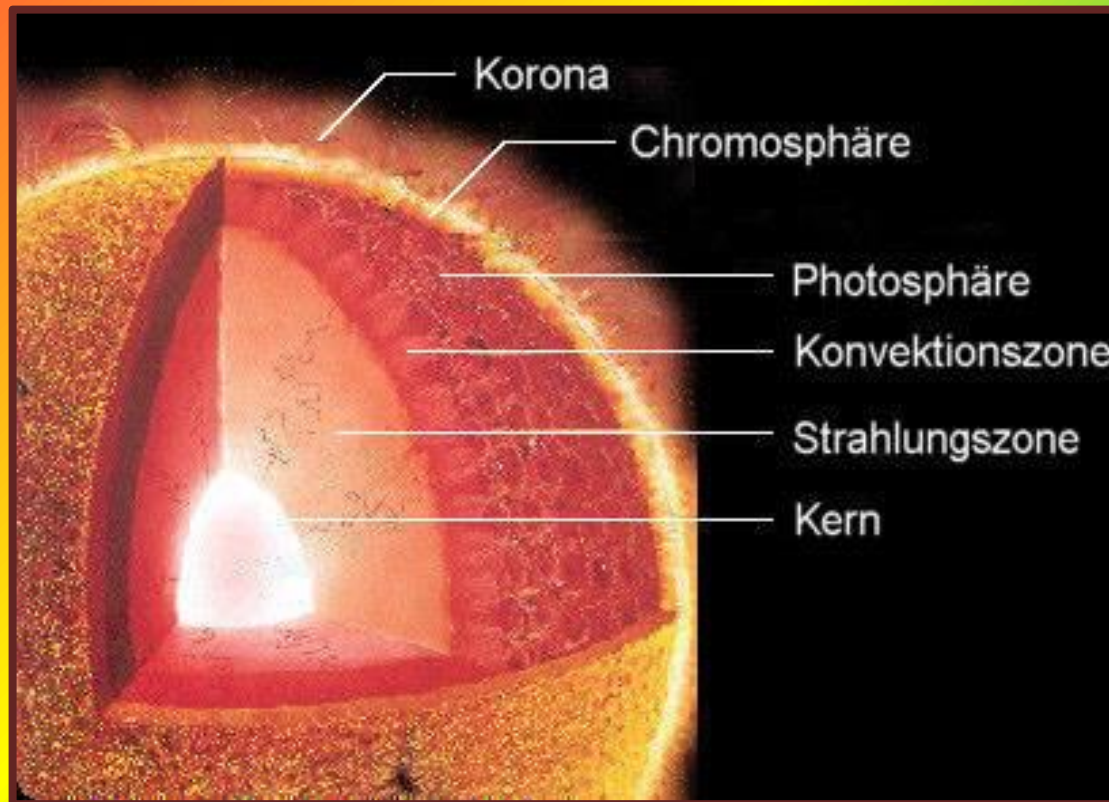


1. Energie der Sonne

1.3. Die Kernfusion

Leichte Kerne verschmelzen zu einem schweren Kern. Dabei wird Energie frei. Diese Prozesse finden im Kern der Sonne statt.



