

66-770

Experimentalphysik I/II für Studierende der Biologie und der Zahnmedizin

Prof. Arwen Pearson & Prof. Nils Huse
arwen.pearson@cfel.de & nils.huse@uni-hamburg.de

Vorlesungen:

Mittwoch 08:15-09:45 Junguisstr. 9 Hörsaal **2**

Freitag 08:15-09:45 Junguisstr. 9 Hörsaal **1**

Information zur Vorlesung unter/über **STiNE**

Aufbau der Atome

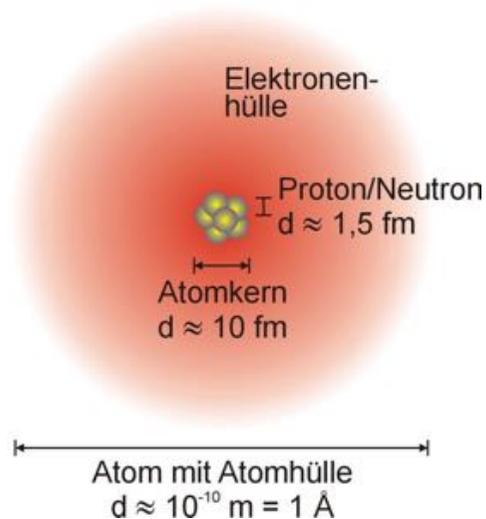
- Atomos: griechisch : unteilbar



Demokrit
460 v. Christus



- **Demokrit** postulierte, dass die Materie aus kleinsten, unteilbaren Teilchen den Atomen zusammengesetzt sei
- **Dalton** begründete die moderne Atomtheorie, insbesondere die kinetisch Gastheorie nach der sich Atome wie Kugeln im freien Raum bewegen können und ihre Stöße gegen eine Wand den Druck erzeugen

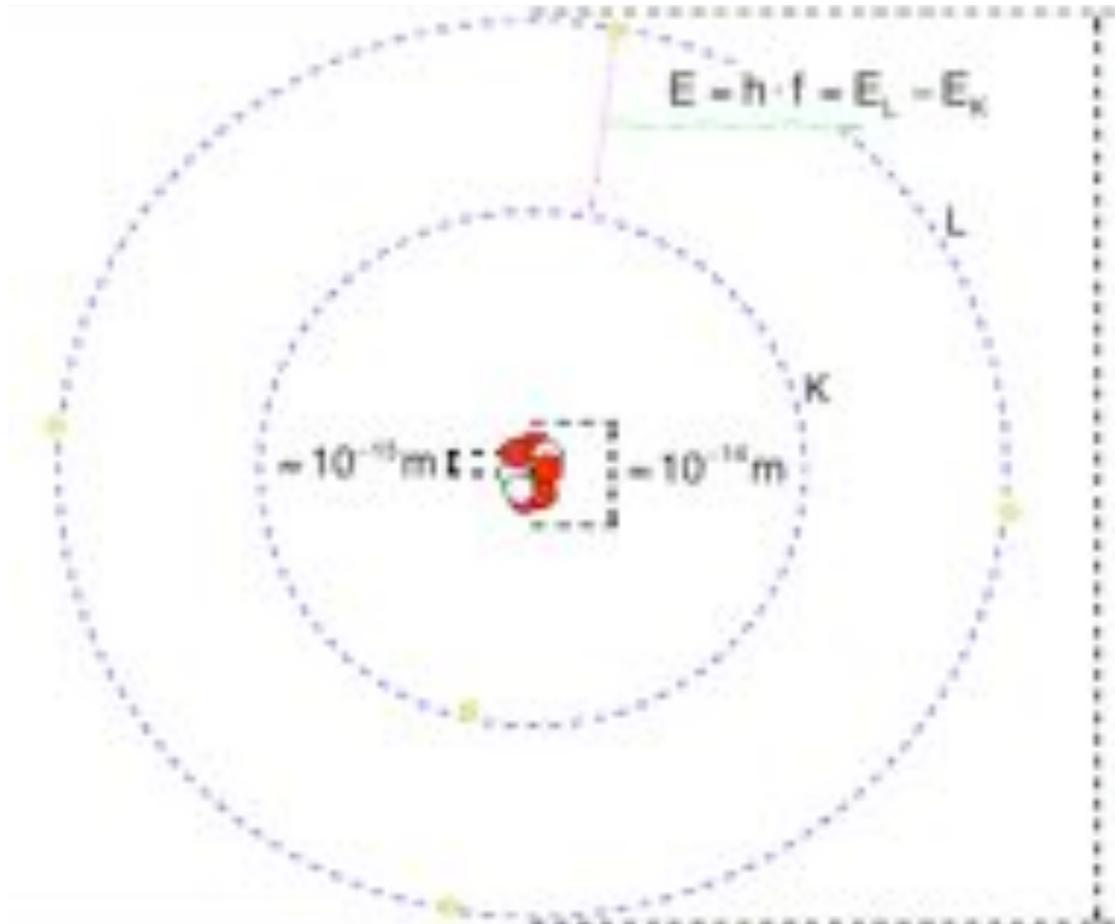


Dalton
1766-1844

Aufbau der Atome

Größenvergleich: Atomkern :: Stecknadelkopf - 1mm

Atom :: - 30 - 100 m



Atomkern:

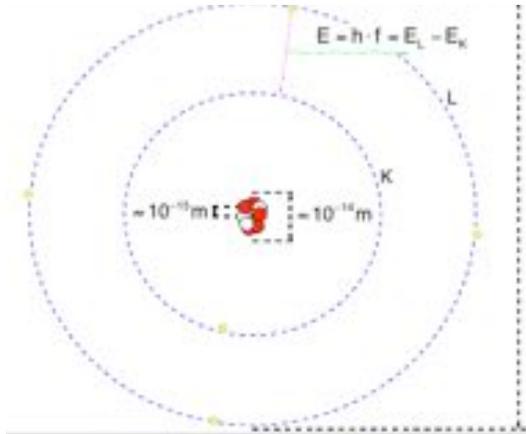
- Sitz positiver Ladung
- Konzentration der Masse
- enthält Protonen und Neutronen

ca. 10^{-10} m

Atomhülle:

- Sitz negativer Ladung
- Elektronen umkreisen den Atomkern
- Zahl der Elektronen gleich Zahl der Protonen
- Elektronenbahnen sind diskret, d.h. man findet Elektronen nur in bestimmten, abzählbaren Zuständen

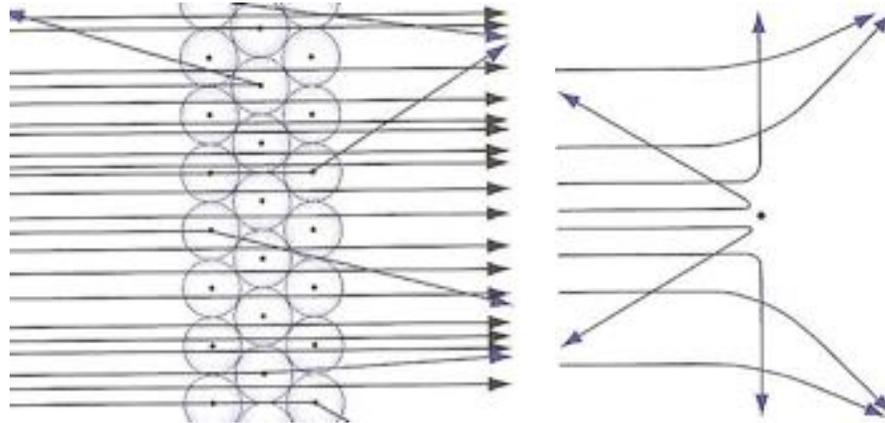
Rutherford'sche Atommodell



Rutherford

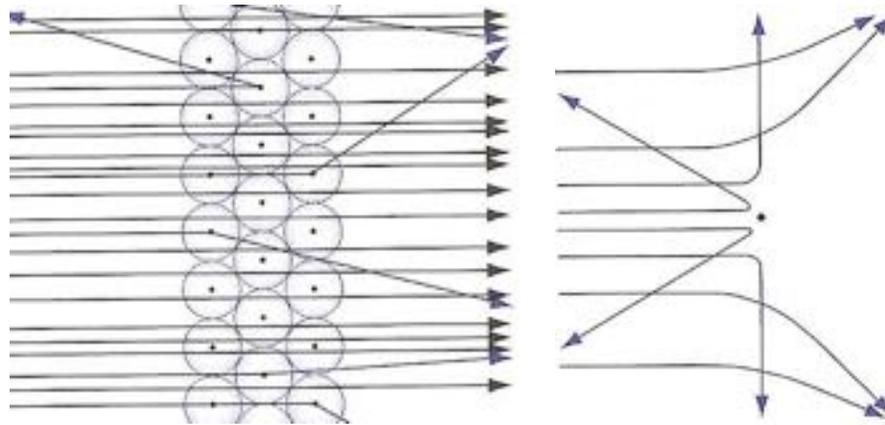
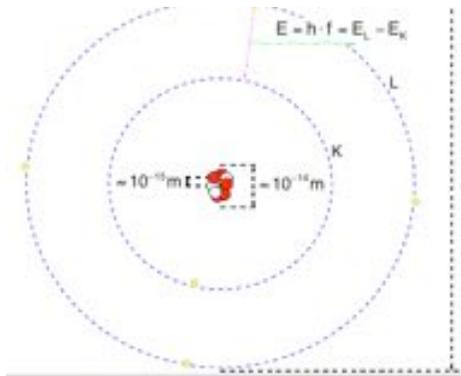
- erkannte als Erster, anhand von Streuversuchen, dass das Atom bis auf einen sehr kleinen Kern *leer ist* und seine Grösse nur durch die am Kern gehaltenen Elektronen bedingt ist, die um den Kern kreisen wie Planeten um die Sonne, da die Coulombkraft als Zentripetalkraft wirkt

- er beschoss dünne Metallfolien mit α -Teilchen,
- α Teilchen werden beim radioaktiven Zerfall freigesetzt und bestehen aus 2 Protonen und 2 Neutronen
- und stellte fest, dass die Teilchen die Folie ungestört durchdringen können und nur wenige Teilchen von der Bahn abgelenkt werden, d.h. offensichtlich mit Partikeln zusammenstossen die eine erhebliche grössere Masse besitzen



Lord Ernest
Rutherford
1871-1937

Rutherford'sches Atommodell



Lord Ernest
Rutherford
1871-1937

Rutherford

- das 1911 aufgestellte Rutherford'sche Atommodell besagt, dass **fast die gesamte Masse im positiv geladenen Atomkern konzentriert ist**
- da die Elektronen auf ihrer Kreisbahn einer ständigen Richtungsänderung unterworfen sind, sollten Sie nach den normalen Gesetzen der Physik elektromagnetische Strahlung abgeben und kontinuierlich an Energie verlieren
- dadurch langsamer werden und in den Kern stürzen
- die Bahngeschwindigkeit der Elektronen muss daher so bemessen sein, dass sich Fliehkraft und Anziehungskraft die Waage halten

Richard Feynman,

Nobelpreis 1965, Quantum Electrodynamics

„There is a reason physicists are so successful

with what they do,

and that is they study the hydrogen atom and

the helium ion and then they stop“



1918-1988



Aufbau der Atome

Niels Bohr

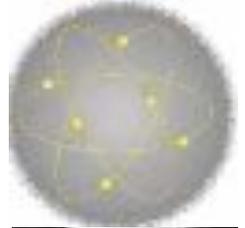
- entwickelte das Rutherford'sche Atommodell weiter

Postulate:

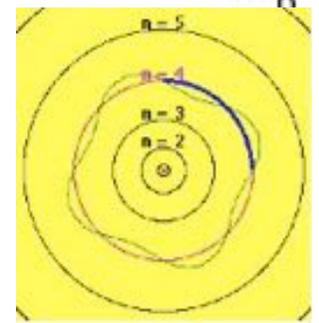
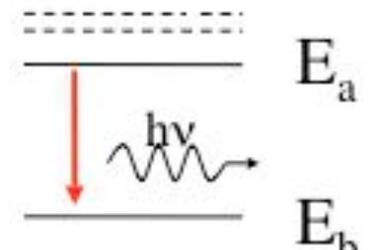
- es gibt bestimmte Bahnen, auf denen die Elektronen ohne Energieverlust um den Kern kreisen können
- diese Bahnen haben unterschiedliche Energieniveaus
- beim Sprung von einer Bahn auf eine niedrigere wird die Energiedifferenz durch Aussendung einer elektromagnetischen Welle mit der Frequenz ν abgegeben
- die Abgabe der Strahlungsenergie erfolgt unstetig
- die abgegebene Strahlungsenergie ist der Frequenz ν der Strahlung proportional

$$\Delta E = h\nu$$

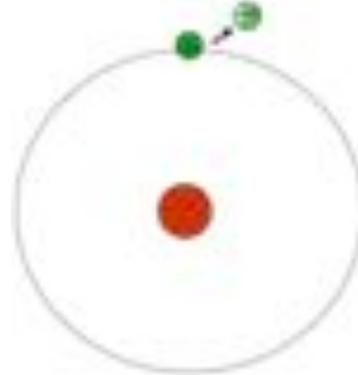
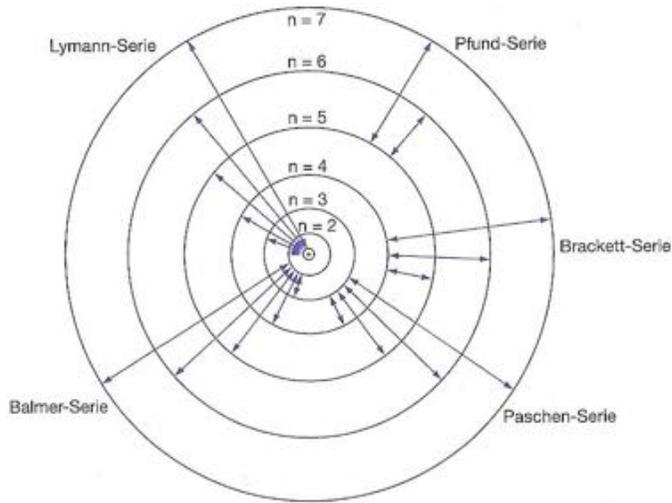
- der Drehimpuls eines Elektrons in einem stationären Zustand nimmt nur n diskrete Werte ein, wobei n eine natürliche Zahl ist, bedeutet also eine Quantelung des Drehimpulses



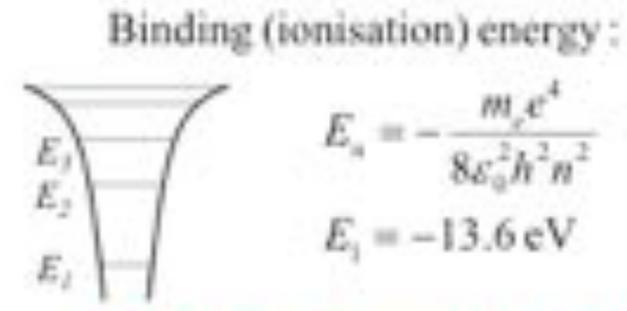
Niels Bohr
1885-1962



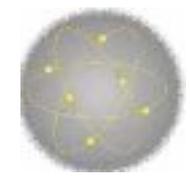
Aufbau der Atome



$$2\pi \cdot r \cdot m_e \cdot v = n \cdot h$$



Bohr'sches Atommodell (1913)



