

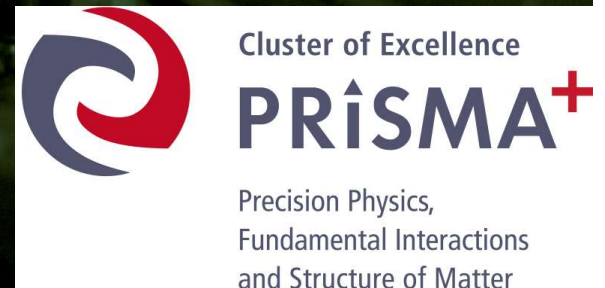
Das Protonen-Radius Rätsel

Wie groß ist ein Proton?

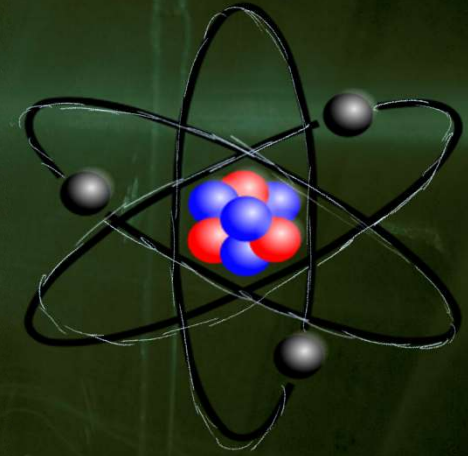
Randolf Pohl

Johannes Gutenberg-Universität
Exzellenzcluster PRISMA⁺

Physik für Chemiker*innen
22.04.2022



Heute



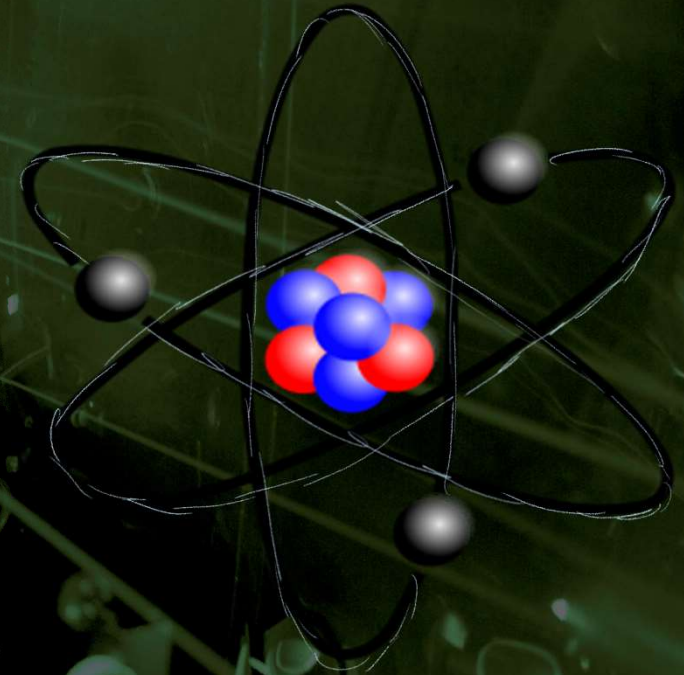
- Atome
- Protonen, Elektronen
- Teilchenbeschleuniger
- Elementarteilchen: Myonen
- Laser
- und (k)eine Antwort auf die Frage:
 “Wie groß ist das Proton?”
- Viel Spaß!

Periodensystem der Elemente

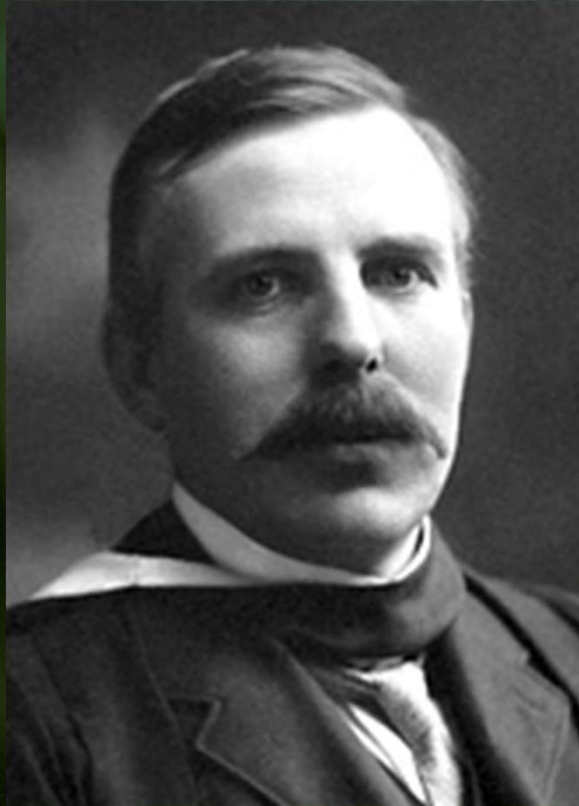
Legende Symbol schwarz = Feststoff blau = Flüssigkeit rot = Gas grau = unbekannt unterstrichen = radioaktiv Dichte rot = kg / m³ schwarz = kg / dm³ grau = unbestimmt Serie (Flächenfarbe) Alkalimetalle Erdalkalimetalle Übergangsmetalle Lanthanoide Actinoide Metalle Halbmetalle Nichtmetalle Halogene Edelgase unbekannt Schraffur durchgehend = natürliches Element schraffiert = künstliches Element Ordnungszahl Atommasse Symbol Name Elektronegativität Dichte Serie 17 35,451 Cl Chlor 3,16 3,21 Serie Gruppe 13 14 15 16 17 18 5 10,813 B Bor 2,04 2,46 Al Aluminium 1,61 2,70 6 12,011 C Kohlenstoff 2,55 2,26 Si Silicium 1,9 2,34 7 14,007 N Stickstoff 3,04 1,25 P Phosphor 2,19 2,69 8 15,999 O Sauerstoff 3,44 1,43 S Schwefel 2,58 2,07 9 18,998 F Fluor 3,98 1,70 Cl Chlor 3,16 3,21 10 20,180 Ne Neon 0,90 — Ar Argon 0,82 1,78 11 22,990 Li Lithium 0,98 0,53 Na Natrium 0,93 0,97 12 24,305 Be Beryllium 1,57 1,85 Mg Magnesium 1,31 1,74 13 26,981 Al Aluminium 1,61 2,70 14 28,085 Si Silicium 1,9 2,34 15 30,974 P Phosphor 2,19 2,69 16 32,067 S Schwefel 2,58 2,07 17 35,451 Cl Chlor 3,16 3,21 18 39,948 Ar Argon 0,82 1,78 19 39,098 K Kalium 0,82 0,86 20 40,078 Ca Calcium 1,0 1,55 21 44,956 Sc Scandium 1,36 2,98 22 47,867 Ti Titan 1,54 4,50 23 50,941 V Vanadium 1,63 6,11 24 51,996 Cr Chrom 1,66 7,14 25 54,938 Mn Mangan 1,55 7,43 26 55,845 Fe Eisen 1,83 7,87 27 58,933 Co Cobalt 1,91 8,90 28 58,693 Ni Nickel 1,88 8,91 29 63,546 Cu Kupfer 1,9 8,92 30 65,380 Zn Zink 1,65 7,14 31 69,723 Ga Gallium 1,81 5,90 32 72,631 Ge Germanium 2,01 5,32 33 74,922 As Arsen 2,18 5,73 34 78,972 Se Selen 2,55 4,82 35 79,904 Br Brom 2,96 3,12 36 83,798 Kr Krypton — 3,75 37 85,468 Rb Rubidium 0,82 1,53 38 87,622 Sr Strontium 0,95 2,63 39 88,906 Y Yttrium 1,22 4,47 40 91,224 Zr Zirkonium 1,33 6,50 41 92,906 Nb Niob 1,6 8,57 42 95,95 Mo Molybdän 2,16 10,28 43 (97) Tc Technetium 1,9 11,50 44 101,07 Ru Ruthenium 2,2 12,37 45 102,905 Rh Rhodium 2,28 12,45 46 106,42 Pd Palladium 2,2 12,02 47 107,868 Ag Silber 1,93 10,49 48 112,414 Cd Cadmium 1,69 8,64 49 114,818 In Indium 1,78 7,31 50 118,711 Sn Zinn 1,96 7,26 51 121,760 Sb Antimon 2,05 6,70 52 127,60 Te Tellur 2,66 6,25 53 126,904 I Jod 2,1 4,94 54 131,294 Xe Xenon 2,6 5,90 55 132,906 Cs Caesium 0,79 1,90 56 137,328 Ba Barium 0,89 3,59 57 138,906 La Lanthan 1,1 6,15 58 - 71 siehe unten 58 140,116 Ce Cer 1,12 6,77 59 140,908 Pr Praseodym 1,13 6,48 60 144,242 Nd Neodym 1,14 7,01 61 (145) Pm Promethium 1,13 7,22 62 150,360 Sm Samarium 1,17 7,54 63 151,964 Eu Europium 1,2 5,25 64 157,25 Gd Gadolinium 1,2 7,89 65 158,925 Tb Terbium 1,1 8,25 66 162,500 Dy Dysprosium 1,22 8,55 67 164,930 Ho Holmium 1,23 8,78 68 167,259 Er Erbium 1,24 9,05 69 168,934 Tm Thulium 1,25 9,32 70 173,045 Yb Ytterbium 1,1 6,97 71 174,967 Lu Lutetium 1,27 9,84 72 223,038 Th Thorium 1,5 11,72 73 231,036 Pa Protactinium 1,3 15,4 74 238,029 U Uran 1,36 18,95 75 (237) Np Neptunium 1,38 20,45 76 (244) Pu Plutonium 1,3 19,82 77 (243) Am Americium 1,28 13,67 78 (247) Cm Curium 1,3 13,51 79 (247) Bk Berkelium 1,3 14,78 80 (251) Cf Californium 1,3 15,13 81 (252) Es Einsteinium ? 1,3 82 (257) Fm Fermium ? 1,3 83 (258) Md Mendelevium ? 1,3 84 (259) No Nobelium ? 1,3 85 (262) Lr Lawrencium ? 1,3 </																	
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Atome!

- **Atome** haben einen **Kern**, der von Elektronen umkreist wird
- Der **Kern** besteht aus **Protonen** und **Neutronen**
- **Protonen** bestehen aus Quarks, die von den Gluonen zusammen gehalten werden
- **Protonen** sind also **ausgedehnte Objekte**
- Elektronen sind **punktförmig**
- Wasserstoff ist das einfachste aller Atome:
 - ein (ausgedehntes) **Proton**, und
 - ein (punktförmiges) Elektron

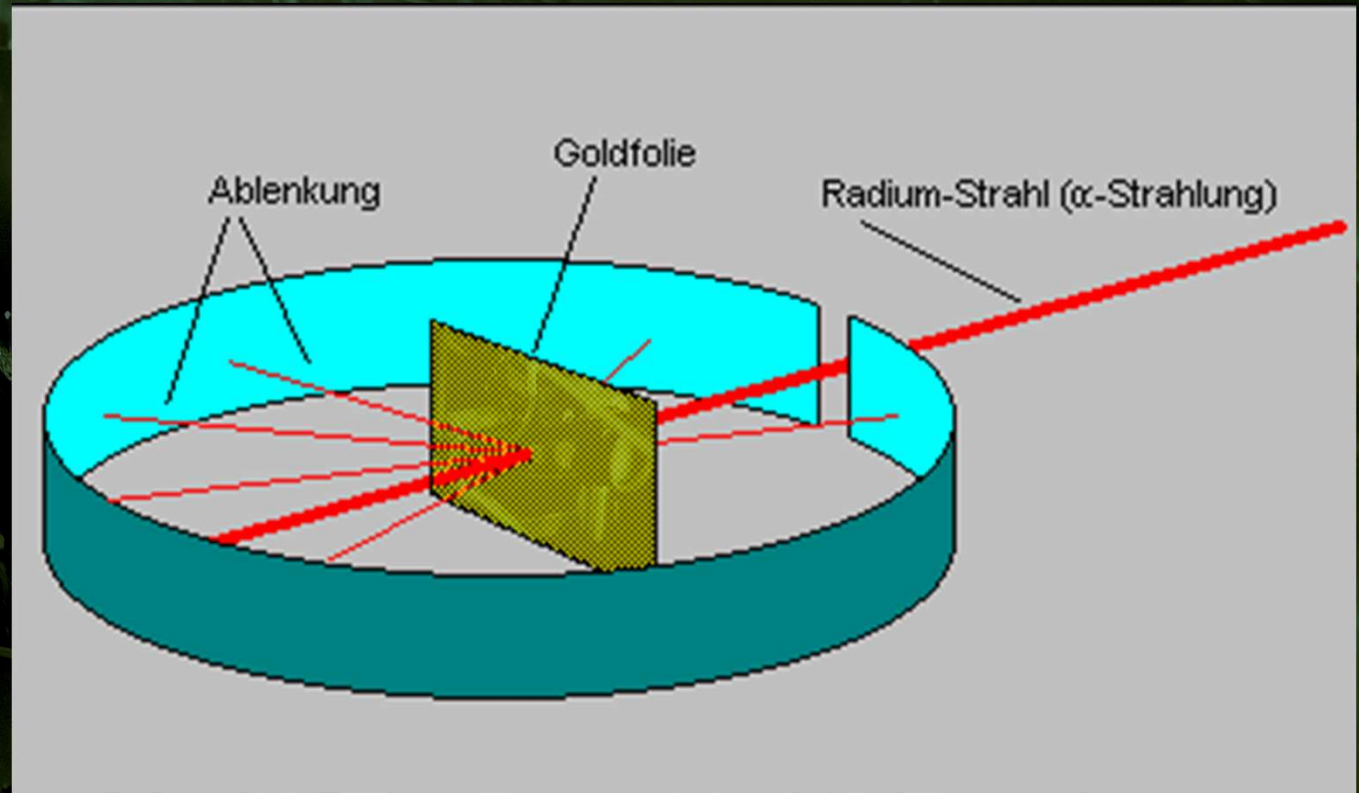


Ernest Rutherford – 1911



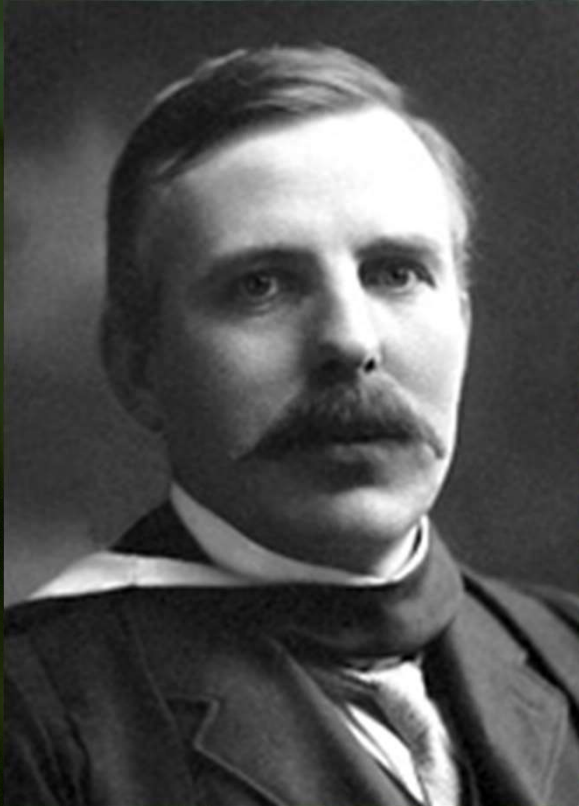
1871 – 1937
Nobelpreis 1908

Rutherford beschießt eine dünne Goldfolie mit Alpha-Teilchen

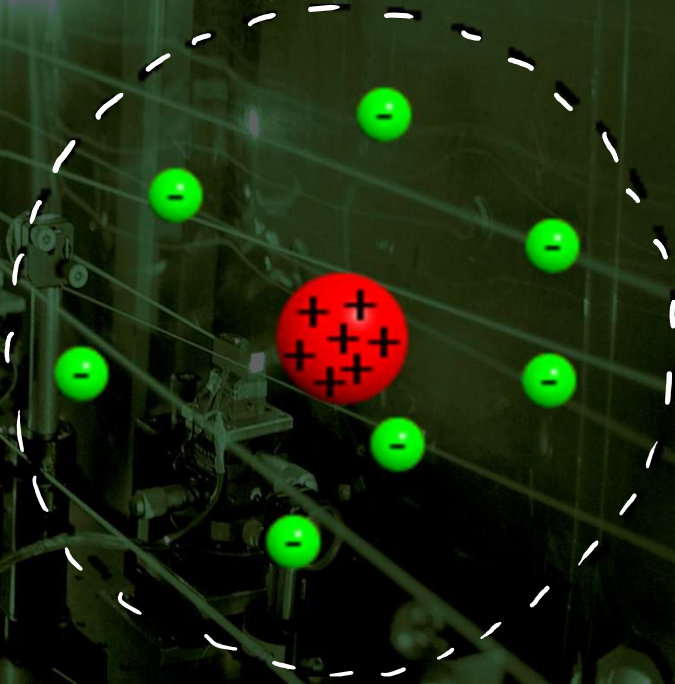


Die meisten Alpha-Teilchen passieren die dünne Goldfolie ungehindert.
Wenige werden jedoch stark abgelenkt.

Ernest Rutherford – 1911

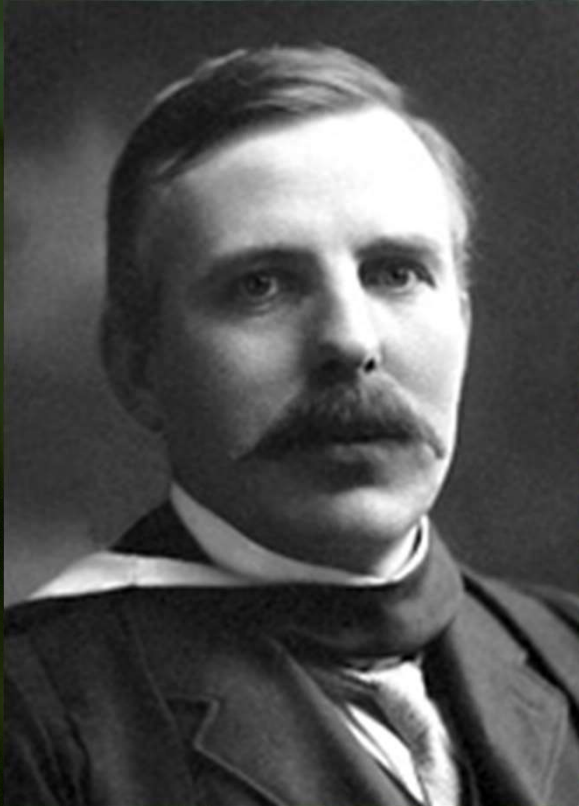


1871 – 1937
Nobelpreis 1908



Das Atom ist ein
sehr kleiner, schwerer, positiv geladener **Atomkern**
umkreist von negativ geladenen **Elektronen**

Ernest Rutherford – 1917



Rutherford gelingt die erste Kernreaktion
beim Beschuss von Stickstoff mit Alpha-Teilchen.

Dabei entdeckt er das **Proton**.

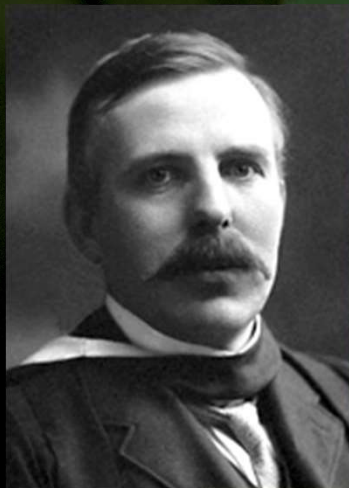
104 Jahre Proton !!!



Die Bausteine der Materie



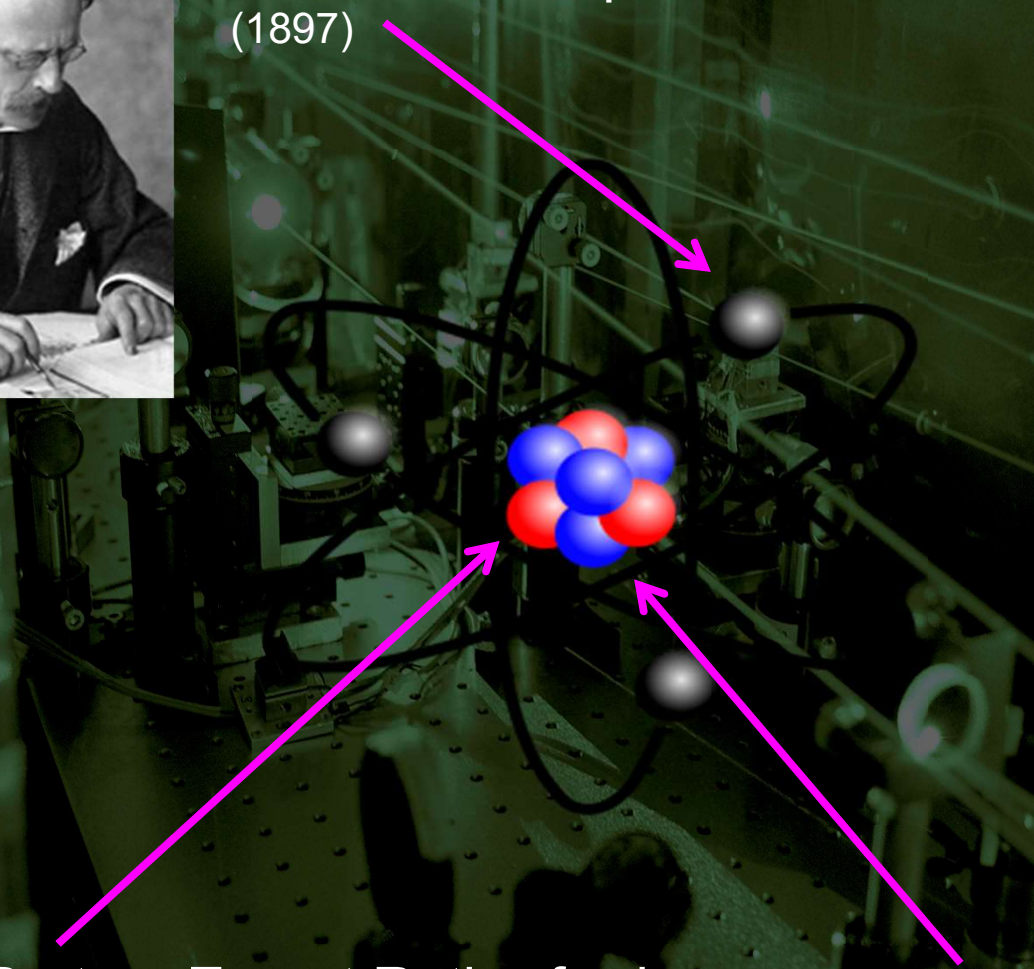
Elektron: Joseph John Thomson
(1897)



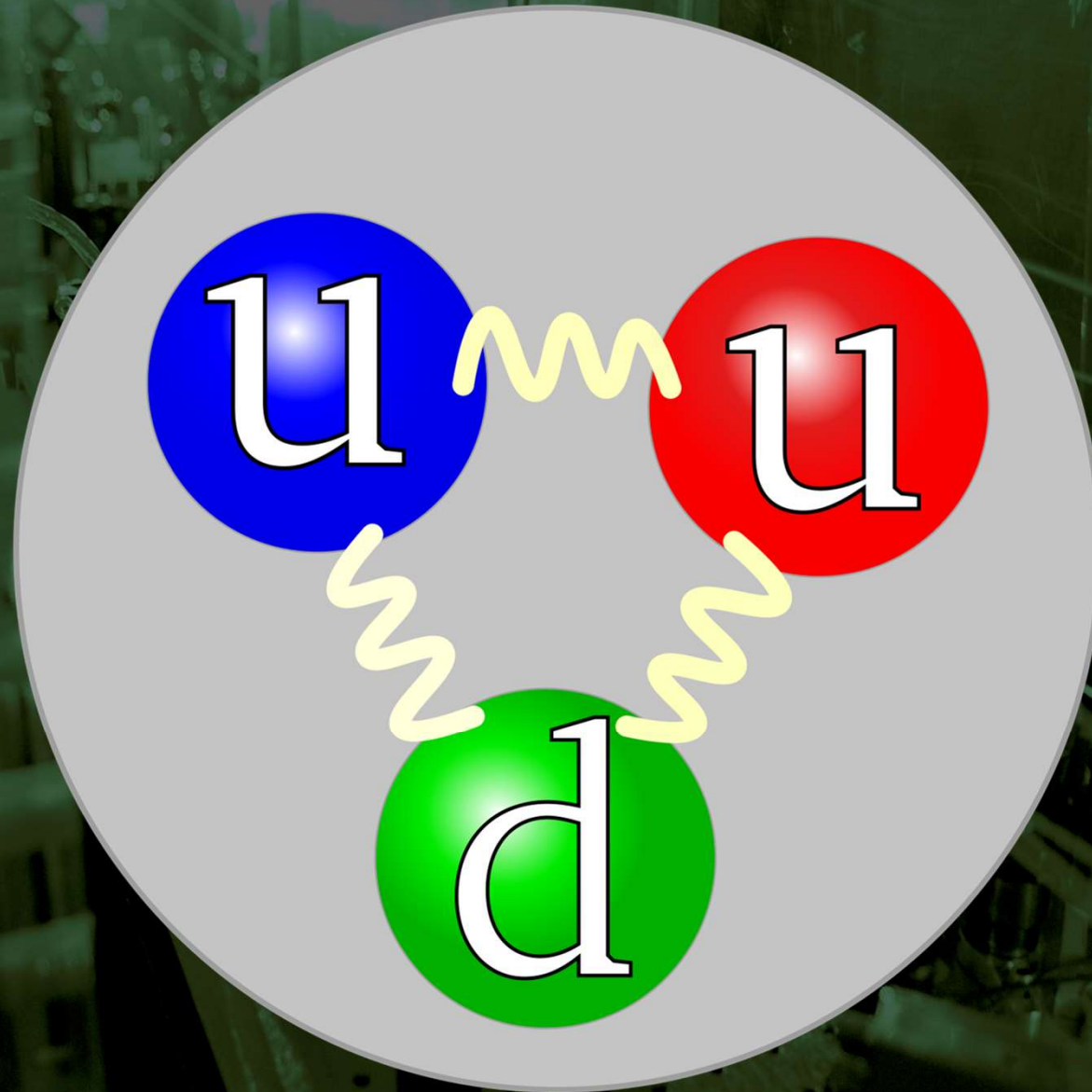
Proton: Ernest Rutherford
(1917)



Neutron: James Chadwick
(1932)

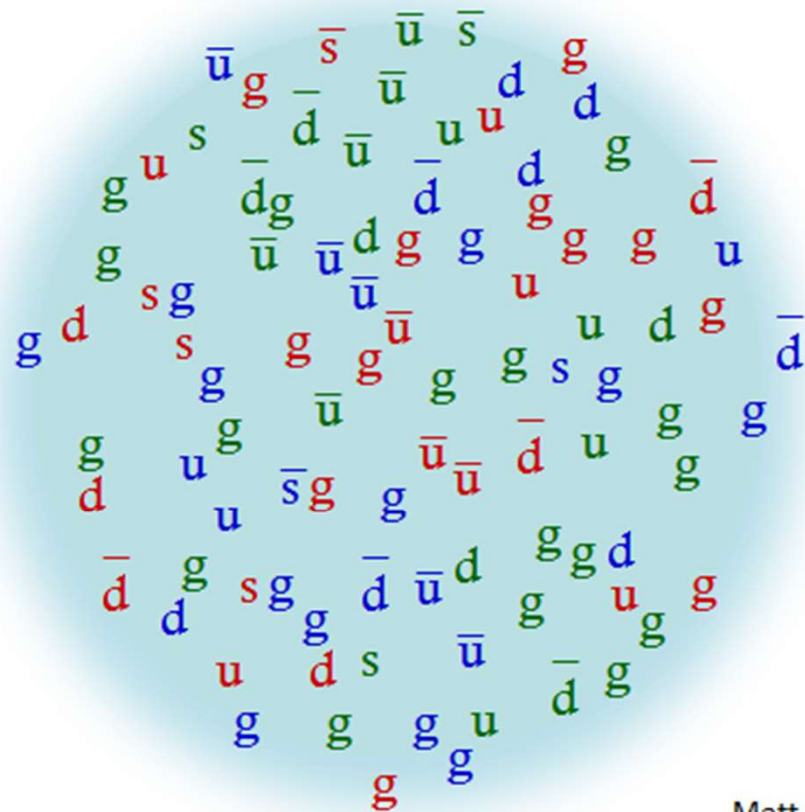


Proton – 3 Quarks



Proton – $\gg 3$ Quarks

proton



Matt Strassl

Robert Hofstadter – 1955



1915 – 1990
Nobelpreis 1961


Elektron (-)

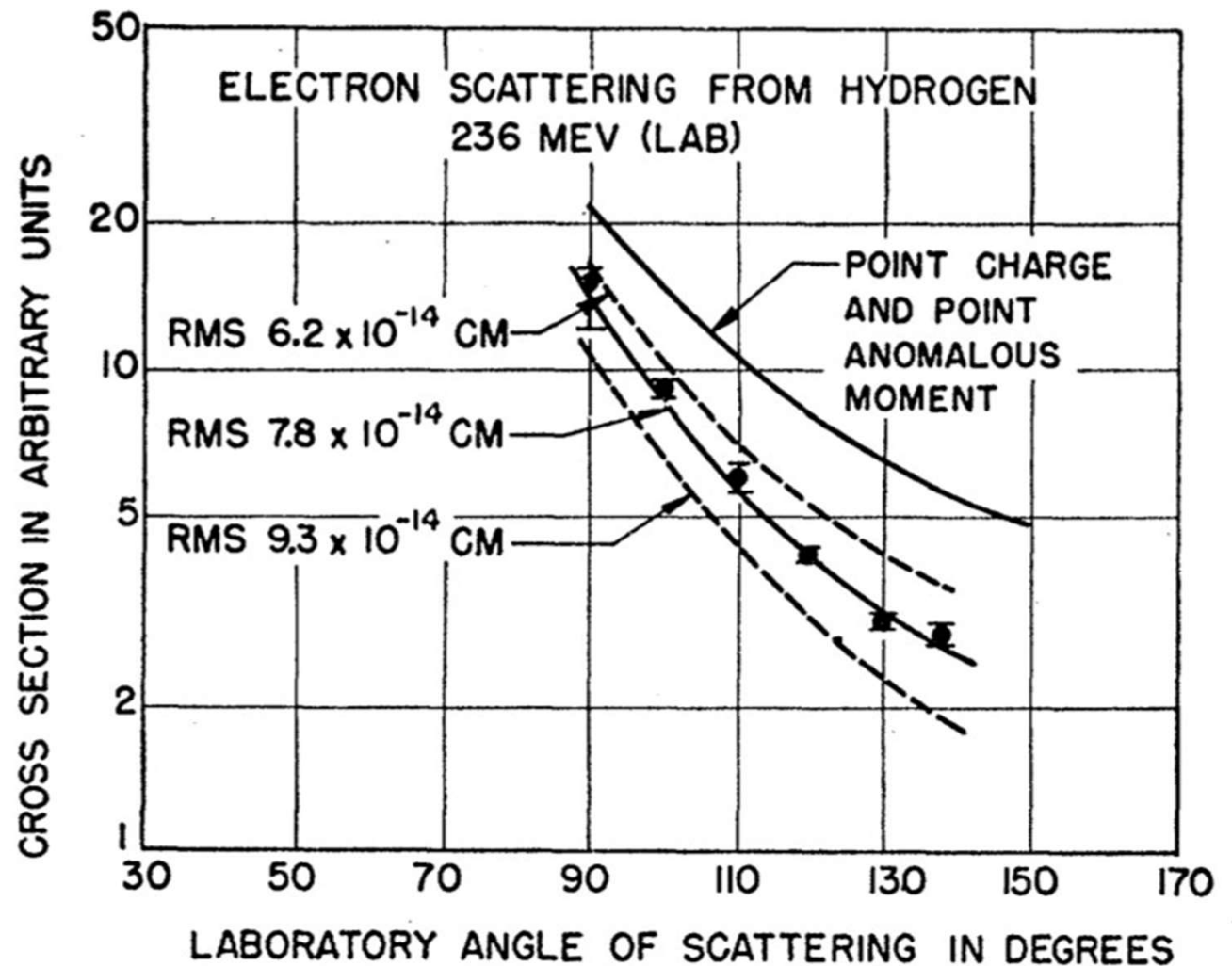

Proton (+)

Streuung von (negativ geladenen) Elektronen
an (positiv geladenen) Protonen.

