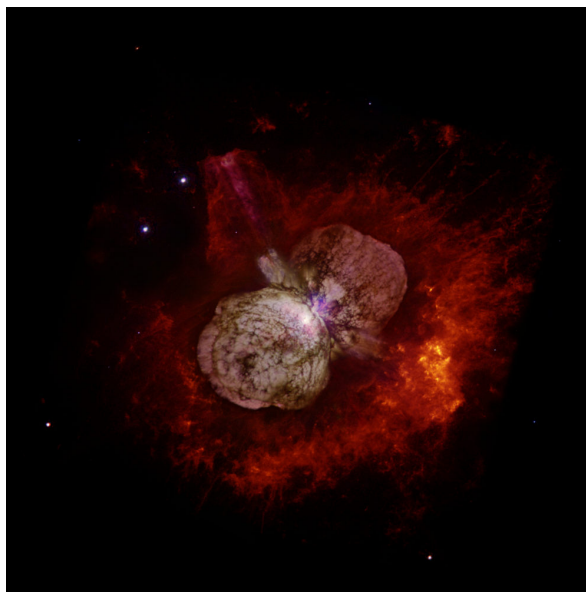


Was, wenn Eta Carinae explodiert?

Vorbemerkung:

Zum Video über den Stern EBLM JO 555-57 Ab von Josef Gassner, ist im YouTube-Forum die Frage gestellt worden: Wie bedroht ist die Erde durch die Explosion eines nahe gelegenen Sternriesen? Im Buch „Sternstunden des Universums“ hat Jörn Müller versucht die von der Explosion des Sternriesen Eta-Carinae ausgehenden Gefahren abzuschätzen.

Angst muss man nicht haben. Aber man kann sich ja mal Gedanken machen, was passiert, wenn es passiert. Die Rede ist von Eta Carinae, von einem der beeindruckendsten Sterne in unserer Galaxis. Zu finden ist dieses „Sternmonster“ am Südhimmel, im Sternbild Schiffskiel, in einer Entfernung von 7.500 Lichtjahren. Eta Carinae gehört zu der sehr seltenen Klasse der so genannten „Leuchtkräftigen Blauen Veränderlichen“ (LBV). Mit einer Masse von 100 bis 120 Sonnenmassen und einer Oberflächentemperatur von etwa 30.000 Grad ist er so leuchtkräftig wie zusammen circa 4 Millionen Sonnen. Im Bereich infraroter Strahlung gehört der Stern, neben unserem Sonnensystem, sogar zu den hellsten am Himmel. 99 Prozent seiner Leuchtkraft entfallen allein auf diesen Wellenlängenbereich. Könnte man Eta Carinae an die Stelle unseres Zentralsterns setzten, so würde er mit einem Durchmesser von rund 1,54 Milliarden Kilometer bis zur Bahn des Planeten Jupiter reichen.



Eta Carinae (Bildquelle: <http://apod.nasa.gov/apod/ap080617.html>)

Man vermutet, dass Eta Carinae mit einer Masse von circa 150 Sonnenmassen „geboren“ wurde. Aufgrund eines starken Sternwindes und zahlreicher Massenausbrüche hat er davon mittlerweile etwa 30 Sonnenmassen eingebüßt. Erstmals katalogisiert wurde der Stern im Jahr 1677 von dem englischen Astronomen und Mathematiker Edmond Halley, der auch den nach ihm benannten Halleyschen Kometen als Erster beobachtete. Eta Carinae war damals ein Stern mittlerer Helligkeit, also mit bloßem Auge zu erkennen. In den Jahren bis 1730 nahm seine Helligkeit kontinuierlich zu, sodass er sich schließlich zum hellsten Stern im Sternbild Schiffskiel entwickelte. In den folgenden Jahren verblasste er wieder zu seiner ursprünglichen Helligkeit, um sie bis zum Jahre 1820 allmählich wieder zu steigern. 1827 war er schon wieder 10-mal so hell. Dieses Schauspiel wiederholte sich noch zweimal in der Zeit bis 1837.

Im Jahr 1841 überstürzten sich die Ereignisse. Ein gewaltiger Ausbruch, ähnlich einer Supernova, erschütterte Eta Carinae. An seinen Polen stieß der Stern etwa 10 Sonnenmassen an Materie aus, die mit einer Geschwindigkeit von circa 700 Kilometern pro Sekunde in den Raum hinaus schoss und zwei riesige, pilzförmige Gas- und Staubwolken, den so genannten „Homunkulus-Nebel“, formte. Einer dieser „Pilze“ ist so gerichtet, dass man seinen Kopf gut erkennen kann, der andere weist von uns weg. Trotz Eta Carinaes Entfernung von 7.500 Lichtjahren, machte ihn dieser Ausbruch 1843, neben Sirius, zum zweithellsten Stern am Nachthimmel. Anhand der Masse und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der bipolaren Wolken konnten Astronomen auch deren Bewegungsenergie berechnen und damit auf die Gewalt des Ausbruchs schließen. Es zeigte sich, dass Eta Carinae dabei eine Energiemenge freigesetzt hat, wie sie unsere Sonne in 200 Millionen Jahren produziert. Die beiden Wolken, die sich gegenwärtig bereits rund 6,4 Billionen Kilometer in den Raum hinaus erstrecken, dehnen sich noch immer mit einer Geschwindigkeit von etwa 660 Kilometern pro Sekunde aus.

In den Folgejahren verblasste Eta Carinae wieder, sodass er zwischen 1900 und 1940 mit bloßem Auge nicht mehr zu sehen war. Aber schon kurz darauf ging es wieder bergauf. Von 1998 bis 1999 verdoppelte sich seine Helligkeit. Zurzeit liegt sie knapp unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze für das bloße Auge. Im Teleskop zeigt sich Eta Carinae heute nicht nur vom Homunkulus-Nebel eingehüllt, sondern auch von

einer weiter entfernten, hufeisenförmigen Gaswolke mit einem Durchmesser von etwa 2 Lichtjahren umgeben. Vermutlich stammt sie von einem Ausbruch, der sich bereits vor mehr als 1.000 Jahren ereignet hat.