Niels Bohr
1885-1962



Wasserstoffgas wird im Lichtbogen zum Leuchten gebracht
Darstellung der entsprechenden Elektronenbahnen

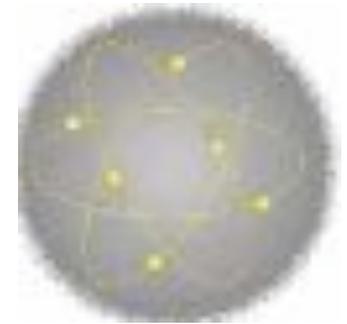
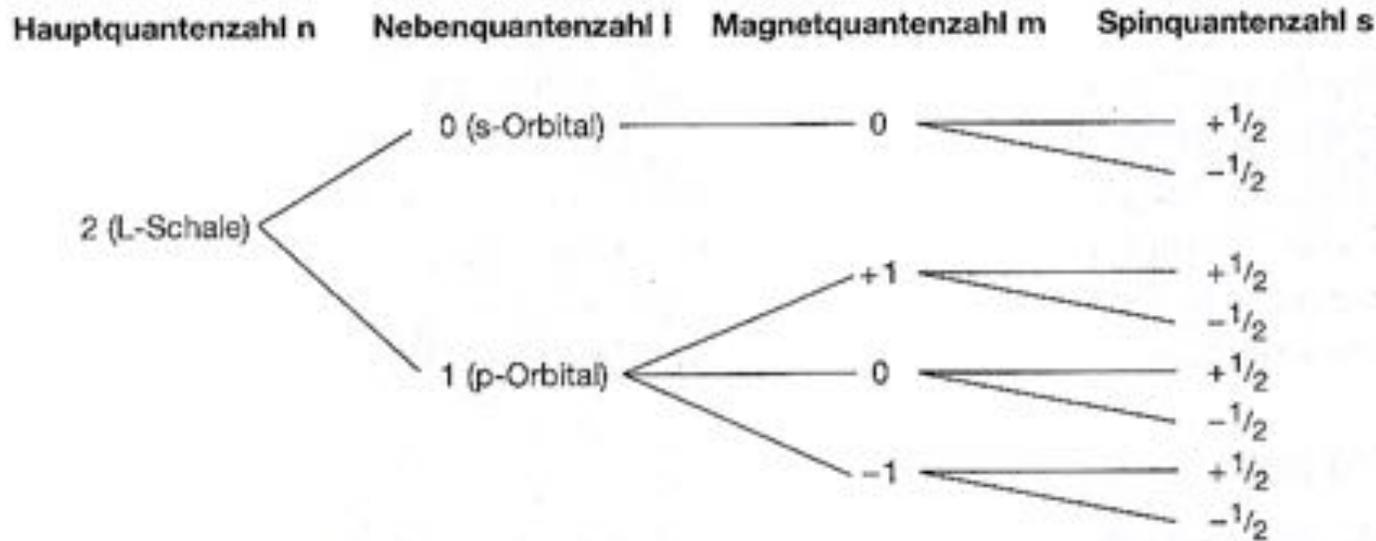
Niels Bohr

- postulierte, dass die erlaubten Bahnen die das Elektron um den Atomkern beschreibt, der oben aufgeführten Bedingung gehorchen muss
- unter Energieaufnahme kann das Elektron auf eine Bahn höheren Energieniveaus gehoben werden >> durch **Anregung, wie ?**
- **Erwärmung:**
- **Zusammenstöße** mit Elektronen >> dabei entsteht charakteristische Röntgenstrahlung
- **Einfang** eines Lichtquants: Fluoreszenz

Rücksprung:

wenn eine Elektronen-Lücke vorhanden ist (Pauli-Prinzip) nach ca. $10^{-8} - 10^{-15}$ sec

Die 4 Quantenzahlen



- in der Quantenmechanik wird der Zustand eines Elektrons durch vier Quantenzahlen beschrieben

Beispiel: 8 Elektronen der L- Schale

- **n**: Hauptquantenzahl: beschreibt die, K,L,M zu der das Elektron gehört
- **l**: Nebenquantenzahl: 0,1,2,3, n-1, s,p,d,f,... beschreibt die Form des Orbitals
- **m_l**: Magnetquantenzahl: -1,... +1, l=2 m_l=-2,-1-0,+1,+2,

beschreibt die räumliche Orientierung des Bahndrehimpulses in Einheiten von h

- **m_s**: Spinquantenzahl : +1/2, - 1/2

beschreibt die Orientierung seines Spins zur z - Achse

Aufbau der Atome

Erwin Schrödinger

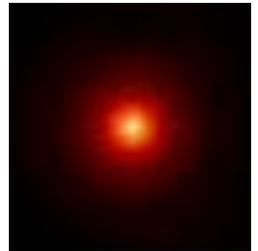
- entwickelte die Schrödingergleichung, nach der den einzelnen Energiezuständen des Atoms Aufenthaltswahrscheinlichkeiten des Elektrons zuzuordnen sind



1887-1961
1933 Nobelpreis für Physik

Werner Heisenberg:

- entwickelte die Unschärferelation nach der das Elektron im Atom nicht mehr als Teilchen mit fester Bahn erklärbar ist und Ort und Impuls nicht gleichzeitig bestimmt werden können

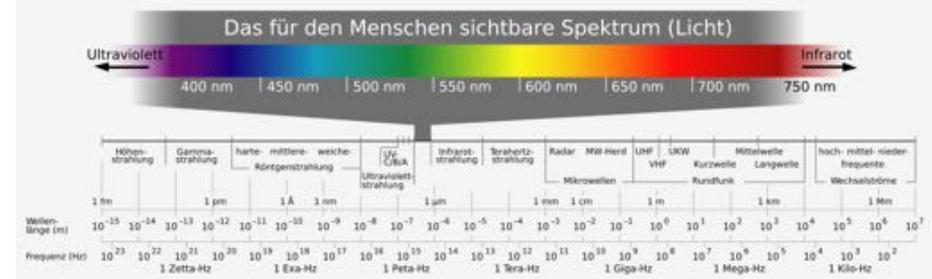


1901-1976
1932 Nobelpreis für Physik

Pauli Prinzip

- zwei Elektronen in einer Atomhülle müssen sich in mindest einer der 4 Quantenzahlen unterscheiden





Licht:
Welle oder Teilchen

Rückblick

17. Jh Huygens:

Licht ist eine Welle mit endlicher Geschwindigkeit >> Brechung und Beugung erklärt

17. Jh. Newton

Licht ist ein Teilchenstrahl erklärt Reflexion, Brechung und Dispersion, Farbbildung bei Beugung

19. Jh. Faraday, Maxwell, Hertz

Licht ist eine elektromagnetische Welle

19. Jh. Halwachs, Hertz

Fotoelektrischer Effekt nicht mit Wellentheorie im Einklang

20. Jh. Einstein

Licht besteht aus Photonen = Teilchen

20. Jh. De Broglie

Dualismus Welle - Teilchen nicht entweder oder sondern sowohl als auch , gilt nur bei Photonen

Zusammenfassung: a)

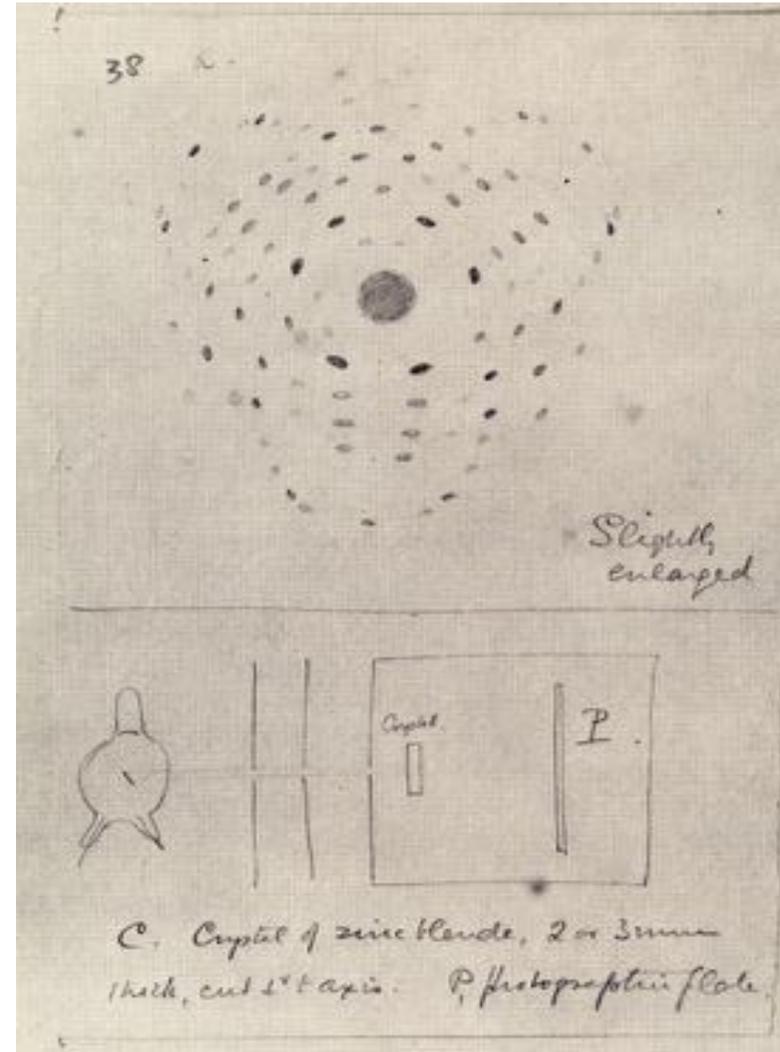
Licht (elektromagnetische Wellen) verhält sich bei der Ausbreitung wie eine Welle

➤ Interferenz, Beugung

b)

Licht wechselwirkt auf atomaren Niveau (Absorption beim Photoeffekt) wie eine Teilchen (Photon) mit der Energie $h \times f$

Licht: Welle oder Teilchen



- je nach Experiment zeigt sich die Wellen bzw. die Teilchennatur des Lichts
- darauf beruht die Heisenbergsche Unschärferelation:
>> Ort und Impuls eines Teilchens lassen sich nicht gleichzeitig messen

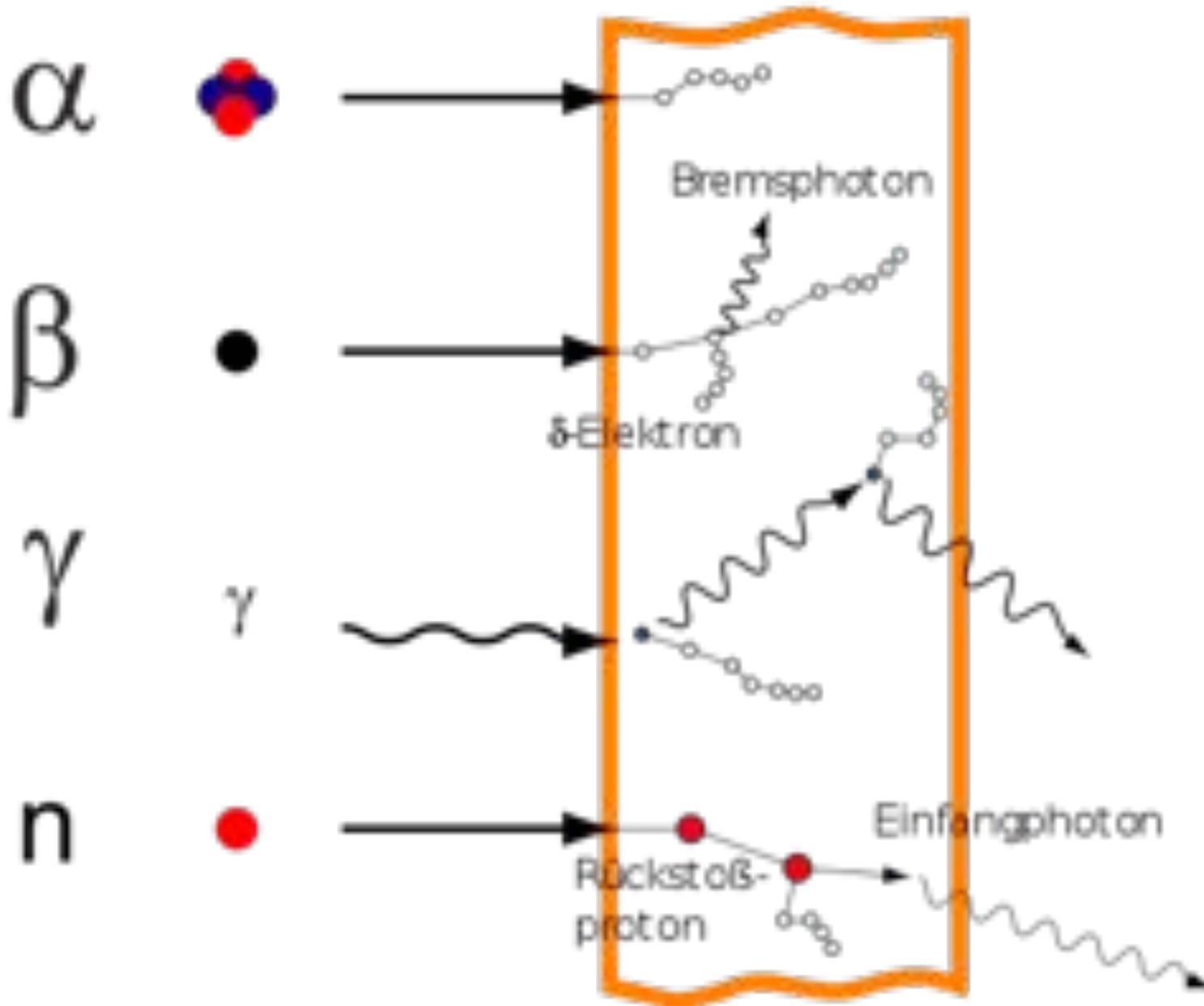
Licht: Welle oder Teilchen



https://global.canon/en/technology/s_lab/light/001/11.html

- je nach Experiment zeigt sich die Wellen bzw. die Teilchennatur des Lichts
- darauf beruht die Heisenbergsche Unschärferelation:
>> Ort und Impuls eines Teilchens lassen sich nicht gleichzeitig messen

Ionisierende Strahlung



Ionisierende Strahlung

Ionisierende Strahlung kann im Labor mit einem Röntgengenerator, einem Elektronen / Protonen-Beschleuniger oder einem Kernreaktor erzeugt werden.

Es kann auch in Form instabiler Atomkerne vorkommen, die durch Emission eines radioaktiven Teilchens in eine stabile Form zerfallen.

Ein radioaktives Material zerfällt langsam in probabalistischer Weise, definiert durch die Halbwertszeit, d. H. Die Zeit, nach der die Hälfte der Strahlung abgeklungen ist.

