Zeitschrift: Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg

Herausgeber: Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles

Band: 62 (1973)

Heft: 1

Artikel: Schwere Elektronen und leichte Protonen im Dienst der Naturwissenschaften und der Medizin

Autor: Schaller, L.A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-308494

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

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

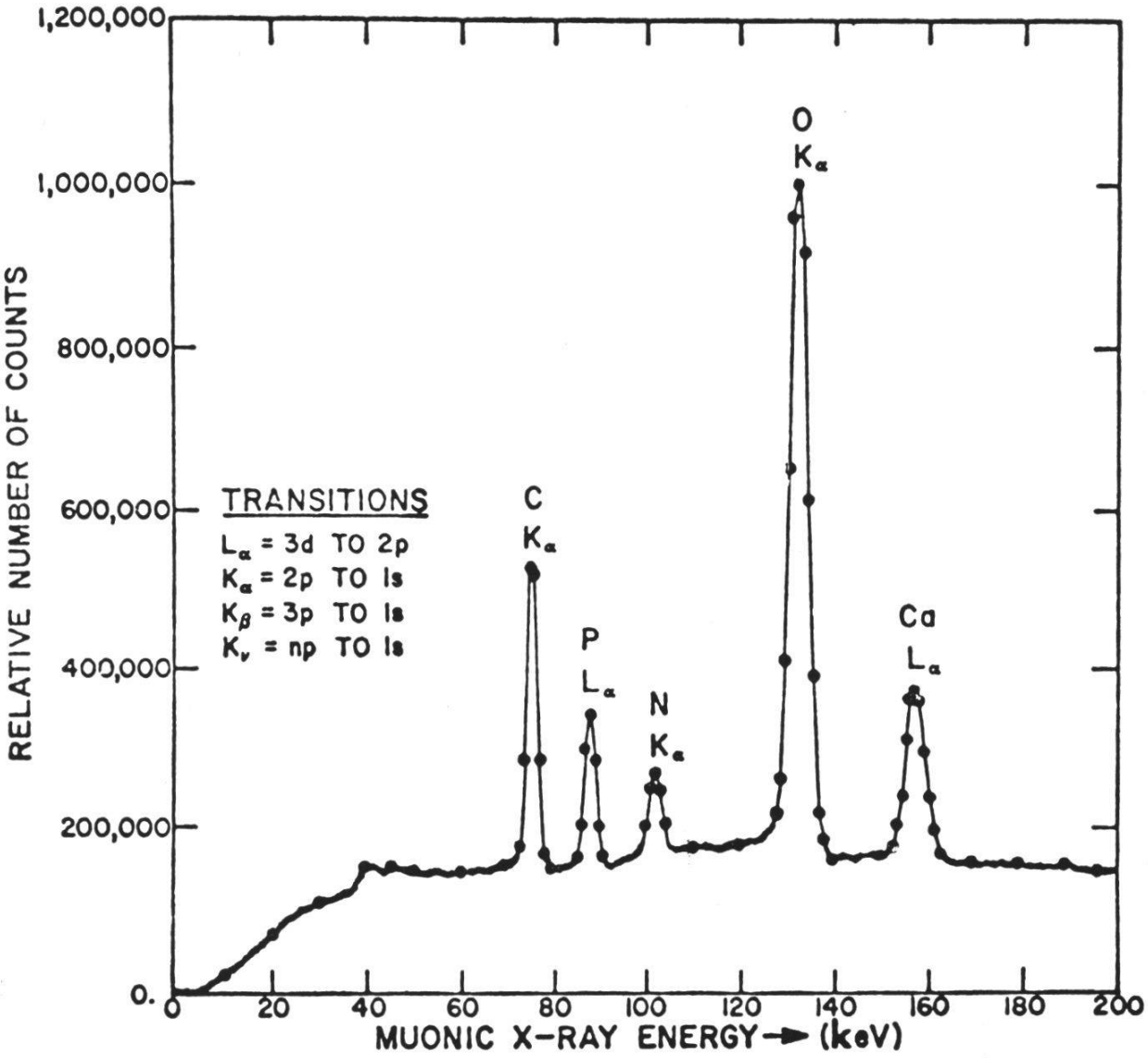
Schwere Elektronen und leichte Protonen im Dienst der Naturwissenschaften und der Medizin

