

Der begeisterte Blitzler

Der Physiker Ferenc Krausz hat neuartige Methoden zur Erzeugung extrem kurzer Lichtblitze entwickelt, um mit ihnen Elektronen auf die Spur zu kommen. Für diese Forschung wurde Krausz 2023 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Zurücklehnen will sich der ungarisch-österreichische Wissenschaftler aber nicht, denn seine Lichtblitze sind nicht nur ein neues Fenster in den Mikrokosmos, sie könnten bald auch die Medizin auf den Kopf stellen.



Dem Physiker Ferenc Krausz ist es gelungen, mit ultrakurzen Laserpulsen in die Welt der Elektronen vorzudringen. Dafür wurde er mit dem Physiknobelpreis 2023 ausgezeichnet. © Georg Hochmuth/APA/picturedesk.com

Kaum erklingt das Stampfen der Hufe, ist das Pferd auch schon an uns vorbeigaloppiert. Seine Hufe verschwimmen, so schnell fliegt das Tier dahin. Wie wir heute wissen, ist das mehr als eine Metapher: An einem Punkt ihrer Schrittfolge haben galoppierende Pferde alle vier Hufe in der Luft – eine wahre Flugphase. Diese Erkenntnis verdanken wir dem Erfinder Eadweard Muybridge (1830–1904), der als Erster Fotografien eines Pferds in Galopp anfertigen konnte. Dafür spannte der Brite Drähte über eine Reitbahn, die ein vorbeirasendes Pferd zerriss und damit den neuartigen, elektromagnetischen Auslöser seitlich aufgestellter Kameras betätigte.

Mit seiner Konstruktion erreichte Muybridge Belichtungszeiten im Bereich einer Millisekunde und stieß die Tür zu einer neuen Möglichkeit auf, die Natur zu erforschen: der Zeitlupe. Doch so schnell Pferde auch laufen mögen, sie erblassen vor Neid angesichts der Geschwindigkeiten, die im Mikrokosmos herrschen.

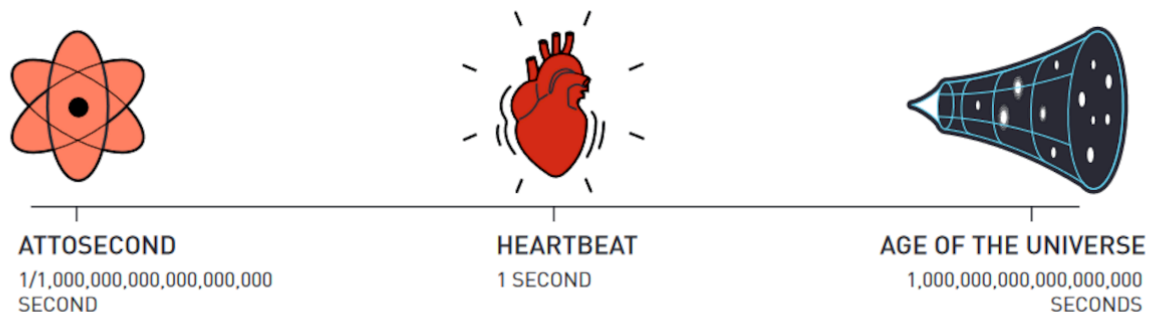
Die Uhren von Elektronen ticken im Bereich der Attosekunden. Mit der Vorsilbe ersparen sich Fachleute einige Nullen, ist eine Attosekunde doch das Milliardstel einer Milliardstelsekunde. Das ist so kurz, dass es lange Zeit als unmöglich galt, diese Zeitskalen aufzulösen. Erst die Quantenphysik erlaubte es, zusammen mit moderner Lasertechnik, ein Fenster in die Welt der Attosekunden zu öffnen. Für diese Errungenschaften erhielten Anne L'Huillier, Pierre Agostini und Ferenc Krausz 2023 den Physiknobelpreis. Mit ihren genialen Experimenten haben sie Muybridges Erbe angetreten.

Krausz, der in Ungarn geboren wurde, studierte Physik und Elektrotechnik in Budapest und an der Technischen Universität Wien, wo er zunächst in Laserphysik promovierte und sich schließlich habilitierte. Vom FWF zunächst mit dem START-Preis, später mit dem Wittgenstein-Preis ausgezeichnet, erzeugte Krausz an der TU Wien erstmals einzelne Attosekunden-Pulse.

Heute ist Ferenc Krausz Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik im bayrischen Garching und Inhaber des Lehrstuhls für Experimentelle Physik/Laserphysik an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Er ist der Welt der ultrakurzen Lichtblitze treu geblieben. Krausz nimmt Anwendungen jenseits der Grundlagenforschung in den Fokus: Er will mit den Attosekunden-Technologien die Medizin revolutionieren. Der Nobelpreisträger im Gespräch über seine Forschung und die Freiheit, seiner Neugier folgen zu dürfen.

Ferenc Krausz hat neuartige Methoden entwickelt, extrem kurze Lichtblitze zu erzeugen. Für diese Forschung wurde er 2023 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Krausz studierte Physik und Elektrotechnik in Budapest und an der TU Wien.

Vom FWF zunächst mit dem START-Preis, später mit dem Wittgenstein-Preis ausgezeichnet, gelang es ihm in Wien erstmals Attosekundenpulse zu erzeugen und damit in die Welt der Elektronen vorzudringen.