Warum sich Eta Carinae so spektakulär gebärdet, lässt sich anhand der gängigen Theorien zu Struktur und Entwicklung von Sternen verstehen. Je massereicher ein Stern, desto mehr Leuchtkraft besitzt er. Allerdings nimmt die Leuchtkraft nicht gleichmäßig mit der Sternmasse zu, sondern proportional zur Masse hoch 3. Ein Stern mit der doppelten Masse unserer Sonne hat demnach nicht die doppelte, sondern die 8-fache Leuchtkraft. Sterne großer Masse machen sich daher mit einer gewaltigen Leuchtkraft bemerkbar. Im Massenbereich um die 100 Sonnenmassen entwickeln diese Sterne einen enormen Strahlungsdruck, der beträchtliche Mengen an Materie von der Oberfläche des Sterns in den Raum hinaustreibt. Pro Jahr verliert Eta Carinae die 500-fache Masse der Erde. Hinzu kommt, dass derart massereiche Sterne in hohem Maße instabil sind und wie ein schlagendes Herz pulsieren. Dabei beschleunigen sich die Fusionsprozesse im Zentrum periodisch und produzieren einen Überschuss an Strahlungsenergie. Wird der Abfluss der zusätzlichen Energie durch die äußeren Sternschichten behindert, so bläht sich der Stern auf. Da mit zunehmendem Abstand vom Zentrum die äußeren Sternschichten immer schwächer gebunden sind, übersteigt schließlich der nach außen wirkende Strahlungsdruck die nach innen gerichtete Gravitationskraft, was zu den beobachteten Massenauswürfen führt.

Und noch etwas ist interessant: Eta Carinae strahlt nicht vollkommen gleichmäßig. Im Bereich der Ultraviolett- und Röntgenstrahlung schwankt die Intensität geringfügig mit einer Periode von $5 \frac{1}{2}$ Jahren. Mittlerweile ist man ziemlich sicher, dass es sich bei Eta Carinae nicht um einen Einzel-, sondern um einen Doppelstern handelt, wobei der eine Partner den anderen bei jedem Umlauf für kurze Zeit abschattet. Wenn dem so ist, dann könnten die Ausbrüche auch durch die gewaltigen Gravitationskräfte hervorgerufen worden sein, die die beiden Sterne bei ihrem Tanz um den gemeinsamen Schwerpunkt aufeinander ausüben. Was die intensive Röntgenstrahlung betrifft, die von Eta Carinae die irdischen Detektoren erreicht, so hat sie ihren Ursprung sehr wahrscheinlich in einem Bereich, in dem zwei Sternwinde aufeinanderprallen. Dabei wird die Materie stark verdichtet und bis zur Emission von

Röntgenstrahlung aufgeheizt. In dem Doppelsternsystem trägt dazu jeder der beiden Sterne mit seinem Sternwind bei. Komplizierter wäre die Sache, falls es sich bei Eta Carinae um einen einzelnen Stern handeln würde. Dann müssten beide Sternwinde von einem Stern abströmen, beispielsweise ein schneller und ein langsamer, und in einer gemeinsamen Stoßfront kollidieren.

Wie es mit Eta Carinae weitergeht kann man ziemlich genau vorhersagen. Circa 3 Millionen Jahre ist der Stern erst alt - und doch schon am Ende seines Lebens. Die Astronomen schätzen, dass nur noch 10.000 bis 20.000 Jahre vergehen werden, bis es bei Eta Carinae zum finalen Knall kommt. In astronomischen Maßstäben ist das eine sehr kurze Zeitspanne. Aufgrund seiner enormen Masse herrschen im Zentrum Temperaturen, bei denen die Kernfusionsprozesse - zunächst verschmilzt Wasserstoff zu Helium, dann Helium zu Kohlenstoff und Sauerstoff und nach einigen weiteren Stufen schließlich Silizium zu Eisen und Nickel – rasend schnell ablaufen. Der letzte Schritt vom Silizium zu Eisen wird nur noch Stunden dauern. Wenn schließlich aller Brennstoff verheizt ist und der von innen nach außen wirkende Strahlungsdruck wegfällt, wird der Stern in Sekunden unter seiner eigenen Schwerkraft zusammenbrechen und in einer Supernova explodieren.

Supernovae (SN) gehören zu den spektakulärsten Ereignissen im Kosmos. Die dabei freigesetzte Energie ist von einer Dimension, die unser Vorstellungsvermögen auf eine harte Probe stellt. Als Beispiel mag die Supernova 1987A (SN 1987A) dienen, die am 24. Februar 1987 in einer circa 180.000 Lichtjahre entfernten Begleitgalaxie unserer Milchstraße, der Großen Magellanschen Wolke, aufleuchtete. Bei dem Vorläuferstern, der sein Leben in dieser SN ausgehaucht hat, handelte es sich um einen sogenannten „Blauen Überriesen“ mit einer Masse von etwa 17 Sonnenmassen und einer Oberflächentemperatur von 30.000 bis 40.000 Grad. Als der Stern explodierte, wurde eine Energie von insgesamt 10^{45} bis 10^{46} Joule freigesetzt. Eine schwache Vorstellung, wie groß diese Energiemenge ist, liefert eine kleine Rechnung: Um ein Gramm Wasser um ein Grad Celsius, genauer von 14,5 auf 15,5 Grad Celsius, zu erwärmen, sind 4,18 Joule nötig. Mit 10^{46} Joule könnte man somit die milliardenfache Menge des Wassers aller Weltmeere 20 Milliarden mal von Null auf 100 Grad erhitzen.