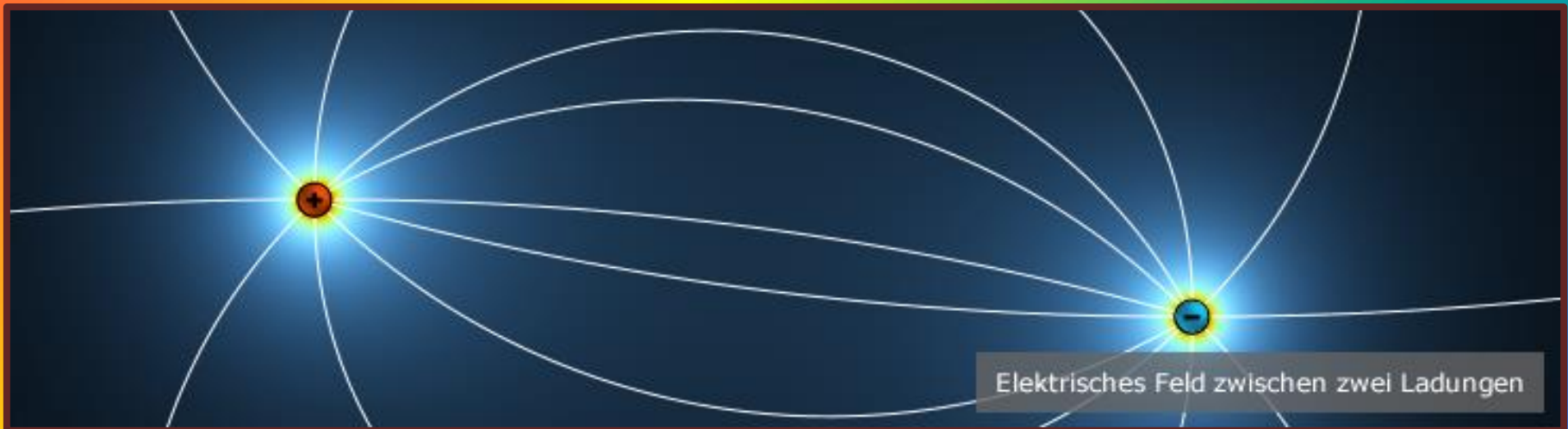
1. Energie der Sonne

1.3 Die Kernfusion

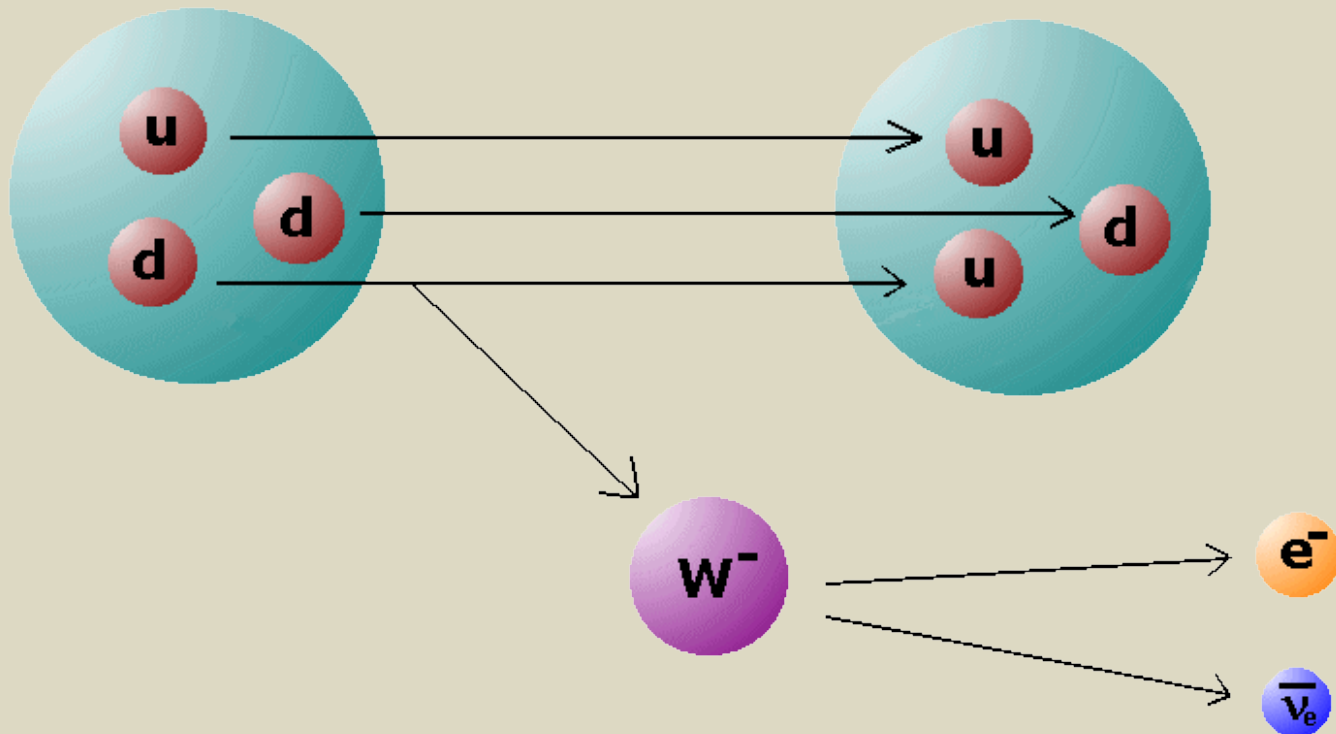
1.3.2. Begriffserklärung

a) Coulombkraft

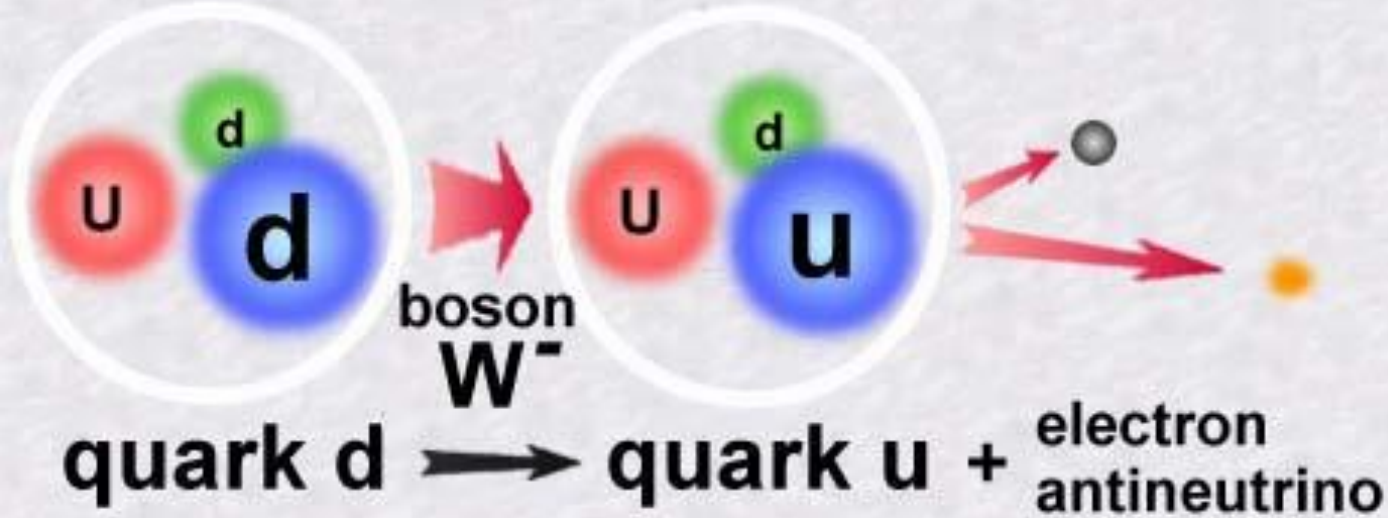
<https://www.youtube.com/watch?v=YaM-PFJCg3I>



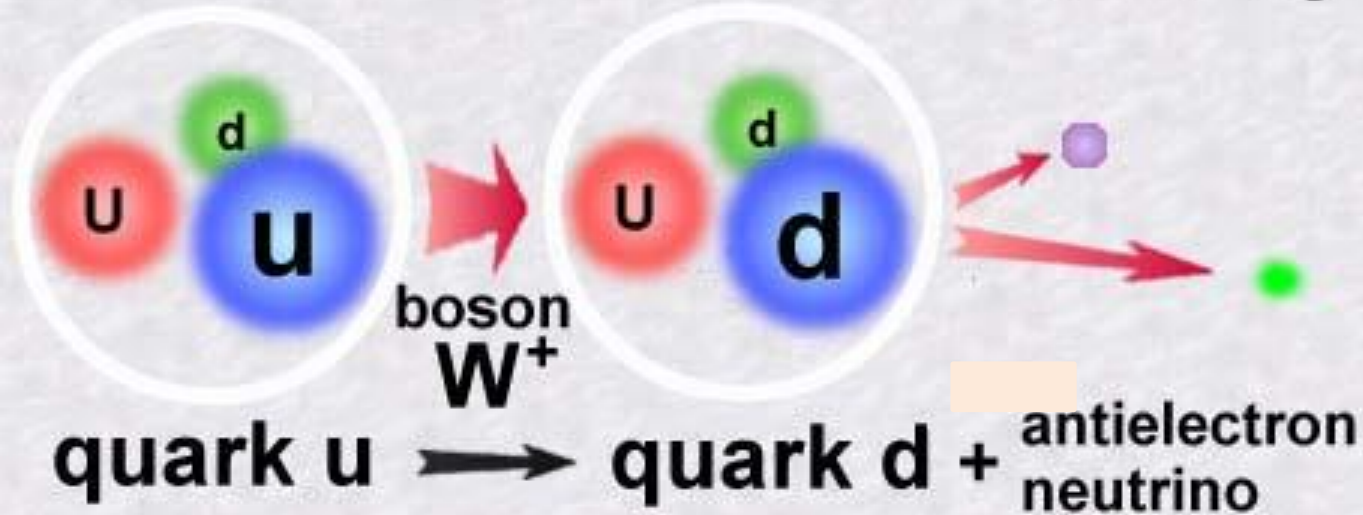
b) Radioaktiver β^- - Zerfall



neutron \longrightarrow proton + e^- + $\bar{\nu}_e$



proton \longrightarrow neutron + e^+ + ν_e



1. Energie der Sonne

1.3 Die Kernfusion

1.3.2. Begriffsserklärung

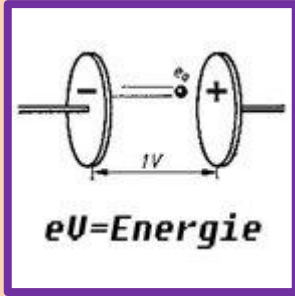
c) Was ist ein Elektronenvolt?

Elementarladung eines Elektrons:

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Einheit der Energie → in Joule angegeben

Das Elektronenvolt, auch Elektronvolt, ist eine Einheit der Energie, die in der Atom-, Kern- und Teilchenphysik häufig benutzt wird. Ihr Einheitenzeichen ist "eV".



