

FASZINIERENDE TEILCHENPHYSIK

A BOOK ON THEORIES, EXPERIMENTS AND METHODS ADDRESSED TO A GENERAL PUBLIC

February 28, 2024 | Christoph Hanhart | IKP/IAS Forschungszentrum Jülich

ABOUT THE BOOK



- Idea: January 2020
- Start: April 2020
- Published: September 2023

Part of the series *Faszinierende(s)*
Physik, Chemie, Gehirn

Concept:

- Pair of pages per topic
- As self-contained as possible
- From the elementary to nuclei

MY CO-AUTHORS



Philip Bechtle
Experimental
particle physics
Bonn



Florian Bernlochner
Experimental
particle physics
Bonn



Kristin Riebe
Astrophysics,
outreach
Potsdam



Herbi Dreiner
Theoretical
particle physics
Bonn



Josef Jochum
Experimental
neutrino physics
Tübingen



Jörg Pretz
Experimental,
hadron physics
Jülich/Aachen

FOR WHOM?

- Interested non-physicists 10th grade up
- Teachers who want to learn about the background of what is in their books
- People working in outreach looking for inspiration
- Science journalists asking for background information

CONTENT

Basics

- **The world of particles** What is particle physics ...
- **General foundations** scattering experiments, basics of quantum mechanics ...
- **Experimental foundations** how an accelerator works, interaction matter-particles
- **Theoretical foundations** fermions and bosons, QFT ...
- **Detectors and accelerators** LHC, accel. in medicine, typical detectors,...
- **Basics of data analysis** determination of uncertainties, neural networks ...

Advanced material

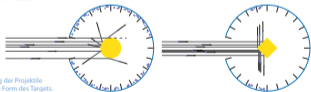
- **The Standard Model** electro-weak interaction, SSB, ...
- **The strong interaction** Confinement, quark mass effect, from nucleons to nuclei, ...
- **Successes of the SM** precision experiments, discovery of W - und Z -bosons, ...
- **Limits of the SM** dark energy and matter, all this an accident?
- **Searches for BSM** space and earth based, supernovae as particle physics labs, ...
- **The connection between the largest and the smallest** birth of a star, baryogenesis, ...

Das Prinzip von Streuexperimenten

Atomares Billard

Streuexperimente sind das Hauptwerkzeug der Teilchenphysik. Ähnlich wie bei einer Kollision zweier Billardkugeln treffen bei einem Streuprozess Elementarteilchen aufeinander. Dabei werden die beteiligten Teilchen abgelenkt oder es entstehen sogar neue Teilchen. Daher erlauben Streuexperimente Rückschlüsse über die Struktur der Materie und deren Wechselwirkungen.

In der einfachsten Variante wird ein zu untersuchendes Objekt, das als **Target** bezeichnet wird, mit Projektilen beschossen. Die Projektile prallen am Target ab. Die Ablenkung der Projektile erlaubt dann Rückschlüsse über die Form des Targets zu ziehen. Die Grundidee kann man an einem einfachen mechanischen Modell verdeutlichen. Wenn Projektile auf ein rundes Objekt treffen, so werden diese in alle Richtungen abgelenkt, wie in der Abbildung gezeigt. Man erhält eine gleichmäßige Verteilung der Projektile, d. h. unabhängig vom Winkel beobachtet man in etwa die gleiche Anzahl von gestreuten Projektilen im Detektor. Für das im Bild gezeigte quadratische Target findet man die Projektile im Gegensatz dazu bei Winkeln $\pm 90^\circ$ gegenüber der Einfallsrichtung der Projektile wieder.

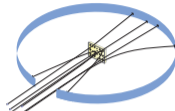


Projektile werden am Target gestreut. Die Winkelverteilung der Projektile erlaubt Rückschlüsse über die Form des Targets.

Grundkonzepte der Quantenmechanik -- S. 40

Auf atomarer Ebene stoßen Projektile und die Teilchen, aus denen das Target aufgebaut ist, nicht wirklich aneinander. Hier gelten die Gesetze der Quantenmechanik (1), so dass Projektile und Targetteilchen durch eine Wellenfunktion beschrieben werden. Ein Streuprozess verursacht dann eine Änderung der Wellenfunktion. Eine Wechselwirkung, die zu einer Streuung führt, findet zum Beispiel aufgrund der elektrischen Ladung der Streupartner statt, und anhand der Ablenkung der Projektile kann man etwas über die Ladungsverteilung der Streupartner lernen.

