
essentials

essentials liefern aktuelles Wissen in konzentrierter Form. Die Essenz dessen, worauf es als „State-of-the-Art“ in der gegenwärtigen Fachdiskussion oder in der Praxis ankommt. *essentials* informieren schnell, unkompliziert und verständlich

- als Einführung in ein aktuelles Thema aus Ihrem Fachgebiet
- als Einstieg in ein für Sie noch unbekanntes Themenfeld
- als Einblick, um zum Thema mitreden zu können

Die Bücher in elektronischer und gedruckter Form bringen das Expertenwissen von Springer-Fachautoren kompakt zur Darstellung. Sie sind besonders für die Nutzung als eBook auf Tablet-PCs, eBook-Readern und Smartphones geeignet. *essentials*: Wissensbausteine aus den Wirtschafts-, Sozial- und Geisteswissenschaften, aus Technik und Naturwissenschaften sowie aus Medizin, Psychologie und Gesundheitsberufen. Von renommierten Autoren aller Springer-Verlagsmarken.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13088>

Claus Grupen

Neutrinos, Dunkle Materie und Co.

Von der Entdeckung der kosmischen
Strahlung zu den neuesten
Ergebnissen der Astroteilchenphysik



Springer Spektrum

Claus Grupen
Department Physik, Universität Siegen
Siegen, Deutschland

ISSN 2197-6708

ISSN 2197-6716 (electronic)

essentials

ISBN 978-3-658-24825-3

ISBN 978-3-658-24826-0 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-24826-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

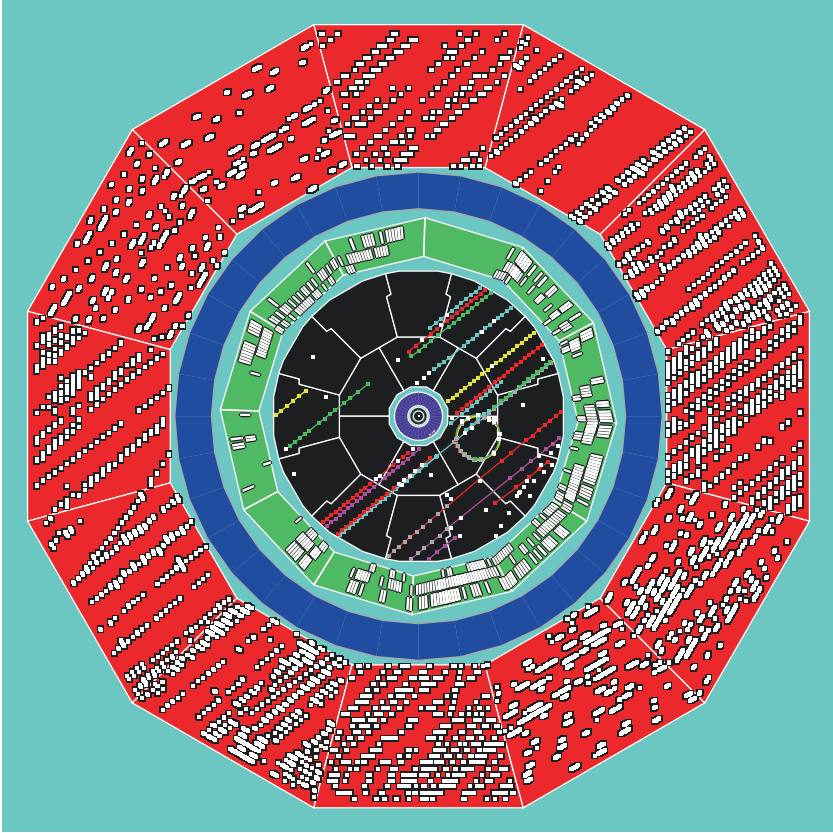
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Was Sie in diesem *essential* finden können

Die Geburtsstunde der Astroteilchenphysik ist die historische Ballonfahrt von Victor Hess im Jahr 1912. Er entdeckte die kosmische Strahlung mit einer Ionisationskammer. Diese kosmische Strahlung wurde in vielen Facetten am Erdboden, unter der Erde und in der Atmosphäre untersucht. Man stellte schnell fest, dass die kosmische Strahlung eine Möglichkeit war, Elementarteilchenprozesse zu untersuchen. Um die ganze Vielfalt der Phänomene in der kosmischen Strahlung zu verstehen, musste man viele Teilbereiche der Physik mit einbeziehen: Thermodynamik, Kernphysik, Plasmaphysik, stellare Physik, Astronomie und Elementarteilchenprozesse, um nur einige zu nennen. Astroteilchenphysik ist also in jeder Hinsicht multidisziplinär. Heute ist die Astroteilchenphysik ein aktives, interdisziplinäres Forschungsgebiet, das Astronomie, kosmische Strahlung und Elementarteilchenphysik umfasst und vereinigt. Sie finden in diesem *essential* einen kurzen historischen Abriss der Astroteilchenphysik und eine Beschreibung der neuesten Resultate, ohne ins mathematische Detail zu gehen. Dieses *essential* ist als Einstieg in dieses neue Forschungsgebiet zu verstehen. Man erhält aber einen Überblick darüber, was sich am Himmel, zwischen den Sternen und zwischen den Galaxien abspielt. Es ist inzwischen schon vieles recht gut verstanden, aber mit jeder gefundenen Lösung tun sich auch neue Fragen auf. Dieses Fragenspektrum mit einigen Antworten finden Sie in diesem *essential*. Eine sehr ausführliche Darstellung der Astroteilchenphysik, einschließlich der mathematischen Beschreibung der Zusammenhänge, insbesondere in der Kosmologie, finden Sie im 2018 bei Springer erschienenen Buch ‚Einstieg in die Astroteilchenphysik‘ von C. Grupen.



