



Prof. Dr. Andreas Türler :: Laborleiter LRC :: Paul Scherrer Institut

## Labor für Radiochemie (LRC)

NES präsentiert: Kompetenzen und Highlights






# Mission des LRC

SWAN Isotopen AG  
LHEP / UNIBE  
Insel Spital /  
UNIBE

Oeschger Zentrum /  
UNIBE



Radiopharmazie Bern  
Dr. Josue Moreno




Radionuklide in der Umwelt  
PD Dr. Sönke Szidat

$^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ ,  $^{177}\text{Lu}$        $^{14}\text{C}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , ...  
 $^{43,44,47}\text{Sc}$ ,  $^{149,152,155,161}\text{Tb}$ ,  
 $^{287}\text{Fl}$ ,  $^{283}\text{Cn}$ ,  $^{265}\text{Sg}$ , ...       $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$ , ...



Schwere Elemente  
Dr. Robert Eichler

$^{7,10}\text{Be}$ ,  $^{44}\text{Ti}$ ,  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Fe}$ ,  
 $^{209,210}\text{Po}$ ...



Radionuklidentwicklung  
Dr. Nick van der Meulen



Radwaste Analytics  
Dr. Dorothea Schumann

Flerov Labor, Dubna  
JAEA und RIKEN, Japan  
Helmholtzzentrum GSI, Darmstadt

Zentrum für  
Radiopharmazeutische  
Wissenschaften / PSI

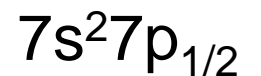
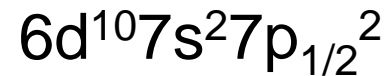
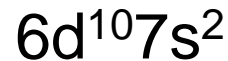
# Das Periodensystem

|          |          |              |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|----------|----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>1</b> |          |              |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           | <b>18</b> |
| 1<br>H   | <b>2</b> |              |           |           |           |           |           |           |           |           |           | <b>13</b> | <b>14</b> | <b>15</b> | <b>16</b> | <b>17</b> | 2<br>He   |
| 3<br>Li  | 4<br>Be  |              |           |           |           |           |           |           |           |           |           | 5<br>B    | 6<br>C    | 7<br>N    | 8<br>O    | 9<br>F    | 10<br>Ne  |
| 11<br>Na | 12<br>Mg | <b>3</b>     | <b>4</b>  | <b>5</b>  | <b>6</b>  | <b>7</b>  | <b>8</b>  | <b>9</b>  | <b>10</b> | <b>11</b> | <b>12</b> | 13<br>Al  | 14<br>Si  | 15<br>P   | 16<br>S   | 17<br>Cl  | 18<br>Ar  |
| 19<br>K  | 20<br>Ca | 21<br>Sc     | 22<br>Ti  | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni  | 29<br>Cu  | 30<br>Zn  | 31<br>Ga  | 32<br>Ge  | 33<br>As  | 34<br>Se  | 35<br>Br  | 36<br>Kr  |
| 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y      | 40<br>Zr  | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd  | 47<br>Ag  | 48<br>Cd  | 49<br>In  | 50<br>Sn  | 51<br>Sb  | 52<br>Te  | 53<br>I   | 54<br>Xe  |
| 55<br>Cs | 56<br>Ba | 57-71<br>La  | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt  | 79<br>Au  | 80<br>Hg  | 81<br>Tl  | 82<br>Pb  | 83<br>Bi  | 84<br>Po  | 85<br>At  | 86<br>Rn  |
| 87<br>Fr | 88<br>Ra | 89-103<br>Ac | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110<br>Ds | 111<br>Rg | 112<br>Cn | 113<br>Nh | 114<br>Fl | 115<br>Mc | 116<br>Lv | 117<br>Ts | 118<br>Og |