Robert Hofstadter – 1955

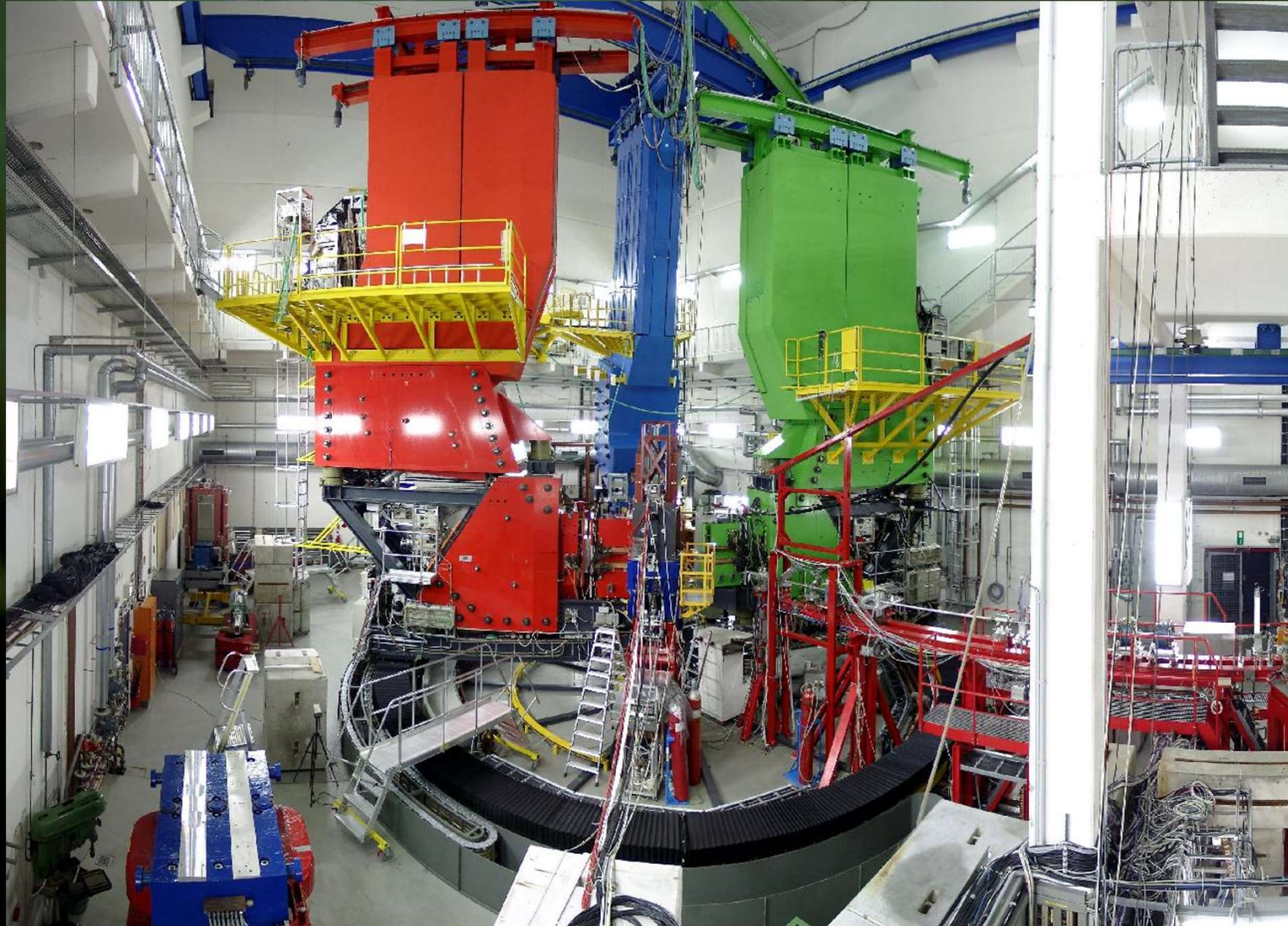


1915 – 1990
Nobelpreis 1961

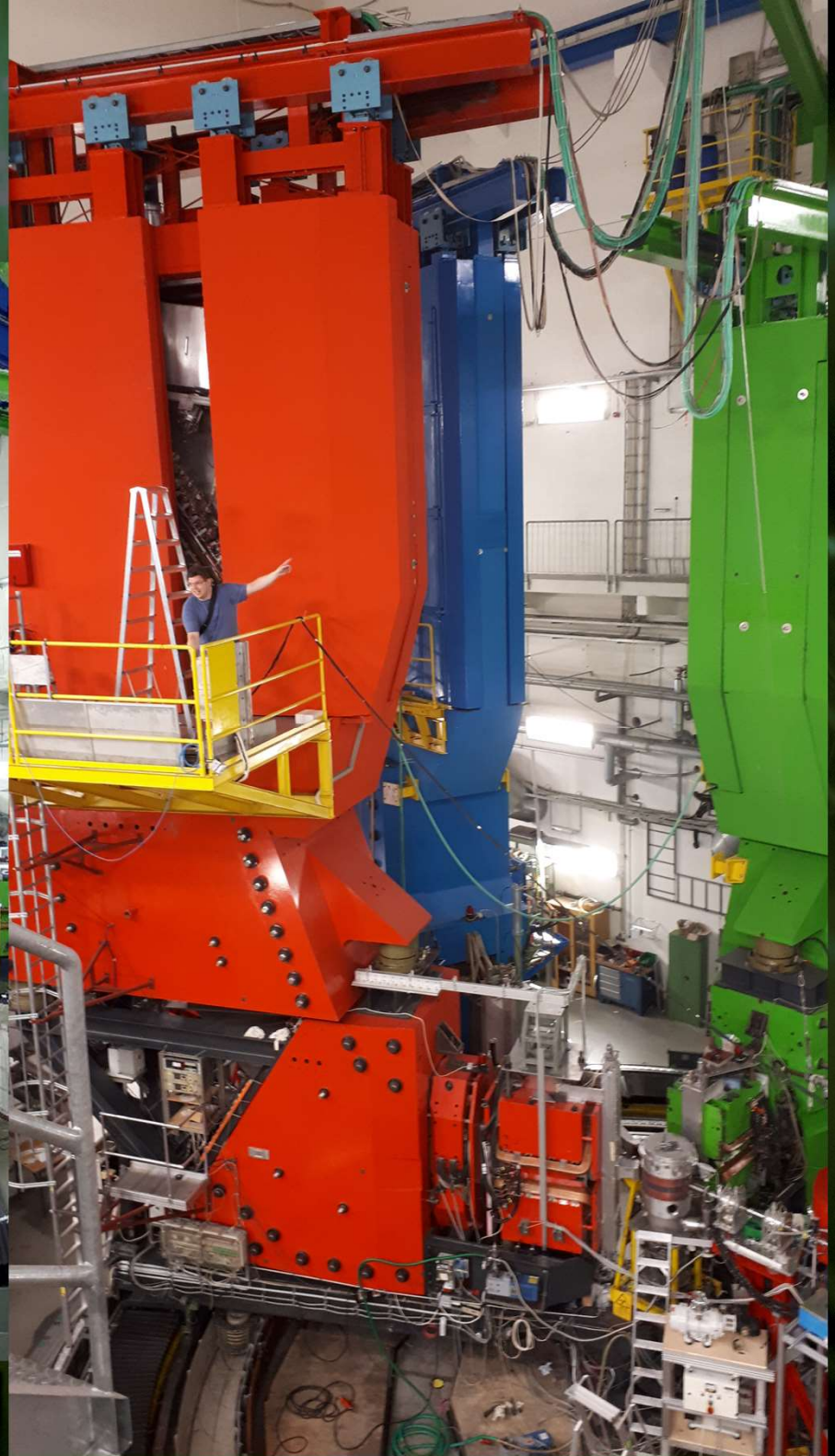
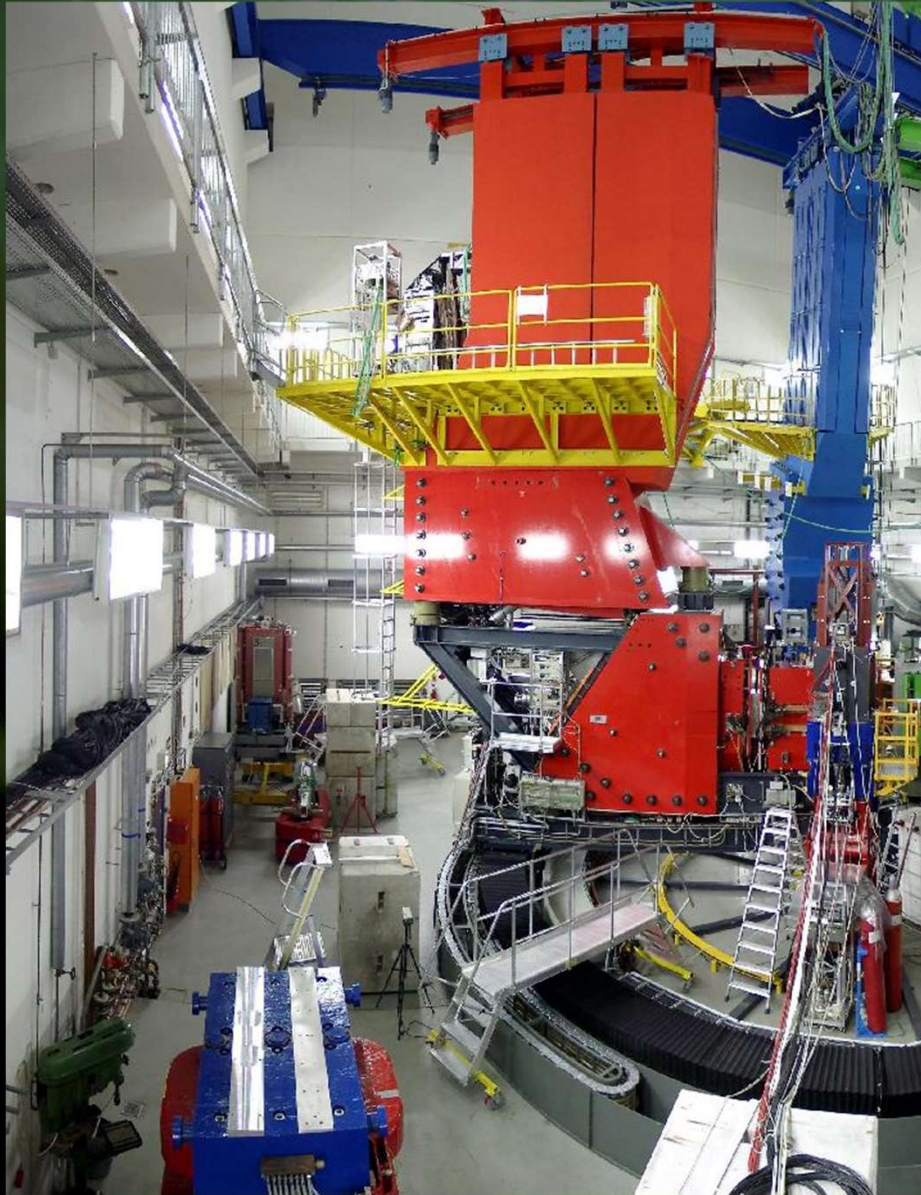


Das Proton hat einen **Radius** von " $7.8 \cdot 10^{-14}$ cm"

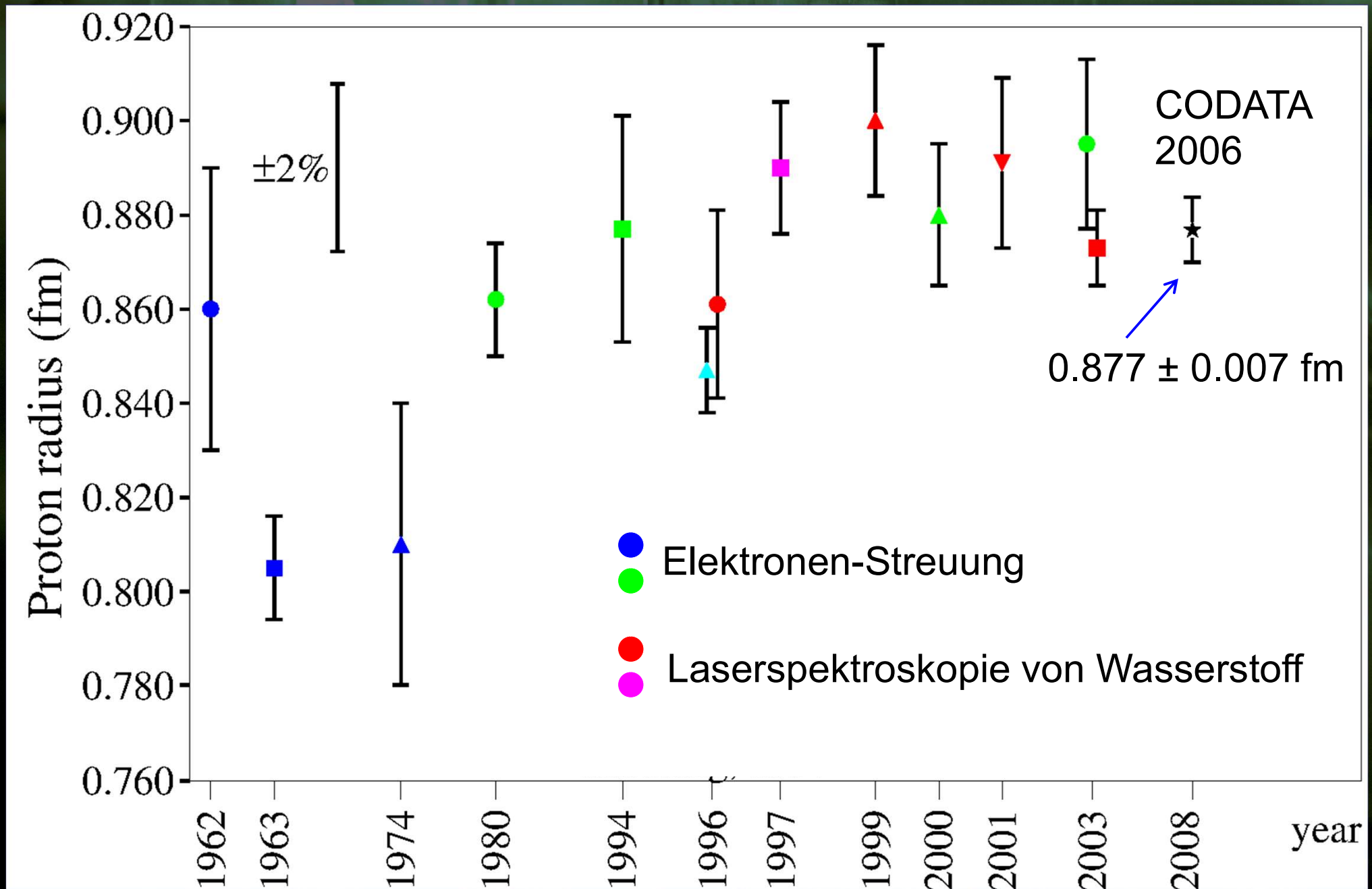
Mainzer Microtron MAMI



Mainzer Microtron MAMI



Wie gross ist das Proton?



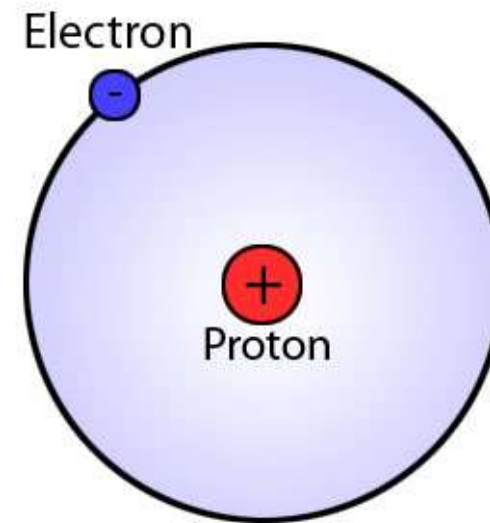
Das Wasserstoff-Atom

Ein Proton, von einem Elektron umkreist



Nils Bohr

1885 – 1962
Nobelpreis 1922



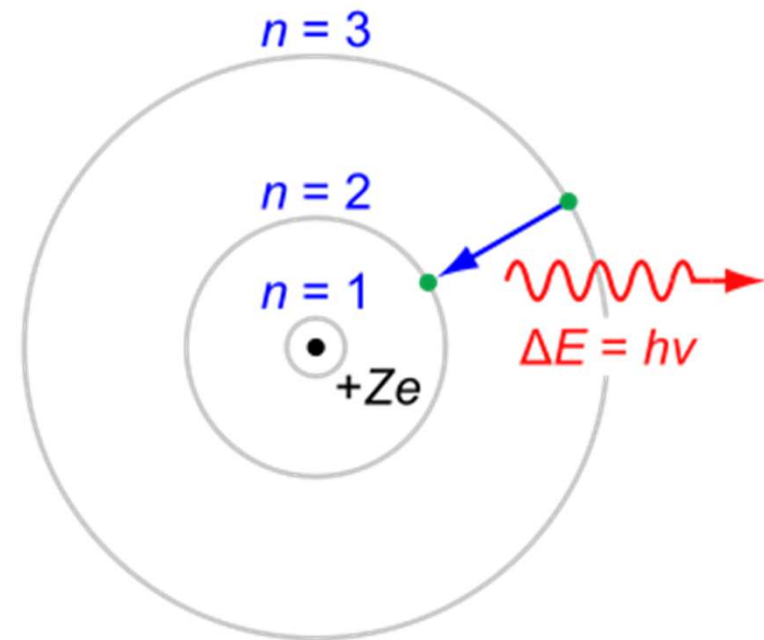
Das Wasserstoff-Atom

Ein Proton, von einem Elektron umkreist



Nils Bohr

1885 – 1962
Nobelpreis 1922



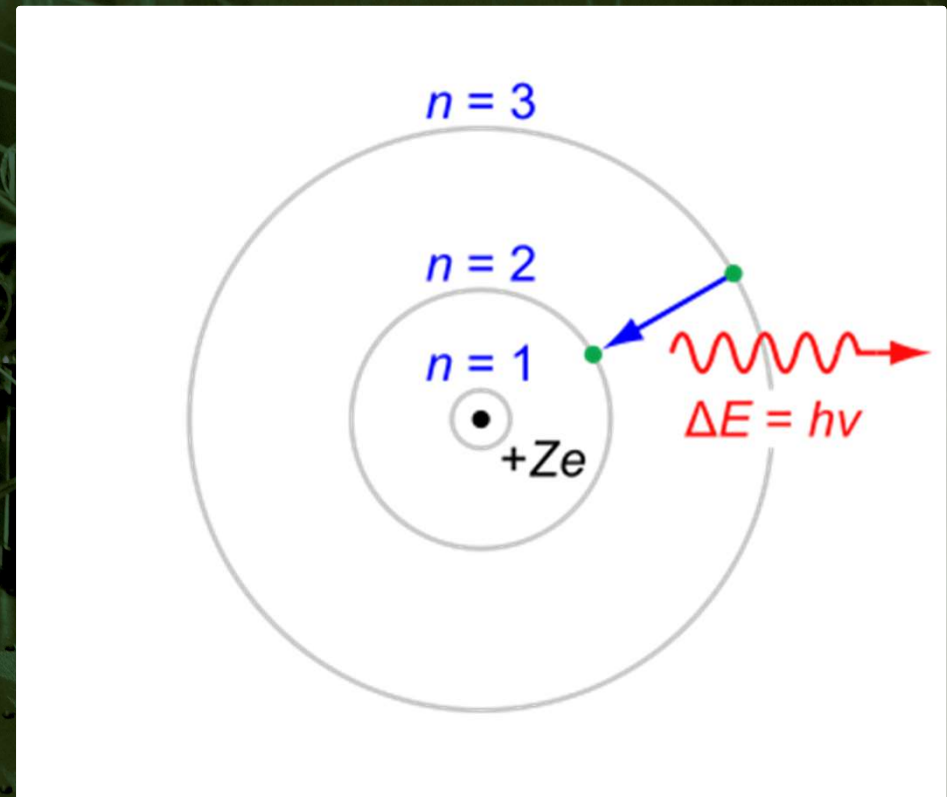
Das Wasserstoff-Atom

Ein Proton, von einem Elektron umkreist



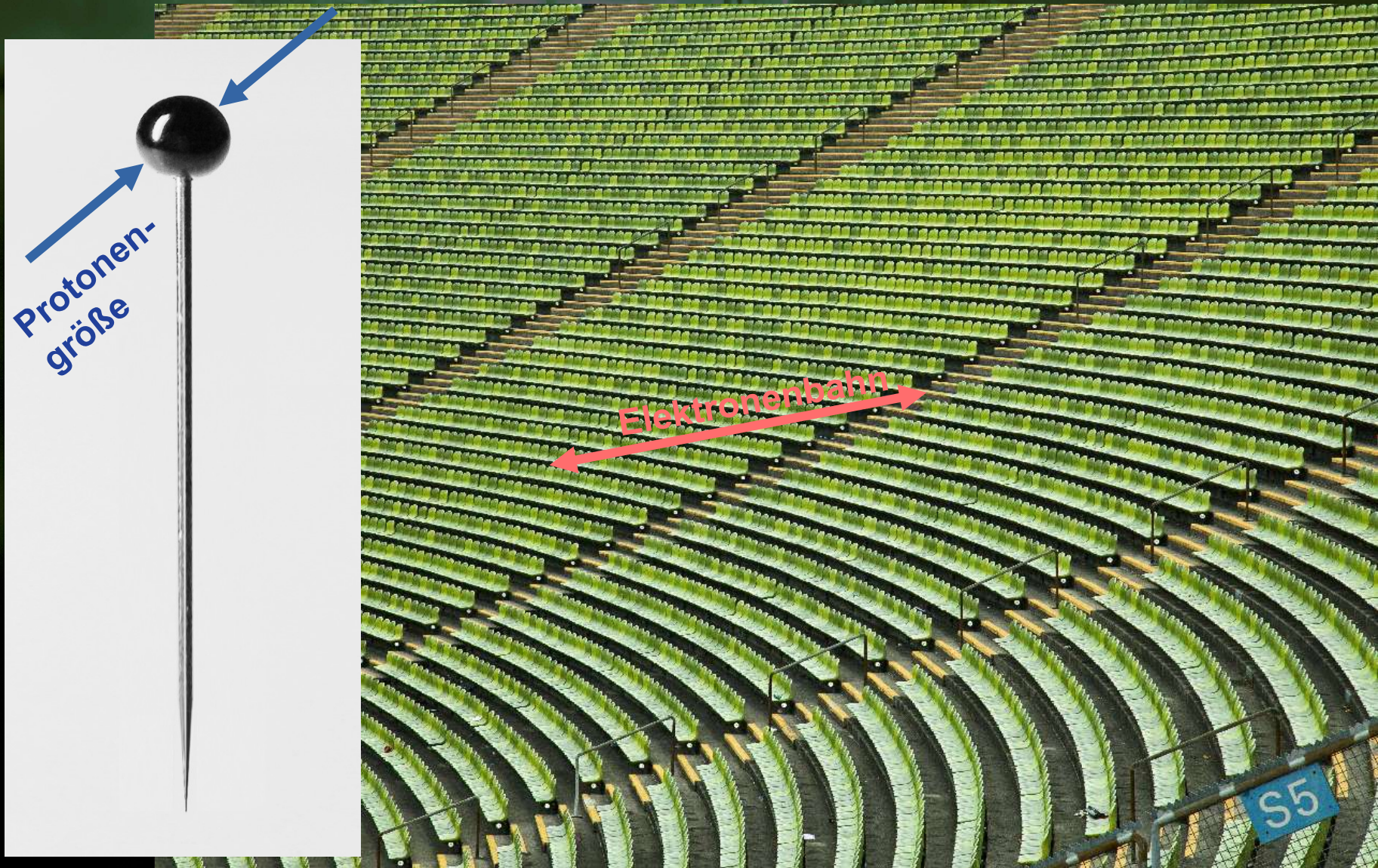
Nils Bohr

1885 – 1962
Nobelpreis 1922



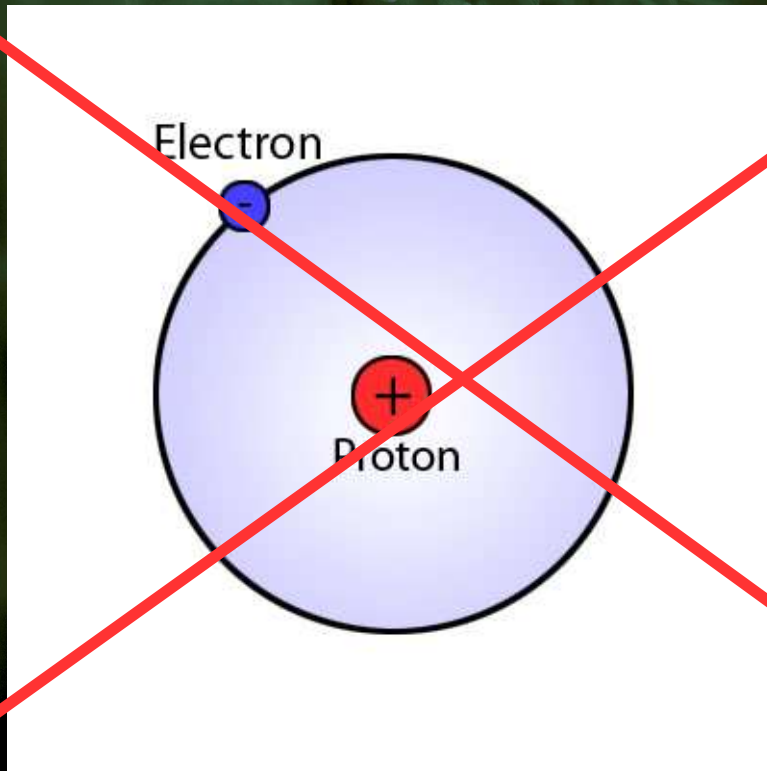
- Diskrete Bahnen (Orbitale)
- “Quantensprünge”

Das Wasserstoff-Atom



Das Wasserstoff-Atom

Ein Proton, von einem Elektron umkreist



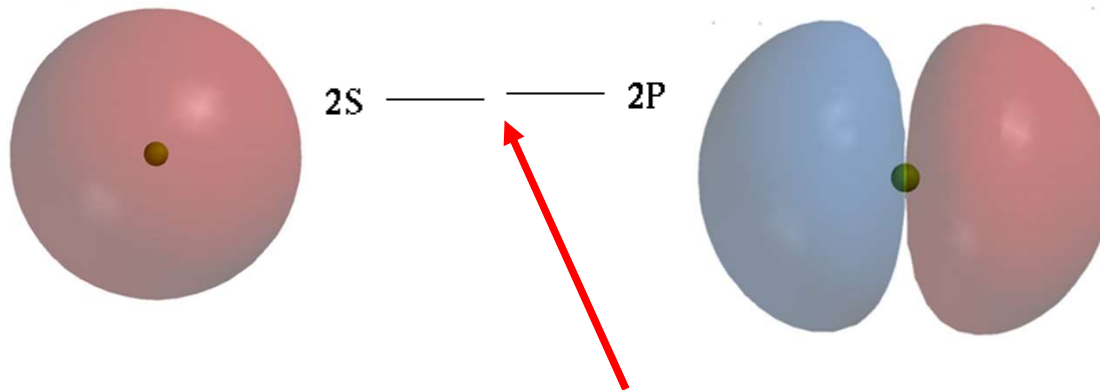
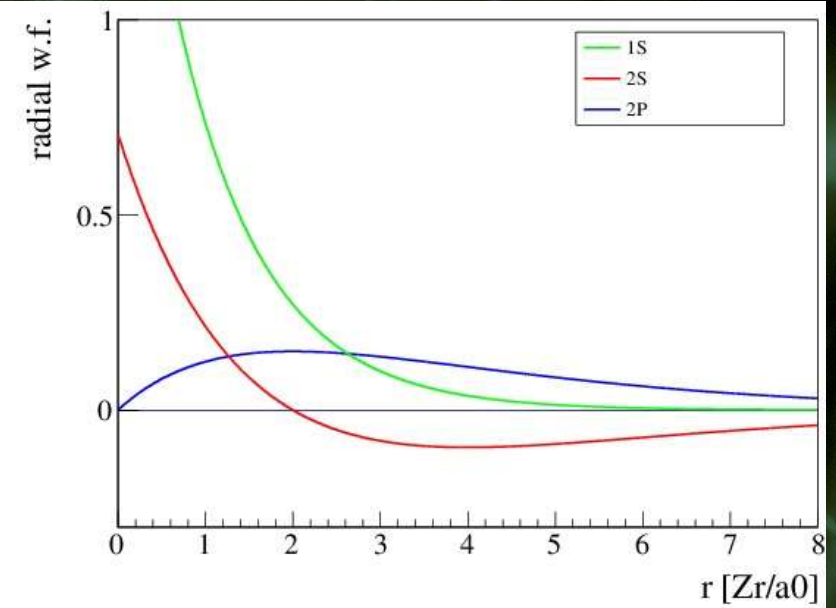
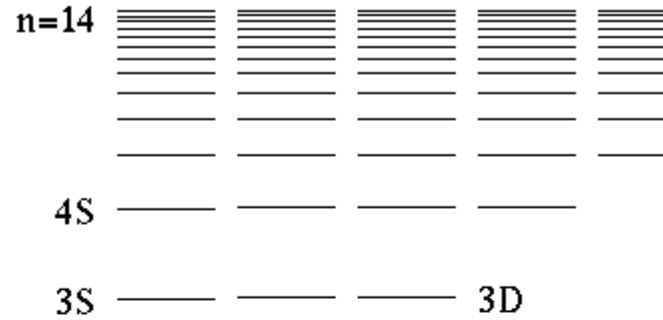
Atom ist KEIN Planetensystem.