Medizinisch genutzte Isotope haben eine sehr kurze Halbwertszeit, aber andere, wie die in Atomkraft oder Kohlenstoffdatierung verwendeten, haben sehr lange Halbwertszeiten



https://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_waste

Energiedosis = die menge an Energie
deponiert pro masse Einheit

J/Kg = **Gray (Gy)**

Aber verschiedene Arten von ionisierende
Strahlung haben verschiedener Energie
und vierschiedlicher interaktions-
wahrscheinlichkeit.

Das **Elektronvolt (eV)**, ist eine Einheit der
Energie, die in der Atom-, Kern- und
Teilchenphysik häufig benutzt wird.

Sie setzt sich zusammen aus der
Elementarladung e und der Spannung U in
Volt (V oder J/C). Ihr Einheitenzeichen ist
daher eV

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \quad \text{und } E = e U$$



3 Gy =



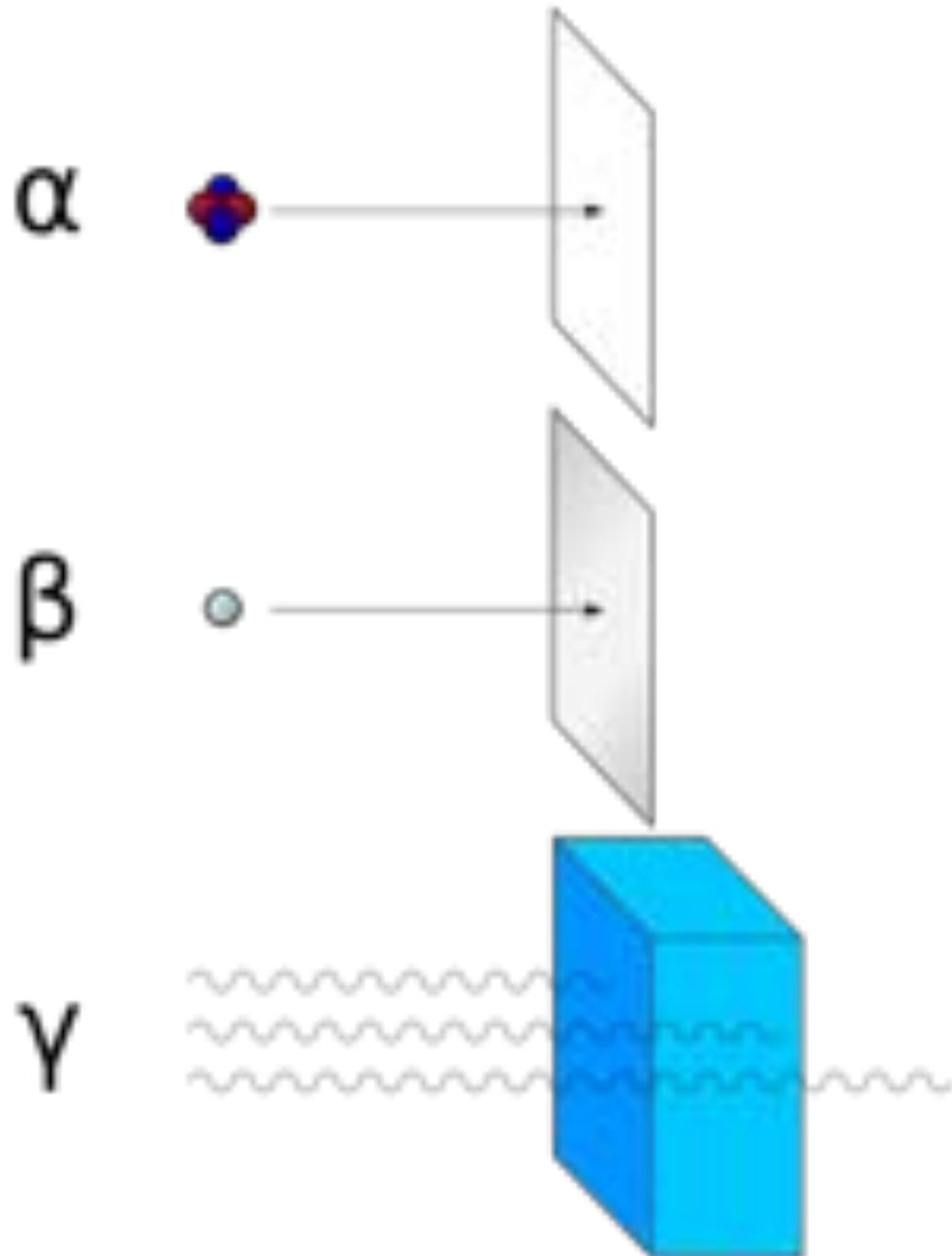
(3 Joules/Kg)

z.B. alpha Partikel ~ 5 MeV

X-rays ~ 10-100 keV

Grünlicht ~ 2.5 eV

Ionisierende Strahlung



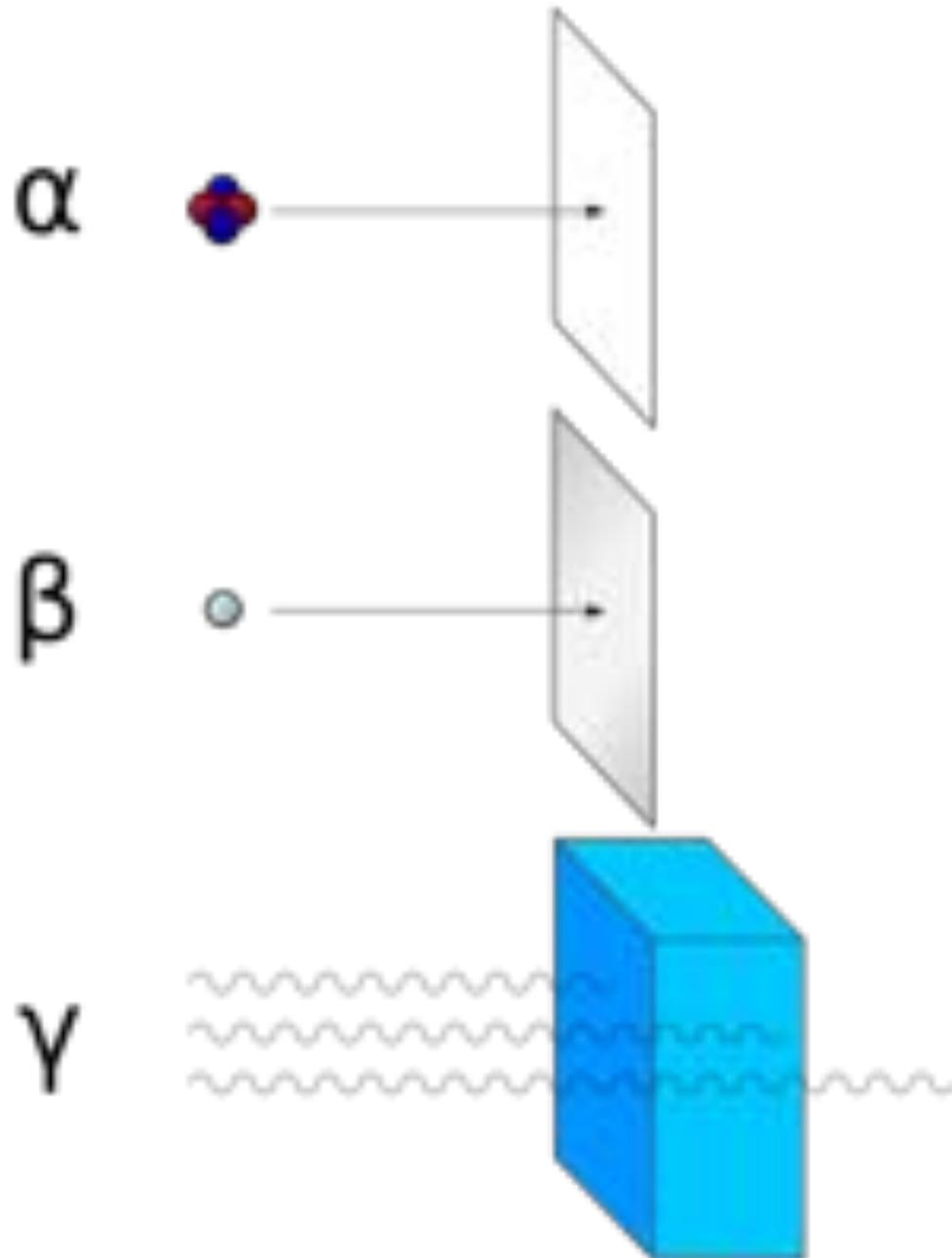
Aufgrund ihrer unterschiedlichen Wechselwirkung mit der Materie haben verschiedene Arten ionisierender Strahlung unterschiedliche **Relative Biologische Wirkungen (RBW)**.

Alphateilchen sind etwa 20 x schädlicher als Röntgenstrahlen

Aus diesem Grund verwenden wir anstelle von Gray als Dosiseneinheit in der Biologie und Medizin oft stattdessen das Sievert (Sv)

Der Sievert ist definiert als die Dosis in Grau mal der RBW-Faktor q

Ionisierende Strahlung



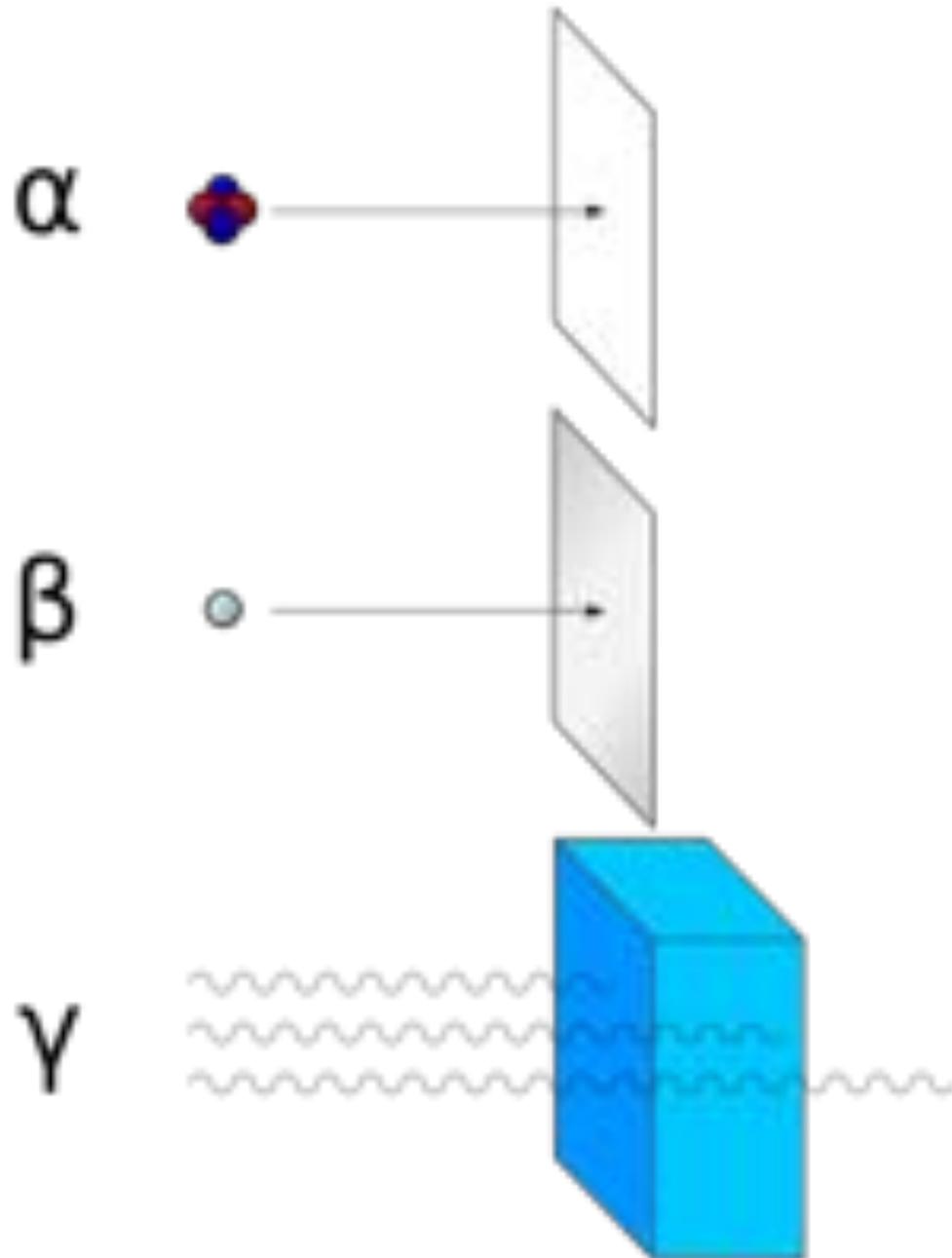
Wir können ionisierende Strahlung blockieren.

Papier reicht aus für Alphateilchen und eine Aluminiumfolie für Betateilchen.

Für Röntgen- und Gammastrahlen benötigen wir große Brocken von elektronendichten Materialien wie Blei oder Wolfram.

Neutronen sind schwer aufzuhalten, da sie nur sehr wenig mit Materie interagieren. Wir verwenden Materialien mit niedriger Z-Zahl wie Wasser, um die Neutronen abzubremsen und die "thermischen" Neutronen dann mit Bor zu absorbieren.

Ionisierende Strahlung



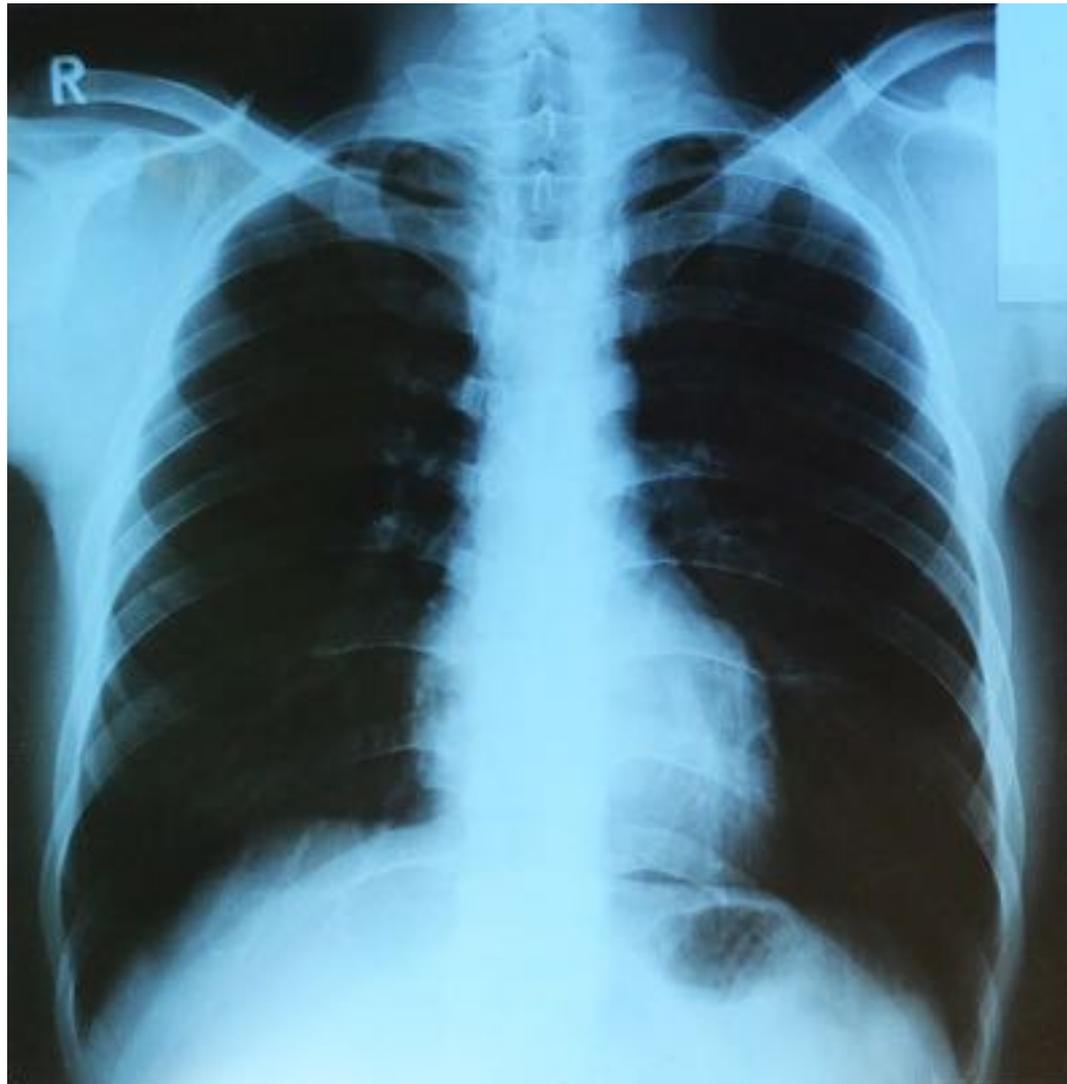
Die Strahlung fällt sowohl mit der Dicke des Attenuator als auch mit dem Abstand von der Strahlungsquelle ab.

