

Wasser verstärkt Strahlenschäden

Durch den Energietransfer von der Hydrathülle auf ein Biomolekül entstehen mehrere reaktive Teilchen, die etwa die DNA angreifen können

Radioaktive Strahlung schädigt Gewebe auf mehr Wegen als bislang bekannt. Energie der ionisierenden Strahlen kann nämlich zunächst in Wassermolekülen deponiert und dann an benachbarte Biomoleküle abgegeben werden, wie Physiker des Heidelberger Max-Planck-Instituts für Kernphysik festgestellt haben. Durch den Energietransfer auf das organische Molekül, entstehen Elektronen und geladene Moleküle, die weitere Schäden in der näheren Umgebung verursachen können. Dadurch ist die biologische Wirkung dieses intermolekularen Coulombzerfalls sehr hoch, sodass es etwa im DNA-Molekül des Erbguts zu irreparablen Brüchen kommen kann.

Was für einen gesunden Organismus fatal sein kann, ist bei der Strahlentherapie von Tumorgewebe gerade das Ziel: Energiereiche Strahlung löst in biologischen Zellen zahlreiche chemische Reaktionen aus – mit zerstörerischer Wirkung für Biomoleküle. Alpha-, Beta-, Gamma- und intensive Röntgenstrahlen, die umgangssprachlich als radioaktive Strahlung bezeichnet werden, schlagen aus Biomolekülen reaktive Teilchen wie Radikale, Ionen und langsame Elektronen heraus. Diese schädigen das Erbgut und andere Teile der Zelle. So können sie einen oder gar beide Stränge in der Strickleiterstruktur des DNA-Moleküls brechen. Besonders fatal wirken dabei die vielen Elektronen, die ionisierende Strahlung auf ihrem Weg durch das Gewebe aus Biomolekülen herausschlägt. Sie können in einem lawinenartigen Effekt weitere langsamere Elektronen freisetzen, die aber immer noch genügend Energie besitzen, um Biomoleküle kaputt zu machen. Einzelne solcher Schäden an Biomolekülen können Zellen zwar reparieren, mit einer zu großen Zahl werden sie nicht mehr fertig.

Ein Elektron erzeugt fünf schädliche Produkte

„Wir haben jetzt einen bisher unbekannten Mechanismus für Strahlenschäden in Biomolekülen beobachtet“, sagt Alexander Dorn, dessen Team am Max-Planck-Institut für Kernphysik eine Forschungsgruppe leitet. Dabei spielt die Hydrathülle, also die Wasserhülle eines Biomoleküls die entscheidende Rolle: Jedes Basenpaar der DNA etwa, das einer Sprosse der molekularen Strickleiter entspricht, ist von einer Hydrathülle aus bis zu 22 Wassermolekülen umgeben. Ein relativ langsames Elektron, wie es ionisierende Strahlung im Gewebe erzeugt, kann aus einem Wassermolekül dieser Hülle ein Elektron herausschlagen. In das entstehende Loch fällt ein anderes Elektron aus dem Wassermolekül, wobei Energie frei wird. Diese Energie kann dann das Biomolekül sehr schnell ionisieren. Diesen Prozess nennen Physiker intermolekularen Coulombzerfall, den Lorenz Cederbaum von der Universität Heidelberg 1997 theoretisch vorhergesagt hat und der inzwischen in vielen Experimenten nachgewiesen wurde.

Letztlich erzeugt ein Elektron mit relativ wenig Energie, beim intermolekularen Coulombzerfall also fünf reaktive Produkte: drei noch energieärmere Elektronen sowie die energiereichen Ionen des Wassers und des Biomoleküls. Diese Produkte können weitere Schäden anrichten, und zwar besonders gravierende. „Weil gleich mehrere reaktive Teilchen in einem Volumen, das etwa so groß ist wie ein Protein oder ein DNA-Molekül, entstehen, können sie Biomoleküle irreparabel schädigen“, sagt Alexander Dorn. Auch wenn der Mechanismus im Vergleich zur direkten Ionisierung von Biomolekülen relativ selten ist, sollten Biophysiker ihn wegen der relativ großen Schäden, die dabei auftreten können, in ihren Modellen berücksichtigen, wenn sie die Auswirkungen

von ionisierender Strahlung auf Gewebe berechnen.

Coulombexplosion der positiv geladenen Moleküle

Als Modell für ein DNA-Molekül mit Hydrathülle untersuchten die Heidelberger Wissenschaftler die schwache Allianz – Chemiker sprechen von einem Komplex – aus einem Molekül Tetrahydrofuran und einem Wassermolekül. Das organische Molekül ähnelt dem Zuckermolekül Desoxyribose, einem der Bausteine der DNA-Strickleiter. Erzeugt ein Elektronenstoß im Sauerstoff-Atom des Wassermoleküls in dieser chemischen Allianz ein Loch, so kann das organische Molekül über den intermolekularen Coulombzerfall ionisiert werden. Weil sich die nun jeweils positiv geladenen Wasser- und Tetrahydrofuran-Moleküle abstoßen, bricht die schwache Bindung auf und es kommt zur sogenannten Coulombexplosion des Komplexes.

Die Experimente machten die Heidelberger Forscher mit einem Reaktionsmikroskop. „Damit können wir aus einem einzelnen Coulomb-Zerfall beide Ionen und wenigstens ein Elektron nachweisen“, sagt Xueguang Ren vom Max-Planck-Institut für Kernphysik, der die experimentellen Daten aufgenommen hat. Wissenschaftler der Universität Irkutsk in Russland unterfütterten die Experimente mit theoretischen Studien, indem sie die Struktur des Komplexes aus Tetrahydrofuran und Wasser sowie den Ablauf des Coulombzerfalls berechneten.

So untersuchten die Forscher wie oft der Coulombzerfall im Vergleich zu einem anderen Prozess auftritt, der zum gleichen Ergebnis führt. Denn ein ursprüngliches, relativ energiereiches Elektron kann nacheinander auch das Wasser- und das Tetrahydrofuran-Molekül ionisieren. Die Physiker stellten jedoch fest, dass der Coulombzerfall etwa fünfmal wahrscheinlicher ist als die Doppelionisierung durch zwei Stöße des ursprünglichen Elektrons. „Damit dürften auch die Strahlenschäden durch die mehrfache Ionisation an nah beieinander liegenden Stellen eines Biomoleküls beim Coulombzerfall fünfmal größer sein“, sagt Xueguang Ren. „Wir erwarten, dass dieser Mechanismus generell ein verbreitetes Phänomen in schwach gebundenen organischen Systemen ist und einen wichtigen Mechanismus für Strahlenschäden in hydratisierten Biomolekülen wie DNA darstellt.“

Originalveröffentlichung

Xueguang Ren, Enliang Wang, Anna D. Skitnevskaya, Alexander B. Tromov, Kirill Gokhberg und Alexander Dorn

Experimental evidence for ultrafast intermolecular relaxation processes in hydrated biomolecules
Nature Physics, 23. Juli 2018