

14. Fusion zweier Neutronen zum Deuterium

In unserem Aufbau von der Welt, von dem wie sich das Universum entwickelte und noch heute weiter verändert gehen wir auch bei den Atomen von differenzierteren Modellvorstellungen aus, als es das Standardmodell der Teilchenphysik tut. Darin sind die Objekte, Elektronen, Protonen und Neutronen weder kleine Kügelchen, noch quasi punktförmige Objekte, wie es die Quantenmechanik fordert, noch extrem winzige Strings, die nur mathematisch in aufwendigen Gleichungen erfasst und von einigen wenigen Experten verstanden werden. Form oder Größe scheinen quantenmechanisch keine besondere Rolle zu spielen und auch wie man sich die Massen und Ladungen oder die Massen- und Ladungsverteilung vorstellen soll hat keine vorrangige Bedeutung. Inzwischen betrachtet man solche Fragen eher pragmatisch und spricht nur noch von Wahrscheinlichkeiten ein Teilchen mit seinem Impuls an einem bestimmten Ort zu finden. Teilchen werden durch ihre physikalischen Eigenschaften wie Farbladung, Gluonen und Quarks beschrieben. Dies steht im Einklang zur Mathematik, aber nicht zu irgendetwas konkret Vorstellbaren. So hat beispielsweise ein Teilchen oder besser ist ein Teilchen eine Zustandsfunktion, die selber nichts aussagt, aber deren Betragsquadrat die Ortswahrscheinlichkeit oder auch den Impuls beschreiben kann.

Die Teilchenphysik kennt inzwischen eine Vielzahl von zum Teil äußerst kurzlebigen Partikeln, die allesamt in Teilchenbeschleunigern untersucht wurden und zu denen es eine nur schwer angreifbare zusammenhängende Theorie gibt, mit deren Hilfe sich sehr genaue Voraussagen machen lassen. Doch immer haben wir es mit Protonen, Elektronen oder leichteren Atomkernen zu tun, die gewaltig mit Energie aufgepumpt und dann frontal zum Zusammenstoß gebracht werden. Der Energiewert der Protonen wurde um Größenordnungen erhöht, die Protonenmasse war ein Vielfaches größer, bestand also quasi aus vielen Massebausteinen, ehe sie auf ein anderes viel zu großes Massenobjekt traf. Zwei künstlich erzeugte Massenansammlungen die aufeinander trafen. Dabei fragmentierten die Massenansammlungen wieder zu Einzelobjekten mit den unterschiedlichsten Massen und Eigenschaften. Wen wundert es, dass dabei so viele fremdartige Teilchen entstehen? Wir erschaffen mit riesigen Spulen hochenergetische elektromagnetische Felder, konzentriert auf wenige Protonen und erzeugen damit kurzzeitig künstliche Massen, die so lange

am Proton hängen, wie sie sich fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, also ziemlich abgeschnitten von der Umwelt sind. Dann stürzt alles in sich zusammen und wir sehen ganz kurz diese neu erschaffenen Massen, ehe sie wieder zu dem werden, woraus sie bestehen, Energie.

Allen entstandenen exotischen Teilchen ist gemeinsam, dass sie nicht stabil sind. Wirklich stabil sind nur die Elektronen, die Protonen, Neutronen in Atomkernen und die Atomkerne des Periodensystems. Sämtliche neutralen Atome des Periodensystems der Elemente und einige Isotope davon sind zu unserem Glück dauerhaft stabil. Nicht Neutronen-Atome werden in den Sonnen geschmiedet, die nie eine bunte Welt ermöglicht hätten und auch nicht Atome, die in auffälliger Zahl mehr Neutronen als Protonen haben, so dass nicht genügend Elektronen für eine komplexe Atomhülle blieben. Neutrale Atome und besonders die höheren neutralen Atome haben eine sehr komplexe Hülle, die die vielen chemischen und biologischen Eigenschaften der Atome erst ermöglichen.