von L. A. Schaller
Physikalisches Institut der Universität Fribourg

Als Ladungsträger der Elektrizität oder als Bestandteil der Atomhülle ist das Elektron wohlbekannt. Auch die Protonen, welche zusammen mit den Neutronen die Atomkerne ausmachen, haben wenig Mysteriöses an sich. Was soll aber ein «schweres Elektron» oder ein «leichtes Proton»? Das erste dieser beiden merkwürdigen Teilchen wurde 1937 von Anderson in derHöhenstrahlung entdeckt. Da es rund 200 mal so schwer ist wie das Elektron, im übrigen aber bis auf seine Instabilität – es zerfällt in $2 \cdot 10^{-6}$ sec in ein Elektron und zwei Neutrinos – sämtliche Eigenschaften seines viel leichteren Partners aufweist, ist es eben nichts anderes als ein «schweres Elektron». Das Myon, wie es heute genannt wird, läßt sich theoretisch noch nicht erklären. Ganz anders ist die Situation beim Pion oder π–Meson, jedenfalls was seine physikalische Existenzberechtigung angeht. Das Pion wurde bereits 1935 vom japanischen Theoretiker Yukawa postuliert, um die Kernkraft zu beschreiben. Aus der sehr kurzen Reichweite dieser Kraft (ca. 10^{-13} cm) läßt sich nämlich auf ein Teilchen einer intermediären Masse zwischen der Elektronen- und der Protonenmasse schließen, welches die Kernkraft gewissermaßen zwischen Proton und Neutron überträgt, sowie das Photon Träger der elektromagnetischen Welle ist. Solche Eigenschaften besitzt nun das Pion. Es ist 270 mal schwerer als das Elektron (oder fast 7 mal leichter als das Proton) und reagiert insbesondere heftig mit den Atomkernen, ganz im Gegensatz etwa zum Elektron oder Myon. Es darf also mit einiger Berechtigung als «leichtes Proton» bezeichnet werden. Wegen seiner kurzen Lebensdauer – das Pion zerfällt in $2.6 \cdot 10^{-8}$ sec in ein Myon und ein Neutrino – wurde es erst zehn Jahre später als das Myon entdeckt. Powell fand es 1947, ebenfalls in der kosmischen Strahlung.

Myonen und π–Mesonen können heute erstmals in reichlichen Mengen in sogenannten «Mesonenfabriken» hergestellt werden. Sie entstehen dabei als Reaktionsprodukte der primär beschleunigten Protonen. Drei solcher Beschleuniger werden in Nordamerika erstellt, nämlich «LAMPF» in Los Alamos, New Mexico, «NEVIS» in Irvington, New York und «TRIUMF» in Vancouver, Canada. Die vierte Mesonenfabrik wird vom Schweiz. Institut für Nuklearforschung («SIN») in Villigen im Kanton Aargau konstruiert [1]. Bei voller Leistung erwartet man ca. 10 Milliarden Pionen und 10 bis 100 Millionen Myonen pro sec, d.h. rund tausend mal mehr als bis jetzt mit Synchrozyklotron-Beschleunigern möglich war. Derartige Mesonenflüsse eröffnen manche Anwendungsgebiete auch ausserhalb der Physik.

Als erste solche Anwendung sei die Chemie mit positiven Myonen erwähnt (μ^+–Chemie). Ein in Materie eindringendes μ^+–Teilchen bildet nach seiner Verlangsamung Myonium, indem es ein Elektron einfängt. Dieses Gebilde

