

Wir sind alle Sternenstaub – Die Entstehung der Elemente im Universum



***Prof. Dr. Andreas Zilges**
Institut für Kernphysik
Universität zu Köln*



Wir sind alle Sternenstaub – Die Entstehung der Elemente im Universum



Empedokles (ca. 450 v. Chr.):

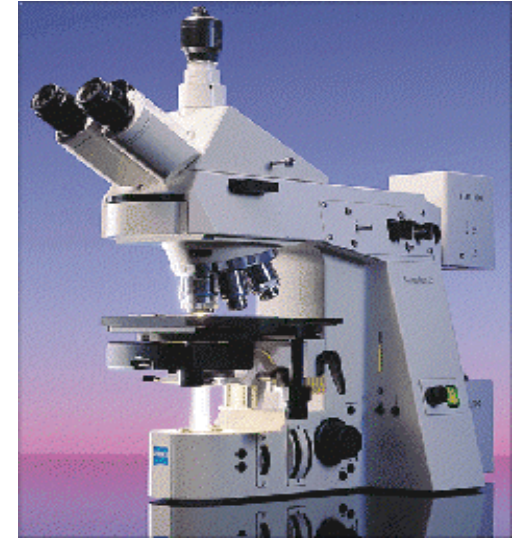
**Alle Elemente sind Mischungen von
Erde, Luft, Feuer und Wasser.**

Wechselwirkungen: Liebe und Hass

Eine kurze Reise in das Innere der Materie



**Sandstrand
1 Meter**

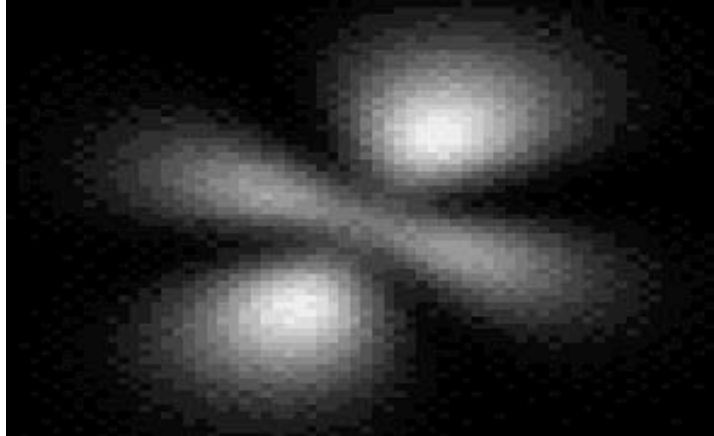


**Siliziumdioxid-
Kristall
0.05 mm**

Eine kurze Reise in das Innere der Materie

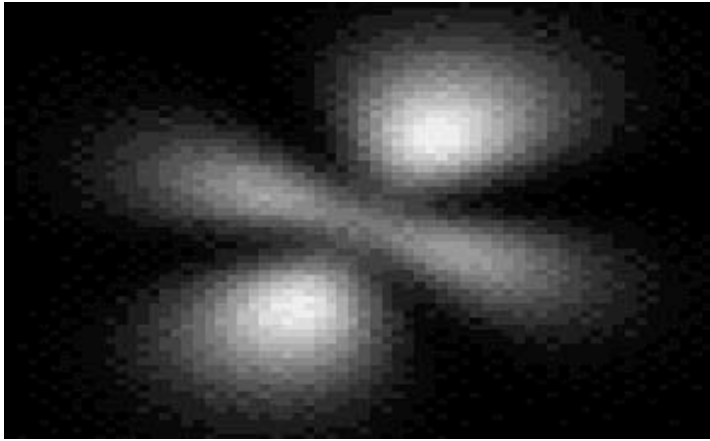


**Siliziumdioxid-
Kristall
0.05 mm**

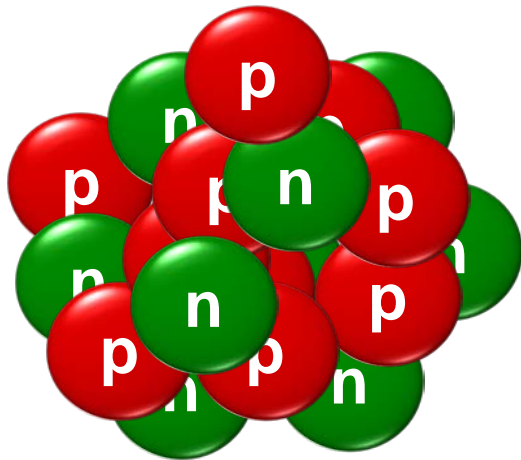


**Si-Atom
 10^{-10} m pro Atom**

Eine kurze Reise in das Innere der Materie

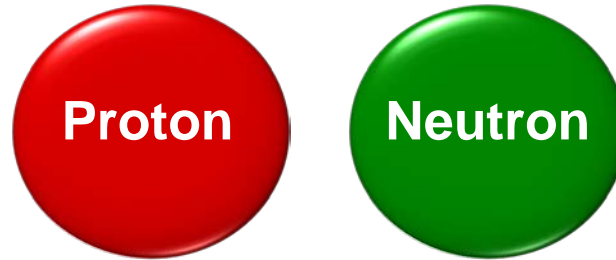


Si-Atom
 10^{-10} m pro Atom



14 Protonen, 14 Neutronen
 1×10^{-15} m pro Nukleon

Wir sind alle Sternenstaub – Die Entstehung der Elemente im Universum



**Die Atomkerne aller Elemente bestehen
aus Protonen und Neutronen.**

**Wechselwirkungen:
starke, elektromagnetische und schwache**

**Wie entstanden/entstehen aus diesen
Bausteinen die Elemente ?**

Synthese der Elemente: Energieproduktion im Inneren der Sterne



Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne. I.

Von C. F. v. Weizsäcker.

1. Die Aufbauhypothese. — 2. Umwandlung durch geladene Kerne. — 3. Reaktionsketten der leichtesten Elemente. — 4. Folgerungen für den inneren Aufbau der Sterne. — 5. Umwandlung durch Neutronen. — 6. Der Aufbau der schwereren Elemente. — 7. Allgemeinere astrophysikalische Fragen. — 8. Zusammenfassung.

Physikalische Zeitschrift 38 (1937) 176

Synthese der Elemente im Urknall: Das $\alpha\beta\gamma$ -Manuskript



The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

February 18, 1948

Phys. Rev. 73 (1948) 803

Synthese schwerer Elemente: B2FH-Manuskript

REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 4

OCTOBER, 1957

Synthesis of the Elements in Stars*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,
California Institute of Technology, Pasadena, California*

“It is the stars, The stars above us, govern our conditions”;
(*King Lear*, Act IV, Scene 3)

but perhaps

“The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,”
(*Julius Caesar*, Act I, Scene 2)



DAS WELTALL

DU LEBST DARIN – ENTDECKE ES!