In unserem Ansatz bestehen die Protonen und die Elektronen, die beiden wirklich elementaren Teilchen dieser Welt, aus zwei Ebenen der Flächen-Größe R_e^2 , die im Abstand R_e und d_p sich gegenüberstehen. Die Grundgrößen des Raums werden also durch R_e , d_p und die Ebenendicke δ festgelegt. Damit und nur damit muss das Universum auskommen. Will es etwas interessantes erschaffen, dann muss ein sehr ausgeklügeltes komplexes Netzwerk im Hintergrund entstehen, bei dem aus diesen beiden sehr einfach angelegten Bausteinen komplizierte, vielfältige Atome mit den unterschiedlichsten Eigenschaften entstehen.

Wir wollen hier nur zeigen, dass die einfachste Fusion die zum Deuterium auch anders als bisher angenommen ablaufen kann. Dabei spielt unser Ebenenmodell-Ansatz der Teilchen eine entscheidende Rolle. Es müssen dabei die Teilchen nicht tunneln und auch eine starke Kernkraft wird nicht benötigt.

Bisher ging man davon aus, dass das Deuterium auf der Sonne durch die Fusion von zwei Protonen entsteht. Dem Modell liegt die Theorie zugrunde, dass es eine starke Wechselwirkungskraft gibt, die im Nahbereich von 1,4 fm greift und dabei erst anziehend und dann, je näher sich die Teilchen kommen, wieder abstoßend ist. Zwei Protonen benötigen dann mindestens jeweils 250 keV um gegen die elektrische Abstoßung auf eine Entfernung von etwa 3 fm zu kommen. Dann hätten sie den Potentialwall überschritten und würden tief in den energetischen Potentialtopf fallen, in dem sie fortan festsitzen. Die neue

Kraft wird nach der Quantenchromodynamik von Gluonen vermittelt, die zwischen den drei Quarks (up und down-Quarks) hin und her fliegen. Dabei ändern sich unentwegt die Farbladungen immer so, dass insgesamt Weiß entsteht (Farbladung Null). Über die Restladung erklärt sich nun die Anziehungskraft zu anderen Teilchen, wenn sie in die Nähe von etwa 2,5 fm kommen. Mit der starken Wechselwirkung eröffnet sich die neue Welt der Quarks, die dann im Weiteren Grundlage für das Standardmodell der Teilchen ist. Nach dem Quarkmodell gibt es eine ausgeklügelte Substruktur innerhalb der Protonen und Neutronen. Fusionieren zwei Protonen dann wird ein Positron und ein Neutrino abgegeben, so dass wir ein Deuteriumatom erhalten.

Die Temperatur auf der Sonne beträgt im Zentralbereich etwa 15 Millionen Kelvin. Da bei dieser Temperatur die Elektronen noch nicht entartet sind, können wir mittels der Boltzmann-Konstante die kinetische Energie des Plasma-Gases mit etwa 2 keV annehmen. Die Protonen, als auch die Elektronen haben diese kinetische Energie. Das heißt die Elektronen müssen sich wegen der geringeren Masse wesentlich schneller bewegen. Gehen wir zudem davon aus, dass das Gas normalverteilt ist, finden sich auch Teilchenenergien bis hin zu 15 keV. Da die Verteilung aber exponentiell abfällt, wären Teilchenenergien bis hin zu 250 keV völlig unrealistisch.

Hier nun kommt der quantenmechanische Tunneleffekt ins Spiel. Betrachtet man die Position und den Energiewert eines Teilchens statistisch als nur seine Aufenthaltswahrscheinlichkeit, dann kann auch ein größeres Potential, von einer bestimmten Dicke zu einer gewissen statistischen Wahrscheinlichkeit übersprungen oder durchdrungen werden. Passend zum Potential das überwunden werden muss und den besonders energiereichen Protonen, gibt es eine Möglichkeit, bei der entsprechenden Entfernung von einigen pm, auf die nötige Nähe von 3 fm zu kommen. Der Tunneleffekt verschafft uns einen Faktor von etwa 14 und die Gaussverteilung von 8, was dann beides zusammen eine weltliche Bedingung schafft, die nötigen 500 keV zu überwinden (oder für je ein Proton 250 keV). Was trotzdem unbeantwortet bleibt ist die Frage, woher die viele Energie des Deuteriumatoms kommt. Wir brauchen zum einen die große Energiemenge um ein Elektron beim Umwandeln vom Neutron zum Proton zu erschaffen und die kinetische Energie, die das Elektron, das Neutrino und das Deuterium zusammen aufbringen. Insgesamt gewaltige 1,1 MeV je Nukleon. Wir stecken etwa 30 keV an kinetischer Energie in die

