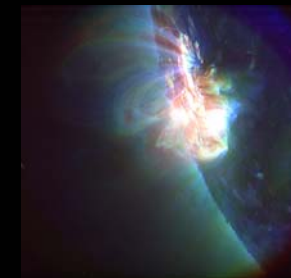
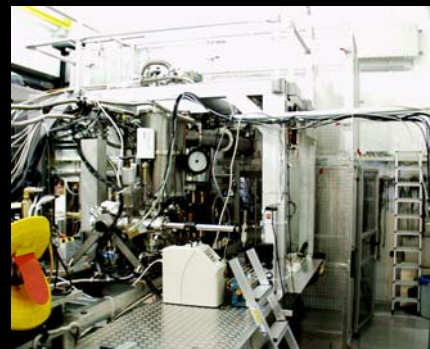
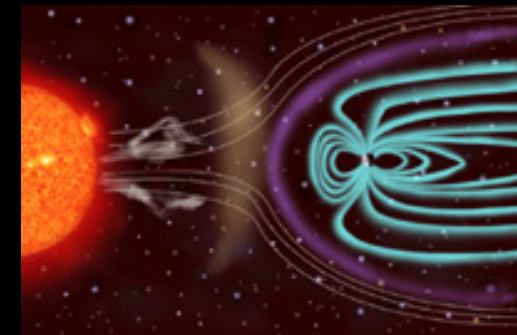
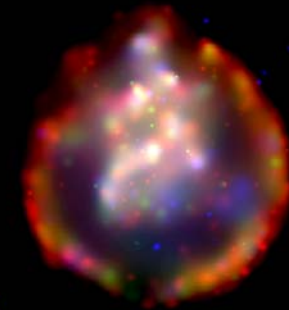
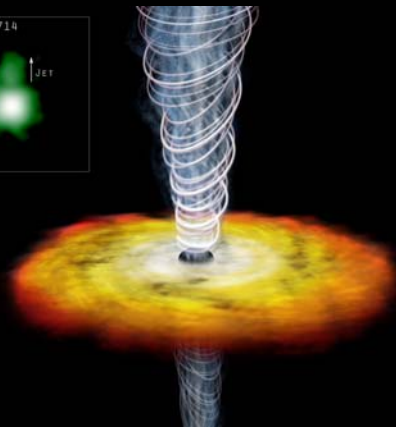


# Heiße Sternmaterie und Sonnenwind im Labor

José R. Crespo López-Urrutia  
„Physik am Samstagmorgen“  
13.12.2003  
Max-Planck-Institut für Kernphysik



Ganz am Anfang war ein ziemliches Chaos...

aus dem irgendwie **Nukleonen** entstehen konnten.

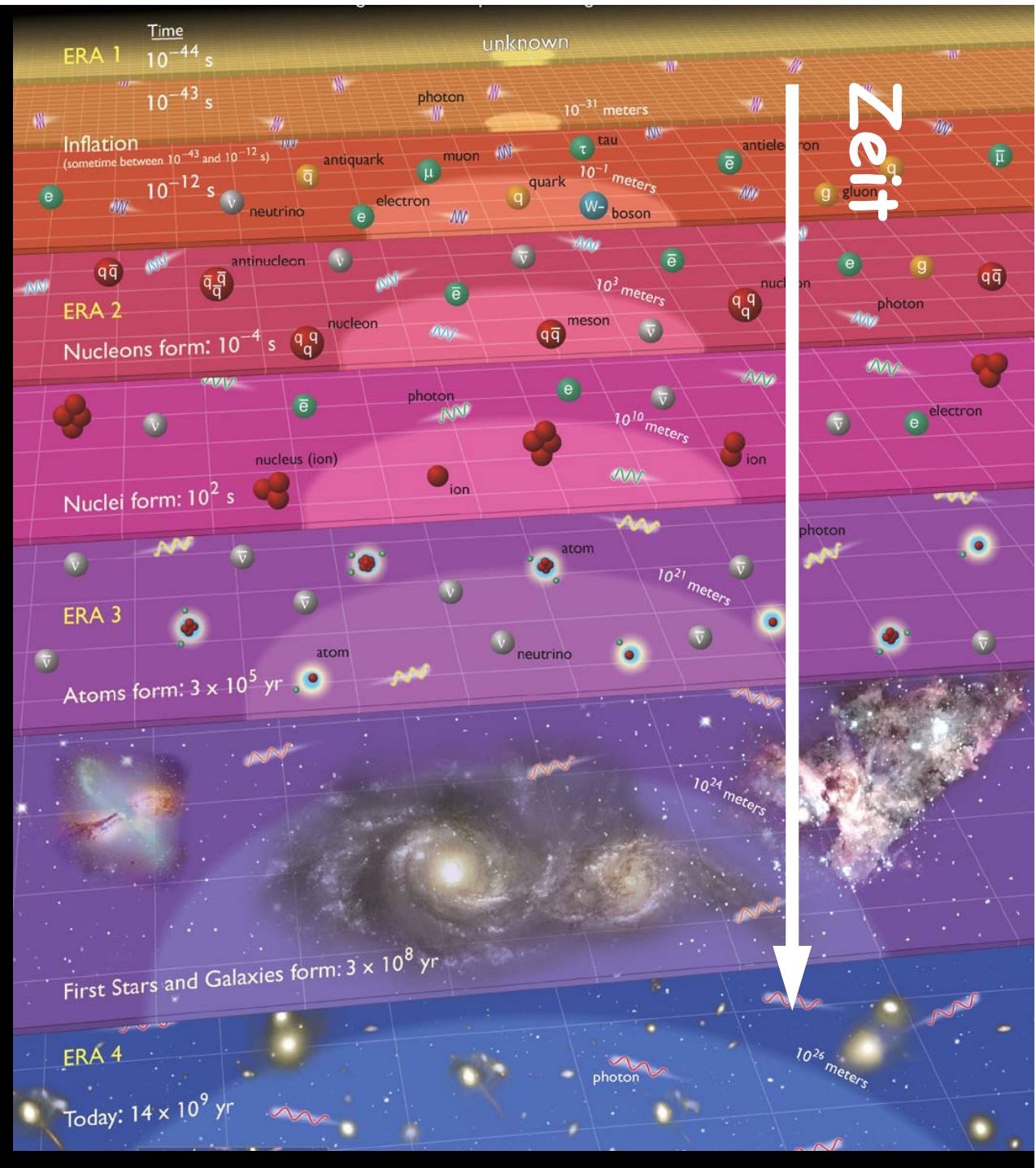
Nach wenigen Sekunden bildeten sich **Kerne** und **Ionen**....

und ein paar hundert Tausend Jahre später (neutrale) **Atome**...

die sich dann zu **Sterne** und **Galaxien** klumpten.

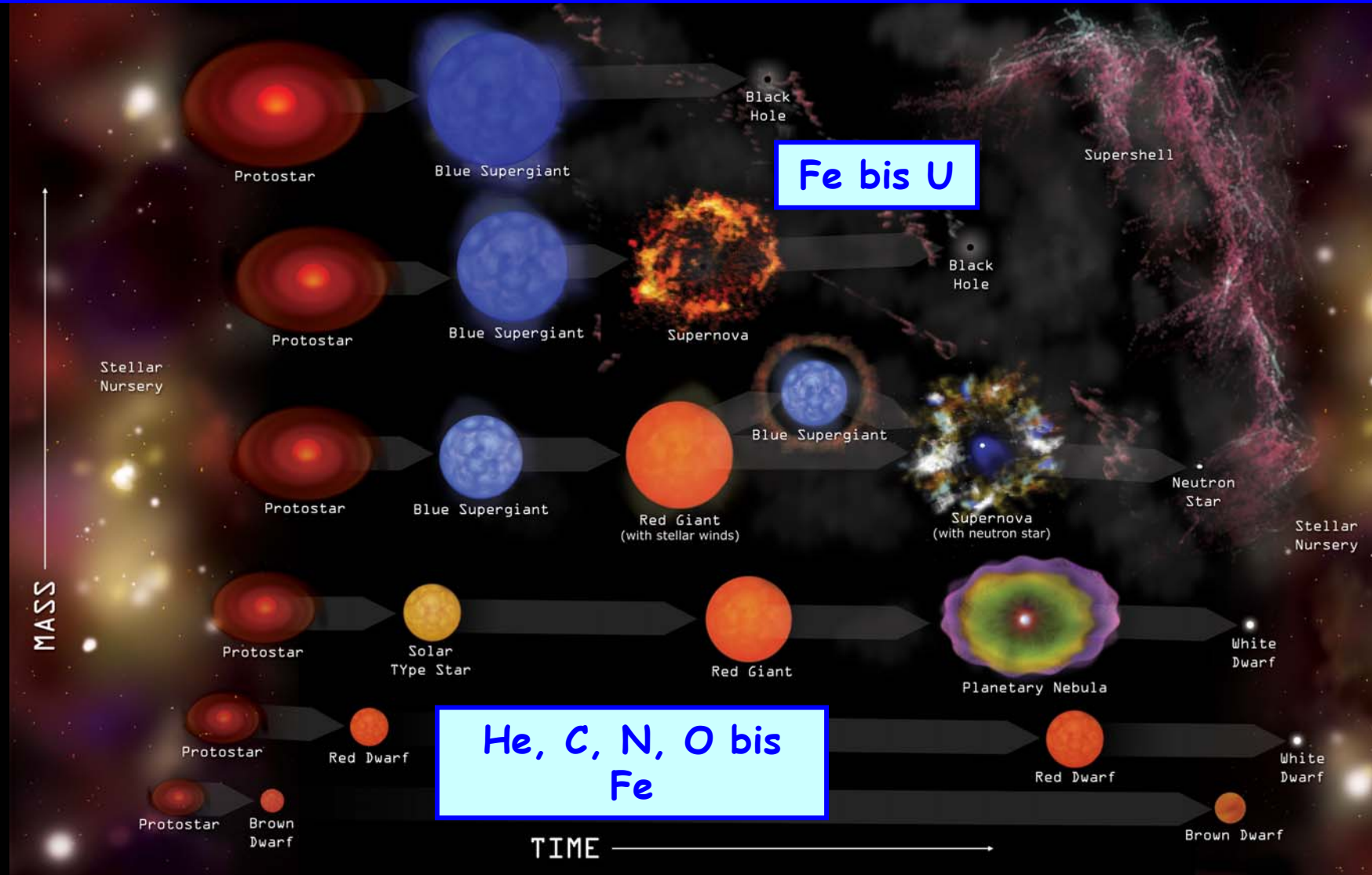
Dort sind dann die schweren **Elemente** synthetisiert worden...

aus denen sich auch **Planeten** machen lassen.

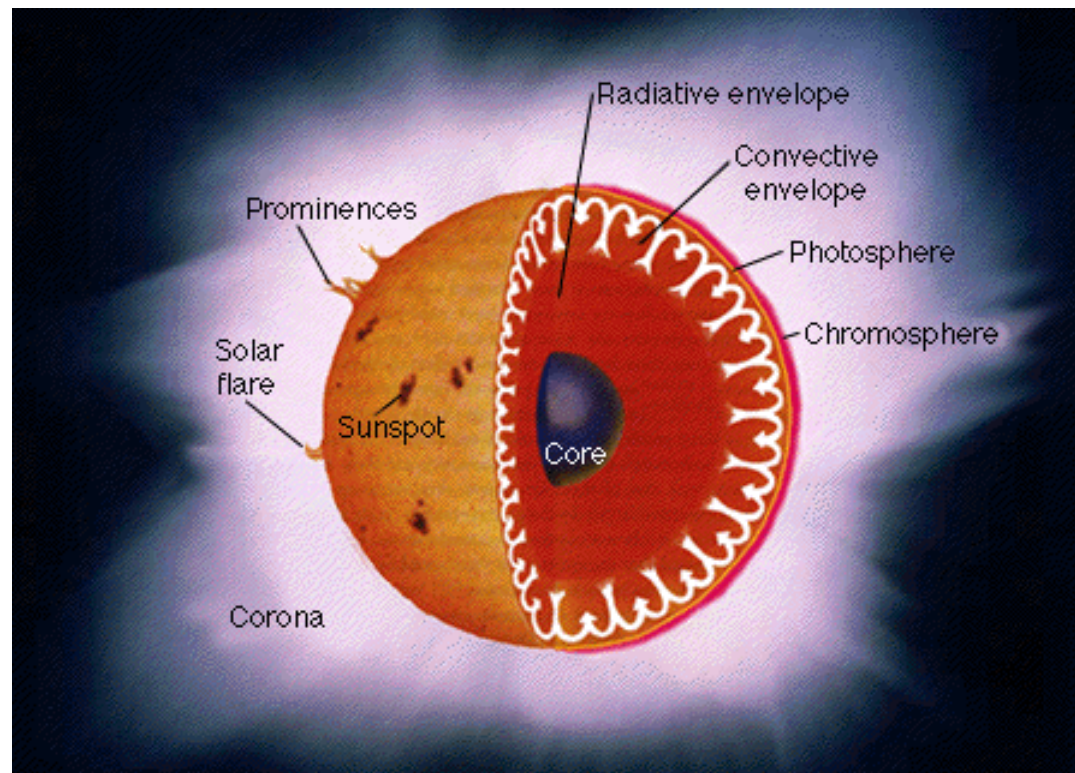


Die Sterne sind riesige Fabriken, die aus **Wasserstoff Energie** und **schwerere chemische Elemente** produzieren.

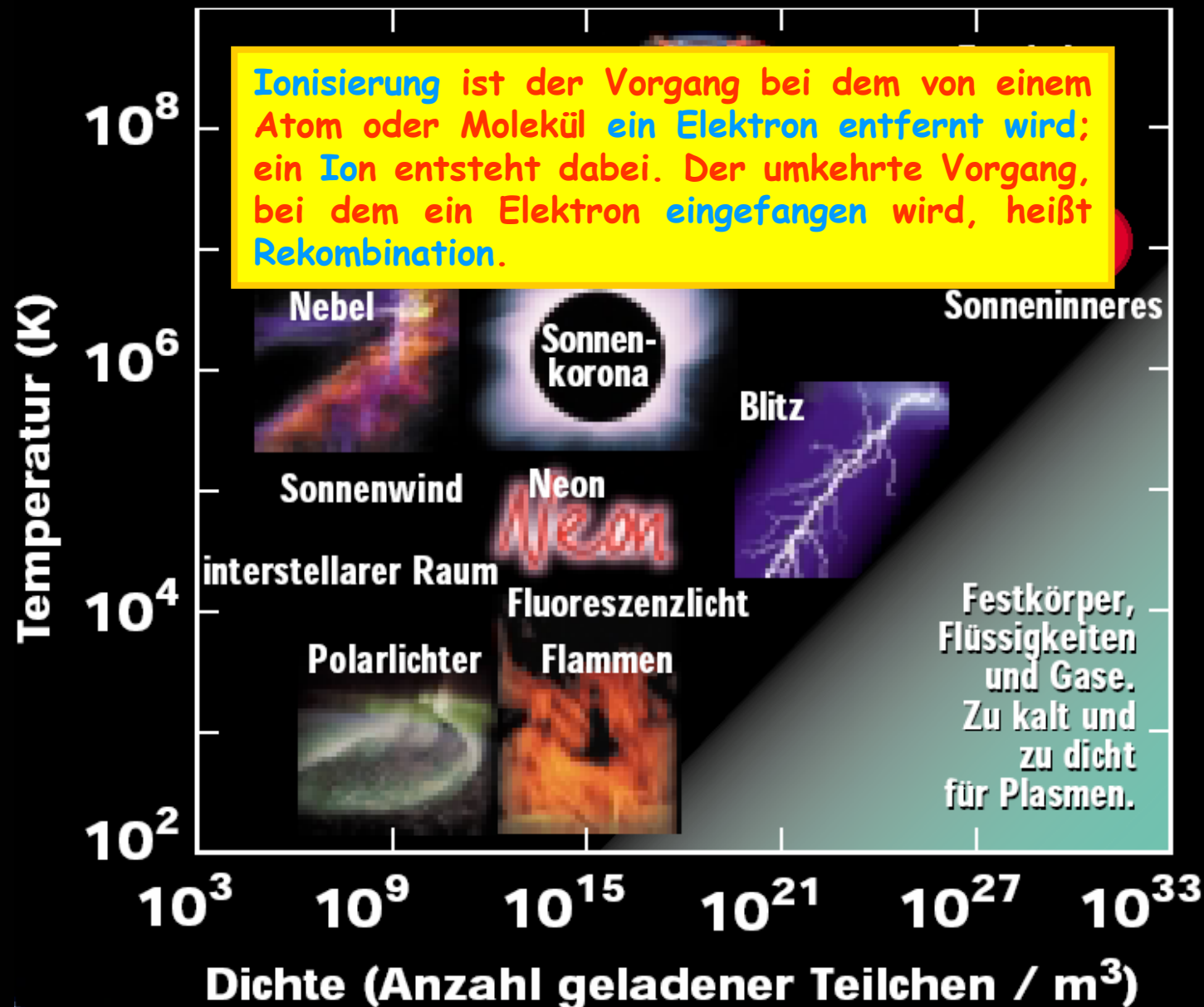
Jede Phase der Sternentwicklung ist notwendig, um unsere jetzige Alltagschemie zustande zu bringen.



- Die **Schwerkraft** läßt Materie sich sammeln und aufheizen.
- Ab einer gewissen Masse kann ein Stern Wasserstoffkerne sich verschmelzen lassen und **Fusionsenergie** erzeugen. So entstehen schwerere **Elemente bis Eisen**.
- Wenn der Brennstoffvorrat verbraucht ist, kann ein Stern als **Supernova** explodieren. In diesem Fall werden sehr schnell die **ganz schwere chemische Elemente synthetisiert**.



Ein großer Teil der Materie im All befindet sich im **Plasmazustand**, das heißt, mehr oder minder **ionisiert**. Die **Dichte** (Anzahl geladener Teilchen / m<sup>3</sup>) des Plasmas und auch dessen **Temperatur** können sehr unterschiedlich sein.



## Was sind hochgeladene Ionen?

wenn ein Atom die **meisten** seiner Elektronen verliert und dadurch die Kernladung **Z nicht mehr kompensiert** wird, z. B.:

**O<sup>6+</sup>**, **Kr<sup>34+</sup>** (mit zwei e<sup>-</sup> übrig), **Ar<sup>17+</sup>**, **U<sup>91+</sup>** (ein e<sup>-</sup> übrig)

Wann und wo gibt es hochgeladene Ionen?