INTERNATIONALES
ASTRONOMIEJAHR
2009

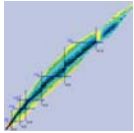
**400 Jahre:
„Astronomia nova“
(J. Kepler)**

**~ 70 Jahre:
Energieproduktion aus Sternen
(C.F. von Weizsäcker, H.A. Bethe)**

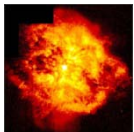
**~ 50 Jahre:
Synthese schwerer Elemente
(B2FH)**

**40 Jahre:
Woodstock
(Joni Mitchell:
*“We are stardust, we are golden,
we are billion year old carbon.”*)**

Wir sind alle Sternenstaub – Die Entstehung der Elemente im Universum



Prinzip der Synthese von Elementen



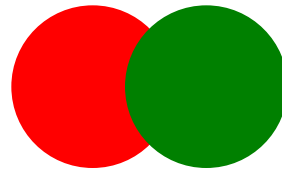
Kernumwandlung im Labor



Nachweis kleinster Reaktionsraten

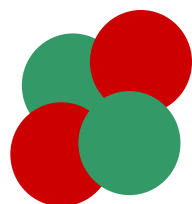
Wie entstanden die ersten Atomkerne ?

Beim Zusammenprall von Proton und Neutron können diese zu einem neuen Kern fusionieren:



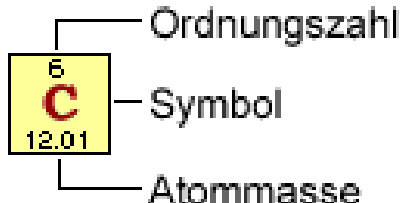
**Dieser neue Kern bleibt stabil, wenn die Temperatur nicht zu hoch ist.
($T < 1$ Milliarde Grad Celsius)**

Wie entstanden die Elemente?



Fusion von Protonen und Neutronen zu Helium und Lithium

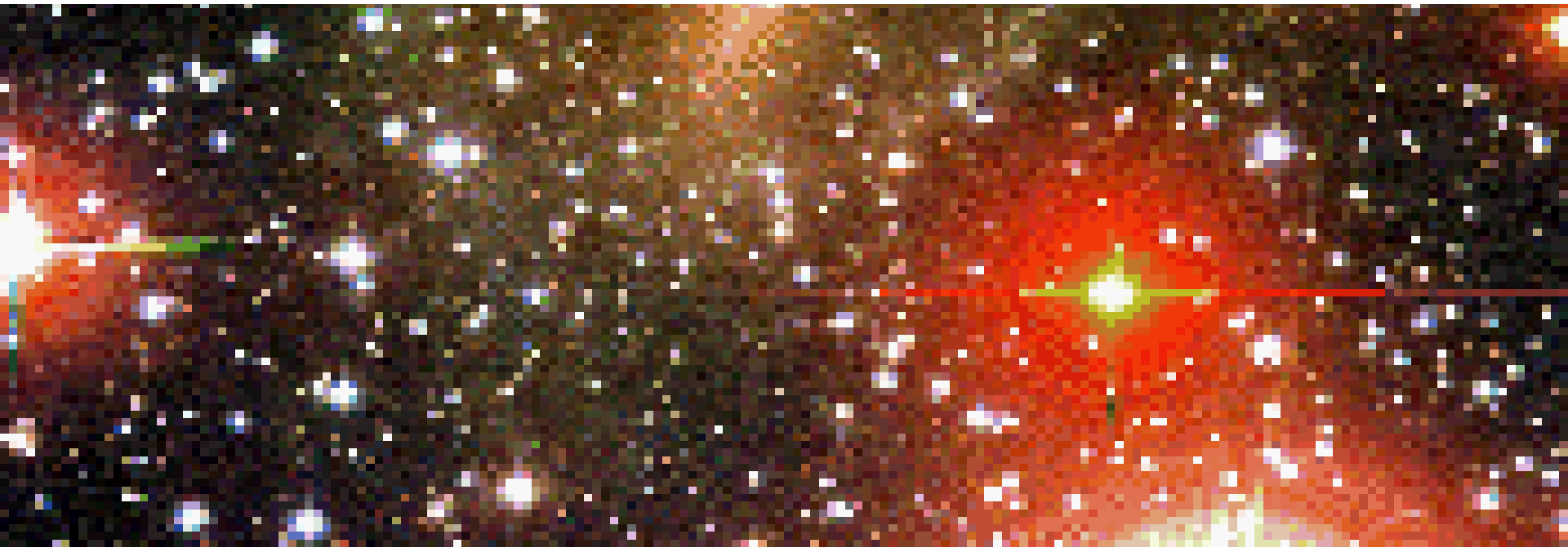
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 1.008																	2 He 4.003
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
3	11 Na 22.99	12 Mg 24.31											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
4	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80
5	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	Zeit: ca. 3 Minuten nach dem Urknall												52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3
6	55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	71 Lu 175.0	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.8	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po 209.0	85 At 210.0	86 Rn 222.0
7	87 Fr 223.0	88 Ra 226.0	103 Lr 262.1	104 Rf 261.1	105 Db 262.1	106 Sg 263.1	107 Bh 264.1	108 Hs 265.1	109 Mt 268	110 Uun 269	111 Uuu 272	112 Uub 277	113 Uut	114 Uuq 289	115 Uup	116 Uuh 289	117 Uus	118 Uuo 293
6			57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm 146.9	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0		
7			89 Ac 227.0	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np 237.0	94 Pu 244.1	95 Am 243.1	96 Cm 247.1	97 Bk 247.1	98 Cf 251.1	99 Es 252.0	100 Fm 257.1	101 Md 258.1	102 No 259.1		



Die Synthese schwerer Elemente

Erst nach etwa 200 Millionen Jahren entstehen die ersten Sterne (Gravitation).

Jetzt können auch schwere Kerne bis zum Eisen durch Fusionsprozesse erzeugt werden.