Lanthanides

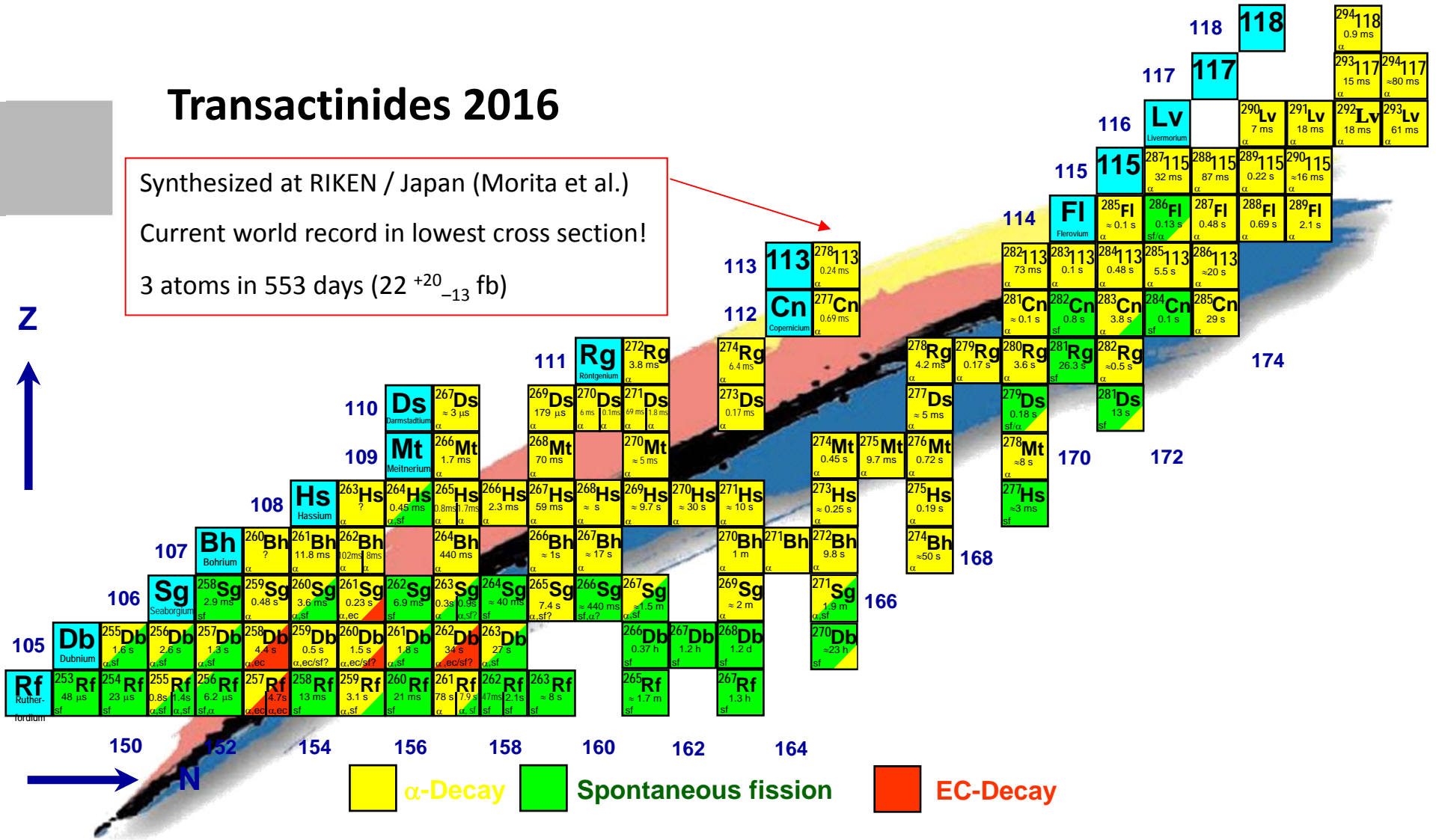
Actinides

|          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 57<br>La | 58<br>Ce | 59<br>Pr | 60<br>Nd | 61<br>Pm | 62<br>Sm | 63<br>Eu | 64<br>Gd | 65<br>Tb | 66<br>Dy | 67<br>Ho | 68<br>Er  | 69<br>Tm  | 70<br>Yb  | 71<br>Lu  |
| 89<br>Ac | 90<br>Th | 91<br>Pa | 92<br>U  | 93<br>Np | 94<br>Pu | 95<br>Am | 96<br>Cm | 97<br>Bk | 98<br>Cf | 99<br>Es | 100<br>Fm | 101<br>Md | 102<br>No | 103<br>Lr |



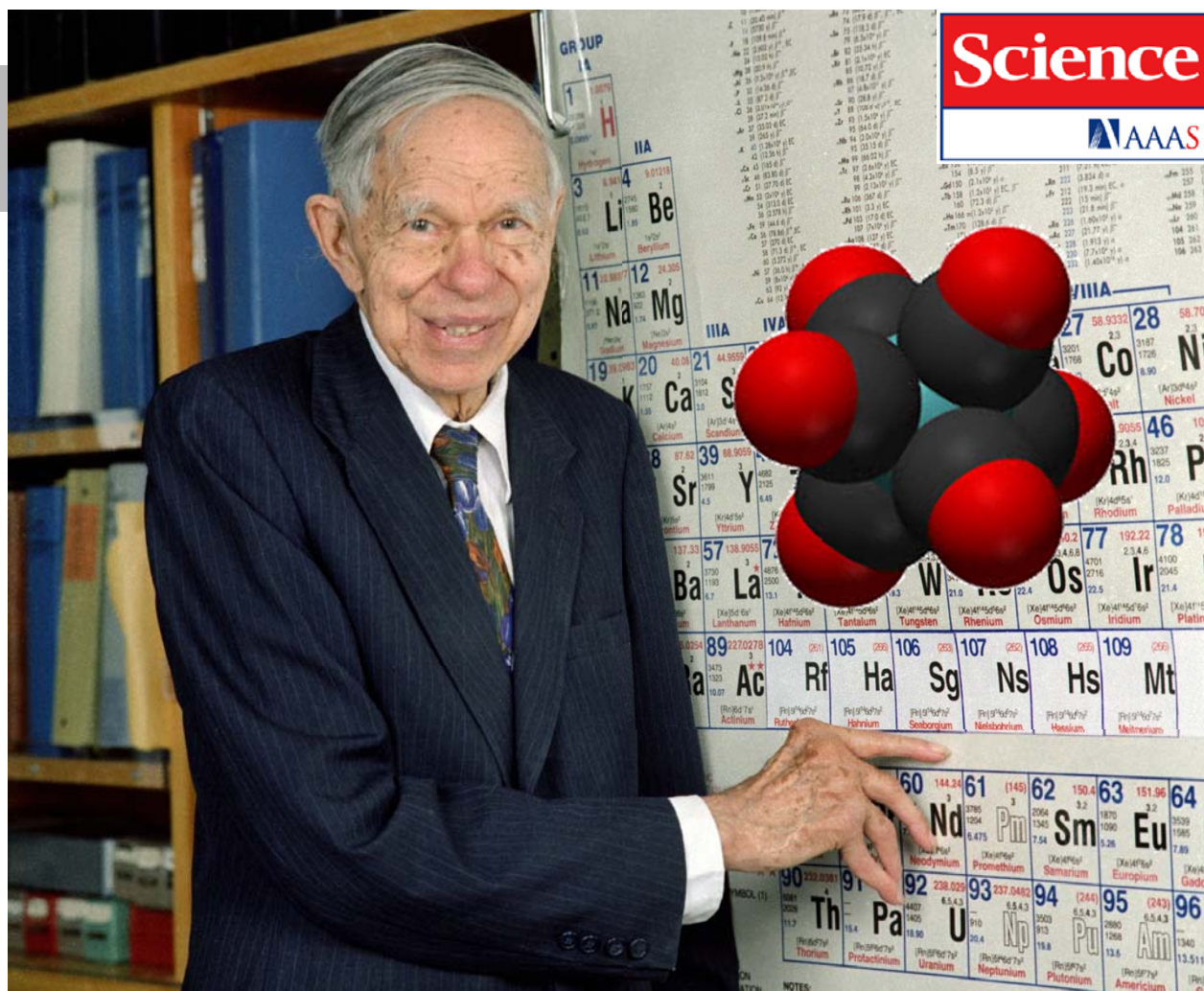
## Transactinides 2016

Synthesized at RIKEN / Japan (Morita et al.)  
 Current world record in lowest cross section!  
 3 atoms in 553 days ( $22^{+20}_{-13}$  fb)





