

Öffentlicher Vortrag 70 Jahre CERN
Klaus Blaum

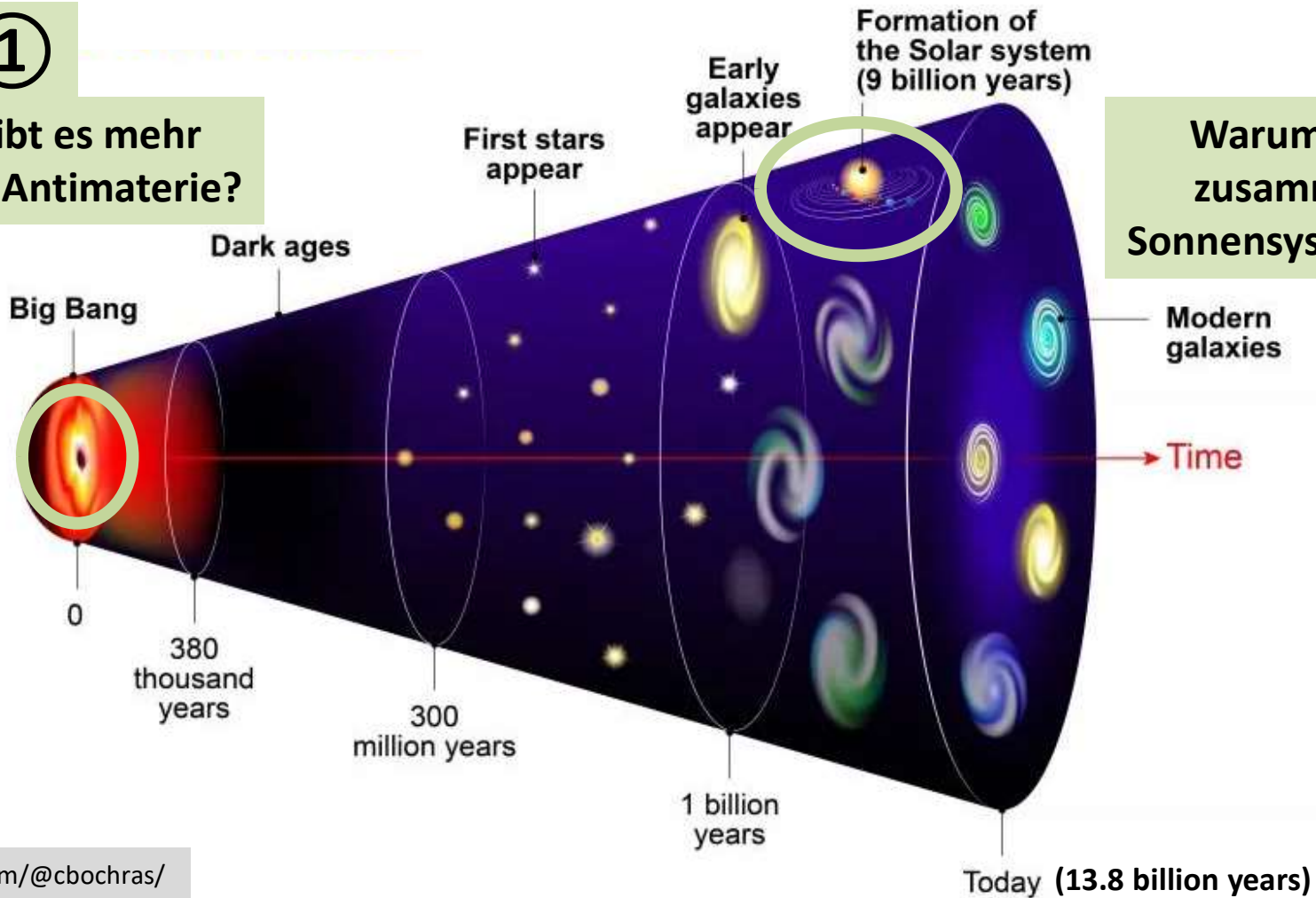
**„Exotische Materie am CERN –
Spannende Einblicke in die Entstehung der Welt“**



Die Entstehung des Universums

①

Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?



②

Warum ist die Elementzusammensetzung des Sonnensystems so, wie sie ist?

<https://medium.com/@cbochras/>



Teil 1

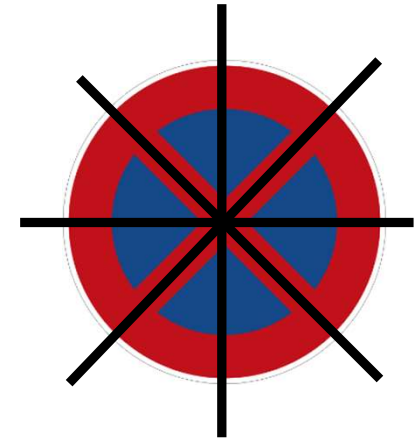
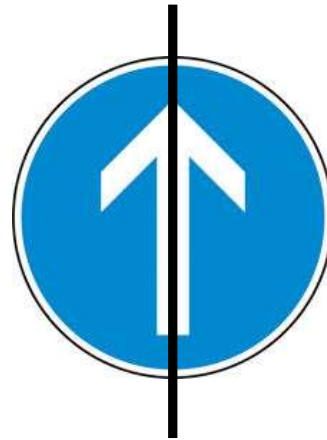
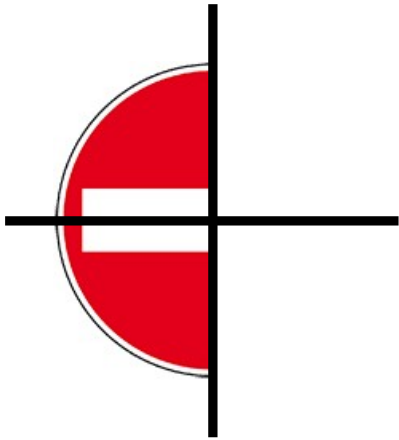


Warum gibt es mehr Materie
als Antimaterie?

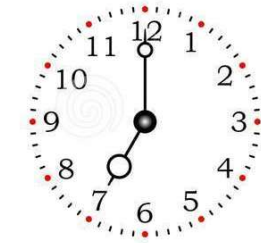
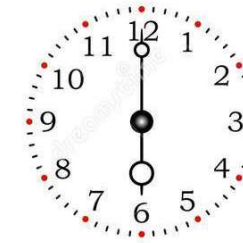
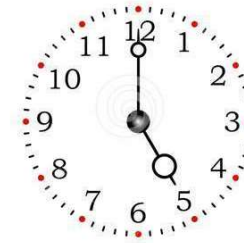
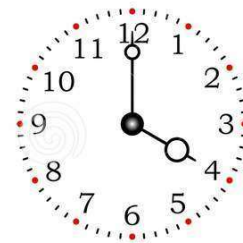
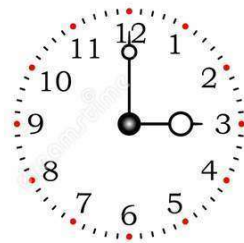
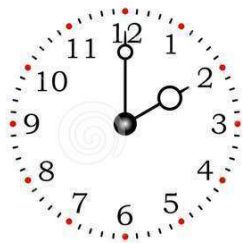