Das Ende der Fusionskette



In Sternen: Fusionsreaktionen zu schwereren Elementen bis zu Eisen

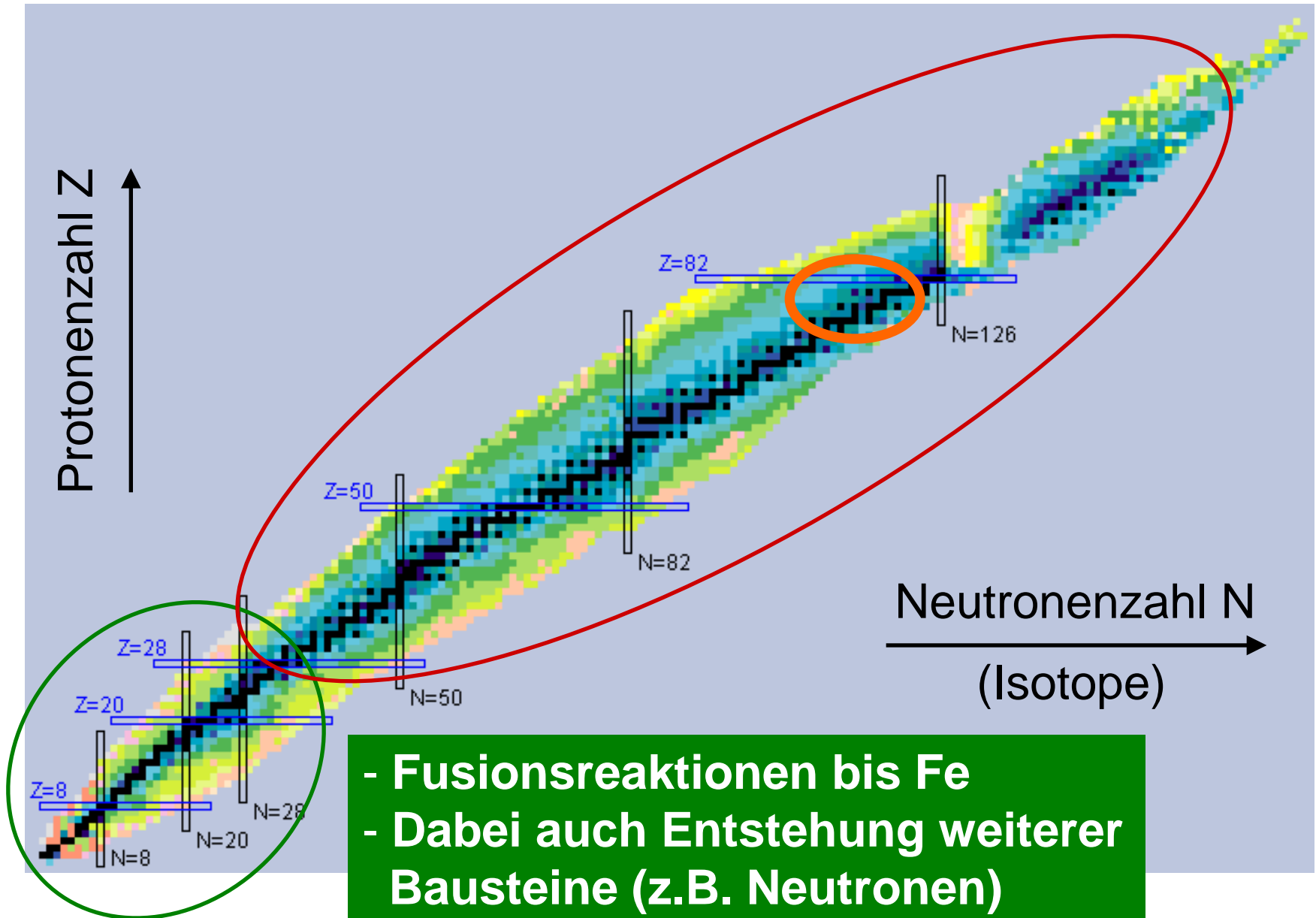
Ordnungszahl
Symbol
Atommasse

Metall
Halbmetall
Nichtmetall

Zeit: ca. 200 Millionen Jahre nach dem Urknall

1	1 H 1.008	2 He 4.003																
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
3	11 Na 22.99	12 Mg 24.31											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
4	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80
5	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62														54 Xe 131.3		
6	55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	71 Lu 175.0	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.8	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po 209.0	85 At 210.0	86 Rn 222.0
7	87 Fr 223.0	88 Ra 226.0	103 Lr 262.1	104 Rf 261.1	105 Db 262.1	106 Sg 263.1	107 Bh 264.1	108 Hs 265.1	109 Mt 268	110 Uun 269	111 Uuu 272	112 Uub 277	113 Uut	114 Uuq 289	115 Uup	116 Uuh 289	117 Uus	118 Uuo 293
6	57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm 146.9	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0				
7	89 Ac 227.0	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np 237.0	94 Pu 244.1	95 Am 243.1	96 Cm 247.1	97 Bk 247.1	98 Cf 251.1	99 Es 252.0	100 Fm 257.1	101 Md 258.1	102 No 259.1				

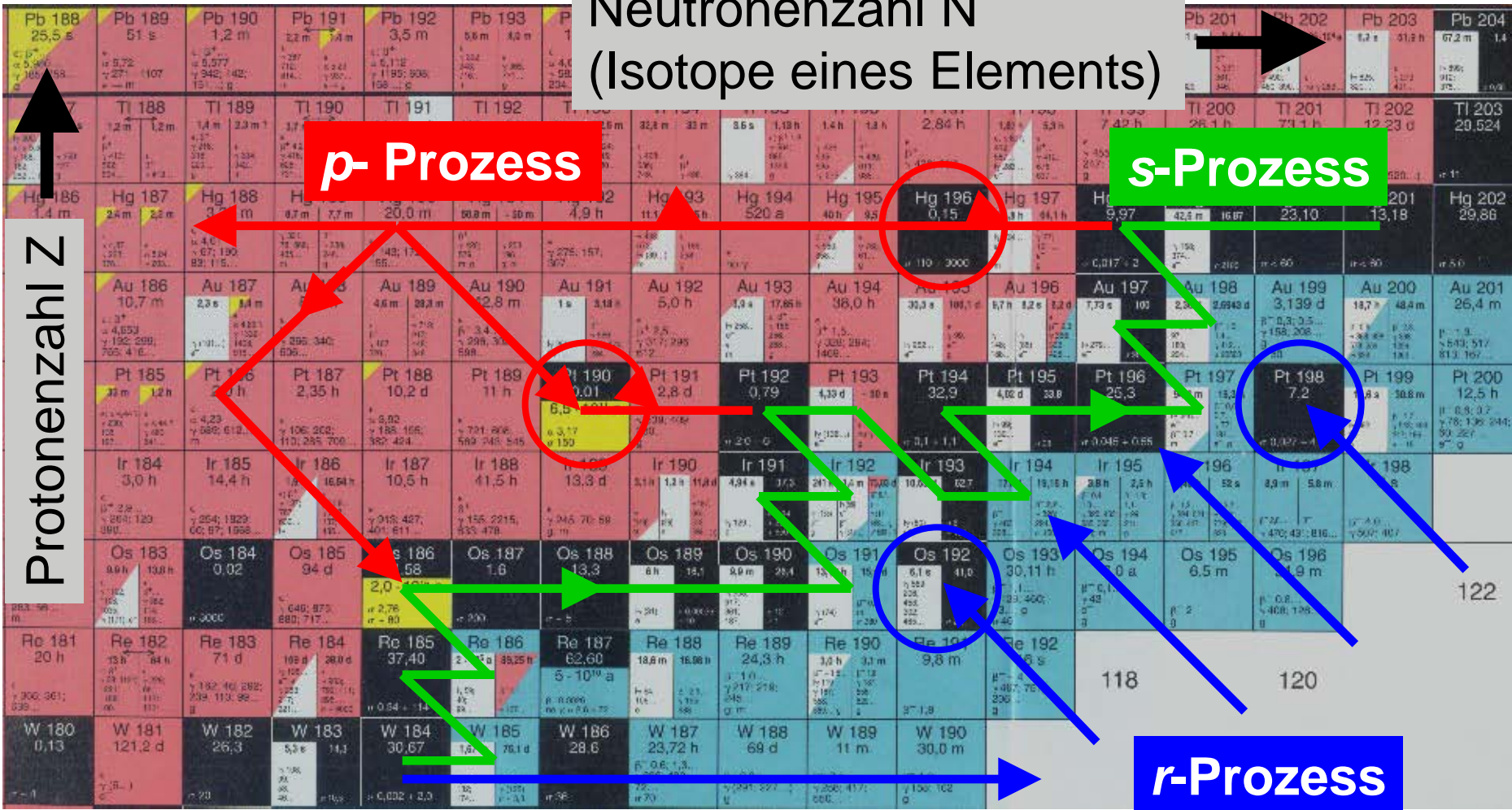
Synthese schwerer Atomkerne



- Fusionsreaktionen bis Fe
- Dabei auch Entstehung weiterer Bausteine (z.B. Neutronen)