Jede zusätzliche Materialdicke verringert die Strahlungs-dosis um den gleichen Prozentsatz. Wenn also 0,1 mm Aluminium die Dosis um 50% reduziert, reduzieren 0,2 mm Aluminium sie um 75%.

Die Entfernung von der Quelle funktioniert auf ähnliche Weise. In diesem Fall fällt die Dosis mit $1/r^2$ von einer Punktquelle ab.

Ionisierende Strahlung

Wir können diesen Unterschied in der Interaktion zu unserem Vorteil ausnutzen - zum Beispiel in der Radiographie, wo wir die unterschiedliche Aufnahme von Kalzium (Knochen) gegenüber "Wasser" (Weichgewebe) zur Abbildung des Körpers verwenden.



- Sleeping next to someone (0.25 μ Sv)
- Living within 50 miles of a nuclear power plant for a year (0.29 μ Sv)
- Eating one banana (0.1 μ Sv)
- Living within 50 miles of a coal power plant for a year (0.3 μ Sv)

- Air X-ray (1 μ Sv)
- Using a CRT monitor for a year (1 μ Sv)

• Extra dose from spending one day in an area with higher-than-average natural background radiation, such as the Colorado plateau (3.2 μ Sv)

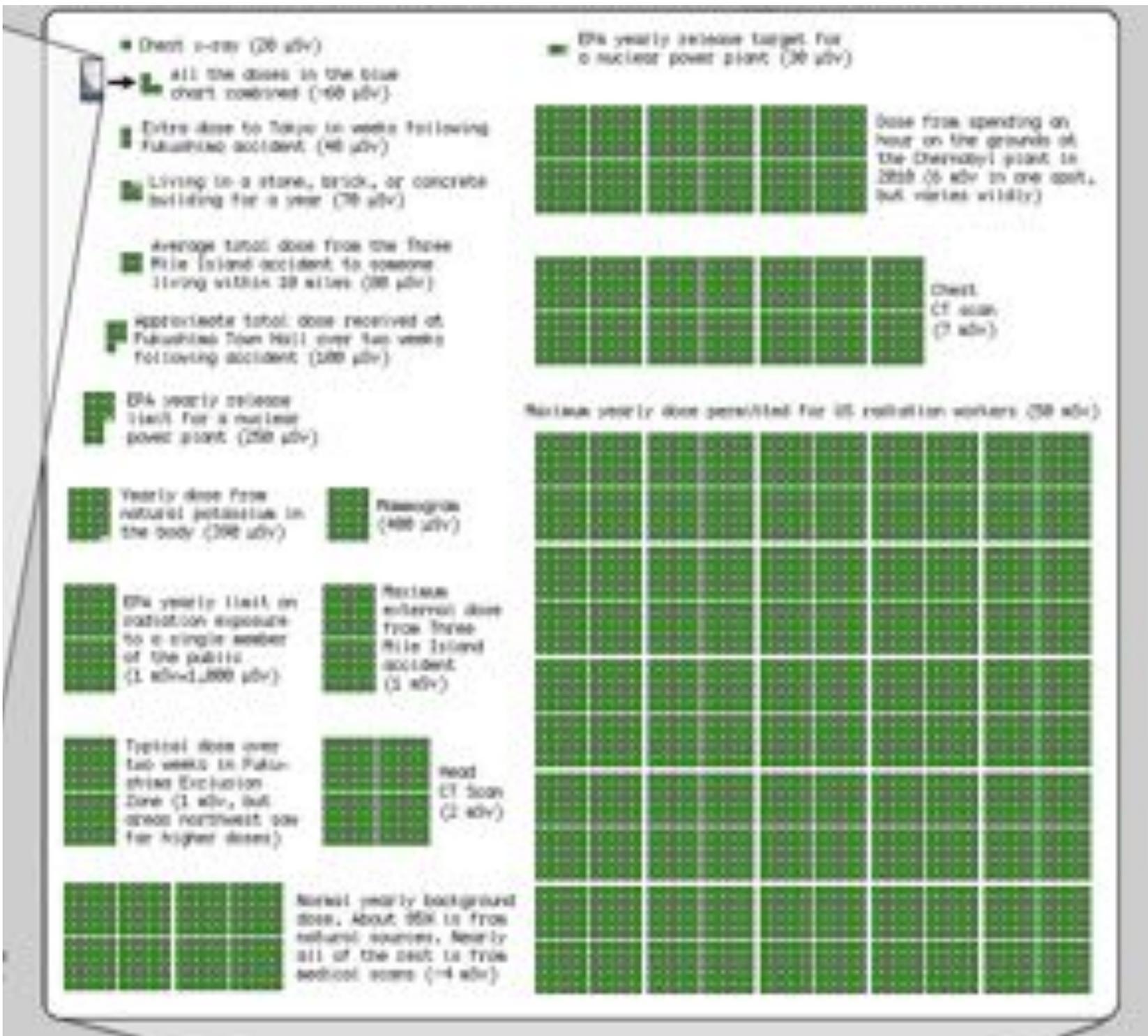
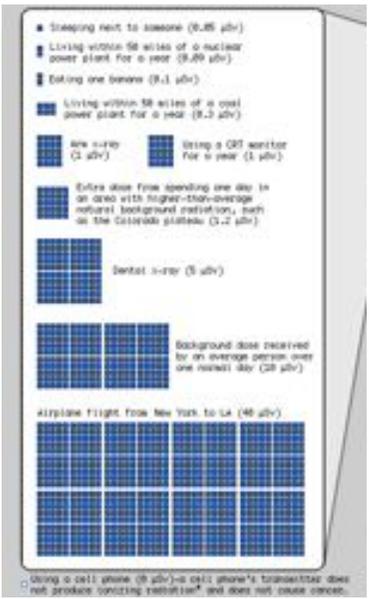
• Dental X-ray (5 μ Sv)

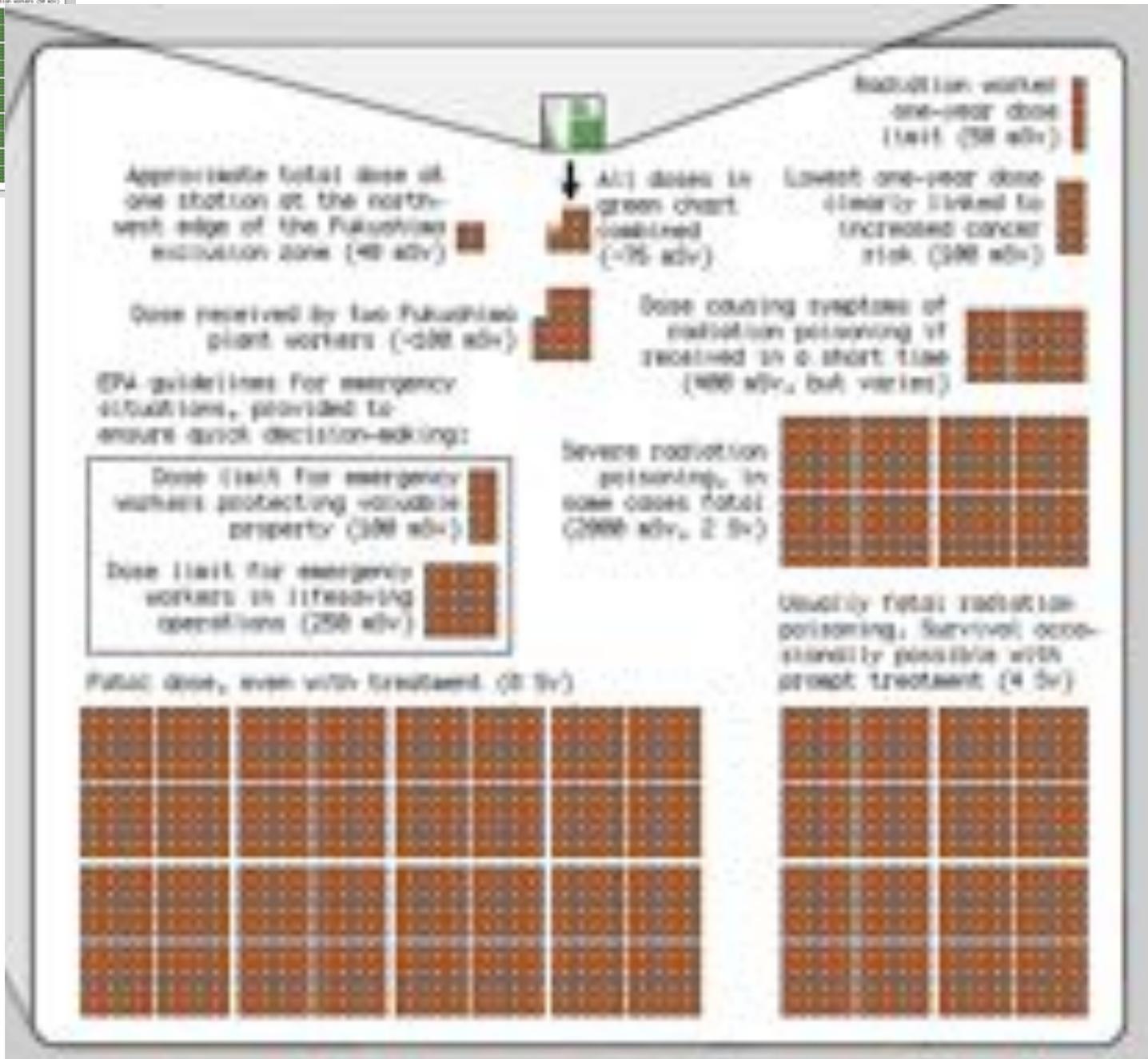
• Background dose received by an average person over one normal day (20 μ Sv)

• Airplane flight from New York to LA (40 μ Sv)

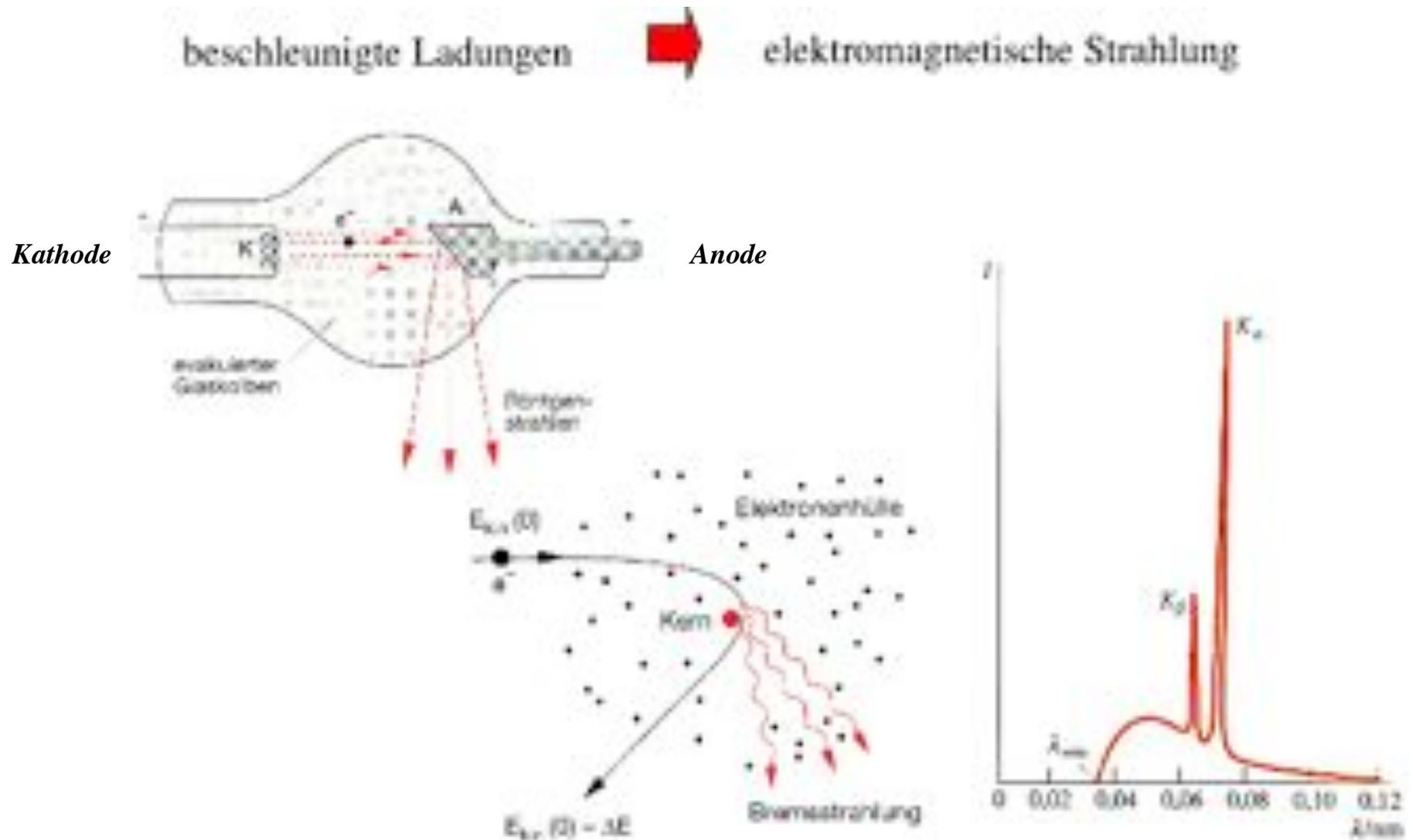


• Using a cell phone (0 μ Sv)—a cell phone's transmitter does not produce ionizing radiation⁸ and does not cause cancer.