Fusion hinein und es werden 2,2 MeV umgesetzt. Das Deuteriumatom hat eine kleinere Masse als die beiden Protonen. Damit scheint sich bei diesem Prozess Masse in Energie umgewandelt zu haben - aber wie? Die Protonen durchtunneln sich gegenseitig mit viel zu wenig Energie und lösen dann einen Prozess aus, der gewaltige Energien aus der Masse der Teilchen abzieht und frei werden lässt. Zwei stabile Protonen finden eine neue gemeinsame Stabilität, ohne dass es einen Grund gibt warum der Ablauf genau so, mit genau diesen Energien abläuft. Woher kommt diese neue Stabilität und warum wird dann ein Elektron überflüssig? Was ist ein Neutrino, welche Bedeutung hat es? Wie kann überhaupt ein Neutron aus einem Proton entstehen und warum werden genau diese Energiewerte beim Betazerfall frei?

Nach unseren Vorstellungen können zwei positiv geladene Protonen, wenn überhaupt, nur unter exotischen Bedingungen eine Verbindung eingehen. Auch kann ein Proton kein Elektron abgeben, wenn es das nicht hat. Was nicht heißt, dass es unter besonderen Umständen nicht zum Beta-Plus-Zerfall kommen kann. Weiter glauben wir nicht, dass eine ganz neue Urkraft extra eingeführt werden muss. Kommen sich ein Elektron und ein Proton so nahe, dass nur noch ein R_e Abstand zwischen den Ebenen liegt, dann haben wir es nicht mehr mit einem kugelsymmetrischen Feld zu tun, sondern dann stehen sich eher zwei Kondensatorplatten gegenüber, als irgendetwas anderes und es gelten andere Gesetze. Kein elektrisches Feld dringt mehr heraus und wir haben eine neue Stabilität, die aus den Grundbedingungen des Raums entsteht und nicht über den Umweg einer neuen Kraftwirkung. Im Bereich von 2,8 fm verhalten sich Elektron und Proton anders als in einem größeren Abstand. Die elektrische Welt für diese beiden Teilchen zu einander ist nur noch eindimensional, weil die Raumstruktur dann in unserem Universum keine Freiheit mehr hat. Die Zustände für den R_e -Abstand (2,8 fm) sind alle verbraucht, die Freiheit liegt nur noch im d_p -Abstand der Ebenen oder der Raumstruktur, die durch die Teilchen bestimmt wird.

Von den Elektronen wissen wir, dass es ein niedrigstes Energieniveau gibt. Wir wissen das, weil ein Elektron sich in einem Atom, im niedrigsten Zustand mit einer Geschwindigkeit von $2,2 \cdot 10^6$ m/s auf einer Bahn a_0 bewegt. Das sind 1/137-stel der Lichtgeschwindigkeit. A_0 und v_0 entsprechen auch der Unschärferelation. Bei einem freien Elektron wäre es nicht

klar, wie groß die Unschärfe ist. Von der Theorie her kann sich ein freies Elektron überall im Raum mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit aufhalten. Erst im gebundenen Zustand erfahren wir etwas über sein niedrigstes Energieniveau und damit über den realistisch wahrscheinlichsten Orts- und Impulsbereich. Diese Unschärfe wird es nach unseren Vorstellungen auch als freies Teilchen haben, wenn es ungebunden durch den Raum driftet. Die Unschärfe ist ein Ausdruck für die vielen nicht vorhersagbaren Verbindungen zu anderen Teilchen doch wissen wir bei einem freien Partikel nichts darüber. Auch beim Proton können wir nicht so ohne weiteres herausfinden, wie groß seine Unschärfe in der Bewegung und im Ort ist. Hier spielt der niedrigste Energiezustand auch beim Atom keine besondere Rolle. Darum erfahren wir auch im Atom nichts darüber. Wir müssen also indirekte Überlegungen anstellen.