Die von einer SN abgegebene Energie verteilt sich auf drei Säulen. Rund 99 Prozent der Energie tragen winzige Teilchen von sehr geringer Masse davon, die Neutrinos. Sie entstehen bei den Fusionsprozessen in den Sternen, insbesondere jedoch beim Kollaps eines massereichen Sterns. Etwa ein Prozent der Energie steckt in der kinetischen Energie der in den Raum hinaus katapultierten Sternmassen und nur circa 0,01 Prozent entfällt auf elektromagnetische Strahlung, das heißt auf Gammastrahlung, Röntgenstrahlung und sichtbares Licht sowie auf kosmische Strahlung. Im Gegensatz zu den erstgenannten Strahlungsarten gehört die kosmische Strahlung nicht zu den elektromagnetischen Wellen, vielmehr handelt es sich dabei um eine Teilchenstrahlung, vornehmlich bestehend aus nahezu lichtschnellen Elektronen, Protonen und Heliumkernen.

Angesichts dieser enormen „Energieausschüttung“ einer SN drängt sich die Frage auf: Besteht Anlass zur Sorge, wenn Eta Carinae explodiert? Können die Neutrinos und die Strahlung dem irdischen Leben gefährlich werden? Oder ist Eta Carinae weit genug von uns entfernt, sodass sich die freigesetzte Energie im Raum verliert? Für eine Antwort muss man die Wirkung der bei einer SN auftretenden Strahlungsformen abklären. Anhand der Ergebnisse kann man dann versuchen das Maß der Gefährdung abzuschätzen. Auf Erfahrungswerte kann man sich dabei nicht stützen, denn zum Glück ist die Menschheit noch nie mit einer nahen SN konfrontiert worden. Schwierig zu bestimmen ist insbesondere die Wechselwirkung der Strahlung mit der irdischen Atmosphäre, denn durch sie muss die Strahlung erst hindurch, ehe sie auf belebte Strukturen auf der Erde trifft. Außerdem ist die Wirkung von Neutrinos auf biologisches Gewebe noch nicht ausreichend erforscht. Und überhaupt weiß niemand, wie heftig die SN Eta Carinae ausfallen wird. Mit anderen Worten: Präzise Aussagen, welches Gefährdungspotential in Eta Carinae steckt, kann man nicht erwarten. Vielmehr wird man sich mit ein paar groben Abschätzungen zufrieden geben müssen.

Zunächst: Könnte man die SN sehen? Dazu vorab ein kurzer Ausflug in das Maßsystem, mit dem Astronomen die Leuchtkraft eines Sterns beschreiben. Als Einheit dient die sogenannte „Magnitude“. Je kleiner dieser Wert, desto leuchtkräftiger ist der Stern. Unterscheiden sich zwei Sterne um eine Magnitude, so hat der mit der kleineren Magnitude eine 2,5-mal größere Helligkeit als der andere.

Man muss jedoch unterscheiden zwischen absoluter und scheinbarer Helligkeit. Denn zwei Sterne von gleicher absoluter Helligkeit in unterschiedlichen Entfernungen sind scheinbar unterschiedlich hell. Oder anders herum: Zwei Sterne von gleicher scheinbarer Helligkeit scheinen gleich hell zu sein, obwohl sie sich in ihren absoluten Helligkeiten deutlich unterscheiden können. Ist ein Stern genau 10 Parsec (pc) entfernt, so sind dessen scheinbare und absolute Helligkeit gleich groß. Bei weiter entfernten Objekten ist die scheinbare Helligkeit größer als die absolute, bei näheren ist sie kleiner. Das zeigt sich besonders gut am Beispiel unserer Sonne. Deren absolute Helligkeit beträgt 4,87 Magnituden, wogegen ihre scheinbare Helligkeit, aufgrund ihrer geringen Entfernung, minus 26,7 Magnituden beträgt. Sterne mit einer scheinbaren Helligkeit von 6 Magnituden sind in stockdunkler Nacht gerade noch mit bloßem Auge zu erkennen. Objekte mit größeren Magnituden lassen sich nur noch mit optischen Hilfsmitteln, also mit Teleskopen, beobachten. Supernovae, die das Ende eines massereichen Sterns markieren, haben eine mittlere absolute Helligkeit von minus 18,5 Magnituden.

Nehmen wir an, auch die SN Eta Carinae würde mit einer absoluten Helligkeit von minus 18,5 Magnituden aufscheinen. Dann betrüge ihre scheinbare Helligkeit rund minus 6,7 Magnituden. Die SN wäre rund 8-mal heller als beispielsweise der Planet Venus, der am 9. Februar 2009 mit einer Helligkeit von minus 4,5 glänzte. Die SN würde also nicht nur des Nachts sofort auffallen, auch am Tage wäre sie noch gut wahrzunehmen, vorausgesetzt sie steht der Sonne nicht zu nahe. Doch die SN könnte noch viel gewaltiger ausfallen. Am 18. September 2006 entdeckten Astronomen in 240 Millionen Lichtjahren Entfernung eine SN (SN 2006gy) mit einer absoluten Helligkeit von minus 22 Magnituden! Möglicherweise hatte der explodierte Stern 150-mal soviel Masse wie unsere Sonne. Da auch Eta Carinae in diese „Gewichtsklasse“ einzuordnen ist, könnte er sich mit einer ähnlich leuchtkräftigen SN verabschieden. In diesem Fall betrüge die scheinbare Helligkeit etwa minus 10 Magnituden. Das sind nur 2,5 Magnituden mehr als der volle Mond oder anders ausgedrückt: die SN würde genauso viel Licht spenden wie unser Erdtrabant bei Halbmond. Im Vergleich zur Sonne wäre die SN jedoch circa 5 Millionen Mal leuchtschwächer. Der zusätzliche Strahlungsfluss im Bereich des sichtbaren Lichts wäre daher vernachlässigbar klein und für das irdische Leben sicher ohne Bedeutung. Man müsste Eta Carinae aus der Entfernung von 7.500 Lichtjahren

schon bis auf etwa 4 Lichtjahre an die Erde heranrücken, damit die SN mit der Sonne konkurrieren könnte.