Synthese schwerer Atomkerne

Neutronenzahl N
(Isotope eines Elements)

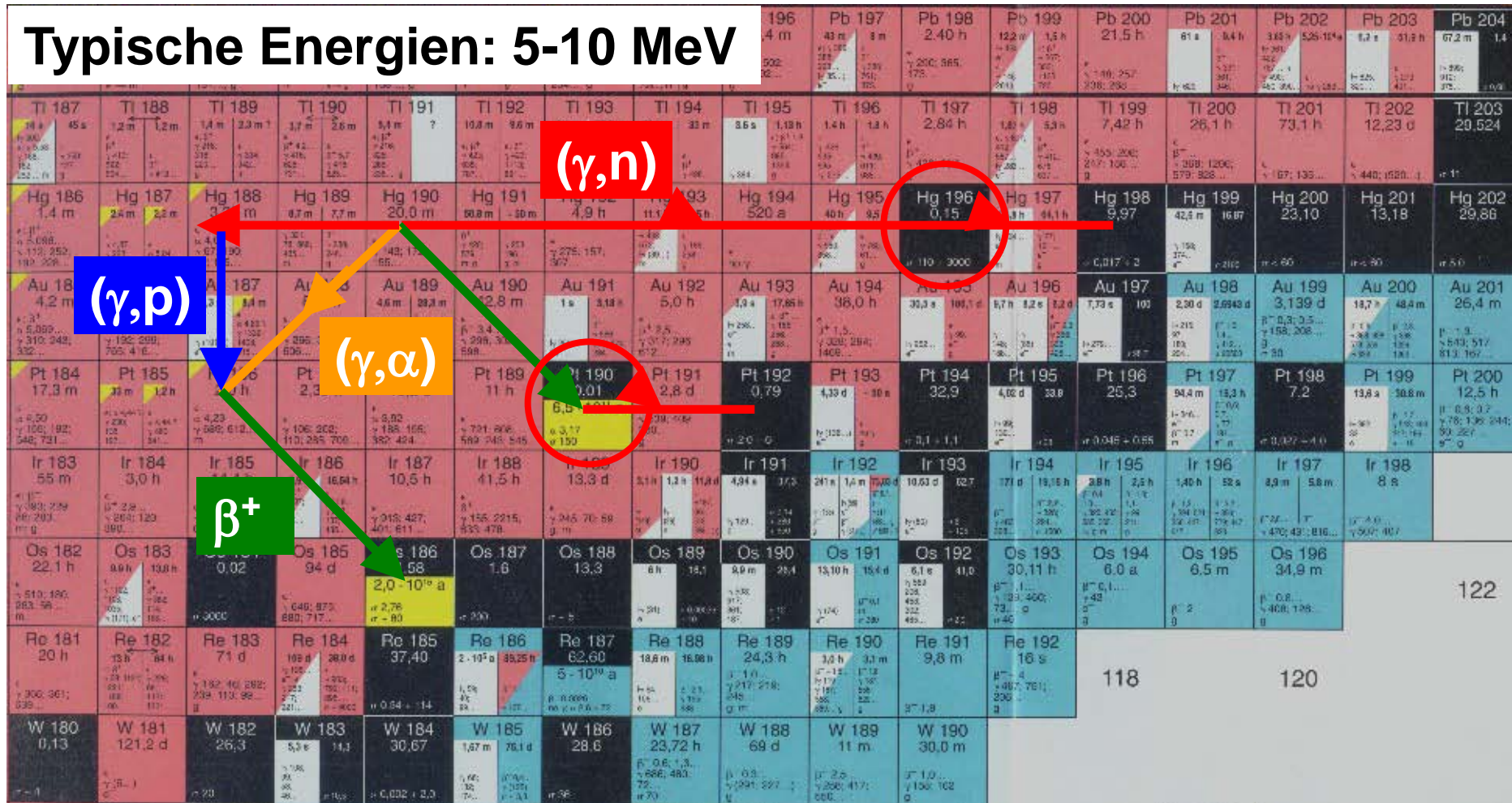


■ = stabile Isotope

■ = instabile Isotope

Kernreaktionen und Zerfälle im p-Prozess

Typische Energien: 5-10 MeV



Auch alle Umkehrprozesse sind wichtig!
 (n, γ), (p, γ), (α, γ)

Wo gibt es so hohe Energien im Weltall ?

Der Krebs-Nebel

Temperaturen bis 10 Milliarden Grad Celsius
→ ein „Bad“ hochenergetischer
Lichtquanten und Teilchen