1. Energie der Sonne

1.3 Die Kernfusion

1.3.2 Begriffserklärung

Ein Elektronenvolt ist die Energiemenge, um welche die kinetische Energie eines Elektrons zunimmt, wenn es eine Beschleunigungsspannung von 1 Volt durchläuft:

$$1 \text{ eV} = 1,602\,176\,6208(98) \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ J} = 0,62415091 \cdot 10^{19} \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 1 \text{ Megaelektronenvolt} = 1\,000\,000 \text{ eV}$$

1. Energie der Sonne

1.3. Die Kernfusion

1.3.2. Begriffserklärung

d) Primordiales Deuterium

Primordiale Nukleosynthese:

- Vorgang der Bildung der ersten zusammengesetzten Atomkerne kurz nach dem Urknall in der Kosmologie
- Entstehung von Deuterium, Helium sowie Spuren von Lithium
- Entstehung der heute zu beobachtenden schwereren Elemente → aus Fusions- und anderen Kernreaktionen in Sternen → viel späterer entstanden

e) Hauptreihenstern

Hauptreihe:

Sternephase, in der Sterne ihre Strahlungsenergie durch das Wasserstoffbrennen im Kern freisetzen

1.3.3. Bedingung und Verlauf der Kernfusion

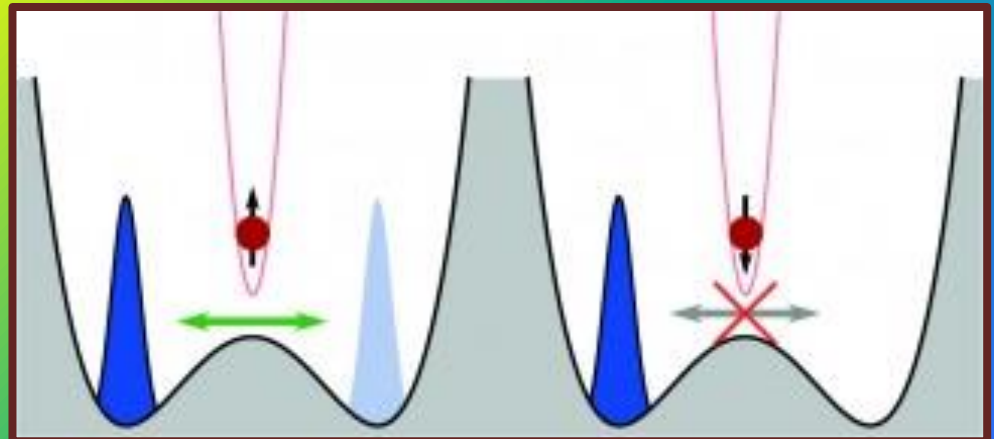
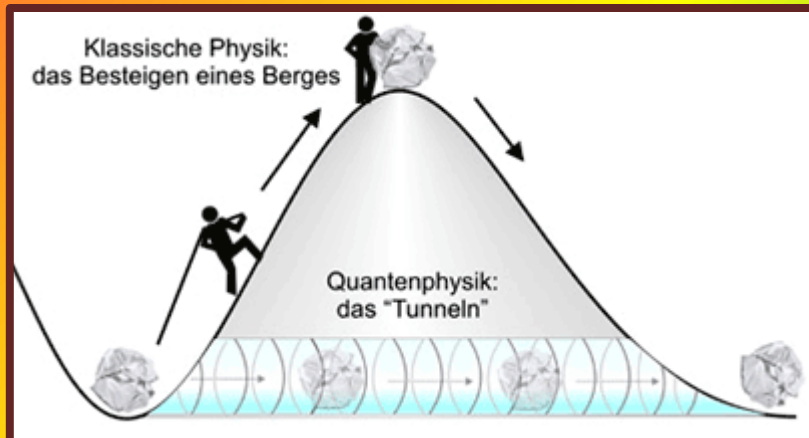
1. Nennen Sie die Bedingungen, unter denen die Kernfusion stattfindet.
2. Nennen Sie die Ausgangsprodukte, die Zwischenprodukte und die Endprodukte, die bei der Kernfusion entstehen.
3. Beschreiben Sie die Rolle des Tunneleffektes bei der Kernfusion
4. Erklären Sie die Reaktionsgleichungen der Proton-Proton-Reaktion.

a) Tunneleffekt – eine Erscheinung der Quantenphysik

- Gesetze der klassischen Mechanik in der Welt der kleinsten Teilchen nicht mehr gültig
- Energieprozesse laufen „in Sprüngen“ ab → Teilchen können also nur konkrete Energiebeträge annehmen
- Eigenschaften der Teilchen wie Elektronen, Protonen oder Neutronen können sich überdecken und sind nicht mehr gleichzeitig exakt mess- und beobachtbar
- Strahlen haben nicht nur Wellencharakter, sondern verhalten sich unter bestimmten Bedingungen wie Teilchen, diese nennt man Photonen

a) Tunneleffekt – eine Erscheinung der Quantenphysik

- ebenso können kleinste Teilchen wie Elektronen Wellencharakter annehmen und z.B. die Eigenschaften der Interferenz zeigen
- Aufenthalt von kleinsten Teilchen nicht eindeutig bestimmbar → Elektronen in der Atomhülle → Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten
- der Tunneleffekt beruht auf diesen Prinzipien



Der Tunneleffekt

Frage: In einem Atomkern befinden sich nur positive Ladungen. Weshalb stoßen sich diese nicht sofort gegenseitig ab und das Atom »fliegt« auseinander?