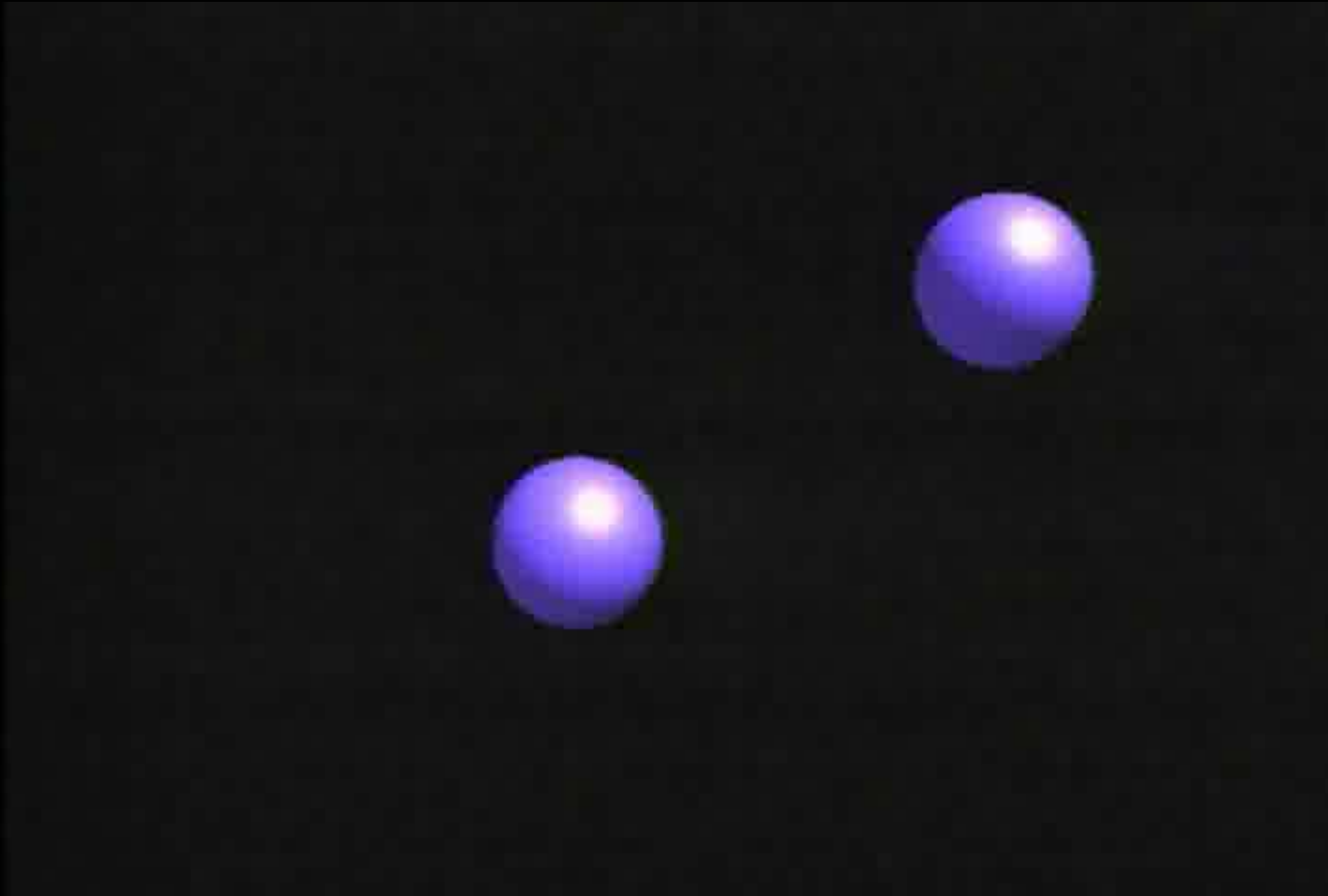
- bei **sehr hohen Temperaturen** ( $T > 10^6$  K)

$$10^6 \text{ K} \approx 100 \text{ eV} \rightarrow 10^9 \text{ K} \approx 100000 \text{ eV}$$

## Warum muß man sie erforschen?

- Astrophysik, Fusionsforschung : Analyse und **Diagnostik** der Beobachtungen, **zuverlässige** Daten fehlen.
  - theoretische **Modelle** sind nicht ausreichend genau, weil die Systeme **zu komplex** sind und die Mathematik nicht klar (**Grenzen** der Störungsrechnung) ist.
  - fundamentale Phänomene werden leichter beobachtbar, weil die **Atomhülle** einfacher wird und schwache Effekte verstärkt werden.
- Experimentelle Daten notwendig!

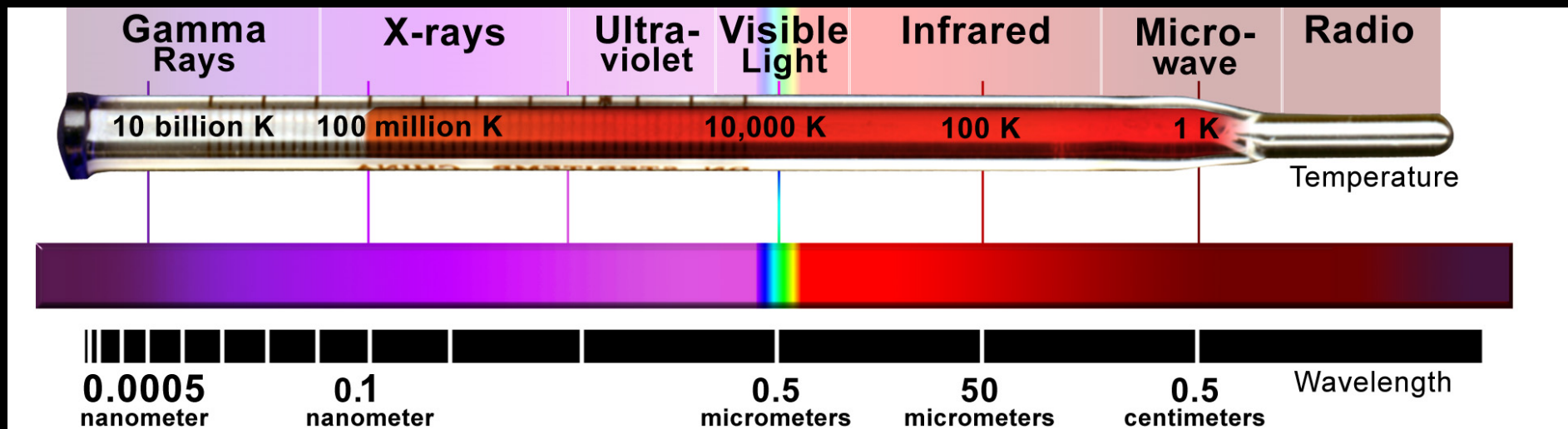
Was kann man beobachten?





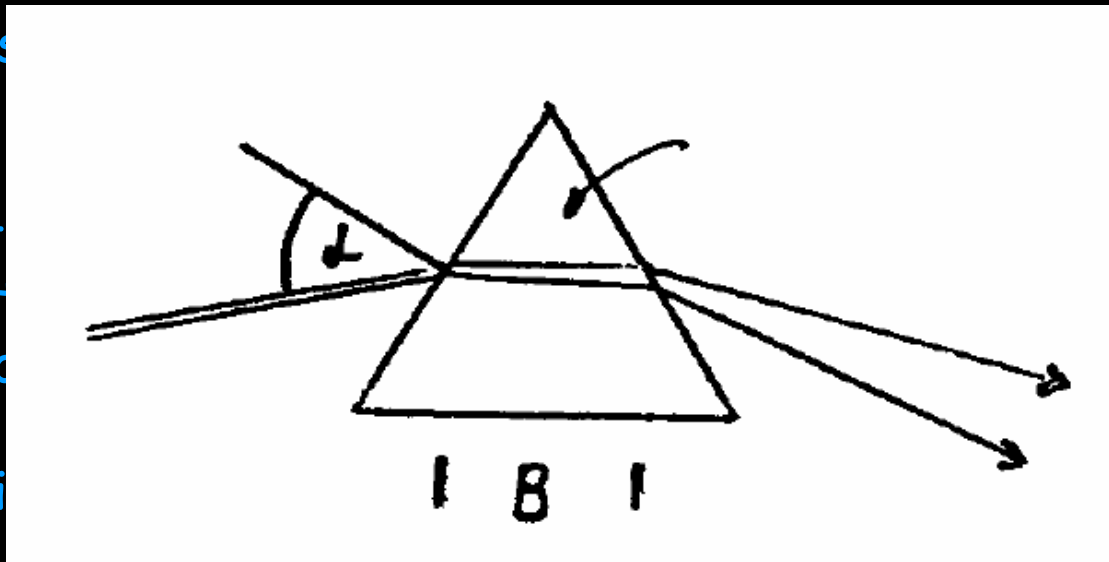
Für jede **Temperatur** gibt es einen „typischen“ Wellenlängebereich, in der die Materie strahlt.

Heiße Quellen **glühen** nicht nur **rot, blau** oder „weiß“, sondern im Ultravioletten oder im **Röntgen**.



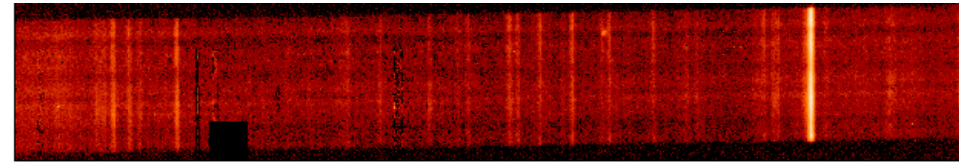
# Jedes chemische Element hat spezifische Farben

Wassers  
Helium  
Lithium  
Sauerst  
Kohlenst  
Sticksto  
Neon  
Magnesi  
Silizium  
Schwefel  
Eisen  
Aluminu  
Kalzium  
Argon  
Natrium  
Krypton  
Xenon  
Barium  
Strontiu

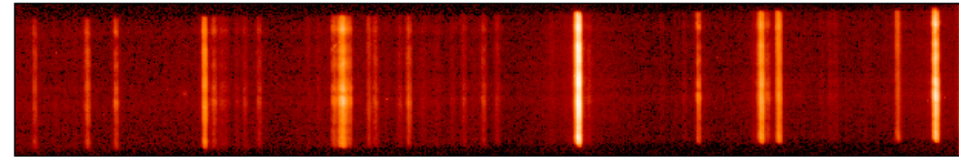


...und die hochgeladene Ionen haben auch „Farben“

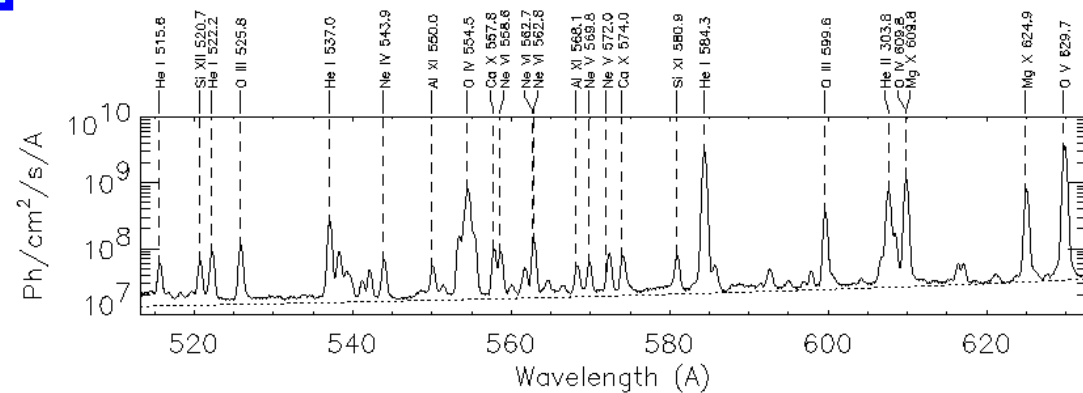
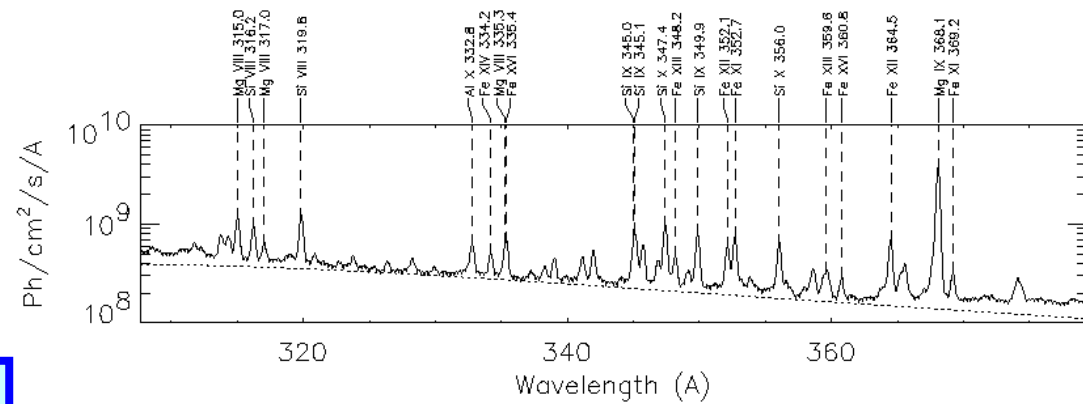
z. B. im Vakuum-Ultraviolett



NIS wavelength band 1



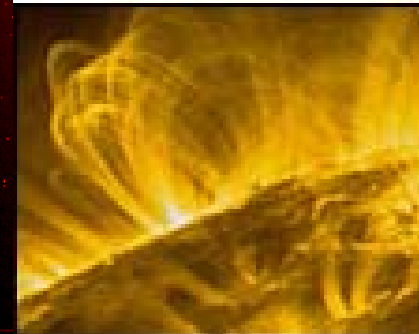
NIS wavelength band 2



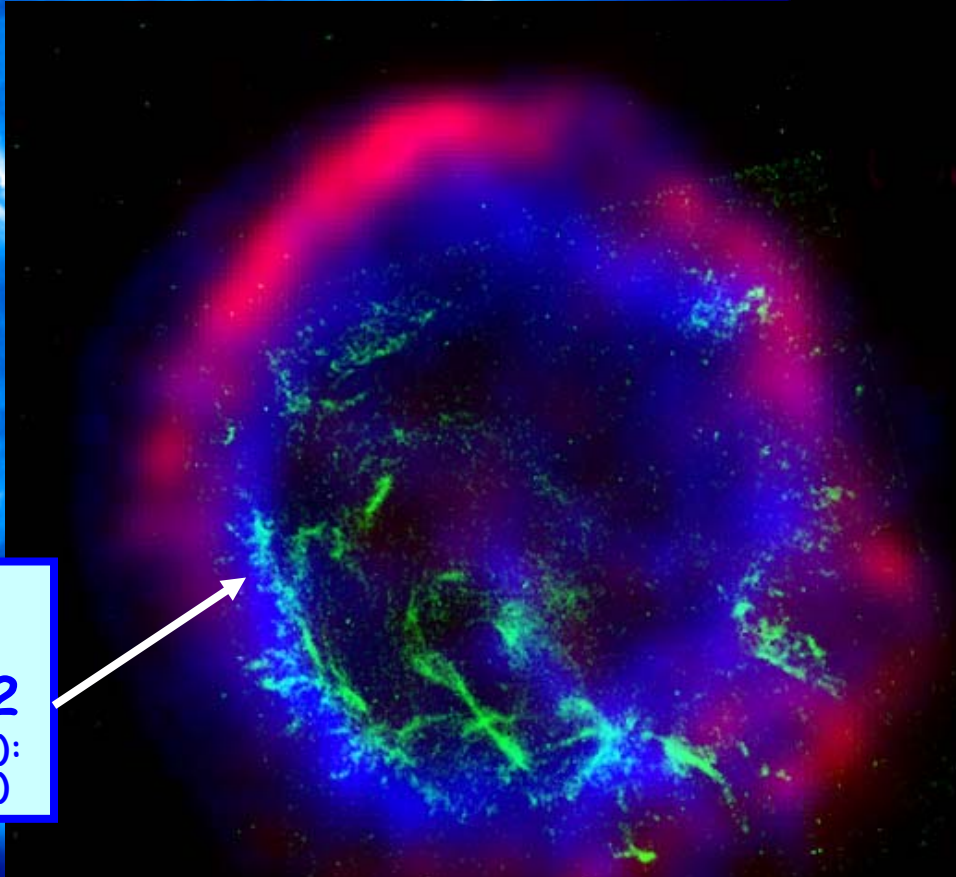
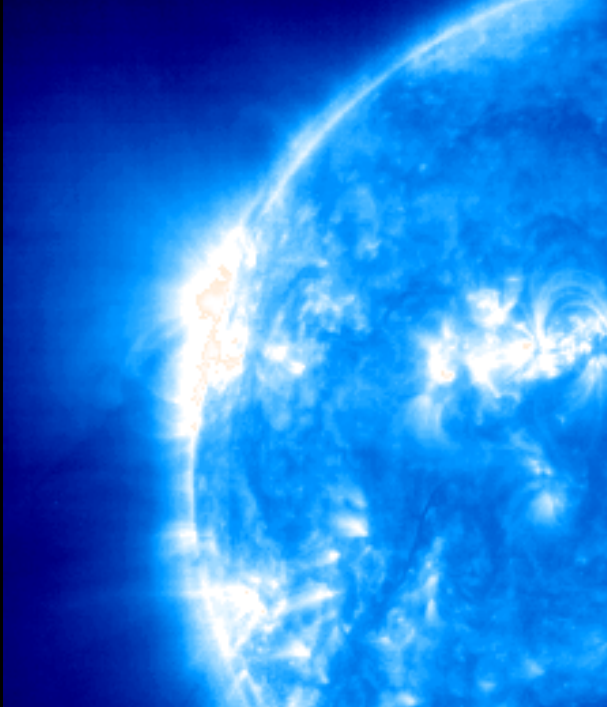
## Neue, hochauflösende Röntgen-Satelliten

**Meßgrößen:** Wellenlänge  $\lambda$ , Intensität...  
**gesucht:** Identifizierung der Ionen,  
Werte der Plasmadichte, Temperatur,  
Magnetfeld, usw.

2001/04/03 01:19



...bringen seit neuestem Bildern in kürzeren Wellenlängen.



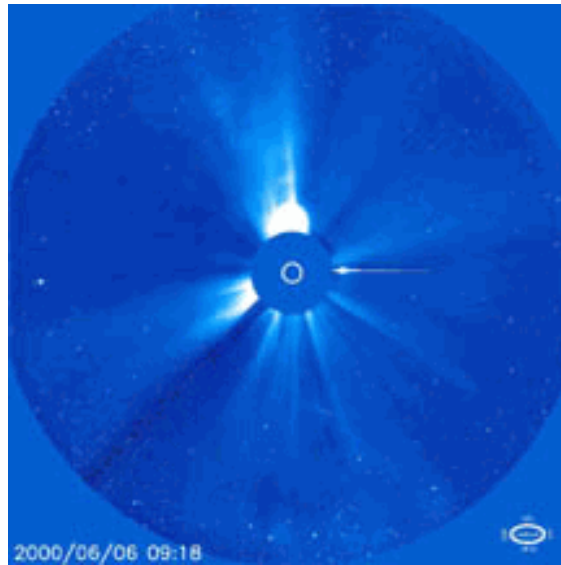
Röntgen (blau)

Supernova *remnant* E0102-72

Kleine Magellanische Wolke (190.000 Lichtjahre):  
Röntgen (blau), sichtbar (grün), Radiowellen (rot)

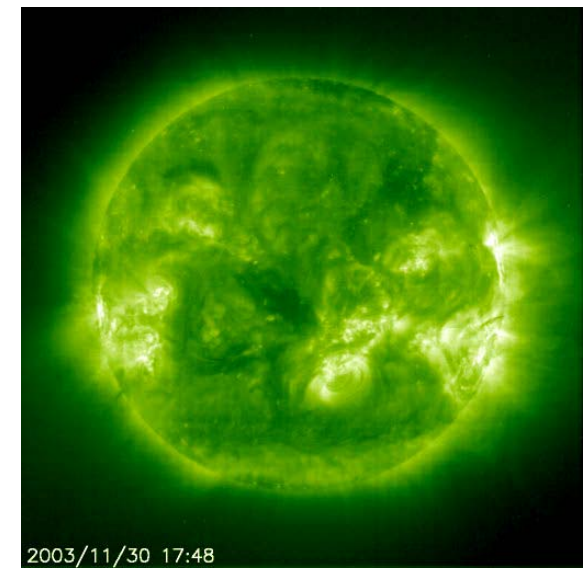
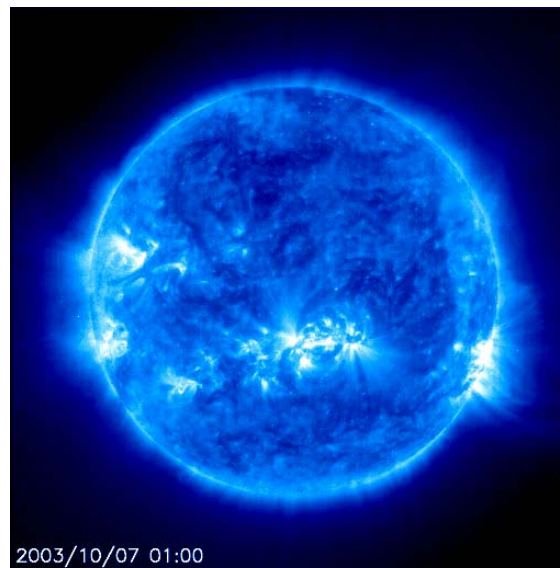
2001/05/15 07:00

T. Gaetz et al., "Chandra X-ray Observatory Arcsecond Imaging of the Young Oxygen Rich Supernova Remnant 1E0102.2-7219", ApJ. Lett.(in press)