# Synthese und Nachweis eines Seaborgium Carbonyl Komplexes

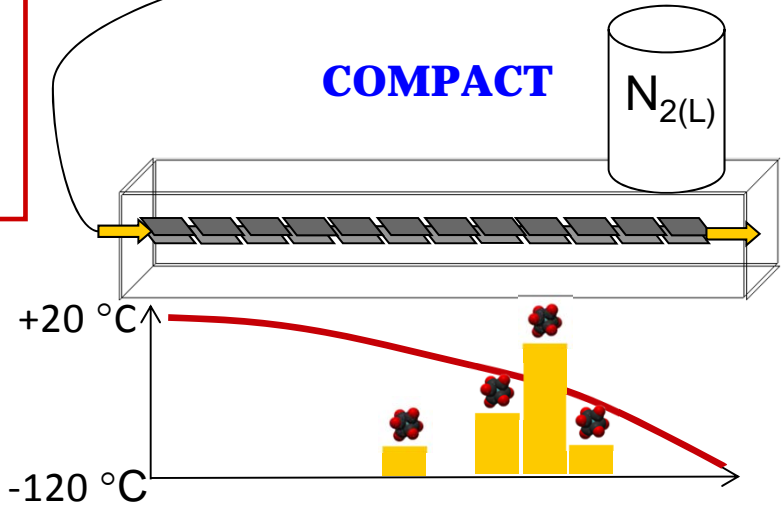
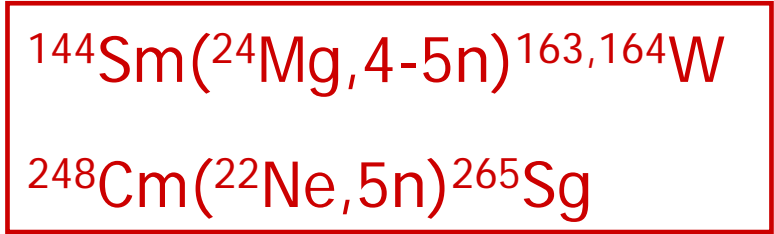
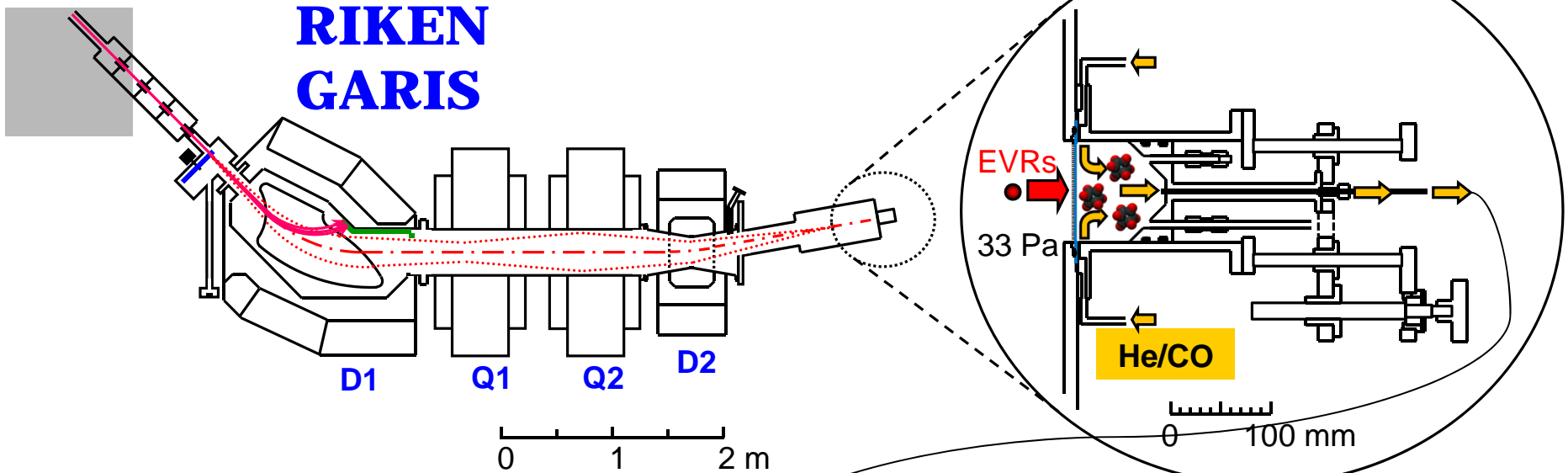


*Science* **345**, 1491 (2014);  
DOI: 10.1126/science.1255720

Mainz – GSI – PSI – Bern – Berkeley – Tokai – Riken – Lanzhou collab.

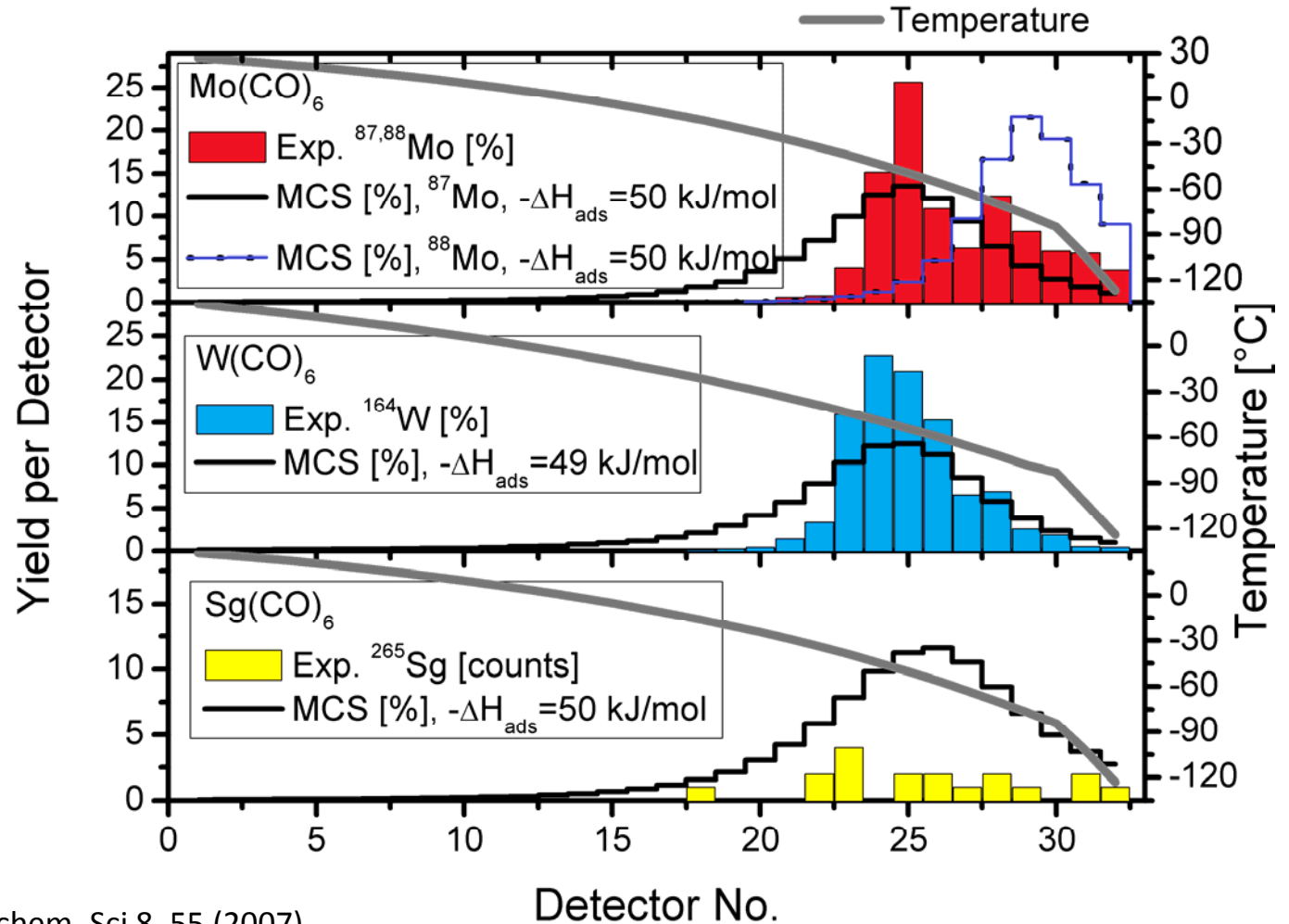
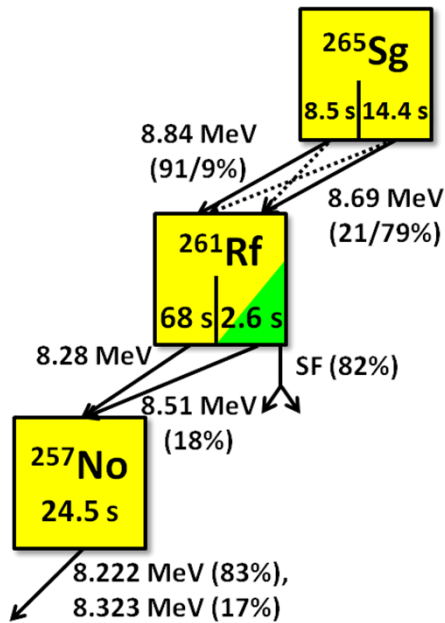
# Carbonyl Experimente bei GARIS/RIKEN