Antwort: Diese abstoßende Kraft gleicher Ladungen existiert tatsächlich, sie wird als Coulombkraft bezeichnet. Nähern sich Protonen entgegen dieser Kraft jedoch weit genug an (Distanz $< 10^{-14}\text{m}$), beginnen so genannte Kernbindungskräfte (die starke Wechselwirkung) zu wirken, die wesentlich stärker sind als die Coulombkraft, so dass der Kern trotz der abstoßenden Kraft zusammenhält. Nur Protonen, die sich sehr schnell bewegen, können die Coulombkraft (Potenzialwall) überhaupt überwinden und werden im Kern mit aufgenommen. Um Protonen in so schnelle Bewegung zu versetzen, sind Temperaturen, wie sie im Sonnenkern herrschen, notwendig.

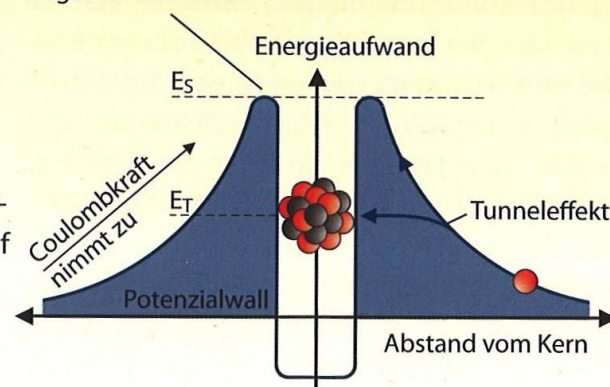
Frage: Warum reagieren dann nicht alle Protonen »auf einmal« zu Heliumkernen?

Antwort: Grundsätzlich reicht die Temperatur im Sonnenkern gar nicht aus, um Protonen so stark zu beschleunigen, dass sie den Potenzialwall überwin-

Die Überwindung des Potenzialwalls ist mithilfe des Tunneleffekts möglich. Beim »Aufstieg« auf dem Potenzialwall nimmt die Coulombkraft zu. Erst auf seinem »Gipfel« beginnen die Kernbindungskräfte zu wirken.

den könnten. Allerdings stellt die Temperaturangabe des Sonnenkerns nur einen durchschnittlichen Wert dar, d.h. es gibt auch Protonen, die sich wesentlich schneller bewegen, als bei einer Temperatur von 15,7 Mio. Kelvin zu erwarten wäre. Genaue Modellrechnungen zeigen jedoch, dass das nur für einige Tausend Protonen in der gesamten Sonne zutrifft. Die Erklärung, weshalb die Fusion trotzdem aufrechterhalten wird, liefert der Tunneleffekt: Einem gewissen Prozentsatz an Protonen gelingt es trotz zu geringer Geschwindigkeit, den Potenzialwall zu »durchtunneln« und sich entsprechend weit anzunähern. Dieser Effekt kann mithilfe der Quantenmechanik erklärt werden. Er ermöglicht eine Heliumfusion bereits ab 5 Mio. K.