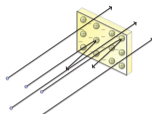
Das historisch bedeutendste Streuexperiment ist das Rutherford-Experiment, das auf Vorschlag Ernest Rutherfords von Hans Geiger und Ernest Marsden durchgeführt wurde. Als Target diente eine sehr dünne Goldfolie, die mit Heliumkernen (α -Teilchen) beschossen wurde. Das überraschende Ergebnis war, dass die meisten der α -Teilchen die Goldfolie einfach ohne nennenswerte Richtungsänderung durchdrangen. Einige wenige wurden aber unter Rückwärtswinkeln beobachtet. Zur Zeit der Durchführung des Experiments hatte man nur eine sehr vage Vorstellung vom Aufbau



Prinzip des Rutherford'schen Streuexperiments

der Atome. Dem Thomson'schen Atommodell zufolge besteht es aus einer gleichmäßig verteilten positiven Ladung. Darin befinden sich negativ geladene Elektronen verteilt wie Rosinen in einem Kuchen, sodass sich insgesamt ein elektrisch neutrales Objekt ergibt. Da die α -Teilchen etwa 7.000 mal schwerer als Elektronen sind, ist es schwer vorstellbar, dass diese für eine Rückwärtsstreuung verantwortlich sind. Rutherford drückte seine Verwunderung darüber so aus: Es ist, als ob man eine Granate auf einen Wattebausch feuert und diese zurückgeschleudert wird.

Daraus schloss Rutherford, dass die Goldfolie größtenteils „leer“ ist, was das ungehinderte Durchdringen der α -Teilchen erklärt. Nur ein kleiner Teil besteht aus Objekten, die viel schwerer als die Projektile sind. Nur so kann man die Rückwärtsstreuung erklären. Ähnlich wie eine Münze nur dann in ihre Ausgangsrichtung zurückgestreut wird, wenn sie bei einem Stoß auf eine viel schwerere Münze trifft. Mit dem Rutherford-Experiment war es möglich, das Thomson'sche Modell auszuschließen und die heute noch gültige Vorstellung vom Aufbau der Atome zu etablieren: Die positiven



Streuung von α -Teilchen an einer Goldfolie

Ladungen sind auf einem sehr kleinem Volumen, dem Atomkern, lokalisiert (1), der auch den Löwenanteil der Masse des Atoms trägt.

In der Teilchenphysik spielen Streuexperimente sowohl zur Untersuchung der Struktur der Targetteilchen als auch zum Verständnis der Wechselwirkung zwischen Projektile und Target eine entscheidende Rolle. So kann man mithilfe von Streuexperimenten das Innenleben des Protons (1) untersuchen und aus der Elektron-Positron-Streuung bei hohen Energien etwas über die Struktur der starken Wechselwirkung (1) lernen.



Eine Ein-Cent-Münze stößt auf eine viel schwerere Münze und wird abgelenkt.

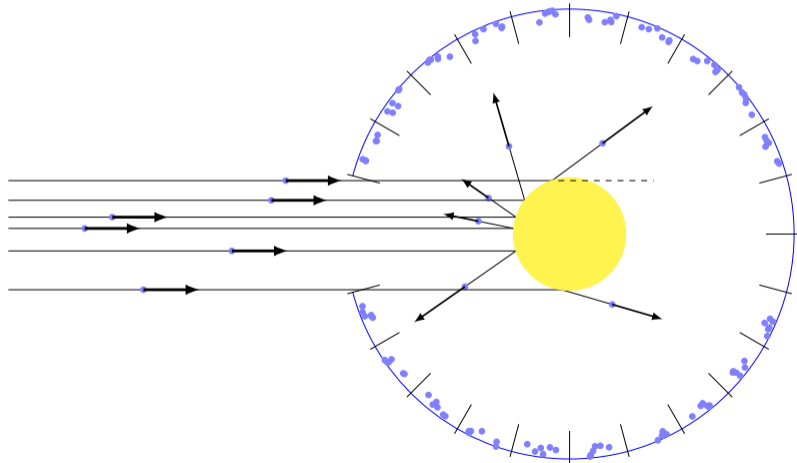
Über die Reichweite von Wechselwirkungen -- S. 54