→ **Quantenmechanik**

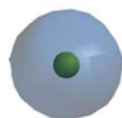
→ **Wellenfunktionen**

→ **Wahrscheinlichkeiten**

Energie-Niveaus in



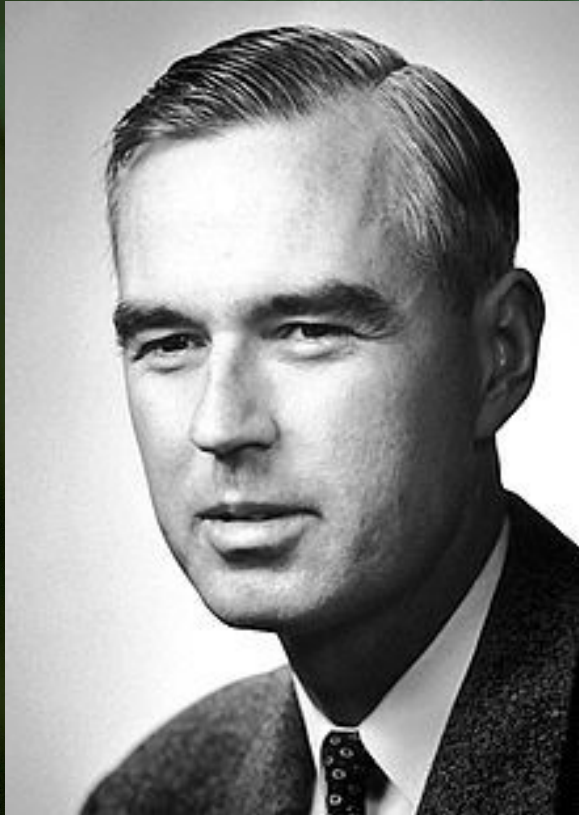
2S-2P Lamb-Verschiebung



1S

Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons
(Quadrat der Wellenfunktion)

Die Lamb-Verschiebung



Willis E. Lamb, Jr.

1913 – 2008
Nobelpreis 1955

Entdeckung 1947

Energie-Niveaus “**2S**” und “**2P**” in Wasserstoff
haben NICHT dieselbe Energie

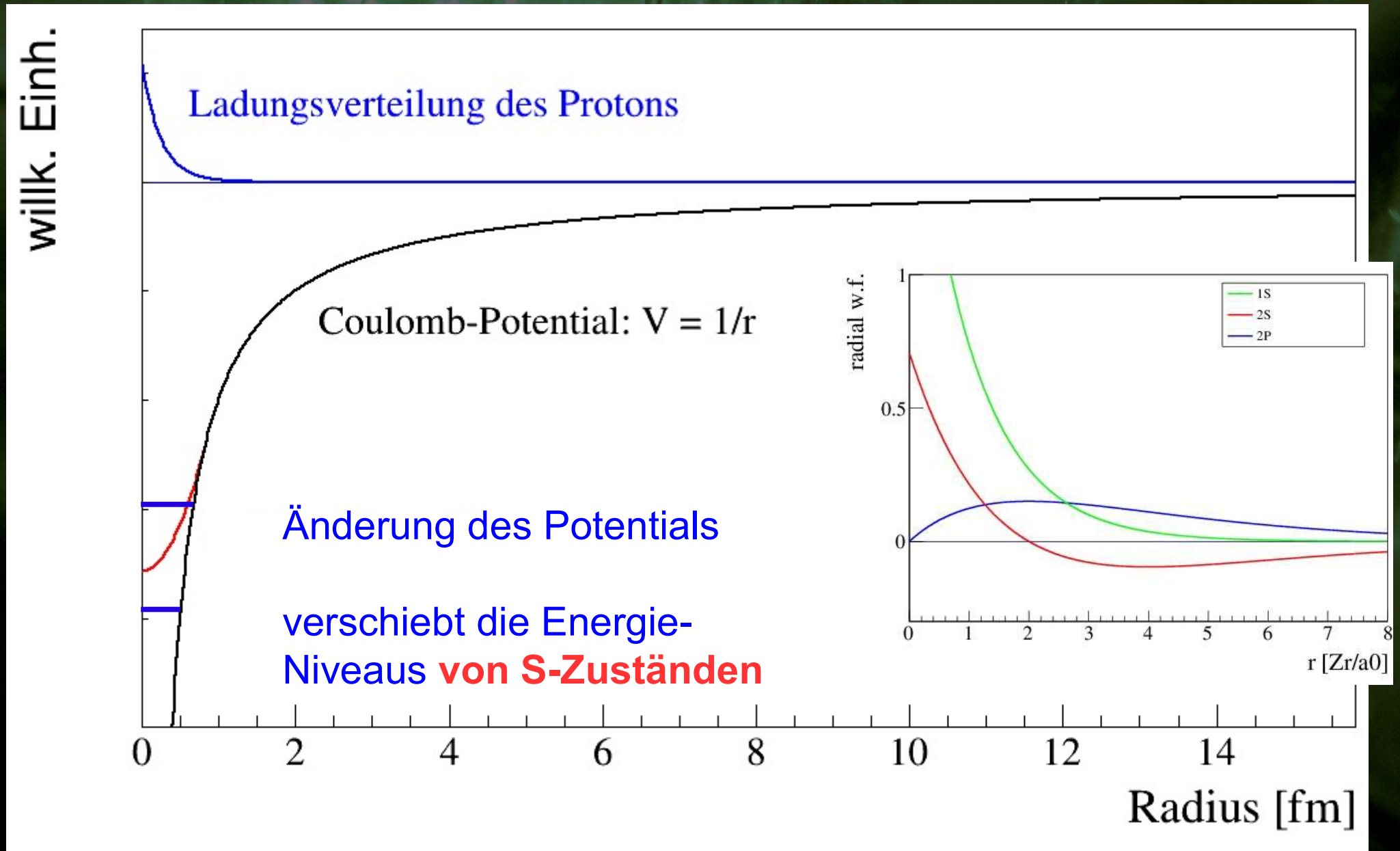
Ursachen der **Lamb-Shift**:

- * Quanten-Fluktuationen des Vakuums
- * Ausdehnung des Protons (Ladungsradius)

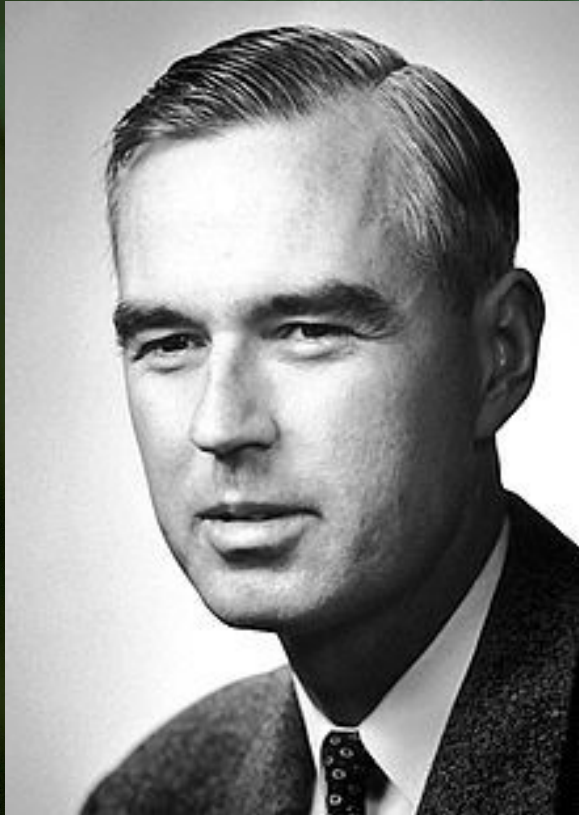
→ Entwicklung der

Quantenelektrodynamik (QED)

Protonenradius und Wasserstoff



Die Lamb-Verschiebung



Entdeckung 1947

Energie-Niveaus “**2S**” und “**2P**” in Wasserstoff
haben NICHT dieselbe Energie

Ursachen der **Lamb-Shift**:

- * Quanten-Fluktuationen des Vakuums
- * Ausdehnung des Protons (Ladungsradius)

Willis E. Lamb, Jr. →

1913 – 2008
Nobelpreis 1955

Quantenelektrodynamik (QED)

Energie-Niveaus in Wasserstoff



Bohr & Schrödinger & Dirac & recoil & relativistic recoil

$$\begin{aligned}
 E = & \left(-\frac{1}{n^2} \frac{4n^2 - 3}{N + 4n^2 - \gamma - k} \alpha^2 \frac{2n^3 + 6n^2 - 12n + 5}{8n^6} \alpha^4 \dots \right) \frac{1}{1 + m_e/m_p} \\
 & + \left(\frac{1}{n^4} \alpha^2 - \frac{4n - 3}{8n^6} \alpha^4 + \frac{8n^3 + 40n^2 - 72n + 29}{64n^6} \alpha^6 \dots \right) \frac{m_e}{m_p} \frac{1}{(1 + m_e/m_p)^3} \\
 & + \frac{k - j + 1/2}{\pi n^3 m_p \sqrt{1 \pm \sqrt{k^2 - 4n^2}}} \left(-\frac{2}{3} \ln(\alpha) - \frac{8}{3} \ln k_0(n) - \frac{1}{9} + \frac{14}{3} \left(\ln\left(\frac{2}{n}\right) + \sum_{m=1}^n \frac{1}{m} \right. \right. \\
 & \left. \left. + 1 - \frac{1}{2n} \right) - \frac{2}{1 - (m_e/m_p)^2} \ln\left(\frac{m_e}{m_p} + 1\right) + \frac{2}{1 - (m_p/m_e)^2} \ln\left(\frac{m_p}{m_e} + 1\right) \right) \\
 & + \frac{2\alpha^4 m_e}{m_p n^3} \left(4 \ln(2) - \frac{7}{2} - \frac{44\alpha}{60\pi} \ln(\alpha)^2 \right)
 \end{aligned}$$

Energie-Niveaus in Wasserstoff

Bohr & Schrödinger & Dirac & recoil & relativistic recoil & self energy & vacuum polarization & two-

$$\begin{aligned}
 E = & \left(-\frac{1}{n^2} - \frac{4n-3}{4n^2} \alpha^2 - \frac{2n^3+6n^2-12n+5}{8n^6} \alpha^4 \dots \right) \frac{1}{1 + m_e/m_p} \\
 & + \left(\frac{1}{n^4} \alpha^2 - \frac{4n-3}{8n^6} \alpha^4 + \frac{8n^3+40n^2-72n+29}{64n^6} \alpha^6 \dots \right) \frac{m_e}{m_p} \frac{1}{(1 + m_e/m_p)^3} \\
 & + \frac{2\alpha^3 m_e}{\pi n^3 m_p (1 + m_e/m_p)^3} \left(-\frac{2}{3} \ln(\alpha) - \frac{8}{3} \ln k_0(n) - \frac{1}{9} + \frac{14}{3} \left(\ln\left(\frac{2}{n}\right) + \sum_{m=1}^n \frac{1}{m} \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + 1 - \frac{1}{2n} \right) - \frac{2}{1 - (m_e/m_p)^2} \ln\left(\frac{m_e}{m_p} + 1\right) + \frac{2}{1 - (m_p/m_e)^2} \ln\left(\frac{m_p}{m_e} + 1\right) \right) \\
 & + \frac{2\alpha^4 m_e}{m_p n^3} \left(4 \ln(2) - \frac{7}{2} - \frac{44\alpha}{60\pi} \ln(\alpha)^2 \right)
 \end{aligned}$$

Fundamentale Konstanten und Wasserstoff



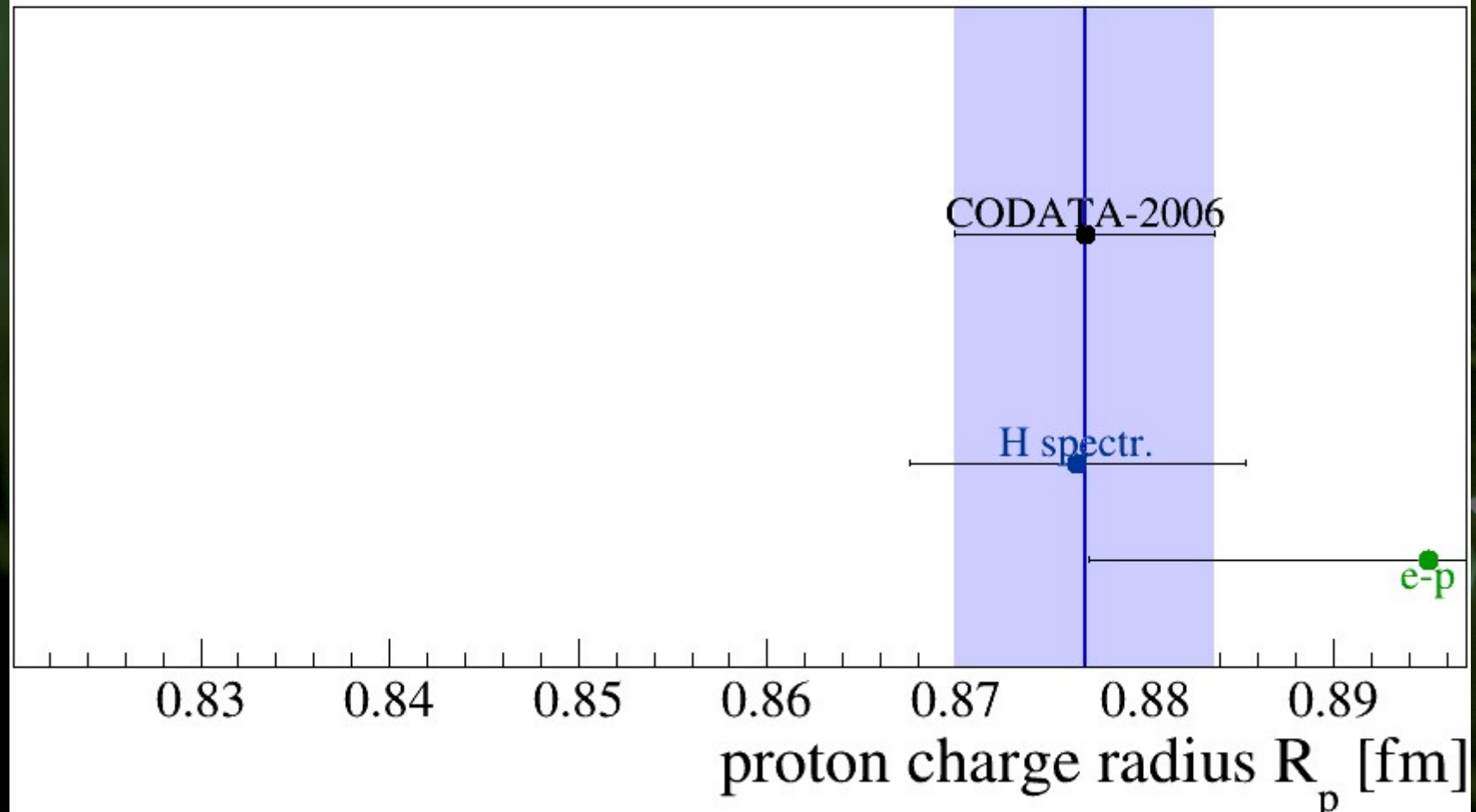
Die Energie-Niveaus in Wasserstoff (in **SI Einheiten**) incl. relativistischer, Rückstoß, QED und Kerngrößen- Korrekturen:

$$E_{nlj} = \underbrace{R_{\infty}}_{\text{Rydberg constant}} \left(-\frac{1}{n^2} + f_{nlj} \left(\underbrace{\alpha}_{\text{Fine structure constant}}, \underbrace{\frac{m_e}{m_p}}_{\text{electron – proton mass ratio}}, \dots \right) + \delta_{\ell 0} \frac{C_{\text{NS}}}{n^3} \underbrace{r_p^2}_{\text{RMS proton charge radius}} \right)$$

H Spektroskopie Penning-Fallen und Atom-Interferometrie H-Spektroskopie

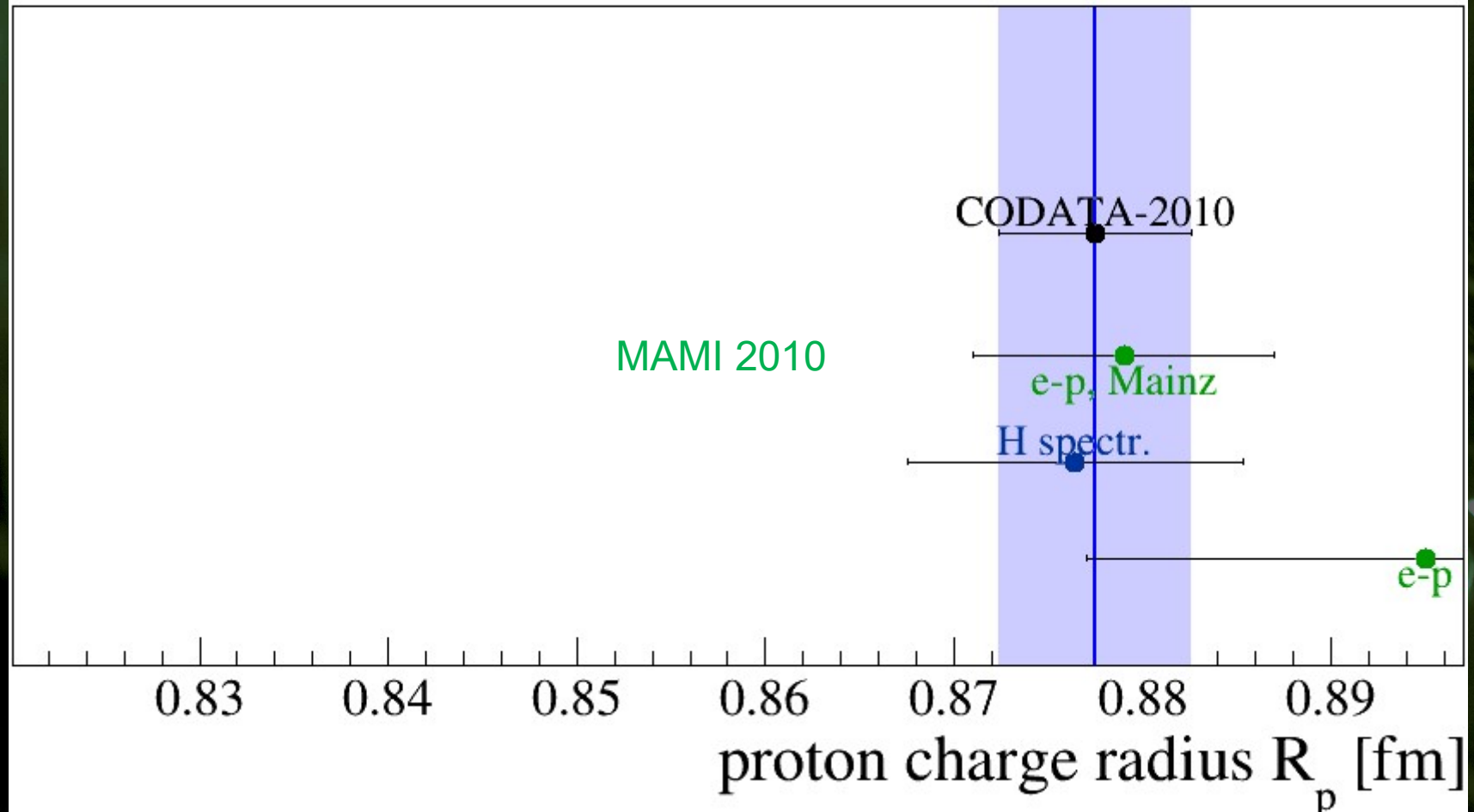
Protonen-Radien

Electrons



Protonen-Radien

Electrons





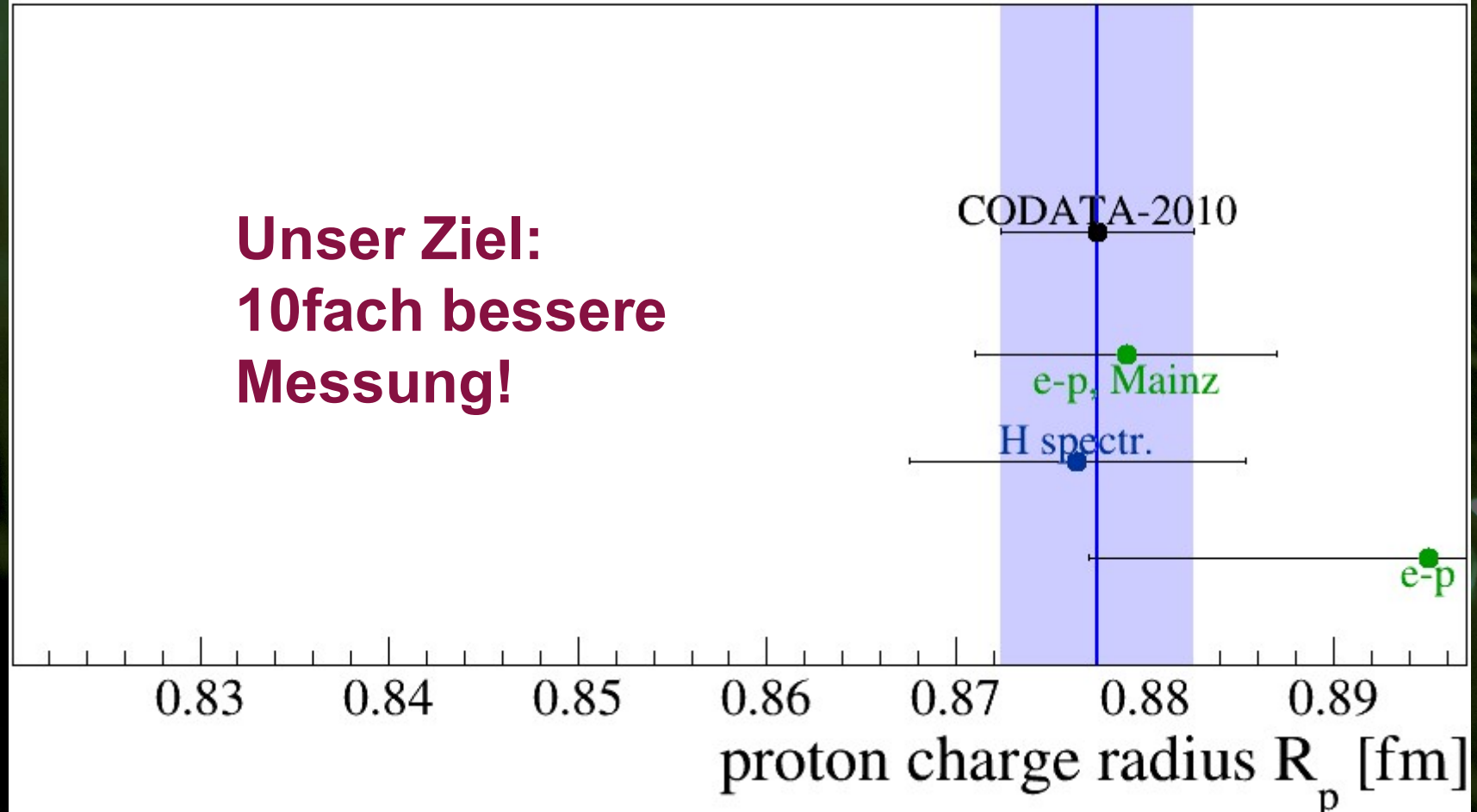
Alles OK?

...

Protonen-Radien

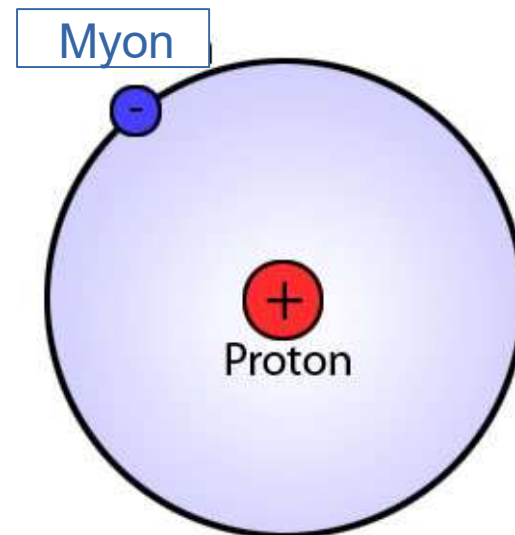
Electrons

**Unser Ziel:
10fach bessere
Messung!**



Myonischer Wasserstoff

Ein **Proton**, das von einem **negativen Myon** umkreist wird.