## Gas-jet Transport System



# Sg(CO)<sub>6</sub> a Superheavy Carbonyl Complex

Mainz – GSI – PSI – Bern – Berkeley – Tokai – Riken – Lanzhou collaboration  
 @ GARIS RIKEN (Japan)



H. Haba et al., J. Nucl. Radiochem. Sci 8, 55 (2007)

H. Haba et al., Phys. Rev. C85, 024611 (2012)



# Radiochemische Analyse exotischer, langlebiger und sicherheitsrelevanter Radionuklide

- Bestimmung relevanter Radionuklide für den sicheren Betrieb, die Entsorgung und Endlagerung von Komponenten nuklearer Anlagen
- R&D zur Gewinnung nuklearer Daten für das Design und den Betrieb von «accelerator driven systems» (ADS) und Spallationsneutronenquellen
- Für das PSI: Bestimmung des Radionuklidinventars von
  - SINQ Komponenten und Konstruktionsmaterialien
  - SINQ Target
  - Zement
  - Target E
  - MEGAPIE LBE

Relevanz der Radionuklide basierend auf: Zerfallsart, Halbwertszeit, totale Aktivität, chemische und physikalische Eigenschaften.

Beispiele:  $^{208-210}\text{Po}$ ,  $^{194}\text{Hg}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{148}\text{Gd}$  und andere Lanthaniden

# Exotische Radionuklide (ERAWAST Projekt)

ERAWAST – Exotic Radionuclides from Accelerator Waste for Science and Technology

## Kupfer Strahlstopp

- $^{44}\text{Ti}$ ,  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{60}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{32}\text{Si}$
- $^{60}\text{Co}$  – 5 GBq



## Myon Produktionsstation

- Betrieb 1-3 Jahre
- Beam Dosis 4 – 11 Ah
- Quelle von  $^{10}\text{Be}$



**SINO Target Irradiation Program-STIP**  
 $^{44}\text{Ti}$ ,  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{26}\text{Al}$



## SINO Kühlwasser

$^{7}\text{Be}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{88}\text{Y}$

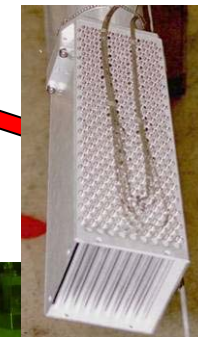
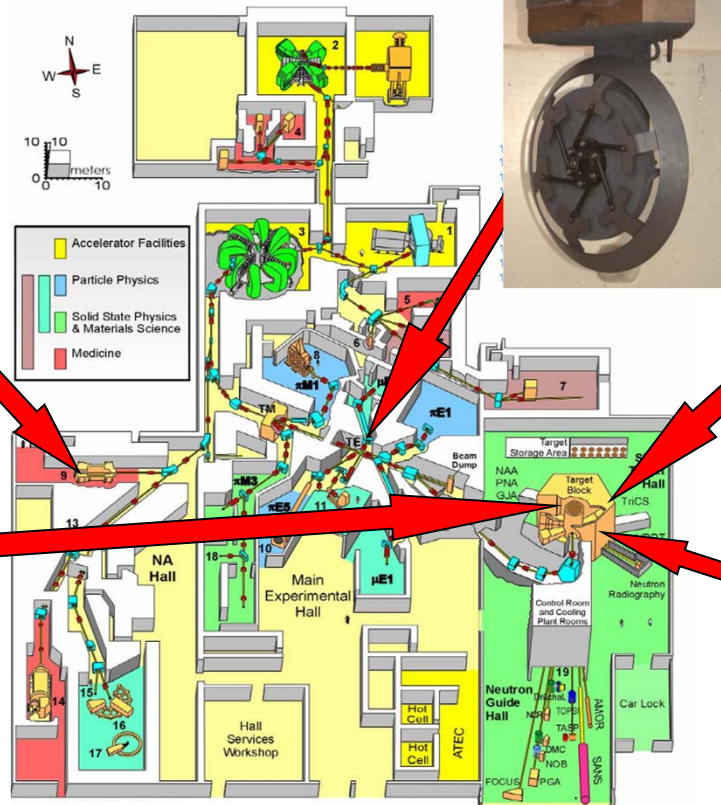
Spezielle Bestrahlungspositionen mit 590 MeV Protonen

V für  $^{44}\text{Ti}$  Produktion

Bi für  $^{205}\text{Pb}$  Produktion

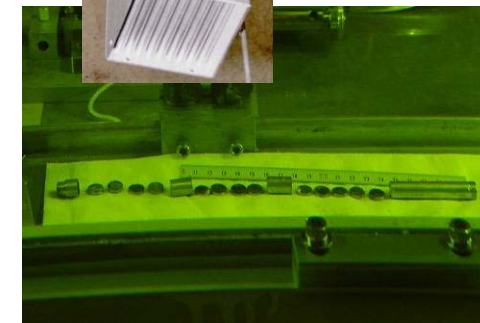
## Spezielle Neutronenbestrahlungen an SINO

$^{68}\text{Ge}$ , Tracer

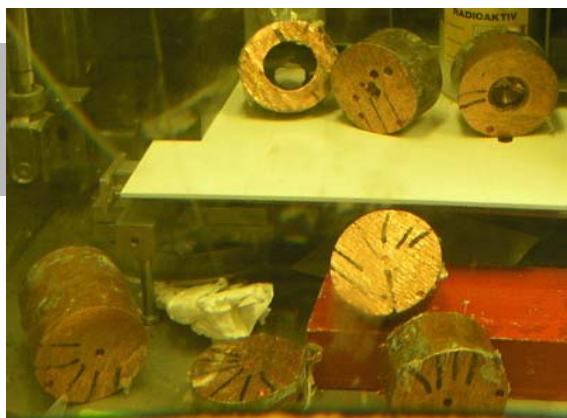


## SINO Target

- $^{207}\text{Bi}$ ,  $^{172}\text{Hf}$ ,
- $^{173}\text{Lu}$ ,  $^{194}\text{Hg}$ ,
- $^{202}\text{Pb}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,
- $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{44}\text{Ti}$



# Neubestimmung der Halbwertszeit von $^{60}\text{Fe}$ (r-Process Nucleus!)



Eine  $^{60}\text{Fe}$  Probe wurde chemisch aus einem Cu-Strahlstopp des Ringbeschleunigers extrahiert, **gammaskopimetrisch** vermessen an der **TU München** und **massenspektrometrisch** am **PSI Hotlabor (AHL/NES)** bestimmt.