Die Struktur des Protons -- S. 198

Starke Wechselwirkung: Quantenchromodynamik -- S. 190

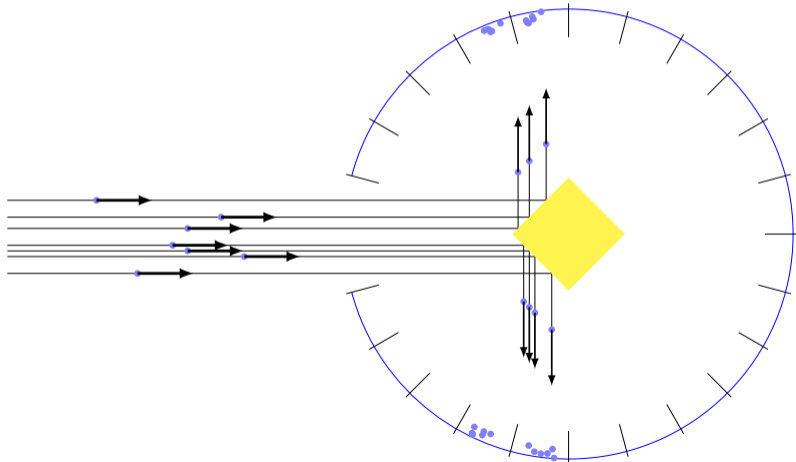
SCATTERING EXPERIMENT

- work horse of particle physics
- Shoot probe on target and deduce structure of the latter from final pattern

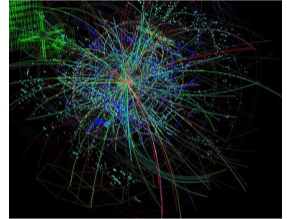
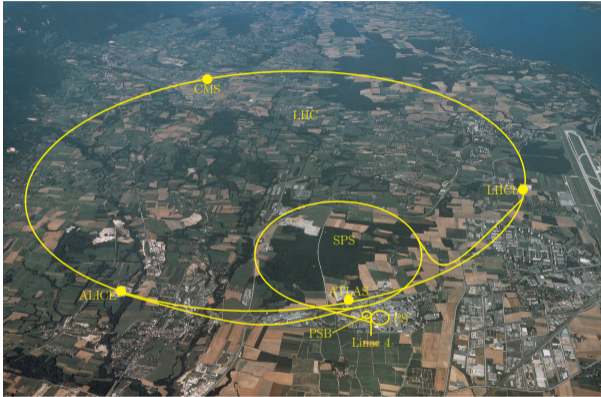


SCATTERING EXPERIMENT

- work horse of particle physics
- Shoot probe on target and deduce structure of the latter from final pattern



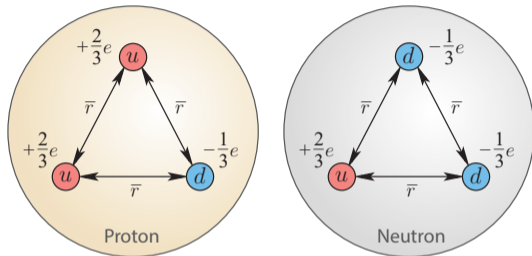
THE LHC - FROM THE *H*-BOTTLE TO COLLISIONS



APPLICATION: PROTON THERAPIE



PROTON-NEUTRON MASS DIFFERENCE



Formulas appear separated!

Energy content of pairwise attraction and repulsion

$$E_{em}^{(ij)} = \frac{\alpha \hbar c}{\bar{r}} (q_i q_j) = M_{em}^{(ij)} c^2$$

with $\alpha = 1/137$ & $\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$.

Typical distance: $\bar{r} \approx 1 \text{ fm}$, such that

$$M_{em}(\text{Proton}) - M_{em}(\text{Neutron}) \approx \frac{\Delta E_{em}}{c^2} = \frac{\alpha \hbar c}{\bar{r} c^2} (q_u^2 + 2q_u q_d - (q_d^2 + 2q_d q_u)) = 0,5 \text{ MeV}/c^2 \approx m_e$$