Electrons' movements in atoms and molecules are so rapid that they are measured in attoseconds. An attosecond is to one second as one second is to the age of the universe.

©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Eine Attosekunde steht zu einer Sekunde (das entspricht ungefähr einem Herzschlag) so, wie eine Sekunde zum Alter des Universums. © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Herr Krausz, Sie haben sich der Attosekunden-Physik verschrieben. Was ist eigentlich so interessant an der Welt des Ultrakurzen?

Ferenc Krausz: Grundsätzlich ist alles im Mikrokosmos sehr beschleunigt und somit nicht nur in den Ortsdimensionen sehr klein, sondern auch in der Zeitdimension. Um dorthin vorzudringen, brauchen wir die Fähigkeit, in so kurze Zeitintervalle reinschauen zu können. Zum Beispiel wurde bereits in den Achtzigern und Neunzigern die Femtochemie entwickelt, wo es darum geht, das Entstehen und Aufbrechen chemischer Bindungen in Echtzeit zu beobachten.

Nun müssen sich dafür ganze Atome bewegen, daher spielt sich das im Bereich von Femtosekunden ab. Elektronen dagegen sind etwa eintausendmal leichter als Atome – und damit auch entsprechend flinker. Wollen wir diese Teilchen in ihrer Bewegung gewissermaßen einfrieren, müssen unsere Messmethoden ebenfalls schneller sein. Das heißt, das Streben nach der Erzeugung und Messung von Attosekunden-Blitzen war kein sportlicher Ehrgeiz, sondern hatte einen sehr guten Grund, nämlich in diese vorher unbekannte Welt der Elektronen vorzustoßen.

Es braucht also extrem kurze Belichtungszeiten, um Elektronenbewegungen nachvollziehen zu können. Wie lassen sich solche Attosekunden-Blitze erzeugen?

Krausz: Zur Erzeugung von Attosekunden-Pulsen benötigen wir zunächst sehr kurze, exakt kontrollierbare Laserpulse, in denen Licht idealerweise nur eine einzelne Schwingung durchläuft. Die zweite Zutat ist eine sogenannte Nichtlinearität. Fachleute

sprechen von nicht linearen Zusammenhängen, wenn kleine Änderungen einer Größe große Veränderungen bei einer anderen auslösen. So ein Effekt tritt etwa in speziellen Materialien auf, wenn sie mit intensiven Laserblitzen beschienen werden. Durch das Licht werden Elektronen aus Atomen katapultiert oder in das Leitungsband eines Festkörpers gehoben – wodurch er kurzzeitig leitfähig wird.

Beide Male ist es möglich, diese Anregung der Elektronen auf die Intensitätsspitze des Laserblitzes zu beschränken. So schneidet man ein sehr kleines Zeitintervall aus jedem Wellenberg und Wellental einer Laserwelle aus. Besteht der Laserpuls dann nur aus einem einzigen zentralen Wellenberg, mit kleineren Nebentälern, werden die Elektronen innerhalb von Attosekunden angeregt – und schon haben wir einen Attosekunden-Puls. Die Methode kann übrigens auch eine Art Transistor ergeben, der unsere Elektronik um ein Vielfaches beschleunigen könnte, indem man Strom mit Licht schaltet.

Bei Lichtpulsen steigt also die Intensität in jeder halben Periode der Lichtwelle zunächst an, ist dann kurz sehr hoch und fällt wieder ab. Dauert so eine Halbwelle also bereits nur etwa eine Femtosekunde, können Effekte, die nur am Gipfel der Intensität geschehen können, eine Dauer von Attosekunden haben.

Krausz: Ja, und zwar wiederholt, an der Spitze aller Halbperioden des Laserpulses. Dieses Rezept haben meine Mitpreisträger umgesetzt: Mithilfe starker Laser konnten sie innerhalb eines Bruchteils der Halbwellenperiode, und damit des Bruchteils einer Femtosekunde, zuerst Elektronen aus Gasatomen reißen und danach zurückschleudern, wodurch Lichtwellen mit vielfachen Frequenzen des ursprünglichen Lasers entstehen – ein hochgradig nicht linearer Prozess. Doch dadurch entsteht ein Zug von Attosekunden-Blitzen in extrem kurzer zeitlicher Abfolge. Anfang des Jahrtausends hat es unsere Gruppe dann geschafft, einzelne Attosekunden-Pulse zu erzeugen. Für die Ultrakurzzeitfotografie im Mikrokosmos ist dies sehr vorteilhaft, denn wie praktisch wäre eine Kamera, die zwar sehr kurze Belichtungszeiten hat, aber ununterbrochen blitzt.

Attosekunden sind unvorstellbar kurz, viel kürzer als die Zeitauflösung aller bekannten Detektoren. Wie konnten Sie sicher sein, erfolgreich Attosekunden-Blitze hergestellt zu haben?

Krausz: Indem wir das Prinzip der Schmierbild-Kamera weiterentwickelt haben. Die Idee dahinter gibt es schon seit Langem: Fällt ein kurzer Lichtblitz auf einen schnell rotierenden Spiegel, wird der reflektierte Puls zu einem Lichtstreifen auf einem Schirm „verschmiert“. Kennt man die Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels, kann man aus der Länge des Streifens die Dauer des Lichtblitzes berechnen. Damit erreicht man bereits Auflösungen im Bereich von Mikrosekunden.