Neutrinos, wir haben es bereits erwähnt, tragen in etwa 99 Prozent, also fast die gesamte von einer SN freigesetzte Energie davon. Treffen sie auf Materie, so können sie ihre Energie über Streuprozesse an die Atomkerne abgeben. Bei der SN 1987A entstand die ungeheure Menge von 10^{58} Neutrinos. Lassen wir diesen Wert auch für die erwartete Eta Carinae-SN gelten und gehen wir wieder von einer SN-Energie von 10^{46} Joule aus, so hat ein Neutrino eine mittlere Energie von nur einem Billionstel Joule. Allerdings würde uns nicht der gesamte Teilchenstrom treffen, da die Neutrinos vom Explosionsort gleichmäßig in alle Richtungen davonfliegen. Bei der Entfernung von 7500 Lichtjahren wären es aber pro Quadratzentimeter immerhin noch rund 16 Billionen Neutrinos. Nehmen wir ferner an, ein Mensch würde im Augenblick der SN-Explosion frontal zur SN stehen und seine ihr zugewandte Körperfläche betrüge einen Quadratmeter. Dann träfen die Person insgesamt 16 Trillionen Neutrinos mit einer Energie von 160.000 Joule! Eine einmalig absorbierte Strahlendosis von mehr als 10 Sievert (Sv), was einer Energiedosis von 10 Joule pro Kilogramm Körpergewicht entspricht, ist für den Menschen tödlich. Bei einem Körpergewicht von 80 Kilogramm sind das 800 Joule. Wenn also Neutrinos mit einer Gesamtenergie von 160.000 Joule einen Menschen treffen, dann sollte das augenblicklich zum Tode führen.

Ein Blick auf unsere Sonne zeigt: das kann nicht stimmen. Auch bei der in der Sonne fortwährend ablaufenden Fusion von Wasserstoff zu Helium entstehen Neutrinos: rund 2×10^{38} jede Sekunde. Pro Quadratzentimeter und Sekunde treffen uns davon 70 Milliarden! – Und? Haben Sie jemals was davon bemerkt? Etwa ein Gefühl wie von Nadelstichen? Wenn Sie ehrlich sind: nein! Anscheinend durchdringen Neutrinos unseren Körper problemlos. Und nicht nur das: Neutrinos können durch den gesamten Erdball laufen, ohne auch nur mit einem Atom zu kollidieren. Verantwortlich dafür ist der so genannte Wechselwirkungsquerschnitt σ (= griech. Buchstabe sigma). Man versteht darunter eine Fläche um das Zielteilchen, innerhalb der das Neutrino auftreffen muss, damit es zu einer Wechselwirkung zwischen dem Neutrino und dem Teilchen kommt. Das σ von Neutrinos hat den verschwindend kleinen Wert von 10^{-44} Quadratcentimetern. Weiß man noch über die Dichte und die

Zusammensetzung der bestrahlten Materie Bescheid, so kann man berechnen, wie viele von den auftreffenden Neutrinos ihre Energie an die Materie abgeben. Da menschliches oder tierisches Gewebe vornehmlich aus Molekülen besteht, die aus Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff aufgebaut sind, macht man keinen großen Fehler, wenn man $C_4H_{40}O_{17}N_1$ -Moleküle als repräsentativ für menschliches Gewebe ansieht. Damit ergibt sich rein rechnerisch, dass von den 16 Trillionen ankommenden Neutrinos der Eta Carinae-SN nur der fünftausendste Teil eines einzigen Neutrinos seine Energie an die betroffene Person abgibt! Im Mittel deponieren die 16 Trillionen Neutrinos also nur ein 5 Billiardstel Joule im menschlichen Körper. Von den tödlichen 800 Joule ist das himmelweit entfernt! Wenn Eta Carinae als SN explodieren wird, dürfte uns der gewaltige Neutrinoschauer kaum etwas anhaben. Damit der Neutrinostrom einer SN unmittelbar tödlich wirkt, darf der explodierende Stern höchstens 20 Prozent weiter entfernt sein als unsere Sonne.

Diese Ergebnisse sagen etwas darüber aus, wie viel Energie SN-Neutrinos im Körper eines Menschen abgeben. Sie lassen jedoch nicht erkennen, welche zerstörerische Auswirkung diese Energie auf die Zellen des Gewebes hat. Zellschäden in begrenztem Umfang machen sich nicht unmittelbar bemerkbar. Längerfristig können sie jedoch zu Krebs oder zu Veränderungen im Erbgut führen. Ansatzweise hat das J. I. Collar in „Biological Effects of Stellar Collapse Neutrinos“ untersucht. Folgt man den Ausführungen, so zeigt sich, dass sich die Bedrohung durch eine SN in Grenzen hält. Entscheidend ist wieder, in welcher Entfernung der Stern explodiert. Beispielsweise hätte man bei einer SN in rund 900 pc, das heißt knapp 3000 Lichtjahren Entfernung im Gewebe einer 80 Kilogramm schweren Person lediglich bei einer einzigen Zelle mit Zerstörungen im Zellkern zu rechnen. Da Eta Carinae circa 2,5-mal soweit entfernt ist und da überdies die Menge der Neutrinos pro Flächeneinheit mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, dürfte dem Leben auf der Erde auch von dieser Seite keine Gefahr drohen.

Nächster Punkt ist die von einer SN ausgehende Röntgen- und Gammastrahlung. Deren Energie geben die Physiker in Elektronenvolt (eV) an. Umgerechnet in die mittlerweile vertraute Energieeinheit Joule entspricht 1 eV lediglich $1,6 \times 10^{-19}$ Joule. Beschleunigt man ein Elektron zwischen zwei Platten, die eine Spannungsdifferenz

von einem Volt aufweisen, so gewinnt es die Energie von 1 eV. Ein Kilo-eV (keV) entspricht 1.000 eV und ein Mega-eV (MeV) sind eine Million eV. Man kann Röntgen- und Gammastrahlung aber auch durch ihre Wellenlänge klassifizieren. Dabei gilt: Je kürzer die Wellenlänge, desto „härter“, das heißt durchdringungsfähiger ist die Strahlung. Beispielsweise hat sichtbares Licht grüner Farbe eine Wellenlänge von rund 534 Nanometer (nm), wogegen harte Gammastrahlung nur eine Wellenlänge von etwa einem Hunderttausendstel nm hat. Dabei ist 1 nm der Millionste Teil eines Millimeters. Vergleicht man die Energien der jeweiligen Photonen, so besitzt Röntgenstrahlung mittlerer Härte rund 5000-mal mehr Energie als ein „grünes“ Photon, harte Gammastrahlung 50 Millionen mal mehr.

