

Wär nicht das Auge sonnenhaft,
die Sonne könnt es nie erblicken.

Johann Wolfgang v. Goethe (1749–1832)

Liebe Leserin, lieber Leser,

vor 130 Jahren, am 2. Februar 1892, erblickte im Thüringischen Sonneberg Cuno Hoffmeister das Licht der Welt. Der Sohn eines Spielwarenfabrikanten war ein begeisterter Himmelsbeobachter. Nach dem 1. Weltkrieg richtete sich der Autodidakt im Elternhaus eine Privatsternwarte ein. Er, der 1920 sein Abitur nachgeholt hatte, studierte in Jena Astronomie und betrieb, kaum dass er wieder in seiner Heimatstadt ansässig war, die Gründung einer städtischen Sternwarte. Unterstützung kam von der Carl-Zeiss-Stiftung. 1925 konnte das Observatorium auf dem Erbisbühl (638 m) eröffnet werden. Er blieb bis zu seinem Tode im Januar 1968 Direktor „seiner“ Sternwarte, welche zwischenzeitlich an die Universitätssternwarte Berlin-Babelsberg angegliedert war. Das Hauptarbeitsgebiet war die systematische fotografische Suche nach veränderlichen Sternen und deren Erforschung. (Man erfährt mehr über das Wesen eines Dinges, ist es veränderlich.) Die Sternwarte Sonneberg mauerte sich zu einem Weltzentrum der Veränderlichenforschung. Einige der hier entdeckten Veränderlichen machten Schlagzeile, so der von Hoffmeister 1936 entdeckte HZ Herculis. 1977 registrierte der UHURU-Satellit an jener Stelle des Himmels die Röntgenquelle Her X-1 – einen Röntgendoppelstern. Daneben galt Hoffmeisters Interesse den leuchtenden Nachtwolken, den Meteoren und der interplanetaren Materie.

Vor 80 Jahren, Ende Februar 1942, die Sonne war befleckter als in den Vormonaten – zwei Jahre vor dem 1944er Minimum der Sonnenaktivität –, entdeckte der vormalige Röntgenphysiker und kriegsbedingte Radarspezialist, der Engländer James Stanley Hey (1909–2000), im m-Bereich die Radio-sonne. Was als willentliche¹ Störung des Radars durch Feindeinwirkung betrachtet wurde, entpuppte sich als natürlichen Ursprungs. Im Februar und

¹Am Morgen des 12. Februar 1942 waren die beiden deutschen Schlachtschiffe Scharnhorst und Gneisenau sowie der Kreuzer Prinz Eugen auf ihrer Fahrt von Brest nach Kiel durch den „English Channel“ (Unternehmen Cerberus) nahezu unbehelligt, jedenfalls unentdeckt vom britischen Küstenradar geblieben. Diese Schlappe für die Seefahrernation aufzuklären war Heys Aufgabe.

März 1942 ließ die Sonne noch einmal ihre Muskeln spielen. Am 1. Februar war eine zunächst kleine Fleckengruppe gesichtet worden, die im Laufe der Zeit enorm an Größe zunahm und über zwei Sonnenrotationen hinweg verfolgt werden konnte. Die beiden Hauptflecke unterschiedlicher magnetischer Polarität werden als ungewöhnlich dunkel und überdurchschnittlich magnetisch beschrieben. Am 28. Februar ereignete sich dann eine gewaltige chromosphärische Eruption. Am 1. März tobte ein geomagnetischer Sturm, der den Funkverkehr weltweit lahm legte.

Beim Versuch, aus der Radarverfolgung anfliegender V2-Raketen, auf den Einschlagort zu schließen, entdeckte Hey Radarechos von Meteorspuren. Damit begann die Erforschung der Tageslicht-Meteorströme mittels Radioechos. Im Februar 1946 schließlich stießen Hey und Kollegen, die sich inzwischen der Radioastronomie verschrieben hatten, auf die erste extragalaktische Radioquelle, die Radioquelle Cygnus-A.

Im Nachkriegsdeutschland begann das „wissenschaftliche“ Abhören der Sonne im Radiofrequenzbereich 1953, und zwar nahezu gleichzeitig am Heinrich-Hertz-Institut in Berlin-Adlershof und auf dem Gelände der Sternwarte in Babelsberg durch Herbert Daene (1906–1975). Wegen der Störungen durch die Nähe der Großstadt wurde die solare Radioastronomie im m-Bereich bald nach Trensdorf, südlich von Potsdam, verlagert.