Die nächste Entwicklungsstufe war es, mit dem zu messenden Lichtpuls Elektronen aus einem geeigneten Material herauszulösen, die dann mit dem schnell variierenden elektrischen Feld einer Mikrowelle abgelenkt werden – und so auf einem Schirm wieder ein Schmierbild erzeugen. Damit kommt man in den Bereich der Pikosekunden, was aber immer noch eine Million Mal zu lang ist. Um schließlich Attosekunden-Auflösung zu erreichen, haben wir Lichtwellen zur Ablenkung der Elektronen genutzt. Auf diese Weise haben wir die Ablenkung noch einmal hunderttausendfach beschleunigt und die Attosekunden-Dauer der Pulse nachgewiesen.

Wie können wir mit dieser Technologie Neues über die Natur lernen?

Krausz: Bereits bei der Femtochemie ist der Ansatz, mithilfe eines kurzen Lichtblitzes einem System, also zum Beispiel einem Molekül, Energie zuzuführen. Dadurch treten Veränderungen im System ein, wodurch etwa chemische Bindungen auseinanderbrechen. Um so etwas nachzuvollziehen, schickt man kurz nach dem ersten Lichtblitz einen zweiten Puls hinterher, der die Veränderungen abtastet. Gewissermaßen lassen sich so Schnappschüsse von extrem schnellen Prozessen anfertigen.

Freilich sind das nicht Schnappschüsse, wie wir sie von der herkömmlichen Fotografie kennen, soweit ist die Technologie leider noch nicht. Tatsächlich vermessen wir mit dem Abtastpuls die zeitliche Veränderung anderer Größen, wie zum Beispiel die Absorption des Attosekunden-Blitzes oder die Energieverteilung der Elektronen, die der Puls aus dem Molekül schlägt. Im ersteren Fall schauen wir uns das Spektrum des zweiten Lichtpulses an, den das Molekül durchlaufen hat. Dort werden gewisse Frequenzen fehlen, die das System verschluckt hat. Dadurch erhalten wir Informationen über den momentanen Zustand des Systems, nachdem es vom ersten Puls angeregt wurde.



Die drei Physik-Preisträger:innen des Jahres 2023 nach ihren Nobelpreisvorlesungen am 8. Dezember 2023 in der Aula Magna der Universität Stockholm. Von links: Ferenc Krausz, Anne L'Huillier und Pierre Agostini. © Nobel Prize Outreach. Photo: Nanaka Adachi

Sie haben mit der Messung ultrakurzer Lichtimpulse etwas geschafft, was noch niemandem vor Ihnen gelungen ist, und dafür die weltweit höchste wissenschaftliche Auszeichnung bekommen. Was möchten Sie nun noch erreichen?

Krausz: Die Frage, wie es weitergeht, hat sich tatsächlich schon vor rund 20 Jahren gestellt, nach dem Durchbruch mit den ersten Experimenten in Wien. Denn natürlich arbeitet man nicht auf einen Preis hin. Aber damals war klar, dass wir die Werkzeuge haben, um in eine Welt zu schauen, die noch niemand zuvor in Echtzeit gesehen hat.

Doch bevor wir damit neue Erkenntnisse gewinnen konnten, mussten wir Vertrauen in die neuen Techniken herstellen. Wir haben ein Jahrzehnt damit verbracht, mit den neuen Werkzeugen Prozesse, die theoretisch gut verstanden waren, zu beobachten, um sicherzugehen, dass die neuen Techniken gut funktionieren. Und sie haben die Prüfungen bestanden. In dieser Phase konnten wir die Messtechnik auch wesentlich weiterentwickeln und wir wussten schließlich sicher, dass es funktioniert. Dadurch, dass wir Prozesse in Echtzeit erlebt haben, so wie es die Berechnungen vorhergesagt haben.

Wie ging es dann weiter?

Krausz: Unsere Arbeitsgruppe hat sich dann intensiv mit der Frage beschäftigt, welche neuen Erkenntnisse die Attosekunden-Messtechnik zutage fördern kann und wie wir das für etwas Praktisches nützen könnten. Wir haben nach 2010 zwei große Richtungen identifiziert. Zum einen die Weiterentwicklung der Elektronik. Es war klar, dass wir dazu von einfachen atomaren Systemen und Molekülen zu komplexen Halbleiterstrukturen wechseln müssen, aus denen unsere Laptops oder Mobiltelefone bestehen. Das bedeutet, sich mit Fragen der Festkörperphysik zu beschäftigen, die noch unbeantwortet sind.

Ein Ziel dabei ist, Mikroprozessoren, die in all unseren Gadgets enthalten sind, zu beschleunigen. Hier gibt es in Bezug auf Taktfrequenz seit ungefähr zwei Jahrzehnten so gut wie keinen Fortschritt. Man schaffte es zwar, die integrierten Schaltungen immer weiter zu miniaturisieren, und damit immer mehr Transistoren in dasselbe Volumen hineinzupacken. Aber in der zeitlichen Dimension hat sich nichts verändert. Unsere jüngsten Experimente an Festkörpern zeigten nun, dass wir elektrischen Strom sogar bei Lichtfrequenzen, also hunderttausendmal schneller als in der heutigen Elektronik, ein- und ausschalten können, indem wir Isolatoren mit Licht kurzzeitig leitend machen.