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{A_{^{60}\text{Fe}}} \times \frac{N_{^{60}\text{Fe}}}{N_{\text{Fe}}} \times N_{\text{Fe}}$$

**Resultat:**  $^{60}\text{Fe}$  zerfällt wesentlich langsamer als früher bestimmt!

**Referenz Halbwertszeit**

**$(1.49 \pm 0.27) \times 10^6 \text{ y}$**

*Kutschera et al, 1984*

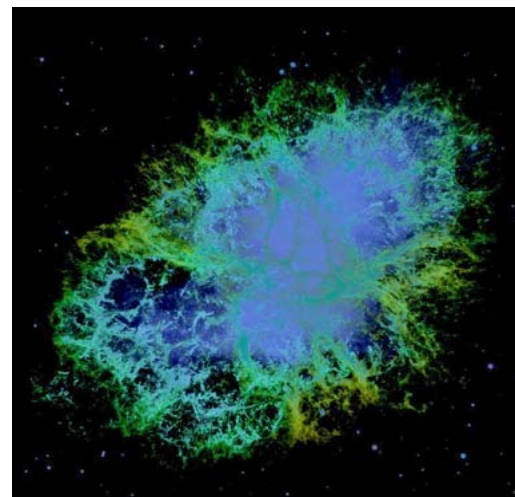
**Neue Halbwertszeit**

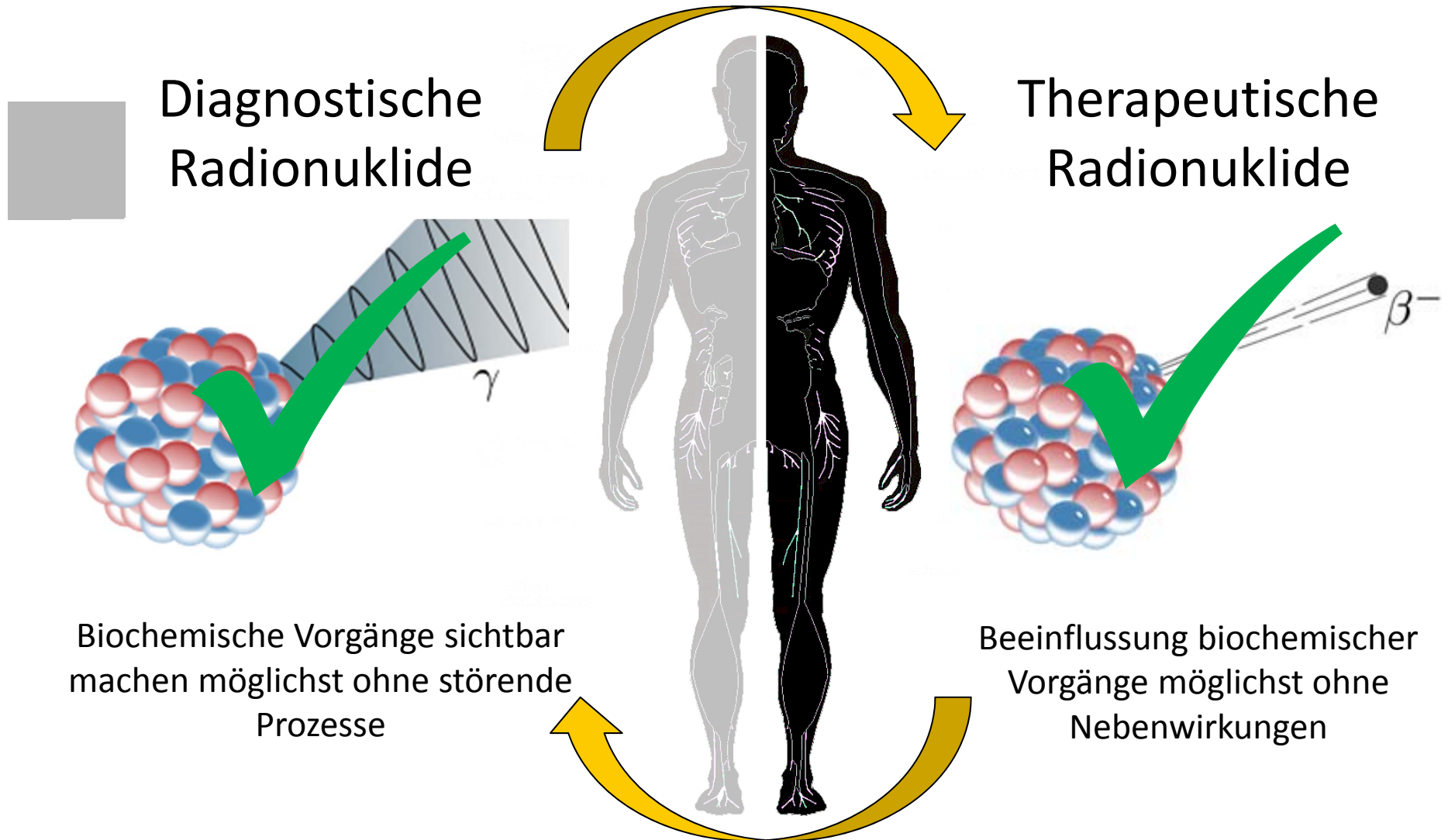
**$(2.62 \pm 0.04) \times 10^6 \text{ y}$**

*Korschinek et al, Phys. Rev. Lett., 2009*

**Impact:** Kosmische Prozesse müssen neu bewertet werden!

*(<http://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/0,1518,645644,00.html>)*





## Radiopharmazeutika: Paradebeispiel für «Theragnostics»



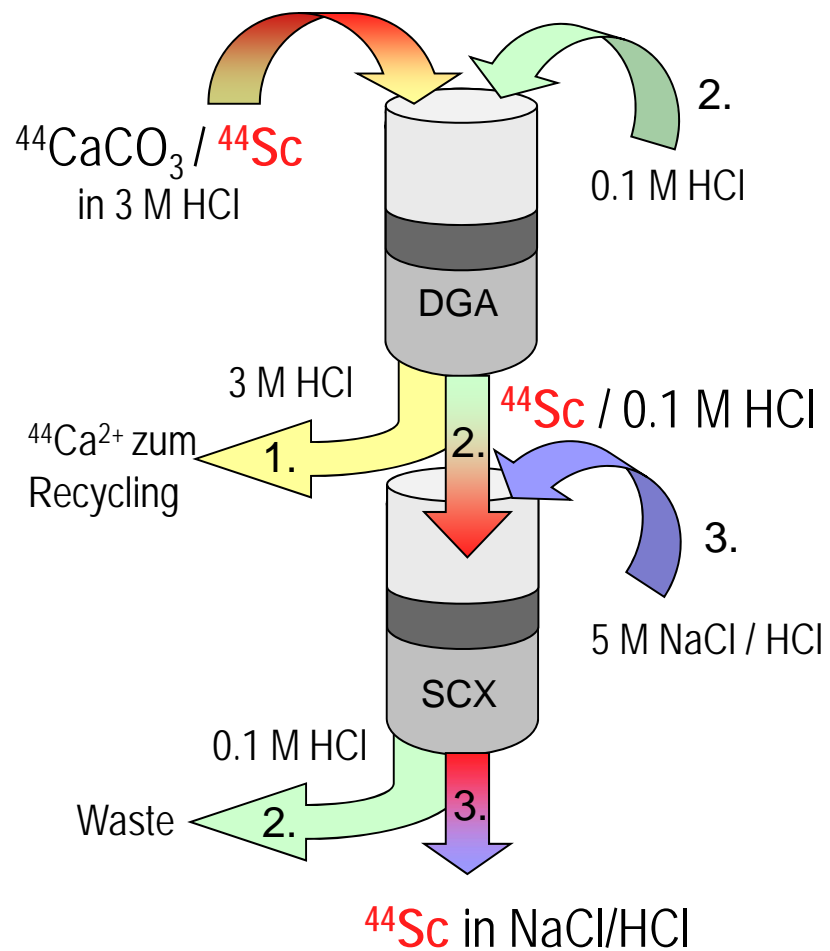
# Beispiele für geeignete theragnostische Paare