Vor einem Vierteljahrhundert, am 20. Februar 1997, kam die NASA²-Sonde Galileo dem Jupitermond Europa auf 586 km nahe und übermittelte fantastische Ansichten des Eismondes. Um die Europa nicht mit irdischen Lebensspuren zu kontaminieren ließ man Galileo am Ende der Mission (2003) gezielt in den Jupiter stürzen. Die Suche nach aquatischem Leben unter dem Eis steht nach wie vor auf der Agenda von Raumfahrtorganisationen. ESAs „JUICE“ (JUpter ICy moons Explorer) soll nächstes Jahr auf die Reise gehen, die NASA folgt im Jahr darauf mit dem „Europa Clipper“.

Was wäre die Astronomie ohne Licht? Es war die visuelle Wahrnehmung, der Gesichtssinn, der dem Menschen das Überirdische erschloss. Dass die Sonne „laut“ ist, hören wir nicht (auch wenn Goethe den Erzengel Raphael im „Faust“ Gegenteiliges behaupten lässt), wir sehen es. Doch was ist Licht? Im Februar 1672, vor 350 Jahren, teilte Isaac Newton (1643–1727) der gelehrten Welt brieflich mit, weißes Licht setze sich aus allen Farben des Regenbogens zusammen. Außerdem spricht er von Korpuskeln, Lichtteilchen. (Der

²Technisch beteiligt an dem Projekt war die deutsche Firma Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB).

gängige Name dafür, Photon, ist eine Schöpfung des 20. Jh. Das Wort tauchte erstmals 1926³ auf.) Newtons Teilchentheorie blieb nicht unwidersprochen. Christiaan Huygens (1629–1695) und Robert Hooke (1635–1703) vertraten beide die Wellentheorie. Um das letzte Wort zu behalten, soll Newton mit der Veröffentlichung seiner „Opticks“ bis 1704 gewartet haben. Da waren seine Widersacher tot. Dennoch setzte sich schließlich die Wellentheorie durch . . . Zum Photon gehört das Elektron. Auch das Elektron hat seine Gedenktage im Kalender. Ein Schlüsselexperiment begeht just seinen hundersten Jahrestag. Die Experimentalphysiker Otto Stern (1888–1969) und Walther Gerlach (1889–1979) schickten im Februar 1922 in Frankfurt a. M. einen Strahl, bestehend aus Silberatomen, durch ein starkes Magnetfeld und beobachteten erstmals die (vorausgesagte) Richtungsquantelung des Drehimpulses. Otto Stern, der 1933 in die USA emigrierte, erhielt 1943 den Nobelpreis für Physik. Obwohl der Atomstrahl aus *n e u t r a l e n* Silberatomen bestand, keinen geladenen, wurde er im stark inhomogenen⁴ Magnetfeld in zwei räumlich getrennte Teilstrahlen aufgespalten. Das war unerwartet, jedenfalls im Falle von Silber. Ein Silberatom sollte gar keinen resultierenden Drehimpuls und damit auch kein magnetisches Moment haben. Die Summe aller 47⁵ Bahndrehimpulse verschwindet! Vom Eigendrehimpuls (Spin) des Elektrons wusste man 1922 noch nichts. (Der wurde erst 1925 eingeführt.) Durch dieses Experiment und der dem Spektroskopiker vertrauten Linienaufspaltung im Magnetfeld (Zeeman-Effekt) trat der Elektronen-„Drall“ zutage. Da der Gesamtdrehimpuls und damit das magnetische Moment beim Silberatom allein⁶ vom Eigendrehimpuls des Valenzelektrons bestimmt wird, verhält sich ein Silberatom im Magnetfeld wie ein elektrisch neutrales Spin-1/2-Teilchen. Die Aufspaltung in zwei Teilstrahlen ist klassisch völlig unverständlich, da alle denkbaren Richtungen erlaubt sein sollten. Der quantenmechanische Eigendrehimpuls in Magnetfeldrichtung aber kann nur diskret sein, d. h., im Falle von Spin-1/2-Silber zwei verschiedene Werte annehmen, wobei der Zufall entscheidet. Überrascht waren die Physiker von des Spins Halbzahligkeit. Und was geschähe, experimentierte man mit zwei Elektronen, welche in ihren Richtungen entgegengesetzt durch jeweils ihren eigenen Stern-Gerlach-

³bei Gilbert Lewis (1875–1946), einem Physiko-Chemiker

⁴Bei homogenem Magnetfeld gäbe es keine zum Magnetfeld parallele Kraft, nur ein Drehmoment, das sich, bildlich, in einer Präzession äußert. Wie bei einem Kreisel.