Röntgen- und Gammastrahlung sind nicht klar voneinander abgegrenzt, ihre Bereiche überlappen sich. So findet man beispielsweise die Angabe: Röntgenstrahlung umfasst den Wellenlängenbereich von 10 bis 0,001 nm (124 eV bis 1,24 MeV), Gammastrahlung den Bereich von 0,1 bis 1 Hunderttausendstel nm (12,4 keV bis 124 MeV). Anderen Tabellen zeigen größere oder auch kleiner Überschneidungen. Für die Abschätzung hinsichtlich der von einer SN ausgehenden Strahlengefahr ist das jedoch ohne Bedeutung.

Ein als SN kollabierender Stern setzt im Energieintervall von 1 bis 10 keV pro Sekunde im Mittel 10^{32} bis 10^{33} Joule an Röntgenstrahlung frei. Sollten diese Werte auch für Eta Carinae gelten, dann würde unser Planet pro Quadratcentimeter und Sekunde ein 15 Billionstel ($1,5 \times 10^{-13}$) Joule an Röntgenenergie abbekommen. Ob damit die Schwelle dessen, was biologische Strukturen „verkräften“ können, überschritten wird, soll ein Vergleich mit der Röntgendosis zeigen, die uns während eines „solaren Flares“ erreicht.

Solare Flares sind durch Magnetfelder in der Sonnenatmosphäre verursachte Eruptionen, die mit einem enormen Materieauswurf und einer intensiven elektromagnetischen Strahlung vornehmlich im Röntgenbereich einhergehen. Während eines Ausbruchs kann eine Energie von bis zu 6×10^{25} Joule freigesetzt werden. Das ist etwa 10 Millionen mal mehr als bei einem Vulkanausbruch. Die dabei von der Sonne ausgehende elektromagnetische Strahlung sowie ein Strom geladener Teilchen können auf der Erde die Kommunikation und die

Stromversorgung ganzer Landstriche lahm legen. Starke Flares, so genannte X-Flares, überschütten die Erde im oben angegebenen Energiebereich mit einer „Röntgenenergie“ von 1×10^{-8} Joule pro Quadratcentimeter und Sekunde. Man hat auch schon Flares beobachtet, beispielsweise am 16. August 1989, am 2. April 2001 und am 4. November 2003, bei denen von geostationären Satelliten Röntgenintensitäten von 2×10^{-7} bis $4,5 \times 10^{-7}$ Joule pro Quadratcentimeter und Sekunde gemessen wurden. Das waren Flares der Größenklasse X20 beziehungsweise X45. Vergleicht man das mit den $1,5 \times 10^{-13}$ Joule pro Quadratcentimeter und Sekunde, mit denen Eta Carinae die Erde bestrahlen würde, so zeigt sich, dass die Strahlenbelastung eines Sonnenflares die einer Eta Carinae-SN um einen Faktor 50.000 bis 3 Millionen übertrifft. Umgerechnet in Entfernungen heißt das: Eta Carinae dürfte nicht weiter als 9 pc von der Erde entfernt explodieren, damit es zu einer ähnlich hohen Röntgenstrahlenbelastung wie bei einem X-Flare kommt. Für die deutlich stärkeren, aber sehr selten auftretenden X20-beziehungsweise X45-Flares ergeben sich noch kleinere Entfernungen von 2 pc beziehungsweise 1,3 pc.

Mit der von einer SN ausgehenden Gammastrahlung verhält es sich ähnlich. Doch zunächst: Woher stammt sie? Von der unmittelbar beim Sternkollaps entstehenden hochenergetischen Strahlung bekommt die Umwelt nicht viel mit. Die Sternmaterie ist im Augenblick der Explosion noch so dicht, dass sie die Gammaquanten größtenteils nicht ungehindert durchdringen können. Vielmehr geben sie in einer Reihe aufeinanderfolgender Absorptions- und Reemissionsprozesse einen Großteil ihrer Energie an die auseinanderfliegende Sternmaterie ab und werden zu niederenergetischer Röntgenstrahlung transformiert. Das, was uns erreicht, stammt vornehmlich aus dem Zerfall radioaktiver Atomkerne, die beim Sternkollaps entstehen und in den Raum hinausgeschleudert werden. Hauptlieferant der Gammastrahlung ist eine Zerfallskette, bei der innerhalb von sechs Tagen zunächst die Hälfte der beim Kollaps entstandenen Nickelkerne zu Kobalt und anschließend mit einer Halbwertszeit von 77 Tagen die Kobaltkerne weiter zu Eisen zerfallen. Beim ersten Zerfallsschritt werden Gammaquanten einer Energie von 0,81 MeV, beim zweiten Photonen der Energie 0,85 und 1,24 MeV emittiert. Der dabei entstehende Strahlungsfluss von rund 10^{33} Joule pro Sekunde ist ähnlich hoch wie im Röntgenbereich. Die Explosion einer SN in einer mit Eta Carinae vergleichbaren

Entfernung würde also die Erde im Energiebereich um 1 MeV einem Strahlungsfluss von $1,5 \times 10^{-12}$ Joule pro Quadratcentimeter und Sekunde aussetzen.