| PET Nuclide      | 1<br>% $\beta^+$ | 2<br><E $_{\beta^+}$ > | 3<br>E $_{\gamma}$ , I $_{\gamma}$ | 4<br>T $_{1/2}$ | 5<br>Prod. | 6<br>Pharm. | 7<br>Pair?            |
|------------------|------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------|------------|-------------|-----------------------|
| <sup>18</sup> F  | ✓<br>96.7 %      | ✓<br>249.8 keV         | ✓                                  | ✓<br>1.83.h     | ✓          | ✓           | ✗                     |
| <sup>43</sup> Sc | ✓<br>88.1 %      | ✓<br>476.0 keV         | ✓<br>373 keV 23%                   | ✓<br>3.89 h     | ✓          | ✓           | ✓<br><sup>47</sup> Sc |
| <sup>44</sup> Sc | ✓<br>94.3 %      | ✓<br>632.0 keV         | ✗<br>1157 keV 100%                 | ✓<br>3.97 h     | ✓          | ✓           | ✓<br><sup>47</sup> Sc |
| <sup>45</sup> Ti | ✓<br>84.8 %      | ✓<br>438.9 keV         | ✓                                  | ✓<br>3.08 h     | ✓          | ✗           | ✗                     |
| <sup>52</sup> Mn | ✗<br>29.6 %      | ✓<br>242.0 keV         | ✗<br>1434 keV 100%                 | ✓<br>5.59 d     | ✓          | ✗           | ✗                     |
| <sup>64</sup> Cu | ✗<br>17.6 %      | ✓<br>278.2 keV         | ✓                                  | ✓<br>12.7 h     | ✓          | ✓           | ✓<br><sup>67</sup> Cu |
| <sup>68</sup> Ga | ✓<br>88.9 %      | ✓<br>829.5 keV         | ✓<br>1077 keV 3%                   | ✗<br>68 m       | ✗          | ✓           | ✓<br><sup>67</sup> Ga |
| <sup>86</sup> Y  | ✗<br>31.9%       | ✓<br>660.0 keV         | ✗<br>1077 keV 83%                  | ✓<br>14.7 h     | ✓          | ✓           | ✓<br><sup>90</sup> Y  |
| <sup>89</sup> Zr | ✗<br>22.7%       | ✓<br>396.0 keV         | ✗<br>909 keV 99%                   | ✓<br>78.4 h     | ✓          | ✓           | ✗                     |

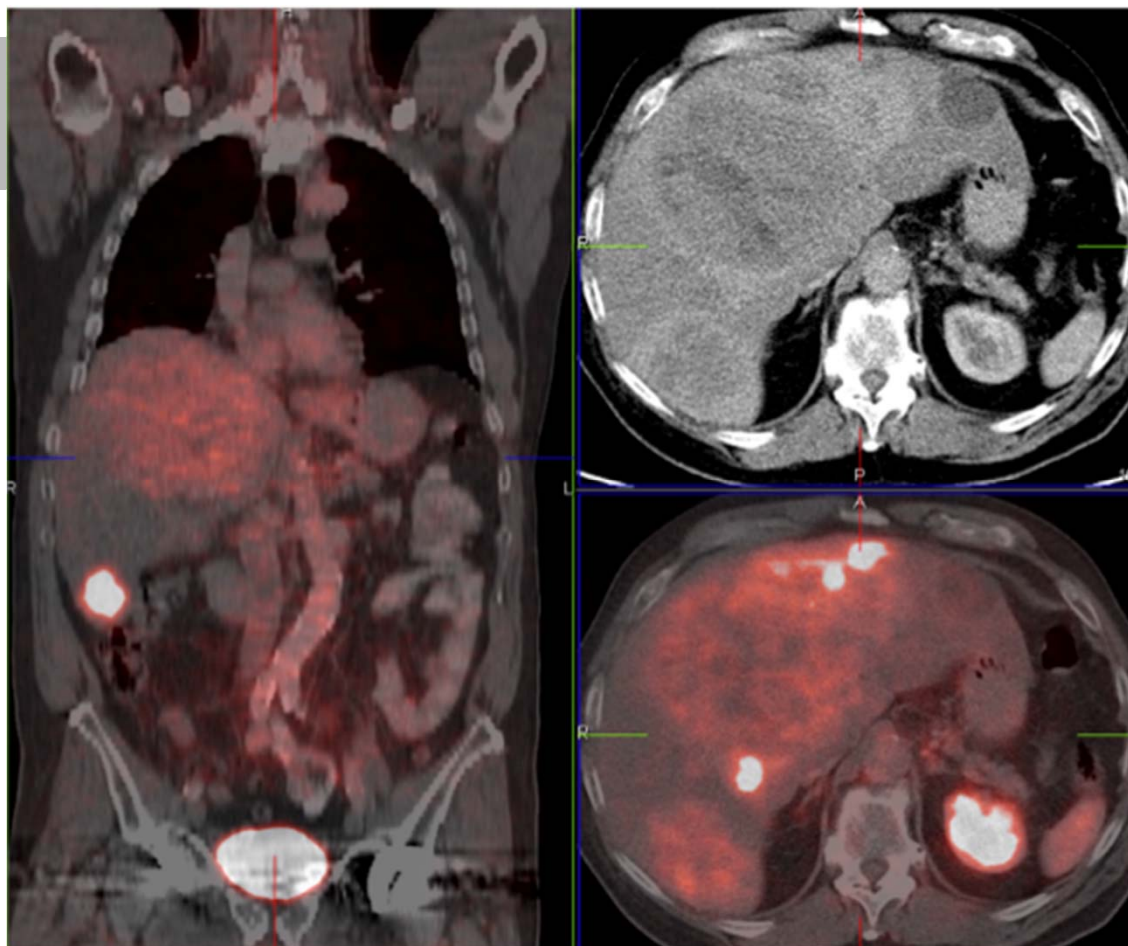
# Zyklotronproduktion: $^{44}\text{Ca}(p,n)^{44}\text{Sc}$