Was ist

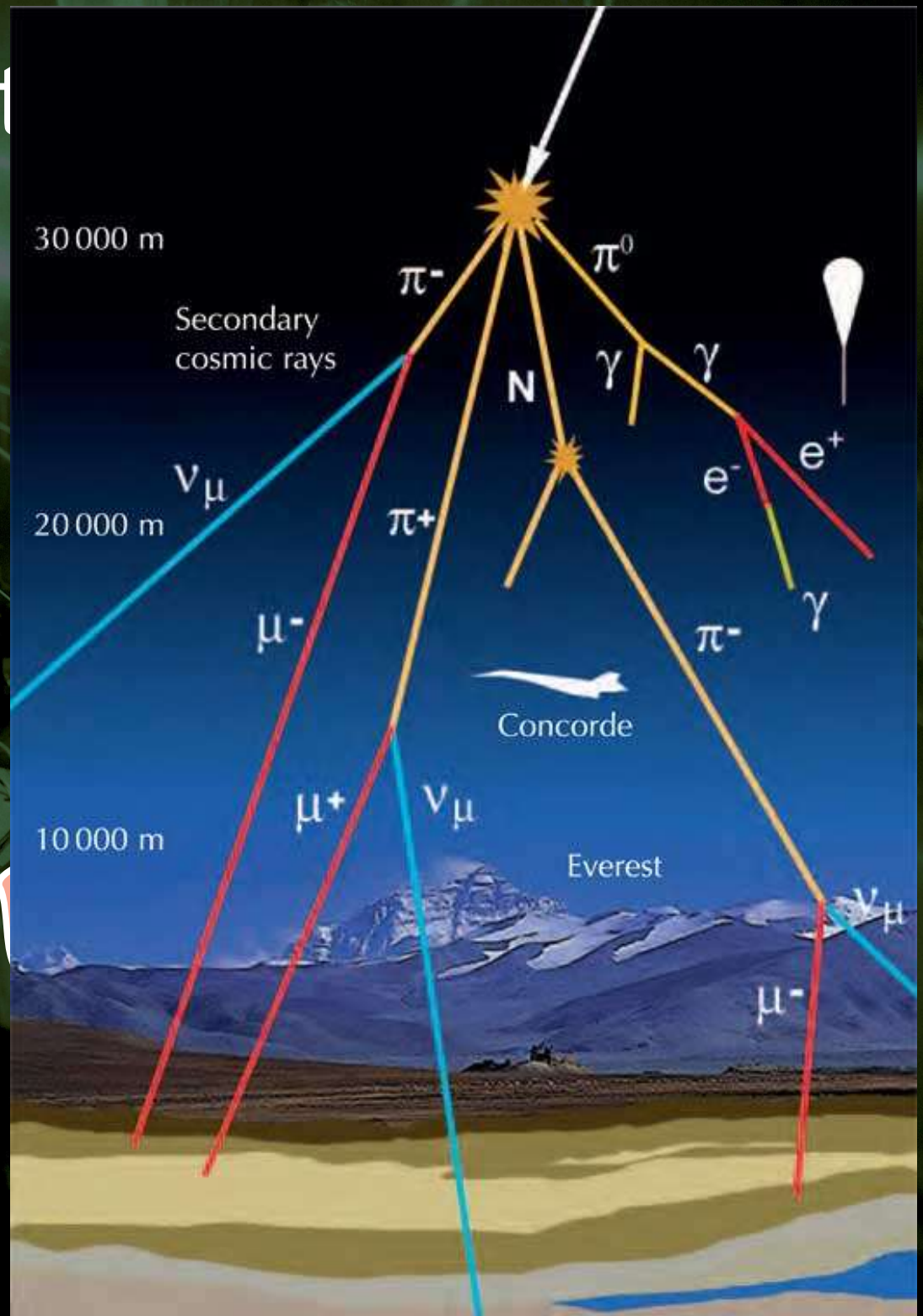


Carl David Anderson

Nobelpreis 1936 (Entdeckung Positron!)

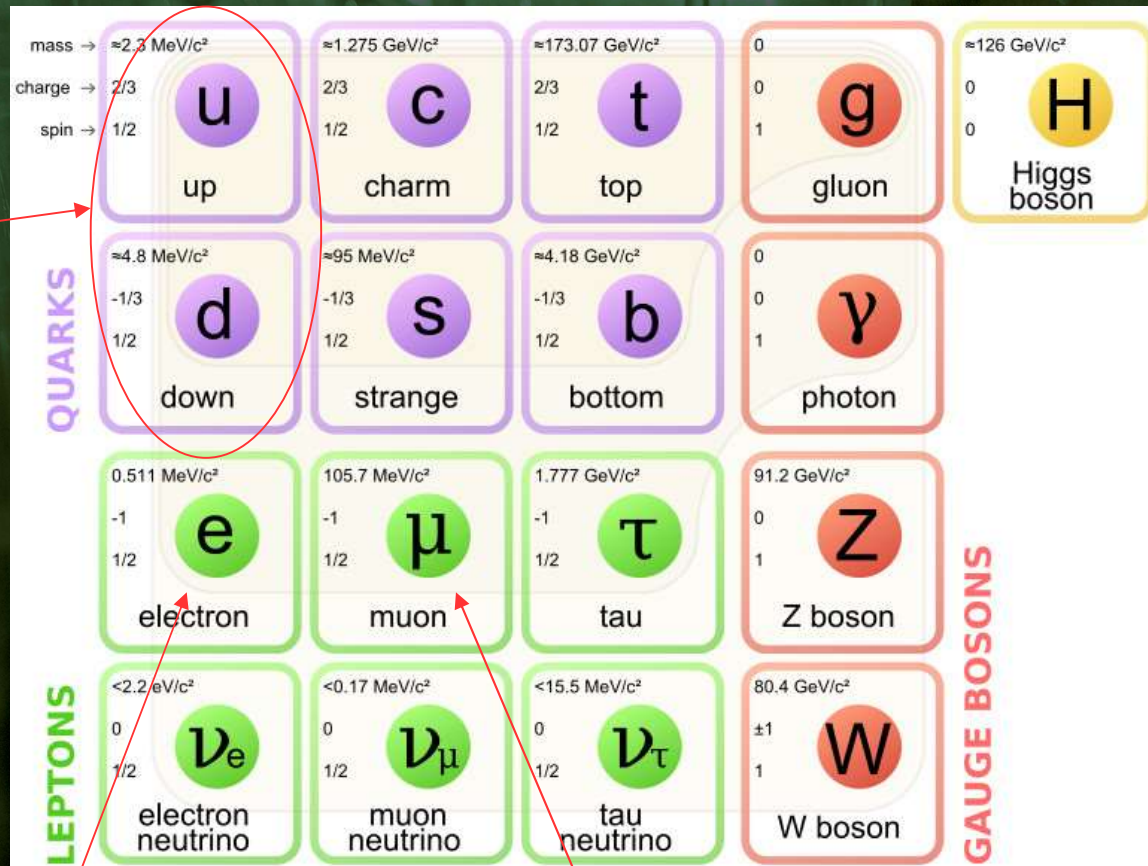


Seth
Neddermeyer



Das Myon und sein Platz in der Welt

Das Standard-Modell der Teilchenphysik



Proton

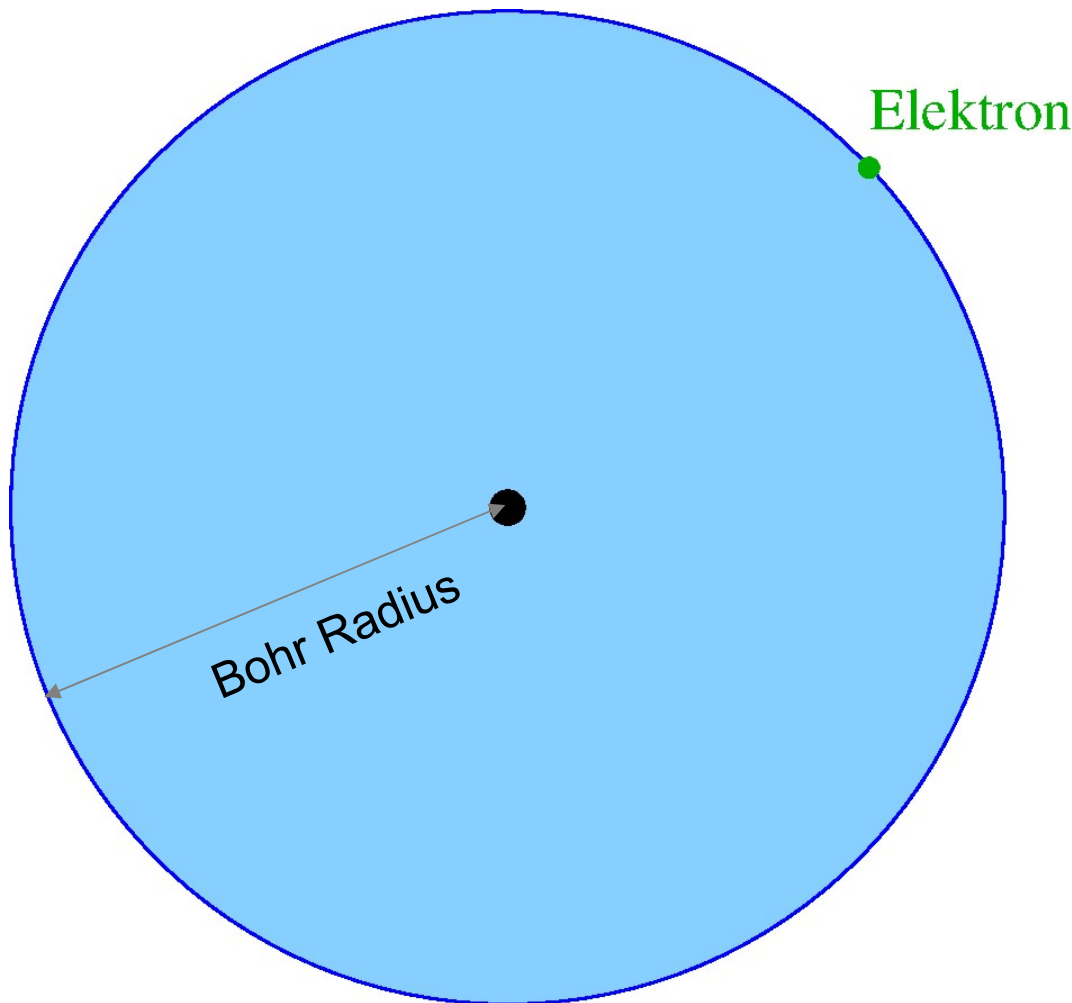
Elektron

Myon

Normaler and myonischer Wasserstoff

Normaler Wasserstoff:

Proton + Elektron



Myonischer Wasserstoff:

Proton + Myon

Masse = **200** * Elektronenmasse

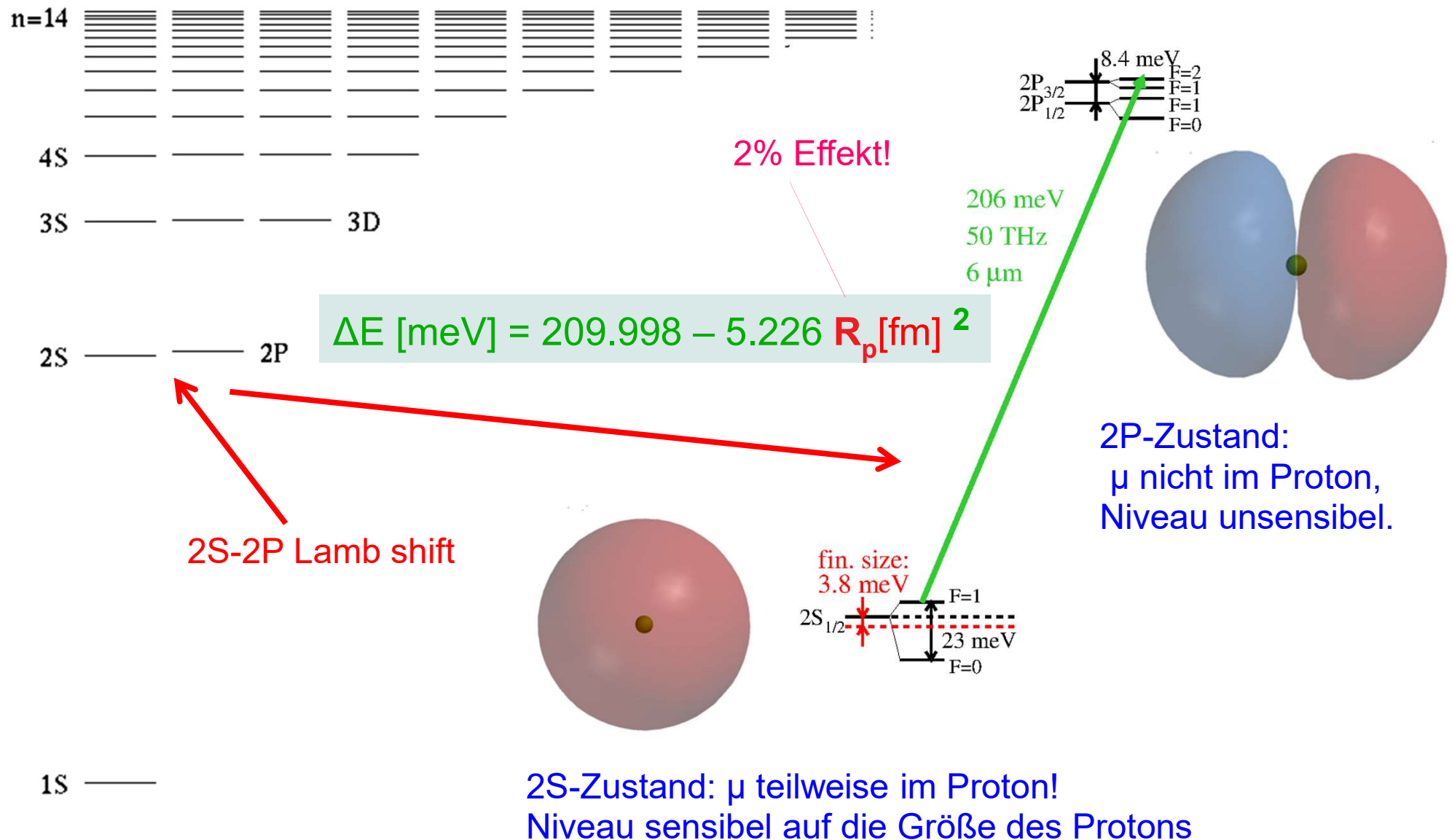
Bohr Radius = **1/200** von H

200³ = 10 Millionen mal sensibler

auf die Größe des Protons



Myonischer Wasserstoff

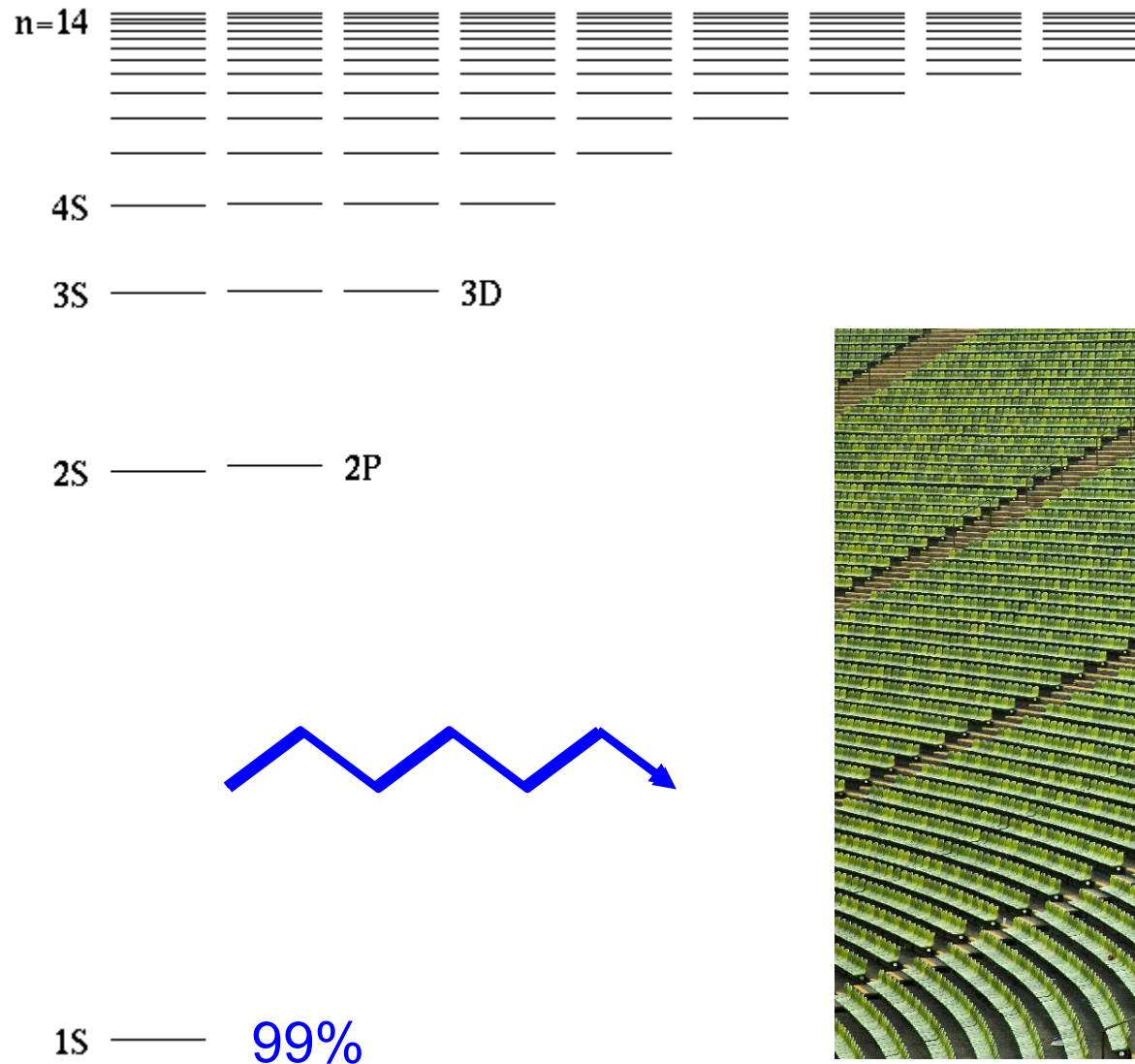


Prinzip der Messung

* Myonen stoppen in H_2

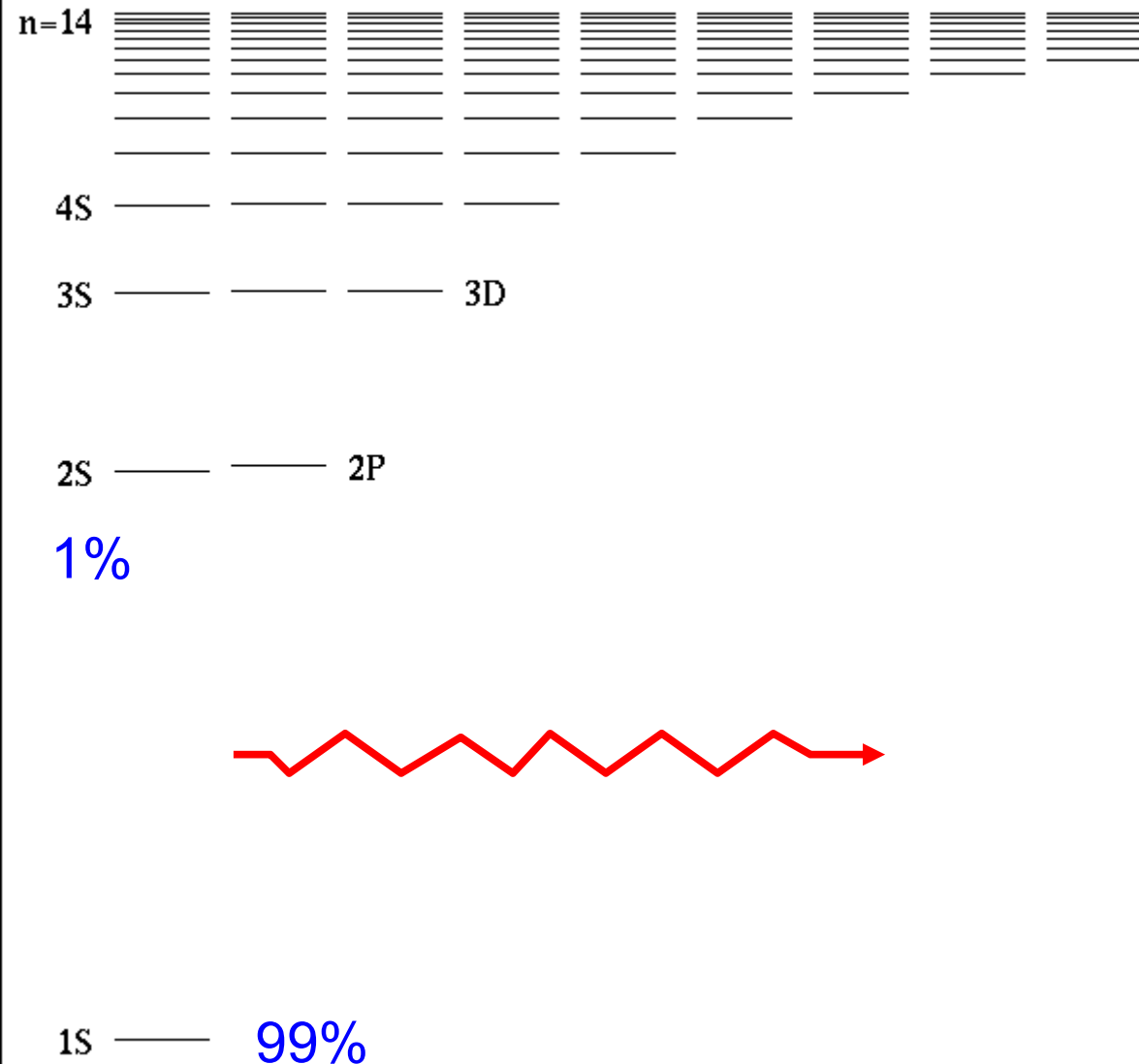
* Einfang zuerst in Niveaus mit $n \sim 14$

* Kaskade zu niedrigeren n

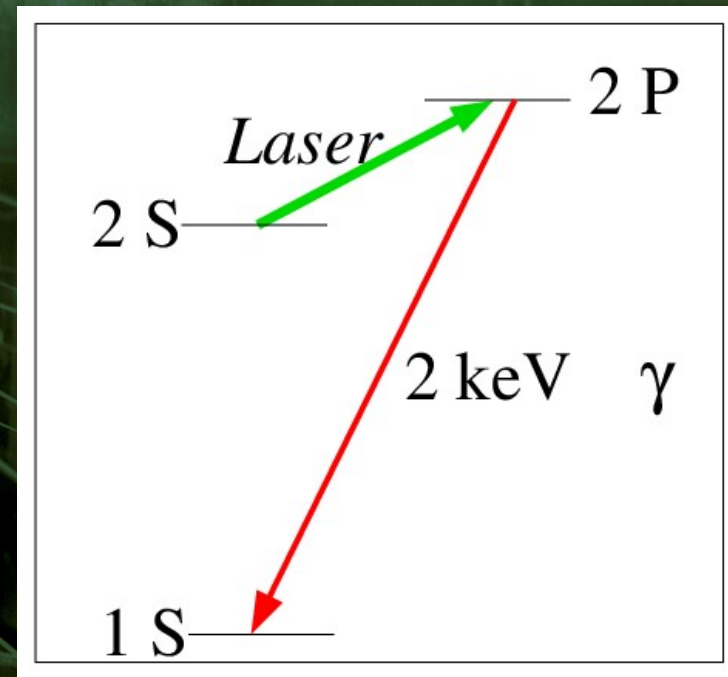
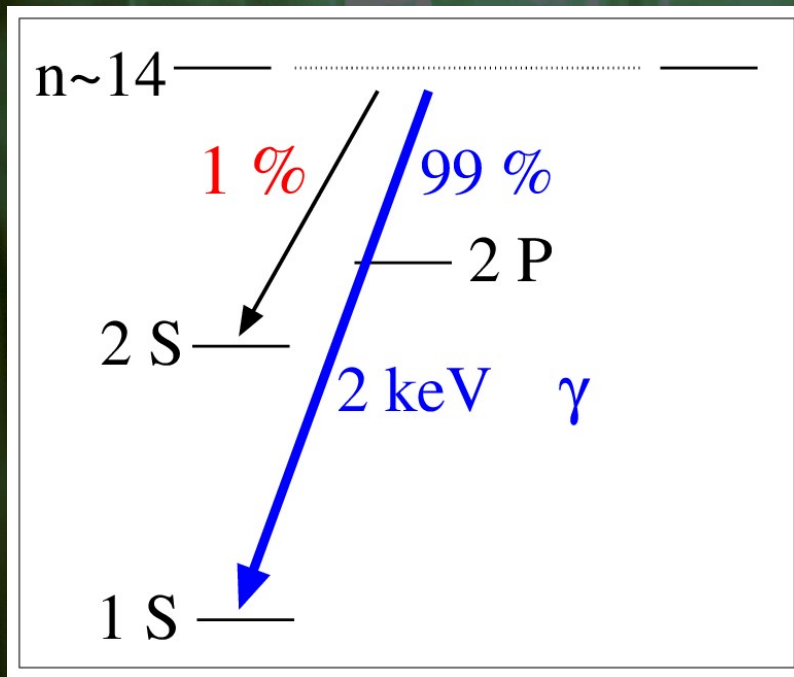


Prinzip der Messung

- * Myonen stoppen in H_2
- * Einfang zuerst in Niveaus mit $n \sim 14$
- * Kaskade zu niedrigeren n
- * 1% enden im langlebigen 2S Zustand
- * Laser auf Resonanz



Prinzip der Messung



“prompt” ($t=0$):

- * Einfang des Myons bei $n \sim 14$
- * Kaskade
- * 99% enden im Grundzustand

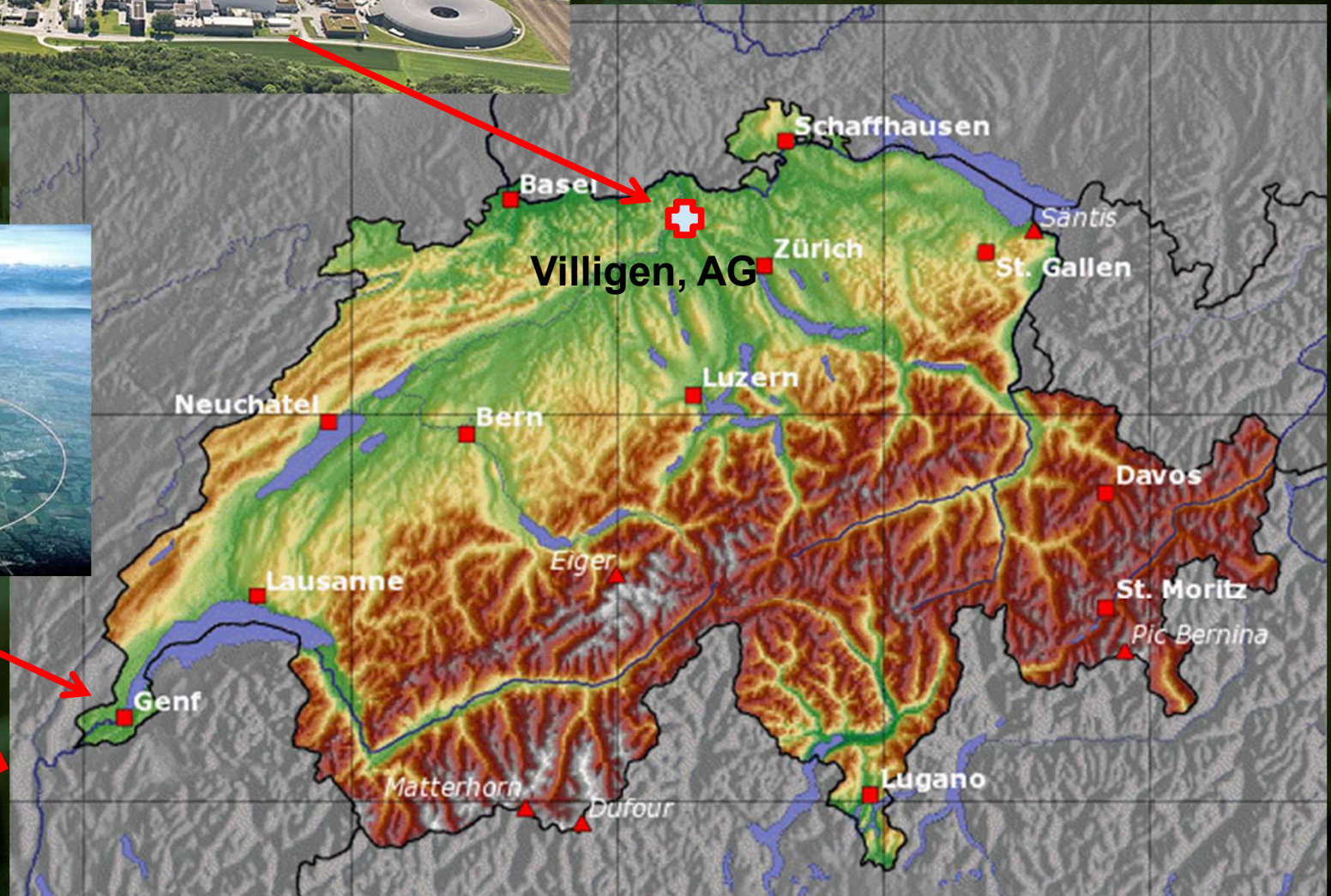
→ “prompte” Röntgenquanten

“später” ($t \sim 1 \mu\text{s}$):

- * 1% der Myonen sind im $2S$ -Zustand
- * Laser auf Resonanz ($\lambda = 6 \mu\text{m}$)
- * $2S \rightarrow 2P \rightarrow 1S$