Kernbindungskräfte
beginnen zu wirken

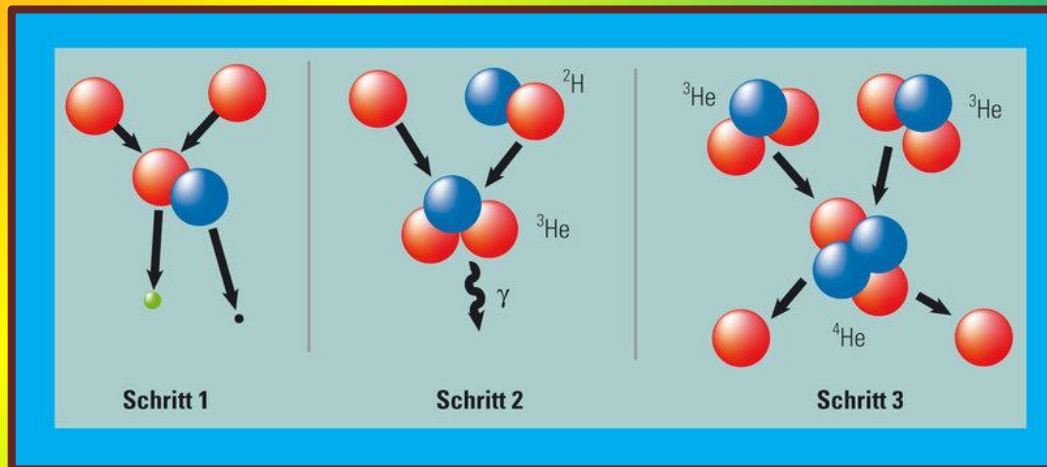


b) Tunneleffekt – Überwindung der Coulombkraft

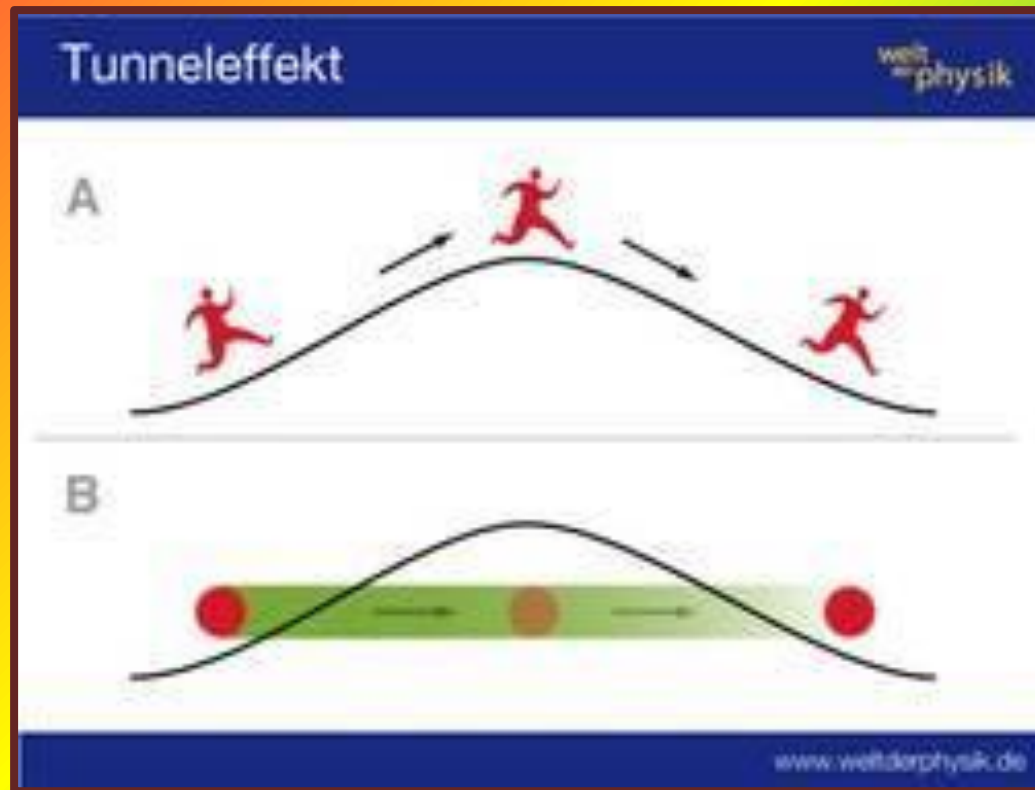
- normalerweise verhindert die Coulombkraft das Aufnehmen eines Protons im Kern
- Kernfusion nur möglich, wenn Coulombkraft überwunden wird → positive Protonen stoßen sich ab
- trotzdem dringen Protonen in fremde Atomkerne ein
- nur Protonen mit einer hohen kinetischen Energie
- die starke Kernkraft hält die Protonen im Kern zusammen → stärker als die Coulombkraft → wirkt im Kern nur in kurzen Reichweiten → dabei geht es um Abstände, die kleiner sind als 10^{-14} m
- dazu Temperaturen von 100 Millionen Grad Kelvin nötig

b) Tunneleffekt – Überwindung der Coulombkraft

- einem kleinen Prozentsatz der Protonen gelingt die Überwindung der Coulombkraft
- Annäherung des Protons an den Kern unterhalb des Spitzenwertes der Coulombkraft → Prinzip des Tunneleffekts
- Voraussetzung für den Tunneleffekt → Mindesttemperatur von 5 Mio K
- Kernfusion kann also in der Sonne schon bei 15 Mio K stattfinden