Symmetrien

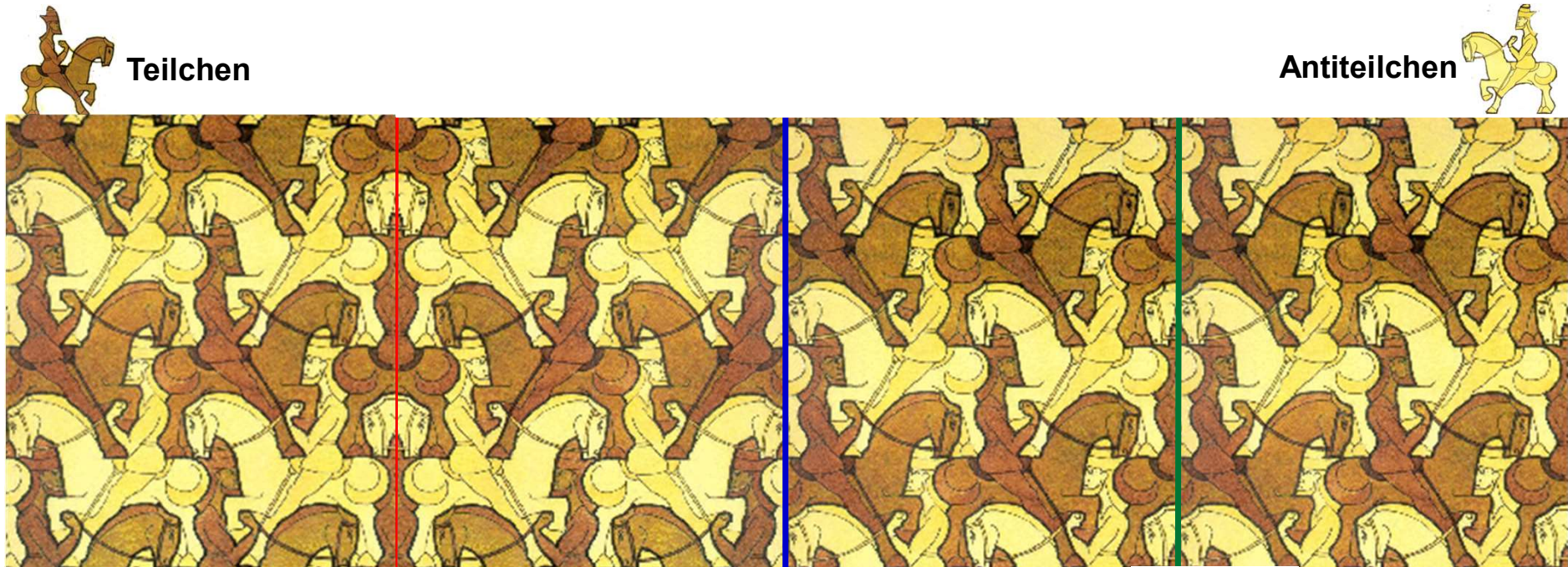
Spiegelsymmetrie



Zeitumkehr



Symmetrieoperationen



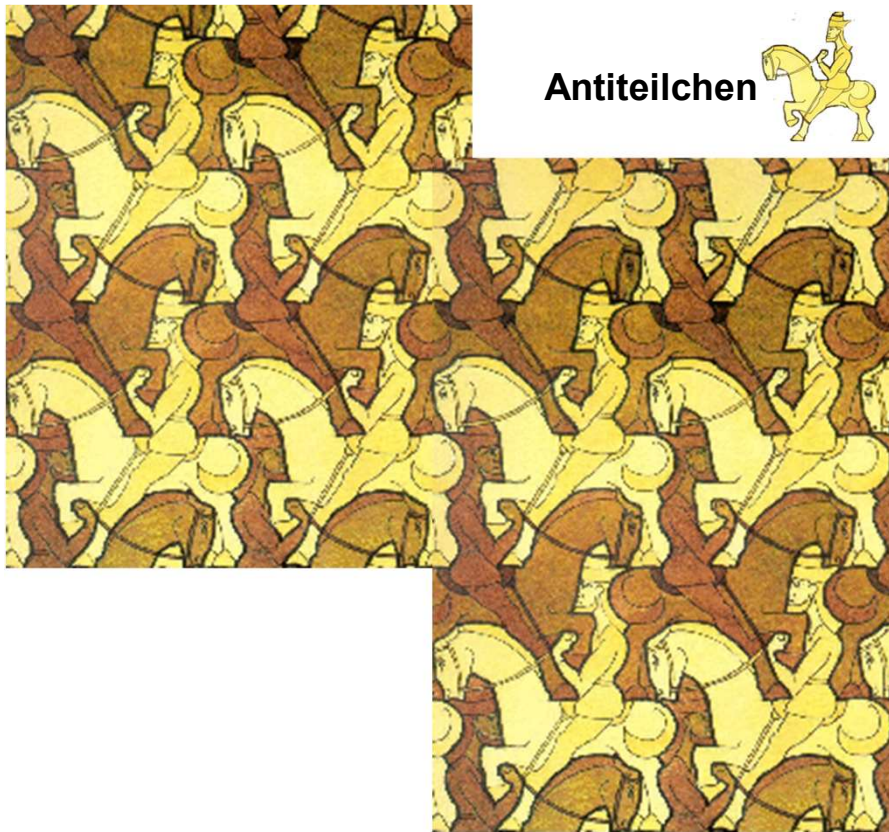
Parity

Charge

Time



Symmetrieoperationen



Die Physik ist gegenüber der kombinierten Anwendung aller drei Transformationen invariant!

(1954 Gerhart Lüders, 1955 Wolfgang Pauli)

Antimaterie - Vorhersage und Entdeckung

- **1928:** Dirac-Gleichung

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

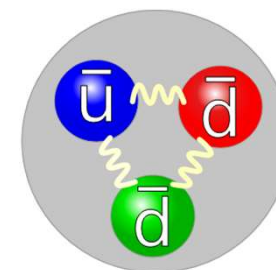
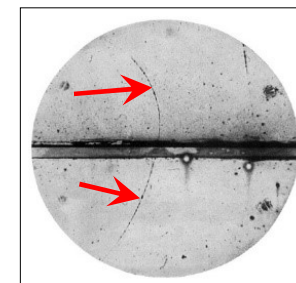
⇒ Dirac postuliert die Existenz von Antimaterie

- **1932:** Entdeckung des Positrons in einer Nebelkammer

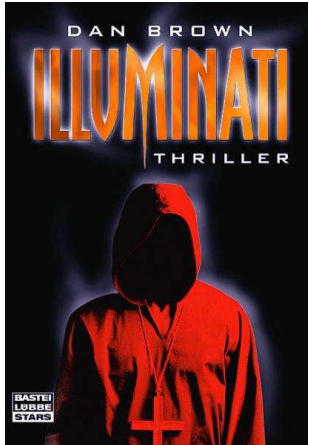
- **1955 / 1956:** Entdeckung des Antiprotons



Paul A. M. Dirac



Antiatom/Antimaterie - Was ist das?



Teilchen und Antiteilchen als zwei verschiedene Ausprägungen derselben grundlegenden physikalischen Struktur (z.B. gleiche Masse, ...)

→ **Proton - Antiproton , Wasserstoff - Antiwasserstoff**

Erzeugung von Antimaterie

Die Antimateriefabrik AD am CERN

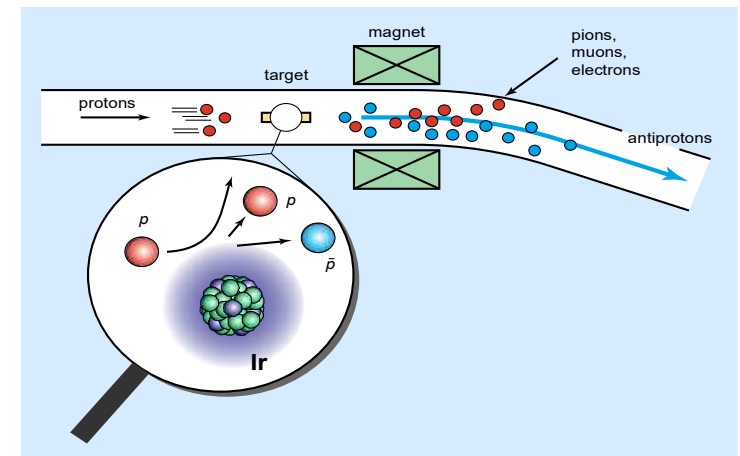


- Beschuss von Iridium mit Protonen am CERN:

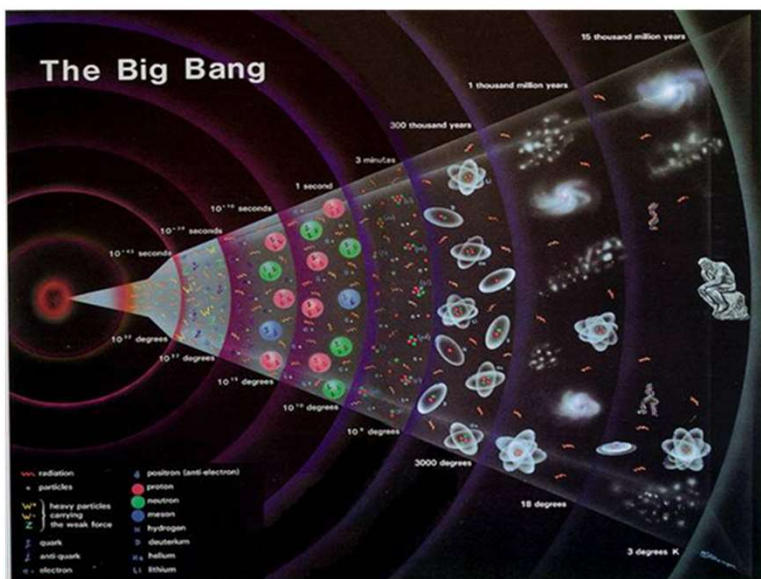
Protonen haben nahezu Lichtgeschwindigkeit

$$E = mc^2$$

→ Paarbildung (p, anti-p)



Problem: Materie/Antimaterie-Asymmetrie



- Im Urknall vor etwa 13,7 Milliarden Jahren sind vermutlich gleiche Mengen Materie und Antimaterie entstanden
- Die allermeisten Teilchenpaare annihilierten sich kurz danach
- Aber: Es ist noch Materie übrig!

Wo ist die Antimaterie geblieben?

Mögliche Erklärungen:

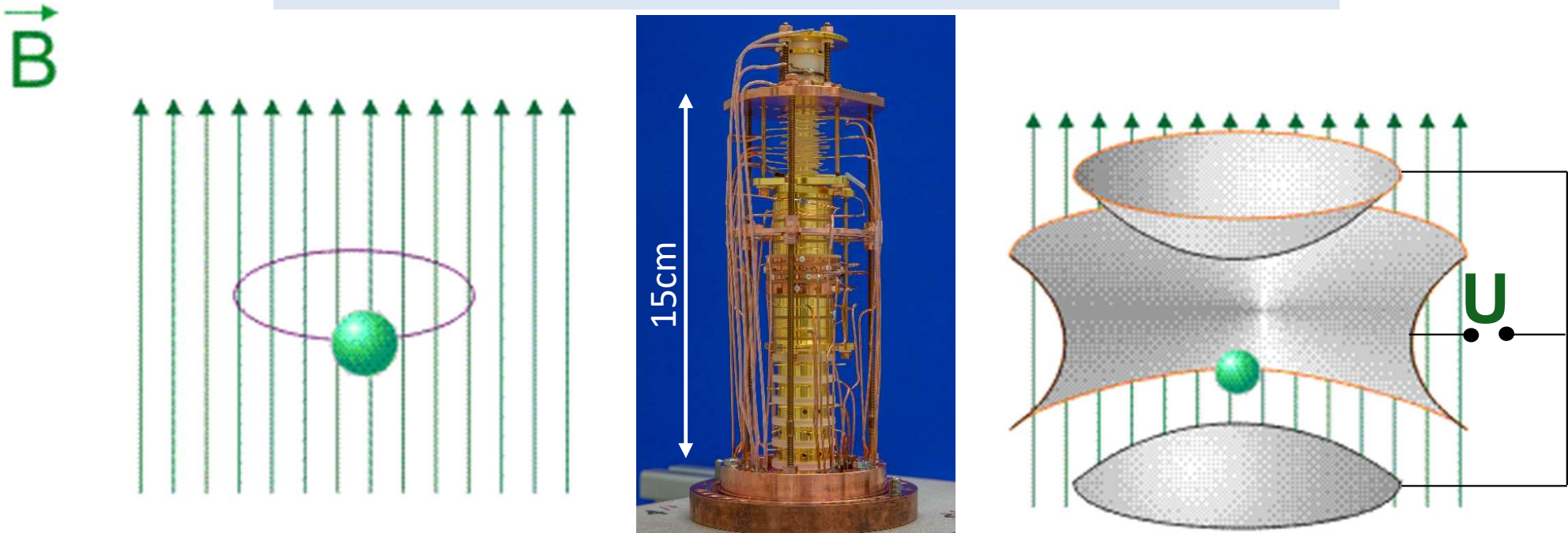
1. Unterschiede in den Eigenschaften von Materie und Antimaterie
2. Anomale Gravitation, Trennung in verschiedene Bereichen des Universums