→ “verzögerte” Röntgenquanten

Der Beschleuniger am PSI



Paul-Scherrer-Institut



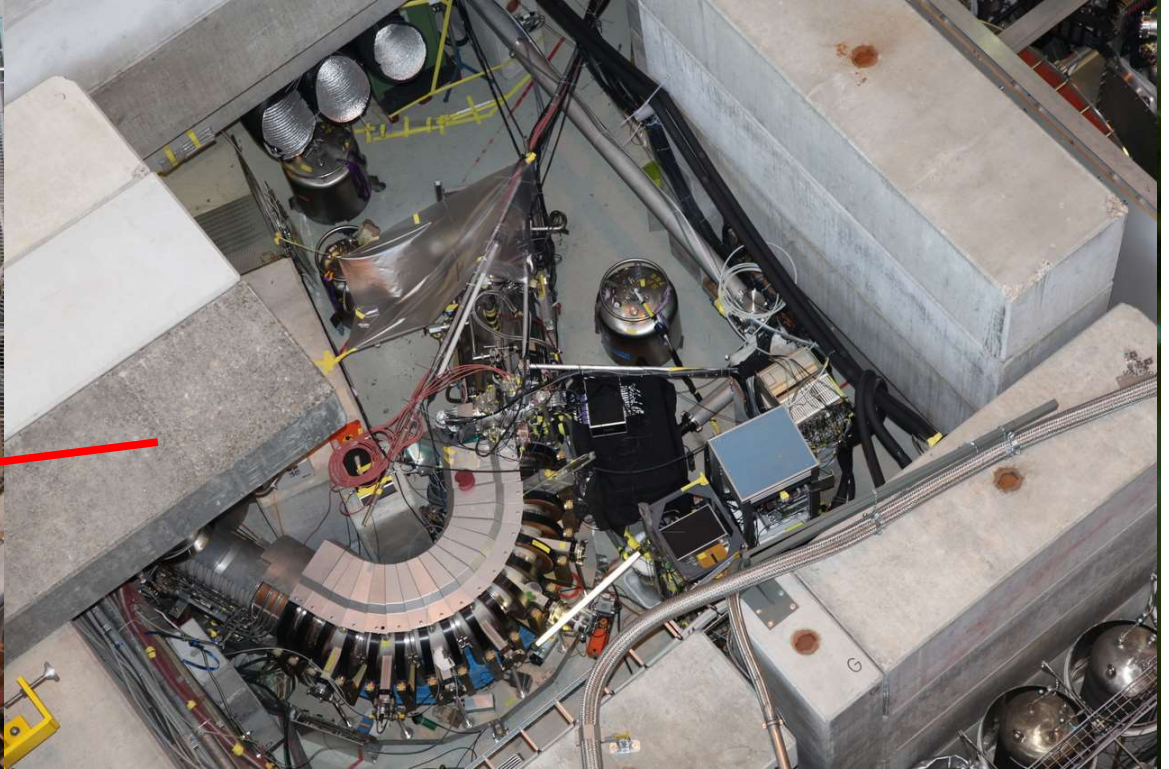
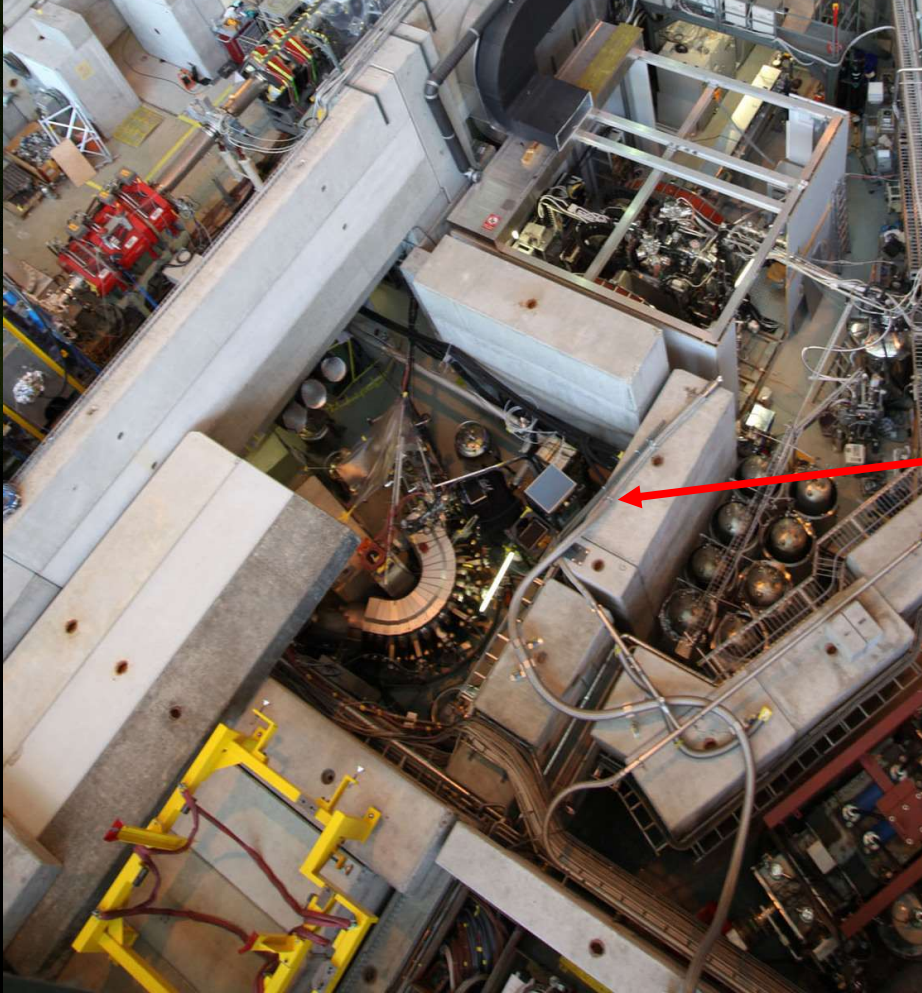
Paul-Scherrer-Institut



Experimentierhalle



Experimentierhalle von oben



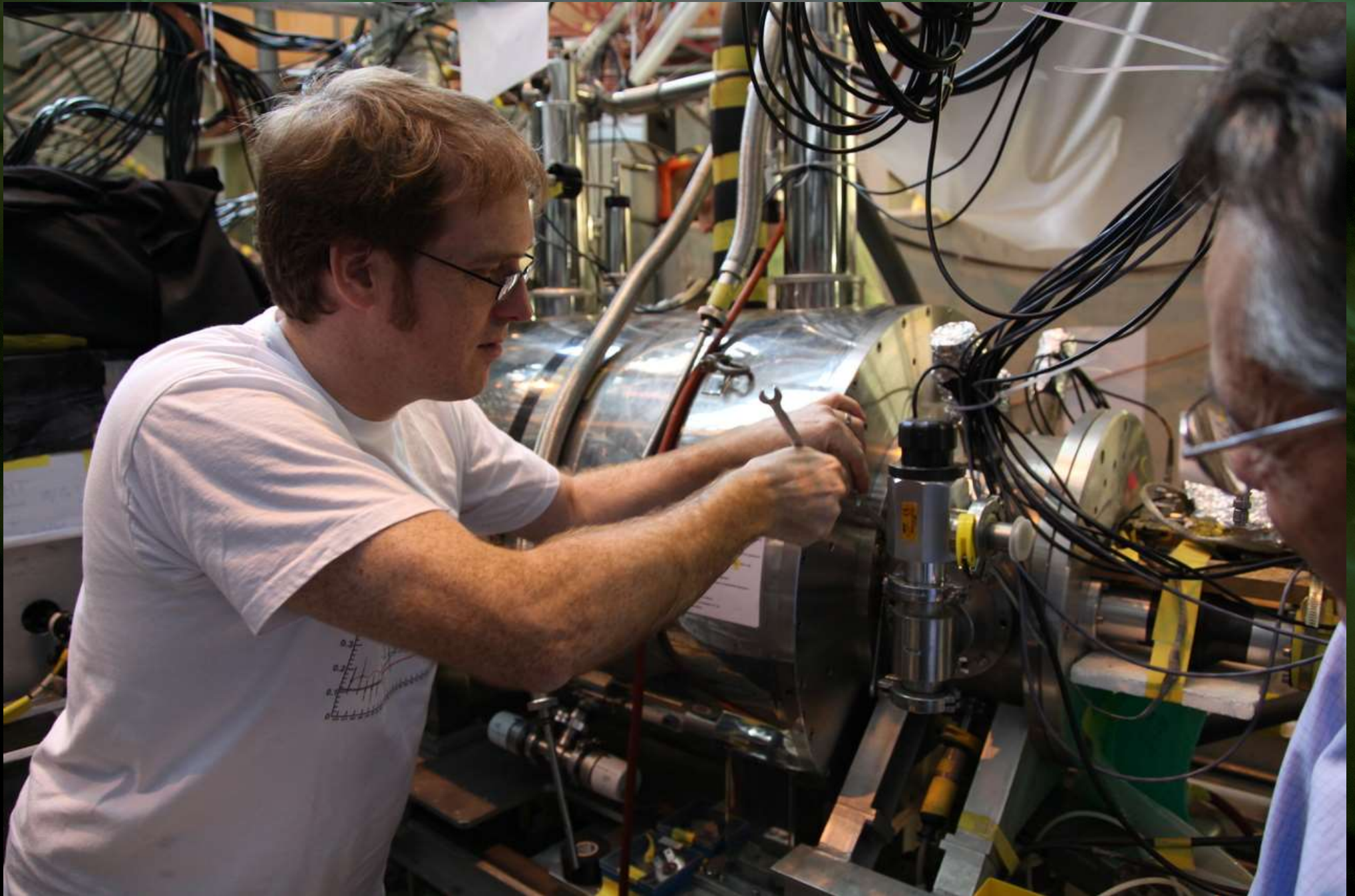
Strahl-Areal $\pi E5$



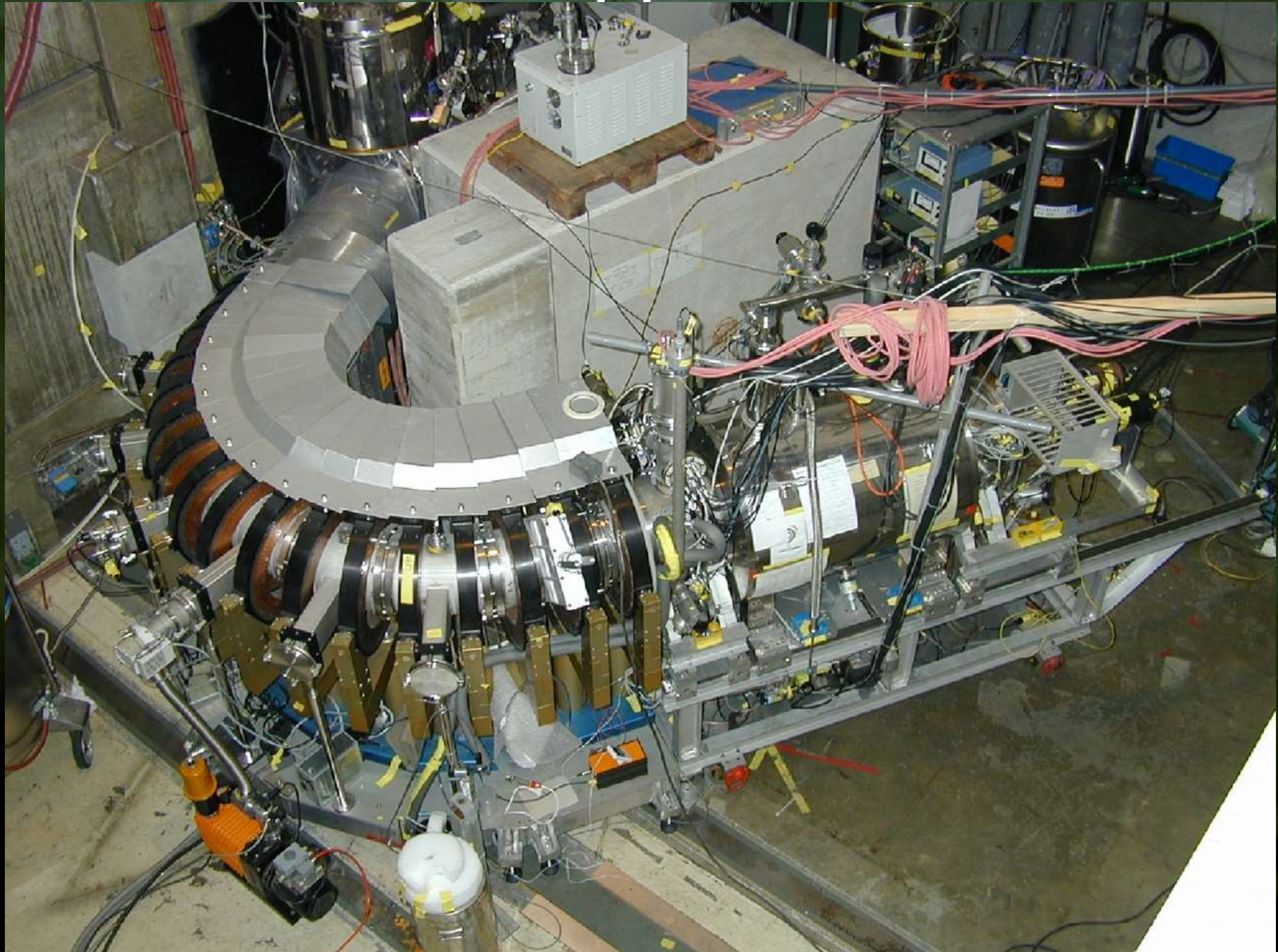
MEK im $\pi E5$

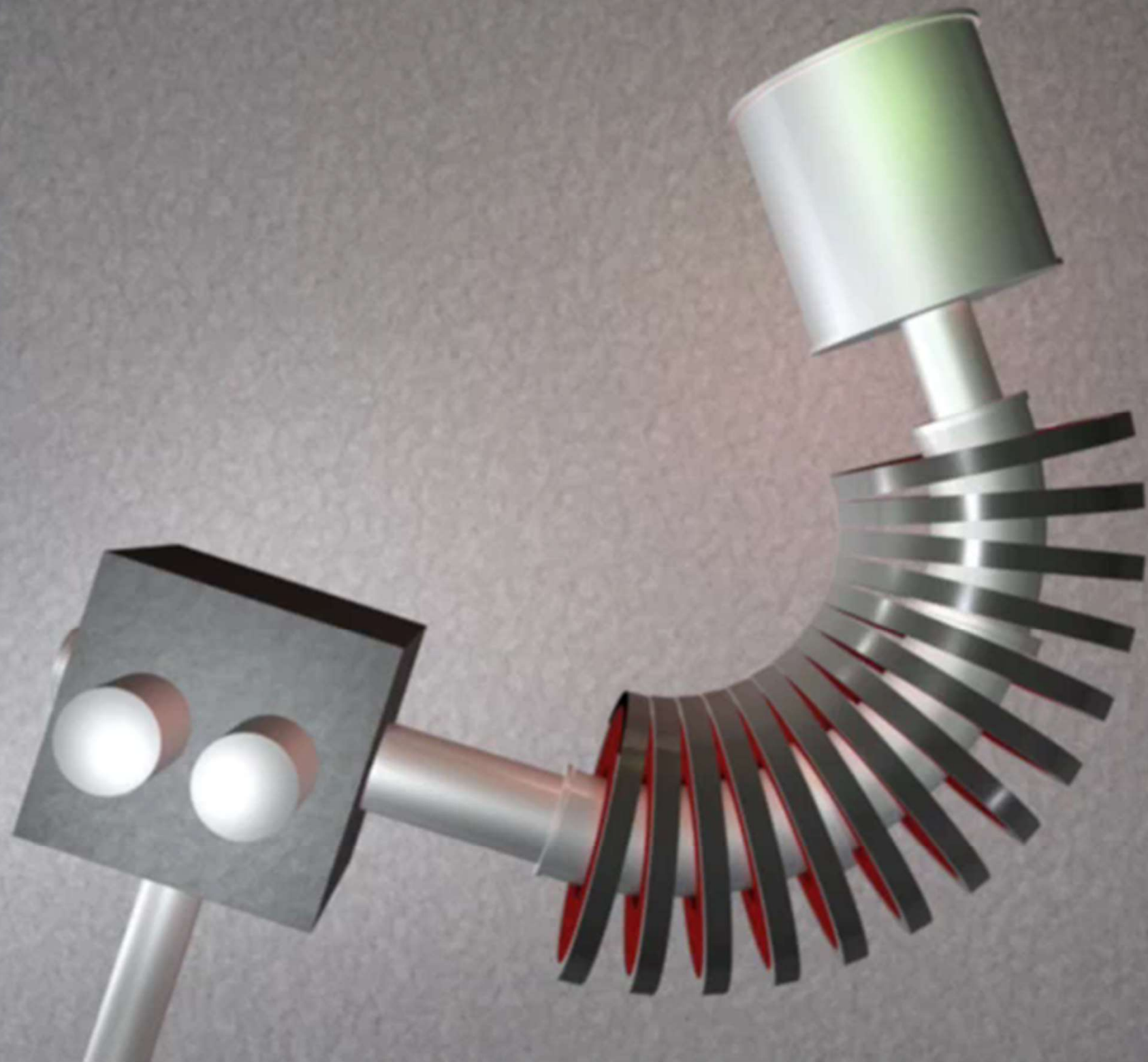


Letzte Vorbereitungen

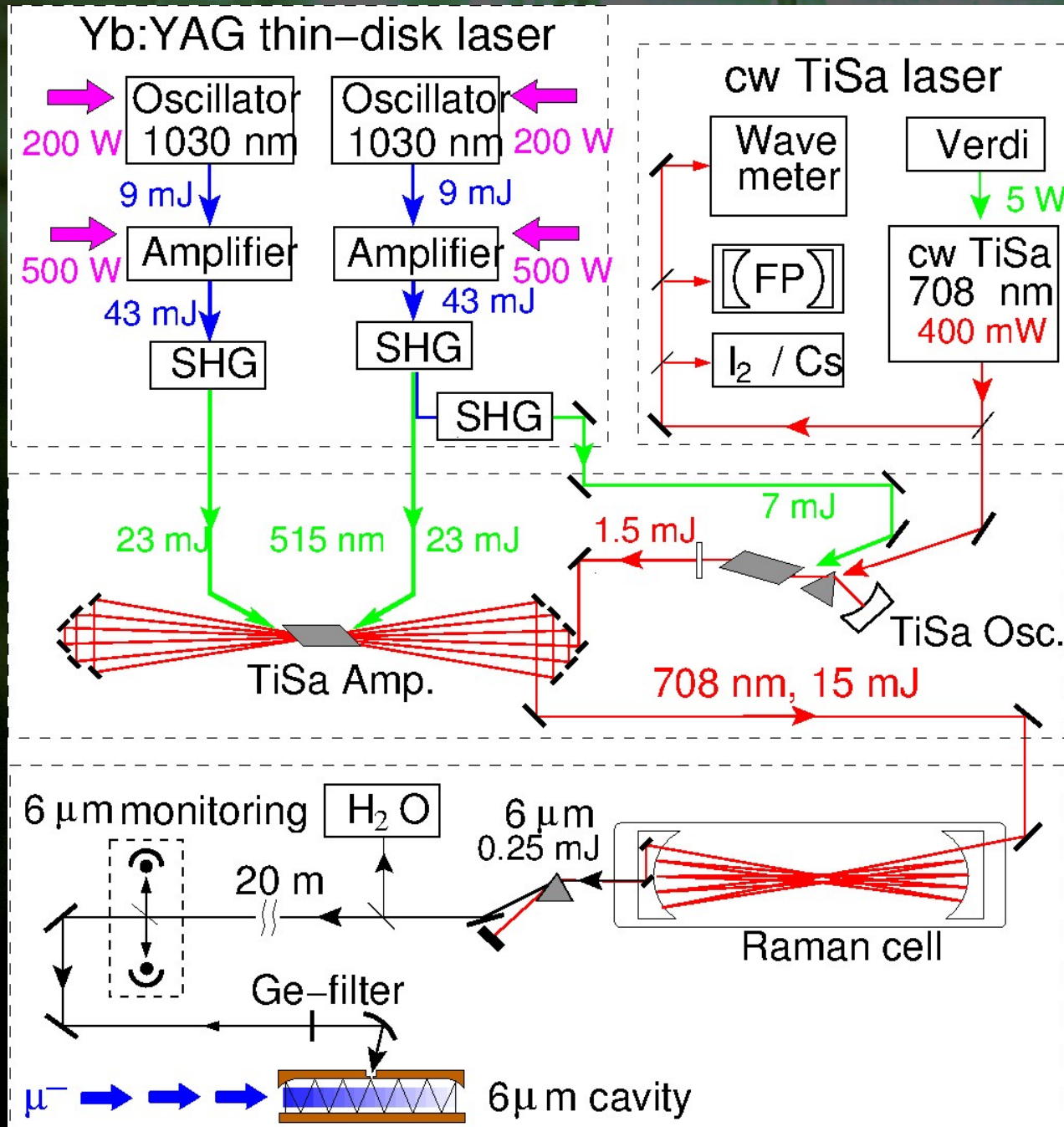


Der Strahlapparat im $\pi E5$





Das Lasersystem



Yb:YAG Scheibenlaser

→ schnelle Reaktion auf μ

Frequenzverdopplung (SHG)

→ grünes Licht zum Pumpen
Von Ti:Saphir-Kristallen

Ti:Saphir cw Laser

→ gibt Laserwellenlänge vor

Ti:Saphir Oszillator/Verstärker

→ hohe Pulsenergie (15 mJ)