## Chemical Separation Procedure

Zeit: ~ 20 min



## $^{44}\text{Sc}$ PET/CT Bild eines Patienten



### THERANOSTICS

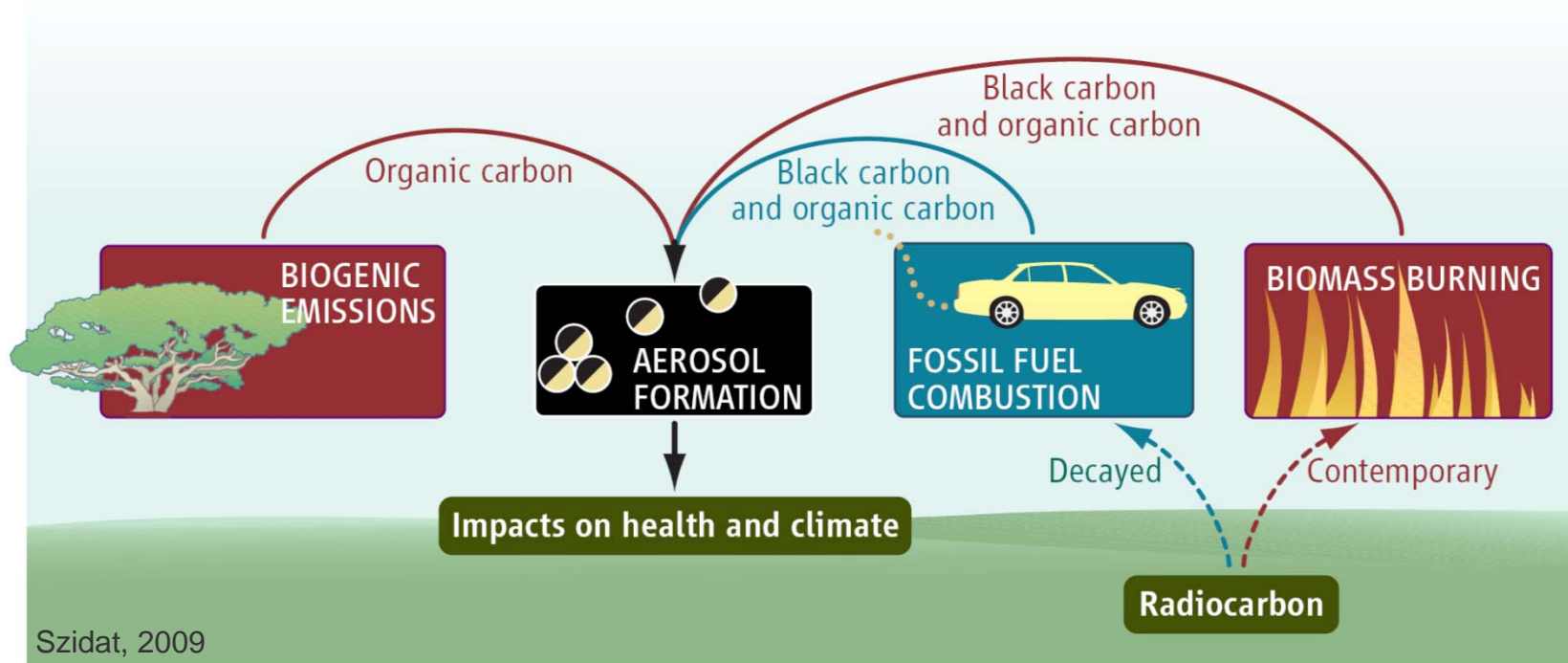
Center for Molecular  
Radiotherapy –

Zentralklinik Bad Berka,  
Prof. R. Baum

$^{44}\text{Sc}$  wurde am PSI produziert  
und > 500 km nach Bad Berka  
geschickt

PET/CT Bild eines Patienten  
60 min. p.i. mit  $^{44}\text{Sc}$ -DOTATOC

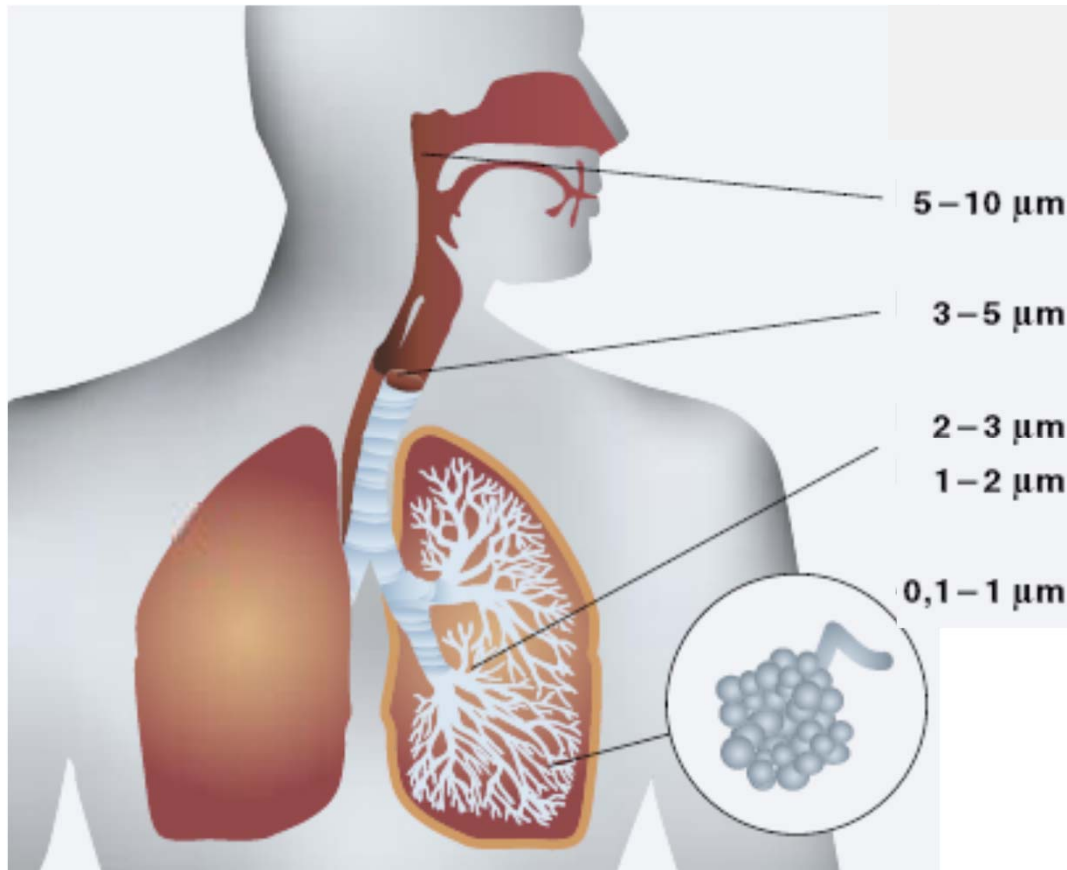
# Fossile und nicht-fossile Quellen kohlenstoffhaltiger Aerosole