Idee: wir vergleichen die Masse von Materie und Antimaterie



Eine Waage für Atome: die Penning-Falle

*Magnetische und elektrische Kräfte
lassen geladene Teilchen frei im Raum schweben*

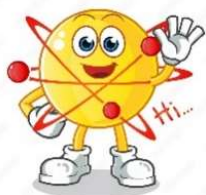


Aus der Anzahl der Umläufe pro Sekunde wird die **Masse** des gespeicherten Ions bestimmt!

$$\omega_c = qB/m$$

Messung der Umlauffrequenz

klein, leicht



Unsere Atome machen
bis zu 30 Millionen
Umläufe pro Sekunde!!!

groß, schwer



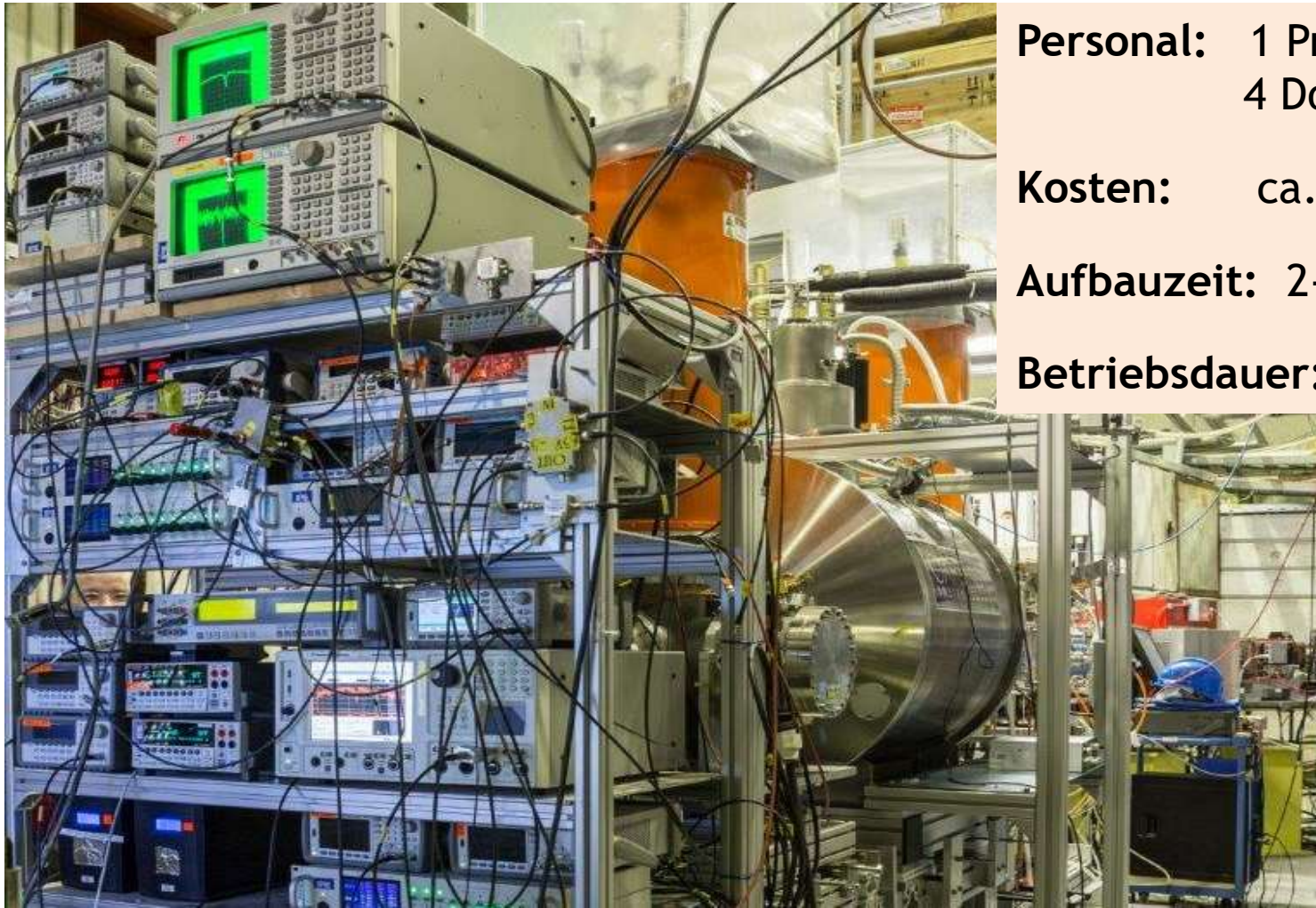
2s pro Umlauf

Nachweis winzigster Ströme!

4s pro Umlauf



BASE - Eine „Waage“ für (Anti-)Protonen am CERN



Personal: 1 Projektleiter, 2 PostDocs,
4 Doktoranden, 2 Studenten

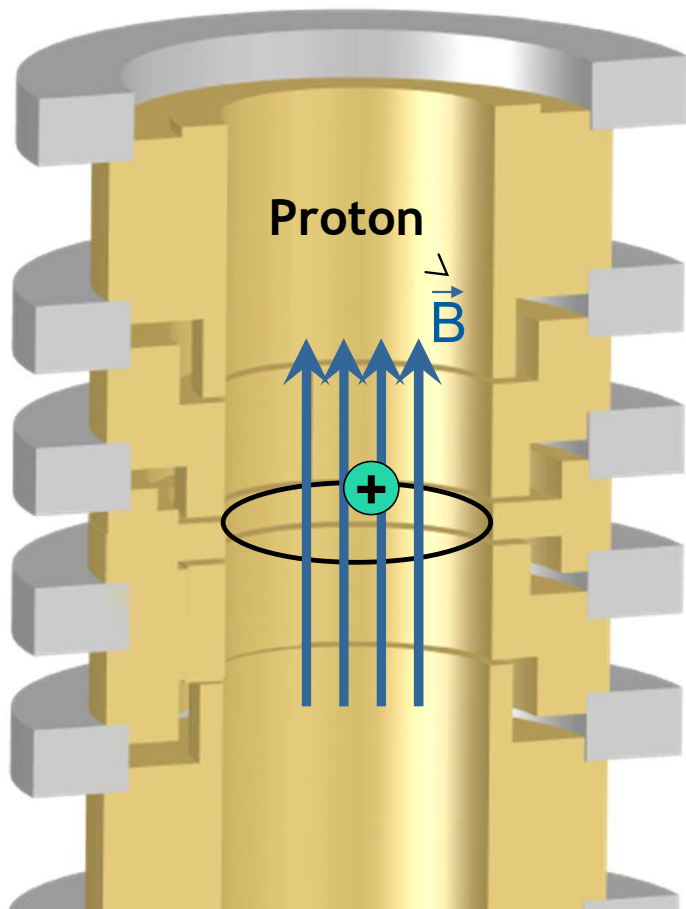
Kosten: ca. 3 M€ (Hardware)

Aufbauzeit: 2-3 Jahre (sehr schnell)