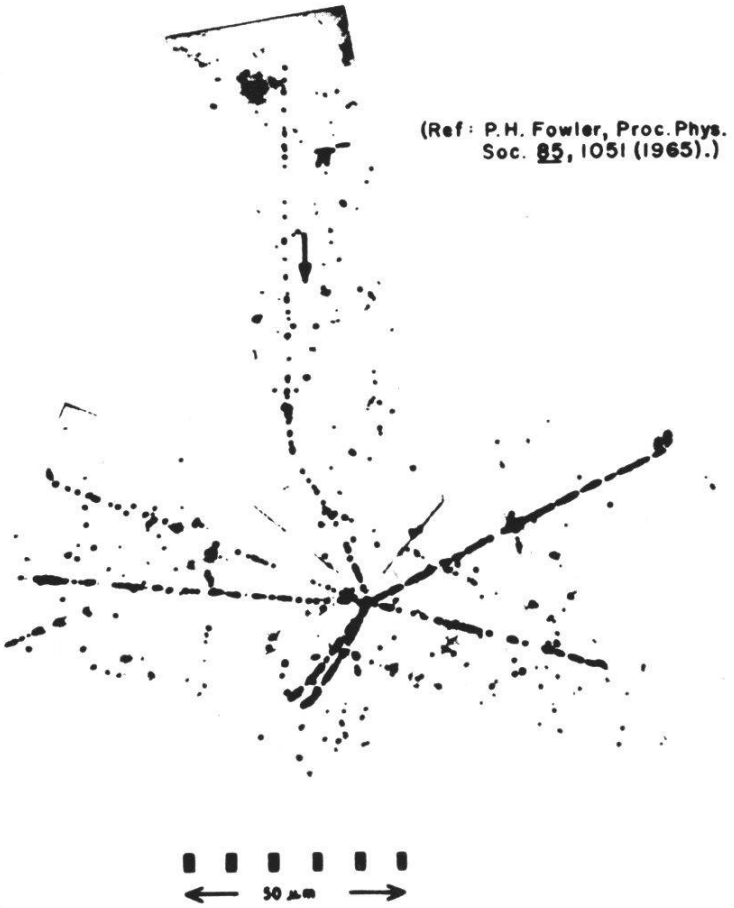


Figur 1: Niederenergetische μ^-–Röntgenlinien von menschlichem Knochen. Das computersimulierte Spektrum basiert auf 1 cm Absorption im Knochen, 5 cm Absorption im Gewebe und einem 30 ccm Ge(Li) γ–Detektor.

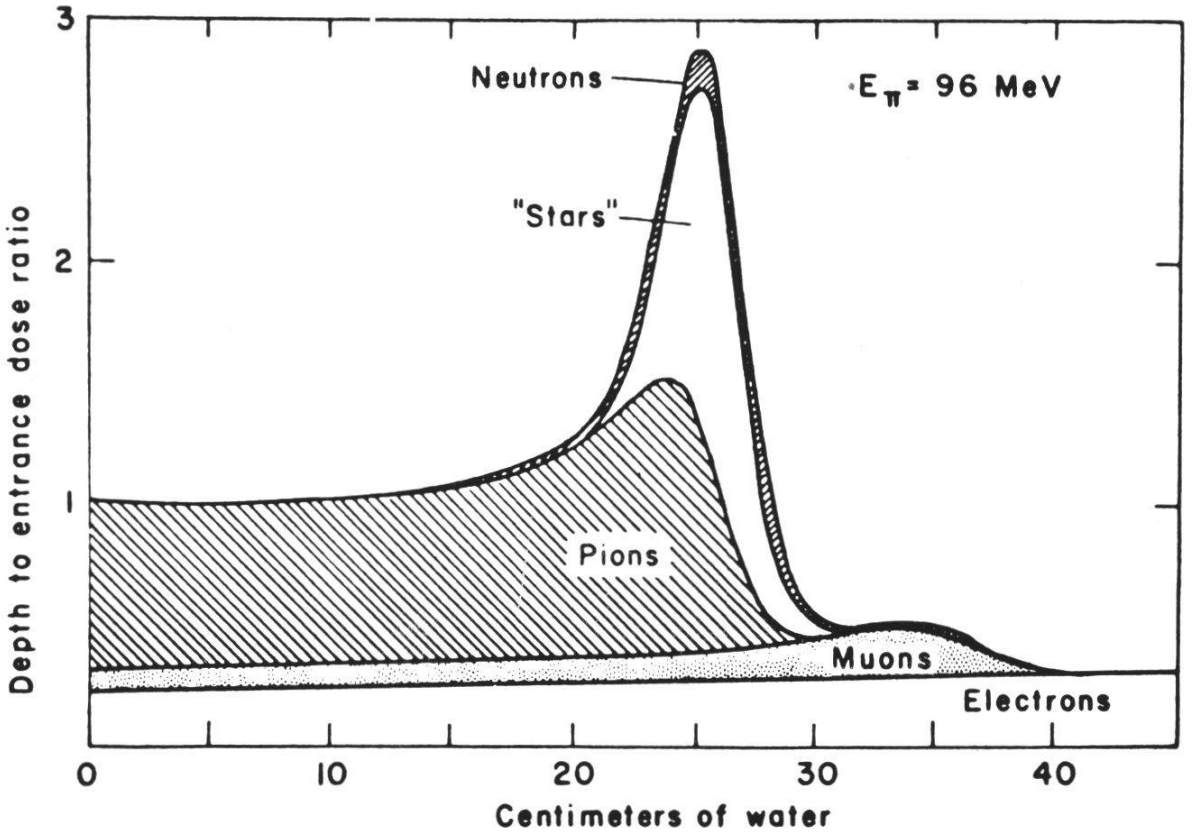
(μ^+e^-) ist im wesentlichen nichts anderes als ein leichtes Wasserstoffatom ($pe^- = H$), also chemisch äusserst reaktionsfähig. Auch negative Myonen können in der Chemie Verwendung finden (μ^-–Chemie), u.z. als Hilfsmittel zur Strukturanalyse [2]. Im Gegensatz zum μ^+–Teilchen wird das μ^- vom Atomkern in eine Bohr'sche Bahn eingefangen, wobei ein Hüllenelektron verdrängt wird. Die Bildung eines solchen «myonischen Atoms» hängt von der chemischen Umgebung ab. Diese Abhängigkeit macht sich in Intensitäts- und Energieunterschieden der nachfolgenden myonischen Röntgenkaskade bemerkbar. Das negative Myon fällt nämlich unter Aussendung myonischer Röntgenstrahlung – genau