Proton is stable only, since the up-quark is lighter than the down quark

Der Quarkmasseneffekt

Warum wir den Massenunterschieden der Quarks unsere Existenz verdanken

Quarks sind die Bausteine von Protonen und Neutronen, die ihrerseits die Bausteine der Atomkerne (1) darstellen, die wiederum etwa 10.000 mal kleiner als Atome sind. Das lässt vermuten, dass ihre Eigenschaften keinen unmittelbaren Einfluss auf unsere Existenz haben. Doch weit gefehlt: Das Proton (p) ist etwas leichter als das Neutron (n), und zwar gerade so viel, dass der β -Zerfall (Produktion und Zerfall 1) $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, also der Zerfall eines Neutrons in ein Proton, ein Elektron (e^-) und ein Elektron-Antineutrino ($\bar{\nu}_e$) (schwache Wechselwirkung 1), erlaubt ist. Somit zerfallen freie Neutronen, wohingegen freie Protonen stabil sind. Wäre jedoch das Proton so viel schwerer als das Neutron, dass der umgekehrte β -Zerfall, $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$, energetisch erlaubt wäre, dann wäre das Neutron stabil und nicht das Proton. Da das Neutron aber elektrisch neutral ist, kann es keine Elektronen an sich binden und somit keine Atome bilden. Dann gäbe es keinen elementaren Wasserstoff, kein Wasser und in letzter Konsequenz auch kein Leben, wie wir es kennen.

Aber warum ist das Proton leichter als das Neutron? Die zentralen Bausteine des Protons sind zwei up- und ein down-Quark, während das Neutron aus zwei down- und einem up-Quark besteht (Struktur des Protons 1). Die starke Wechselwirkung unterscheidet nicht zwischen den Quarktypen. Daher muss der Massenunterschied von Proton und Neutron durch Unterschiede in den Quarkeigenschaften bedingt sein. Ein up-Quark hat die elektrische Ladung $+2/3 e$ und ein down-Quark $-1/3 e$, wobei $-e$ die Ladung des Elektrons bezeichnet. Addiert man diese Ladungen jeweils

β -Zerfall des freien Neutrons findet statt, da:

$$M_p + M_e + M_{\bar{\nu}_e} < M_n$$



Vergleich des β -Zerfalls von Neutron und Proton

β -Zerfall des freien Protons findet nicht statt, da:

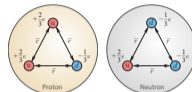
$$M_n + M_e + M_{\nu_e} > M_p$$



zusammen, ergibt sich wie erwartet für ein Proton die Gesamtladung $1 e$ und für das Neutron $0 e$. Im Proton ist also mehr elektrische Ladung auf engem Raum „eingespeert“ als im Neutron. Nun ist es aber so, dass sich gleichnamige Ladungen abstoßen. Daher kostet es Energie, diese Ladungen nahe zusammenzuhalten, und somit bekommt ein Proton von der elektromagnetischen Wechselwirkung einen etwas höheren Energiegehalt als ein Neutron!

Mithilfe von $E = mc^2$ lässt sich diese Energie Differenz in eine Massendifferenz übersetzen, so dass ein Proton schwerer sein sollte als ein Neutron. Detaillierte Untersuchungen, die sich mit einer einfachen Abschätzung bestätigen lassen (siehe Infokasten), haben ergeben, dass die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen den Quarks das Proton ca. $0,7 \text{ MeV}/c^2$ schwerer macht

Von Nukleonen zu Kernen – S. 20
Produktion, Zerstörung und Zerfall von Teilchen – S. 50
Die schwache Wechselwirkung – S. 166
Die Struktur des Protons – S. 198



Modell der Nukleonen

als das Neutron. Wäre dies also die einzige Quelle der Proton-Neutron-Massendifferenz, würde das Proton in ein Neutron zerfallen können, mit den zuvor beschriebenen fatalen Folgen für unsere Existenz.

Verantwortlich dafür, dass das Proton leichter als das Neutron ist, ist die Massendifferenz der Quarks: Da das up-Quark leichter als das down-Quark ist, gibt es einen zweiten Beitrag zur Proton-Neutron-Massendifferenz. Und dieser ist etwas größer als der elektromagnetische Effekt. Wir verdanken somit unsere Existenz der Massendifferenz der leichten Quarks (siehe auch Zufall 1).