Die Supernova 1987A

22.02.1987



vorher

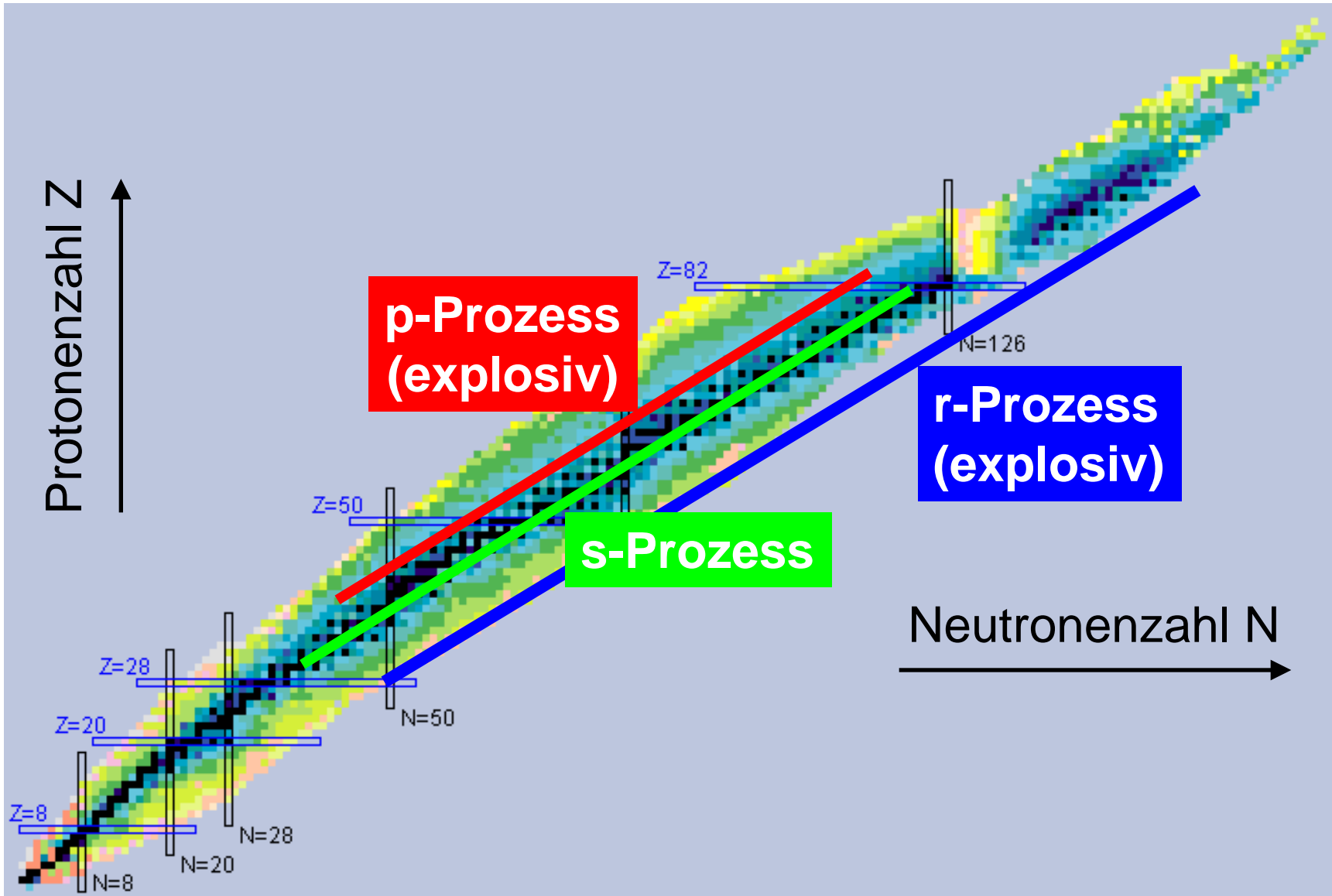
23.02.1987



Gibt es denn so viele Supernovae ?

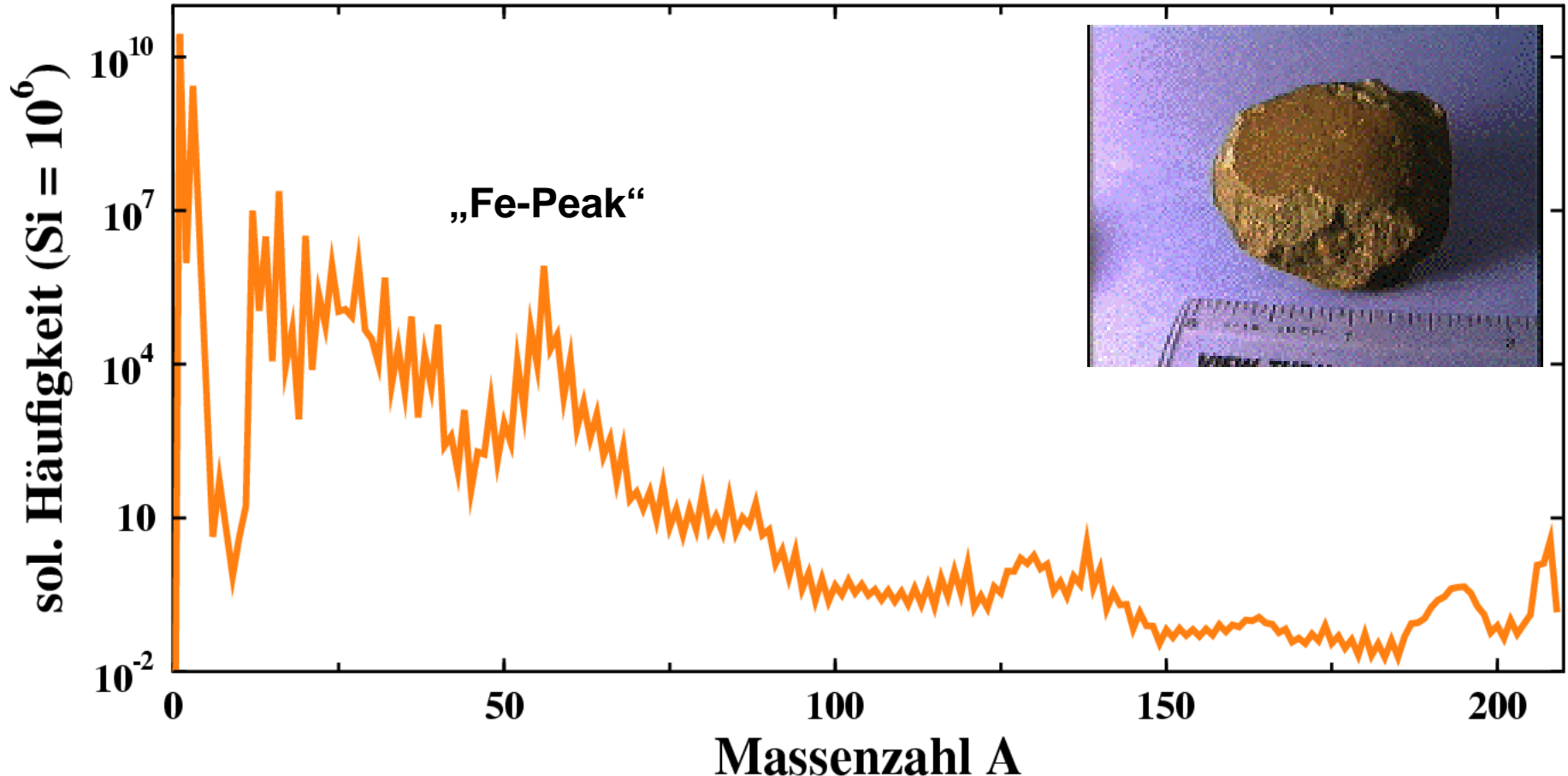
SN	Host Galaxy	Date	R.A.	Decl.	Offset	Mag.	Disc.	Ref.	SN Position	Type SN	Discoverer(s)
2009iu NGC 7329 2009 09 01			Maza, Piganata et al. (CHASE)								
2006kc	Anon.	2006 10 12	22 30.2	-00 24 21.0		22 30	10.61	-00 24 28.2		Ia	2006kc Sloan Digital Sky Survey II
2006kb	Anon.	2006 10 12	20 19.2	-01 04 20.2		20 19	10.21	-01 03 52.2		Ia	2006kb Sloan Digital Sky Survey II
2006ka	Anon.	2006 10 11	02 18.4	+00 14 21.9		02 18	26.68	+00 13 36.0		Ia	2006ka Sloan Digital Sky Survey II
2006jz	Anon.	2006 10 11	00 11.4	+00 42 21.9		00 11	24.80	+00 42 09.8		Ia	2006jz Sloan Digital Sky Survey II
2006jy	Anon.	2006 10 04	01 02.9	+00 11 21.7		01 02	56.34	+00 10 59.2		Ia	2006jy Sloan Digital Sky Survey II
1987B	NGC 5850	1987 02 24	15 07.1	+01 32	75W 120S 15	IAUC 4321		15 07 02.99 +01 30 13.3	IAUC 4322		1987B Evans
1987A		1987 02 24	05 35.4	-69 16		4.5 IAUC 4316		05 35 27.99 -69 16 11.5	IAUC 4327	Ilp	1987A Shelton, Duhalde, Jones
1986P	NGC 5763	1986 07 02	14 49.0	+12 29	8W 6S 17	IAUC 6470					1986P Mueller
1901B	NGC 4321	1901 03 17	12 22.9	+15 49	110W 4N 15.6						1901B Curtis
1901A	NGC 2535	1901 01 10	08 11.2	+25 11	19E 7N 14.7			08 11 15.05 +25 12 30.6	AN 221,47		1901A Reinmuth
1895B	NGC 5253	1895 07 07	13 39.9	-31 39	16E 23N 8.0						1895B Fleming (Z Cen)
1895A	NGC 4424	1895 03 16	12 27.2	+09 25	75E 11S 12.5						1895A Wolf (VW Vir)
1885A	NGC 224	1885 08 17	00 42.7	+41 16	15W 4S 5.8						1885A Hartwig (S And)
(V843)	Milky Way observers (V843 Oph)	1604 10 09		-3				17 30 38.6 -21 28 52	Clark & Steph. I	(V843)	Altobelli; Brunowski; Asian
B Cas	Milky Way	1572 11 06		-4				00 24 48.6 +64 08 49	Dreyer		
	Milky Way	1054 08 27		-4				05 34 31.89 +22 00 52.0	AA 1997	I?	Chinese observers