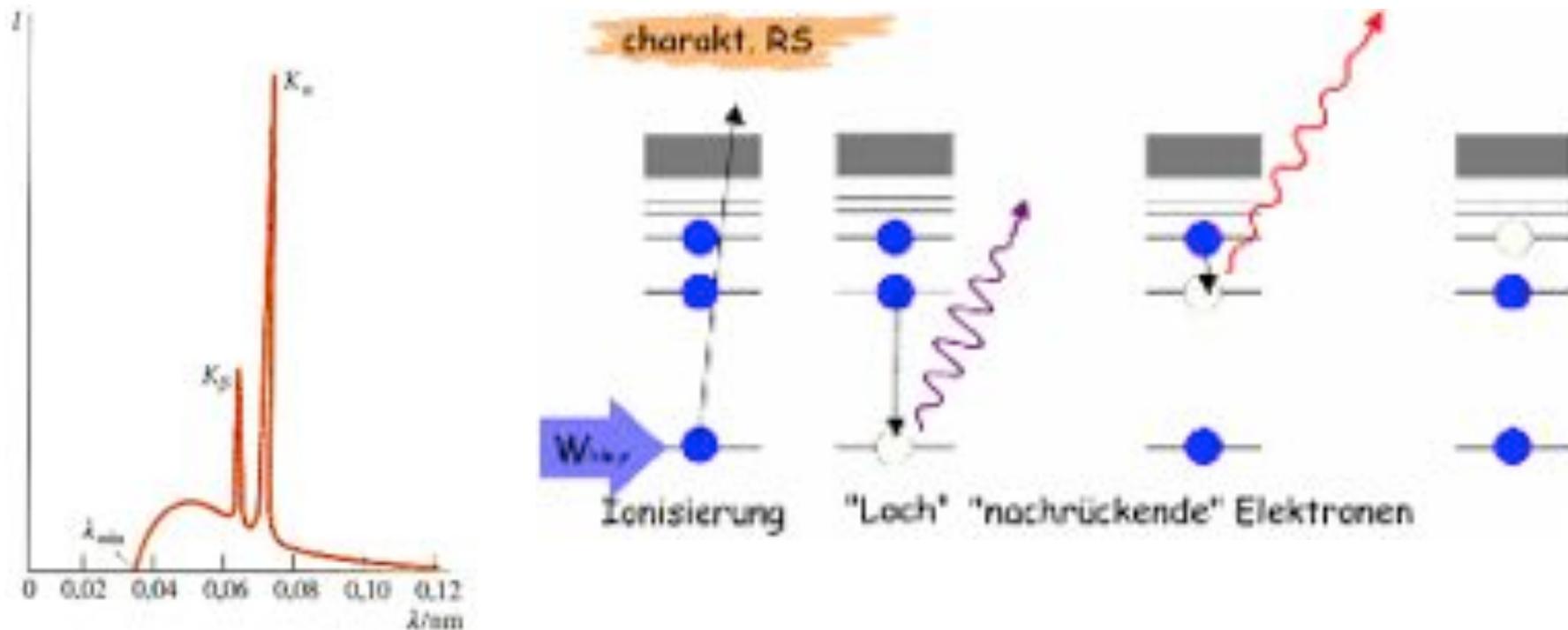
Röntgenstrahlung & Gammastrahlung



die maximale Energieabgabe der Röntgenquanten entspricht:

$$E_{X-ray,max} = e \cdot U = h \cdot f_{max} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{min}}$$

Röntgenstrahlung & Gammastrahlung

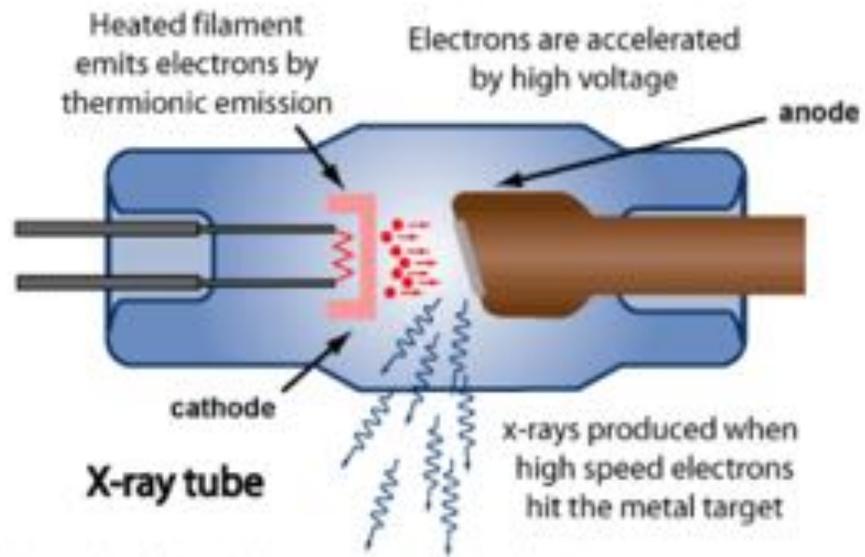


Bremsstrahlung: die Elektronen werden im Coulombfeld der Kerne abgelenkt und verlieren kontinuierlich Energie

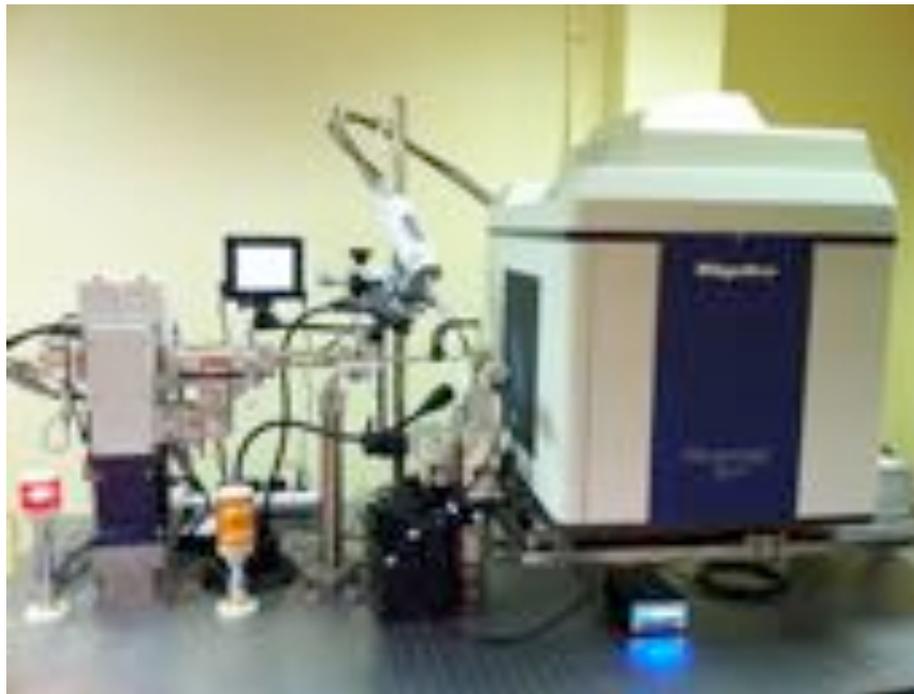
Charakteristische Strahlung:

Elektronen regen durch Stossionisation K-Elektronen auf inneren Schalen der Targetatome an
dabei entsteht ein für das Target (z.B. Cu) charakteristisches Emissionsspektrum

X-ray Quellen

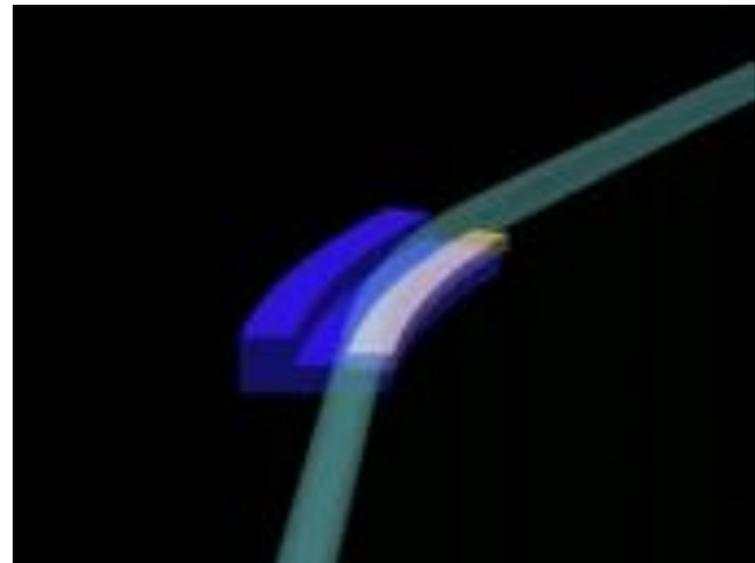
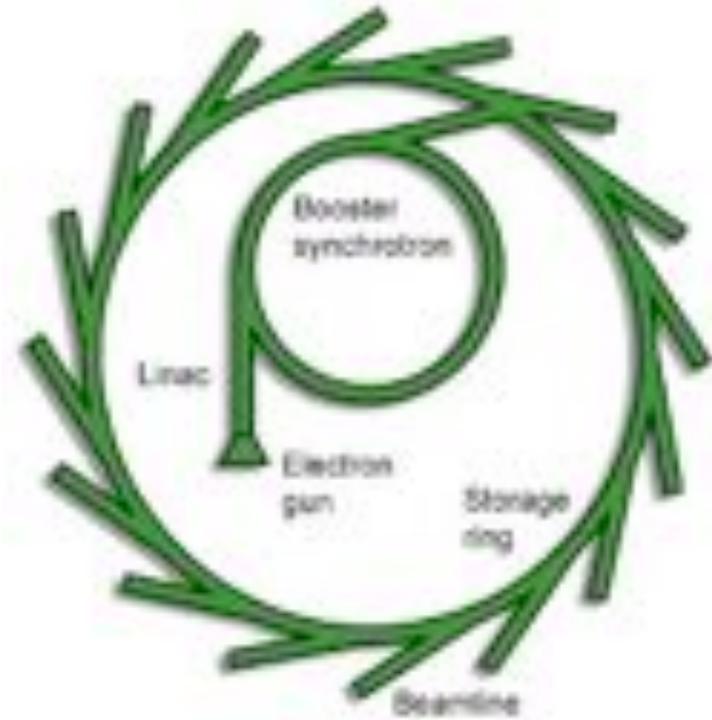


1913



2013

X-ray Quellen





Wilhelm Conrad
Roentgen

X-rays



Max von Laue



William Henry Bragg und William Lawrence Bragg



WHB

- 1884 – Cambridge – Mathematics
- 1885 – University of Adelaide – Professor of Mathematics & Experimental Physics
- 1909 – Cavendish Chair of Physics at University of Leeds

1903 – untersucht Radioaktivität, unterstützt die Idee, dass X-rays Partikel sind, nicht Wellen



WHB's hand



WHB

- 1884 – Cambridge – Mathematics
- 1885 – University of Adelaide – Professor of Mathematics & Experimental Physics
- 1909 – Cavendish Chair of Physics at University of Leeds

WLB

- 1912 – Cambridge – Naturwissenschaft
- Forschte waehrend seiner Ferien mit seinem Vater



Interesse an X-rays von Anfang an



'Als ich sechs Jahre alt war, hatte ich einen Unfall, der möglicherweise schlechtere Ergebnisse gehabt hätte, wenn nicht mein Onkel Arzt wäre. Wir spielten am Nachmittag auf einem Platz in der Mitte von North Adelaide, und einmal, als ich mit meinem Dreirad unterwegs war, sprang Bob hinterher und störte mich. Das Gewicht von uns beiden fiel auf meinen linken Ellbogen, der in zahlreiche Stücke zertrümmert wurde ' WLB

Interesse an X-rays von Anfang an

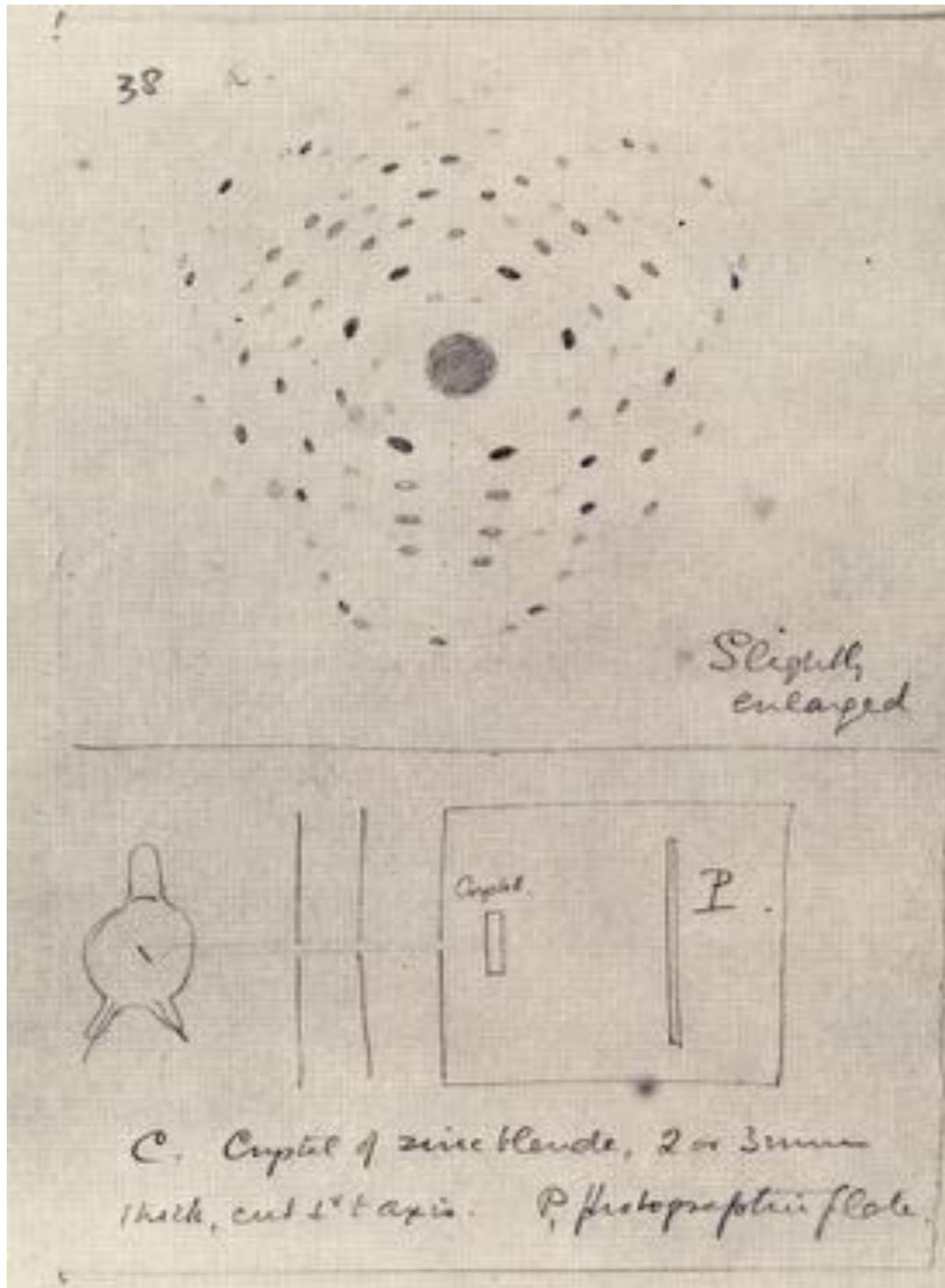


'Sehr bald nach Rontgens Ankündigung der neuen Strahlung stellte mein Vater eine Röhre auf, die von einer Induktionsspule bearbeitet wurde, und machte Röntgenaufnahmen des gebrochenen Ellbogens. Ich hatte steife Angst vor den funkelnden Funken und dem Geruch von Ozon und konnte nur überredet werden, sich der Belichtung auszusetzen, nachdem mein viel ruhiger kleiner Bruder Bob sein Röntgenbild aufgenommen hatte, um mir ein Beispiel zu geben.' WLB