Ramanzelle

→ 3fache Änderung der
Laserwellenlänge → 6 μm

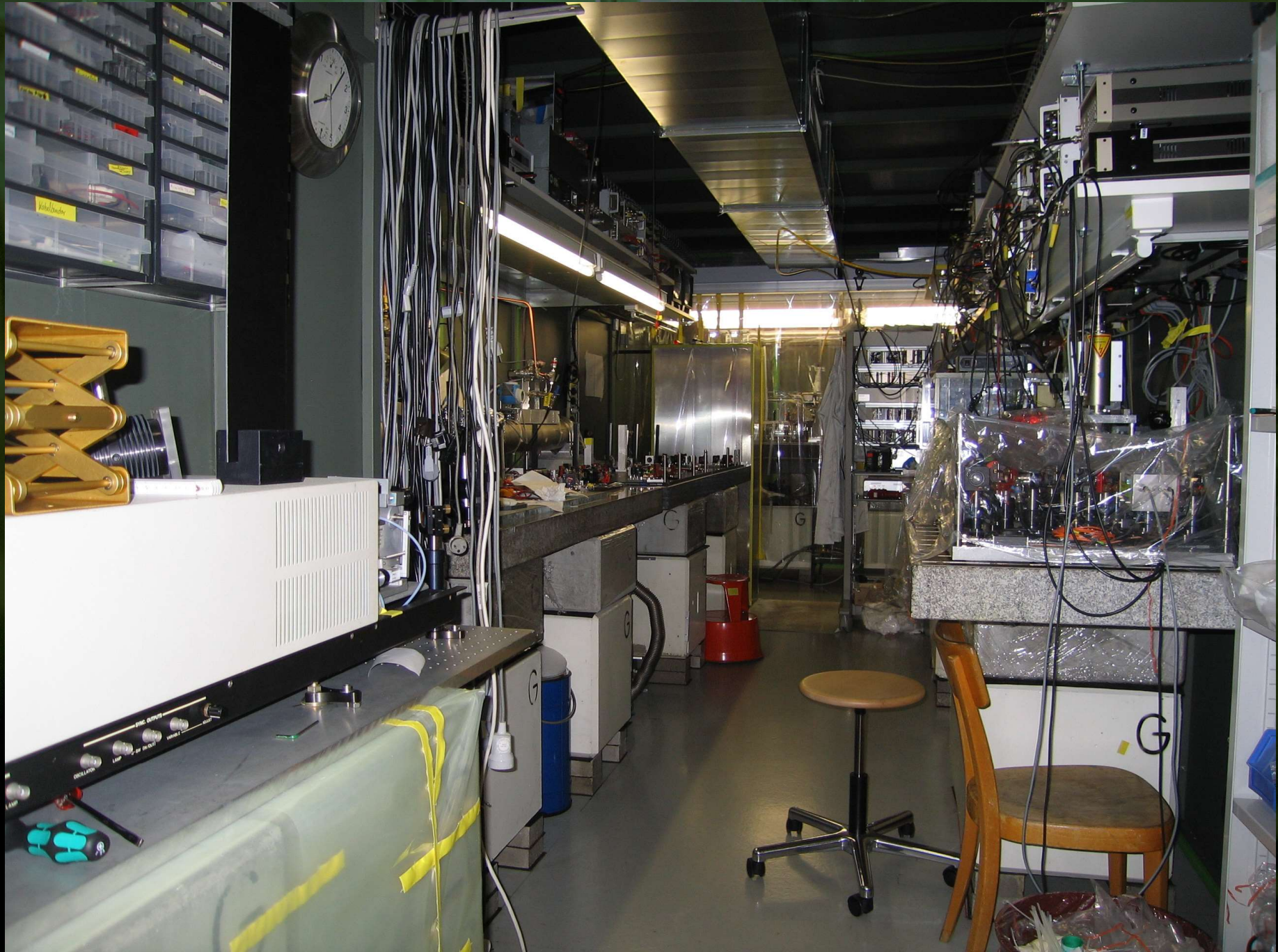
Target Cavity

→ Spiegelsystem umschließt
Das Myonen-Stopvolumen

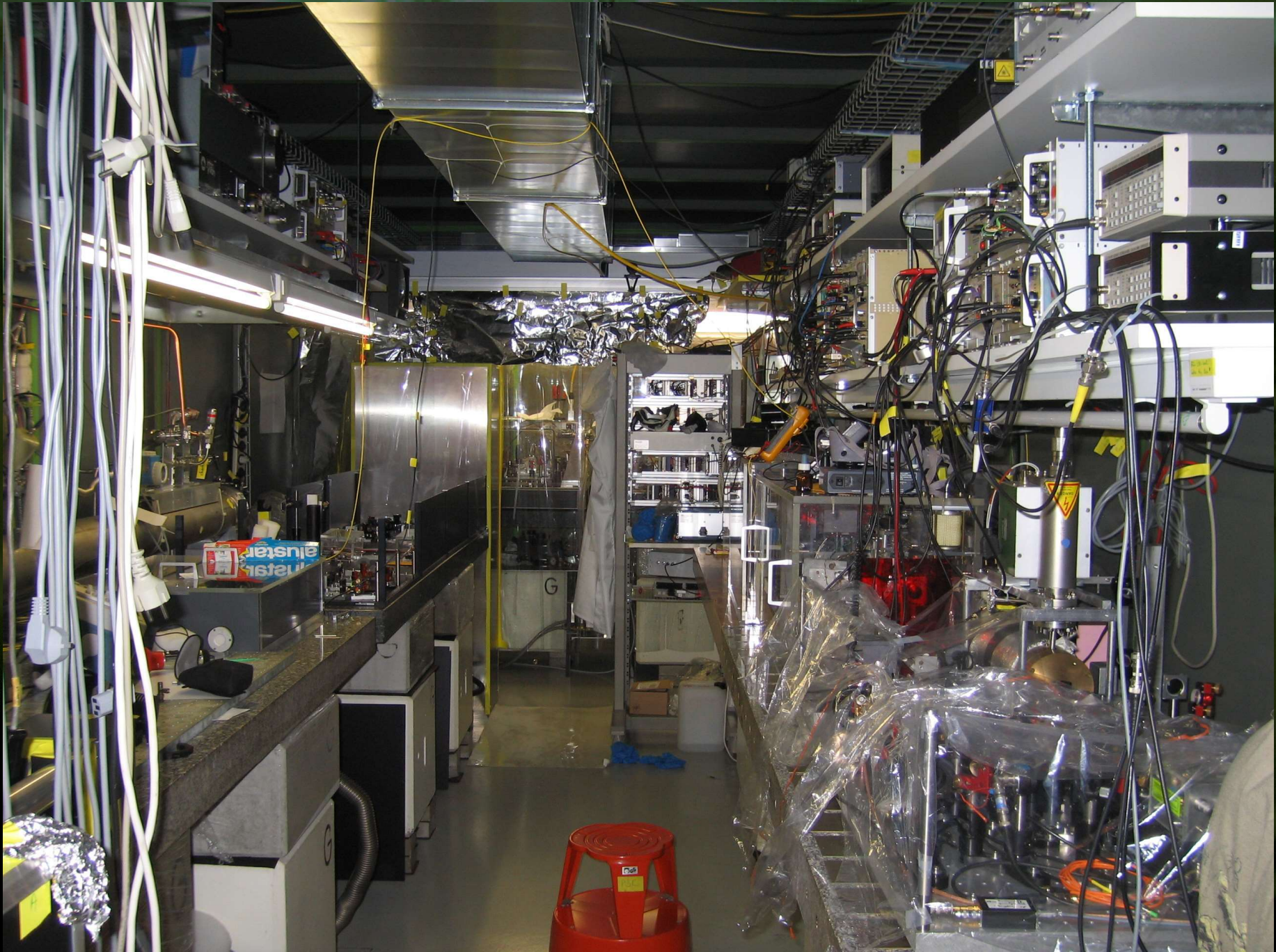
In der Laserhütte



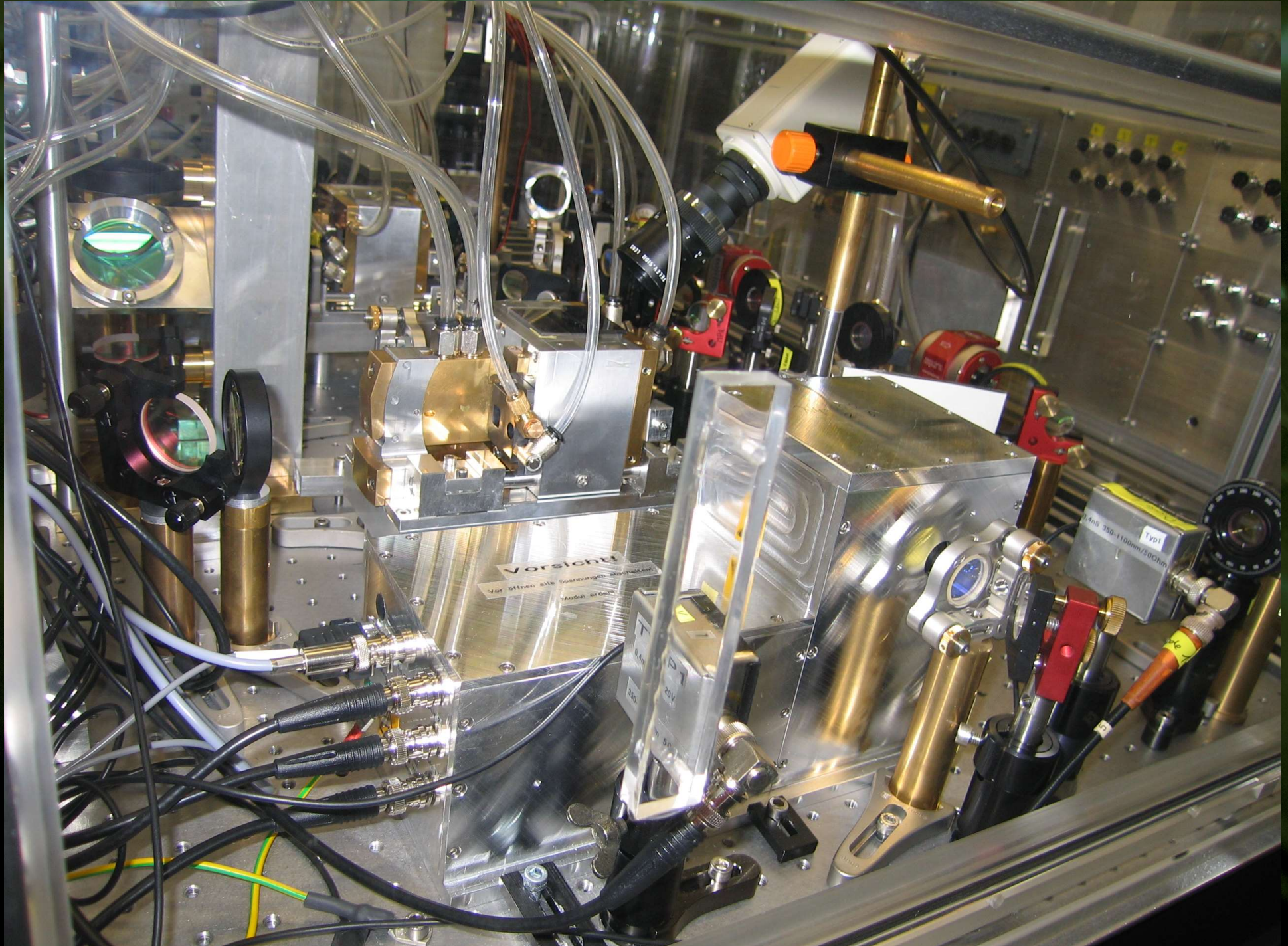
In der Laserhütte



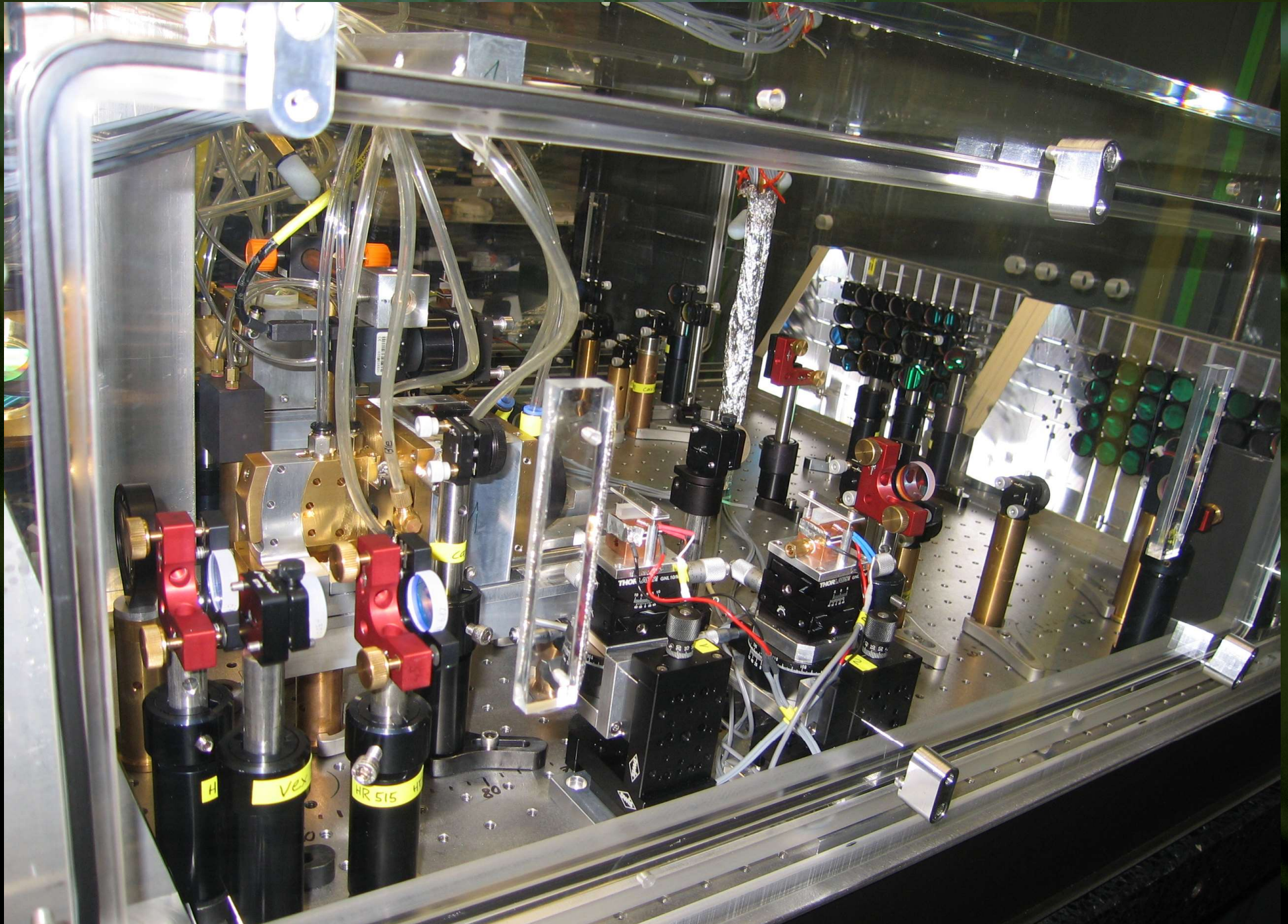
In der Laserhütte



Yb:YAG Oszillator



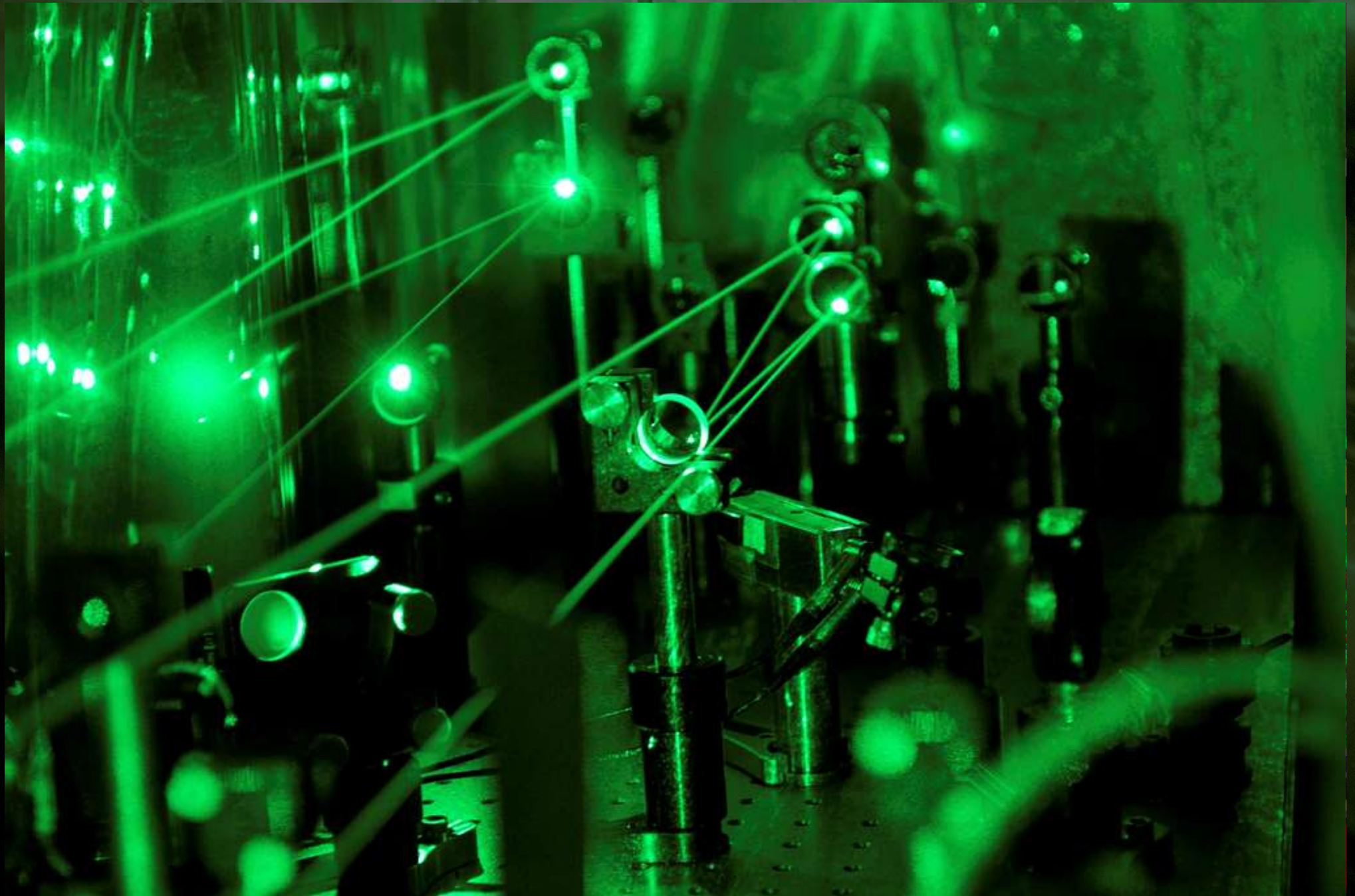
Yb:YAG Verstärker



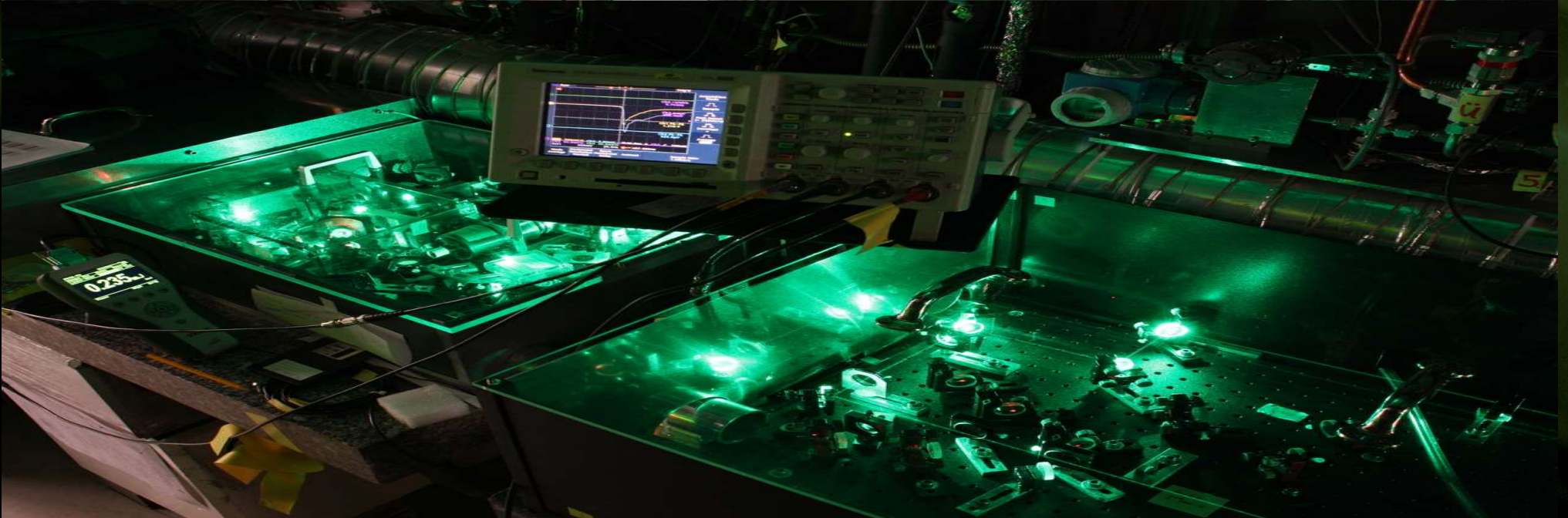
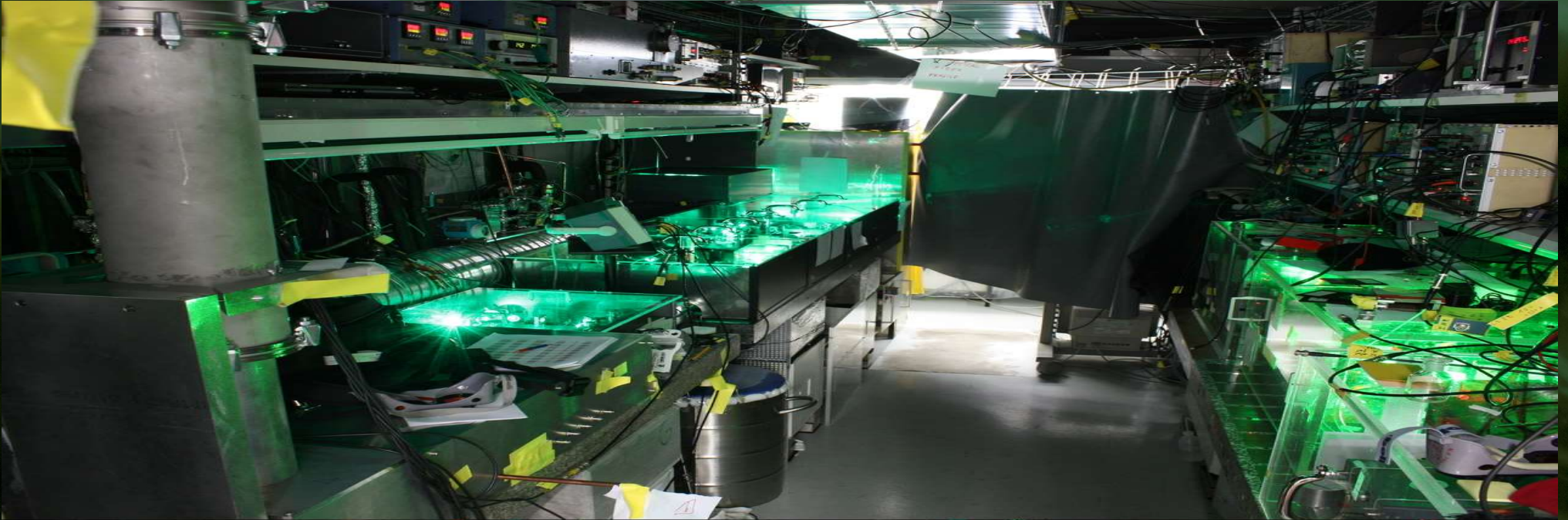
In der Laserhütte