wie ein Elektron unter Aussendung gewöhnlicher Röntgenstrahlung – in den energetisch tiefstliegenden Atomzustand hinunter. Werden jetzt die myonischen Anfangsbahnen in verschiedenen Verbindungen verschieden besetzt, so ergeben sich Intensitätsunterschiede in den korrespondierenden μ^-–Röntgenlinien. Energieverschiebungen treten infolge des verschiedenen Abschirmeffekts ungleicher Elektronenwolken auf.

Hat man eine unbekannte Substanz vor sich und stoppt darin negative Myonen, so geben umgekehrt die gemessenen μ^-–Röntgenlinien Aufschluß darüber, welche Elemente in dieser Substanz vorhanden sind, und mit welcher Häufigkeit. Wird dieses Verfahren auf biologische Stoffe angewandt, so führt es zur sogenannten «μ^-–Diagnostik» [2]. Hier würde man mit derselben Technik wie in der μ^-–Chemie Energien und Intensitäten myonischer Röntgenlinien messen und daraus Rückschlüsse auf die Gewebezusammensetzung und den Gewebezustand ziehen. Natürlich kann die Gewebezusammensetzung auch chemisch bestimmt werden, aber nicht am lebenden Subjekt, also nicht «in vivo». Mit den an Mesonenfabriken erhältlichen Myonenflüssen lassen sich selbst die Konzentrationen relativ seltener Körperstoffe wie Eisen, Silizium, Fluor oder Zink in medizinisch vernünftigen Zeitspannen «in vivo» ermitteln, ohne daß die Strahlenbelastung zu groß würde. Was den Gewebezustand angeht, so weiß man z.B., daß bei krebsartigen Geweben Konzentrationsunterschiede von