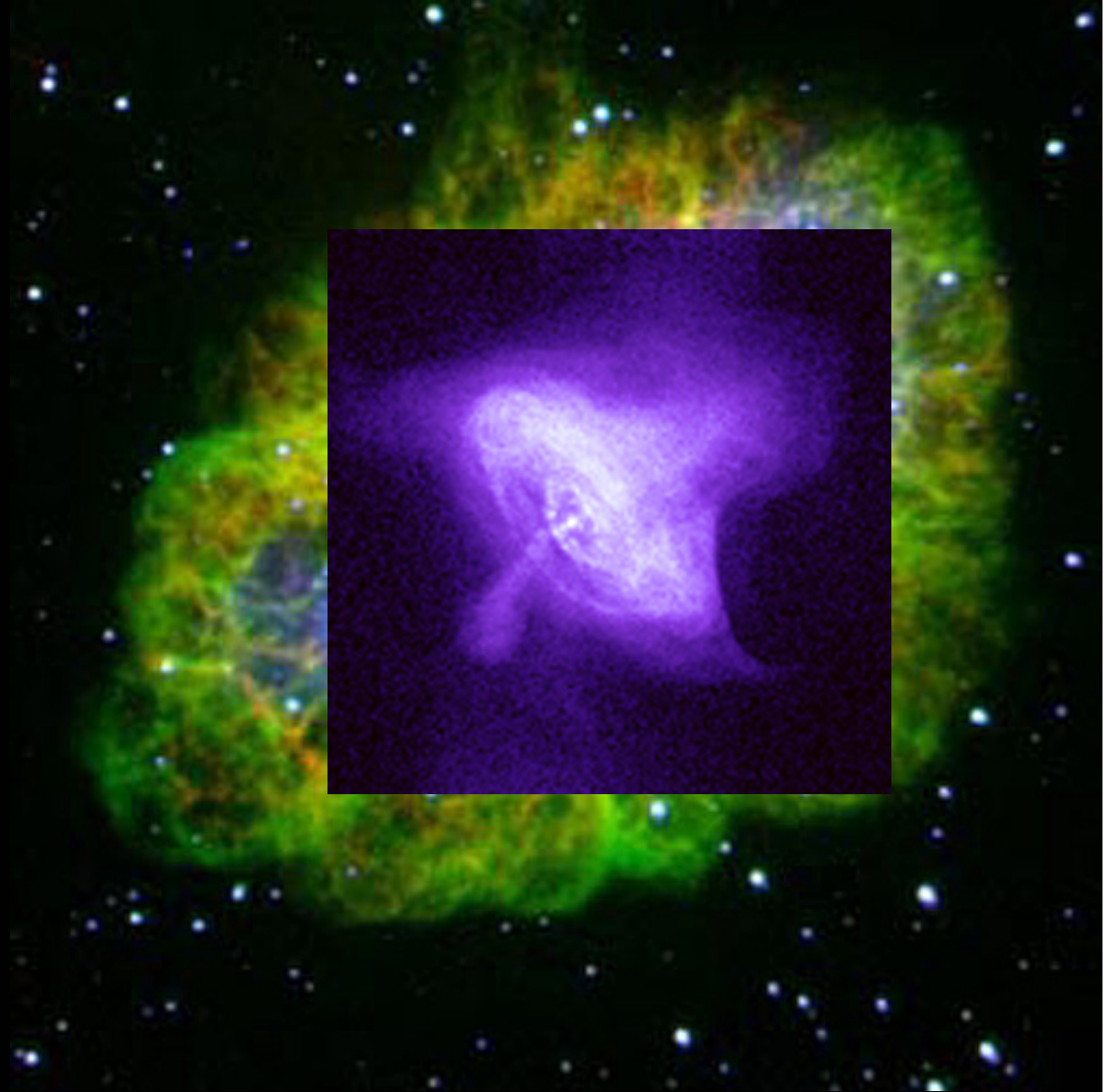


**Koronaler  
Massenauswurf**

**Sonnenaktivität  
im VUV-Bereich**



Die Aufnahmen im  
**Sichtbaren** und im  
**Röntgen** zeigen  
unterschiedliche  
Aspekte des  
beobachteten  
Objektes.



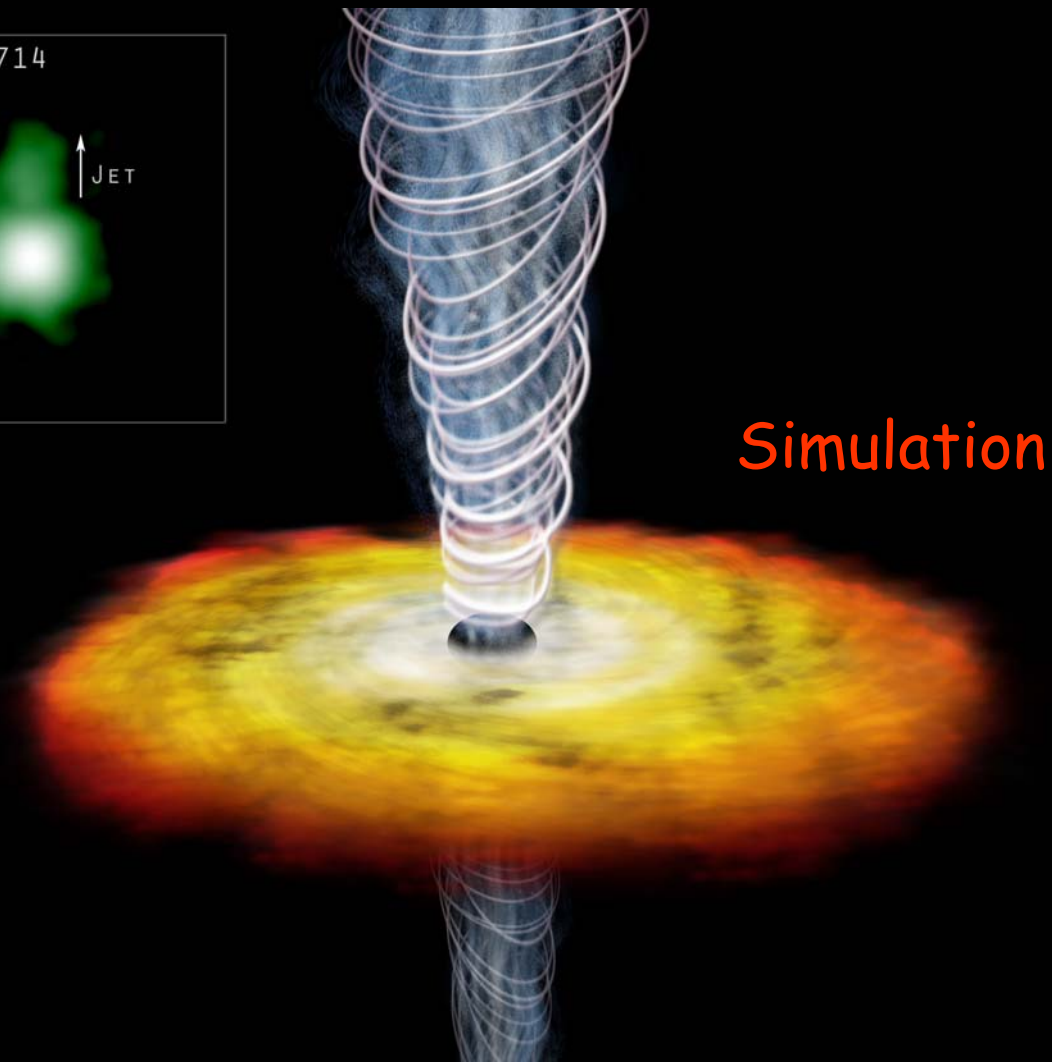
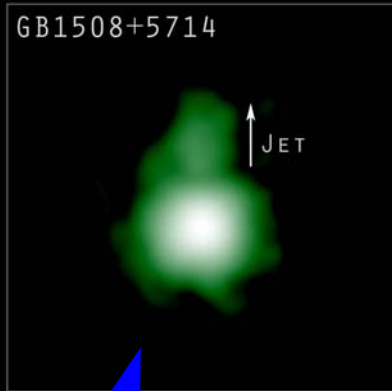
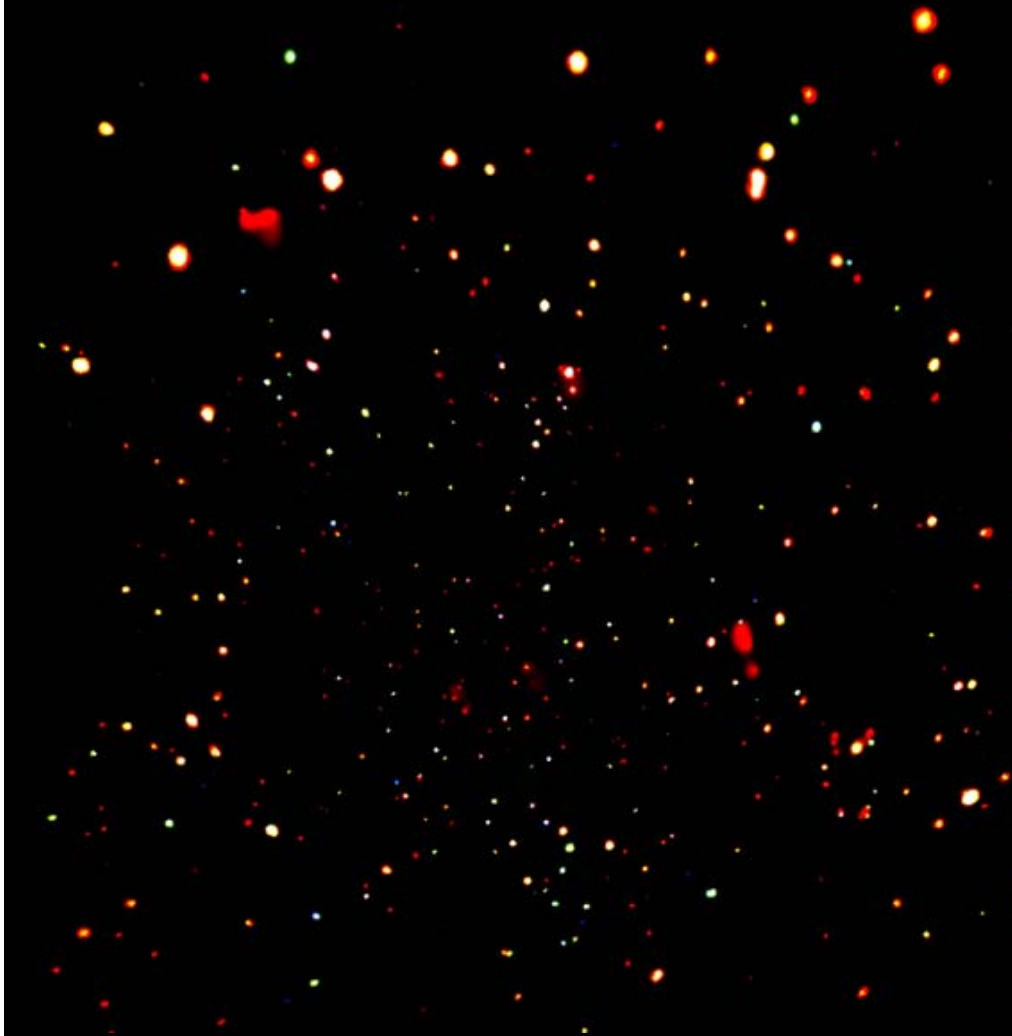


Bild im Röntgen (NASA Chandra X-ray Observatory) vom Quasar GB1508+5714 (12 Milliarden Lichtjahren entfernt) mit einem **Jet von hochenergetischen Teilchen** daß mehr als **100,000 Lichtjahren** vom supermassiven Schwarzen Loch in der Mitte des Quasars hinausschießt.



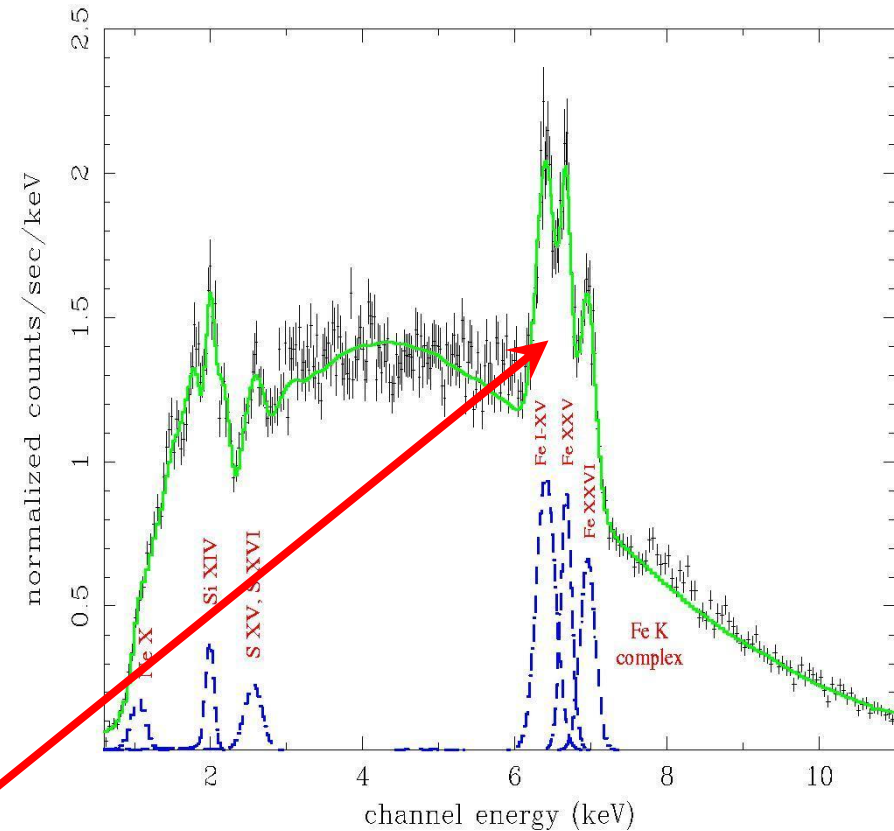
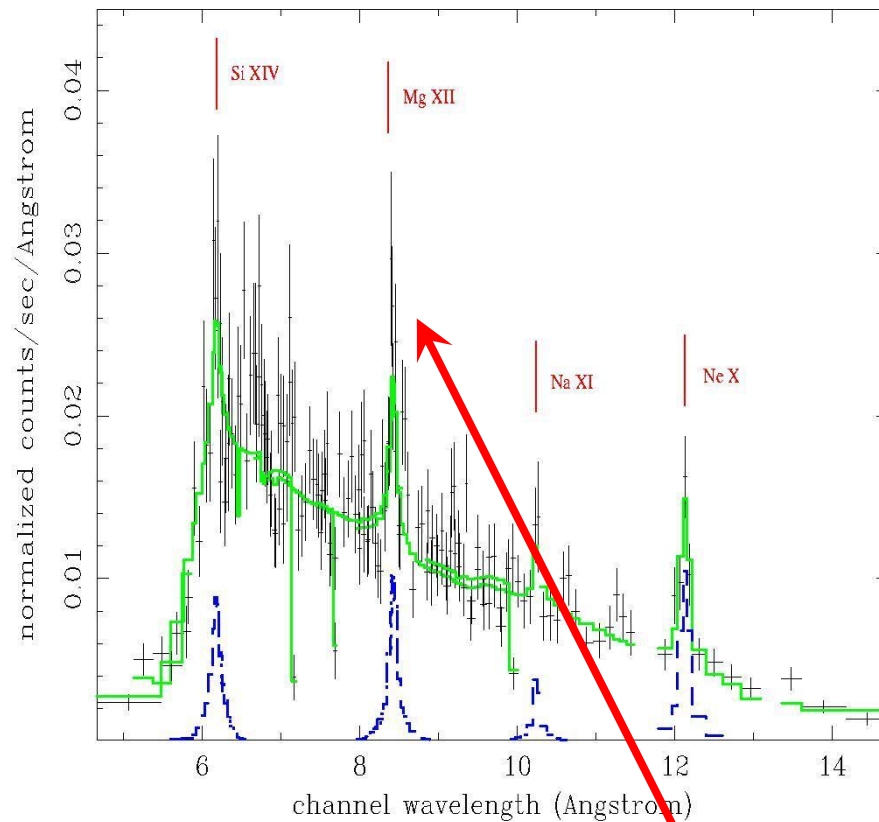
## Ganz neue Aus- und Einsichten des Alls



Nach **23 Tagen Belichtungszeit** entstand dieses *Chandra Deep Field North* -Bild. Es zeigt einen Ausschnitt des Himmels etwa halb so groß wie der Mond, und ist das „tiefste“ Bild des Universums **im Röntgen**.

Darin sind etwa **500 Röntgenquellen** enthalten. Die meisten stellen supermassive **Schwarze Löcher (mehrere Millionen Sonnenmassen)** in den Mittelpunkten von Galaxien dar.

Wenn ein Schwarzes Loch Materie vom Nachbarstern verschlingt, wird Röntgenstrahlung emittiert.



High Resolution spectroscopy of Cen X-3 during an Eclipse

Image courtesy of M. van der Klis, T. di Salvo

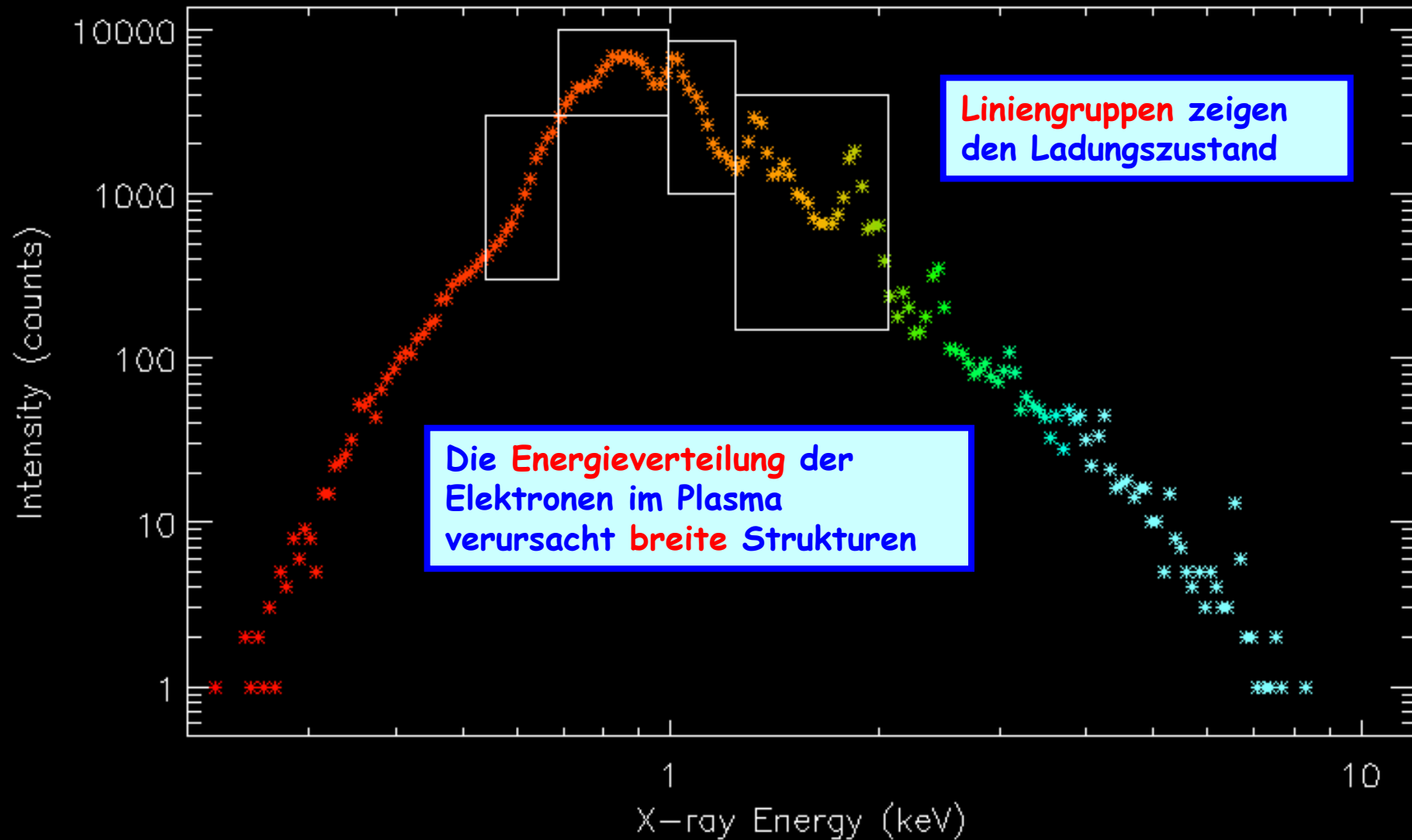
European Space Agency

Magnesium, Silizium, Eisen mit nur noch einem oder zwei Elektronen...  $T=30$  Millionen  $^{\circ}\text{K}$