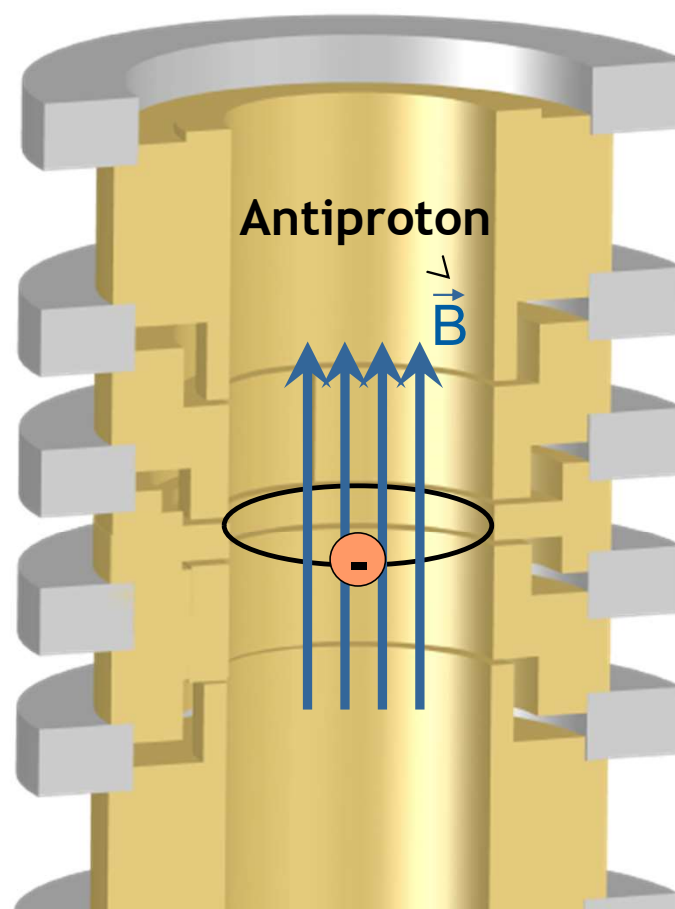
Betriebsdauer: ca. 10-15 Jahre

Massevergleich Proton - Antiproton

14800

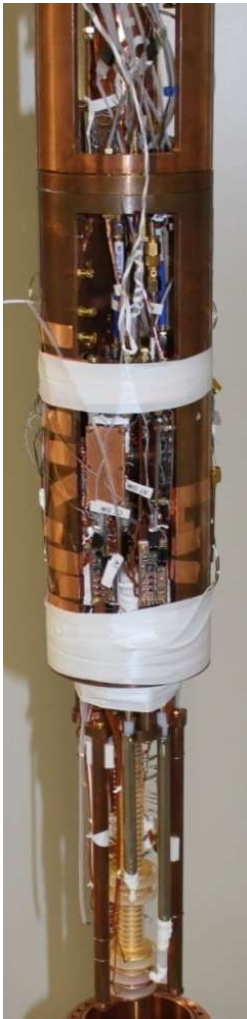


14800



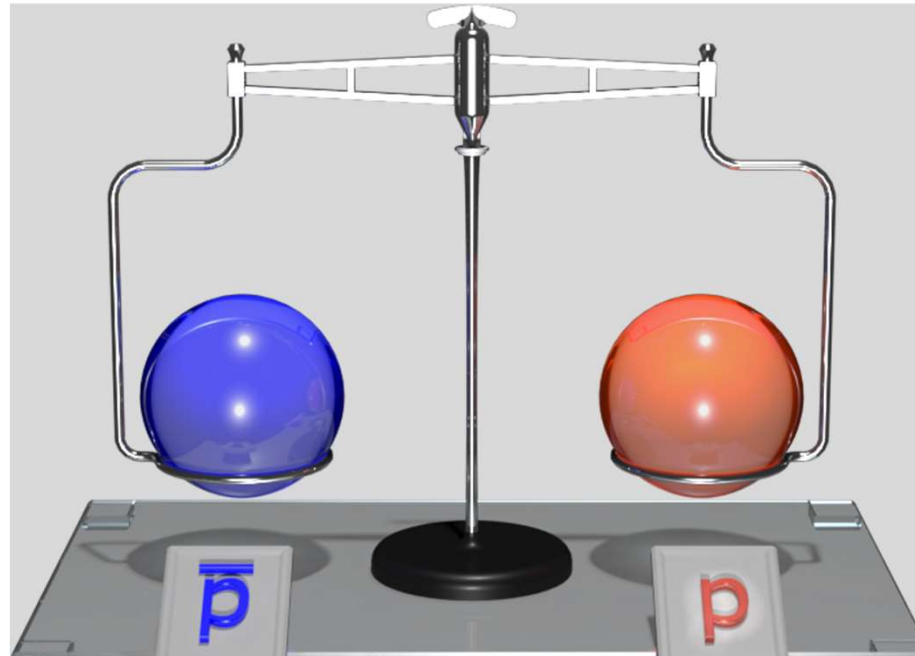
Das Verhältnis der Umlauffrequenzen entspricht dem Verhältnis der Massen.

Verhältnis Antiproton- zu Protonmasse



Standardmodell:
Teilchen und Antiteilchen sind identisch (Masse, Ladung)

$$Masse_{\text{Proton}} / Masse_{\text{Antiproton}}$$



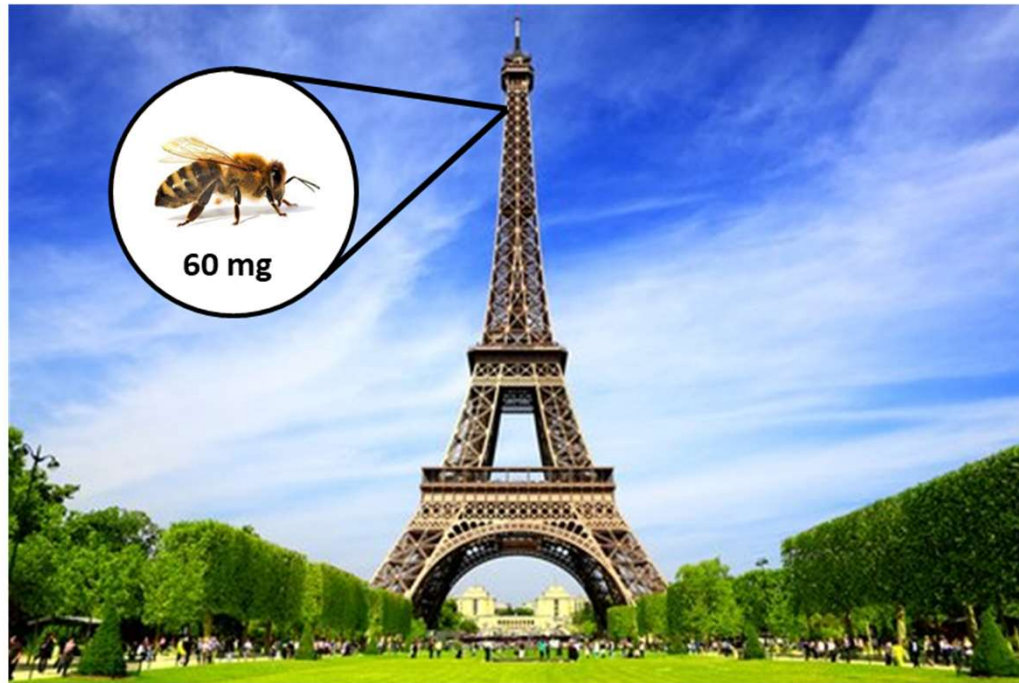
M. Bohman *et al.*,
Nature (2021)

M.J. Borchert *et al.*,
Nature (2022)

Das Materie/Antimaterie-Problem ist (noch) NICHT gelöst.



Ein einfacher Genauigkeitsvergleich

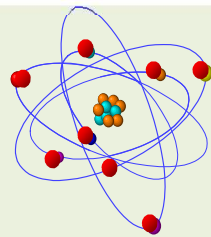


$$m_{\text{Biene}} \approx 60 \text{ mg}$$

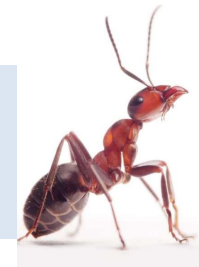
$$\frac{m_{\text{Biene}}}{m_{\text{Eiffel}}} \approx 8 \cdot 10^{-12}$$

$$m_{\text{Eiffel}} = 7300 \text{ T} = 7.300.000.000.000 \text{ mg} = 7.3 \cdot 10^{12} \text{ mg}$$

Aber:
Genauigkeit auf
atomarer Skala!



Neueste Messungen:
 $\approx 2 \cdot 10^{-12}$



Teil 2

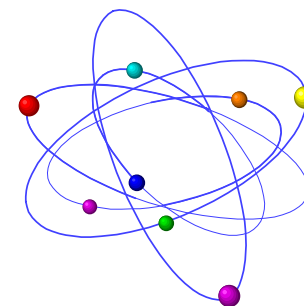
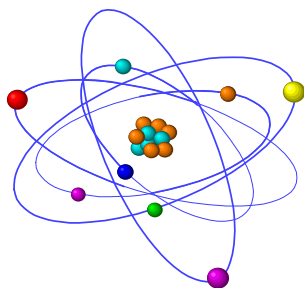
An aerial photograph of Darmstadt, Germany, with a large, semi-transparent white circle overlaid on it. Inside this circle, several smaller white circles are connected by thin lines, representing the orbits of the planets in the solar system. A series of small white stars are scattered across the image, representing the stars in the galaxy. The text 'Warum ist die Elementzusammensetzung des Sonnensystems so, wie sie ist?' is overlaid in the center of the image.

Warum ist die Elementzusammensetzung
des Sonnensystems so, wie sie ist?



Was sind die Bausteine eines Atoms?

Atom = Atomkern + Elektronenhülle

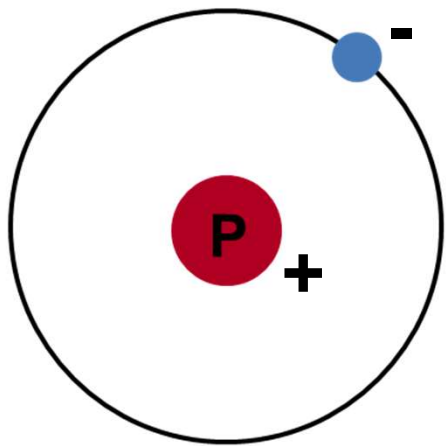


Protonenzahl bestimmt die
Elementsorte und das
chemische Verhalten

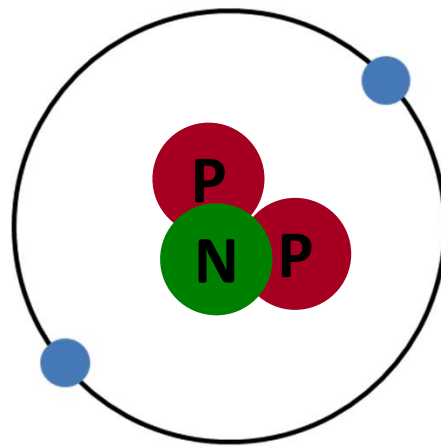


Aufbau der Atome

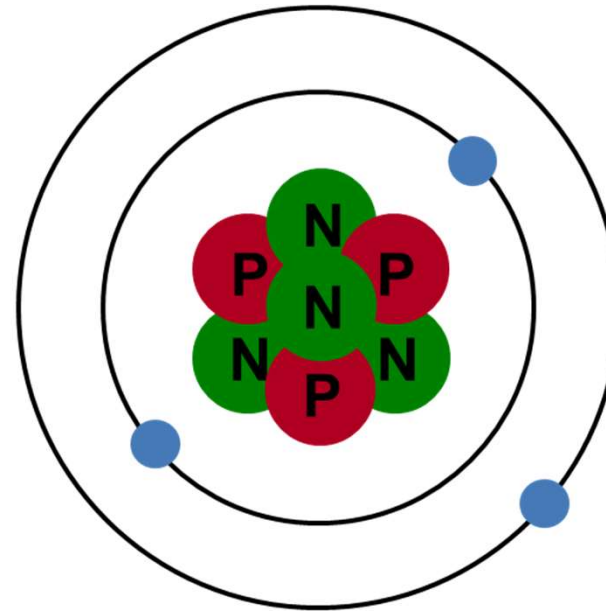
Elemente unterscheiden sich in der Anzahl der Protonen im Kern bzw. Elektronen in der Hülle