Die zweite Richtung führt uns in die medizinische Anwendung. Wir haben uns gefragt, wie man die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie für die Medizin nutzbar machen kann. Dabei kam die Frage auf, ob man zum Beispiel aus menschlichem Blut so viel Information rausholen kann, um den individuellen Gesundheitszustand einer Person zu messen und Krankheiten zu erkennen – und zwar lange bevor Symptome da sind. Also in einem Stadium, wo Therapien wirkungsvoll anwendbar sind. Das ist entscheidend.

Wie weit entfernt sind wir da noch von der Anwendung?

Krausz: Nach zehn Jahren sehen wir erste sehr ermutigende Ergebnisse. Mittels extrem kurzer Infrarotpulse bringen wir die Moleküle im Blut in Schwingung, so wie ein Musiker seine Stimmgabel. Doch statt akustischer Signale senden die Moleküle Infrarotwellen aus. Die sind charakteristisch für die Moleküle, die sich im Blut befinden – die haben je nach atomarer Zusammensetzung unterschiedliche Schwingungsfrequenzen, all diese Information steckt in diesem Signal drinnen. Wir nennen das Infrarotfingerabdruck, da die Frequenzen im ausgesandten Infrarotlicht erfasst werden. Sie liefern eine fingerabdruckähnliche Signatur über die individuelle Blutprobe von jeder Einzelperson.

Kann man diese Infrarotwellen empfindlich genug messen, gewinnt man aus dem Infrarot-Fingerabdruck eine gigantische Menge an Information. Idealerweise fängt man mit den Messungen an, wenn der Mensch noch gesund ist, um eine Referenz zu haben, gegenüber welcher Abweichungen, die entstehende Krankheiten verursachen, erkennbar sind. Wir haben das inzwischen für die drei großen Krankheitsgruppen Krebs, Herz- Gefäß- und Stoffwechselerkrankungen wie zum Beispiel Diabetes getestet und sehen, dass die Methode anspricht.

„Wir wollen mit dem Infrarotfingerabdruck Krankheiten erkennen, lange bevor Symptome da sind.“

Ferenc Krausz

Wenn Sie auf Ihre Anfänge in Wien in den 90er-Jahren zurückblicken: Welche Rahmenbedingungen haben Sie vorgefunden, die Ihre wissenschaftliche Laufbahn ermöglichten?

Krausz: Ich habe Wien und den Menschen, die für mich zuständig waren, außerordentlich viel zu verdanken. An allererster Stelle dem späteren FWF-Präsidenten Arnold Schmidt, meinem Mentor und Wegbereiter an der TU Wien. Im Wesentlichen gibt es drei Faktoren, die erfolgreiche Wissenschaft ausmachen: eine gute Infrastruktur, internationaler Austausch und größtmögliche Freiheit. Durch Arnold Schmidt waren wir an der TU unfassbar gut vernetzt. Es kamen laufend Topforscher:innen nach Wien, wie zum Beispiel der kanadische Physiker Paul Corkum.

Diese Begegnungen haben mich geprägt und wir wussten immer, was an vorderster Front passiert. Das waren ideale Bedingungen in Verbindung mit viel Freiraum. Dieser ist essenziell, um für sich selbst zu definieren, welche Fragen man beantworten will. Das ist zu Beginn am wichtigsten, egal wie viel Zeit das braucht. Hat man diesen Kompass gefunden, ist das eine unerschöpfliche Quelle für Motivation, die einen durch alle Höhen und Tiefen trägt.

Sie haben 1996 den START-Preis und 2002 den Wittgenstein-Preis erhalten. Welche Rolle spielen Förderorganisationen wie der FWF auf dem Weg an die Spitze?

Krausz: Die beste Idee bringt nichts, wenn man sie nicht umsetzen kann, etwa durch fehlende Werkzeuge und Geräte. Da waren die beiden FWF-Förderungen enorm wichtig für meinen Weg, nicht nur die Mittel selbst, sondern auch die Freiheiten, die damit einhergingen. Das hat für mich den Wert der Finanzierungen verdoppelt. Mittel mit so wenigen Einschränkungen wie möglich bereitzustellen, das sind ideale Voraussetzungen für die Wissenschaft.

Wie bewerten Sie aktuell die Spitzenforschung in Europa?

Krausz: Ein Problem, das ich sehe, sind Versuche, Forschung programmatisch von oben zu steuern, wo dann viele Milliarden in riesige Projekte, sogenannte Flagships, zur Erforschung von zum Beispiel Quanteninformatik oder Graphen fließen. Das ist ein bisschen ähnlich zur Planwirtschaft, politisch gesteuert. Sinnvoller würde mir erscheinen, mit diesen Milliarden für die Programmforschung das Budget von Institutionen wie dem ERC, dem Europäischen Forschungsrat, aufzustoßen. Ich war dort selbst viele Jahre im Entscheidungsgremium und mir blutete das Herz, wie viele hervorragende Projekte wir ablehnen mussten. Nicht einmal die Hälfte der herausragendsten Projekte konnte finanziert werden. Das macht Europa im weltweiten Wettbewerb um die besten Köpfe und Ideen nicht gerade konkurrenzfähiger.