Mit diesen Daten lässt sich das gleiche Szenario aufstellen wie mit der Röntgenstrahlung. Kommt da mehr auf die Erde zu als bei einem starken solaren Flare? Das von der NASA betriebene Compton Gammastrahlen-Observatorium (CGRO), das die Erde von 1991 bis 2000 umkreiste, hat während starker solarer Flares im Energiebereich von 1 bis 10 MeV Strahlungsflüsse von 10^{-12} Joule pro Quadratcentimeter und Sekunde gemessen. Demnach wäre eine SN in 7.500 Lichtjahren Entfernung für die Erde genau so „gammastrahlungswirksam“ wie eine starke Sonneneruption. Man hätte mit Problemen zu rechnen, wie sie als Folge starker solarer Flares auftreten: teilweiser Ausfall der elektrischen Netze und der Stromversorgung sowie Störungen im Funkverkehr und der Kommunikation mit erdnahen Satelliten. Natürlich würde das das öffentliche Leben in einigen Landstrichen für kurze Zeit beeinträchtigen, aber ausgesprochen gefährlich wäre es vermutlich nicht. Bis heute hat die Menschheit jede noch so starke Sonneneruption ohne Schäden für Leib und Leben überstanden.

Doch es könnte schlimmer kommen. Da Eta Carinae eine so große Masse besitzt, ist nicht auszuschließen, dass der Stern einen deutlich spektakuläreren „Abgang“ inszeniert als eine „normale“ Supernova. Als Steigerung käme eine Hypernova (HN) in Frage mit einem Energieausstoß, der bis zu 1000-mal größer ist als bei den SNe, von denen bisher die Rede war. Was eine Hypernova auszeichnet, ist ein so genannter „Gamma-Ray Burst“, ein enormer Gammastrahlenausbruch, der mit dem Sternkollaps einhergeht. Dabei setzt der Stern im Zeitraum von wenigen Sekunden mehr Strahlungsenergie frei als unsere Sonne während ihrer gesamten Lebenszeit von circa 10 Milliarden Jahren. Mittlerweile glaubt man zu wissen, wie diese „Energieschleudern“ funktionieren. Bei einem sehr massereichen Stern kommt der Kollaps nicht zum Stehen, wenn die Materie eine gewisse Dichte erreicht hat. Anstelle eines Neutronensterns im Sterninneren entsteht ein stellares Schwarzes Loch. Und weil sich der Stern um seine Achse gedreht hat, rotiert auch das Schwarze Loch, jedoch um ein Vielfaches schneller als ursprünglich der Stern. Das funktioniert genau so wie bei einem Pirouetten drehenden Eiskunstläufer, der schneller wird, wenn er die Arme anlegt. Von dem rotierenden Schwarzen Loch im

Zentrum bekommen die äußeren Bereiche des Sterns zunächst nichts mit. Dort wird weiterhin Kernfusion betrieben. Doch die enorme Gravitationskraft des Schwarzen Lochs zeigt Wirkung. Sie versammelt die umgebende Materie in eine um das Loch rotierende Scheibe, von wo aus sie auf spiralförmigen Bahnen in das Loch hinein fällt. Mit der rotierenden Materie werden auch die allgegenwärtigen Magnetfelder regelrecht aufgewickelt und zunehmend komprimiert. Ist schließlich eine kritische Magnetfelddichte erreicht, entspannen sich die Magnetfelder explosionsartig und setzen die gespeicherte Energie frei. Zwei entgegengesetzt gerichtete, enge Materiebündel, so genannte Jets, durchbrechen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit die Sternhülle parallel zur Rotationsachse des Schwarzen Lochs. Der Aufprall der Jets auf die umgebende Sternhülle und das spätere Auftreffen auf das dünne Gas in der Umgebung des Sterns, das so genannte interstellare Medium, verursacht Schockwellen, in denen die Materie so stark aufgeheizt wird, dass es zur Emission hochenergetischer Gammastrahlung kommt.

Vorausgesetzt, die Gammaquanten einer gegenüber einer SN 1.000 Mal „stärkeren“ Supernova verteilen sich gleichmäßig in alle Richtungen im Raum, dann wäre die Bestrahlung der Erdatmosphäre aus einer Entfernung von 7.500 Lichtjahren kurzfristig so intensiv wie durch etwa 1000 solare Flares. Obwohl das vermutlich nicht mehr zu vernachlässigende Auswirkungen auf die irdische Lufthülle und auf empfindliche belebte Strukturen hätte, soll das nicht näher untersucht werden, denn nach allem, was die Astronomie bisher über Gamma-Ray Bursts in Erfahrung gebracht hat, dürfte sich die Strahlung nicht so ausbreiten wie soeben beschrieben. Entsprechend den gängigen Modellen ist auch die Strahlung eines Gamma-Ray Burst wie die ausgeworfene Materie in zwei engen, in entgegengesetzte Richtungen weisenden Strahlenkeulen konzentriert. Weist eines dieser Strahlenbündel in Richtung Erde, so kann das, je nach Entfernung der Quelle, zu erheblichen Gammabelastungen von einigen Joule pro Quadratcentimeter führen. Im Jahre 2005 haben amerikanische Wissenschaftler untersucht, was das für die Erdatmosphäre und insbesondere für die Ozonschicht bedeutet. Für ihre Berechnungen gehen sie von einem „typischen“ Gamma-Ray Burst in einer Entfernung von 2 kpc aus – was übrigens gut mit der Entfernung von Eta Carinae übereinstimmt – und einer 10 Sekunden andauernden Strahlenbelastung der Erdatmosphäre von einem Watt pro Quadratcentimeter. Am Ende der Bestrahlung hat sich das auf einen Energieeintrag

von 10 Joule pro Quadratcentimeter summiert. Rechnet man diese Daten in einen in alle Richtungen gleichmäßigen Strahlungsfluss um, so hätte die Quelle eine Gammastrahlungsleistung von rund 5×10^{44} Joule pro Sekunde.

