse) et relatives à la technique des matériaux (recherche de matériaux étrangers, etc.). Étant donné qu'une multitude d'applications actuelles de la physique des particules repose sur des résultats obtenus il y a des décennies, il est envisageable que les toutes dernières découvertes permettront de trouver plusieurs possibilités d'utilisation supplémentaires à l'avenir.

No

dem die Protonen Elektronen aus den inneren Schalen des Atoms, was zu Röntgenstrahlung führt, die charakteristisch für das jeweilige Element ist. Die Röntgenstrahlung wird danach mit einem Detektor gemessen. Dieses Verfahren kann für das Bestimmen von kleinsten Spuren von Elementen in Materialien verwendet werden, so lange die Elemente schwerer als Kohlenstoff sind. Eine Anwendung ist etwa die Untersuchung von Halbleiterbauteilen: Mit dieser Methode ist es möglich, Materialien zu detektieren, die die korrekte Funktion des Bauteils stören.

Während dieses Verfahren sehr genau ist, hat es doch zwei Nachteile: Einerseits muss die Materialprobe ausreichend klein sein, um in die Analysekommer zu passen, andererseits findet die Untersuchung im Vakuum statt. Dies lässt sich mit der Entwicklung einer neuen Apertur umgehen:

Anstatt den Ionenstrahl im Vakuum auf die Probe treffen zu lassen, wird er durch eine kleine Öffnung von einigen Mikrometern in einer Glaskapillare auf die Probe geleitet. Die Kapillare dient dabei einerseits dazu, den Übergang vom Vakuum zum Umgebungsdruck herzustellen und andererseits, den Ionenstrahl punktgenau auf die Probe zu richten. Die Röntgenstrahlen werden dann wieder mit einem Detektor gemessen.

Mit diesem Verfahren konnte zum Beispiel eine antike Bronzestatue untersucht werden. Bei dieser in Avenches ausgegrabene Statue war nicht klar, ob die Patina von der jahrhundertelangen Lagerung in der Erde kam oder absichtlich angebracht wurde. Mit Hilfe des PIXE-Verfahrens konnte nun erstmals die genaue Zusammensetzung dieser Oberflächenschicht untersucht werden.

Zukünftige Entwicklung

Die meisten heutigen Anwendungen der Teilchenphysik basieren in ihren Grundlagen auf Erkenntnissen, die schon vor mehreren Jahren oder gar Jahrzehnten erzielt wurden. Es ist also durchaus möglich, dass die heutige Grundlagenforschung in der zukünftigen Teilchenphysik eine neuartige Anwendung hervorbringen wird. Vorhersagen lässt sich dies jedoch kaum, und vergangene Prognosen haben sich durchaus als komplett falsch erwiesen. So soll J.J. Thomson, der Entdecker des Elektrons, etwa gesagt haben: «The electron: May it never be of any use to anybody!»

Angaben zum Autor:

Dr. **Michel De Cian** hat an der Uni Zürich in experimenteller Teilchenphysik promoviert und arbeitet als Postdoc an der Uni Heidelberg am LHCb-Experiment. decian@physi.uni-heidelberg.de

Anzeige



Ihre Ansprüche sind unsere Herausforderung

Seit 65 Jahren bauen und unterhalten wir Energie- und Telecommetze sowie Anlagen der Verkehrsinfrastruktur. Mit 600 kompetenten Mitarbeitenden an 20 Standorten sind wir regional verankert und national tätig.

www.arnold.ch

ARNOLD
ENERGIE & TELECOM
Ein Unternehmen der BKW

Feedback, Fragen, Anregungen?

Hat Sie ein Fachartikel inspiriert, neue Perspektiven aufgezeigt oder Ihren Widerspruch provoziert? Gibt es Themen, die zu kurz gekommen sind? Oder sind Sie mit dem Bulletin vollkommen zufrieden? Ihre Meinung interessiert uns.

bulletin@electrosuisse.ch, bulletin@strom.ch

www.bulletin-sev-vse.ch

Bulletin
Fachzeitschrift von Electrosuisse und VSE
Revue spécialisée d'Electrosuisse et de FAES