„Finanzielle Mittel mit so wenigen Einschränkungen wie möglich bereitzustellen, das sind ideale Voraussetzungen für die Wissenschaft.“

Ferenc Krausz

Wie sichert exzellente Wissenschaft unsere Zukunft?

Krausz: Die US-amerikanische Wissenschaft hätte nicht so groß werden können, wenn sie nicht so attraktiv für die besten Forschenden aus aller Welt gewesen wäre. Diesem Wettbewerb müssen wir uns auch in Europa stellen. Nur dann passieren unerwartete und große Dinge. Auch wenn man Grundlagenforschung nicht planen kann und soll, ist es gut, für sich selbst

Richtlinien zu definieren. Etwa indem man darüber nachdenkt, wie man der Gesellschaft aus den Mitteln, die sie bereit ist, für Forschung auszugeben, das Maximum zurückgeben kann.

Als Nobelpreisträger erhält man viel Aufmerksamkeit. Haben Sie den Eindruck, jetzt noch mehr Verantwortung zu tragen?

Dafür braucht es keine neuen Modelle. Die Max-Planck-Gesellschaft ist ein gutes Beispiel. Nach amerikanischem Vorbild suchen wir nach den besten Köpfen, denen man zutraut, vielleicht eines Tages neue Erkenntnisse hervorzubringen, die die Menschheit voranbringen. Die Organisation stellt dafür so viele Mittel wie möglich und maximale Freiheiten zur Verfügung. Das Resultat spricht für sich. Allein in den vergangenen fünf Jahren hat die Max-Planck-Gesellschaft jährlich einen Nobelpreisträger hervorgebracht.

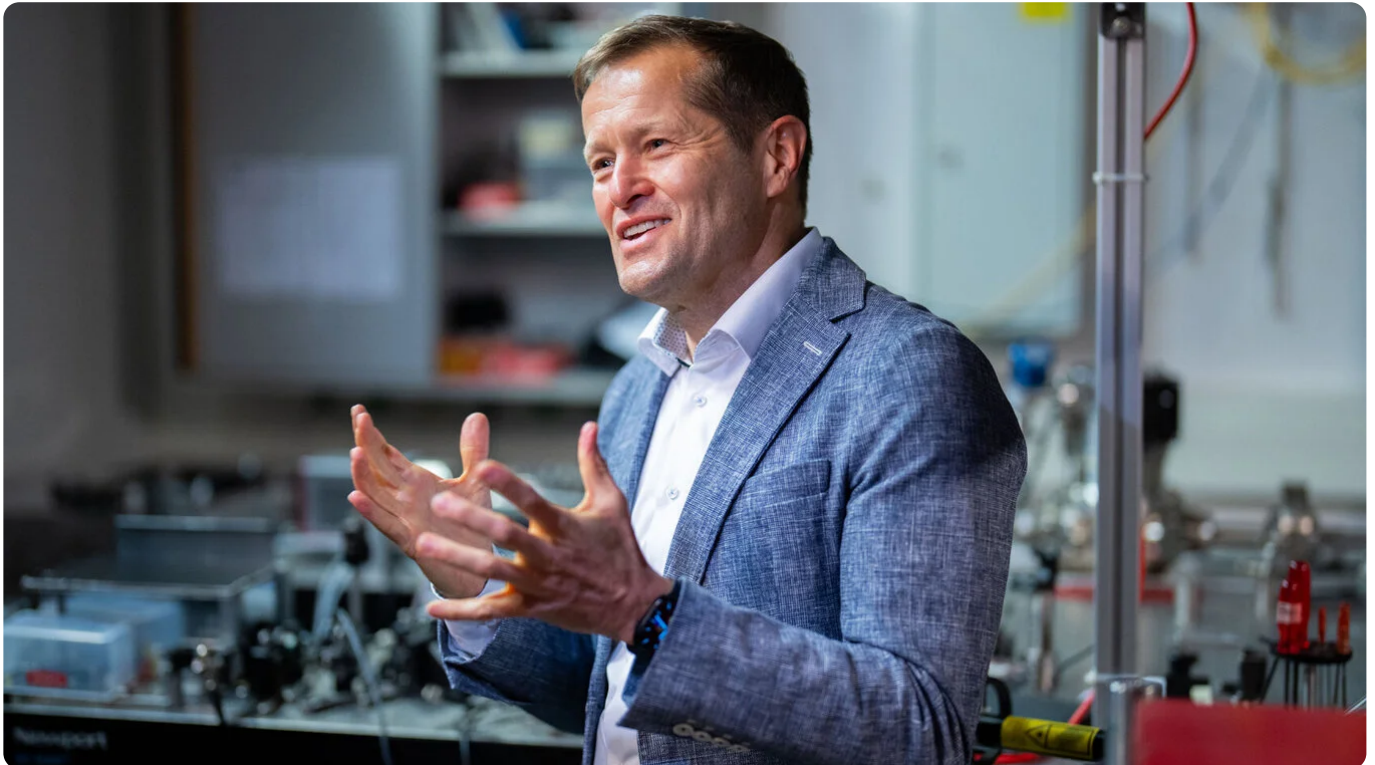
Krausz: Mich erreichen jetzt tatsächlich viele Anfragen. Aus Gymnasien, Hochschulen, von Konferenzveranstaltern. Und aus Regierungskreisen. Ich freue mich über dieses Interesse, das man nutzen kann, um für unser Fachgebiet und, vielleicht noch wichtiger, für die Wichtigkeit der Grundlagenforschung zu werben – weit über die Fachkreise hinaus. In meinem direkten Arbeitsumfeld war es mir immer schon wichtig, meine Erfahrungen an die nächste Generation weiterzugeben und junge Kolleginnen und Kollegen dabei zu unterstützen, ihren Weg zu finden. Das tue ich schon seit vielen Jahren. Seit der Preisverleihung habe ich vermehrt Gelegenheit, solche Gespräche auch mit Forschenden am Beginn ihrer Laufbahn zu führen.