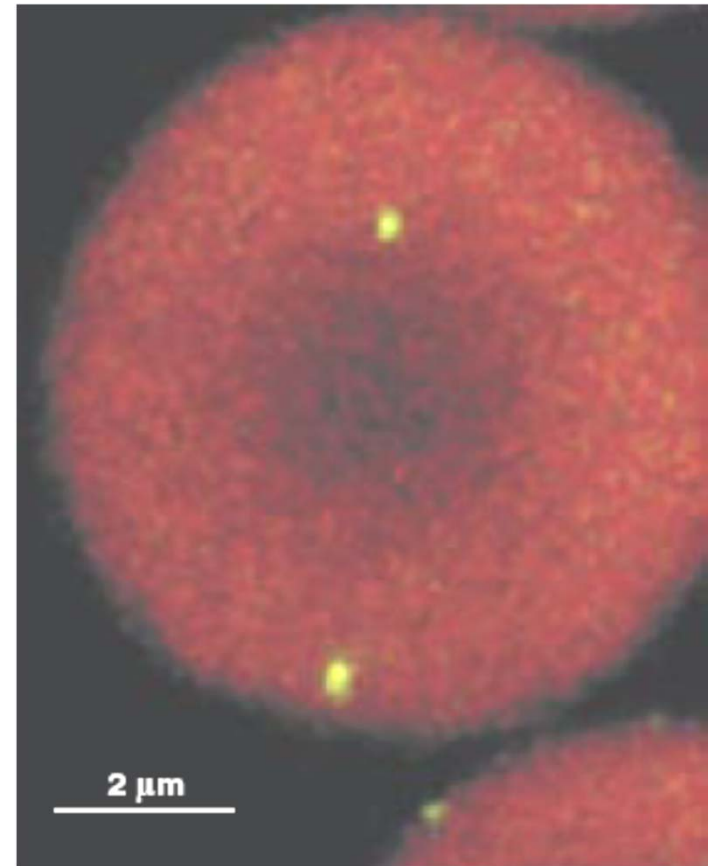
- > Primärer OC&EC: Direkte Aerosolemission
- > Sekundärer OC: Bildung von Aerosolen durch Oxidation von VOCs



# Lungengängigkeit von Aerosolen

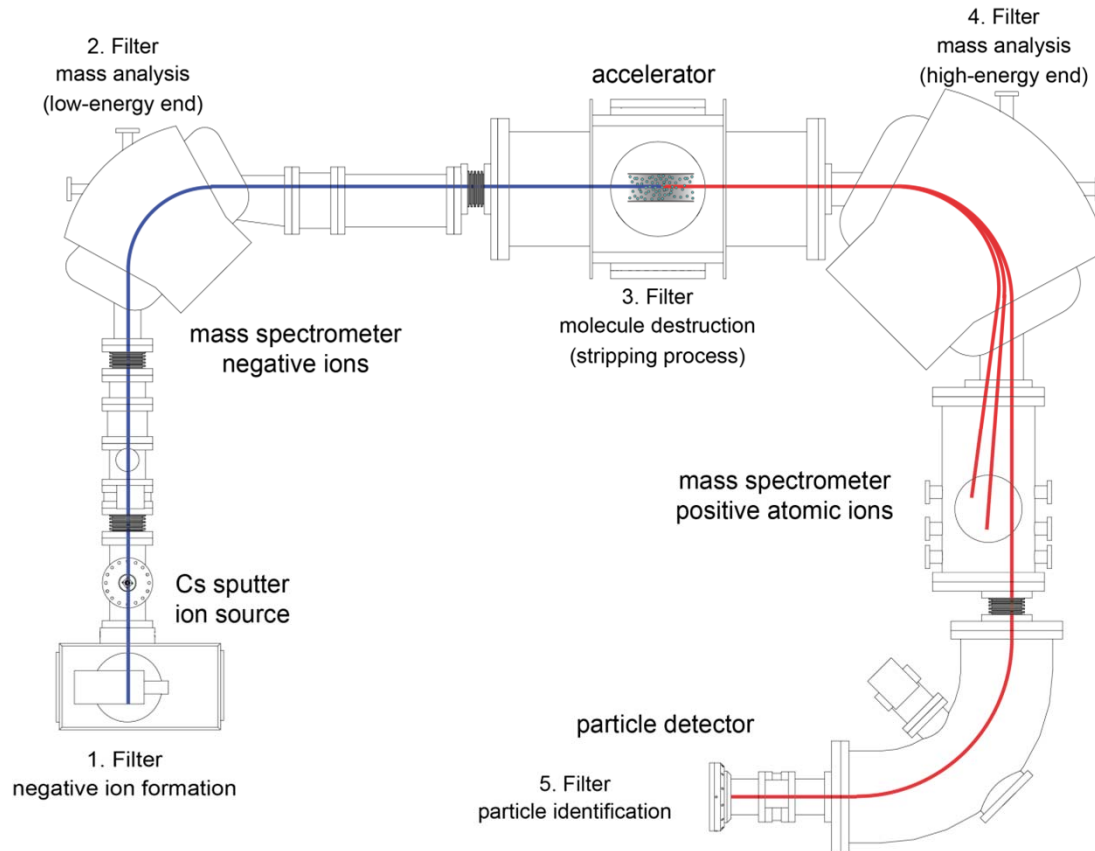


BAFU, 2005



Gehr/SNF, 2006

# $^{14}\text{C}$ Analytik mit Beschleuniger-Massenspektroskopie (AMS)



Synal, in press

- Separation von  $^{14}\text{C}$  von  $^{14}\text{N}$  und  $^{13}\text{CH} / ^{12}\text{CH}_2$
- Bestimmung von 1-1000  $\mu\text{gC}$  mit  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  von  $10^{-15}$ - $10^{-12}$  ( $\mu\text{Bq}$  Bereich)

# Anwendung für NES: Bestimmung von $^{14}\text{C}$ in Reaktorstahl (E. Wieland/S. Szidat)





## Die Rolle der Radiochemie in der Grundlagen- und angewandten Forschung :

... die Radiochemie kann zu einer Reihe von Themen innerhalb NES signifikante Beiträge liefern

... das LRC verfolgt mehrere Kooperationen mit anderen Labors innerhalb NES

... am LRC sprechen wir eine Sprache die im Bereich NES verstanden wird und umgekehrt

... das LRC passt hervorragend in den Bereich NES!





## Liste der internationalen Kollaborationspartner

- GSI Helmholtzzentrum Darmstadt & Mainz University, Germany
- Lund University, Sweden
- Oak Ridge National Laboratory, United States
- CERN, Geneva, Switzerland
- Flerov Laboratory, Russia
- RIKEN & JAEA, Japan
- Lawrence Berkeley National Laboratory, United States
- Lawrence Livermore National Laboratory, United States
- Institute of Modern Physics, China
- Saha Institute of Nuclear Physics, India
- Institute of Electron Technology, Poland
- University of Jyväskylä, Finland
- University of Oslo, Norway
- University of Liverpool, United Kingdom