⁵Silber hat die Ordnungszahl 47.

⁶Vom „Drall“ des Silber-Atomkerns kann abgesehen werden, wegen der vergleichsweise großen Masse eines Nukleons verglichen mit der des Elektrons.

Apparat flitzten? Falls die beiden von Anbeginn an verschränkt⁷ gewesen wären, geschähe etwas sehr Seltsames: Sie blieben verbandelt oder schienen sich doch abzusprechen, und zwar ohne Zeitverzug, *i n s t a n t a n!* Das brachte Albert Einstein (1879-1955) 1935 in Rage. Doch seine Furcht vor „spukhafte[n] Fernwirkungen“, vor denen er in einem Brief (März 1947) an seinen Freund und Widersacher Max Born (1882–1970) warnte, erwies sich im Nachhinein als unbegründet. Eine *s i n n v o l l e* Kommunikation mit Überlichtgeschwindigkeit ist nach wie vor unmöglich. Einstein war übrigens bis zuletzt davon überzeugt, die Quantentheorie sei zwar richtig, aber *u n v o l l s t ä n d i g*. Berühmt ist sein Diktum Gott würfele nicht.

Dass Er doch würfelt, wissen wir seit 40 Jahren. 1982 wies der französische Physiker Alain Aspect (geb. 1947), unter Berufung auf die sog. Bell’schen Ungleichungen, in einer Reihe von Experimenten⁸ mit verschränkten⁹ Photonen die „spukhafte Fernwirkung“ nach und widerlegte damit den Einsteinschen naiven Realismus. (Verschränkte Photonen sind ungeladen und einfacher zu handhaben als Elektronenpaare.) Die Quantenphysik ist nicht unvollständig, sie ist für einen naiven Realisten tatsächlich „verrückt“, nicht nur scheinbar, und Niels Bohr (1885–1962) behielt mit seiner Deutung der Quantenmechanik Recht, wonach erst durchs Messen, d. h. beim bewussten Hinschauen, ein Quantenobjekt eindeutig festgelegt wird. Da gibt es nichts¹⁰, was im Hintergrund die Strippen zöge, wie Einstein und der gesunde Menschenverstand vermuteten! Eine Messung enthüllt eben nicht eine irgendwie bereits vorhandene, bloß unbekannte Eigenschaft! Die verschränkten Photonen des Aspect’schen Experiments befanden sich vor der Polarisationsmessung realiter in einem schwebenden Sowohl-als-auch-Zustand. Verschränkte Photonen spotten jeglicher Alltagserfahrung! Sie sind stärker korreliert, als es mit klassischen Teilchen überhaupt denkbar wäre. Verschränktheit ist im übrigen der Normalfall bei Mehrkörpersystemen, ein Markenzeichen der Quantenwelt, nichts Ausgefallenes. Die Quantenverschränkung¹¹ verheißt uns technisch den

⁷Beispiel: Die Leitfähigkeit von Supraleitern beruht auf verschränkten Elektronenpaaren, sog. Cooper-Paaren.

⁸Wobei erst entschieden wurde, was gemessen werden soll, nachdem sich die beiden Photonen auf den Weg gemacht hatten.

⁹Ein verschränktes Pärchen erscheint, wenngleich räumlich getrennt, als *e i n* Ganzes. Die Partner agieren nicht wie separate klassische Teilchen unabhängig voneinander.

¹⁰also auch keine „verborgenen“ Parameter

¹¹2012 experimentierte der Wiener Quantenphysiker Anton Zeilinger (geb. 1945) mit verschränkten Photonen zwischen zwei, 144 km entfernten Observatorien. Inzwischen rea-

Quantencomputer (der das Verschlüsseln von Botschaften unwirksam macht) und dafür eine absolut abhörsichere Kommunikation.

Der Ire John Stewart Bell (1928–1990) aus Belfast und ein bekennender Einsteinianer hatte dazu die gedankliche Vorarbeit geleistet gehabt – mit einem 1964 ersonnenen philosophisch brisanten Gedankenexperiment.