Vielen Dank für das Gespräch!



Light pulses at mind-boggling speeds

Physicist Ferenc Krausz has developed new methods for generating extremely short light pulses in order to observe electrons. For his research, Krausz was awarded the 2023 Nobel Prize. The Hungaro-Austrian scientist has no intention of slowing down, however, as his light pulses not only open up a new window into the microcosm, they could also soon create revolutionary changes in medicine.



Physicist Ferenc Krausz succeeded in advancing into the world of electrons by means of ultra-short laser pulses. This achievement earned him the 2023 Nobel Prize in Physics. © Georg Hochmuth/APA/picturedesk.com

As soon as we hear the pounding of hooves, the horse has already sped past us. The animal is so fast that its hooves are a blur. As we know today, at one point in their movement, galloping horses have all four hooves in the air – they are in full flight, as it were. It was the inventor Eadweard Muybridge (1830–1904) who was able to take the first serial photographs of a horse at full gallop. The Englishman achieved this by stretching wires across a riding track, which were then torn by a passing horse. This activated the innovative electromagnetic shutter release of cameras set up alongside.

With his construction, Muybridge achieved exposure times in the range of a millisecond and opened the door to a new way of exploring nature: slow motion. But even if horses can move very fast, they can't hold a candle to the speeds that prevail in the microcosm.

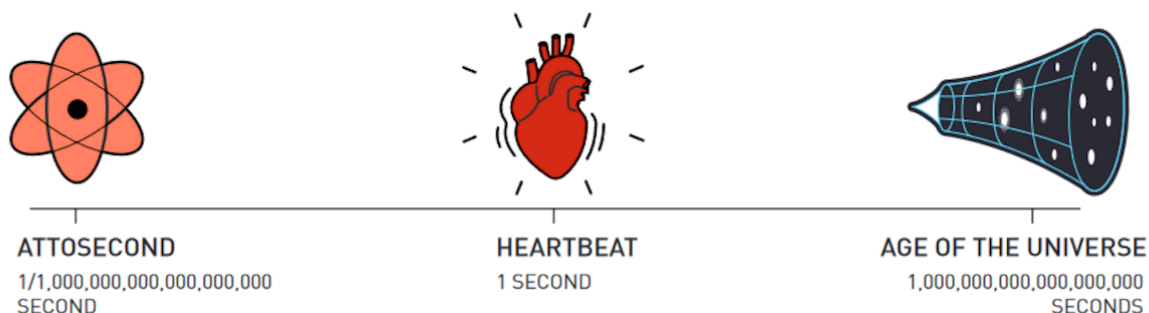
The clock of an electron ticks in the attosecond range. By using the prefix 'atto', experts save some time, as an attosecond is a billionth of a billionth of a second. This period is so short that it was long considered impossible to observe. It took quantum physics, together with modern laser technology, to open a window into the world of attoseconds. Anne L'Huillier, Pierre Agostini, and Ferenc Krausz were jointly awarded the 2023 Nobel Prize in Physics for these achievements. With their ingenious experiments, they are carrying forward Muybridge's legacy.

Krausz, who was born in Hungary, studied physics and electrical engineering in Budapest and at TU Wien (Vienna University of Technology), where he completed his doctorate in laser physics and then qualified as a professor. After winning first the FWF's START Award and, later, the FWF Wittgenstein Award, Krausz was the first to generate individual attosecond pulses at TU Wien.

Today, [Ferenc Krausz](#) is a Director at the Max Planck Institute of Quantum Optics in Garching, Bavaria, and holds the Chair of Experimental Physics-Laser Physics at the Ludwig Maximilian University in Munich. Having remained loyal to the world of ultrashort pulses of light, Krausz is looking at applications beyond the realm of basic research: he wants to revolutionize medicine using attosecond technologies. In our interview, the Nobel laureate talks about his research and the freedom to go where his curiosity leads him.

[Ferenc Krausz](#) has developed new methods for generating extremely short light pulses. For his research, Krausz was awarded the 2023 Nobel Prize in Physics. Krausz studied physics and electrical engineering in Budapest and at TU Wien.

Awarded first the FWF's [START Award](#) and, later, the [FWF Wittgenstein Award](#), Krausz was the first to generate individual attosecond pulses in Vienna in order to observe electrons in real time.



Electrons' movements in atoms and molecules are so rapid that they are measured in attoseconds. An attosecond is to one second as one second is to the age of the universe.

©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

One attosecond is related to one second (equivalent to one heartbeat) in the same way that one second is related to the age of the universe. © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Mr. Krausz, your focus is on attosecond physics. What is actually so interesting about the world of the ultrashort?