Bei einer Erde ohne Atmosphäre wären die Folgen katastrophal. Ein der Strahlung ausgesetzter Mensch, so er denn ohne Luft leben könnte, wäre sehr wahrscheinlich augenblicklich tot! Ein frontal zu Quelle stehender Mensch mit einer Körperoberfläche von rund einem Quadratmeter erhielte eine Ganzkörperdosis von etwa 100.000 Joule. Für eine 80 Kilogramm schwere Person ist das über 100-mal mehr als die letale Dosis. Glücklicherweise hat die Erde eine schützende Lufthülle, die Gammastrahlung, allerdings um den Preis einer mehr oder weniger tiefgreifenden Zerstörung der Ozonschicht, sehr effektiv absorbiert. Das beginnt damit, dass in der Stratosphäre die starke Dreifachbindung der Stickstoffmoleküle (N_2) durch die hochenergetischen Photonen aufgebrochen wird, wobei je zwei freie Stickstoffatome entstehen. Die Stickstoffatome verbinden sich dann sehr schnell mit dem Sauerstoff der Atmosphäre zu Stickoxiden, vornehmlich NO. Trifft sodann ein NO-Molekül auf ein Ozon-Molekül (O_3), so entreißt es dem Ozon ein Sauerstoffatom und es bildet sich ein NO_2 - und ein Sauerstoff-Molekül (O_2). Schließlich reagiert noch das NO_2 -Molekül mit einem weiteren Sauerstoffatom zu NO und O_2 . Als Quintessenz dieser Reaktionskette sind aus einem Ozonmolekül und einem Sauerstoffatom zwei Sauerstoffmoleküle entstanden. Das Ozon existiert nicht mehr.

Fragt sich: Wie hoch ist der Grad der Ozonzerstörung bei dem von Brian C. Thomas und Kollegen angenommenen „typischen“ Gamma-Ray Burst? Wie die Simulationen zeigen, trifft unmittelbar, nachdem die Gammastrahlung die oberen Schichten der Atmosphäre erreicht, ein kurzer UVB-Strahlungsblitz (290 bis 315 nm) mit einer Leistung von rund 2×10^{-3} Joule pro Quadratcentimeter und Sekunde die Erdoberfläche. Das entspricht ungefähr der siebenfachen UVB-Strahlungsintensität an einem sonnigen Sommertag. Da dieser Blitz jedoch nur kurze Zeit währt, ist er für das irdische Leben nicht besonders gefährlich. Allerdings: Für einen „Sonnenbrand“ bei Personen mit empfindlicher Haut würde es reichen. Die Auswirkungen auf die Ozonkonzentration sind jedoch tiefgreifend. Sie erniedrigt sich am Äquator um 55 Prozent, an bestimmten Orten sogar um 74 Prozent. Langfristig stellt sich weltweit eine mittlere um 35 Prozent reduzierte Ozonkonzentration ein. Da sich eine

Verringerung der Ozon-Konzentration von mindesten 10 Prozent rund 5 bis 7 Jahre erhält, bleibt diese Situation über mehrere Jahre stabil. Vermutlich müssten mindestens 10 Jahre vergehen, bis die anfängliche Ozonkonzentration wieder hergestellt wäre. Nebenbei sei angemerkt, dass die Menschheit durch die in den vergangenen Jahren freigesetzten Fluorchlorkohlenstoffe eine Abnahme der globalen Ozonkonzentration um 3 Prozent zu verantworten hat.

Etwa 90 Prozent der von der Sonne kommenden UVB-Strahlung werden von den Ozonmolekülen absorbiert. Verringert sich die Ozonkonzentration, so nimmt die UVB-Intensität auf der Erdoberfläche zu. Folglich hat die teilweise Zerstörung der Ozonschicht einschneidende Konsequenzen für das Leben auf der Erde. Beispielsweise führt eine Erniedrigung um 50 Prozent zu einer dreifach höheren UVB-Strahlenbelastung. Da UVB-Strahlung von biologischem Material stark absorbiert wird, sind insbesondere Proteine, DNA-Moleküle und einfache Organismen wie beispielsweise das Phytoplankton der Meere, die Grundlage der maritimen Ernährungskette, stark gefährdet. Chemische Bindungen werden aufgebrochen, Zellstrukturen verändert und Mutationen im Erbgut ausgelöst. Obwohl die Funktionsfähigkeit der Zellen auch bei hohen Strahlendosen zunächst meist erhalten bleibt, können die Strahlenschäden nach einiger Zeit zum Zelltod führen. Schon eine Erhöhung der UVB-Belastung um 10 bis 30 Prozent, andere Quellen sprechen von einer Verdoppelung, reicht aus, um besonders empfindliche Organismen abzutöten. So könnte ein Gamma-Ray Burst dafür verantwortlich gewesen sein, dass vor rund 460 Millionen Jahren in der erdgeschichtlichen Periode des Ordoviziums die meeresbewohnende Klasse der Gliederfüßler, die Trilobiten, ausstarb, weil das für ihre Ernährung wichtige Plankton zugrunde ging. Alternativ können gering geschädigte Zellen sich unkontrolliert teilen und zu bösartigen Tumoren wachsen. Mit anderen Worten: Eine HN in der Entfernung von Eta Carinae hätte allein schon aufgrund ihres Einflusses auf die Ozonkonzentration dramatische Auswirkungen auf das Leben auf der Erde.

Doch das ist noch nicht alles! Das bei der Reaktion der Gammaquanten mit dem Stickstoff der Atmosphäre anfallende Stickoxid (NO_2) ist ein braunes Gas. Es reduziert die Durchlässigkeit der Atmosphäre und blockiert vor allem das Licht der Sonne im sichtbaren und nahen UV-Bereich des elektromagnetischen Spektrums.

Das hat zur Folge, dass sich die Erdoberfläche weniger erwärmt und die Temperatur der Atmosphäre sinkt. Eine durch einen Gamma-Ray Burst ausgelöste erhöhte Konzentration könnte sogar zu einer kompletten Vereisung des Planeten führen.