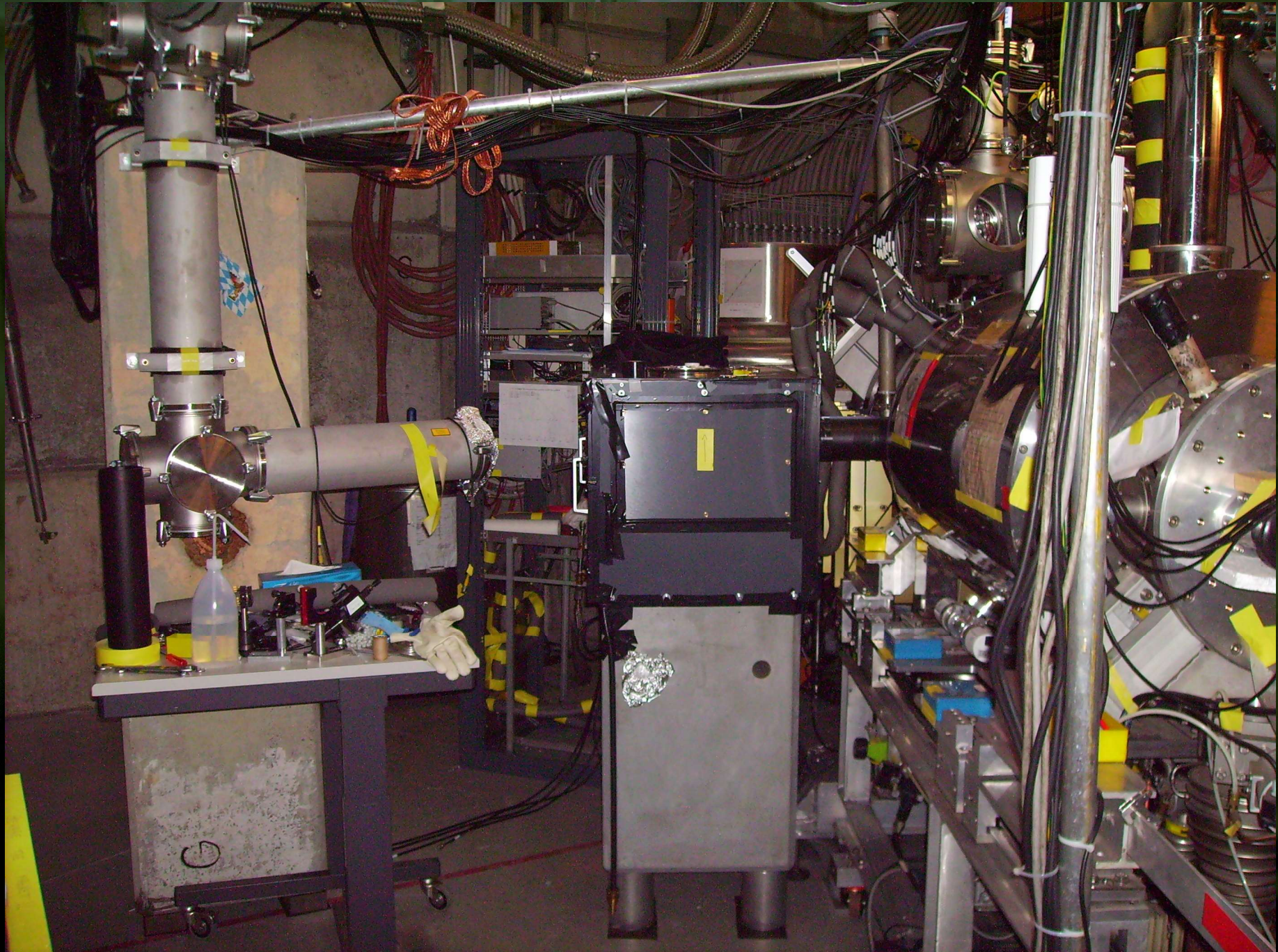
In der Laserhütte



In der Laserhütte



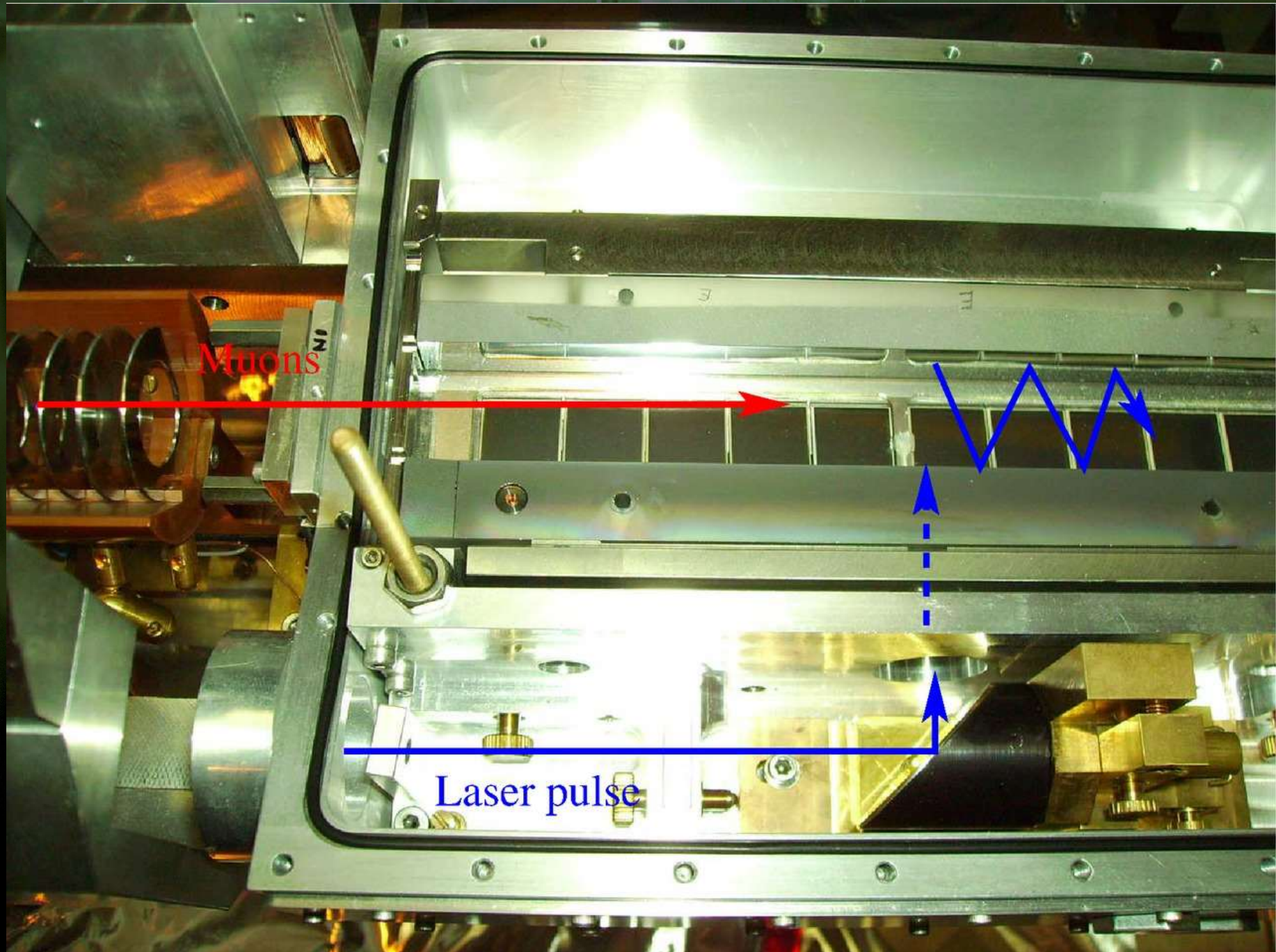
Licht durch die Röhre



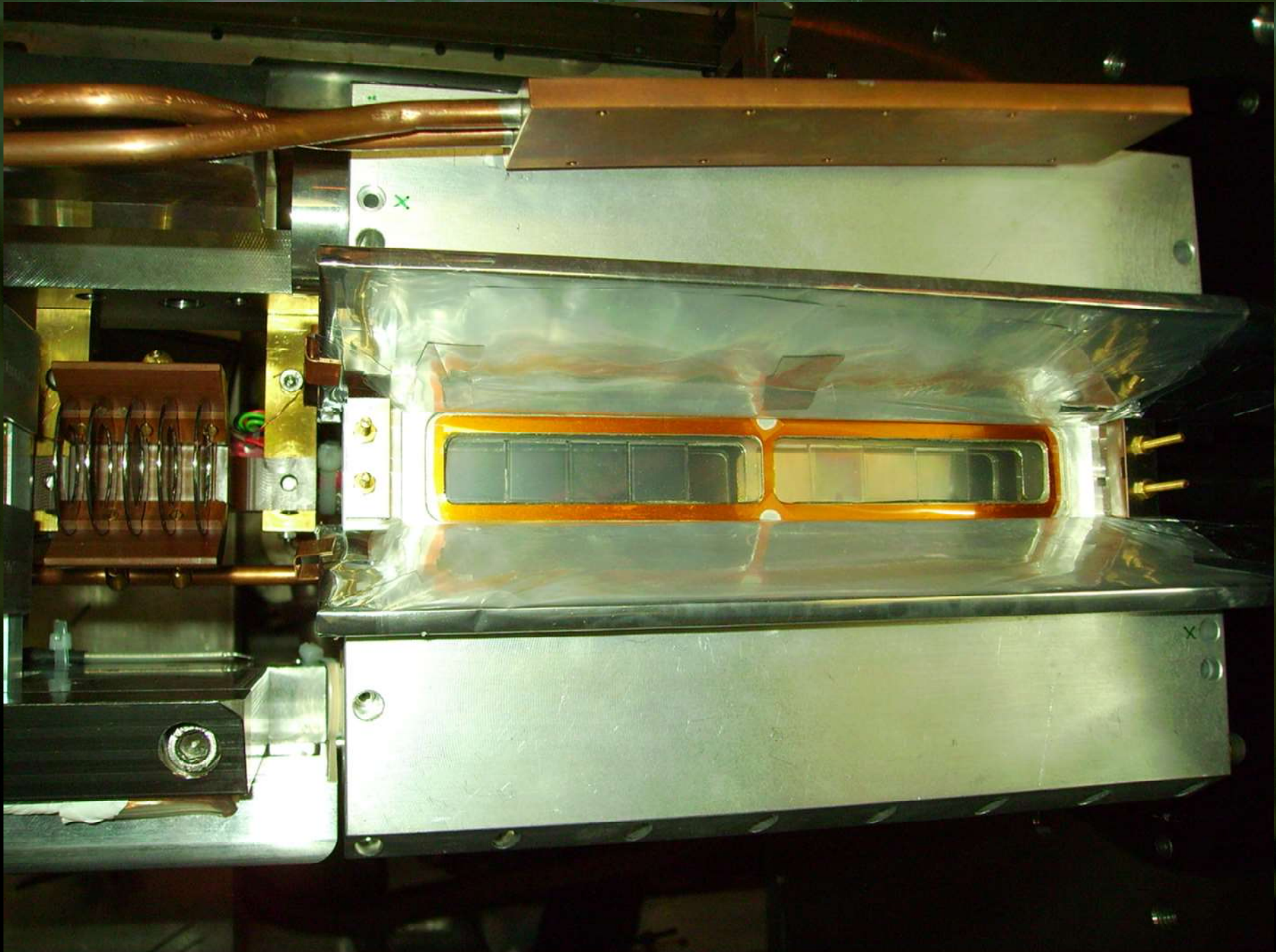
Laserhütte



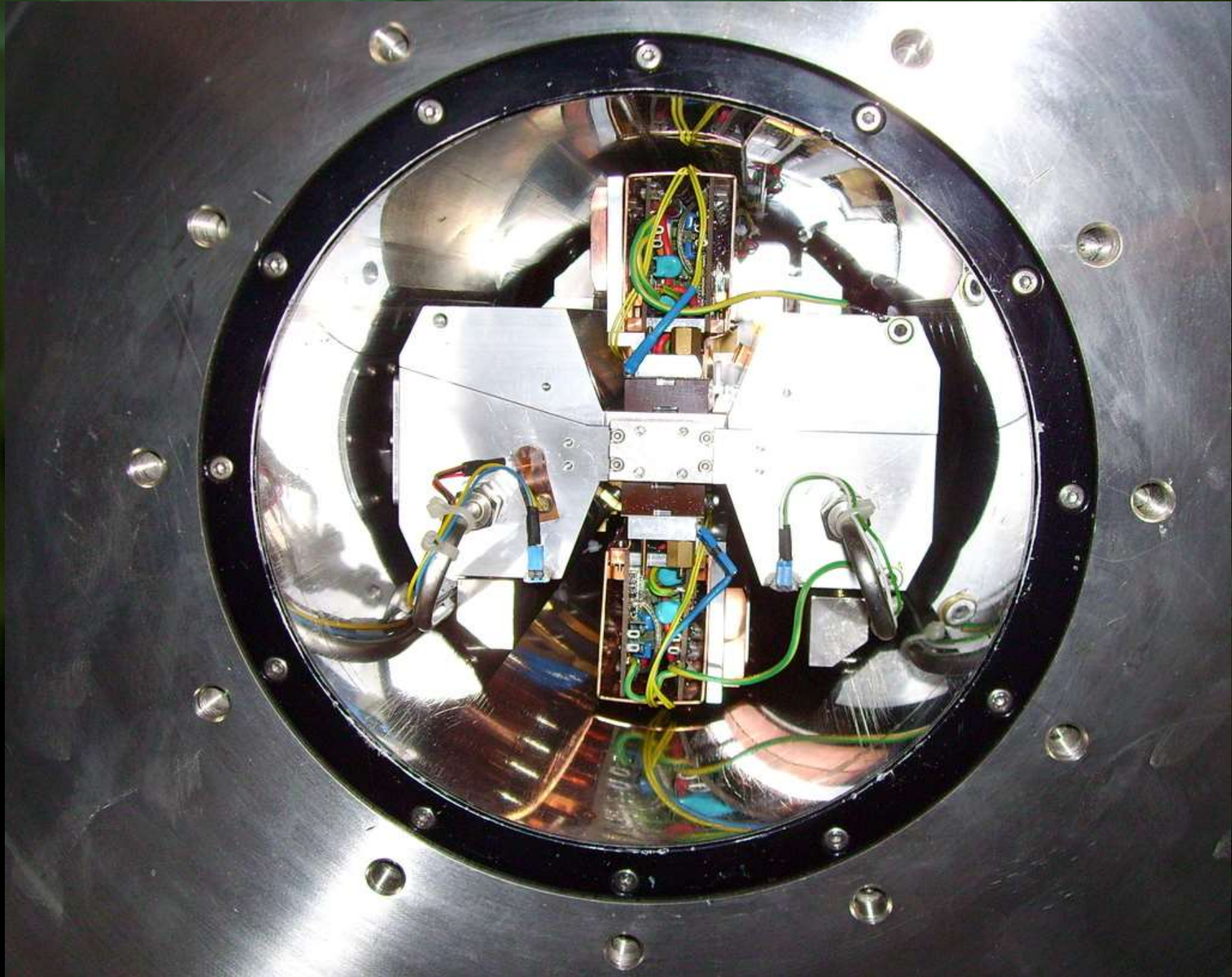
Das Herz des Aufbaus - Target



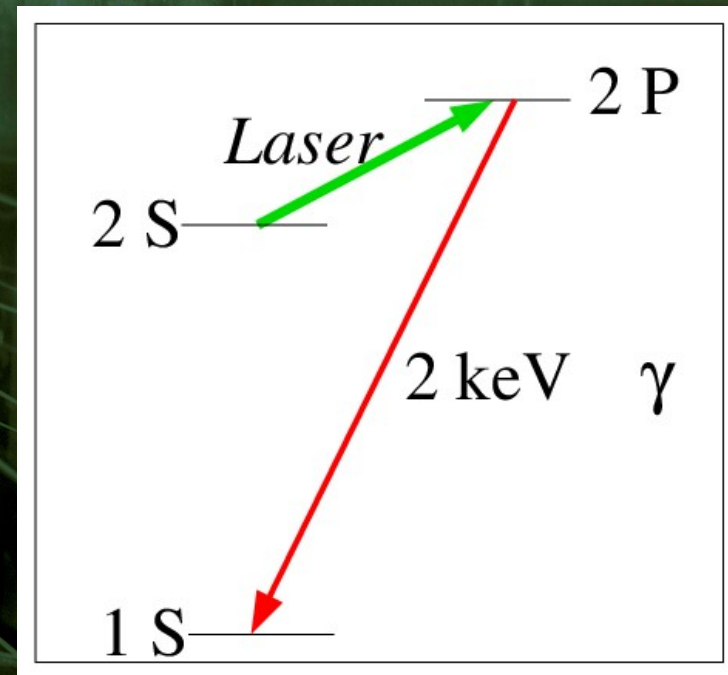
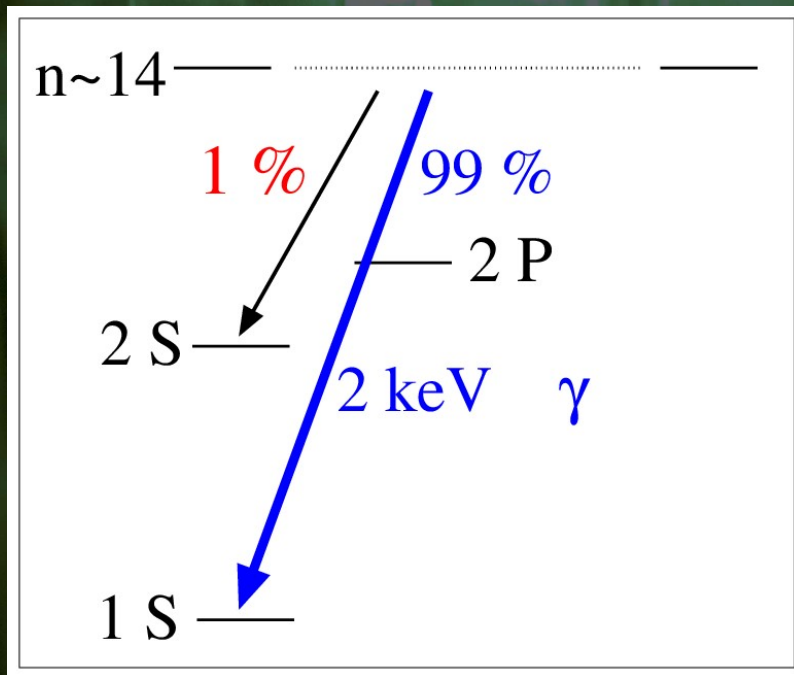
Das Herz des Aufbaus - Target



Das Herz des Aufbaus - Target



Prinzip der Messung



“prompt” ($t=0$):

- * Einfang des Myons bei $n \sim 14$
- * Kaskade
- * 99% enden im Grundzustand

→ “prompte” Röntgenquanten

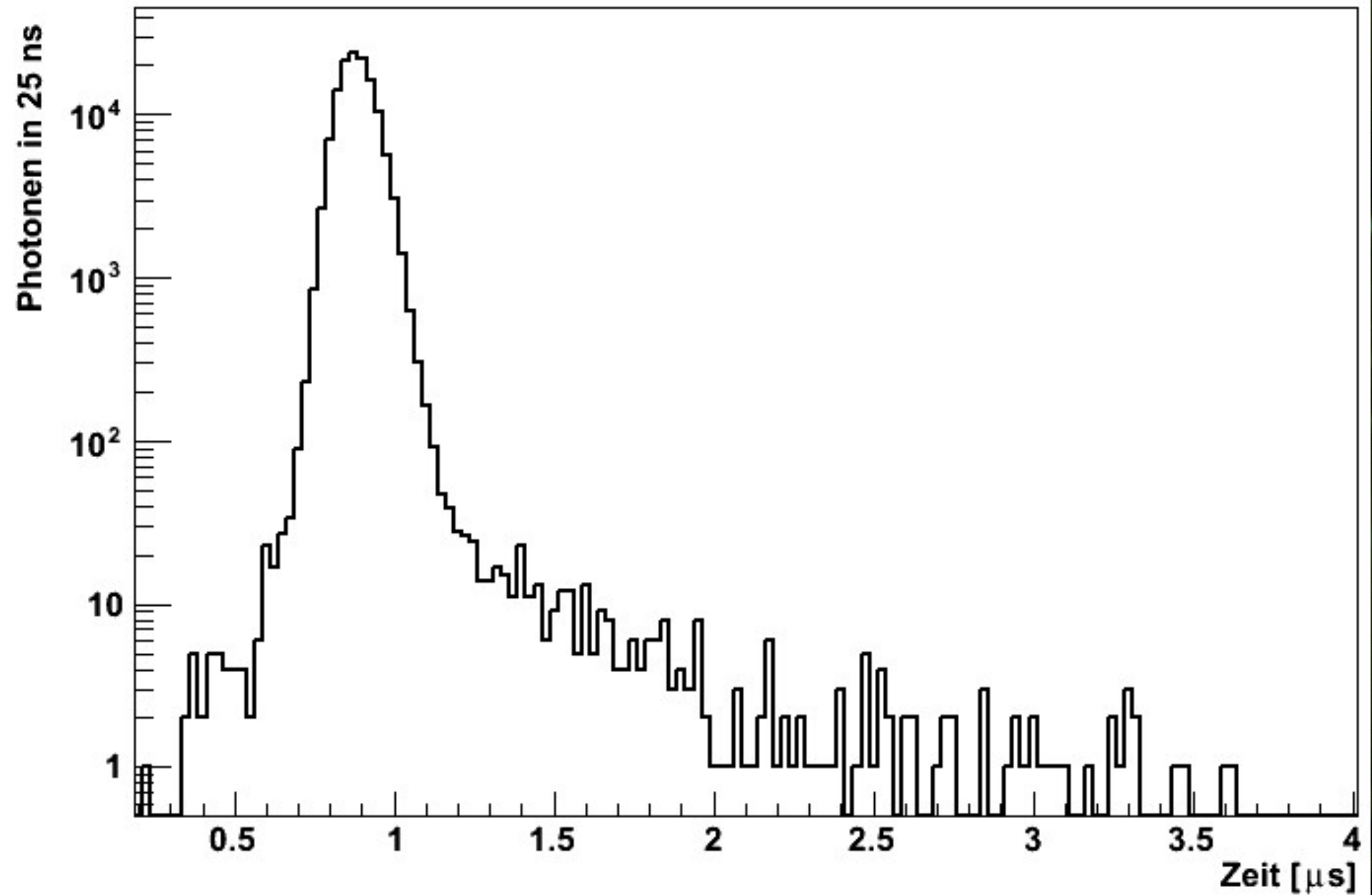
“später” ($t \sim 1 \mu\text{s}$):

- * 1% der Myonen sind im $2S$ -Zustand
- * Laser auf Resonanz ($\lambda=6 \mu\text{m}$)
- * $2S \rightarrow 2P \rightarrow 1S$

→ “verzögerte” Röntgenquanten

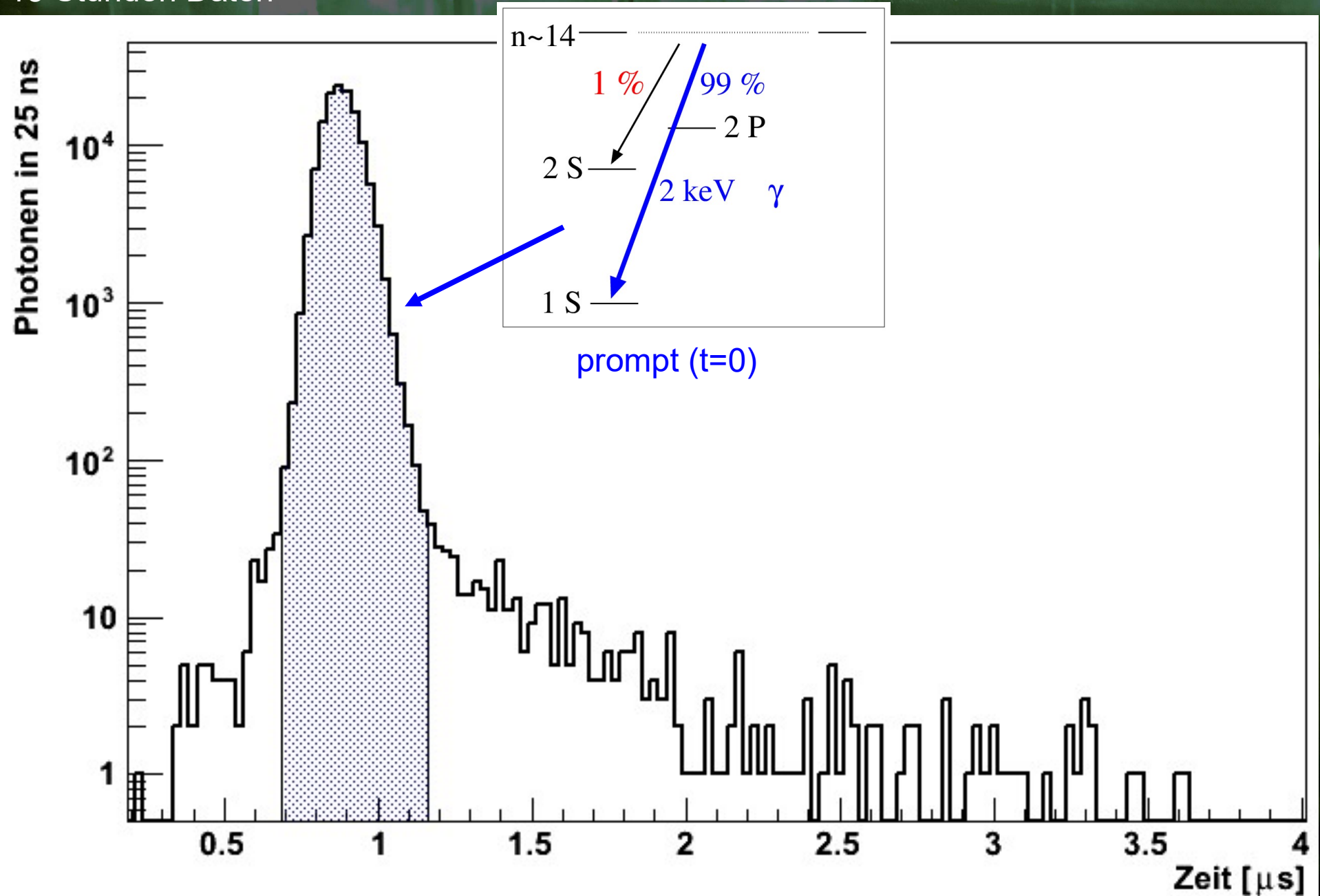
Zeitspektren

13 Stunden Daten

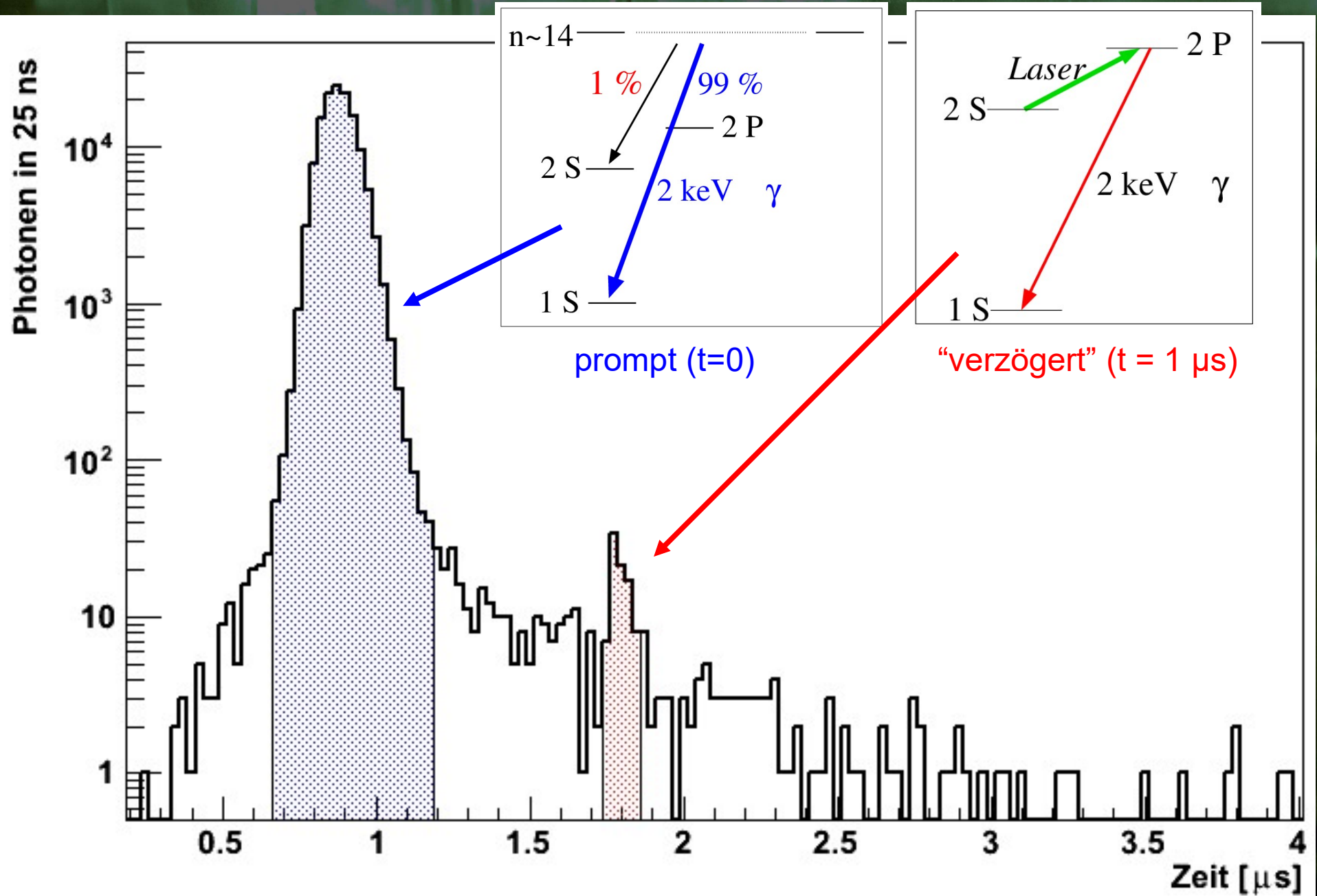


Zeitspektren

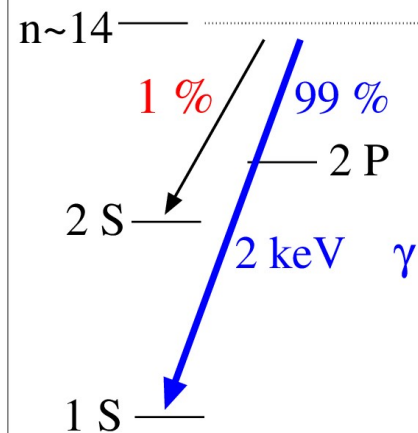
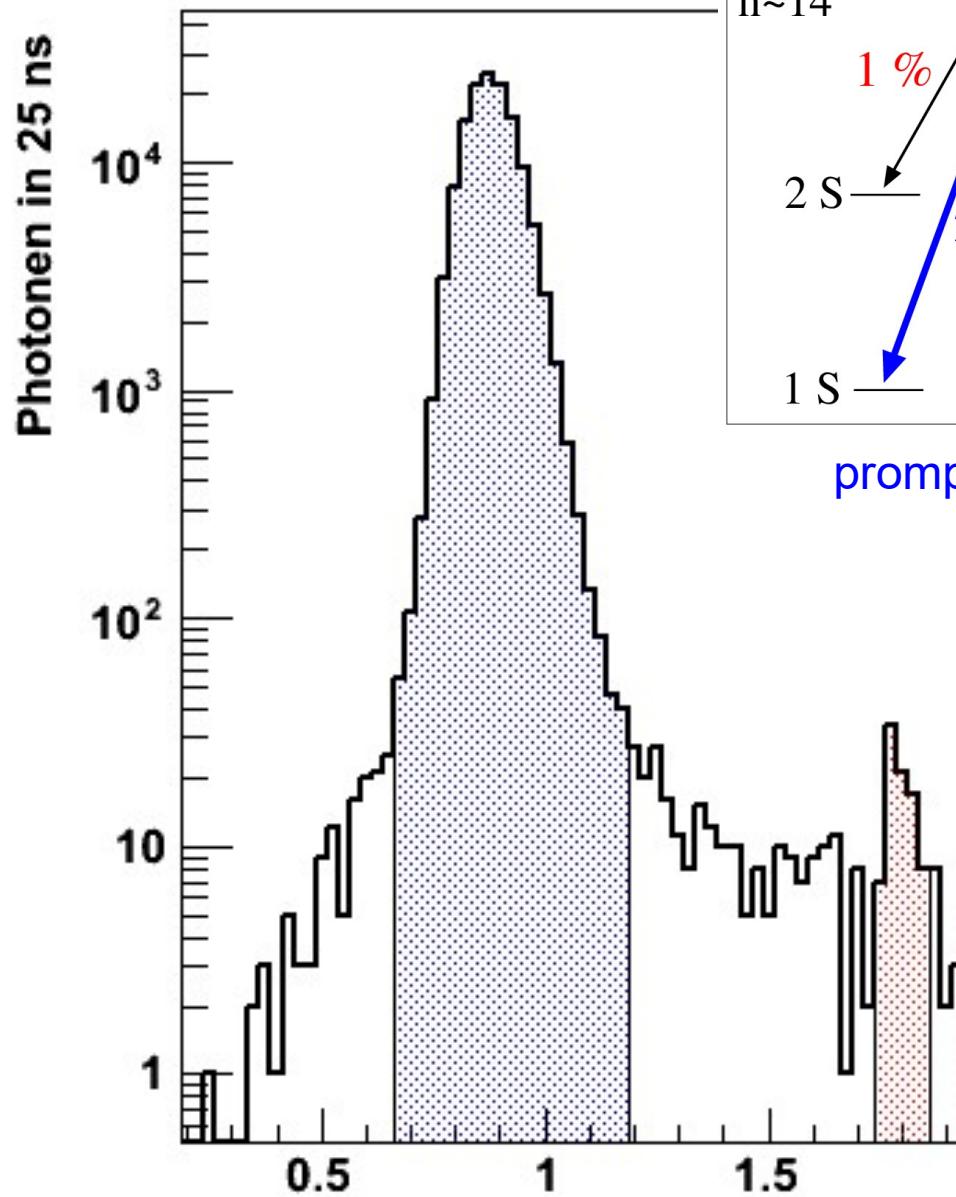
13 Stunden Daten



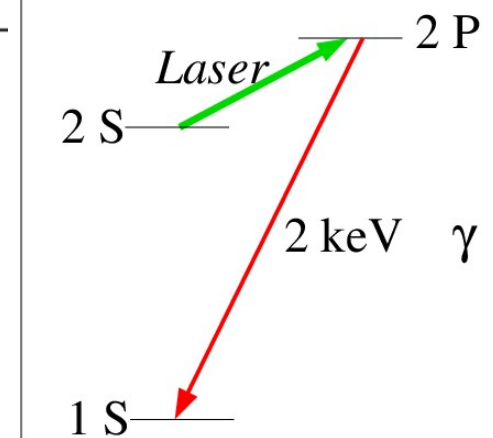
Zeitspektren



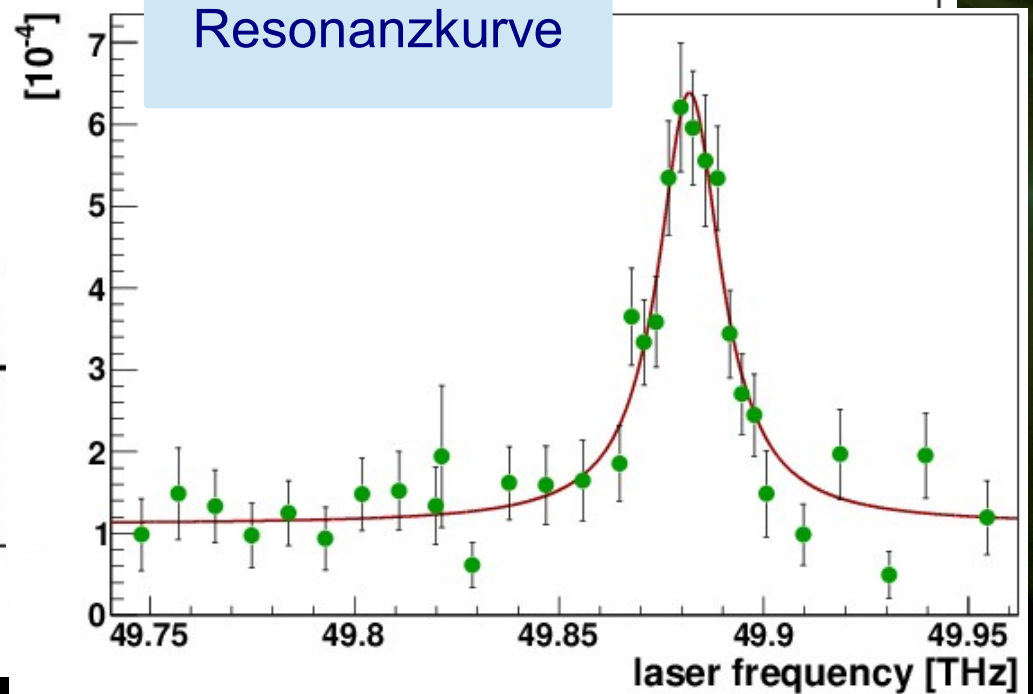
Zeitspektren



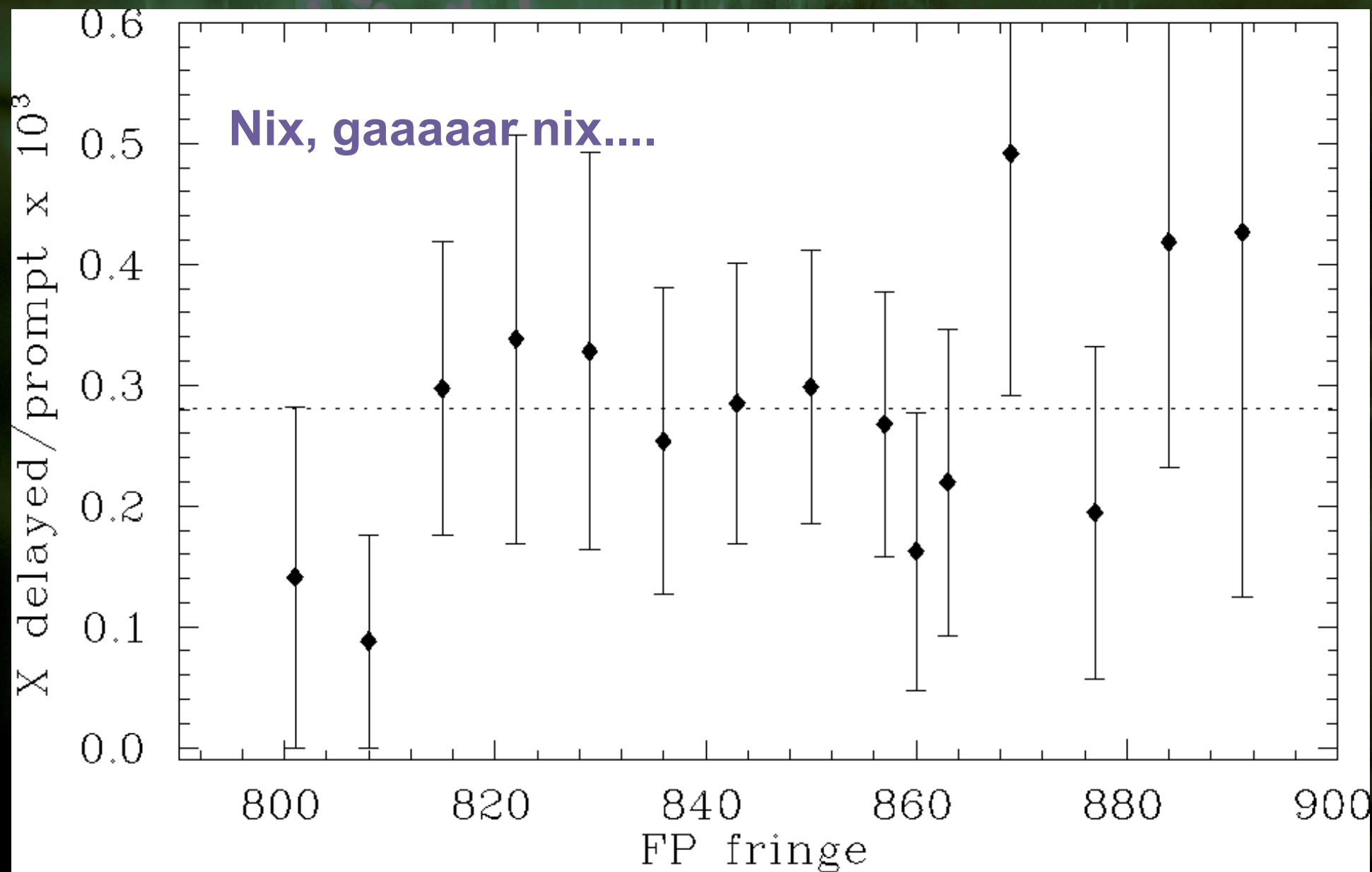
prompt ($t=0$)