Synthese schwerer Atomkerne



Solare Häufigkeit der Elemente

Ziel: Erklärung der beobachteten solaren Häufigkeiten der Elemente (und der Isotope)



Was bestimmt die Elementsynthese?

Astrophysikalische Parameter, z.B.

- Sternmasse
- Temperatur
- Dichten
- Dynamik, z.B. Massentransport

Kernphysikalische Parameter, z.B.

- Massen der Kerne
- Zerfallseigenschaften
- Wechselwirkung des Kerns mit Projektilen, „Reaktionsraten“

Nukleare Astrophysik

Kernumwandlung durch He-Teilchen

Aus ZINN wird TELLUR:

Durch Beschuss mit He-Teilchen (α) kann ein Element in ein anderes umgewandelt werden!



Kernumwandlung durch He-Teilchen

Xe 116 57 s β^+ 3,3... γ 104; 311; 248...	Xe 117 61 s β^+ 5,3... γ 221; 519; 117; 295... βp	Xe 118 3,8 m ϵ β^+ 2,7 γ 54; 60; 120... g	Xe 119 5,8 m ϵ β^+ γ 232; 100; 462...	Xe 120 40 m ϵ ; β^+ γ 25; 73; 178; 176; 763... g	Xe 121 38,8 m β^+ 2,8... γ 253; 133; 445...	Xe 122 20,1 h ϵ γ 350; 149; 417...	Xe 123 2,08 h ϵ β^+ 1,5... γ 149; 178; 330...	Xe 124 0,10 σ 28 + 137	Xe 125 57 s 16,9 h ϵ ; β^+ ... γ 188; 243; 55... $\sigma_{n,\alpha} \sim 0,03$ σ 0,45 + 3,0	Xe 126 0,09
I 115 1,3 m β^+ g	I 116 2,9 s β^+ 6,7... γ 679; 540	I 117 2,2 m β^+ 3,5... γ 326; 274...	I 118 ~ 8,5 m 13 m β^+ ~ 4,9... γ 605; 600; 614... β^+ 5,5... γ 605; 545; 1338... γ 104 ?	I 119 19 m β^+ 2,4... γ 258... g	I 120 53 m 1,35 h β^+ 3,8... γ 560; 601; 614... β^+ 4,6... γ 560; 1523; 641...	I 121 2,12 h ϵ β^+ 1,1... γ 212... g	I 122 3,6 m β^+ 3,1... γ 564...	I 123 13,2 h ϵ no β^+ γ 159... g	I 124 4,15 d ϵ β^+ 2,1... γ 603; 1691; 723...	I 125 59,41 d ϵ γ 35; e^- g σ 900
Te 114 15,2 m ϵ ; β^+ γ 90; 1897; 727; 244; 1417...	Te 115 6,7 m 5,7 m ϵ β^+ 2,7... γ 770; 724; 1072... β^+ 2,7... γ 724; 1381; 1327; 1099...	Te 116 2,5 h ϵ ; β^+ γ 94; g	Te 117 1,1 h ϵ ; β^+ γ 104; g	Te 118 6,0 d ϵ no β^+ g	Te 119 4,7 d 16 h ϵ γ 154; 1213; 271... ϵ β^+ 0,6... γ 644; 700...	Te 120 0,096 0,25 + 2,0	Te 121 154 d 16,8 d β^+ 2,1... γ 212... ϵ β^+ 1,1... γ 1102... ϵ γ 573; 508...	Te 122 2,603 σ 1,1 + 2,3	Te 123 0,908 119,7 d 1,24 · 10 ¹³ a ϵ β^+ 2,1... γ 603; 1691; 723... σ 420	Te 124 4,816 σ 0,05 + 7
Sb 113 6,67 m β^+ 2,4; 2,5... γ 498; 332... g; m	Sb 114 3,5 m β^+ 4,0... γ 1300; 888...	Sb 115 32,1 m ϵ ; β^+ γ 94; g	Sb 116 60 m 16 m ϵ β^+ 1,1 γ 1294; 973; 547... β^+ 2,3... γ 1294; 932; 2225...	Sb 117 2,8 h ϵ β^+ 0,6 γ 159... g	Sb 118 5,0 h 2,5 m ϵ β^+ ... γ 123... 25... 131... β^+ 2,7... γ 1230; 1267...	Sb 119 38,5 h ϵ γ 24 e^- g	Sb 120 5,76 d 15,9 m ϵ no β^+ γ 1171; 1023; 197; 90... ϵ β^+ 1,7... γ 1171...	Sb 121 57,36 σ 0,4 + 5,5	Sb 122 4,2 m 2,70 d β^- 1,4; 2,0... ϵ ; β^+ ... γ 564; 693... σ 0,02 + 0,04 + 4,0	Sb 123 42,64 σ 0,02 + 0,04 + 4,0
Sn 112 0,97 σ 0,16 + 0,40	Sn 113 21,4 m 115,1 d β^+ 2,7... γ 255... m σ ~ 9	Sn 114 0,65 σ ~ 0,12	Sn 115 0,34 σ 30	Sn 116 14,5 s σ 0,0054 + 0,14	Sn 117 13,6 d 7,68 β^+ 2,7... γ 1230; 1267... σ 1,1	Sn 118 24,23 σ 0,004 + 0,21	Sn 119 293 d 8,59 β^+ 2,7... γ 1230; 1267... σ 2,2	Sn 120 32,59 σ 0,001 + 0,13	Sn 121 ~ 50 a 27,0 h β^- 0,35 γ 37 β^- 0,38 no γ	Sn 122 4,63 σ 0,15 + 0,001

(α, γ)

Es entstehen verschieden radioaktive und stabile Tellur-Isotope.