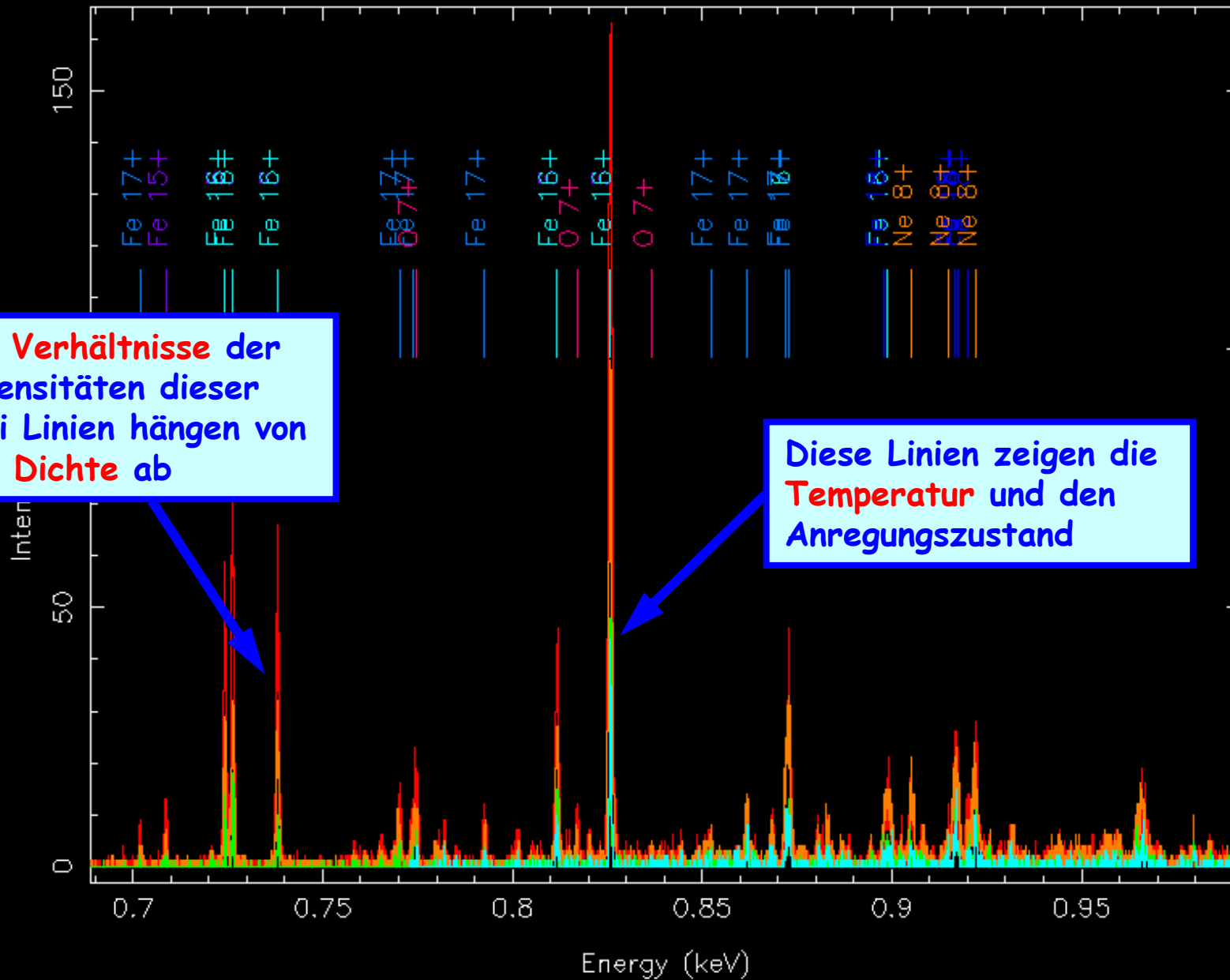
(Image courtesy of M. van der Klis, T. di Salvo and ESA)

Die gleichen Spektren können in unserem Labor erzeugt werden, bei niedriger **Auflösung**...

ACIS Spectrum from Capella Image



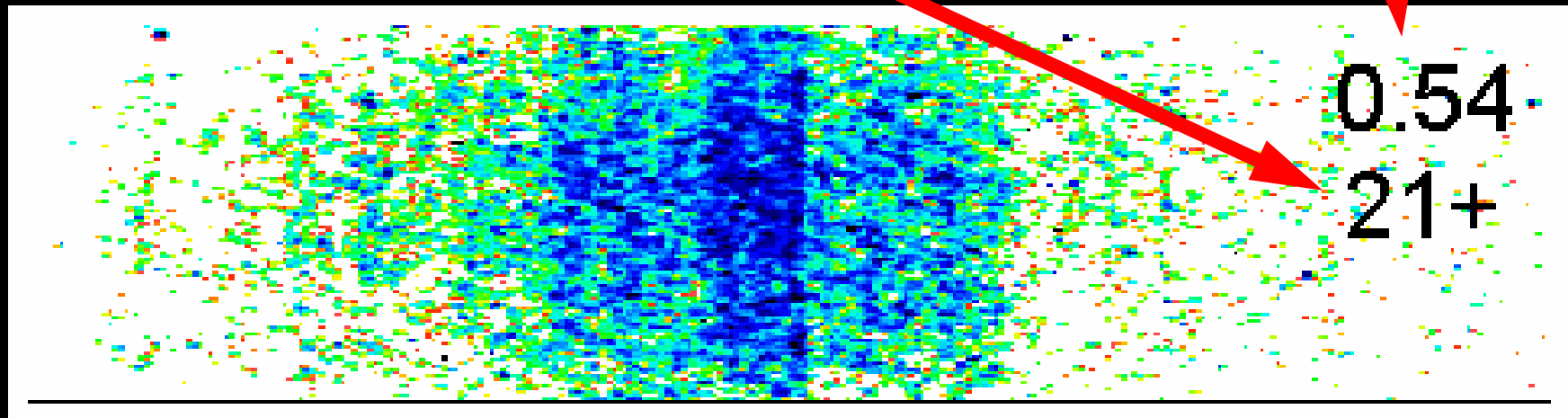
...sowie auch bei hoher Auflösung.



Die **Verhältnisse** der Intensitäten dieser drei Linien hängen von der **Dichte** ab

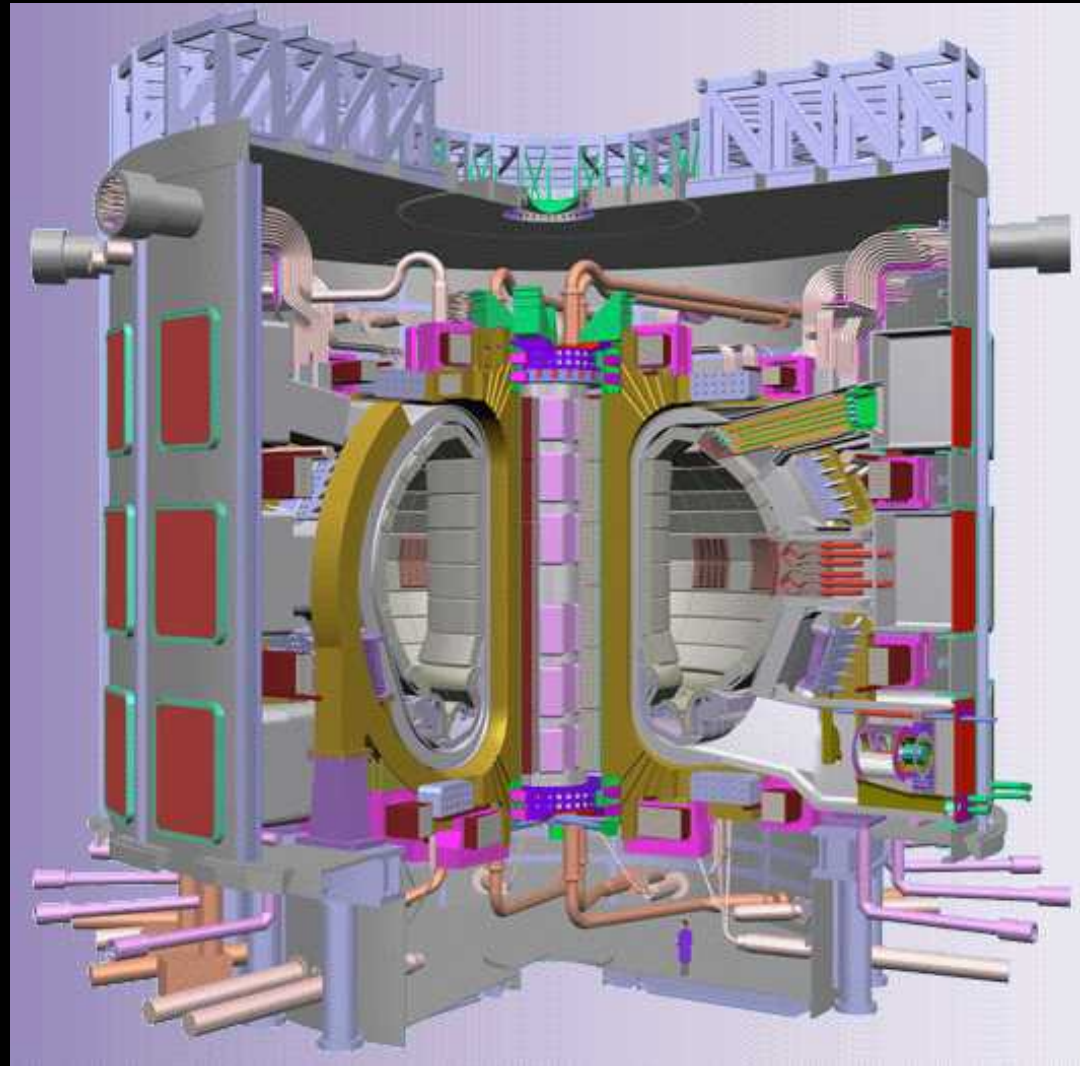
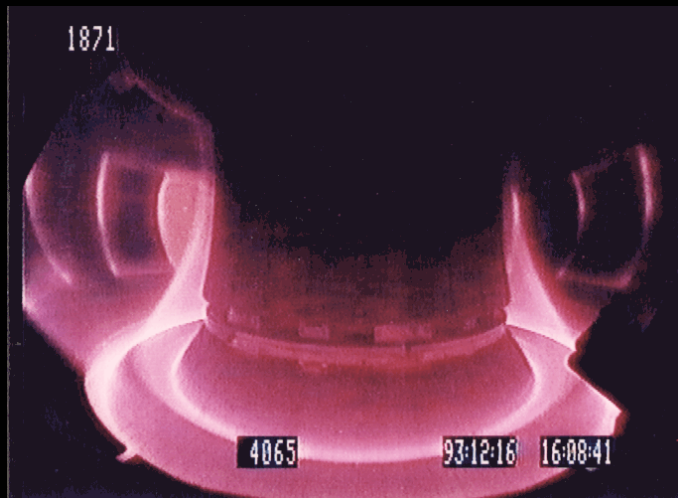
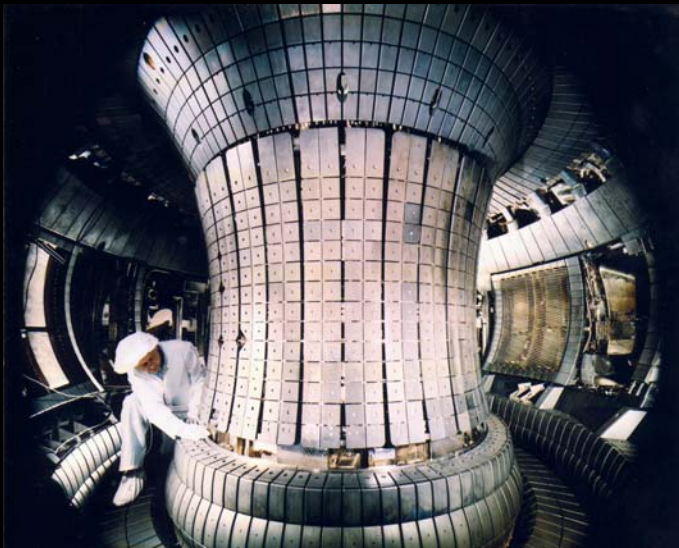
Diese Linien zeigen die **Temperatur** und den Anregungszustand

Hier ändert sich mit der Strahlenergie  
der Ladungszustand (Wolfram,  $Z=74$ )



Aufnahmen an der Berlin-EBIT

Seit Jahren wird versucht, durch **Fusionsenergie** für wirtschaftliche Zwecke zu nützen.  
Die **Diagnostik** des Plasmas ist dafür wesentlich.

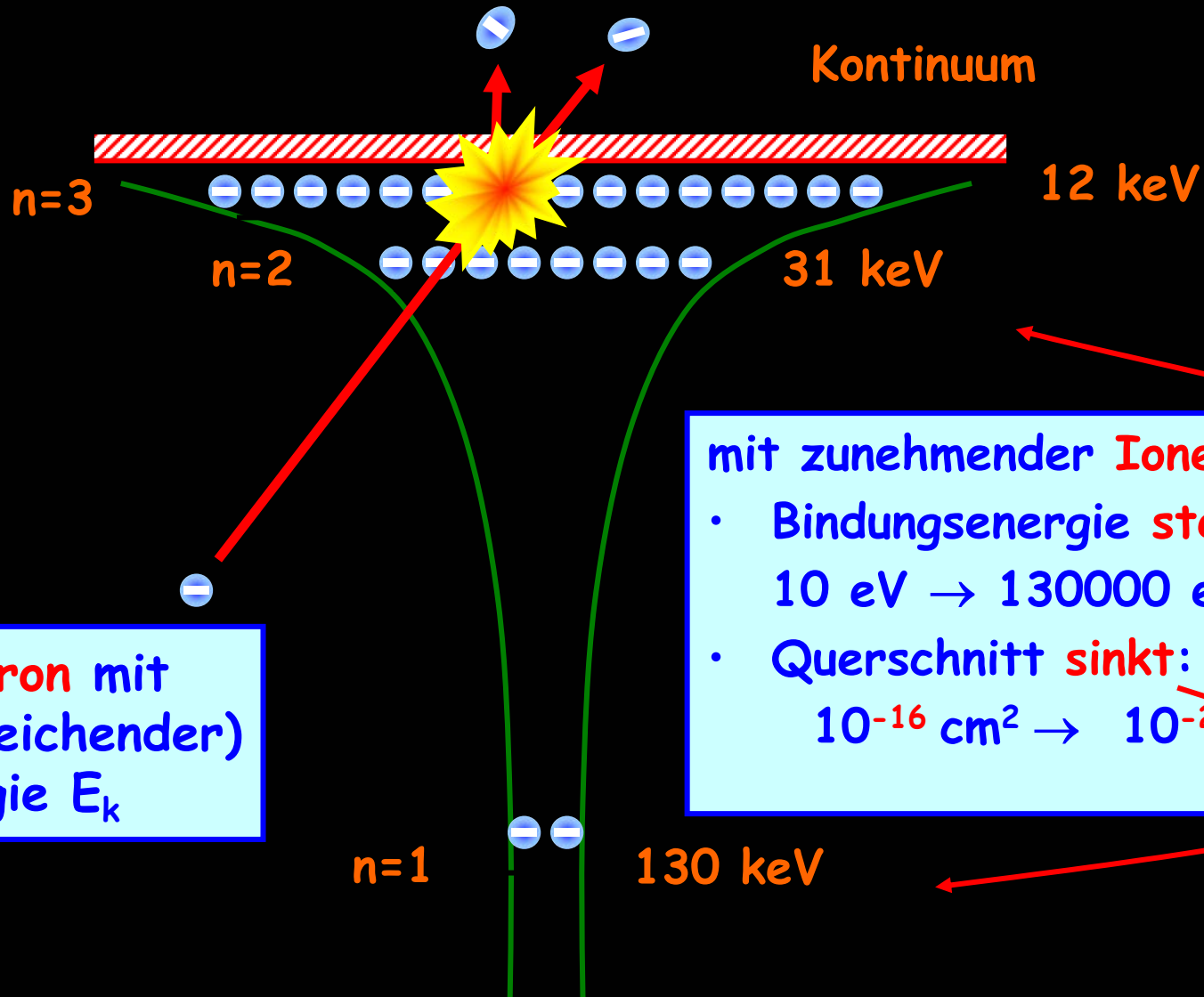


Wie erzeugt man  
hochgeladene Ionen  
auf der Erde  
im Labor?

Ionenquellen  
EBIT, EBIS, EZR

- Große Laser
- Atombomben

# Sequentielle Ionisation durch Elektronenstoß



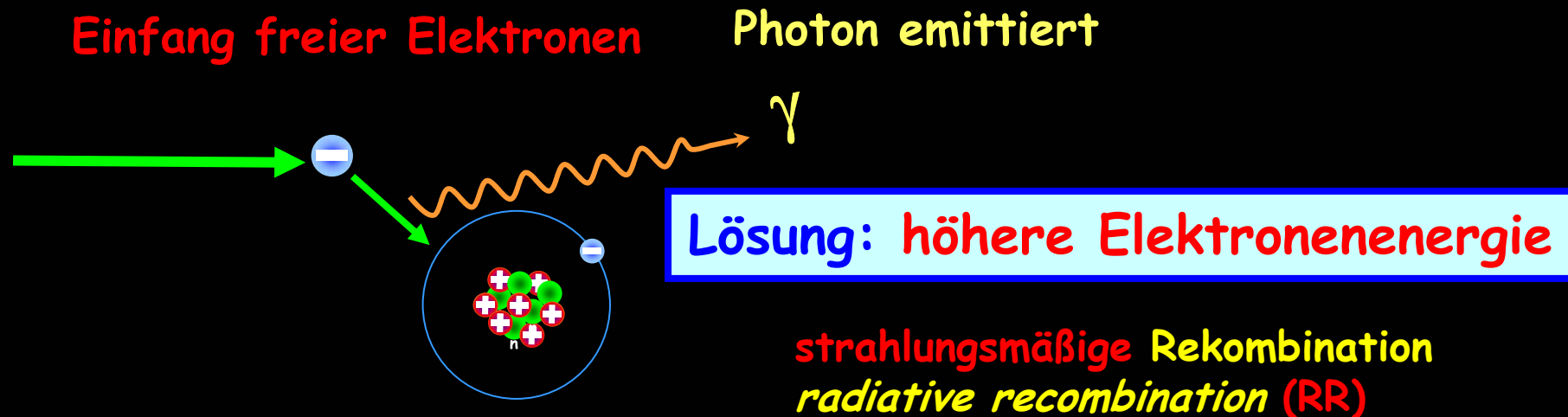
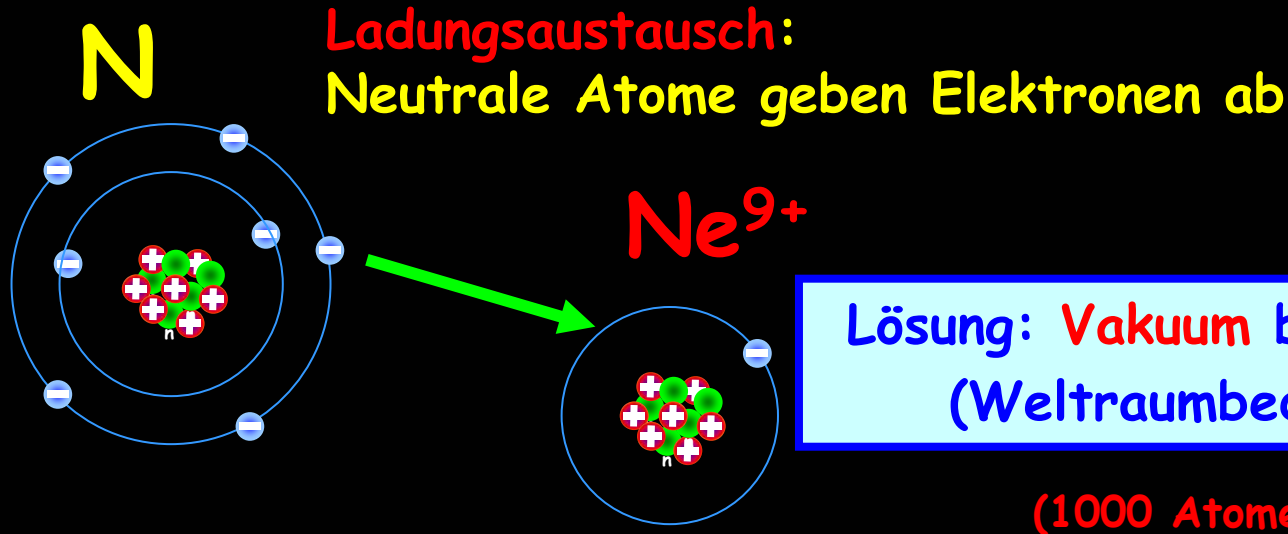
Elektron mit  
(ausreichender)  
Energie  $E_k$

mit zunehmender Ionenladung:

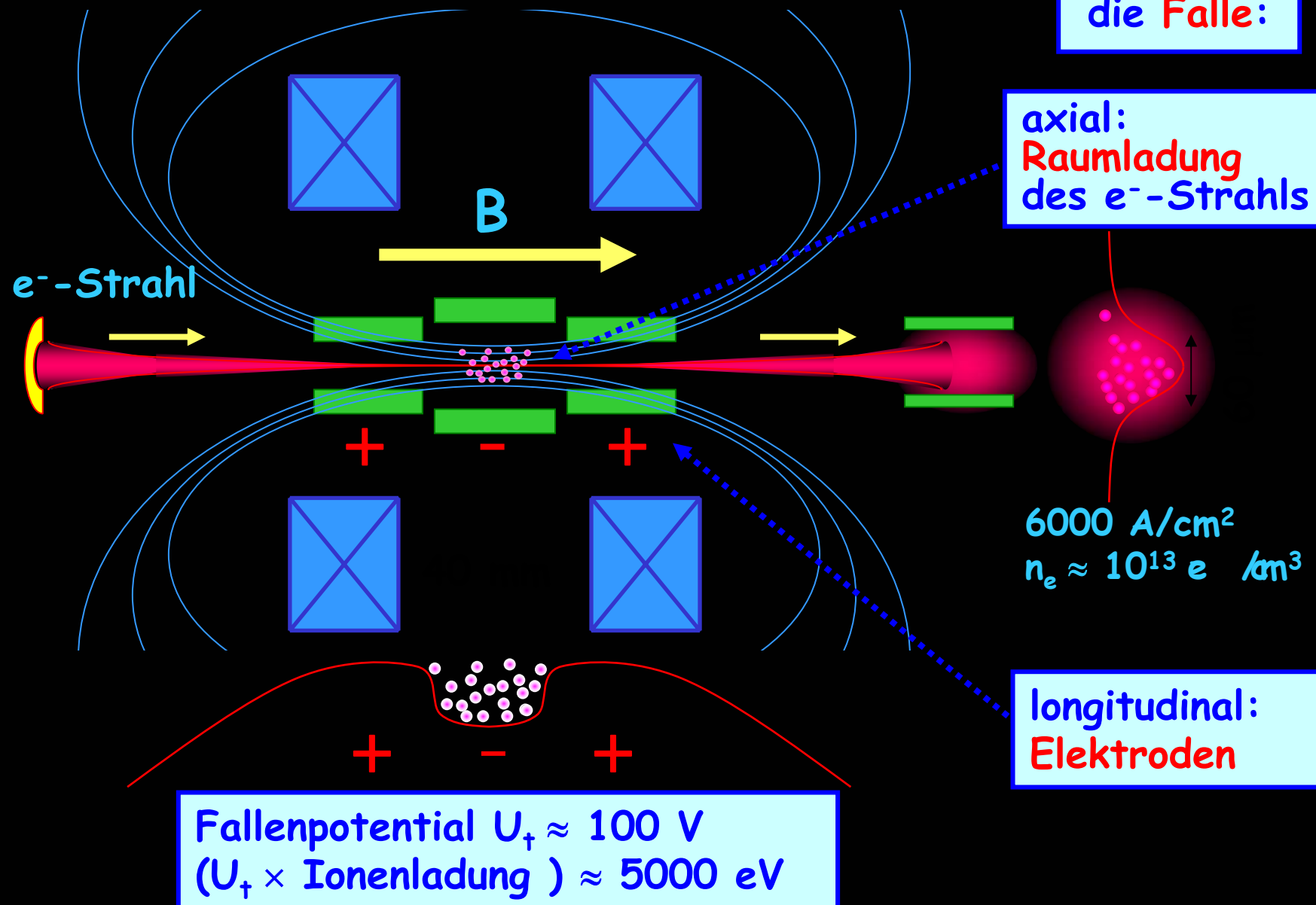
- Bindungsenergie steigt:  
 $10 \text{ eV} \rightarrow 130000 \text{ eV}$
- Querschnitt sinkt:  
 $10^{-16} \text{ cm}^2 \rightarrow 10^{-24} \text{ cm}^2$



# Konkurrenzprozeß: Rekombination



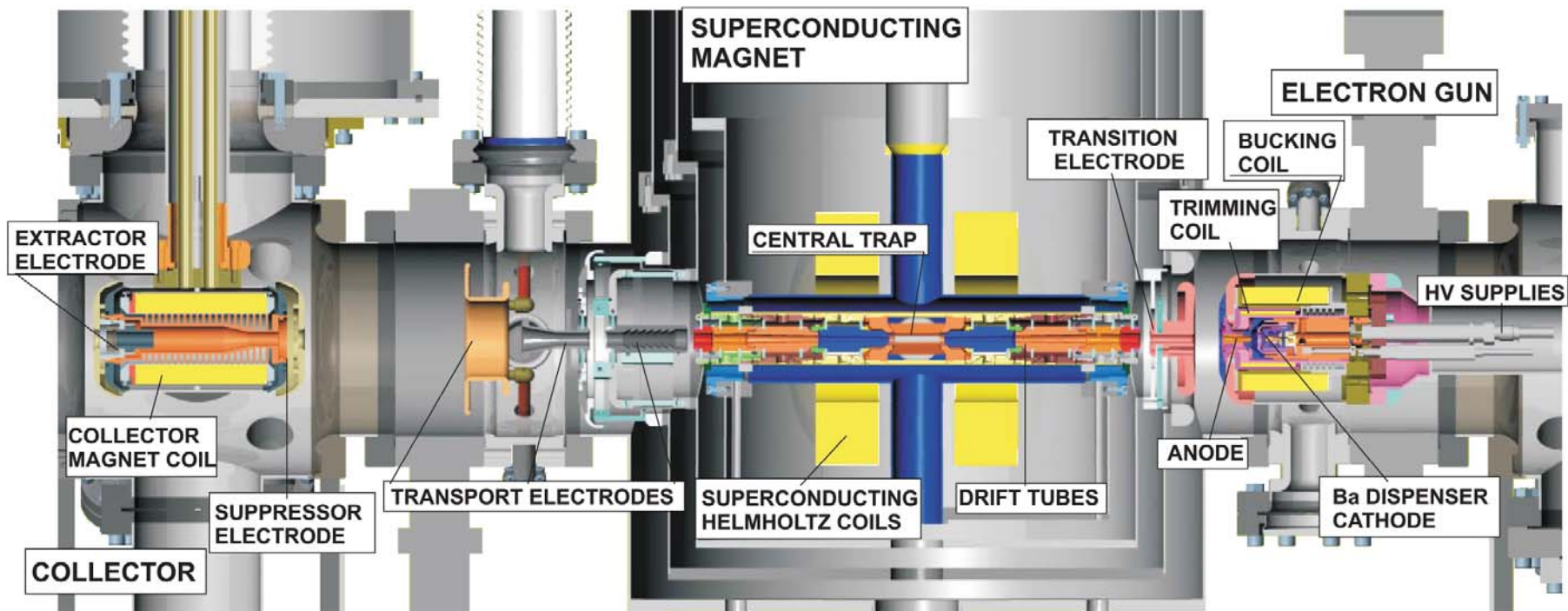
# EBIT (*e*lectron *b*eam *i*on *t*rap)



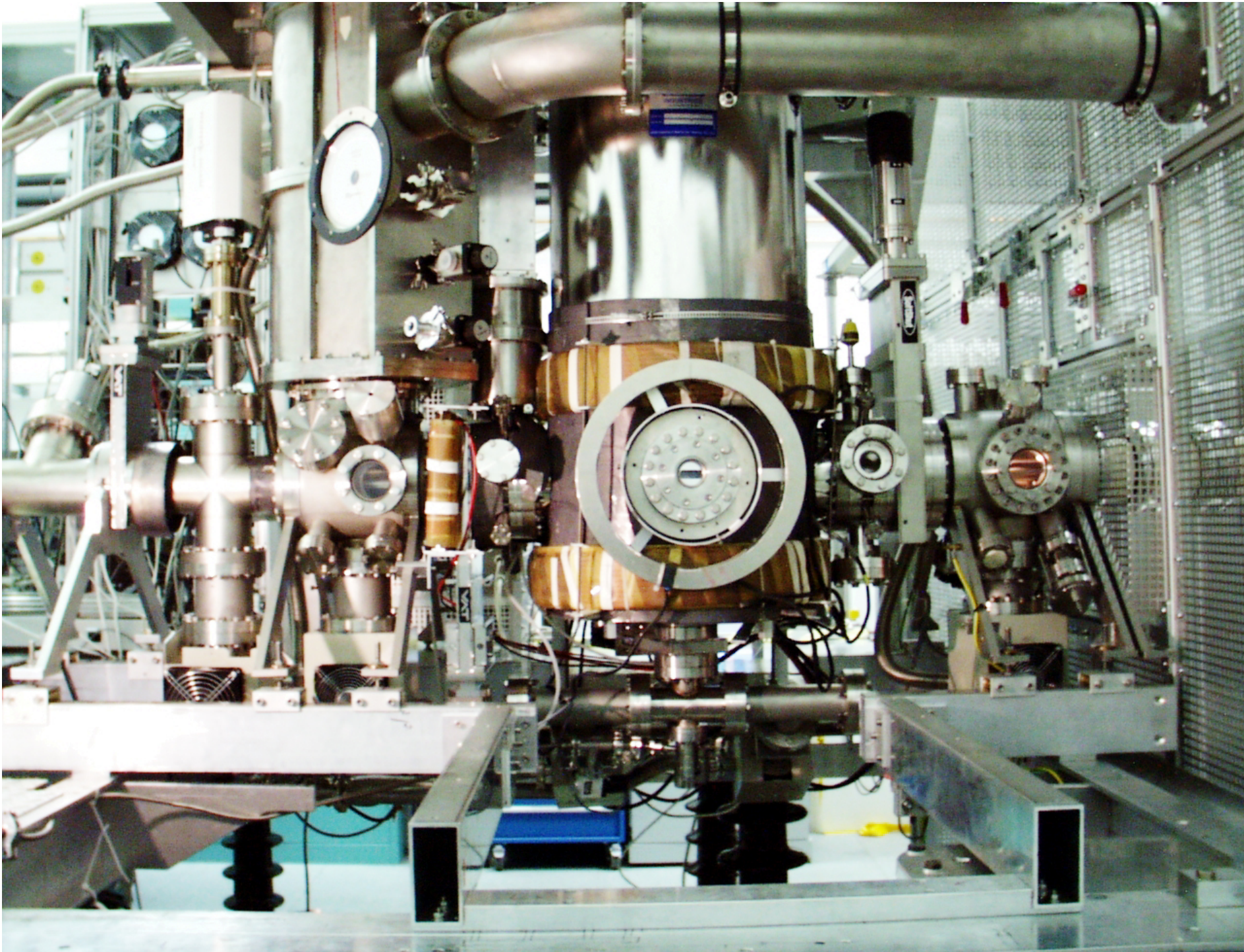
The original and first Livermore  
**EBIT** (Levine & Marrs 1986)



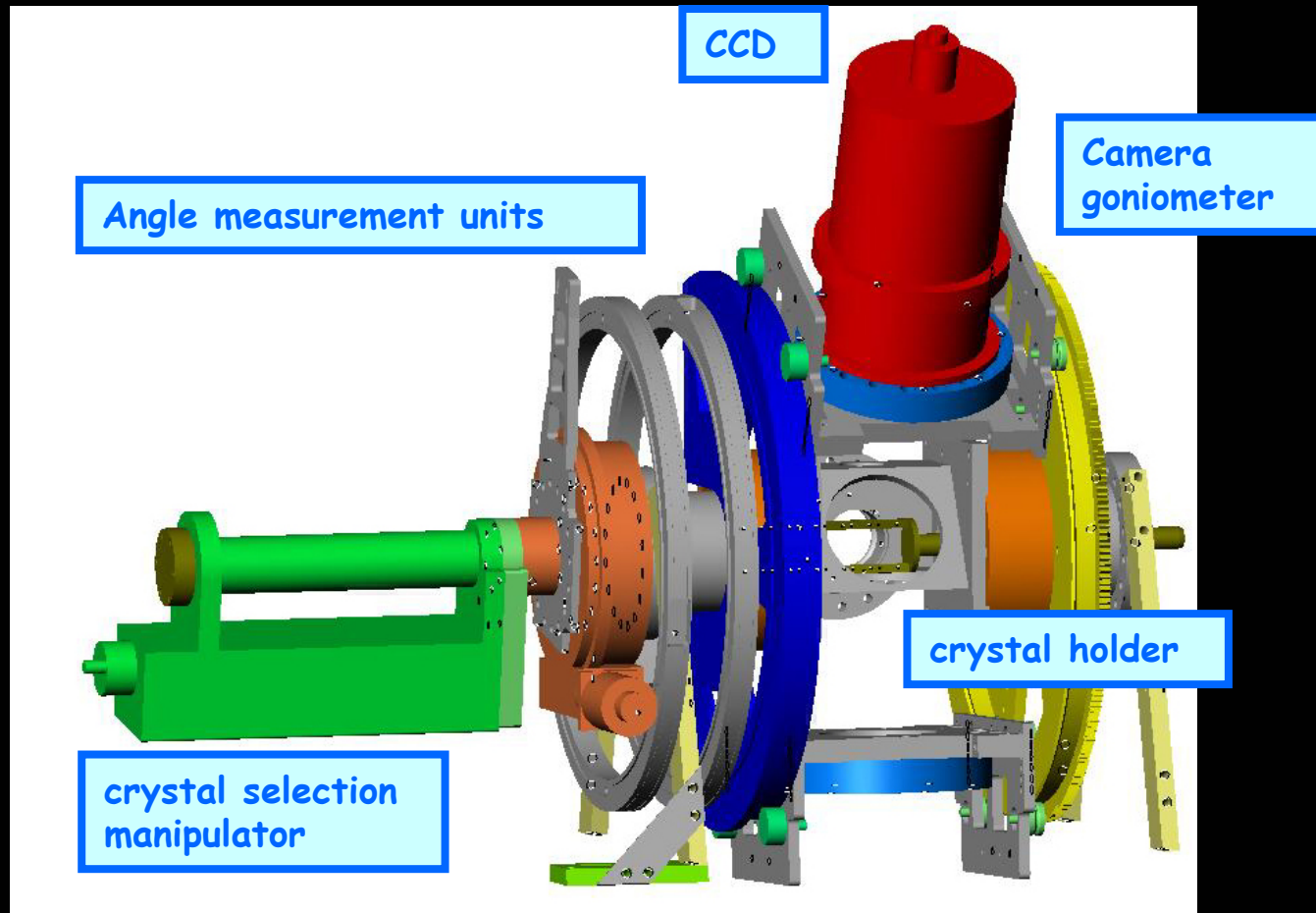
plus ein paar neue Ideen...





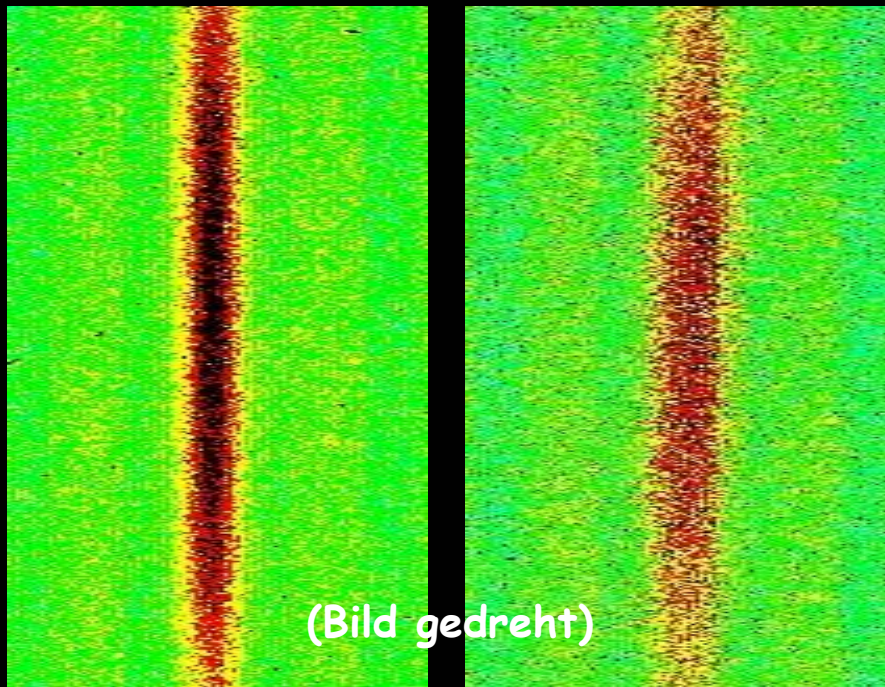


Verschiedene Instrumente (Spektrometer) werden gebaut, um gute Auflösung und extreme Empfindlichkeit zu erreichen

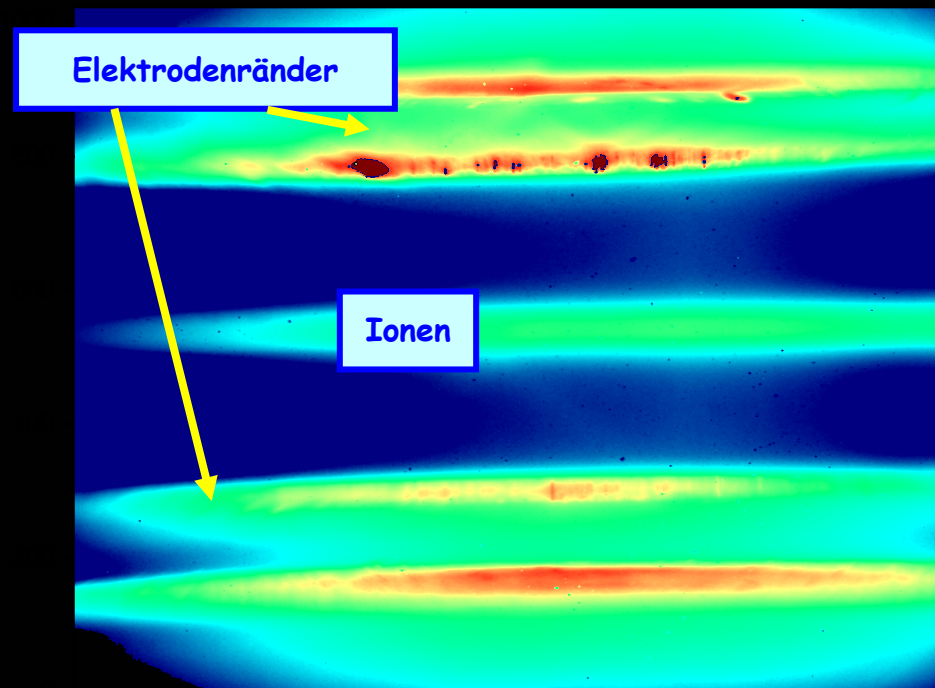


# Bilder der gefangenen Ionen

Links,  $\text{Ar}^{13+}$  ; rechts  $\text{Ar}^{9+}$ .  
Die Ionenwolke hat um die  
0.3 mm Durchmesser.