Wie wir schon gezeigt haben liegt die Unschärfe des Elektrons im Atom bei a_0 . Dazu gehört eine bestimmte Impulsunschärfe. Gehen wir davon aus, dass die Masse in etwa unverändert bleibt, dann können wir die Impulsunschärfe auf eine Geschwindigkeitsunschärfe übertragen. Wir nehmen weiter an, dass sich die Durchschnitts-Geschwindigkeit aus der elektrischen Anziehung und der Trägheit ergibt. Es zeigt sich, dass sich mit zunehmender Masse, die Durchschnitts-Geschwindigkeit nicht ändert, also das Proton die gleiche Durchschnittsgeschwindigkeit hat, aber auch dabei eine ähnliche Geschwindigkeitsunschärfe haben soll. Anscheinend ist beispielweise das unterste Energieniveau nicht nur gleichbedeutend mit der Unschärfe im Ort, sondern es steht auch im Gleichgewicht zur Zentrifugalkraft durch die Trägheit und zur elektrischen Anziehung. Nur dass jetzt der Drehimpuls noch eine Rolle spielt, der sich nur gequantelt ändern kann. Dahinter steckt nun wieder die Unschärfe aller Dinge. Es zeigt sich, dass die Bahngeschwindigkeit für Elektronen im untersten Niveau bei a_0 liegt. Der Bahnradius ist Masseabhängig, die Bahngeschwindigkeit nicht. Also hätte ein schwereres Elektron eine kleinere Bahn, bei gleicher Geschwindigkeit. Ein Proton hätte eine ähnliche Geschwindigkeitsunschärfe wie ein Elektron, also einen 1836-mal größeren Impuls oder ein um $a_0/1836$ -mal kleineren Ortsunschärfe-Radius als der des Elektrons. Damit hätten wir einen Anhaltspunkt dafür, wie groß die Unschärfe des Protons eventuell allgemein ist. Diese läge dann im Bereich von 27 fm und wäre damit ungefähr 20-mal größer als die Entfernung der starken Kernkraft. Deshalb

benötigen wir nur rund $1/20$ der Energie, nämlich 25 keV, um mit dem Elektron im Unschärfbereich des Protons zu liegen.

Ähnlich wie bei der Hülle gibt es für das Elektron eine stabile unterste Schale im Aufenthaltsbereich des Protons, die einen festen Energiewert hat. Bei 25 keV liegt der Aufenthaltsbereich des Elektrons bei 27 fm. Proton und Elektron könnten dann strahlungsfrei zusammen bleiben. Haben die Elektronen mehr Energie, müssten sie diese, wie bei der Hülle abgeben. Liegt hingegen zu wenig Energie vor, bleiben sie frei. Sie kommen dann dem Proton nicht so lange nahe, dass die Ebenen nur noch einander sehen. Hier gibt es einen Unterschied zur normalen Vorstellung über Ladungen. Ladungen ziehen sich zwar allgemein kugelsymmetrisch an, doch im Bereich der Unschärferelation sind die Sprünge des Elektrons zu groß für eine feste Beziehung zwischen ihnen. Erst bei 25 keV hat das Elektron die richtige Unschärfe für das Proton. Dann liegt die Geschwindigkeit der Elektronen bei etwa $0,3 c$ und mit dieser Geschwindigkeit bilden die Beiden einen Quasi-Neutronen-Zustand. Das gebildete Neutron gewinnt zunächst etwas an Energie.

Eine kinetische Energie von 25 keV statt 2 keV hat zwar nach Boltzmann eine Wahrscheinlichkeit von nur 10^{-11} , jeder 100 Milliardste Stoß wäre groß genug. Es ist ein kleiner Wert, aber nicht unrealistisch, besonders wenn die Dichte im Sternenninnern mit dem hundertfachen von Blei recht groß ist.

Liegen die beiden Teilchen jeweils im Unschärfbereich des Anderen, sitzen sie erst mal fest. Und das gilt nicht nur für das Elektron, sondern auch in gleicher Weise für das Proton. Proton und Elektron bestehen beide aus zwei Ebenen der Flächengröße R_e^2 haben aber einen unterschiedlichen Ebenen-Abstand. Das heißt, auch bei einer Unschärfe des Protons von 27 fm bleibt noch genügend Platz für das Elektron sich innerhalb des Volumens zu bewegen. Befindet sich das Elektron innerhalb der Unschärfe des Protons, bilden sie zusammen nur ein „quasi“ Neutron. Bei den entsprechend hohen Temperaturen in der Sonne, würde es von einem zufälligen aber seltenen Stoß mit mehr als 25 keV wieder herausgeschlagen. Werden sie nicht herausgeschlagen und kommen sich die beiden Ladungen zufällig auf 2,8 fm nahe, dann bilden Sie ein echtes Neutron. Dabei müssen sich die Ebenen nicht nur nahe genug kommen, sondern auch genau gegenüberstehen. Ist das der Fall dann stürzen das Elektron und das Proton nun von R_e aus auf den d_p Abstand. Näher als bis auf den d_p Abstand der beiden Ebenen von Elektron