Übrigens: Es gilt ganz allgemein, dass die geladenen Teilchen schwerer sind als die ungeladenen, wenn keine weiteren Effekte beitragen. Da geladene und neutrale Pionen (Quarkmodell 1) je gleiche Anteile an up- und down-Quarks bzw. Antiquarks enthalten (für π^+ , π^0 und π^- findet man als Quarkinhalt $u\bar{d}$, $u\bar{u} - d\bar{d}$ und $\bar{u}d$), sind für sie Quarkmasseneffekte stark unterdrückt und das geladene Pion ist daher schwerer als das neutrale. Im Gegensatz dazu ist aber das negativ geladene Kaon (ein $u\bar{s}$ -Zustand) leichter als das neut-

Mathematische Ergänzung: Elektromagnetische Massendifferenz

Die Größenordnung dieses Effektes kann man mithilfe einer klassischen Überlegung abschätzen: Der Mechanismus des Confinement (1) sorgt dafür, dass der mittlere Abstand zwischen den Quarks, \bar{r} , unter $10^{-16} \text{ m} = 1 \text{ fm}$ bleibt. Wir erhalten also eine Abschätzung der vom Elektromagnetismus erzeugten Energiedifferenz zwischen Proton und Neutron, indem wir die Quarks als statische elektrische Ladungen mit relativem Abstand \bar{r} betrachten (siehe Abbildung). Das Coulomb-Gesetz gibt die elektromagnetische (e.m.) Energie zwischen zwei Ladungen q_1 und q_2 an:

$$E_{\text{e.m.}} = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)\bar{r}} (q_1 q_2)$$

Damit ergibt sich für die e.m. Energiedifferenz zwischen Proton und Neutron

$$\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)\bar{r}} (q_u^2 + 2q_u q_d - (q_d^2 + 2q_d q_u)) = \frac{\alpha \hbar c}{3\bar{r}}$$

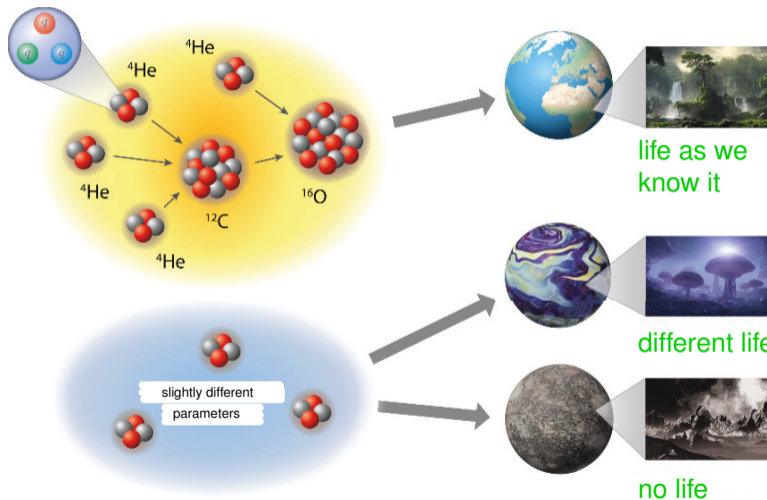
wobei die elektromagnetische Feinstrukturkonstante $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0 \hbar c) = 1/137$ und $\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$ in den sogenannten Umrechnungsfaktor bezeichnen. Für $\bar{r} = 1 \text{ fm}$ ergibt dies einen um $0,5 \text{ MeV}$ größeren Energiegehalt des Protons. Dieser Wert liegt sehr nahe an den $(0,7 \pm 0,3) \text{ MeV}$, die eine aufwändige theoretische Analyse ergeben hat.

rale (ein $\bar{d}s$ -Zustand), da hier die Quarkmasseneffekte nicht nur beitragen, sondern auch größer sind als der elektromagnetische Effekt.

Ist das Leben auf der Erde ein Zufall? – S. 274
Das Quarkmodell – S. 14
Confinement – S. 192



IS LIFE ON EARTH AN ACCIDENT?



Significant **fine tuning**:
slightly different quark mass differences

⇒ dramatically less ^{12}C and ^{16}O production in stars

⇒ **no life** (as we know it)

All an accident?

... OR



- there are "multiverses" and we live in the universe that allows us to
- fundamental parameters are space and/or time dependent and we live in the corner where we can
- there is a more fundamental theory that explains the fine tune parameters
- ...

WHAT IS NEXT?

- The book is available in hard copy and e-book
- English translation should be done in the course 2024



Questions and suggestions highly appreciated: Christoph Hanhart: c.hanhart@fz-juelich.de