Kernumwandlung durch He-Teilchen

Aus ZINN wird TELLUR:

Durch Beschuss mit He-Teilchen (α) kann ein Element in ein anderes umgewandelt werden!



Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit dafür ?

→ Experimente im Labor

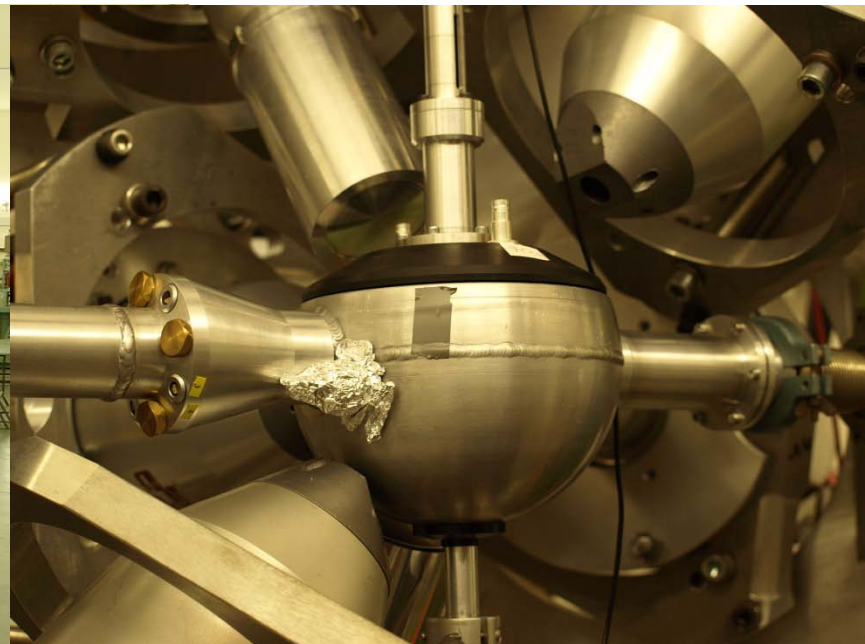
Kernumwandlung durch He-Teilchen

Aus ZINN wird TELLUR:

Man benötigt dazu Energien im MeV-Bereich.



Beschleuniger



Targetkammer

Messung kleiner Reaktionsraten

Problem: Von 10^{34} Stößen zwischen einem Helium-Kern und einem Zinn-Kern führt nur einer zum „Erfolg“ .

→ Man muss die „erfolgreichen“ Reaktionen im Labor sehr empfindlich nachweisen !

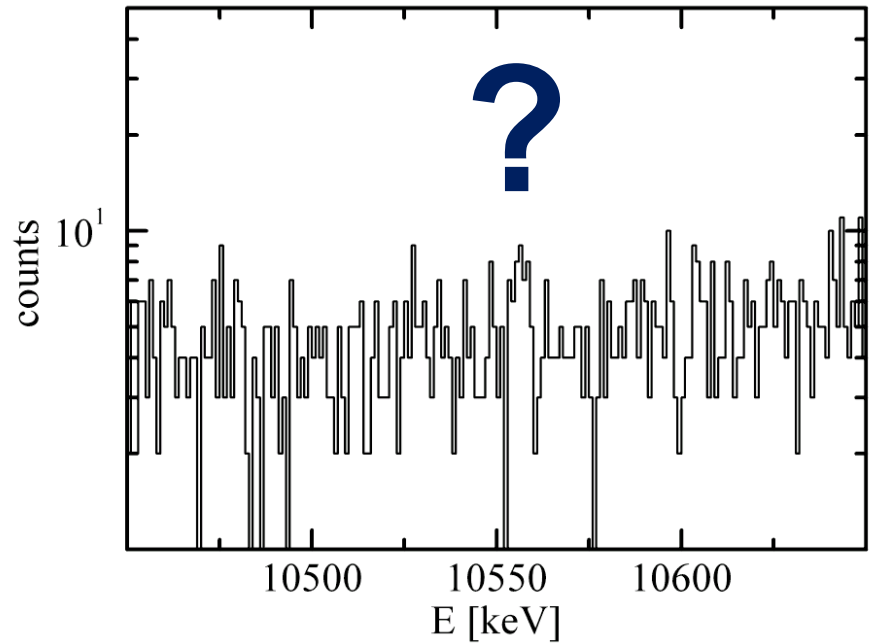
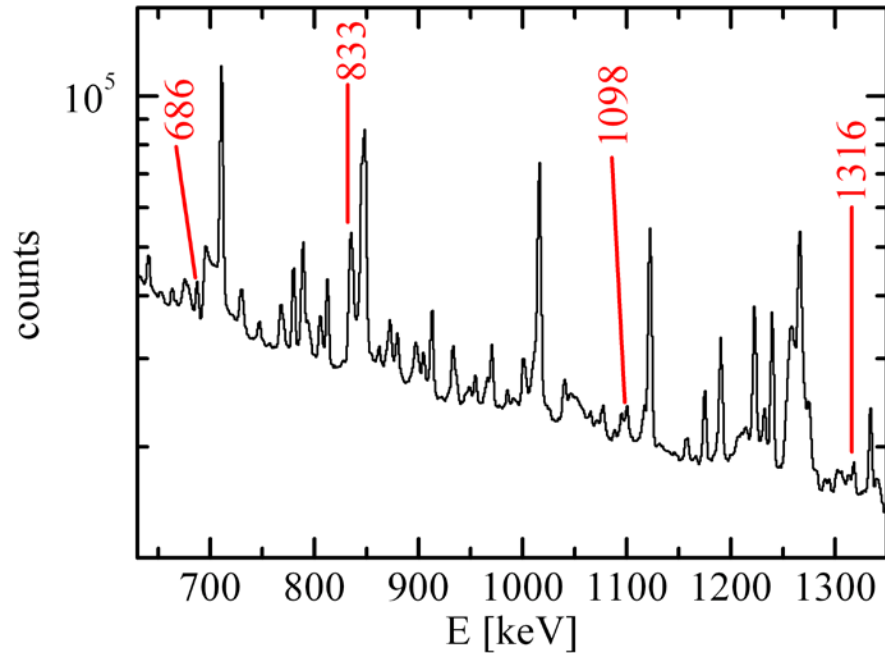
Messung kleiner Reaktionsraten

Indirekter Nachweis der erzeugten Isotope durch γ -Spektroskopie („Fingerabdruck“)



HORUS
Institut für Kernphysik

Messung kleiner Reaktionsraten



Manchmal ist ein Fingerabdruck nicht mehr zu erkennen.

→ **Direkter Nachweis** des erzeugten Isotopes in der Probe durch eine sehr genaue Messung aller Kernmassen.