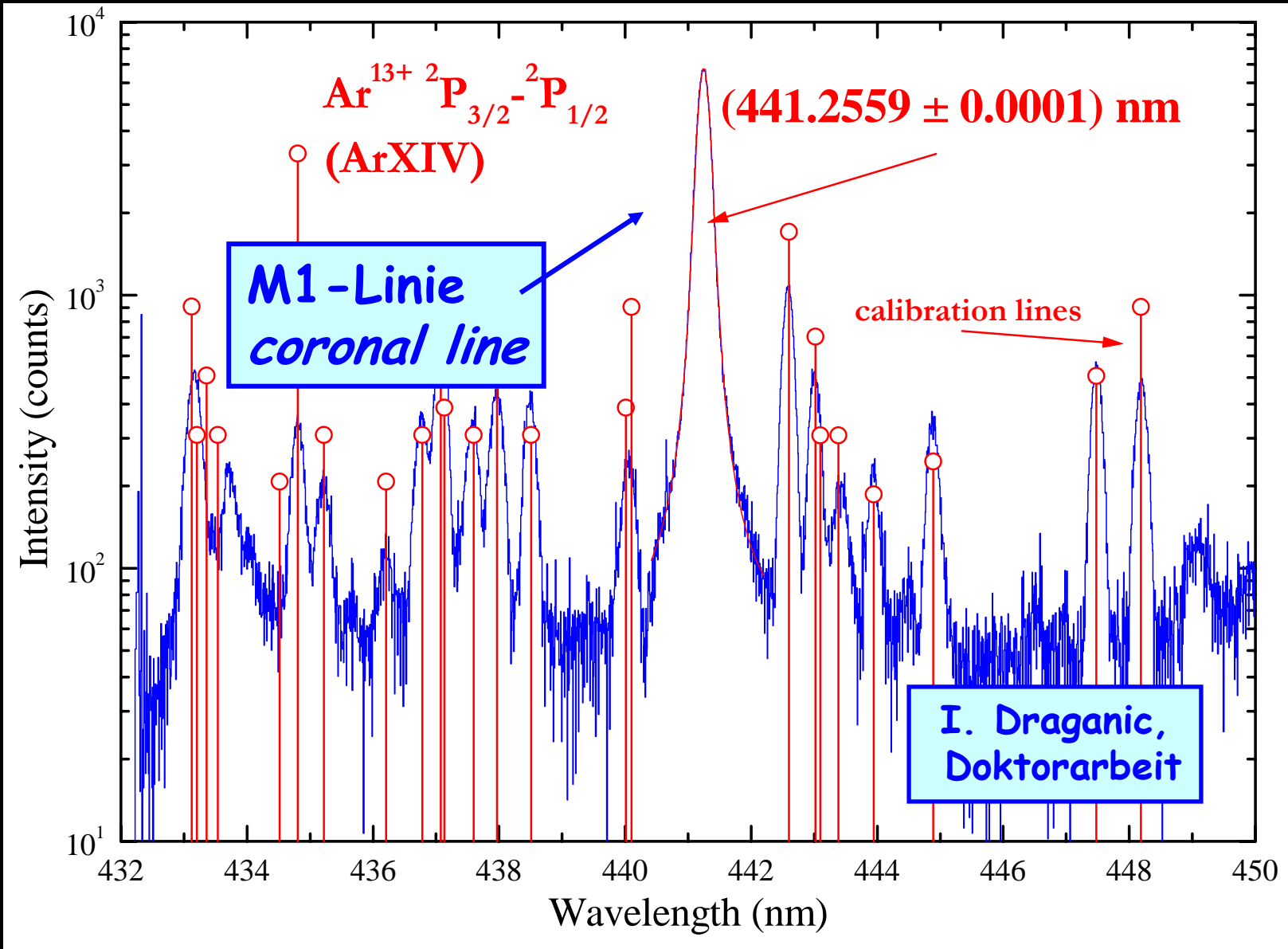


ohne das Bild zu drehen





**Verbotene Linien sind für hochgeladene Ionen typisch.**



mit der man die **Physik der hochgeladenen Ionen** ganz ohne Raumanzug erforschen kann...

### Experimente an der Heidelberg EBIT:

- Spektroskopie im **Röntgen** (Johannes, Hjalmar)
- Spektroskopie im **Sichtbaren** (Rosario)
- **Lasieranregung**, Lebensdauer (Günter, Alain)
- Dielektronische, radiative **Rekombination** (Antonio)
- **Ionenextraktion und Ladungsbrüten** (Vladimir, Günther, Chris)
- **Ladungsaustausch** mit Reaktionsmikroskop (Christina)

# Die Heidelberg EBIT und die EBIT-Gruppe



**RR** → Ion fangt Elektron und sendet ein Photon aus

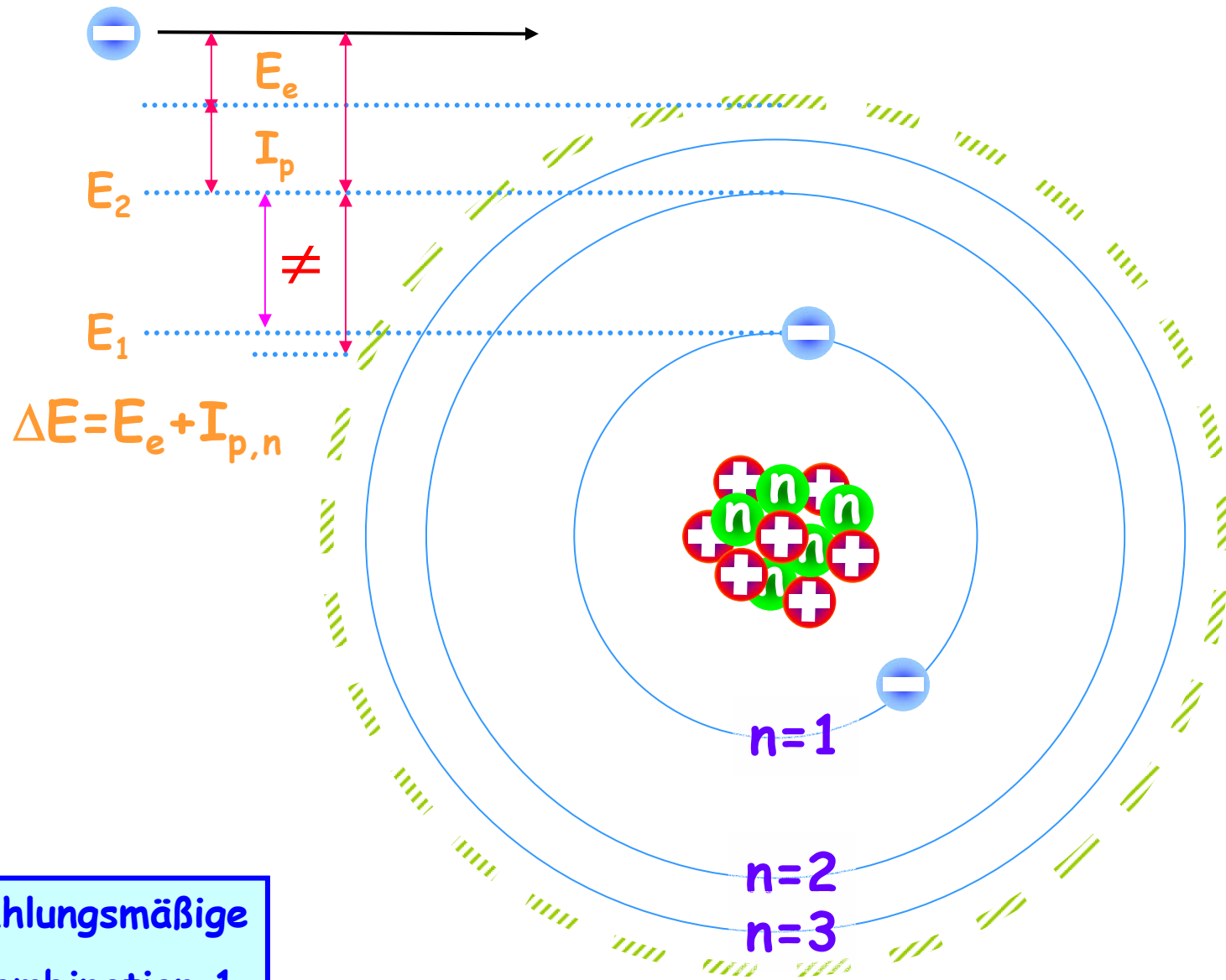
je mehr Elektronenergie:  
→ desto mehr Photonenergie  
→ durchstimmbare Strahlung

**DR** → Ion fangt Elektron und regt dabei die eigenen Elektronen an; danach wird ein Photon emittiert

Energie muß genauen Wert treffen!  
→ scharfe dielektronische Resonanzen  
→ klare Linien im Spektrum

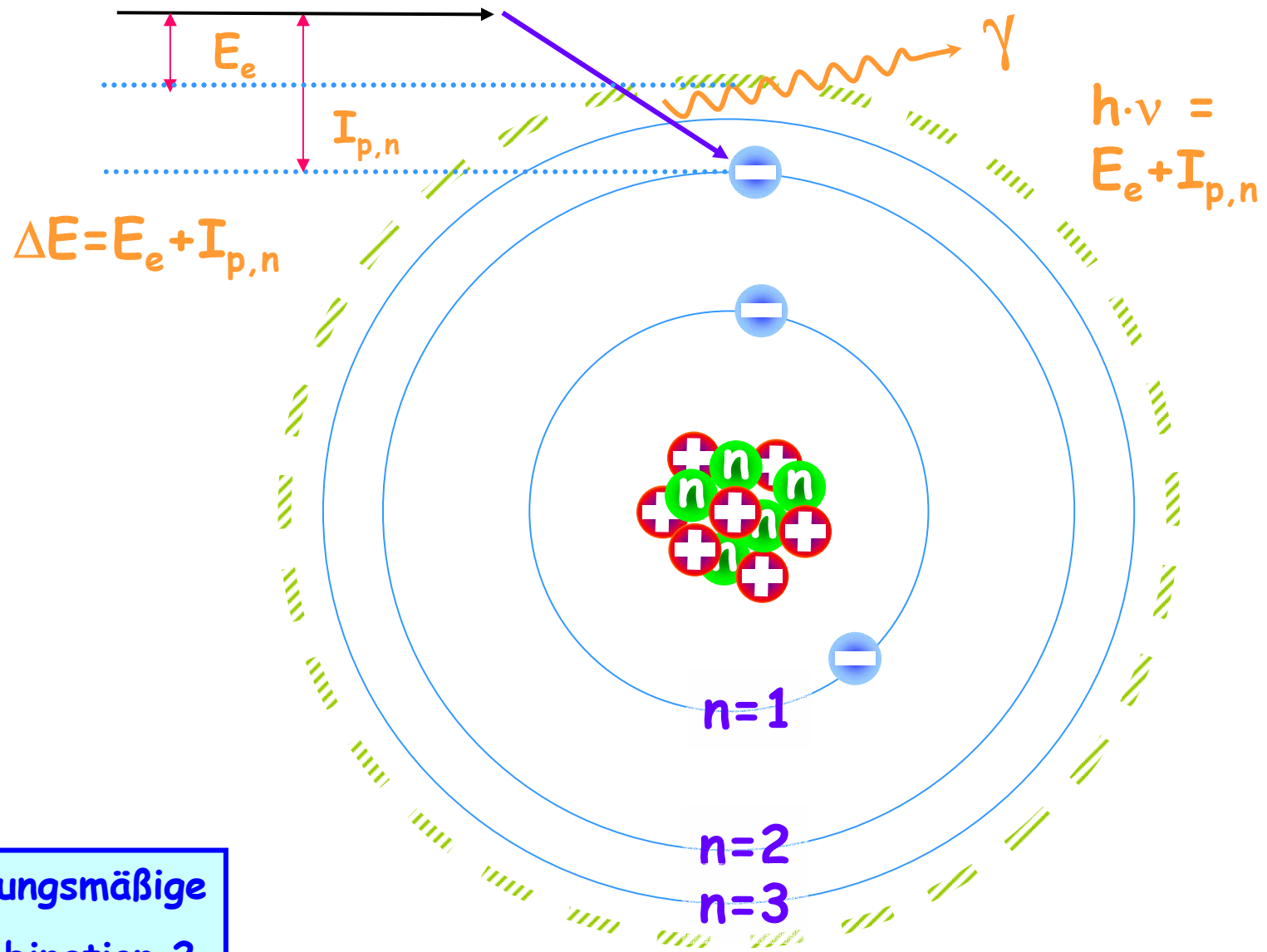
Experiment:  
• Verändern Elektronenergie (x-Achse)  
• Messen Photonenergie (y-Achse)