Genügend Anlässe also, einmal über Photon und Elektron zu plaudern, meint Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Februar

Morgenstern Venus erstrahlt am 12. Februar im größten Glanz. Sie erreicht -4,9 Größenklassen und ist damit 25 mal heller als Sirius. Am Monatsende geht sie kurz vor 5 Uhr im SO auf, eine Stunde vor Beginn der nautischen Morgendämmerung (Sonne 12° unterm Horizont).

Mars kann unter günstigen Umständen am Morgenhimmel gesehen werden. Am 13. Februar mag die Venus beim Auffinden hilfreich sein. Sie zieht $6\frac{1}{2}$ Grad nördlich am Mars vorbei.

Jupiter ist ab der Monatsmitte unsichtbar. Saturn ist erst ab Ende März wieder sichtbar – dann am Morgenhimmel.

Am 25. Februar rückt zum 11. Male die Sonnensonde Parker unserem Zentralgestirn auf die Pelle.

Teilchen ... Welle ... doch ein Teilchen?

Isaac Newton hatte die Lichtteilchenhypothese in die Welt gesetzt gehabt – vor 350 Jahren. Doch Newton wäre nicht Newton, hätte er nicht auch die Schwachstelle seiner kühnen Hypothese gesehen: Woher weiß eine Lichtpartikel, die auf eine Wasseroberfläche trifft, welchen Weg sie zu nehmen hat? Abprallen nach dem Reflexionsgesetz oder Eintauchen nach dem Brechungsgesetz, was stellt die Weiche? Der große Mann ging großzügig über diese Schwäche seiner Korpuskeltheorie hinweg. Man stellte damals nicht die Schwächen der eigenen Hypothese heraus.

Ein Widersacher Newtons war Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832). Er, der sich viel auf seine naturwissenschaftlichen Schriften zugute hielt, vermisste die akademische

lisieren chinesische Satelliten Photonen-Paare, die Tausende von Kilometern „groß“ sind.

Anerkennung. Newtons Lichttheorie hielt er für „baren Unsinn“. Der Physiker Newton und der Dichter Goethe redeten offenbar aneinander vorbei. Newton, der Analytiker, war am Licht selbst interessiert, Künstler Goethe, der die Synthese liebte, am lebendigen Farbeempfinden. Damit bewegte er sich im Reich der Psychophysik, ja sogar der Sittlichkeit, einem wahrlich weiten Feld. Mit einem Prisma in der Hand, konnte er Newtons's reine Lichtfarben jedenfalls nicht reproduzieren. Störrisch hielt Goethe am Weiß als unteilbarem Urphänomen fest.

In der „Farbenlehre“ lesen wir Aufschlussreiches: „Mathematischen Formeln verbleibt immer etwas Steifes und Ungelenkes, mechanische Formeln sprechen mehr zu dem gemeinen Sinn, aber sie sind auch gemein und behalten immer etwas Rohes, sie verwandeln das Lebendige in ein Totes, sie töten das innere Leben, um von außen ein Unzulängliches heranzubringen.“ Das ist die Sprache eines Menschen, welcher „die unmittelbare Wahrheit des sinnlichen Eindrucks gegen die Angriffe der Wissenschaft zu retten“ gedenkt (Helmholtz). Was weder Newton noch Goethe wussten, heute aber jeder Sinnesphysiologe weiß, unsere Sinne produzieren haufenweise Innenreize, um aus dem Wust an Außenreizen ein sinnvolles Abbild der Außenwelt erstehen zu lassen. Unser Weltbildapparat will uns etwas über den Gegenstand lehren, z. B. seine Eigenfarbe, und nicht über die Beleuchtung. Die rechnet er heraus, wozu es einer plausiblen Annahme bedarf und eines Tricks. Durch den **Farbkreis** (Goethe, 1809) hat jede Spektralfarbe ein Gegenüber. Durch „Ausschütten“¹² von Komplementärfarbe (im Hirn!) sehen wir die Umwelt (meistens) farbtreu. Geschlossen wird der Kreis durch eine eigens zu diesem Zwecke „erfundenen Spektralfarbe“ – Purpur!

Meine Mutter verließ beim Kauf farbiger Textilien kurzzeitig den Laden, um den Farbton des Stoffes bei Tageslicht zu begutachten. Bei Kunstlicht funktioniert der Weißabgleich nämlich nicht. Als das Auge phylogenetisch das Licht der Welt erblickte, sah es die Sonne und nicht die Neonröhre. Daher rührt die „Sonnenhaftigkeit“ des Auges: Anpassung an die Farbtemperatur der von Goethen so verehrten Sonne!