Im Sommer 1912 bekamen die Braggs einen Brief, während sie im Urlaub waren

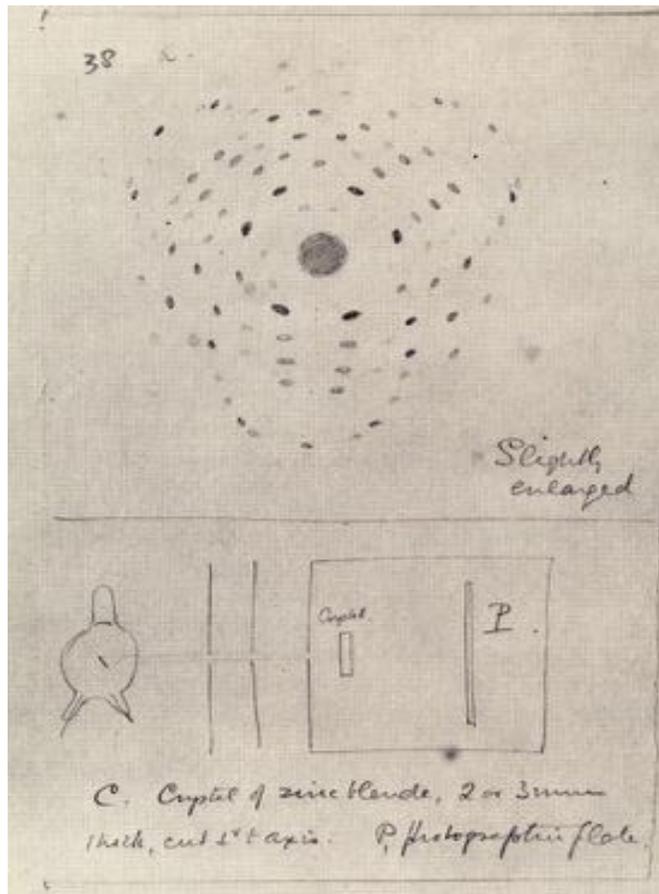
Diese beschrieb einen Versuch von Max von Laue, Friedrich und Knipping





Die Streuung von X-rays durch einen CuSO_4 Kristall

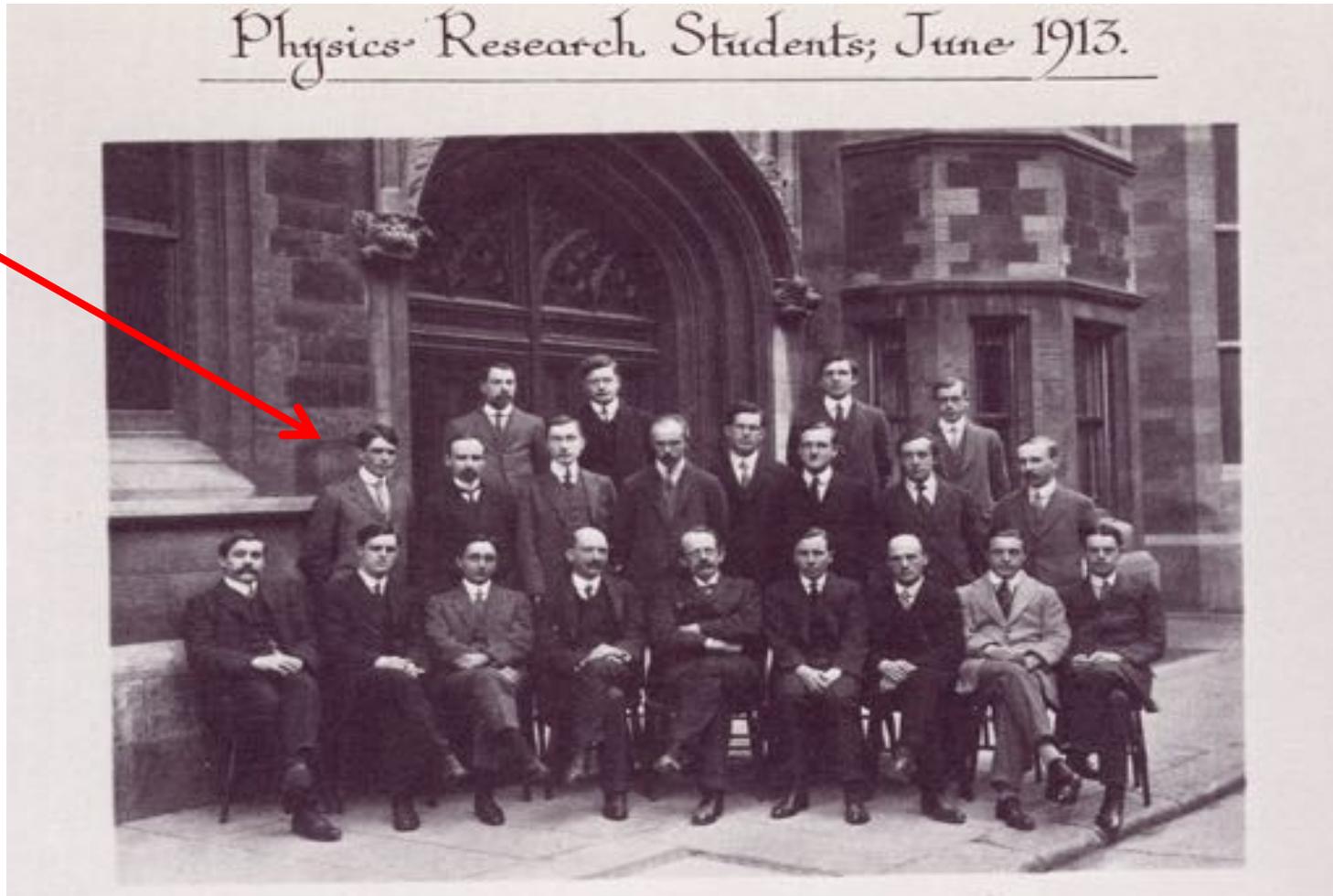
X-rays müssen Wellen sein!



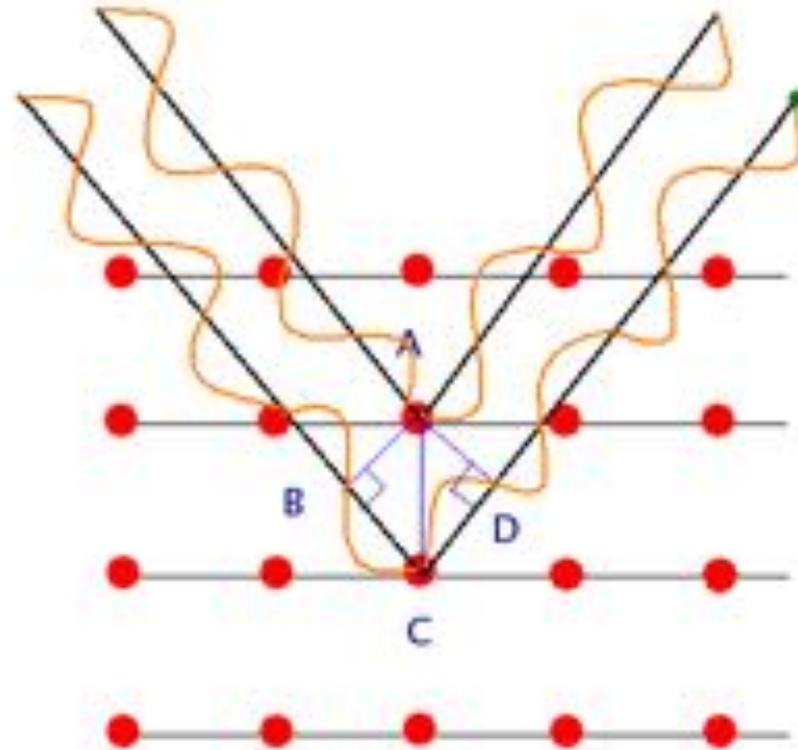
Die Daten von Max von Laue zeigen eindeutig ein Interferenz-Muster

- Aber war dieses Interferenz-Muster nützlich?
- Es war bekannt, dass Moleküle aus Atomen bestehen, und dass Stoff aus Molekülen besteht
- Das Interferenz-Muster deutet auf ein regelmässiges Arrangement hin
- Könnte man solch ein Interferenz-Muster benutzen um molekulare Strukturen zu verstehen?

- Der Durchbruch kam von WLB

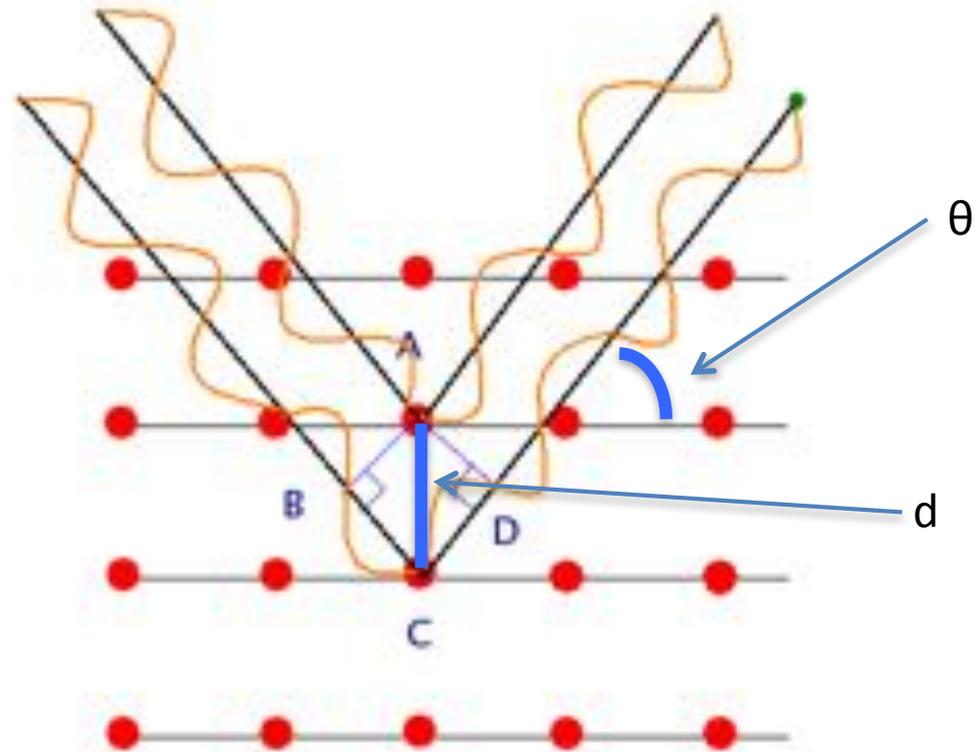


- Der Durchbruch kam von WLB
- 1912 hatte er einen Geistesblitz (“brain-wave”), dass das Interferenz-Muster von der Spiegelung der X-rays von “planes” im Kristall kam



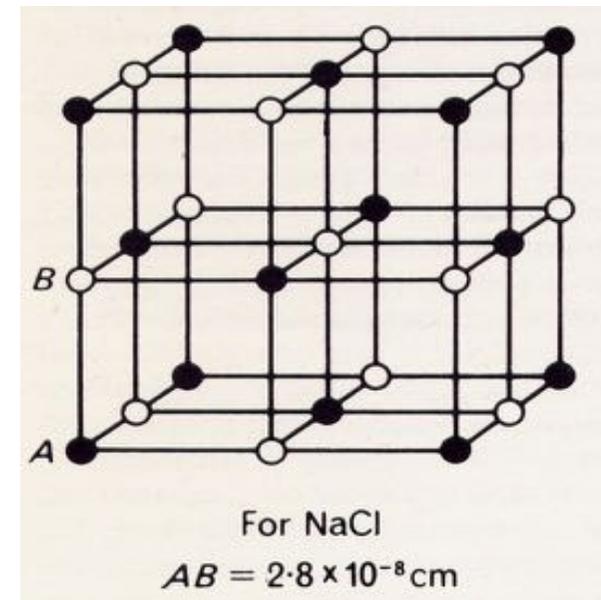
- Der Durchbruch kam von WLB
- 1912 hatte er einen Geistesblitz (“brain-wave”), dass das Interferenz-Muster von der Spiegelung der X-rays von “planes” im Kristall kam

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$



- Vater und Sohn bauten ein X-ray Spektrometer und fingen an zu messen!

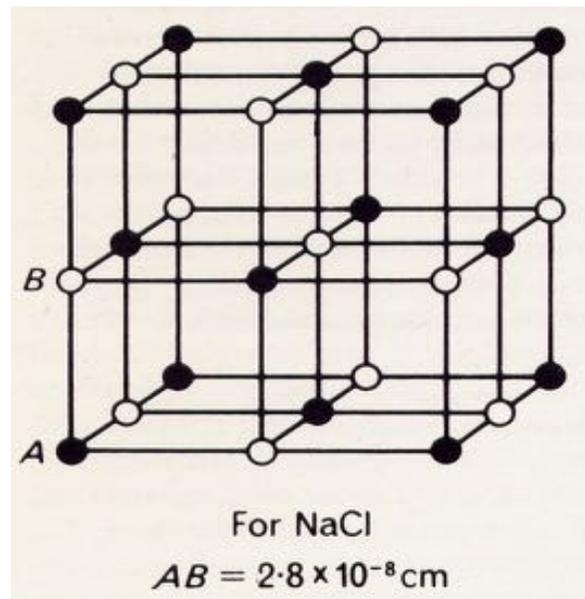
'Das Röntgenspektrometer eröffnete eine neue Welt. . . Es war, als würde man ein alluviales Goldfeld mit Nuggets entdecken, die herumliegen und darauf warten, abgeholt zu werden. . . . Es war eine herrliche Zeit, als wir jeden Abend weit in die Nacht hinein arbeiteten und sich im stillen Labor neue Welten entwickelten.' WLB



- Aber nicht alle waren von diesen Kristallstrukturen überzeugt!