und Proton können Sie nicht kommen, dafür gibt es keinen Raum. Sie gewinnen dabei 0,78 MeV an Bewegungsenergie. Die Ebenen müssen somit 0,78 MeV an Bewegungsenergie wieder abbremsen und das passiert nicht über die kinetische Energie des Neutrons als neues Ganzes, sondern über eine Verschiebung der Protonenebenen, die etwas zusammengedrückt werden. Damit steigt aber die Masse des Protons oder des Neutrons insgesamt. Das Neutron befindet sich im angeregten Zustand. Trifft das Elektron frontal das Proton bei 2,8 fm gewinnt es eine Energie von 0,34 MeV. Das ist aber keine Energie, die von außen aufgebracht werden muss.

Aus der Sicht eines Neutrons bleibt dieser Quasi-Zustand ungewöhnlich lange stabil. In unserer Zeitwelt dauert er durchschnittlich 15 min, ehe die beiden Teilchen sich wieder trennen. Diese 15 Minuten entfallen hauptsächlich auf den „Qasi-Neutronen-Zustand“. Nach durchschnittlich 15 Minuten oder 10^{20} Verbindungen/Stößen treffen anscheinend die beiden Teilchen zufällig Frontal im Abstand R_e aufeinander. Dann bewegen sich die Beiden beschleunigt aufeinander zu, werden abgebremst und dabei kurzfristig schwerer, ehe sie wieder in umgekehrter Richtung sich ganz voneinander trennen. Das Elektron wird mit 1,1 MeV wieder hinausgeworfen. Dieser Ablauf dauert etwa 1 Minute. Die kleinste Geschwindigkeitsänderung für Elektronen liegt bei $1,7 \cdot 10^{-12}$ m/s, das Elektron trifft bei d_p mit fast Lichtgeschwindigkeit auf das Proton, es braucht also 10^{20} -Schritte ehe es auf null abgebremst ist. Bei 10^{18} Verbindungen zwischen Proton und Elektron je Sekunde dauert dies also 30 s oder hin und zurück 1 Minute. Die Energiebilanz sähe dann ausgewogen aus. Es wird gleich viel Energie frei, wie reingesteckt wurde. Nach diesem Ansatz sollte es mehr Neutronen geben, als nach dem Sonnenmodell erwartet. Die Zahl der kurzzeitig entstandenen Neutronen läge wesentlich höher.

Treffen nun in dieser einen Minute zwei Neutronen aufeinander, die beide im „echten“ Neutronenzustand stecken, dann erfolgt eine Umformung bei der nur eines der beiden Elektronen wieder abgegeben wird, der Rest aber stabil bleibt. Für zwei Neutronen oder einem Neutron und einem Proton sollte es viel leichter möglich sein sich nahe zu kommen, da beide Teilchen von ähnlicher Ortsunschärfe sind. Neutronen haben keine Ladung nach außen, die Unschärfe ist zudem nur von der Masse und der Geschwindigkeit abhängig. Weil das Neutron im richtigen Zustand ladungsfrei ist, kann es dem Proton oder einem anderen Neutron ungewöhnlich nahe kommen, ehe die Beiden aufeinander reagieren. Wahrscheinlich reagieren sie erst, wenn sie sich im

Bereich von 2,8 fm befinden. Dann liegt wieder eine eindimensionale Verbindung vor. Das Elektron vom Neutron sieht das Proton wieder wie einen Kondensator und beide Teilchen ziehen sich an. Dabei müssen 0,78 MeV an Energie verarbeitet werden. Vermutlich wird die Energie kurzfristig in einer Stauchung der Ebenen gespeichert, also auch in einer Massenzunahme. Wird die Energie wieder frei gegeben, so kann das leichte Elektron außen die Bindung gut verlassen, die beiden schweren Protonen, auf jeder Seite des zweiten Elektrons aber nicht. Das entstandene Deuteriumatom kann deshalb seine Energie nur in Bewegungsenergie umsetzen. Für die verbleibenden drei Teilchen müsste wenn, dann eine Energie von 2,2 MeV aufgebracht werden, um sie von einander wieder zu trennen. Um diesen Betrag sind sie auch entsprechend leichter als Protonen und Elektron einzeln.