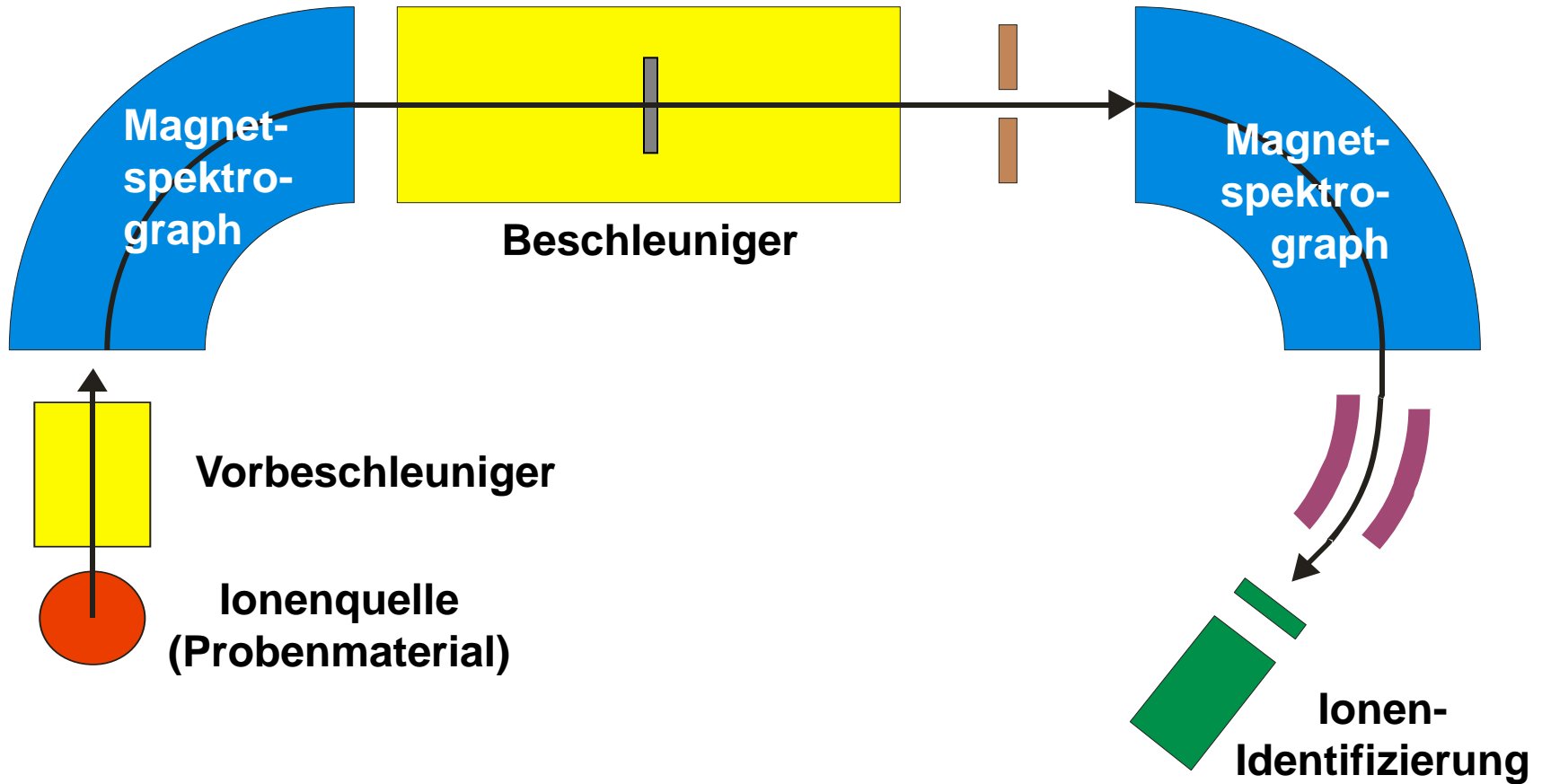
(z.B. Masse Zinn=114, Masse Tellur=118, aber in der Probe ist 10¹⁵ mal mehr Zinn !)

Sensitivität 10^{-15} = 1 Sandkorn im Kölner Dom

(umbautes Volumen
ca. 407.000 m³)



Beschleuniger-Massen-Spektrometrie (AMS)



Extrem hohe Sensitivität: Isotopenverhältnis bis 10^{-15}

Beschleuniger-Massen-Spektrometrie (AMS)

**Nachweis kleinster Mengen
von radioaktivem ^{14}C (Datierung)**

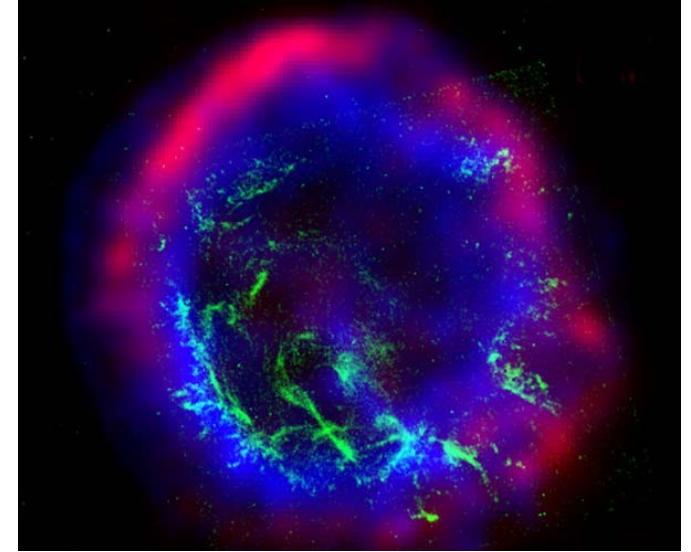


**Nachweis kleinster Mengen
kosmogener, radioaktiver
Nuklide (^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl)**



Beschleuniger-Massen-Spektrometrie (AMS)

**Aber auch:
Nachweis kleinster Mengen
im Labor erzeugter
radioaktiver Atomkerne**



Ein neuer 6 MV Tandetron-Beschleuniger an der Universität zu Köln

Beteiligt: Geowissenschaften, Ur- und Frühgeschichte, Kernphysik



CologneAMS (Start: 2010)

A. Dewald, J. Jolie, and A. Zilges, Nuclear Physics News 18 (2008) 26

Unterstützt durch: **DFG**



Universität
zu Köln



Wir sind alle Sternenstaub – Die Entstehung der Elemente im Universum

Eine vollständige Beschreibung der
Synthese der Elemente benötigt:

Astrophysik UND **Kernphysik**



10^{15} m



10^{-15} m

Wir sind alle Sternenstaub – Die Entstehung der Elemente im Universum

**M. Büssing, J. Endres, M. Elvers, J. Hasper,
L. Netterdon, M. Zvolisky, A. Z.**

Institut für Kernphysik, Universität zu Köln

S. Müller, A. Sauerwein, D. Savran, K. Sonnabend

Institut für Kernphysik, TU Darmstadt

Unterstützt durch die **DFG** und das BMBF

Mehr Informationen und Publikationen: www.zilges.de



20. - 24.9.2009

Köln, Gürzenich

Wissenschaftsfestival

Eintritt frei

**Adresse:
Milchstraße**

2009
highlights der **physik**

<http://www.physik-highlights.de/>