Ferenc Krausz: In fact, everything in the microcosm is very much accelerated, meaning it is not only very small in spatial dimensions but also in terms of the time dimension. In order to make inroads there, we need the ability to look into such short time intervals. Femtochemistry, for instance, was developed back in the 1980s and 1990s. This field involves observing the formation and breaking up of chemical bonds in real time.

In order for this to happen, entire atoms have to move, which is why this process takes place in the femtosecond range. Electrons, on the other hand, are around a thousand times lighter than atoms, which is why they move at much greater speeds. If we want to capture a 'still' of the movement of these particles, our measurement techniques have to be faster, too. In other words, pursuing the goal of generating and measuring attosecond pulses was not an end in itself, but was motivated by a very good reason: enabling us to advance into this previously unknown world of electrons.

So one needs extremely short exposure times to be able to track electron movements. How can you generate such attosecond pulses?

Krausz: In order to generate attosecond pulses, we first need very short, precisely controllable laser pulses in which light ideally passes through only a single cycle. The second ingredient is a so-called non-linearity. Experts speak of non-linear relationships when small changes in one aspect trigger large changes in another. These effects can be observed in special materials, for example,

whenever you shine intense laser pulses on them. The light catapults electrons out of atoms or lifts them into the conduction band of a solid – thus making the solid conductive for a brief period.

In both cases, it is possible to limit this excitation of the electrons to the intensity peak of the laser pulse. In this way, you cut out a very small time interval of each peak and trough of a laser wave. If the laser pulse then consists of only a single central wave peak with smaller side troughs, the electrons are excited within attoseconds – and we get an attosecond pulse. Incidentally, this method could also result in a type of transistor that could greatly speed up our electronics by switching electricity with light.

So, you're saying that in light pulses, the intensity initially increases in every half period of the light wave, is very high for a brief moment and then drops again. If such a half-wave lasts only about one femtosecond, effects that can only occur at the peak of the intensity can have a duration of attoseconds.

Krausz: Yes, and that happens repeatedly, at the peak of all half-periods of the laser pulse. My co-laureates have implemented this approach: using powerful lasers, they were able to first knock electrons from gas atoms within a fraction of the half-wave period, and thus the fraction of a femtosecond, and then hurl them back, creating light waves with multiple frequencies of the original laser. This is a highly non-linear process, but one that creates something like a train of attosecond pulses in extremely short succession. Early in the new millennium, our group succeeded in generating individual attosecond pulses. This is very advantageous for ultra-short time photography in the microcosm, since a camera that has very short exposure times but flashes continuously would come in very handy.

Attoseconds are mind-bogglingly short, much shorter than the time resolution of all known detectors. How could you be certain that you actually generated attosecond pulses?

Krausz: By further developing the principle of the sweeping-image smear camera. The idea behind it has been around for a long time: if a short flash of light falls on a rapidly rotating mirror, the reflected pulse is “smeared” and forms a smear or streak of light on a screen. If the speed of rotation of the mirror is known, the duration of the flash of light can be calculated from the length of the streak. In this way one can achieve resolutions in the microsecond range.

In the next development stage, electrons were detached from a suitable material with the light pulse that was to be measured. The electrons are then deflected by the rapidly varying electric field of a microwave – and thus produce a smear image on a screen. This brings us into the picosecond range, which is still a million times too slow. To finally achieve attosecond resolution, we used light waves to deflect the electrons. In this way, we accelerated the deflection a hundred thousand times again and demonstrated the attosecond duration of the pulses.

How can we learn new things about nature with this technology?

Krausz: Femtochemistry already uses the approach to add energy to a system, such as a molecule, by means of a short light pulse. The pulse causes changes to occur in the system, chemical bonds breaking apart, for example. In order to track such a process, a second pulse is sent shortly after the first one to scan the changes. In this way we can create something like snapshots of extremely fast processes.

They are not the snapshots as we know them from conventional photography, of course. We have not yet reached that level of technology, unfortunately. What we actually do with the scanning pulse is to measure the temporal change of other variables, such as the absorption of the attosecond pulse or the energy distribution of the electrons that the pulse knocks out of the molecule. In the former case, we look at the spectrum of the second light pulse that the molecule has passed through. It will show that certain frequencies are missing that have been swallowed by the system. This gives us information about the current state of the system after it was excited by the first pulse.



The three 2023 physics laureates after delivering their Nobel Prize lectures on 8 December 2023 at the Aula Magna, Stockholm University. From left: Ferenc Krausz, Anne L'Huillier and Pierre Agostini. © Nobel Prize Outreach. Photo: Nanaka Adachi

By measuring ultrashort light pulses, you have achieved something that no one before has managed to do, and as a result, you have been awarded the world's highest scientific award. What would you like to achieve now?

Krausz: The question of where to go from there actually arose around 20 years ago, after the breakthrough with the first experiments in Vienna. Obviously, you don't just do your work to get a prize. But back then it was clear that we had the tools to look into a world that no one had ever seen in real time.

But before we could use these tools to gain new insights, we had to build confidence in the new techniques. We spent a decade using the new tools to observe processes that were theoretically well understood to ascertain that the new techniques worked well. And they did pass the tests. During this phase, we were also able to improve the measurement technology significantly and we finally knew for sure that it worked. We knew because we experienced processes in real time that were just as the calculations had predicted.

What came next?