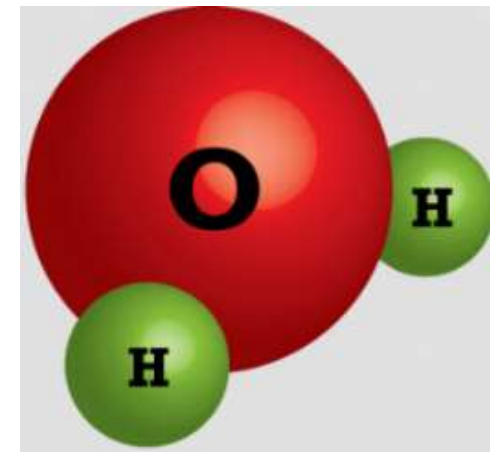
Wasserstoff



Helium-3

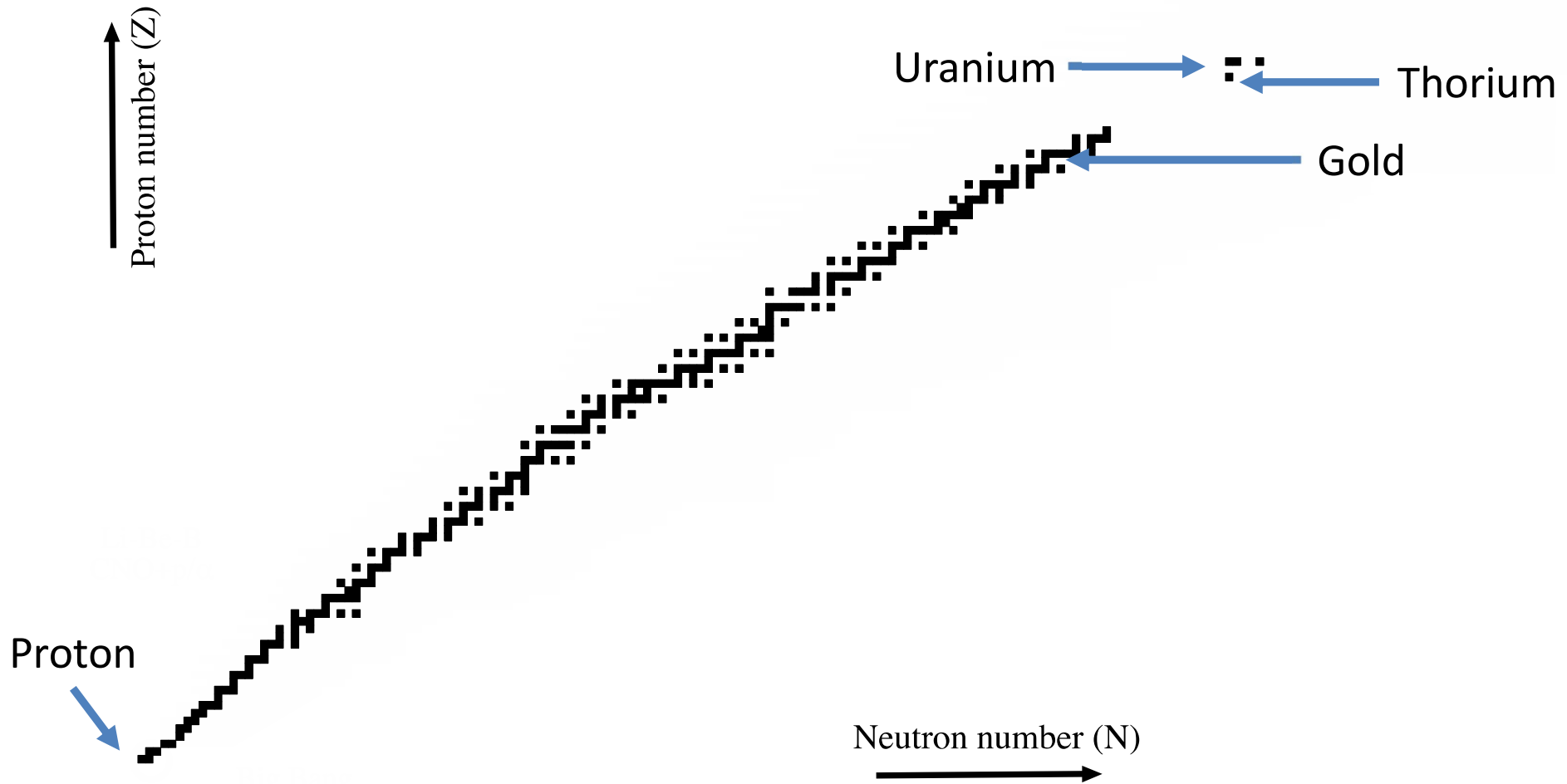


Lithium-7

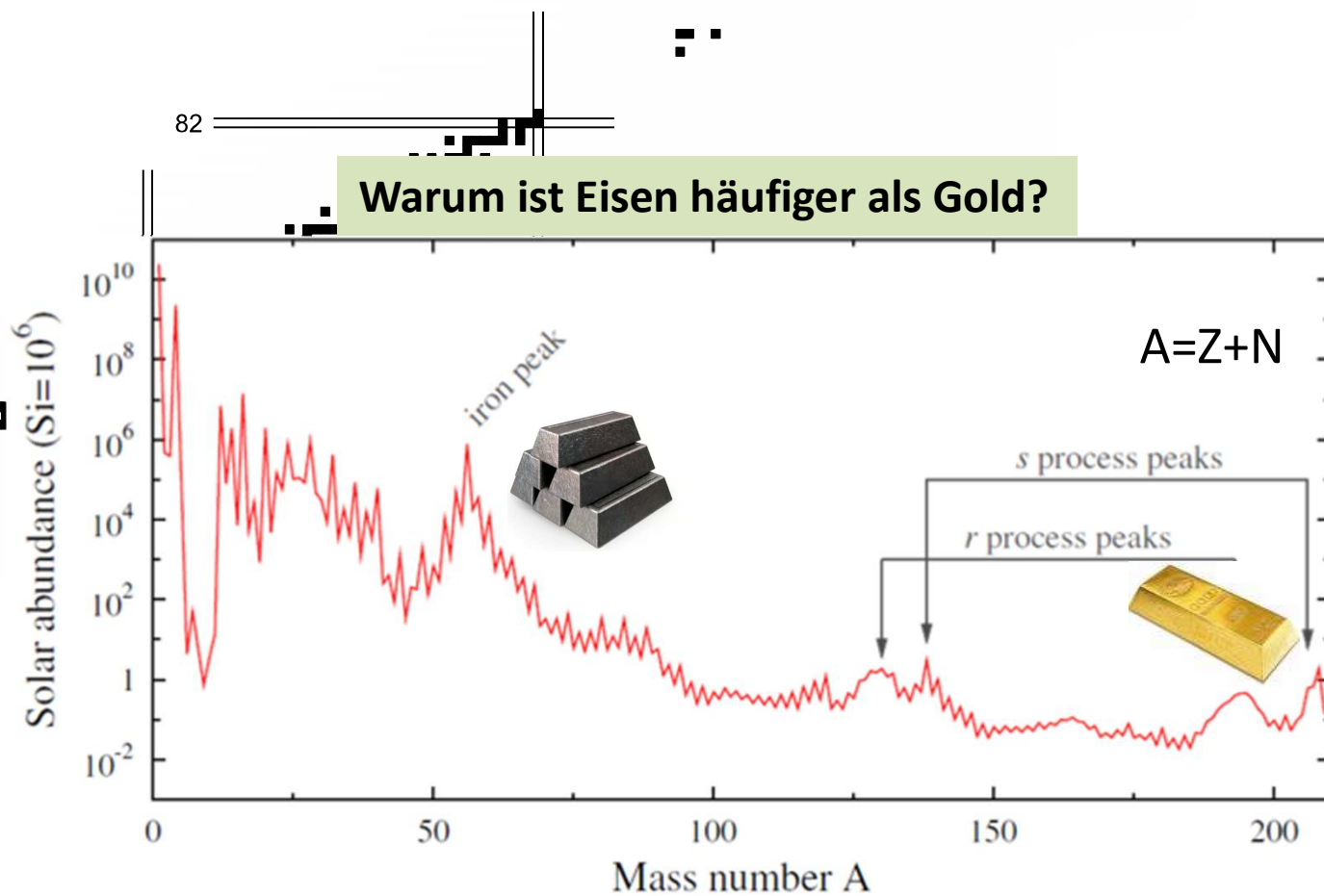
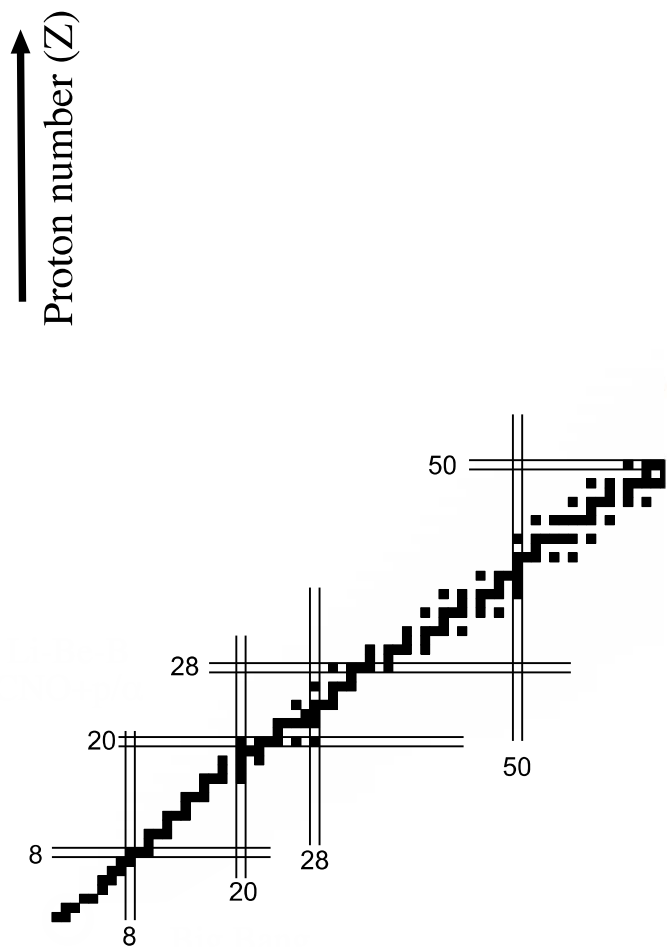