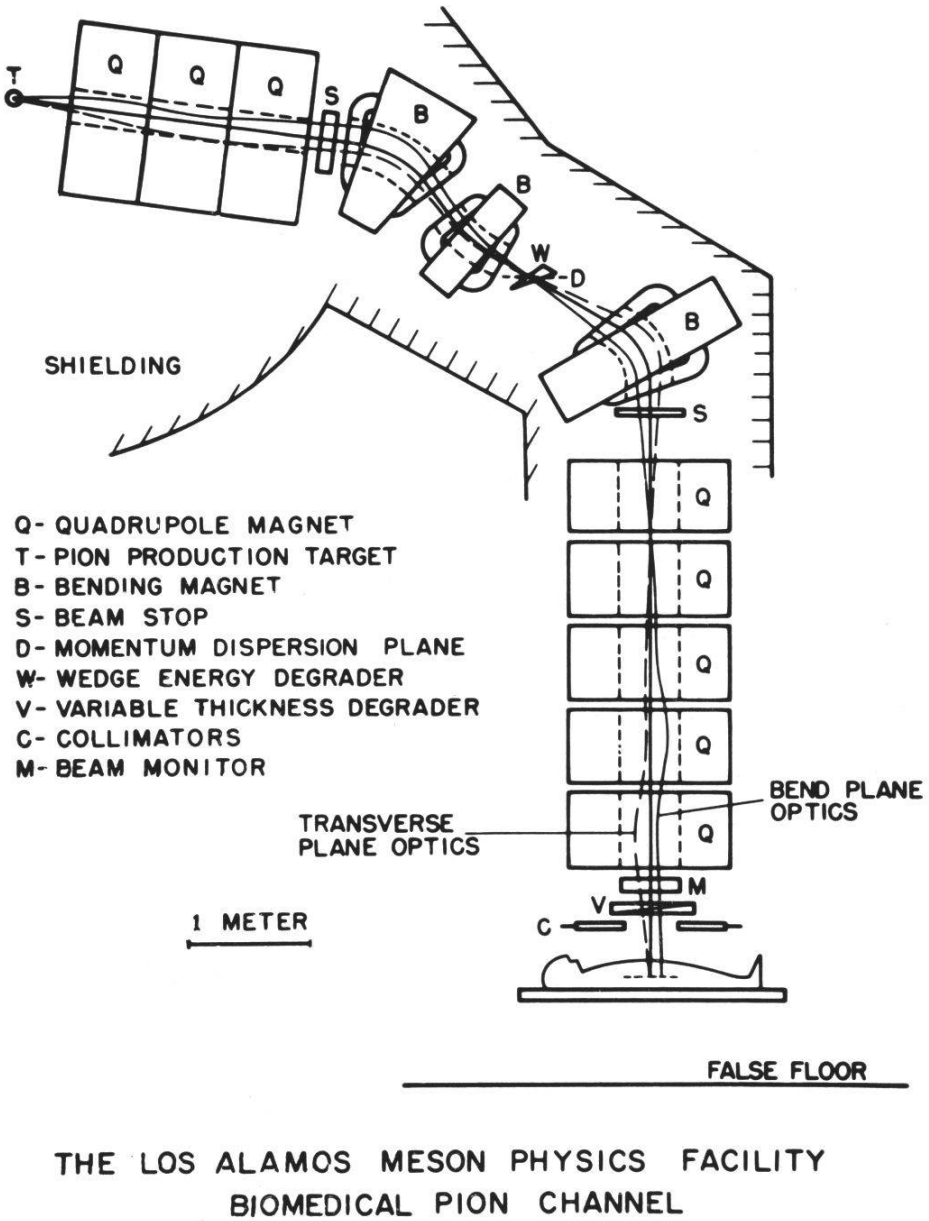
Figur 2:
Zertrümmerung eines Sauerstoffkerns durch ein in photographischer Emulsion zur Ruhe gekommenes π^-–Meson. Der «Stern» besteht in diesem Beispiel aus 6 hochionisierenden Kernbruchstücken.



Figur 3: Dosis versus Eindringtiefe in Wasser für negative Pionen der Einfallenergie 96 MeV. Zum Dosisanteil durch Ionisation (schraffierte Fläche), welcher auch bei den andern Strahlungen vorhanden ist, addiert sich insbesondere der für π^-–Mesonen charakteristische Anteil des «Sterns».

über 10 % gegenüber gesundem Gewebe keine Seltenheit sind. Mögliche Anwendungen der μ^-–Diagnostik sind Knochenuntersuchungen infolge Kalziummangels, insbesondere in Gebieten wie Kopf oder Rückgrat, wo konventionelle Techniken wie γ–Transmission nicht geeignet sind, Bestimmung der Stickstoff-Konzentration in Organen mit schlecht funktionierendem Protein-Metabolismus, Studium der Zusammensetzung kranker Organe während der Behandlungsdauer, anomale Eisenvorkommen in der Leber, Konzentrationsänderungen von Kohlenstoff in Tumoren bei fraktionierter Bestrahlung usw. *Figur 1* zeigt den niederenergetischen Teil eines (vorläufig noch) computersimulierten Knochenspektrums des «Durchschnittsmenschen» nach einer 10 minütigen μ^-–Bestrahlung unter typischen Versuchsbedingungen.

Zur kommerziellen Herstellung radioaktiver Isotope kommen Myonen und π–Mesonen nicht in Frage, dafür umso mehr die hochintensiven Protonenstrahlen der Mesonenfabriken. So können z.B. die beiden Isotope Jod-123 und Gallium–67 erstmals in den von den Nuklearmedizinern geforderten Quantitäten (ca. 4000 Ci ^{123}J und ca. 1200 Ci ^{67}Ga pro Jahr in den USA allein) produziert



Figur 4: Auslegung des gegenwärtig im Bau befindlichen biomedizinischen Pionenkanals von Los Alamos.

werden. Jod–123 soll das bislang verwendete Isotop ^{131}J als diagnostisches und therapeutisches Produkt für Lunge, Leber, Niere und Schilddrüse ersetzen. Gallium–67 dürfte ein sehr wertvolles Agens für eine Reihe vermuteter Krebszentren werden, da es sich in der Form von Ga-Zitrat vornehmlich in Gewebegeschwüren ablagert. Nebenbei bemerkt, auch das heute aus andern Gründen berühmte Isotop ^{197}Au (Gold) könnte in einer Mesonenfabrik hergestellt werden, wobei pro kg Blei und pro Monat 1 Gramm Gold ausfiele!