Krausz: Our working group then focused intensively on the question of what new findings attosecond measurement technology could produce and how we could use them for something practical. After 2010, we identified two major directions. One was the further development of electronics. We knew that we would have to move from simple atomic systems and molecules to complex semiconductor structures as found in our laptops or cell phones. This means exploring questions of solid-state physics that are as yet unanswered.

One objective is to speed up the microprocessors that are contained in all our gadgets. There has been virtually no progress in terms of clock frequency for around two decades. People managed to achieve further miniaturization, which enabled them to pack a growing number of transistors into the same volume. But in terms of the time dimension, nothing has changed. Our latest experiments on solids have now shown that we can switch electric current on and off even at light frequencies, i.e. a hundred thousand times faster than in today's electronics, by making insulators briefly conductive by means of light.

The second direction involves medical applications. We posed the question of how the interaction between light and matter can be used for medical purposes. Would it be possible, for instance, to extract enough information from human blood to measure a person's individual state of health and to detect diseases – long before symptoms become manifest? In other words, to detect them at a stage where therapies can be applied effectively. That is crucial.

How far away are we from application in this respect?

Krausz: After ten years, we are seeing the first very encouraging results. Using extremely short infrared pulses, we cause the molecules in the blood to vibrate, just like musicians make their tuning fork vibrate. But instead of auditory signals, the molecules emit infrared waves. These are characteristic of the molecules in the blood – they have different oscillation frequencies depending on their atomic composition, and all of this information is contained in this signal. We call this an infrared fingerprint, as the frequencies are captured in the infrared light emitted. They provide a fingerprint-like signature of the individual blood sample of each person.

If these infrared waves can be measured at a sufficient level of sensitivity, the infrared fingerprint will provide a huge amount of information. Ideally, measurements should start when the person is still healthy in order to have a baseline against which deviations caused by emerging diseases can be identified. We have now tested this for the three major disease groups of cancer, cardiovascular and metabolic diseases such as diabetes and have seen that the method works.

“With the infrared fingerprint we want to detect diseases, long before symptoms become manifest.”

Ferenc Krausz

When you look back at your beginnings in Vienna in the 1990s: What conditions did you find that made your academic career possible?

Krausz: I owe a great deal to Vienna and the people who were responsible for my career. First and foremost Arnold Schmidt, my mentor and pioneer at TU Wien and later President of the FWF. Essentially, there are three factors that have to be present for successful research: good infrastructure, international exchange, and the greatest possible freedom. Thanks to Arnold Schmidt, we were incredibly well connected at TU Wien. Top researchers, such as the Canadian physicist Paul Corkum, kept coming to Vienna all the time.

These encounters shaped me, and we always knew what was happening at the vanguard of science. Combined with a great deal of freedom, these were ideal conditions. Personal leeway is essential in order to define for yourself which questions you want to answer. That's the most important thing at the beginning, no matter how much time it takes. Once you have found that, it is an inexhaustible source of motivation which carries you through all the ups and downs.

You received the FWF START Award in 1996 and the FWF Wittgenstein Award in 2002. What role do funding agencies like the FWF play on the way to the top?

Krausz: The best idea is useless if you can't translate it into reality, if you can't afford tools and equipment, for instance. The two FWF grants were enormously important for my research, not only the money in itself, but also the freedom that came with it. In my eyes that doubled the value of the funding. Providing funds with as few restrictions as possible creates ideal conditions for science.

What is your assessment of current cutting-edge research in Europe?

Krausz: One problem I see is the attempt to control research from above along certain program lines. This leads to billions being poured into huge projects, so-called flagships, for research into quantum computing or graphene, for example. It's a bit like a centrally planned economy, subject to political control. I think it would make more sense to use these billions that go to programmatic research to increase the budget of institutions such as the ERC, the European Research Council. I was a member of its decision-making body for many years and my heart bled seeing how many outstanding projects we had to turn down. Not even half of the most outstanding projects could be funded. That doesn't exactly make Europe more competitive in the global competition for the best minds and ideas.

“Providing funds with as few restrictions as possible creates ideal conditions for science.”

Ferenc Krausz

How does excellent science secure our future?

Krausz: US research could not have become so big if it had not been so attractive to the best researchers from all over the world. This is a competition we in Europe must face up to. Only then will unexpected and great things happen. Even if you cannot and

should not plan basic research, it is good to define guidelines for yourself. For instance, by reflecting on how to give society the maximum return for the funds it is prepared to spend on research.

We need no new models to do this. The Max Planck Society is a good example. In line with the US model, we are looking for the best minds whom we trust to perhaps one day produce new findings that will benefit humanity. The organization provides as much funding as possible and maximum freedom. The results speak for themselves. In the past five years alone, the Max Planck Society has produced a Nobel Prize laureate each year.

As a Nobel Prize winner, you get a lot of attention. Do you feel you have even more responsibility now?

Krausz: I am indeed getting a lot of inquiries now. From secondary schools, universities, conference organizers. From government circles, too. I am delighted by this interest, which can be used to promote both our field and, perhaps even more importantly, the importance of basic research – far beyond expert circles. In my own working environment, I have always considered it important to pass on my experience to the next generation and to support young colleagues in finding their way. I have been doing that for many years. Since the Nobel Prize, I have had more opportunities to have such discussions also with researchers at the start of their careers.

Thank you for the interview!



It all begins with curiosity.