Professor H E Armstrong, in letter to Nature, 1927

”Professor WL Bragg behauptet, dass“ in Natriumchlorid keine Moleküle zu sein scheinen, die durch NaCl repräsentiert werden. Die Gleichheit der Natrium- und Chloratome wird durch ein Schachbrettmuster dieser Atome erreicht; Es ist ein Ergebnis der Geometrie und nicht eine Paarung der Atome...



- Aber nicht alle waren von diesen Kristallstrukturen überzeugt!

Professor H E Armstrong, in letter to Nature, 1927

...Diese Aussage ist mehr als wider den gesunden Menschenverstand. Es ist bis zum n-ten Grad absurd, nicht chemisches Cricket. Chemie ist weder Schach noch Geometrie, wie auch immer die Röntgenphysik aussehen mag. Eine solche ungerechtfertigte Aufhebung des molekularen Charakters unseres notwendigsten Gewürzes darf nicht länger unangetastet bleiben.

Es war an der Zeit, dass Chemiker erneut die Chemie übernahmen und Neophyten gegen die Verehrung falscher Götter schützten; lehrte sie zumindest, mehr als nur Beweise für Schachbretter anzufordern. “

- 1915 erhielten Vater und Sohn den Nobelpreis

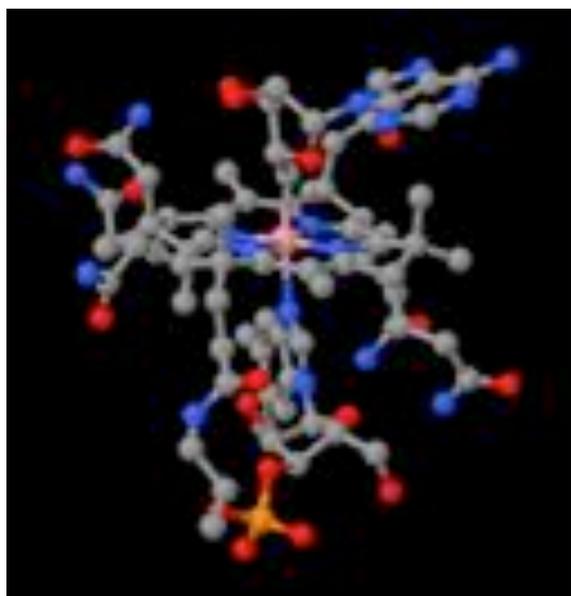


Dorothy Crowfoot -Hodgkin

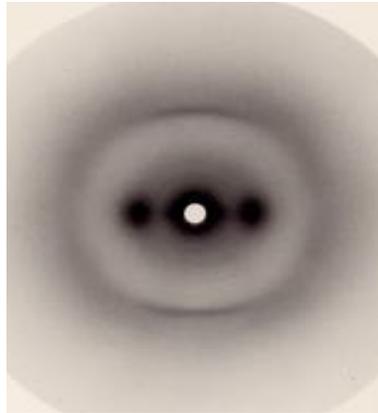


Penicillin – 1945

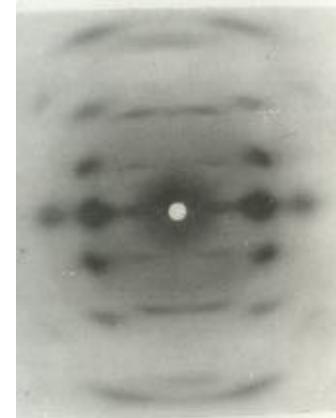
B12 -1954



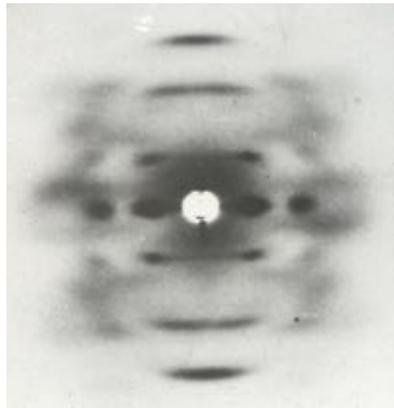
alpha
keratin



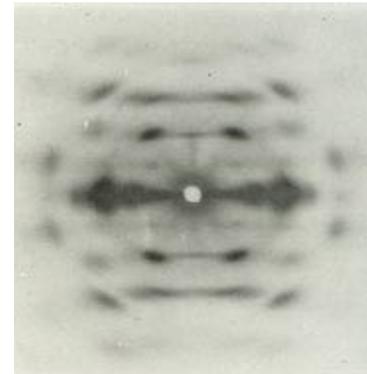
beta
keratin
(silk)



collagen



cellulose

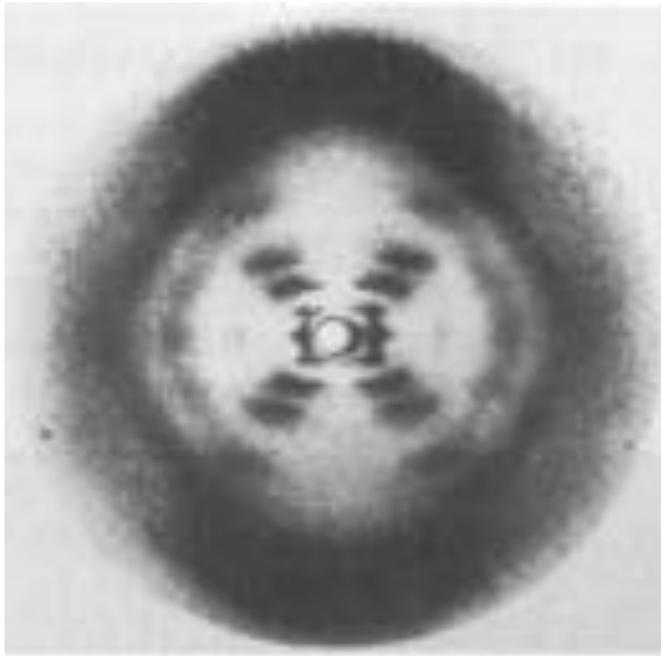


William Astbury
& Florence Bell

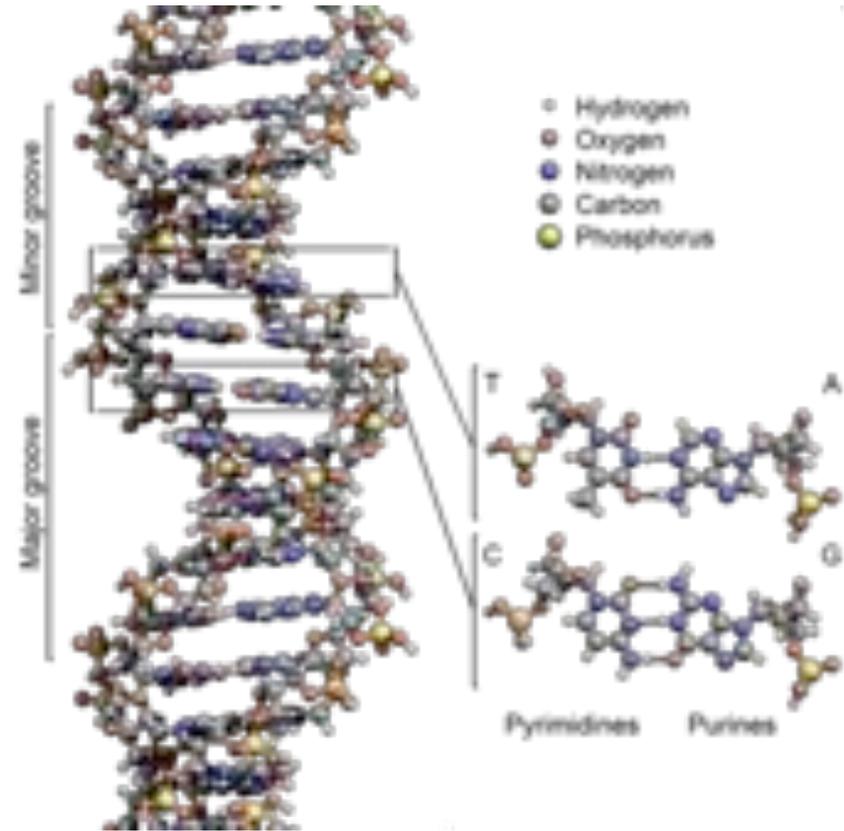
Linus Pauling

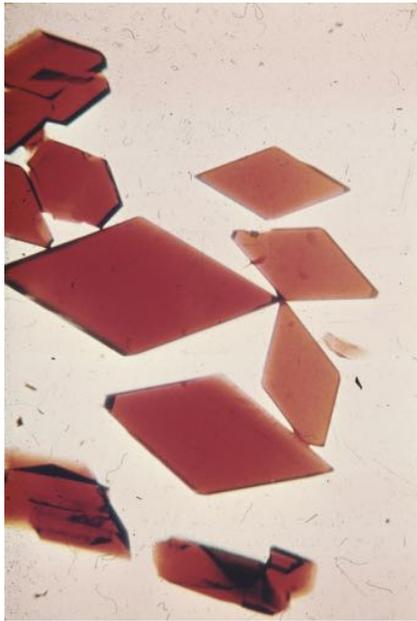
1951 – alpha helix





DNA (1953)