Was schließlich Pionen betrifft, so gibt es kaum praktische Anwendungen positiver Pionen, dafür umso wichtigere für negative, so π^-–Chemie [2] und v.a.

π^-–Therapie. Die negativen Pionen weisen nämlich die geeigneten Eigenschaften auf, um strahlentherapeutisch eingesetzt zu werden. Dies zeigt sich bei einem Vergleich mit den bisher verwendeten Strahlungen. Die Vorzugsstellung der π^-–Mesonen rührt daher, daß diese Teilchen nach ihrer Abbremsung im Gewebe zunächst wie negative Myonen «pionische Atome» bilden, dann aber, sobald sie in die Nähe des Atomkerns gelangen, mit diesem heftig reagieren. Dabei entstehen hochionisierende, kurzreichweitige Kernbruckstücke, welche im umliegenden Gewebe hohe Dosen lokal deponieren. Man erhält also die stärkste Dosis genau dort, wo sie erwünscht ist, nämlich in der Tumorregion. *Figur 2* zeigt die Zertrümmerung eines Sauerstoffkerns («Sternbildung») durch gestoppte π^-–Teilchen. In *Figur 3* ist die absorbierte Dosis als Funktion der Eindringtiefe negativer Pionen in Wasser aufgetragen. Der dabei benutzte Pionenstrahl des Berkeley Synchrozyklotrons weist relativ hohe μ^-– und e^-–Verunreinigungen auf. Die Dosisüberhöhung am Ende der Reichweite ist aber klar ersichtlich.

Die Mesonenfabriken mit ihren hohen Pionenflüssen bieten nun erstmals Gelegenheit, negative Pionenstrahlen zur Krebsbekämpfung einzusetzen. Dabei können Tumore von 10 bis 2000 ccm Ausdehnung bis zu einer Tiefe von 25 cm auf wenige mm genau bestrahlt werden. Das Problem liegt eher darin, die Krebszentren derart genau zu kennen als derart präzis zu bestrahlen. Die Mesonenfabrik von Los Alamos (LAMPF), welche als erste bereits funktioniert (wenn auch noch mit geringer Intensität), unternimmt gegenwärtig die größten Anstrengungen auf dem Gebiet der biomedizinischen Ausnutzung negativer Pionen. *Figur 4* zeigt die Auslegung des im Bau befindlichen «LAMPF-Medizinerstrahles». Die ersten Patienten dürften in ca. zwei Jahren bestrahlt werden. Mit der Zeit hofft man, bis zu einige Tausend pro Jahr behandeln zu können. Auch der schweizerische Mesonenbeschleuniger (SIN) legt natürlich grosses Gewicht auf π^-–Therapie. So wurde im Mai 1971 in Zürich ein internationaler Kongreß abgehalten, der sich mit derartigen Fragen intensiv befaßte [3]. Mit praktischen Arbeiten am «SIN-Medizinerstrahl» dürfte in ca. einem Jahr begonnen werden können. Abschließend sei noch erwähnt, daß gegenwärtig Studien im Gang sind, wie eine billigere Mesonenfabrik, gerade im Hinblick auf π^-–Therapie, verwirklicht werden könnte.

Referenzen:

1. L. Schellenberg: Das neue schweizerische Kernforschungszentrum Villigen (SIN); Bull. Soc. Frib. Sc. Nat. *59*, 95 (1970).

2. W. Lindt, L. A. Schaller, L. Schellenberg, H. Schneuwly, A. von Zelewsky, R. Engfer und H. K. Walter: Chemische Strukturanalyse mit Hilfe von μ^- und π^-Atomen; Vorschlag No. A–72–04.1 vom 18.1.73 für ein Experimentierprogramm am SIN.

3. Proceedings of the Planning Meeting on Biomedical Applications of the Pion Beam from the SIN 590 MeV Isochronous Cyclotron, Zürich, Mai 1971.