# 1. Freies Elektron und He-artiges Ion



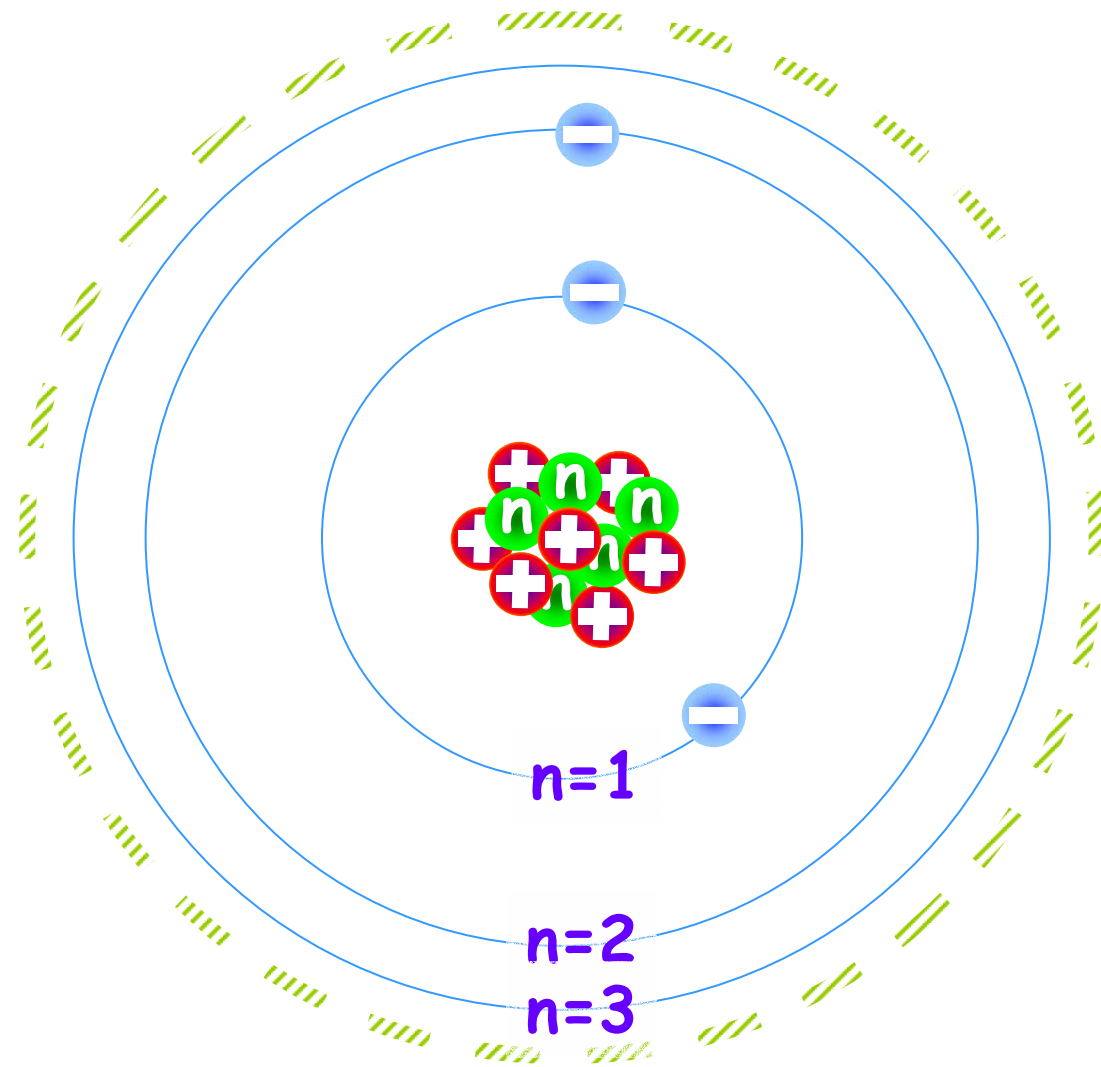
strahlungsmäßige  
Rekombination 1

## 2. Strahlungsmäßige Rekombination



strahlungsmäßige  
Rekombination 2

### 3. Ion im Grundzustand

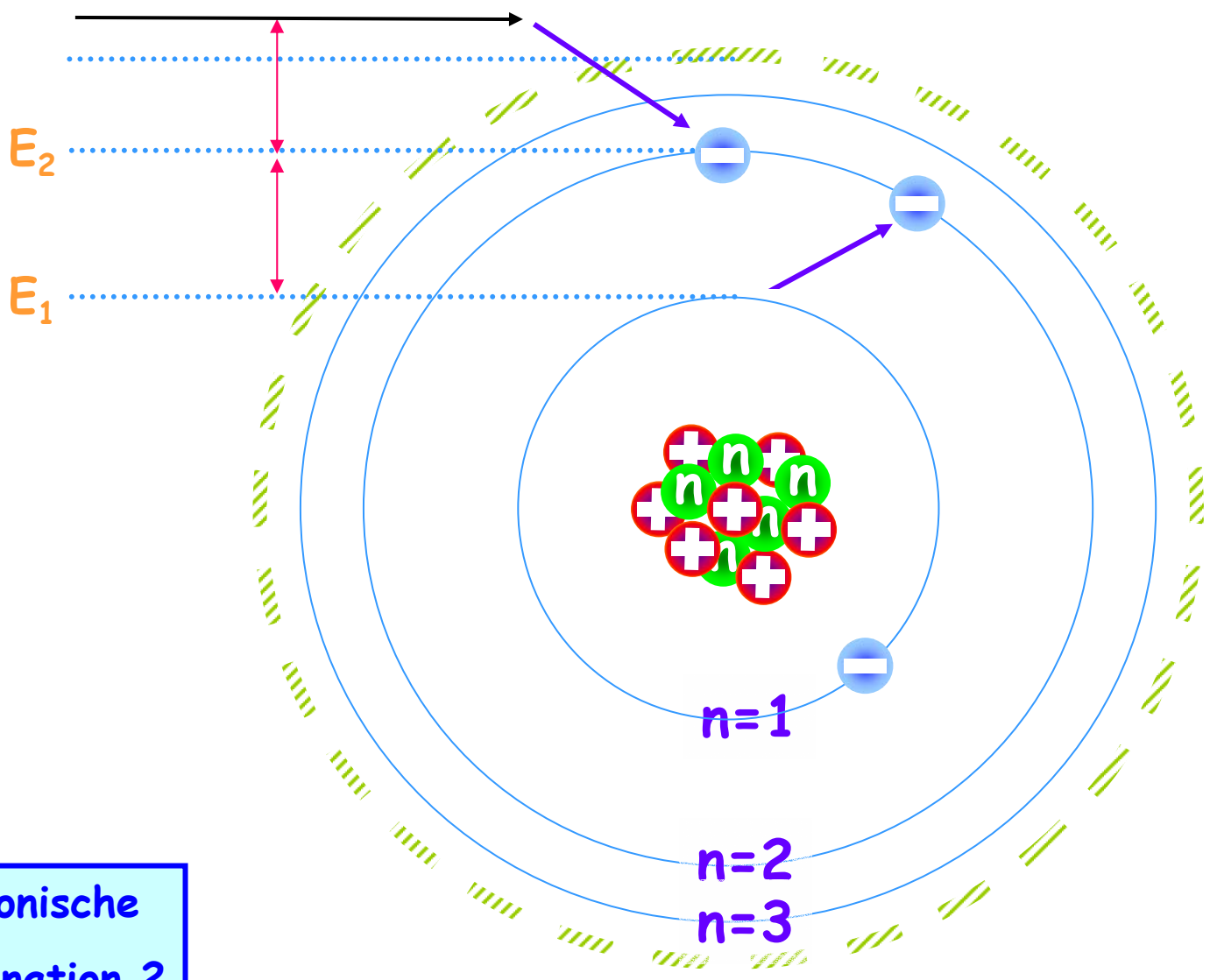


strahlungsmäßige  
Rekombination 3



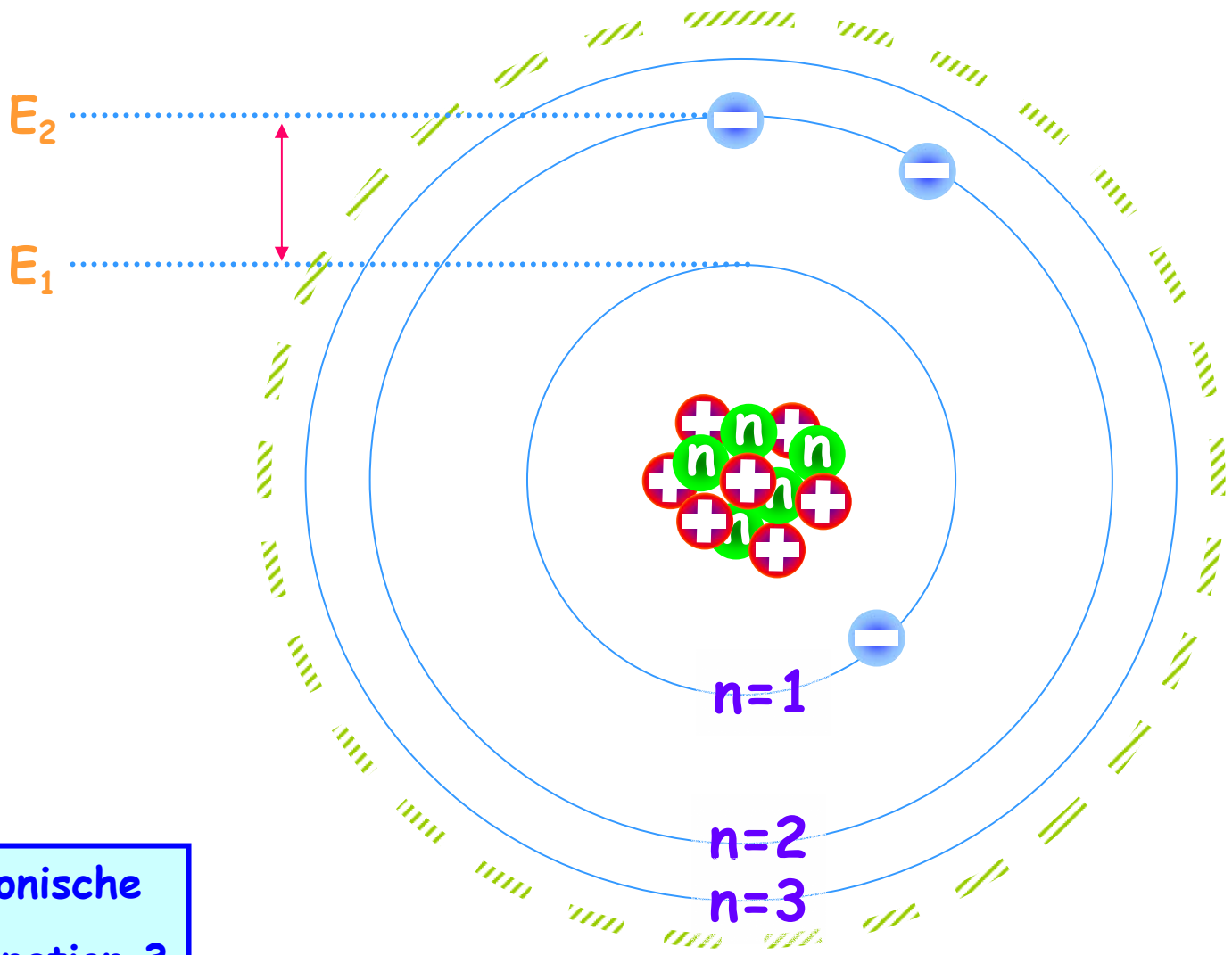


## 2. Dielektronische Rekombination



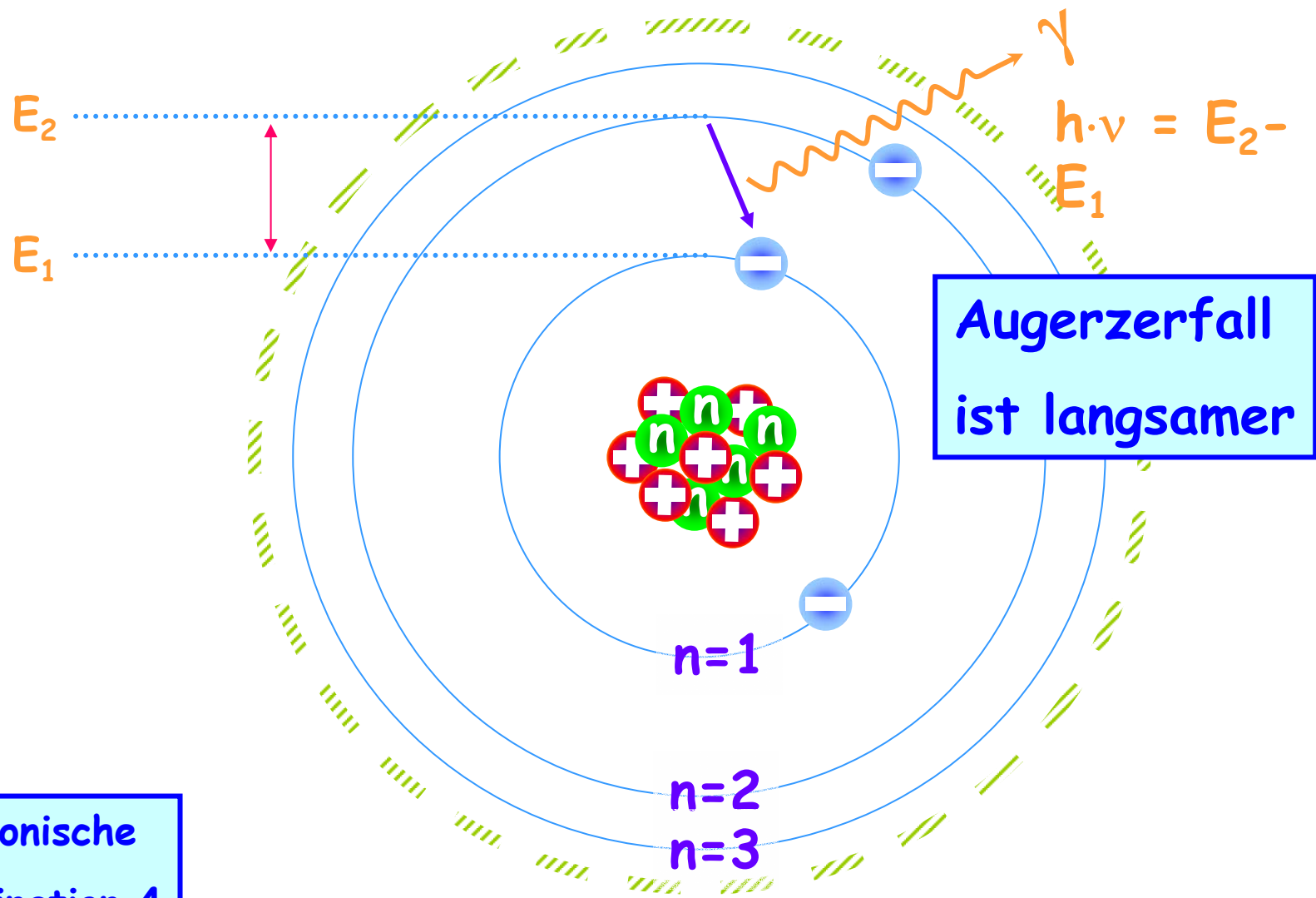
dielektronische  
Rekombination 2

### 3. Zweifach angeregtes Ion



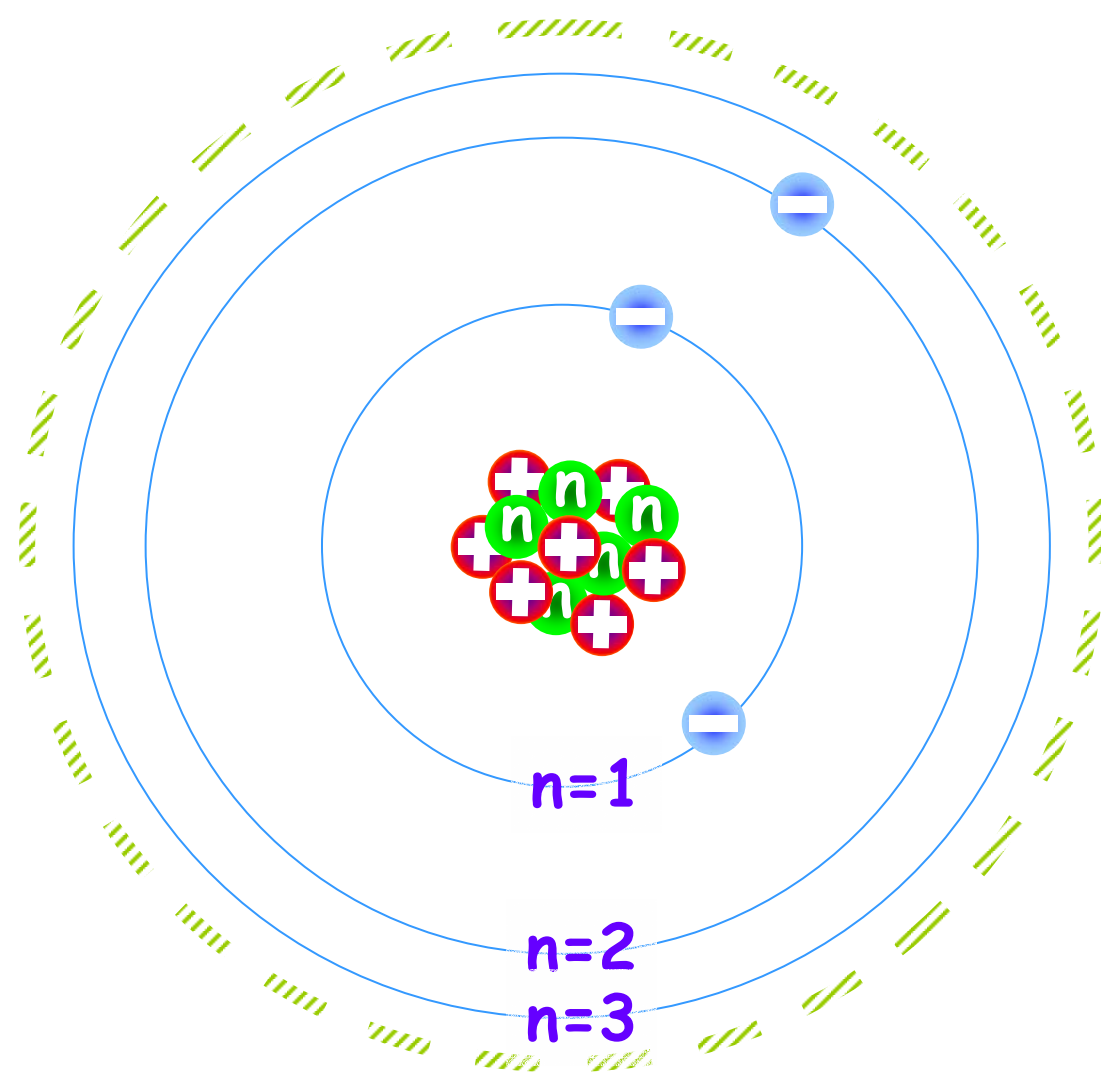
dielektronische  
Rekombination 3

# 4. Abregung durch Photoemission

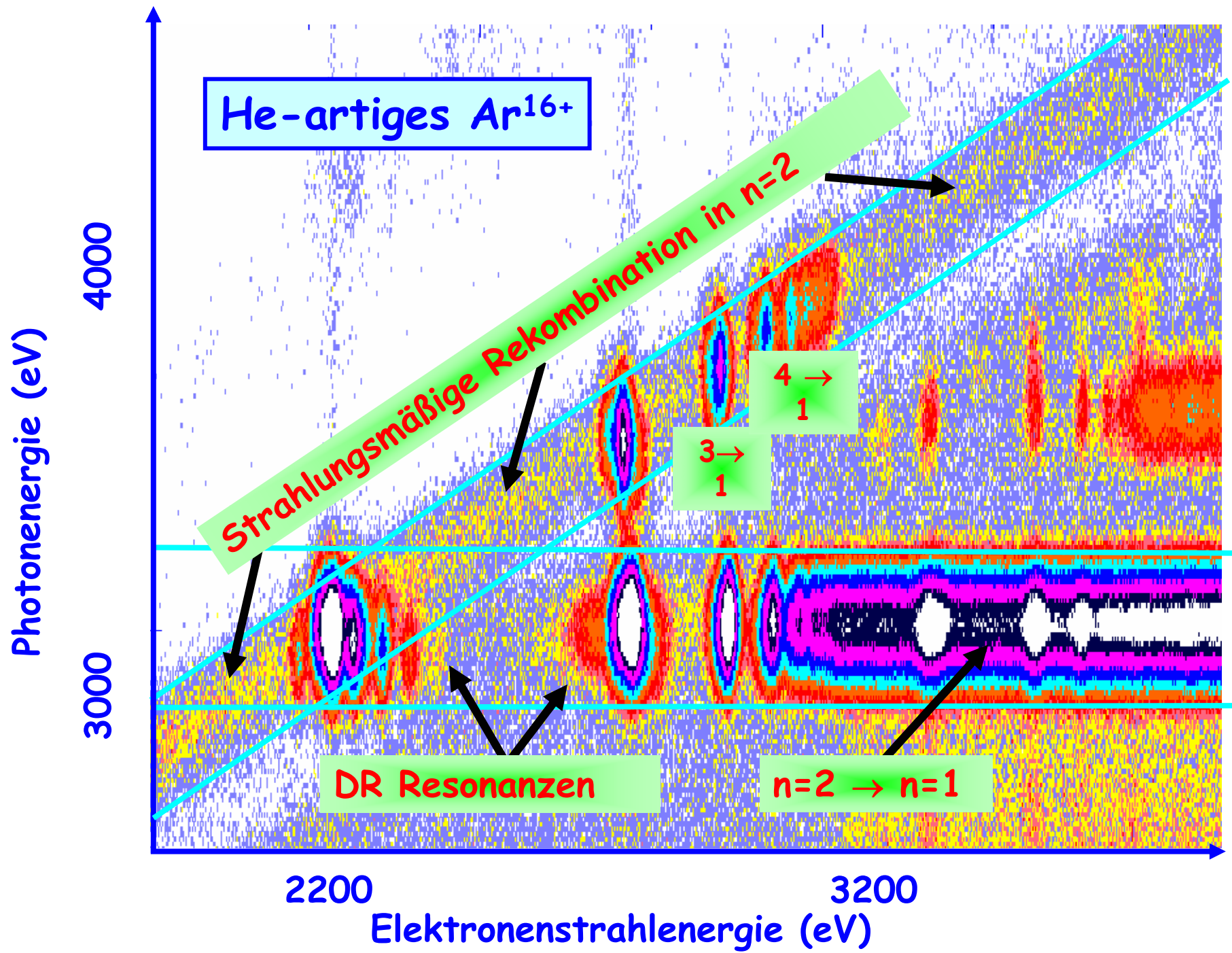


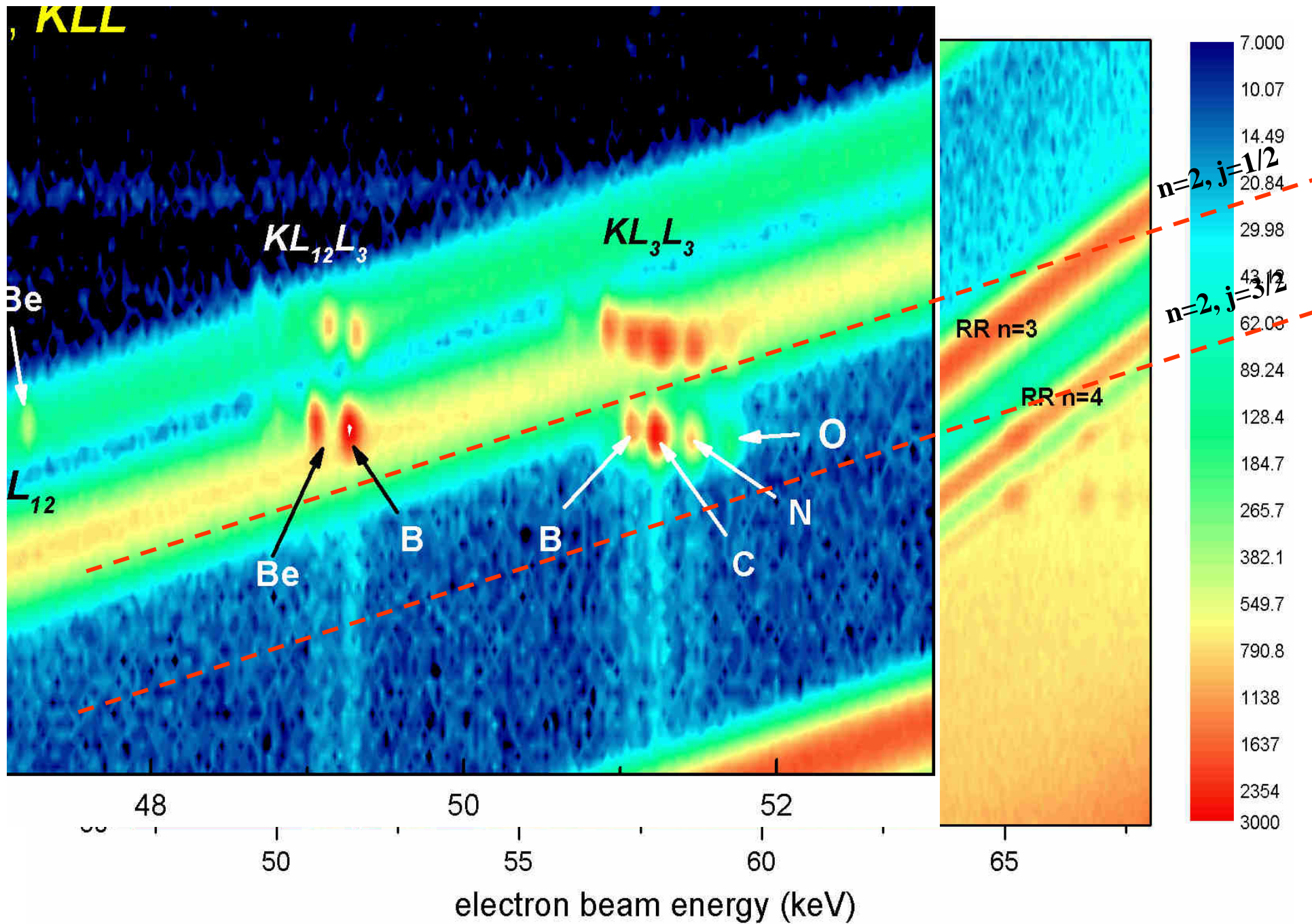
dielektronische  
Rekombination 4

# 5. Ion im Grundzustand

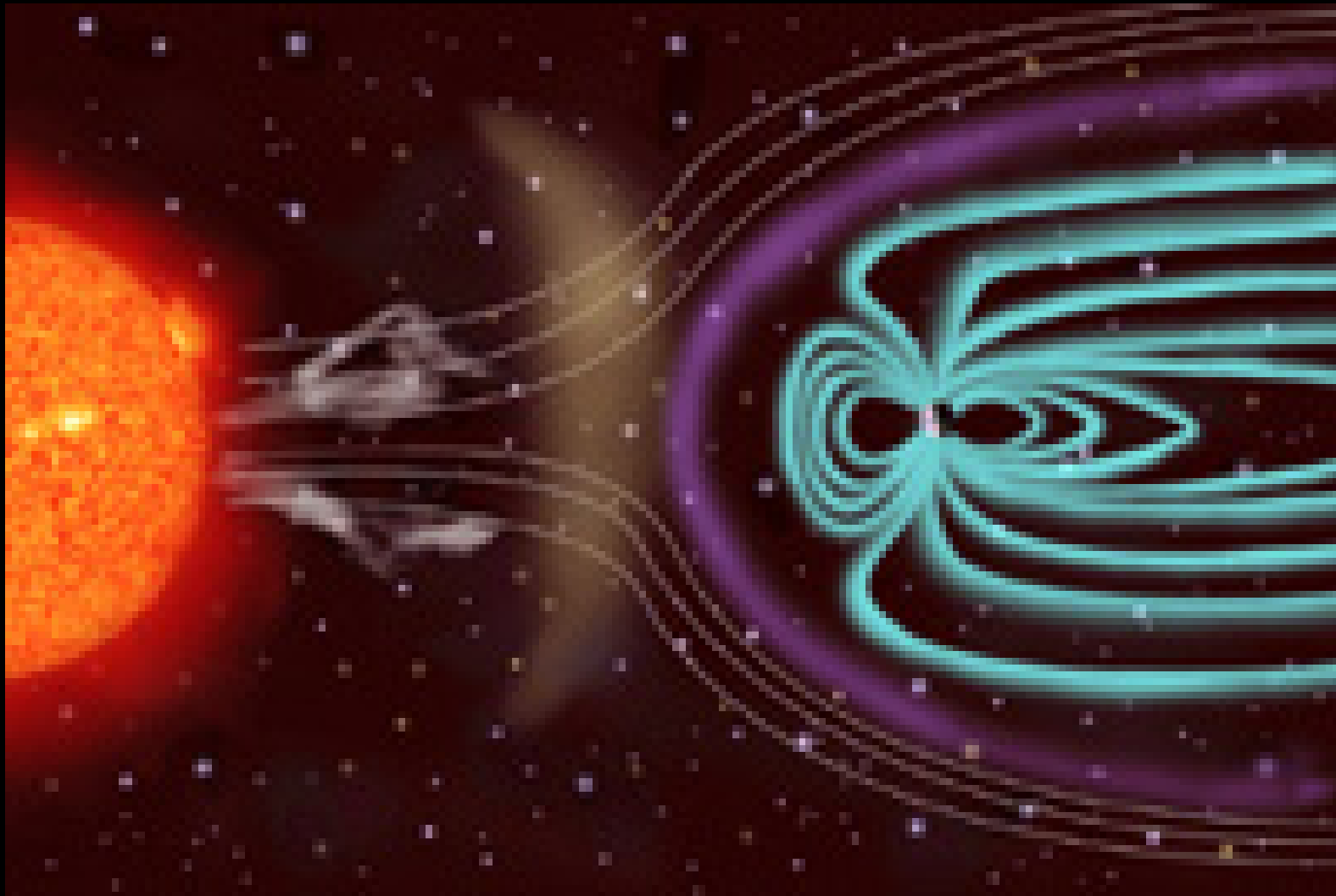


dielektronische  
Rekombination 5

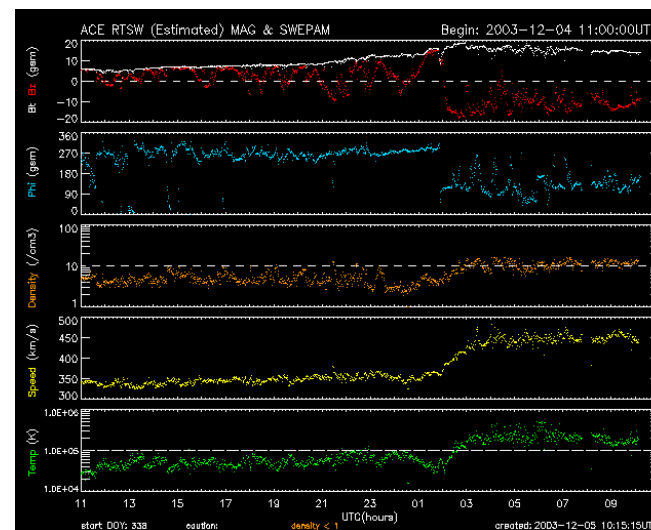
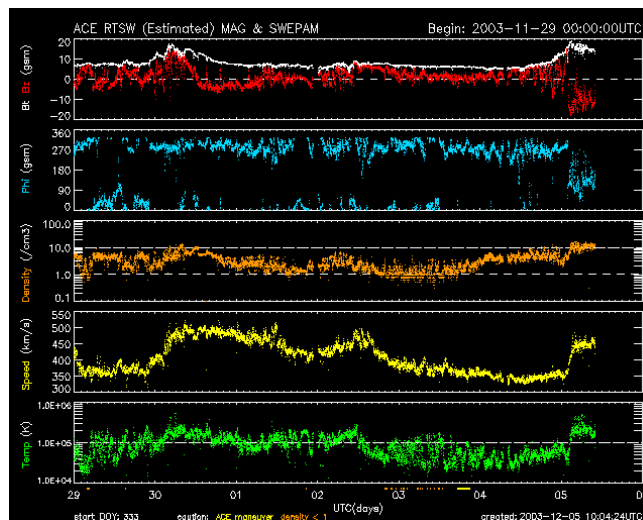
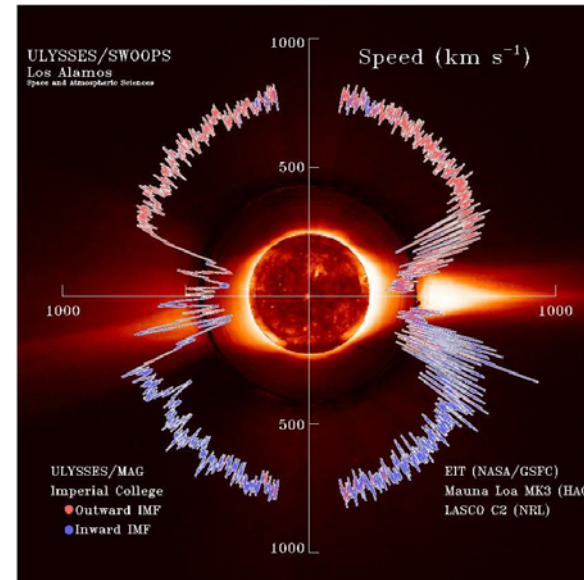




Aus der Sonne entweichen dauernd Ionen, man spricht von **Sonnenwind**. Das Magnetfeld der Erde lenkt es um die Erde herum.



Der Sonnenwind ist abhängig von der Fleckenaktivität und wird dauernd beobachtet, da es u. A. Satelliten und Funkverkehr stark stören kann.

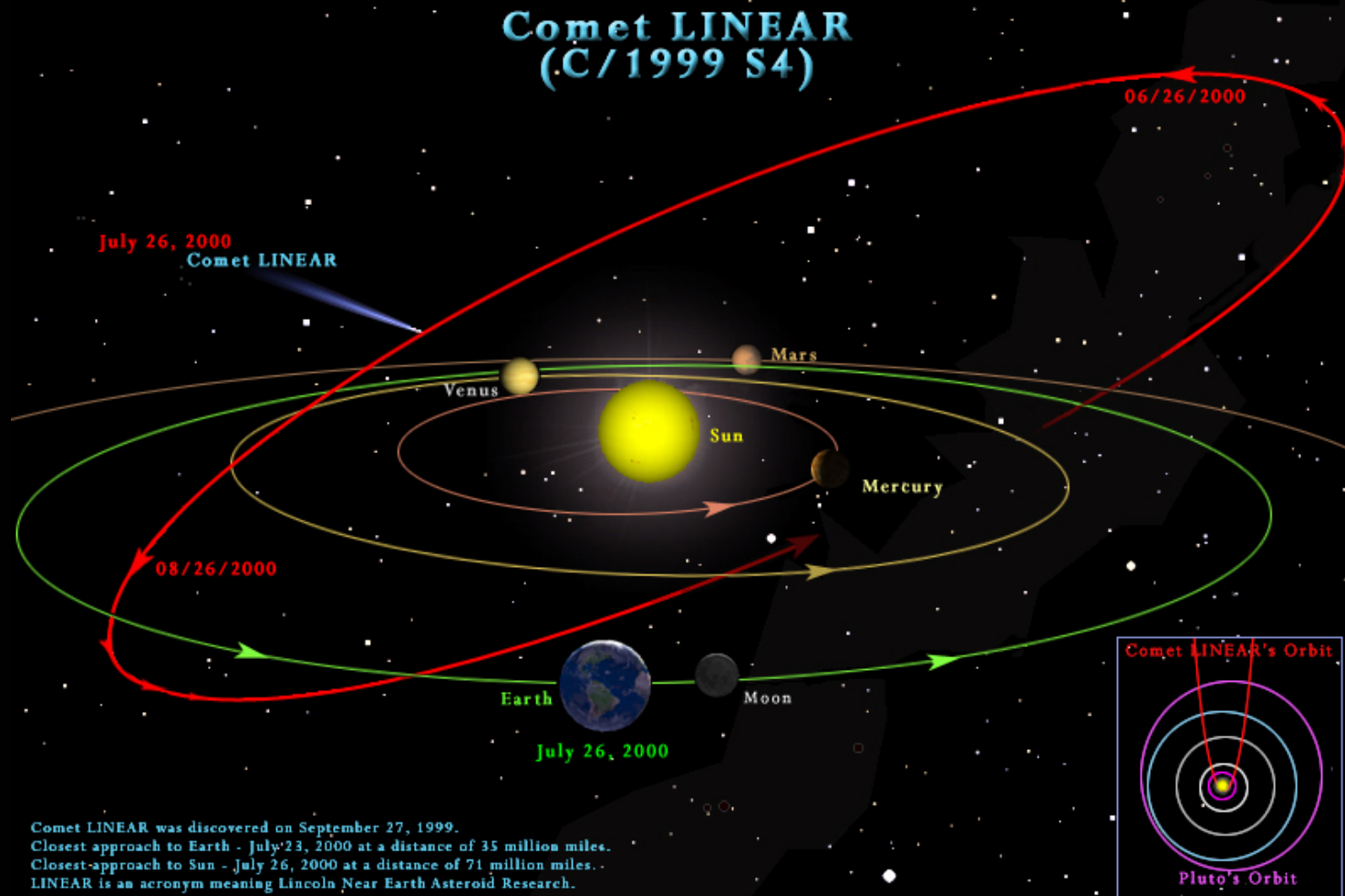




Der Sonnenwind ist die Ursache der Nordlichter auf der Erde und anderen Planeten.



Der Sonnenwind reicht bis über die Grenzen des Sonnensystems.  
Wenn es auf einem Kometen trifft, nehmen sich die Ionen  
**Elektronen** aus dem neutralen kalten Schweifgasen, rekombinieren  
und erzeugen dabei **Röntgenstrahlung (Ladungsaustausch)**.



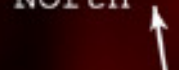
Direction of Motion



x

Nucleus

North



East



To Sun

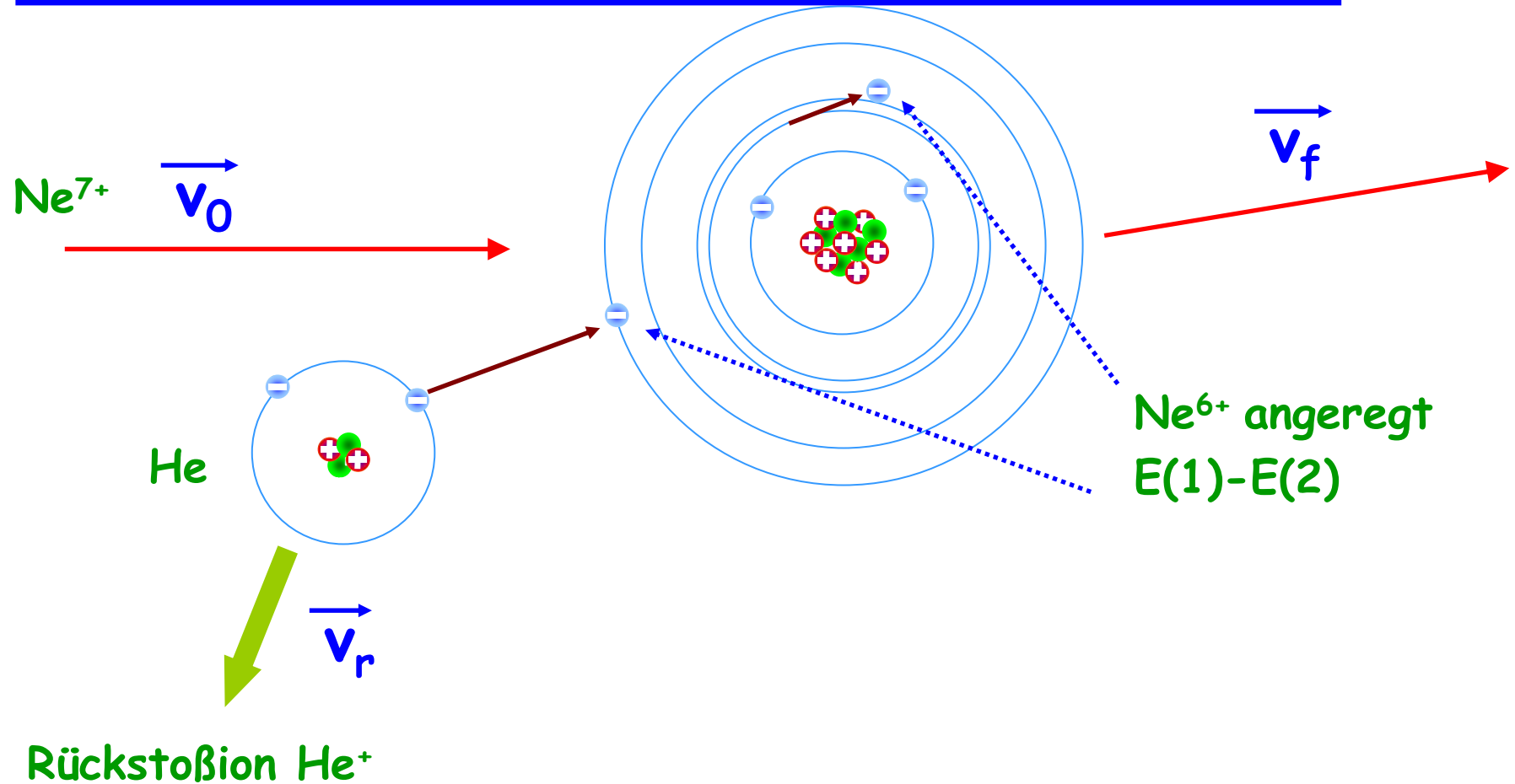


*Röntgenstrahlen vom Kometen  
C/1999 S4 (LINEAR).*

Am 14ten Juli 2000, Chandra  
nahm Bilder vom Kometen und  
detektierte **Röntgenstrahlen** von  
hochgeladenen Sauerstoff- und  