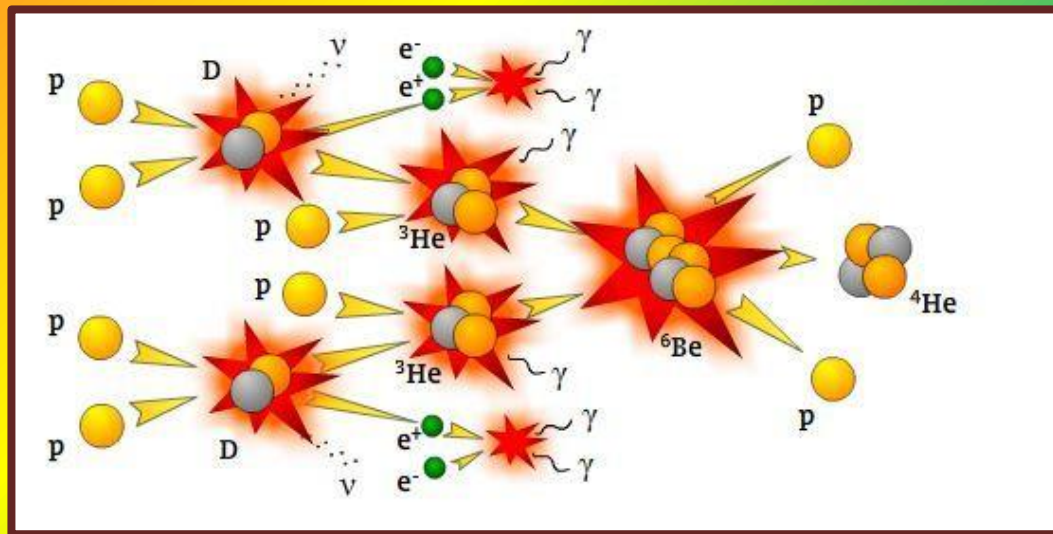


Tunneleffekt

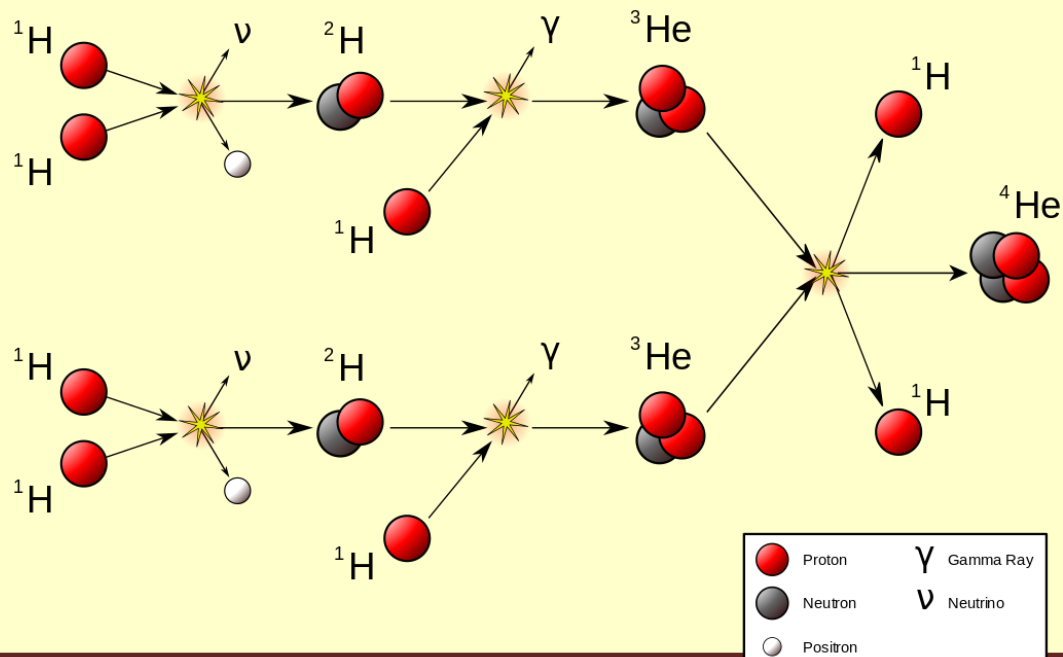
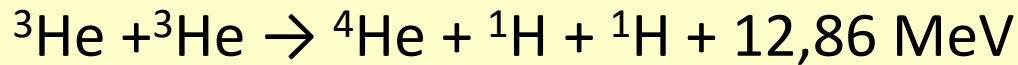
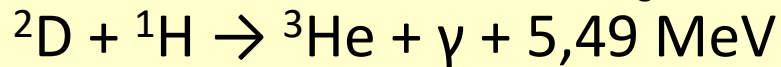
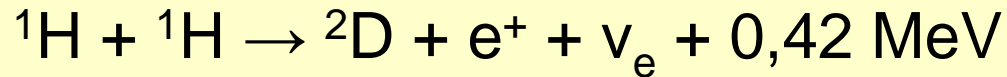


c) Der Proton-Proton-Zyklus:

Proton-Proton-Kette



Die Reaktionsgleichung vom Proton-Proton-Zyklus:

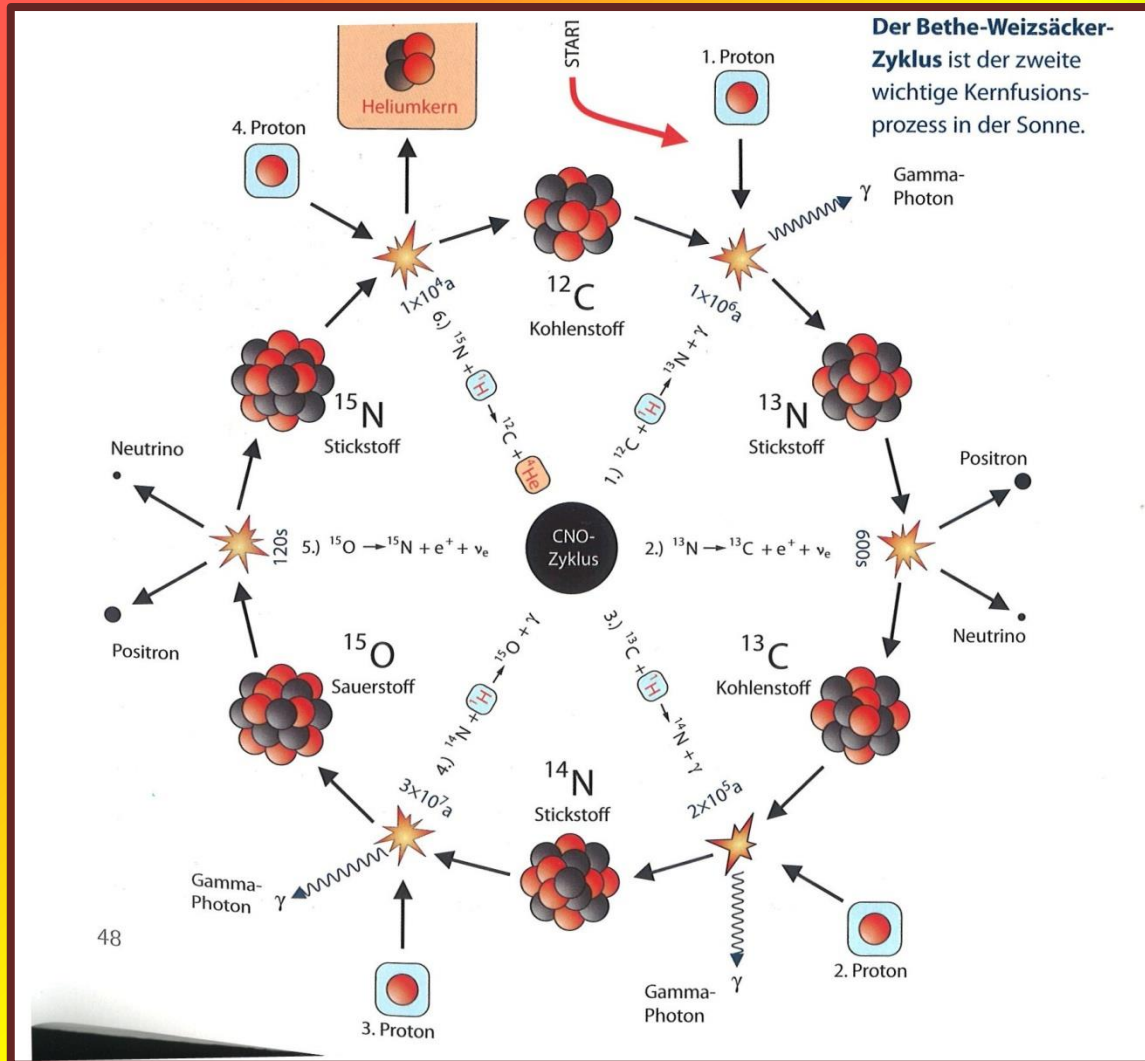


Das Wasserstoffbrennen

In der Zeit als Hauptreihenstern:

- Verschmelzung von primordiales Deuterium und Lithium
- bei schwereren Sternen, z.B. der Sonne, Einleitung einer lange Phase des Wasserstoffbrennens
- Verschmelzung von Protonen, die Atomkerne des Wasserstoffs, unter Energiefreisetzung zu Helium
- hauptsächlich über eine als Proton-Proton-Reaktion bekannte Reaktionskette in mäßig großen Sternen
- bei höheren Temperaturen → Bethe-Weizsäcker-Zyklus vorherrschend

d) Der Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO Zyklus):



Quellen

Literatur: Die Sonne, Eine Einführung für Hobby-Astronomen, Oculum-Verlag GmbH Erlangen, 2009

Tunneleffekt

https://sciencev1.orf.at/static2.orf.at/science/storyimg/storypart_236424.gif

<https://www.cui-archiv.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2016/06/Tunneleffekt-320x141.jpg>

Kernfusion in der Sonne

https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazInternal/News_Stories/Planet_research/Sonne_by_Tavani_fotolia.jpg

Proton-Proton-Reaktion

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/78/FusionintheSun.svg/2000px-FusionintheSun.svg.png>

Pp-reaktioin zu 85% und 15%

<http://www.mpg.de/843703/zoom.jpeg>

Aufbau der Sonne

<https://www.max-wissen.de/331429/original->

[1592578913.jpg?t=eyJ3aWR0aCI6ODAwLCJoZWlnaHQiOiJYwMCwib2JqX2lkIjozMzE0MjI9--b27d3bded279c9c10ee9f9f103672b9b278941bd](https://www.max-wissen.de/331429/original-1592578913.jpg?t=eyJ3aWR0aCI6ODAwLCJoZWlnaHQiOiJYwMCwib2JqX2lkIjozMzE0MjI9--b27d3bded279c9c10ee9f9f103672b9b278941bd)

Sternentstehung

<https://de.wikipedia.org/wiki/Stern#/media/File:Sternentwicklung.png>