Es sah nicht gut aus für Herrn Newton. Die Wellentheorie gewann mehr und mehr an Zuspruch. 1802 **b e w i e s** mit seinem berühmten Doppelspaltexperiment zur Interferenz das englische Allround-Genie Thomas Young (1773–1829) die Lichtwellentheorie. Ihm verdanken wir auch die Dreifarbentheorie der Farbwahrnehmung, die Young-Helmholtz-Theorie. James Clerk Maxwell (1831–1879) schließlich erklärte um 1855 das Licht zur elektromagnetischen Welle. Dann, 1905, ein Paukenschlag. Albert Einstein (1879-1955) meldete sich zu Wort, **b e w i e s** die Teilchentheorie, indem er den lichtelektrischen Effekt¹³ erklärte. Die totgeglaubte Korpuskeltheorie des Lichts feierte Auferstehung, allerdings in neuem Gewand: Das Photon ist keine kleine Billardkugel! Was es zuvor macht, welchen Weg es durchläuft, bevor es irgendwo strandet, wir wissen es nicht. Alles Nachdenken darüber erwies sich jedenfalls

¹²Lichtfarben mischen additiv, Pigmentfarben subtraktiv.

¹³Dafür bekommt Einstein 1921 den Physiknobelpreis – nicht für seine Relativitätstheorie.

als müßig.

Den Weg geebnet hatte 1900 Max Planck mit seiner Quantentheorie. 1924 meinte der französische Physiker Prinz Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892–1987), wenn Licht Impuls transportiere, sollte einem Elektron auch eine (allerdings recht kurze) Wellenlänge¹⁴ zukommen. Der spätere Herzog behielt mit seiner *M a t e r i e w e l l e* Recht: „Beleuchtet“ man einen Young’schen Doppelspalt anstatt mit Licht mit Elektronen, erhält man – ebenfalls ein Interferenzmuster! Das Elektron, das Teilchen *par excellence*, es verhält sich unter Umständen wie eine Welle.

Exkursion in die Quantenwelt

Die Überschrift übertreibt! Mit 1,70 m sind wir viel zu groß, als dass wir in der Quantenwelt heimisch werden könnten. Die Quantentheorie ist gerade keine Theorie subatomarer Teilchen. Sie vermag lediglich vorherzusagen, was makroskopische Messgeräte (d. h. Anhäufungen von Elementarteilchen) bei Experimenten mit mikroskopischen Teilchen mit welcher Wahrscheinlichkeit anzeigen werden. Niels Bohr (1885–1962), der Doyen dieser Sparte, brachte es auf den Punkt: „Es gibt keine Quantenwelt, bloß eine quantenphysikalische Beschreibung.“ Und in der fehlt der Begriff der „Bahn“. Wir registrieren nur Ort o d e r Impuls des Elektrons beim Aufschlagen, am Ende des „Wegs“. Das Spekulieren darüber, was zwischenzeitlich geschieht, ist müßig. Schaut man hin, veränderte dies das Ergebnis des Experiments in unabsehbarer Weise.

Der Welle-Teilchen-Dualismus wurde schließlich, aufbauend auf Paul Diracs (1902–1984) Arbeiten, formal mathematisch, also abstrakt, abgehakt in der QED, der Quantenelektrodynamik (1948) des Richard Feynman (1918–1988), wofür dieser 1965, zusammen mit J. Schwinger (1918–1994) und S. Tomonaga (1906–1979), den Nobelpreis erhielt. Die QED beschreibt die Wechselwirkung von Licht und Materie (Elektronen) und ist die genaueste Theorie, die wir bislang haben – auf ein Dutzend Kommastellen ... Die Theorie kommt nicht mit einem Mechanismus daher, sie erklärt nichts, sie liefert „lediglich“ Aufenthalts- und Übergangswahrscheinlichkeiten. Die aber exakt. Albert Einstein war das zu wenig.

Im Zusammenhang mit dem Stern-Gerlach-Versuch von 1922 war vom Elektron die Rede. Das Elektron, entdeckt 1897 durch den Engländer Joseph

¹⁴Die De-Broglie-Wellenlänge eines Fußgängers ist 10^{20} -mal kleiner als ein Proton!