H₂O
Wasser

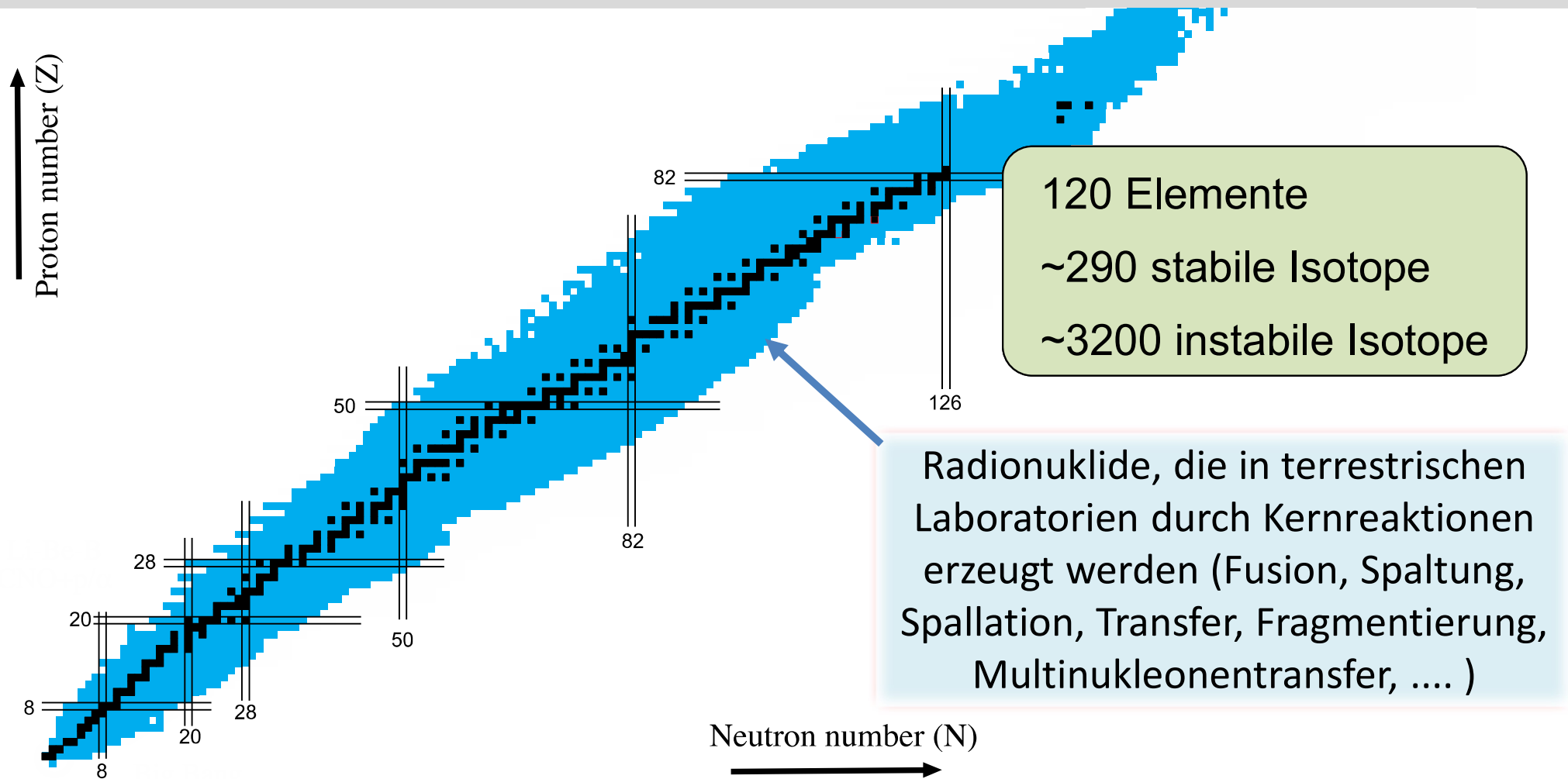
Nuklidkarte: stabile Kerne



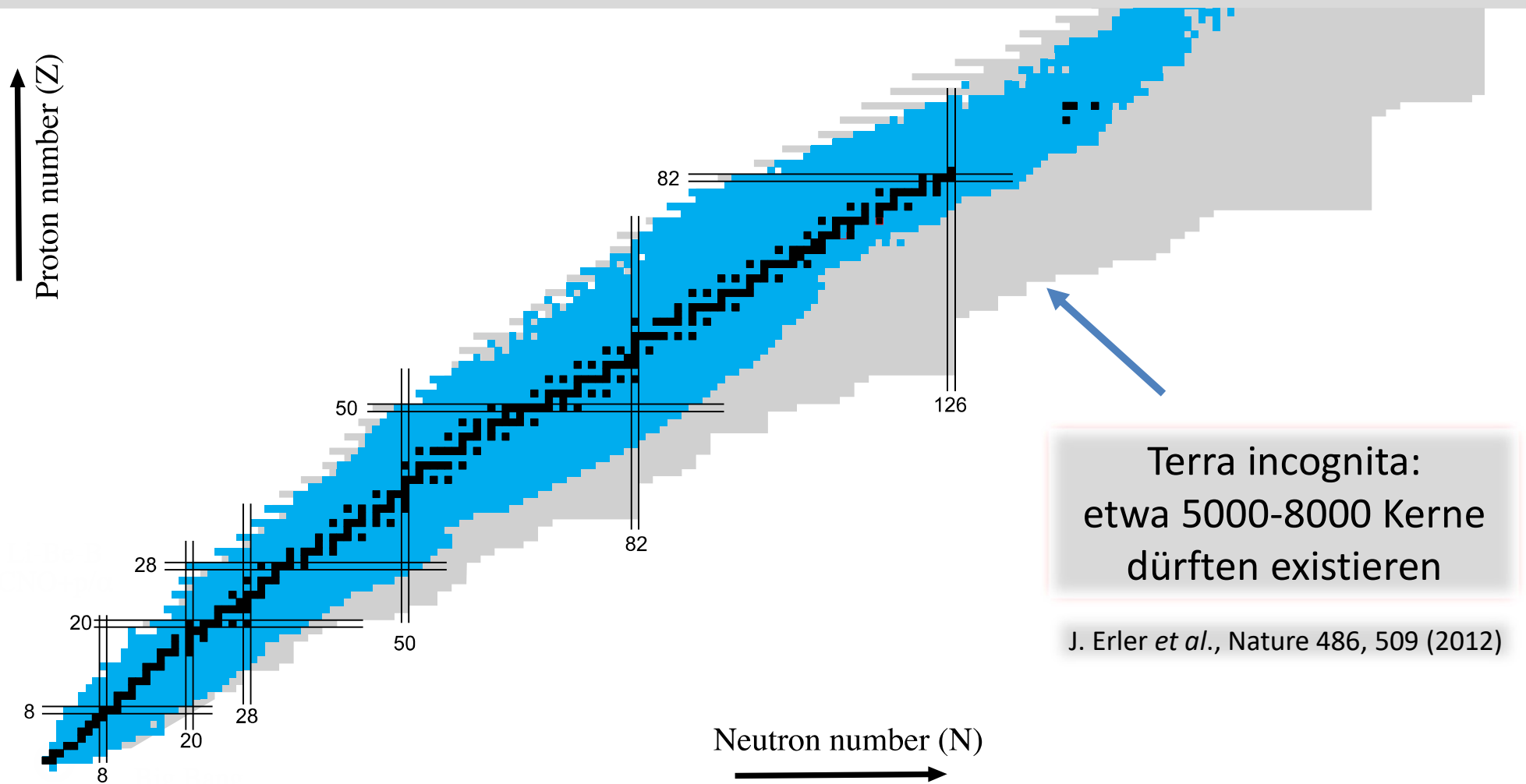
Nuklidkarte: magische Zahlen



Nuklidkarte: bekannte Nuklide

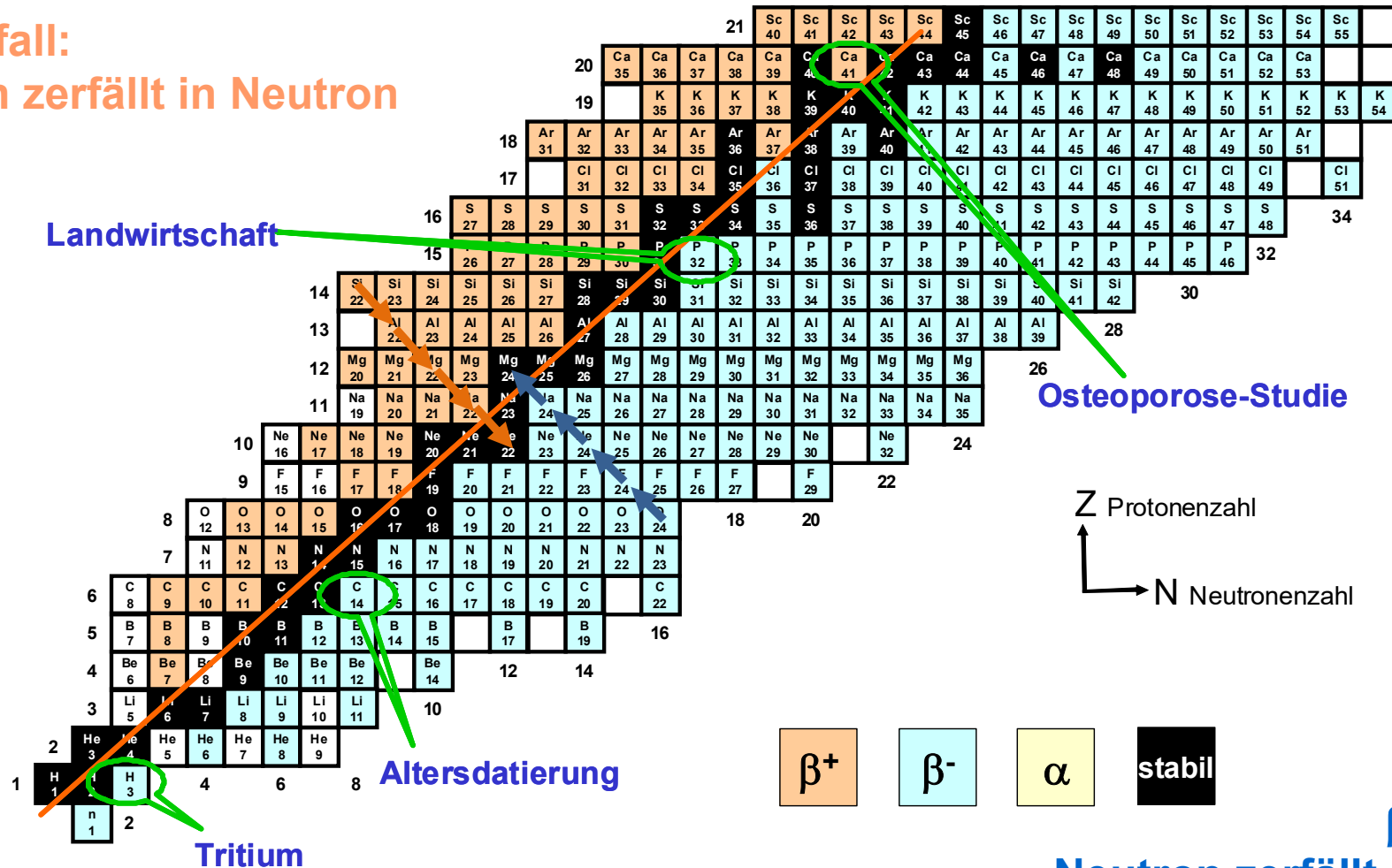


Nuklidkarte: die unbekannte Welt



Der leichte Massenbereich der Nuklidkarte

β^+ -Zerfall:
Proton zerfällt in Neutron



β^- -Zerfall:
Neutron zerfällt in Proton

Was charakterisiert ein Atom?