Myonenschauer im ALEPH-Experiment in 125 m Tiefe unter der Erde. (Bildnachweis: ALEPH-Experiment, <https://home.cern/about/experiments/aleph>, zugegriffen am 12.09.2018. *ALEPH experiment goes cosmic*, <https://cerncourier.com/1999/09/26/> und <https://cerncourier.com/aleph-experiments-go-cosmic/>, zugegriffen am 12.09.2018. Avati, V. et al. (2003) *Astropart. Phys.* **19**, Sn 513–523, *Cosmic multi-muon events observed in the underground CERN-LEP tunnel with the ALEPH experiment; ALEPH experiment goes cosmic*, <https://www.hep.physik.uni-siegen.de/~gruppen/>, zugegriffen am 01.09.2018)

Vorwort

Was auch immer die endgültigen Gesetze der Natur sein mögen, es gibt keinen Grund anzunehmen, dass sie entworfen wurden, um Physiker glücklich zu machen (Steven Weinberg).

Kosmische Strahlung fällt schon seit der Bildung der Planeten auf die Erde ein. Die Beobachtung von Polarlichtern durch Gassendi 1621 und Halley 1716 als Aurora Borealis („nördliche Morgendämmerung“) führte Mairan 1733 zur Vermutung, dass diese Erscheinung extraterrestrischen Ursprungs ist. Die Polarlichter werden durch von der Sonne kommende Elektronen erzeugt, die entlang magnetischer Feldlinien auf schraubenförmigen Bahnen in die Polgebiete einfallen.

Kant vermutete korrekterweise 1775, dass die am Himmel beobachteten ‚Nebel‘ als Anhäufung von einzelnen Sternen zu Galaxien zu interpretieren seien.

Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts führten Messungen der gerade entdeckten Radioaktivität zu der Annahme, dass nicht alle Phänomene ionisierender Strahlung terrestrischen Ursprungs seien. Den Nachweis von Strahlung aus dem Weltraum erbrachte Victor Hess mit seinem historischen Ballonflug bis in Höhen von über 5000 m. Die so entdeckte ‚Höhenstrahlung‘ stellte sich als Fundgrube für neu zu entdeckende Elementarteilchen heraus: Antiteilchen (Positronen), Myonen, Pionen und Kaonen wurden in Höhenstrahlungsexperimenten gefunden. Durch die aufkommenden Beschleuniger und Speicherringe wurde der Teilchenzoo stark erweitert, bis das Quarkmodell eine überfällige Ordnung schaffte.

Durch die Untersuchung hochenergetischer und seltener Prozesse feierte die kosmische Strahlung – nun mit dem neuen Namen Astroteilchenphysik – eine Renaissance. Die Messung solarer Neutrinos und Neutrino-Oszillationen, die Entdeckung von Gravitationswellen und die gleichzeitige Messung von kosmischen Katastrophen durch elektromagnetische Strahlung, Partikelstrahlung und Gravitationswellen („Multi-Messenger-Astronomie“) lieferte neue Erkenntnisse

über das Universum. Trotzdem gibt es noch viele unbeantwortete Fragen: Wo versteckt sich die Dunkle Materie? Ist die Dunkle Energie eine Eigenschaft des Raumes? Leben wir in einem höherdimensionalen Raum? Und schließlich: Ist unser Universum in ein Multiversum eingebettet?

Siegen
Oktober 2018

Danksagung

Ich bedanke mich bei Dr. Tilo Stroh für eine sorgfältige Durchsicht des Manuskripts und besonders für die prompte und effektive Unterstützung bei den auftretenden \LaTeX -Problemen, die er immer professionell und schnell lösen konnte.

Inhaltsverzeichnis

1	Historische Einführung in die Astroteilchenphysik	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Das letzte Jahrhundert	2
1.3	Beiträge der Elementarteilchenphysik	7
1.4	Renaissance der Astroteilchenphysik und offene Fragen	9
2	Geladene Komponente der primären kosmischen Strahlung	13
3	Röntgenastronomie	19
4	Gammaastronomie	23
5	Neutrinoastronomie	27
5.1	Solare Neutrinos	28
5.2	Supernova-Neutrinos	30
5.3	Hochenergetische Neutrinos	31
6	Gravitationswellen	37
7	Kosmologie	41
8	Astrobiologie	47
9	Ausblick	51
	Literatur	55