John („J. J.“) Thomson (1856–1940), ist ein höchst sonderbares Teilchen. Es ist ein **P u n k t**, negativ geladen, der sich wie ein Schwungrad ständig um sich selbst drehen muss. Mit dem Drehen verbunden ist ein Ringstrom und folglich auch ein magnetisches Dipolmoment (das aber doppelt¹⁵ so groß ist wie eigentlich erwartet). Kurz und gut, der „Punkt“ ist mehr als das – ein winziger Stabmagnet¹⁶.

Ein Elektron dreht sich nicht wirklich. Es verhält sich bloß so, als ob es, wie ein gewöhnlicher Alltagsgegenstand, über Drehimpuls und magnetisches Moment verfüge. Die Energie eines Elektrons in einem Magnetfeld beispielsweise ist proportional zur magnetischen Feldstärke. Den Proportionalitätsfaktor in der entsprechenden Gleichung nennt man magnetisches Moment des Elektrons, weil man es von einem Stabmagneten oder einer stromdurchflossenen Spule her so kennt.

Wie schließlich Paul Dirac 1928 herausfand, ist der Ruhedrehimpuls des Elektrons, sein Spin, eine mathematische Konsequenz der Umformulierung der Quantenmechanik als relativistische Theorie¹⁷. (Im Bohrschen Planetenmodell des Wasserstoffatoms „rast“ das Hüllenelektron im Grundzustand mit $1/137$ der Lichtgeschwindigkeit um das Proton. Da ist eine relativistische Beschreibung angebracht.) Man kann die Existenz des Eigendrehimpulses als Argument für Einsteins Spezielle Relativitätstheorie auffassen. In der Folge wurde die Erklärung des Periodensystems der Elemente – und seiner Ausnahmen! – zu einer Angelegenheit der angewandten Mathematik! Allerdings nur im Prinzip: Das Berechnen von Viel-Körper-Systemen – im Falle von Silber immerhin 47 einander meidender Elektronen und ein positiv geladener kleiner Kern –, es harret des Quantencomputers.

94 Jahre nach der Schaffung der relativistischen Quantentheorie durch Paul Dirac steht die „Versöhnung“ der Quantentheorie mit Einsteins **A l l g e m e i n e r** Relativitätstheorie, seiner Gravitationstheorie, immer noch in den Sternen.

Man unterschätze den Elektronenspin nicht! Er ist zwar winzig, aber ihm verdanken wir – wegen des sog. Pauli-Verbotens – die Existenz fester, ausgedehnter Körper! Elektronenhüllen können (aufgrund der Vertauschbarkeit¹⁸ von

¹⁵Es dreht sich „zweimal“ um seine Achse, bevor es wieder im Ausgangszustand ist. So jedenfalls drückt es der Chemiker und Wissenschaftsautor Peter Atkins (geb. 1940) aus.

¹⁶der in der Sprache der klassischen Physik wie ein Kreisel unablässig präzessiert

¹⁷Als Bonus der Dirac-Theorie fällt ein positiv geladenes Elektron an, das Positron, welches 1932 tatsächlich von Carl David Anderson (1905–1991) in der Höhenstrahlung (kosmischen Strahlung) aufgefunden wurde.

¹⁸Elektronen sind ununterscheidbar. Da bei Vertauschung von Spin-1/2-Partikeln die Wellenfunktion das Vorzeichen ändert, kann die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von zwei Elektronen am selben Ort nur Null sein.

Elektronen) weder kollabieren, noch einander beliebig durchdringen. Es ist dieser kollektive Effekt in einem entarteten Elektronengas, der der Sonne dermaleinst ein äonenlanges Nachleben beschert, nach dem Aufbrauchen ihrer thermonuklearen Energiereserven, – als weißer Zwerg. Da ein Energieniveau mit maximal zwei Spin-1/2-Partikeln¹⁹ besetzt werden kann, entsteht – selbst am absoluten Temperaturnullpunkt – ein quantenmechanischer „Druck“. Der Entartungsdruck hat keine Entsprechung in der klassischen Physik.

¹⁹Es müssen keine Elektronen sein. Alle Fermionen meiden einander. Bei einem Neutronenstern sind es die Nukleonen. Licht hingegen kann man grenzenlos zusammenquetschen. Das Photon ist ein Boson, ein Spin-1-Teilchen.