Dass eine reduzierte Intensität des auf die Erde fallenden Sonnenlichts Auswirkungen auf das Klima haben kann, war in den Jahren zwischen 1645 und 1715 zu beobachten. In dieser Zeit zeigte die Sonne nahezu keine Sonnenflecken. Das ging einher mit einer Schwächung des Sonnenlichts um etwa 0,36 Prozent. In dieser sonnenfleckenfreien Zeit, dem so genannten „Maunder Minimum“, war es so kalt, dass in London die Themse über einen Zeitraum von mehreren Monaten immer wieder zufror. Man sprach damals von einer kleinen Eiszeit, die Europa erfasst hatte. Heute glaubt man, dass dies kein globales, sondern ein lokales Ereignis war. Auswertungen des Wettergeschehens über viele Jahre haben gezeigt, dass insbesondere für Zentralengland ein Zusammenhang zwischen einer fleckenarmen Sonne und Zeiten kälteren Klimas besteht. Man vermutet, dass eine reduzierte Sonneneinstrahlung, vornehmlich im Bereich des ultravioletten Lichts, die Luftmassen in der Stratosphäre stark beeinflusst. Dadurch kommt es zum „Abknicken“ des hoch über Europa wehenden „Jetstreams“ (starker Höhenwind), wodurch der Weg für kalte Luftmassen aus dem Osten frei wird. Doch vermutlich ist die langjährige Abwesenheit von Sonnenflecken nicht allein für die reduzierte Sonnenstrahlung verantwortlich zu machen. Zeitgleich mit der „ruhigen“ Sonne ereigneten sich mehrere Vulkanausbrüche. Sehr wahrscheinlich haben auch in die Atmosphäre geschleuderte Aschepartikel einen Teil des Sonnenlichts blockiert und so die Situation noch verschärft.

Doch zurück zu Eta Carinae. Sollte dieser Stern tatsächlich dereinst in einer Hypernova vergehen, dann könnte die Menschheit – falls es dann noch Menschen im herkömmlichen Sinne gibt - ganz schön in die Bredouille geraten. Doch Entwarnung ist angesagt: Sehr wahrscheinlich wird das geschilderte Albtraumszenario nicht wahr werden. Damit eine HN ihre volle Wirkung entfalten kann, muss eine der Strahlenkeulen die Erde treffen. So wie sich uns Eta Carinae derzeit darstellt, wird dieser Fall nicht eintreten. Die beiden pilzförmigen Auswürfe des Homunkulusnebels zeigen die Richtung der Rotationsachse von Eta Carinae an - und die weist nicht in

Richtung Erde! Aller Voraussicht nach werden auch die beiden Strahlenkeulen parallel zu Rotationsachse emittiert werden und deshalb die Erde nicht treffen.

Als Fazit aller Überlegungen bleibt festzustellen: Wenn Eta Carinae dereinst sein Dasein mit einem gewaltigen Feuerwerk beschließt, wird das das Leben auf der Erde nicht ernsthaft gefährden. Allein die Röntgen- und Gammastrahlung könnte für eine vorübergehende Beeinträchtigung sorgen. Auf die eingangs gestellte Frage: Muss man Angst haben, wenn Eta Carinae explodiert, darf man daher mit einem vorsichtigen „Nein“ antworten.

Abschließend noch eine Anmerkung. Man kann bemängeln, dass in diesem Kapitel zwar die Auswirkungen einer eventuellen Eta Carinae-Hypernova und die einer Supernova des Typs II, nicht aber die des Typs Ia in Betracht gezogen wurden. Das liegt daran, dass Eta Carinae – und nur von diesem Stern ist ja die Rede – sicher nicht als Supernova vom Typ Ia explodieren wird.

Von einer Supernova des Typs II sprechen die Astronomen, wenn ein massereicher Stern am Ende seiner Entwicklung allen „Brennstoff“ verheizt hat und unter seiner eigenen Schwerkraft kollabiert. Eine Supernova des Typs Ia „funktioniert“ anders, sie hat ihren Ursprung in einem Doppelsternsystem aus einem Weißen Zwerg und einem Roten Riesen. Rote Riesen sind massearme Sterne, die in ihrem Zentrum bereits allen Wasserstoff zu Helium fusioniert haben. Lediglich in einer schmalen Schale um den Sternkern findet noch eine Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium statt, die Energie liefert. In dieser Phase bläht sich der Stern gewaltig auf, wobei seine Oberfläche auf eine Temperatur von etwa 3.500 Grad abkühlt und daher – nomen est omen - rot leuchtet. Haben diese Sterne schließlich auch noch das Helium im Zentrum zu Kohlenstoff und Sauerstoff „verbrannt“, so wirft der Stern seine äußere Gashülle ab, wobei der Kern aus Kohlenstoff und Sauerstoff freigelegt wird. Diesen etwa erdballgroßen Rest des ausgebrannten Sterns bezeichnet man als Weißen Zwerg. In einem Doppelsternsystem aus einem Weißen Zwerg und einem Roten Riesen kann nun der Weiße Zwerg dank seiner Schwerkraft Gas von der aufgeblähten Hülle des nahen Roten Riesen an sich ziehen. Übersteigt schließlich die Masse des Weißen Zwergs eine bestimmte Grenze, so wird der Weiße Zwerg

instabil und explodiert als Supernova des Typs Ia. Die dabei freiwerdende Energiemenge kann bis zu 100-mal größer sein als bei einer SN des Typs II.

Handelt es sich bei Eta Carinae um einen Einzelstern, ist die Sache klar: Es kann nur zu einer SN des Typs II kommen. Anders in dem vermuteten Doppelsternsystem mit zwei gleich alten Sternen. Damit sich dort einer der beiden Partner zu einem Weißen Zwerg entwickeln kann, dürfte dessen Masse nicht mehr als circa acht Sonnenmassen betragen. Da massereiche Sterne jedoch viel schneller „heranreifen“ als massearme, explodiert der um ein Mehrfaches „gewichtiger“ Partner, noch bevor der andere zum Weißen Zwerg geworden ist. Die Voraussetzungen für eine SN des Typs Ia sind daher nicht erfüllt.