das Gewicht



die Größe



die Lebensdauer/
der Zerfall



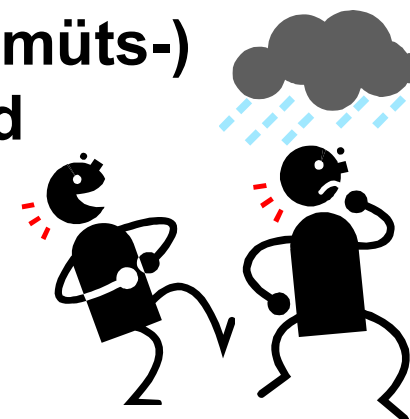
die Form



die el./mag.
Eigen-
schaften



der (Gemüts-)
Zustand



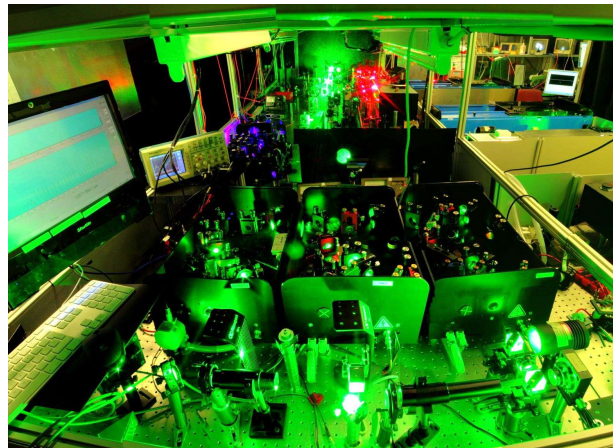
Mitarbeiter:innen des IKP der TUDa haben einzigartige Methoden entwickelt, um diese Eigenschaften experimentell zu bestimmen und theoretisch zu beschreiben.

Experimentelle Werkzeuge an ISOLDE-CERN

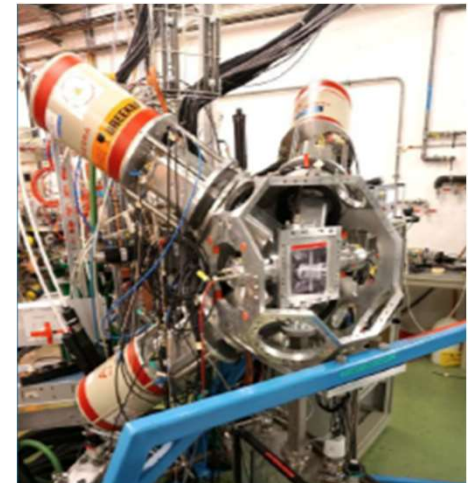
Penningfallen
für Massen



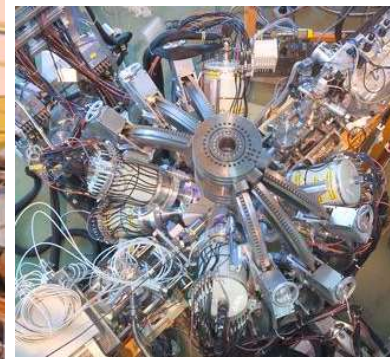
Laser für Radian
und Momente



Detektoren
für Lebensdauern



Nachbeschleunigung
und Antiprotonen
für die Form



Experimentelle Werkzeuge an ISOLDE-CERN

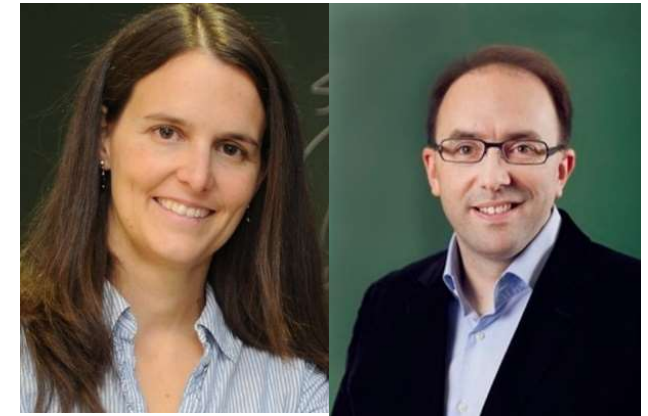
Penningfallen
für Massen



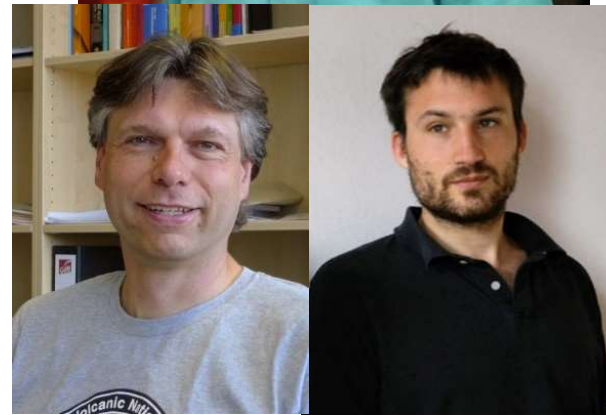
Laser für Radien
und Momente



Theorie

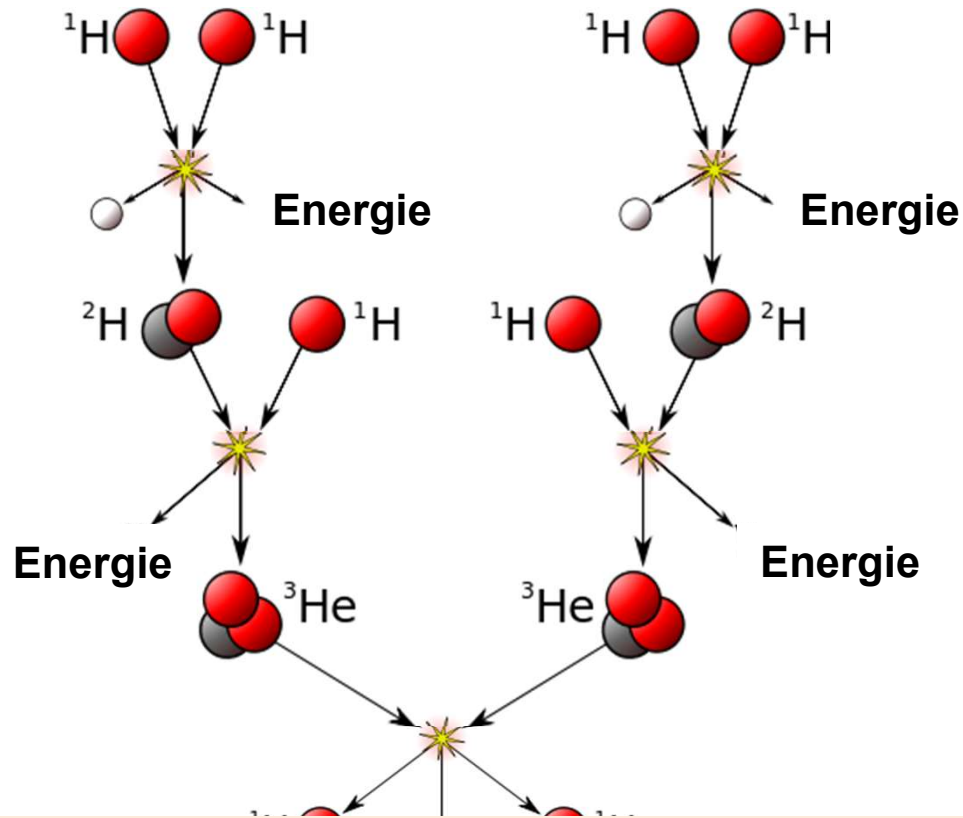


Nachbeschleunigung
und Antiprotonen
für die Form



Was passiert in der Sonne?