Ein unter normalen Bedingungen erzeugtes Neutron zerfällt nach etwa 15 Minuten. Das Elektron hält sich überwiegend im Abstand von 27 fm auf, ehe es erst verschluckt und dann mit großer kinetischer Energie wieder abgegeben wird. Die Chance dabei auf ein zweites Neutron zu treffen ist fast ausgeschlossen. Im Zentralbereich der Sonne sieht das schon anders aus. Hier ist die Dichte sehr hoch. Es werden permanent Neutronen erzeugt und die Chance, dass ein Neutron mit verschlucktem Elektron zufällig genau von einem anderen Neutron oder einem Proton mit der richtigen Position (Ebenenfrontal) gestoßen wird ist viel höher. Freie Neutronen sind nicht stabil, sie werden schwerer als Protonen und Elektronen einzeln und es gibt eine Möglichkeit, sich wieder voneinander zu trennen. Also zerfallen sie. Für zwei gebundene Neutronen besteht die Möglichkeit, nur ein Elektron abzugeben. Dann wird es für die verbleibenden Teilchen wesentlich schwieriger sich voneinander zu trennen. Die Teilchenmasse nimmt ab, die Ebenen entspannen sich und das ganze Deuterium-Atom gewinnt kinetische Energie. Damit hat es eine sehr hohe Bewegungsenergie, ist aber im Innenaufbau nun stabil. Bei der Fusion zum Deuterium-Atom, haben wir nicht einen Prozess, bei dem kurzfristig Energie aufgenommen und dann wieder frei wird, sondern diese komplizierte Verbindung verwandelt innere Energie in äußere Bewegungsenergie. Der angeregte Zustand der Partikel im Deuterium kann seine Energie durch Strahlung, Bewegungsenergie und auch durch ein Neutrino für die Erhaltung der Leptonenzahl wieder loswerden. Was im Umkehrschluss dazu führt, dass das Deuterium dauerhaft stabil ist.

Was hat es nun mit dem Neutrino auf sich? Die Quantenmechanik sagt uns, dass bei jedem Beta-Zerfall ein Neutrino entsteht. Beim Beta-Plus-Zerfall ein Neutrino und beim Beta-Minus-Zerfall ein Antineutrino. Messungen der Sonnenneutrinos haben nun eindeutig Neutrinos nachweisen können, die auf einen Protonenzerfall und den zugehörigen Neutrinos verweist, also keine Antineutrinos, die bei der Neutronenbildung frei werden. Was dabei allerdings auch eindeutig und sehr auffällig ist, nur rund 50% der Sonnenneutrinos werden empfangen. Mindestens die Hälfte der prognostizierten Neutrinos fehlt.

Wir vermuten nun folgendes. Immer wenn der Raum von 3-Dimensionen auf eine Dimension umklappt wird das vom Netzwerk registriert. Es entsteht ein ladungsloser Impuls der vielleicht mit einer Leptonenladung in Verbindung gebracht werden kann und der einen positiven oder negativen Drehimpuls haben kann. Dieser Puls ist das was wir messen können und als Neutrino oder Antineutrino benannt wird. Bildet sich also aus dem Elektron und dem Proton kurzzeitig ein Neutron, so wird ein positiver Puls abgegeben, das ist das Neutrino was auf der Erde gemessen wird. Springt anschließend das Elektron wieder aus der Verbindung heraus, haben wir einen negativen Puls, dem Antineutrino. Neutrino und Antineutrino heben einander auf. Auf der Erde messen wir aber nur die Neutrinos, denn für die Antineutrinos von der Sonne, die andere Hälfte der Ereignisse, sind die Apparate nicht eingerichtet.