Stickstoffionen

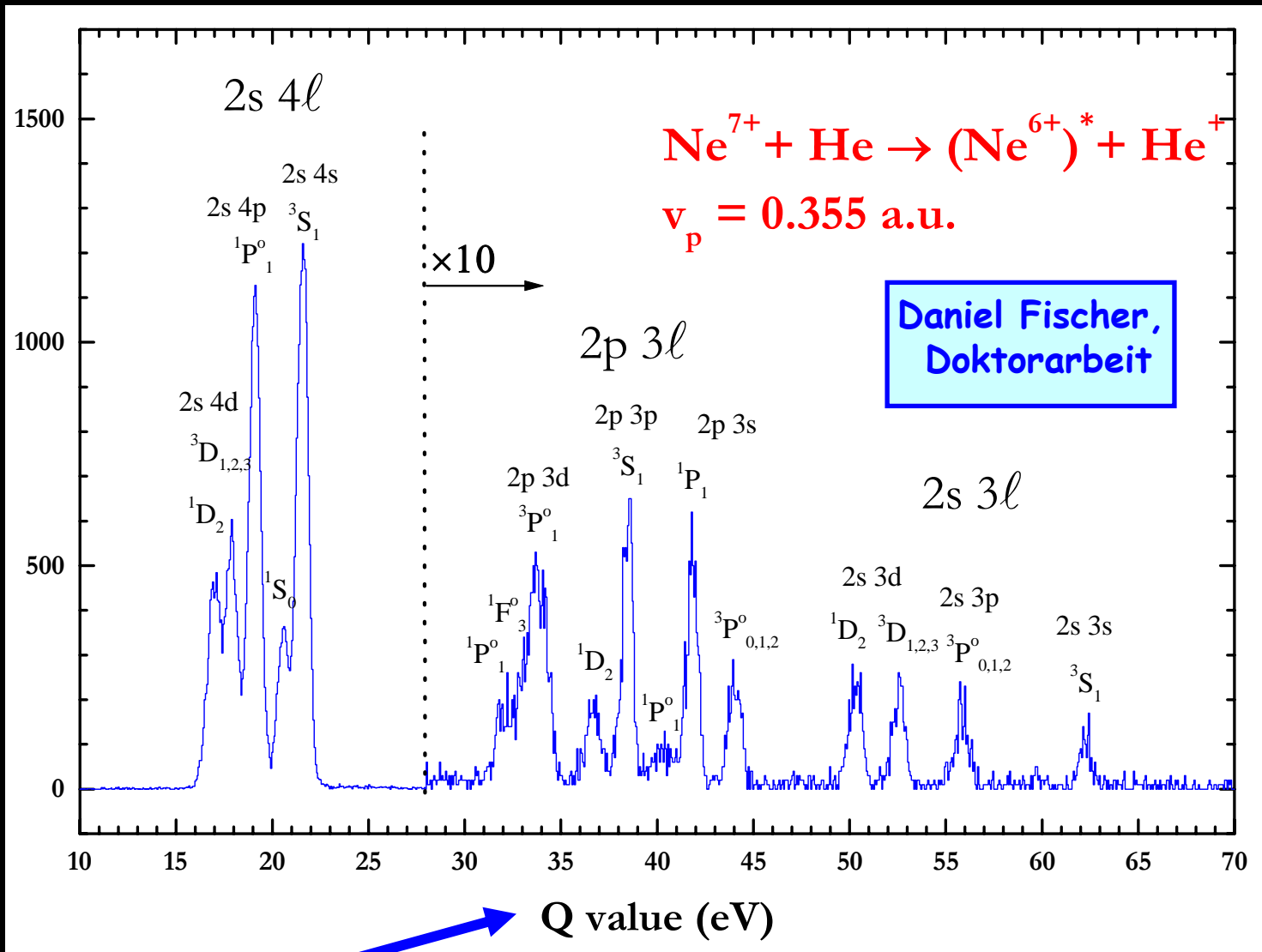
Endzustand des Elektrons ist von der  
Geschwindigkeit  $v$  abhängig:

→ **Sonnenwind-Geschwindigkeit** in Randbereichen  
des Sonnensystems



Wir machen diese Stöße im Labor nach:

- Ein sehr kalten Strahl von Heliumatomen (Komet) wird von einem Ionenstrahl (Sonnenwind) getroffen.
- Die He-Atome geben Elektronen ab, werden dabei ionisiert und vom Projektil zur Seite abgestossen (Rückstoßion).
- Wir messen die Richtungen und Geschwindigkeit sowohl vom Projektil als auch vom Rückstoßion.
- Daraus kann man auf die ausgetauschte Energie und auf die Endzustände der Anregung schließen



Q-Wert: Energietransfer in die Elektronenhülle des Projektils während des Stoßes.

## Kurzgefaßt:

- Heiße Plasmen sind für den **Energie- und Materiehaushalt** des Weltalls wesentlich. Dort spielen **hochgeladene Ionen** eine zentrale Funktion.
- **Spektrale** Beobachtungen erlauben eine **Diagnostik** der Plasmaeigenschaften.
- Wichtige **Daten** müssen im **Labor** gewonnen werden, weil die man die Rechenverfahren und Modelle für die Physik dieser Systeme nicht ausreichend gut sind.

## EBIT Gruppe

Johannes Braun (Doktorand)  
Günter Brenner (Diplomand)  
Hjalmar Bruhns (Doktorand)  
Alain Lapierre (post doc)  
Antonio González Martínez (Doktorand)  
Vladimir Mironov (post doc)  
Chris Osborne (Doktorand)  
Günther Sikler (post doc)  
Rosario Soria Orts (Doktorandin)

Joachim Ullrich (Direktor)

## Besucher 2003

Vladimir Shabaev  
Ilija Tupyitsin  
Anton Artemyev

## Frühere Gruppenmitglieder

Bhas Bapat (post doc)  
Ilija Draganic (Doktorand)  
Panlin Guo (post doc)  
Xuemei Zhang (post doc)  
Andreas Werdich (Diplomand)  
Hiro Tawara (post prof)  
Michael Trinczek (post doc)

## auch beteiligt

Bob DuBois  
Bernold Feuerstein  
Daniel Fischer  
Christina Dimopoulou  
Robert Moshammer  
Yaming Zou

Unterstützt durch: HBFVG, Land BW, DFG, Leibniz-Preis, MPG