C.F. v. Weizsäcker 1937,
G. Gamow 1938



Ausgehend von reinem
Wasserstoff im Stern

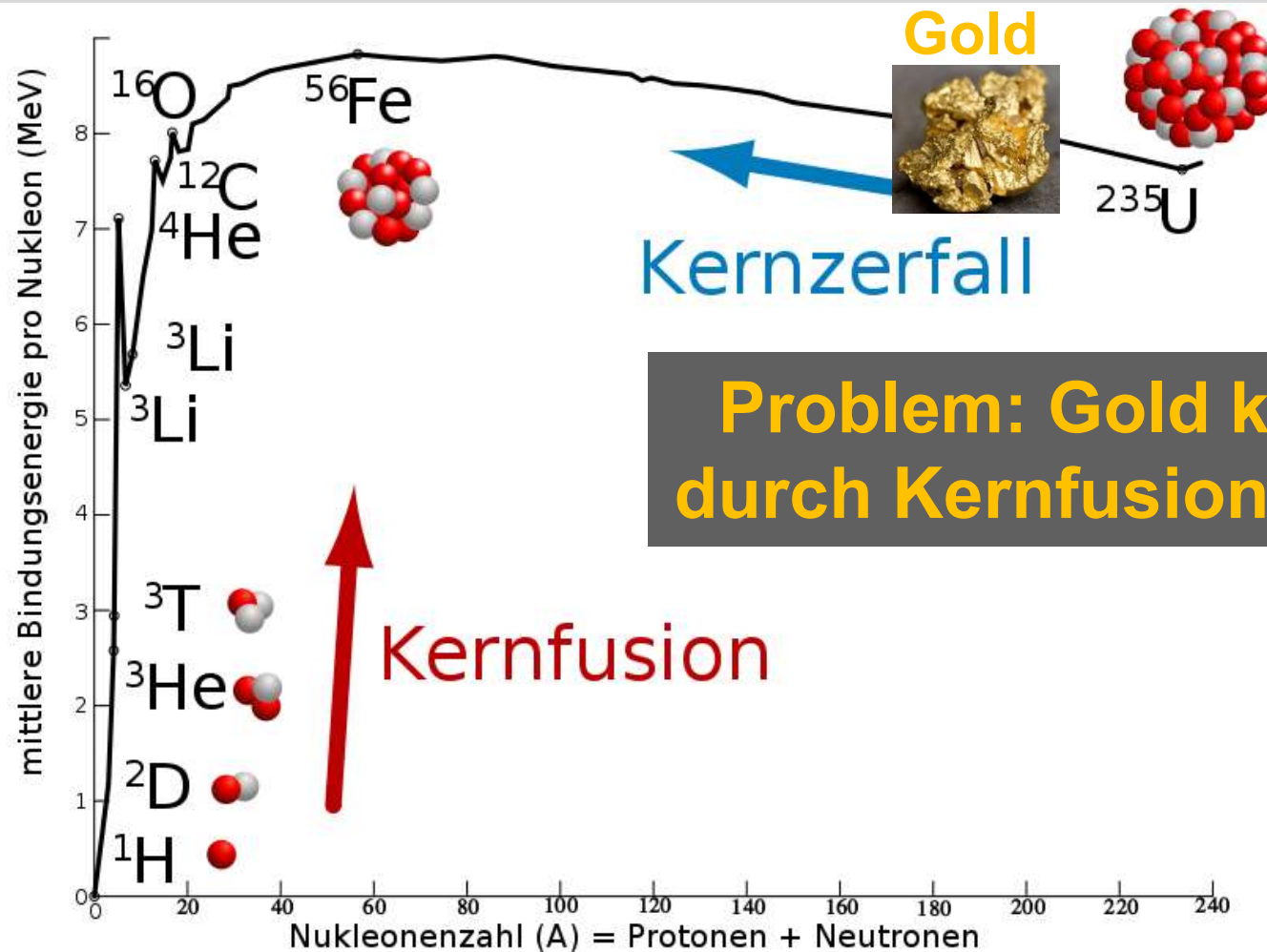
Stellares Brennen!

Die freiwerdende Energie ergibt sich
aus den Massen der beteiligten Kerne.

Abb.: CWitte; C

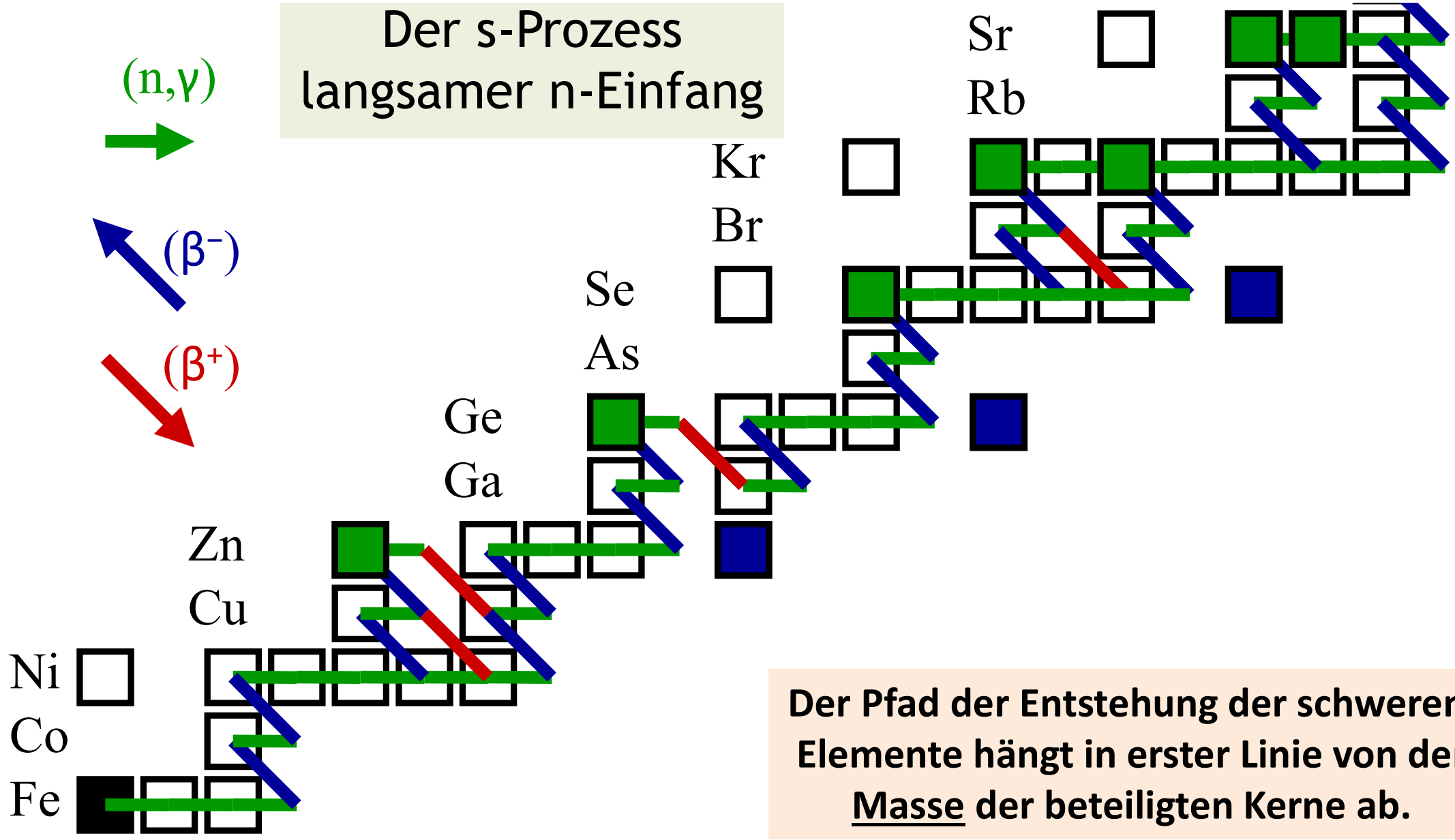


Kernbindungsenergie pro Nukleon



Problem: Gold kann nicht durch Kernfusion entstehen!

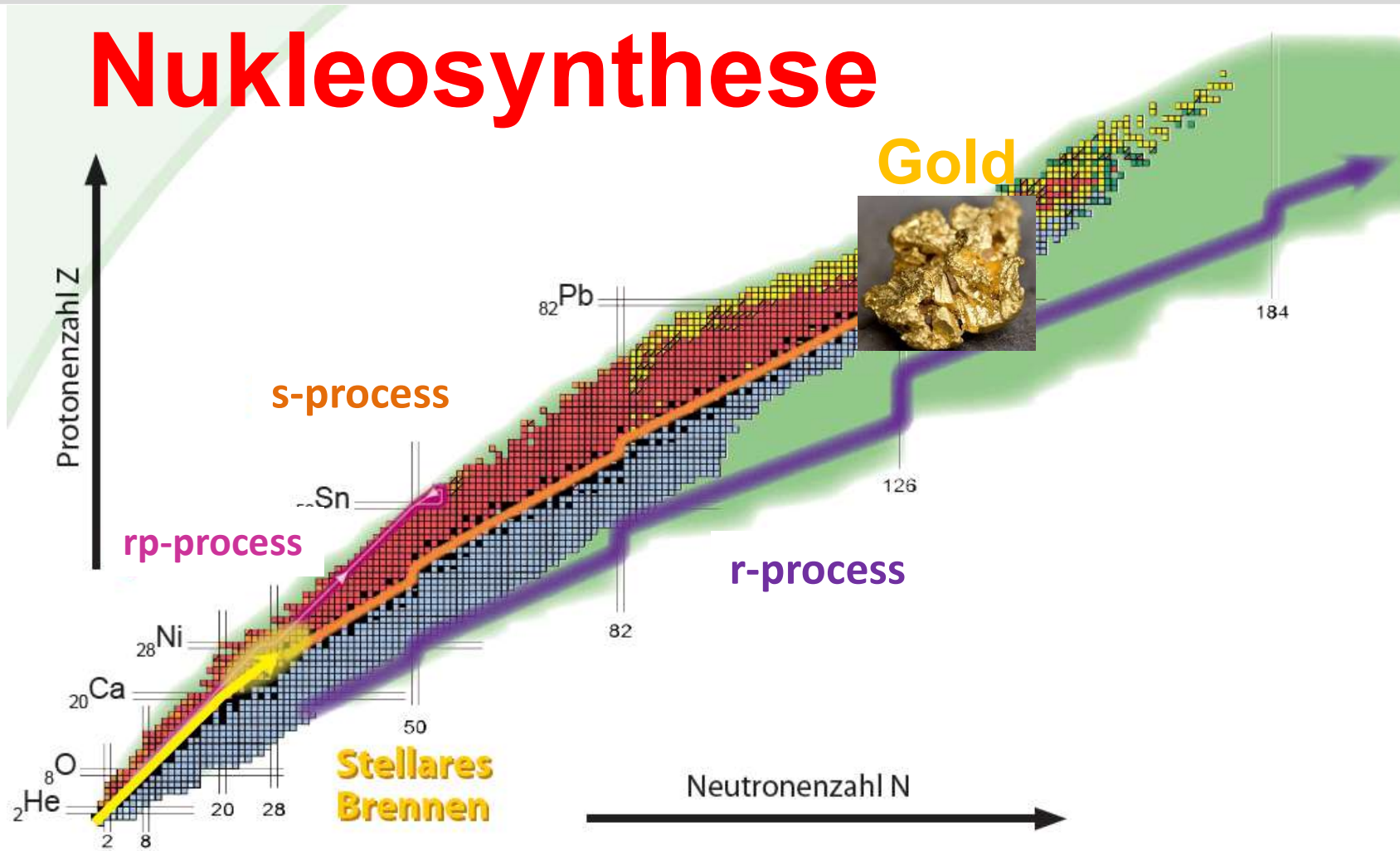
Der s-Prozess
langsamer n-Einfang



Der Pfad der Entstehung der schweren Elemente hängt in erster Linie von der Masse der beteiligten Kerne ab.

Der Weg zum Gold

Nukleosynthese



Ein großer Dank an meine Abteilung

Ein ebenso großer Dank an meine Kolleg:innen der TUDa für die großartige Zusammenarbeit!



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit. Fragen?