Dorothy
Hodgkin



Insulin 1969



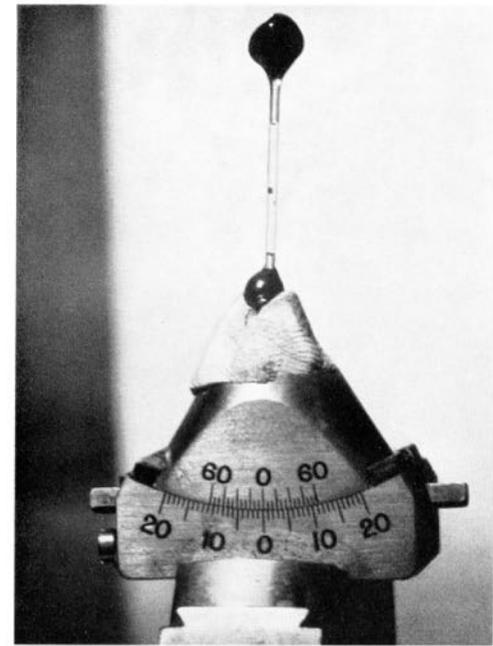
JD Bernal



Max Perutz

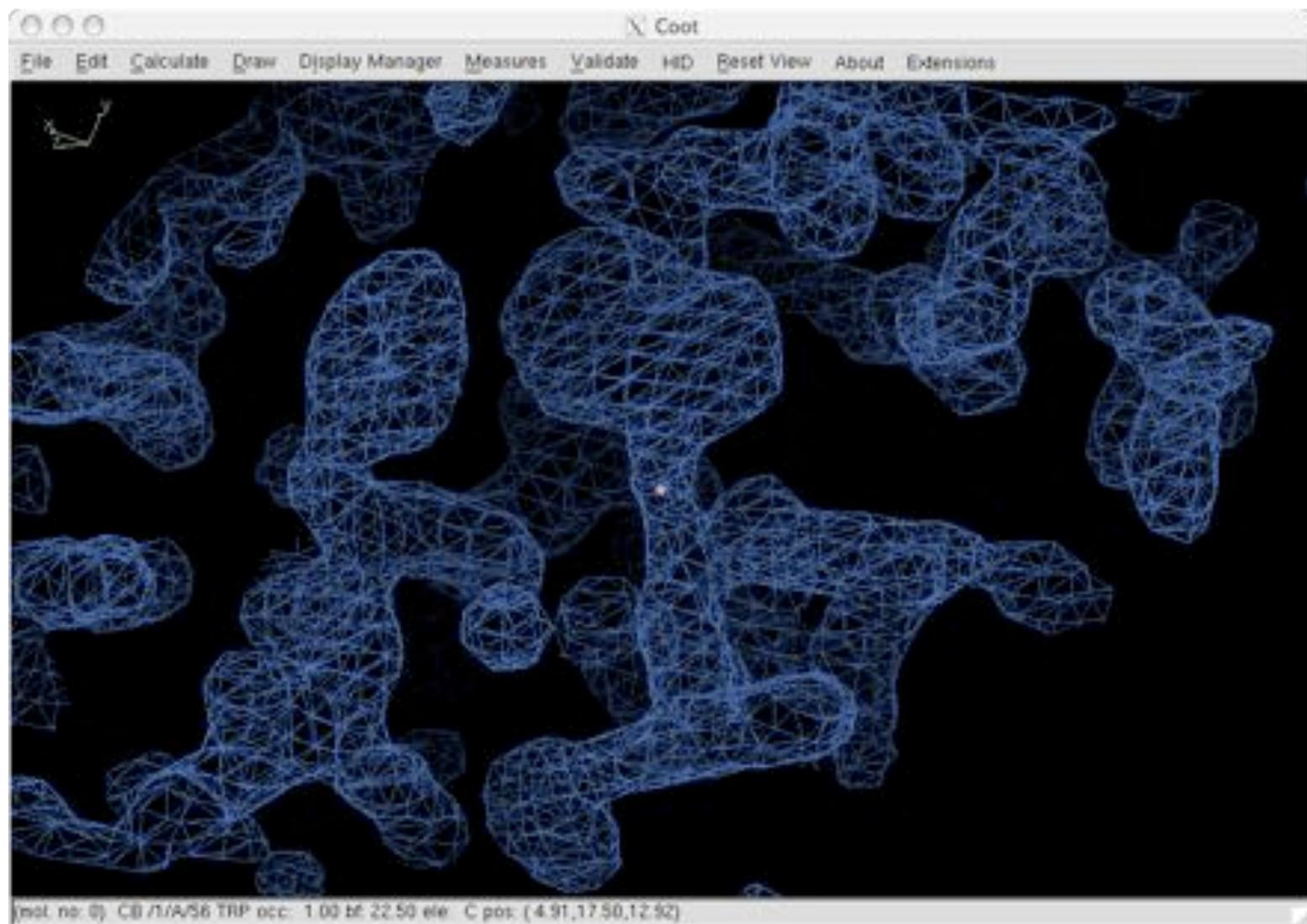


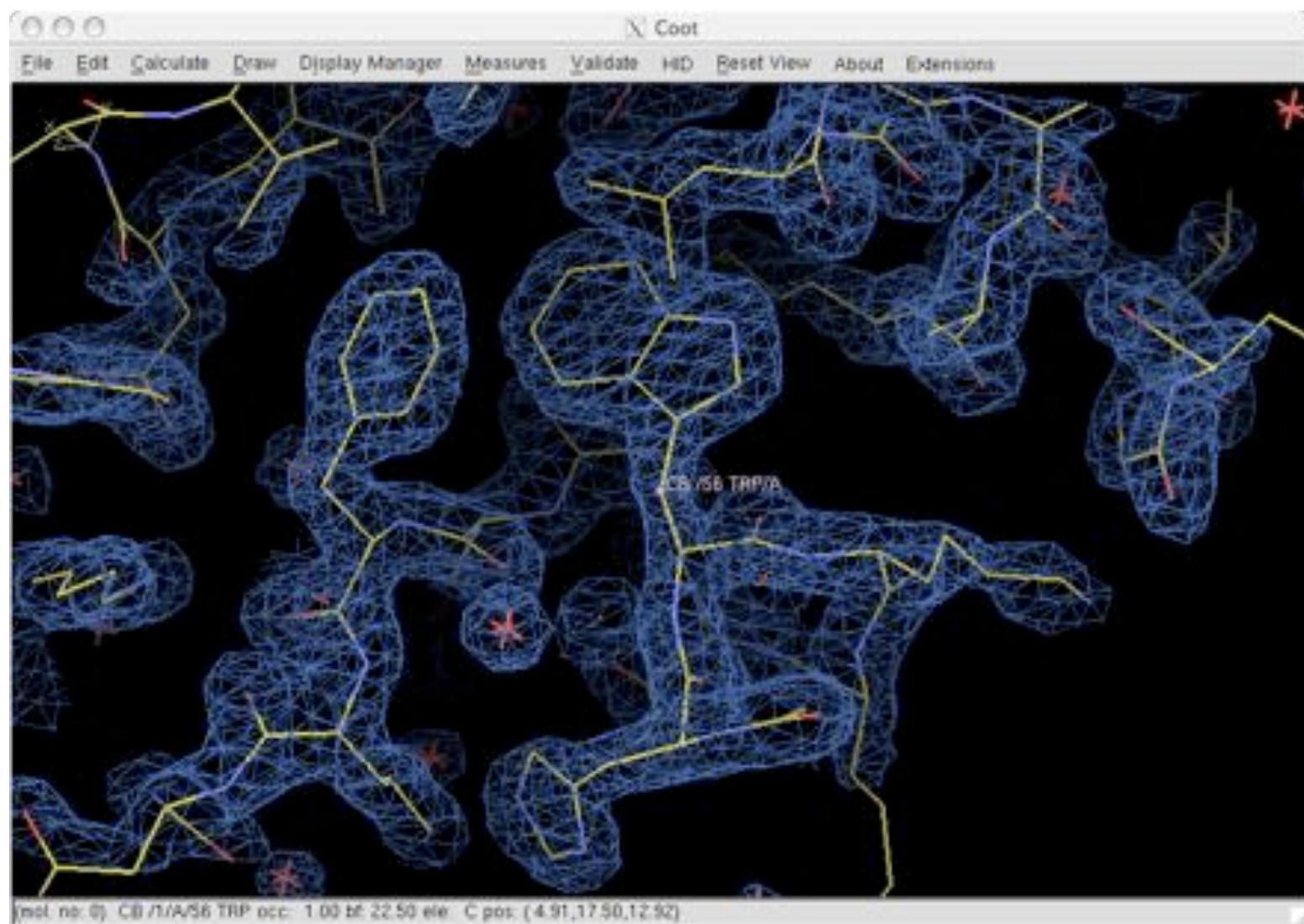
Myoglobin- 1959



John
Kendrew







Kristallographie in ihren zweiten 50 Jahren profitierte von 2 weitere Entwicklungen

Computers



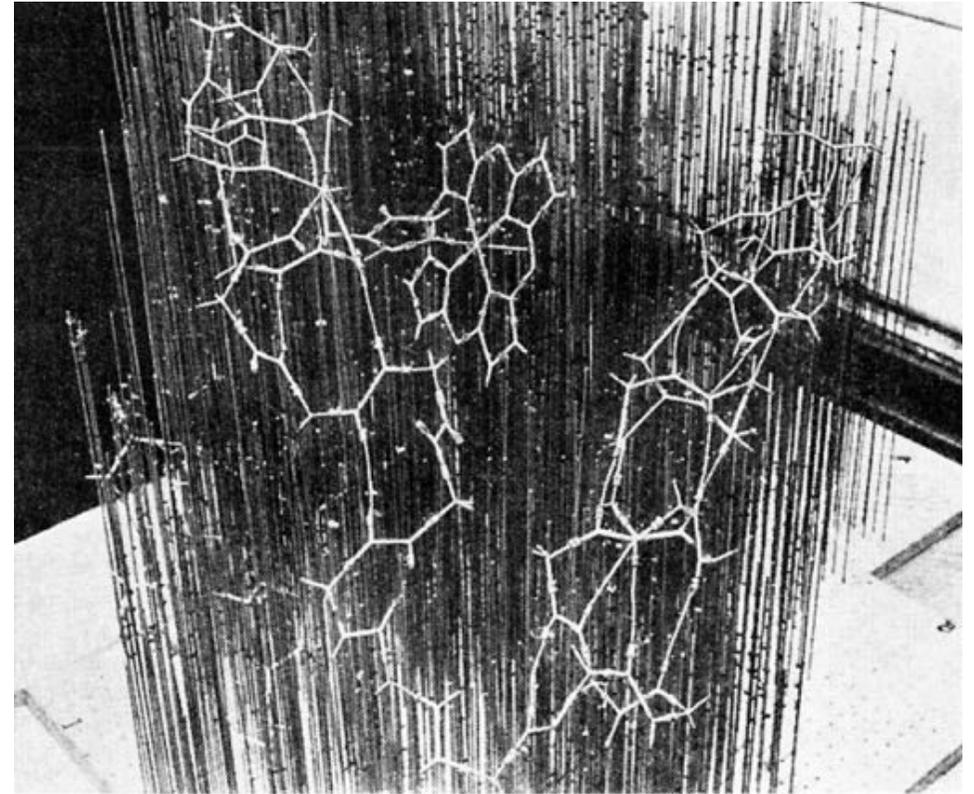
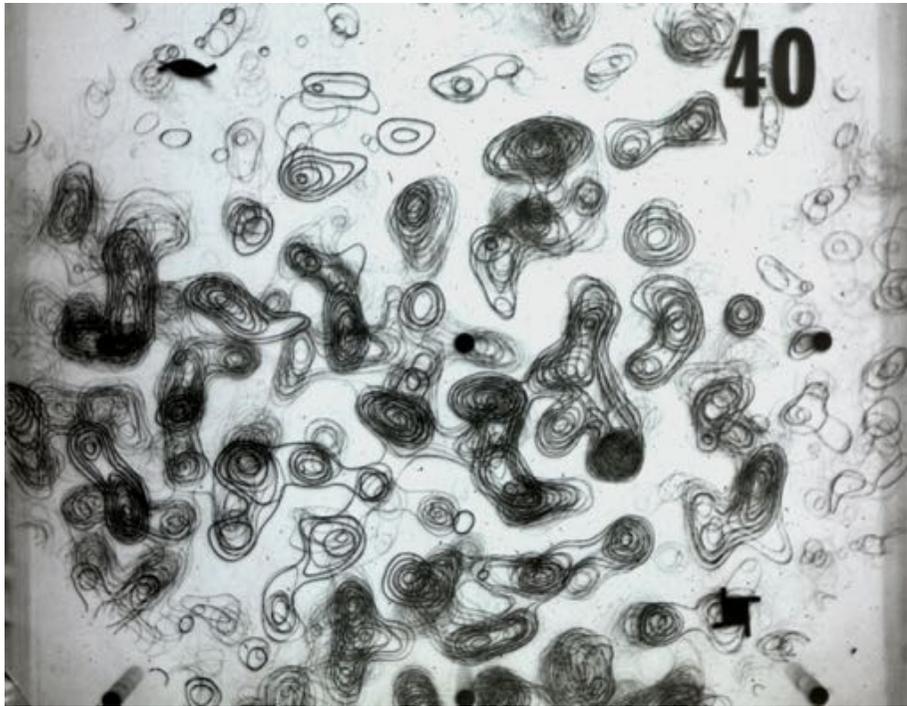
Paper tapes of X-ray structure factors for 2 Å map of myoglobin



1956 Ferranti Pegasus £50,000
primary storage 280 bytes rotating
drum 25,000 bytes

Kristallographie in ihren zweiten 50 Jahren profitierte von 2 weitere Entwicklungen

Computers



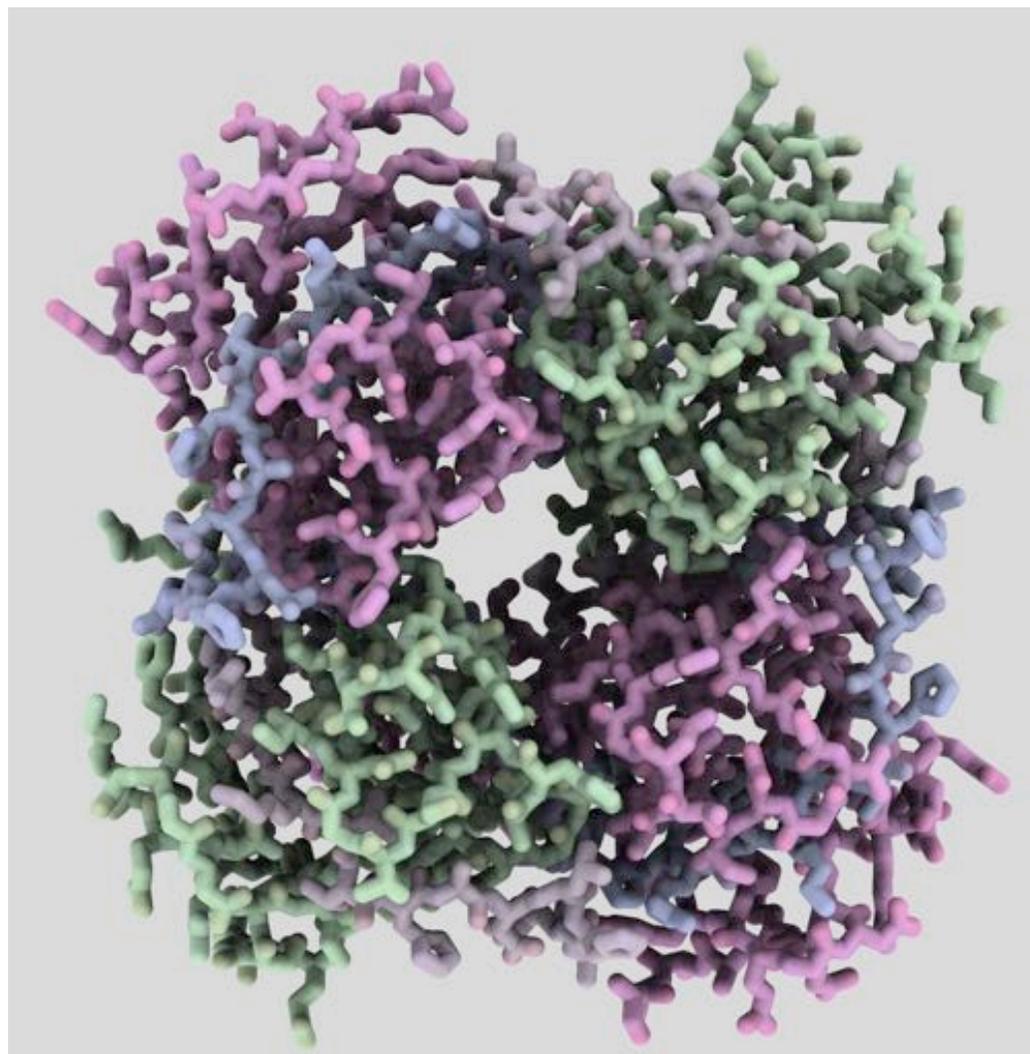
Kristallographie in ihren zweiten 50 Jahren profitierte von 2 weitere Entwicklungen

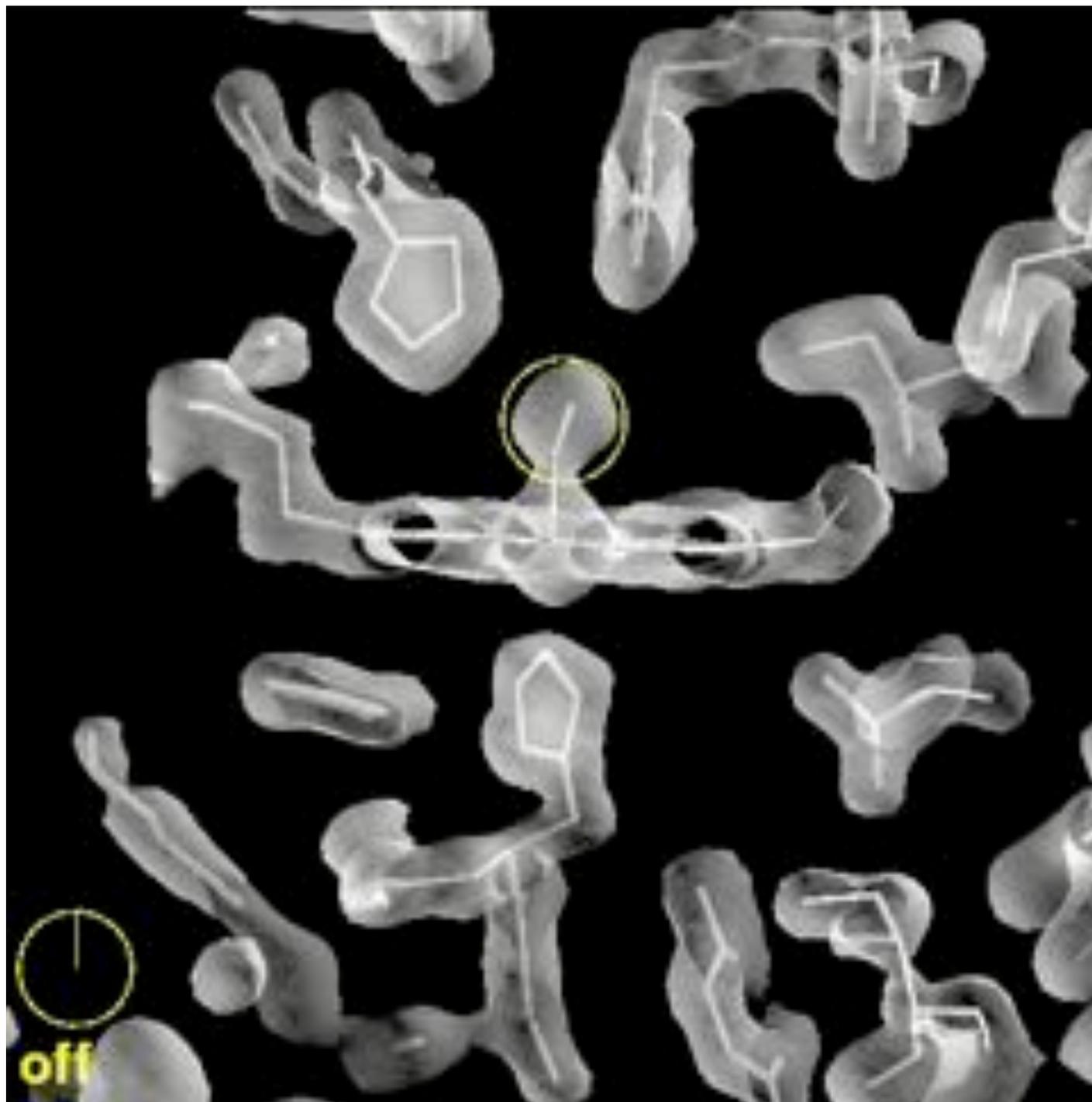
Computer



2010 Laptop £500

primary storage 1,024,000,000 bytes
rotating disk 160,000,000,000 bytes





Quo vadis?

- Grösser
- Besser
- Schneller



Unser Ziel ist es, ein atomar aufgelöstes dynamisches Bild von lebenden Prozessen in Aktion zu beobachten.