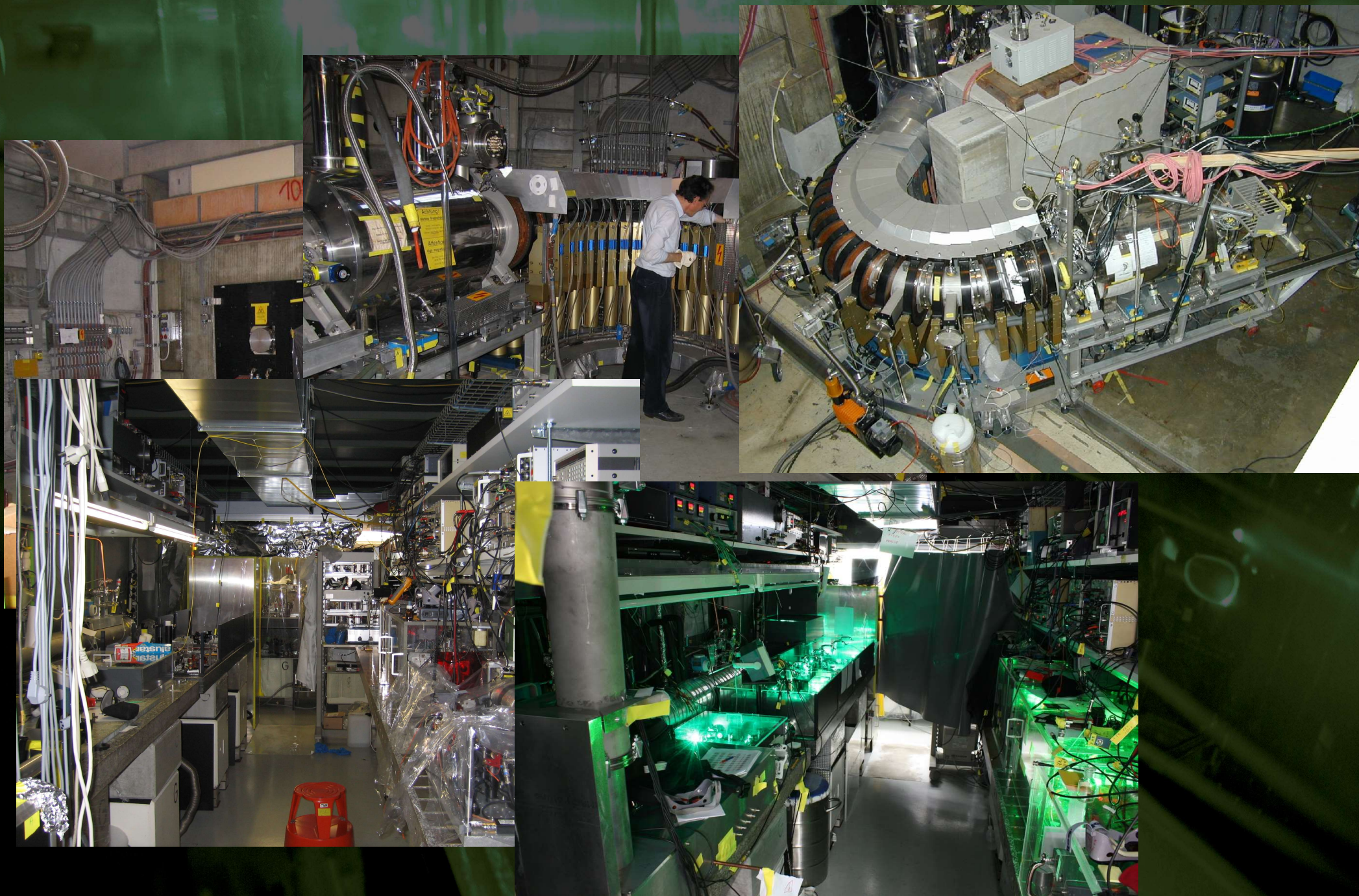
“verzögert” ($t = 1 \mu s$)



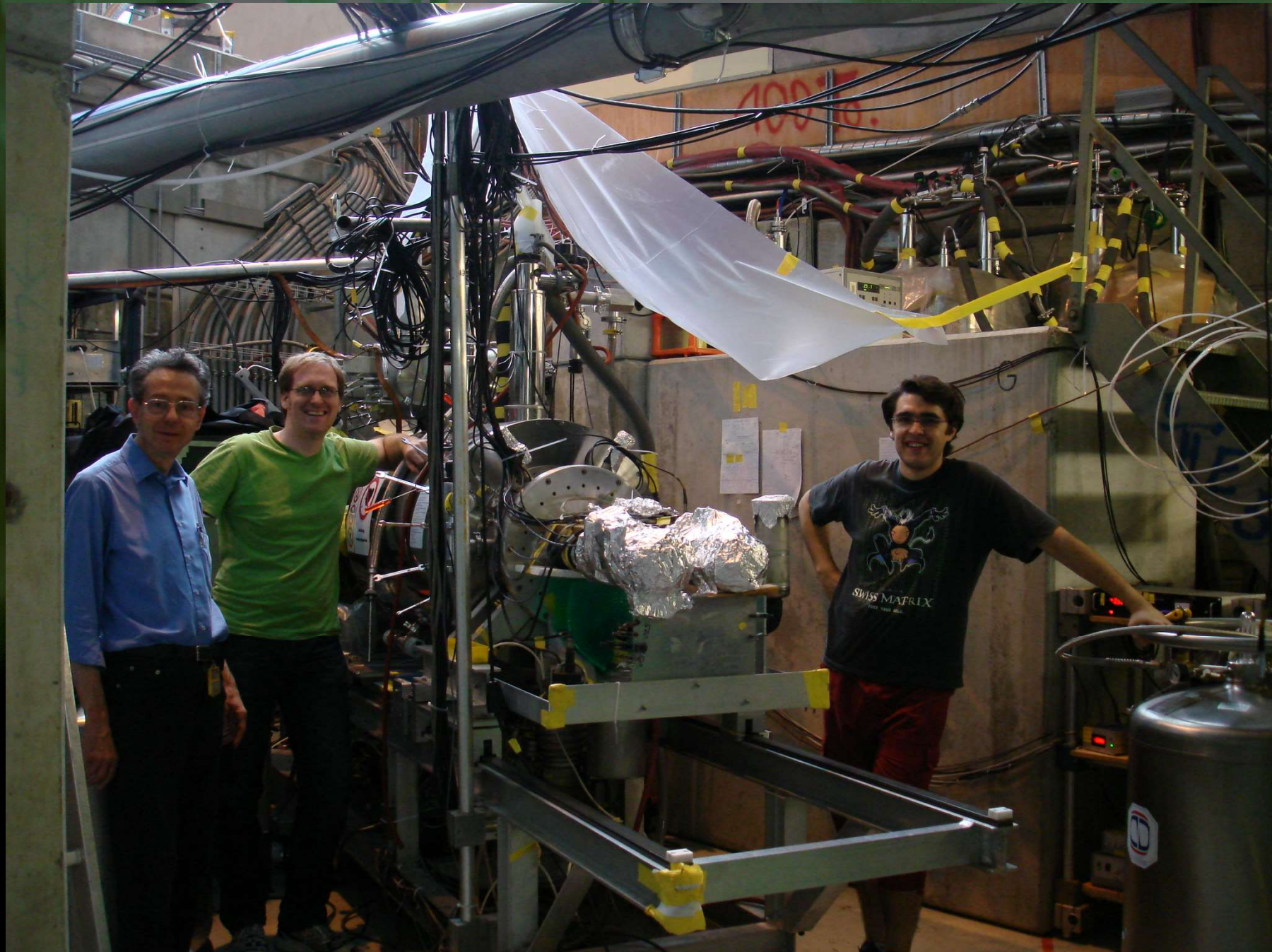
1997 - 2008

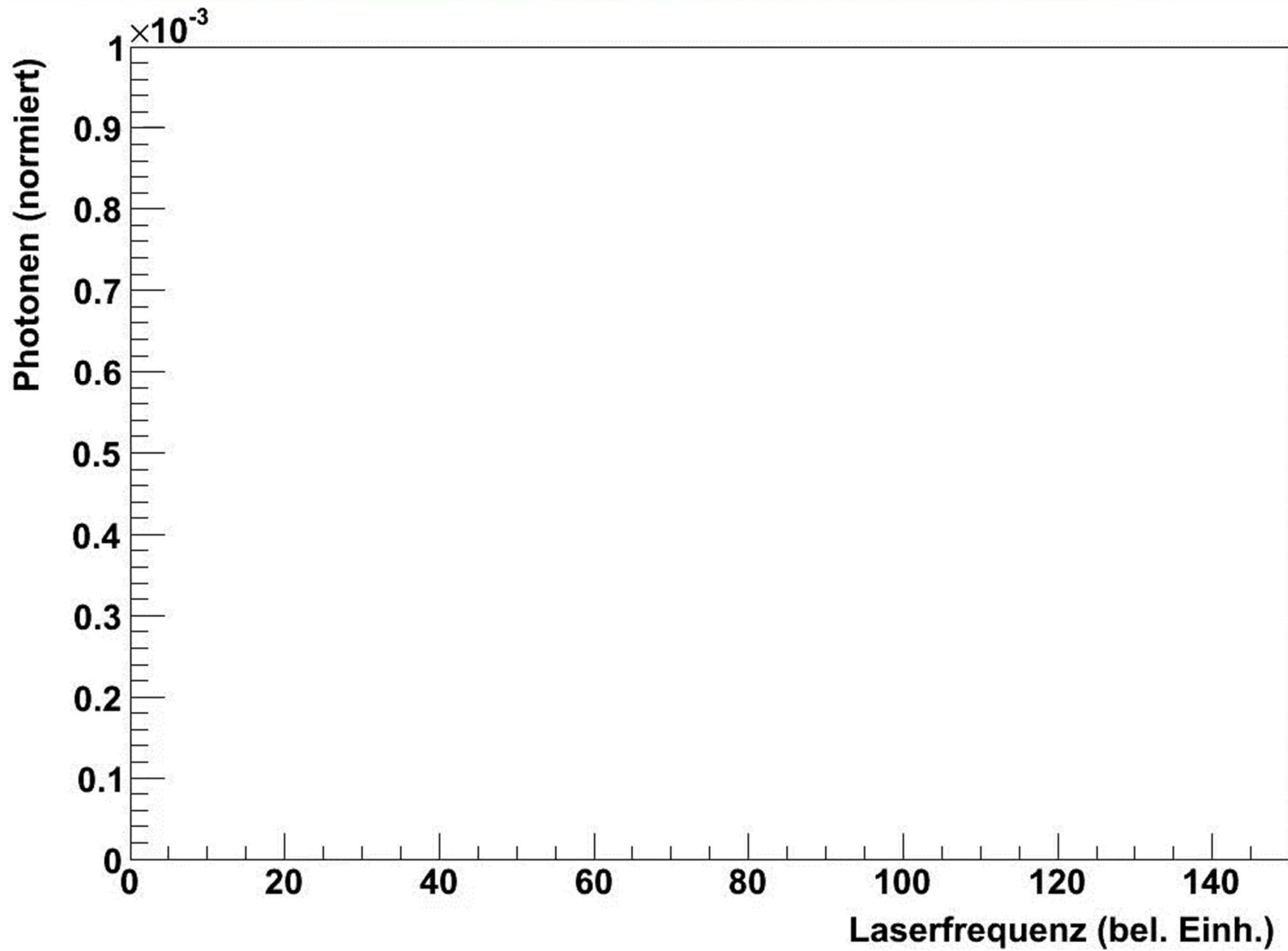


Run 2009

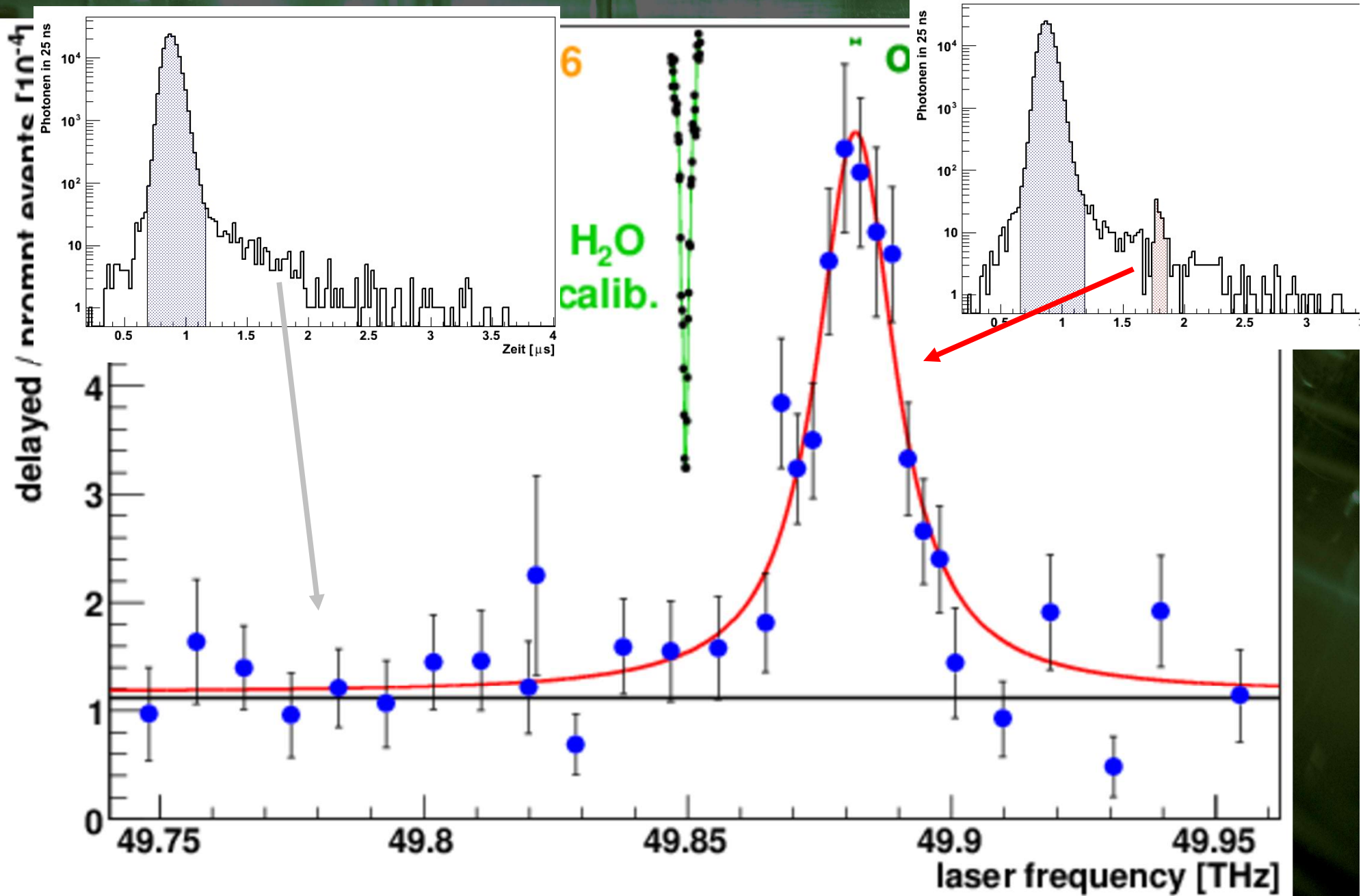


Fertig aufgebaut





Die lang gesuchte Resonanz



Yeah!



Auf die Resonanz!



Die Resonanz auf die Linie

8 July 2010 | www.nature.com/nature \$10

THE INTERNATIONAL WEEKLY JOURNAL OF SCIENCE

nature

OIL SPILLS

There's more
to come

PLAGIARISM

It's worse than
you think

CHIMPANZEES

The battle for
survival

SHRINKING THE PROTON

New value from exotic atom
trims radius by four per cent

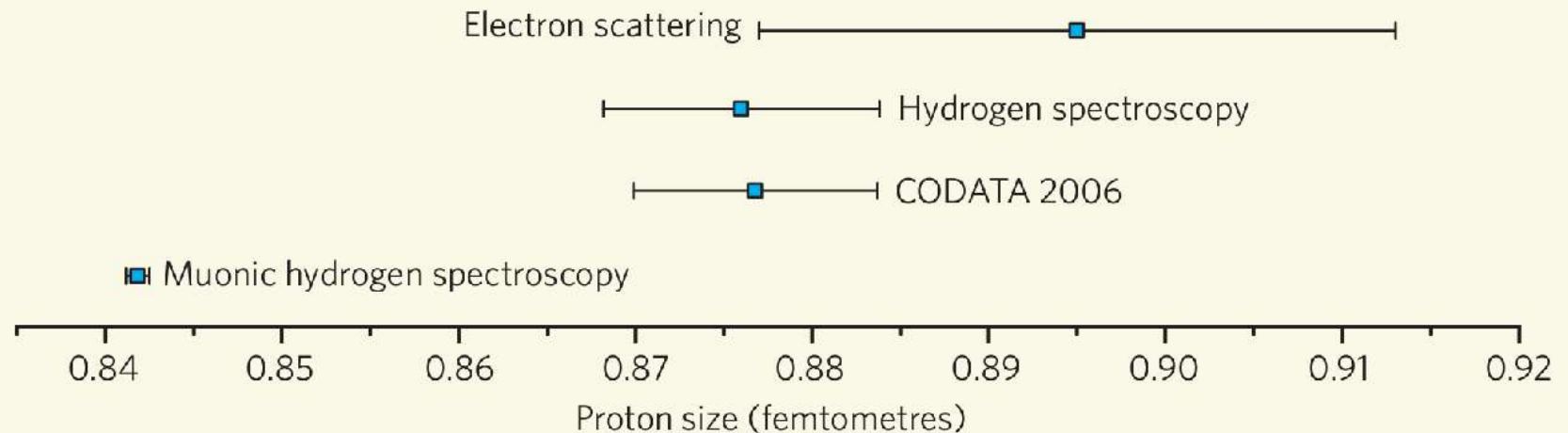
NATUREJOBS
Researchers for hire



Das Proton ist **4% kleiner** als gedacht!

0.84184 ± 0.00067 fm statt

0.8768 ± 0.0069 fm



Die Resonanz auf die Linie



DRS 1

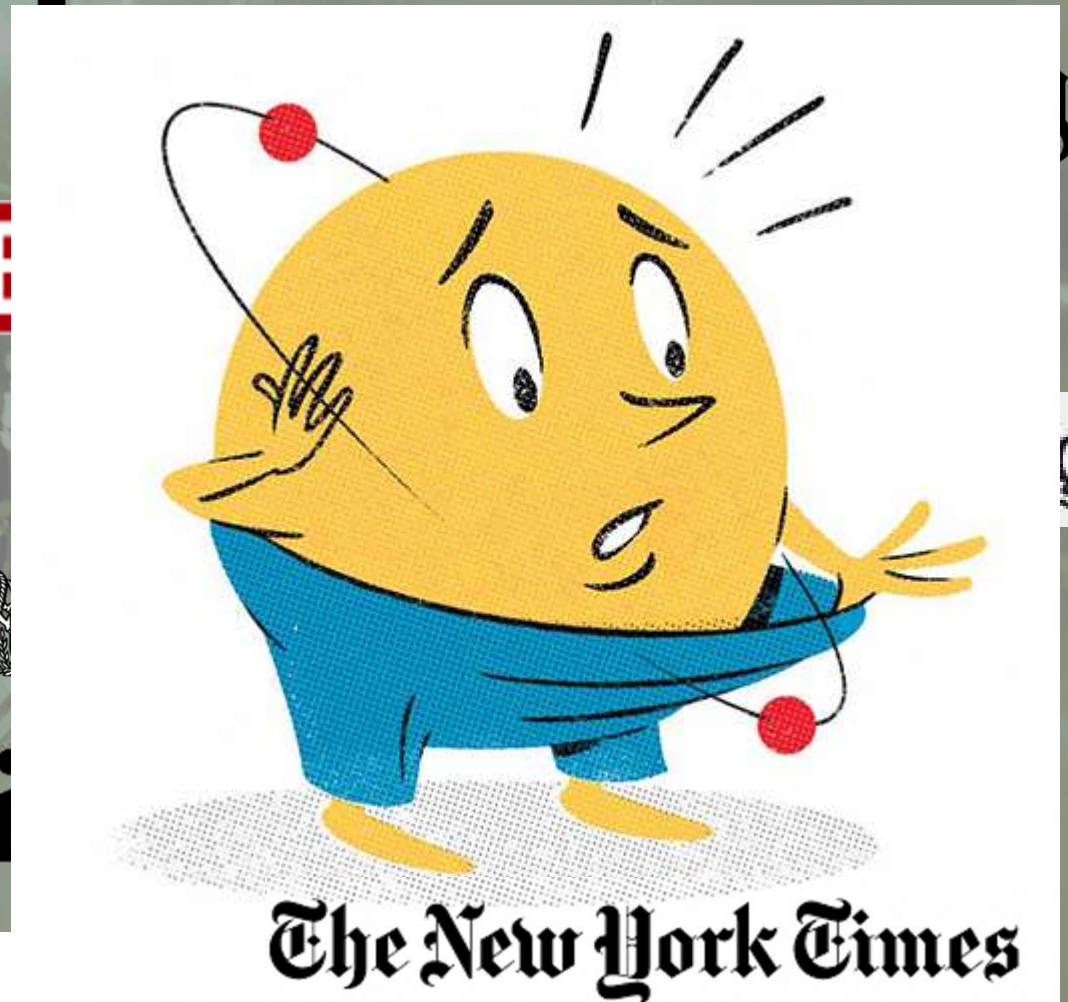
SPIEGEL

DIE

la Repubblica



**NATIONAL
GEOGRAPHIC**



The New York Times

Los Angeles Times

公視
20:36:50

EVENING NEWS

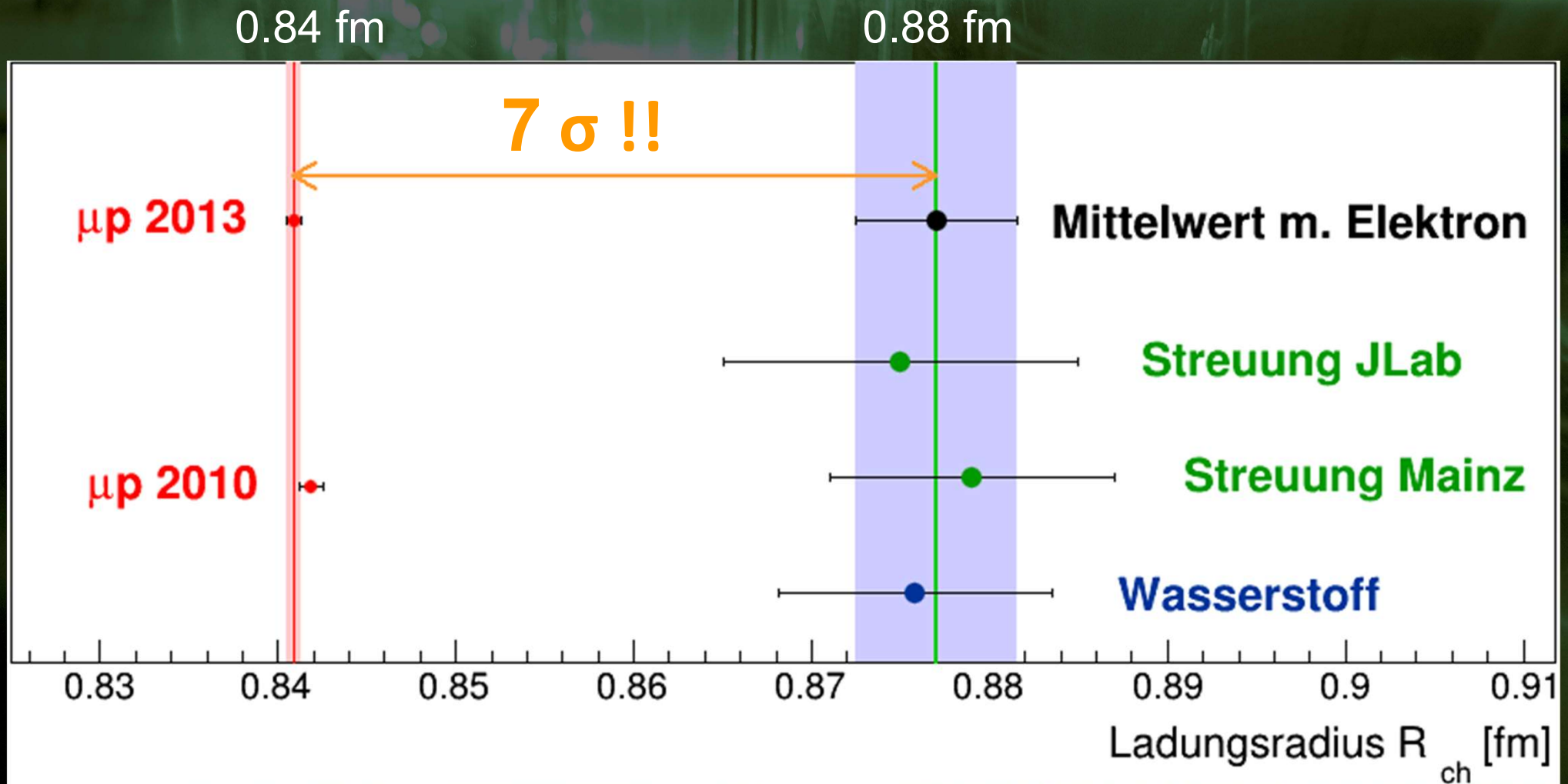
晚間新聞

質子重大發現 比原本所知小4%

PSAS 2010 Konferenz



Das “Proton Radius Puzzle”



myonischer Wasserstoff: 0.8409 ± 0.0004 fm

elektronischer Wasserstoff: 0.876 ± 0.008 fm

Elektronen-Streuung: 0.879 ± 0.008 fm

20x
genauer!

Workshop: The “Proton Radius Puzzle”



ECT* Trento, Okt. 2012

47 Teilnehmer

Theorie + Experiment

Atomphysik

Kernphysik

Teilchenphysik

Elektronenstreuung

“Beyond Standard Model”

38 Vorträge

3 “Fighting Sessions”

Am Schluss: **Abstimmung (!)**

→ Meßfehler

Wir brauchen **neue Daten.**

Folge-Konferenzen

* **Mainz 2014**

* **Trento 2016**

* **Mainz 2018**

Erklärungsversuche

Meßfehler

myonischer Wasserstoff
oder
Wasserstoff **UND**
Elektronenstreuung

Theoriefehler

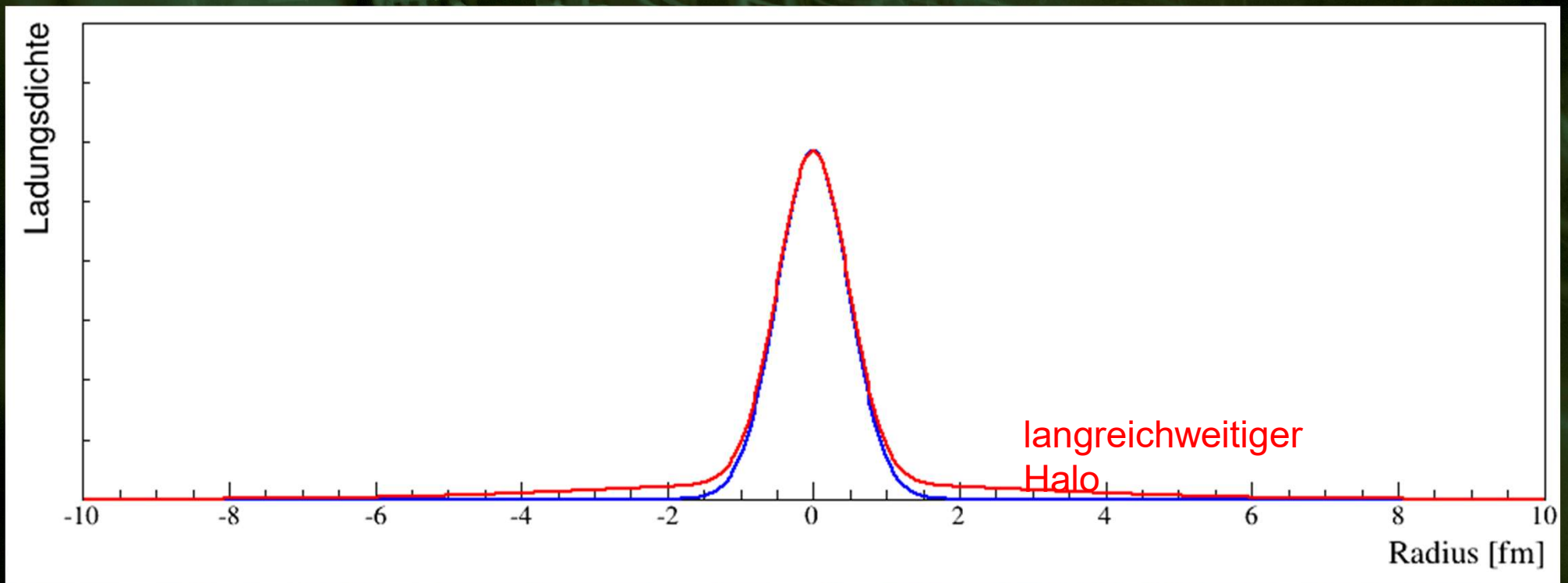
$$\Delta E = 209.998 - 5.226 R_p^2$$

Fehler im **Standard-Modell der Teilchenphysik!**

Das Proton schaut anders aus!

Das Proton ist keine feste Kugel.

Die (radiale) Ladungsverteilung schaut anders aus!

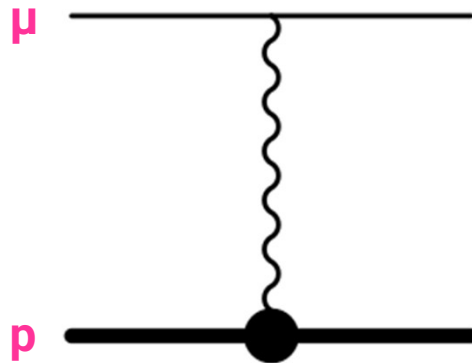


Würde die Diskrepanz erklären!

Ist jedoch im Widerspruch zu Messungen des Halos (e-p Streuung).

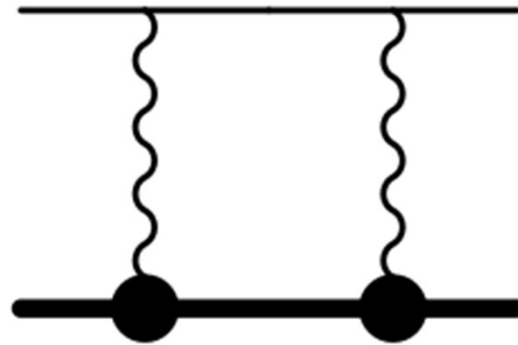
3. Zemach moment: 37 fm^3 vs. $2.7 \pm 0.1 \text{ fm}^3$

Das Myon verändert das Proton



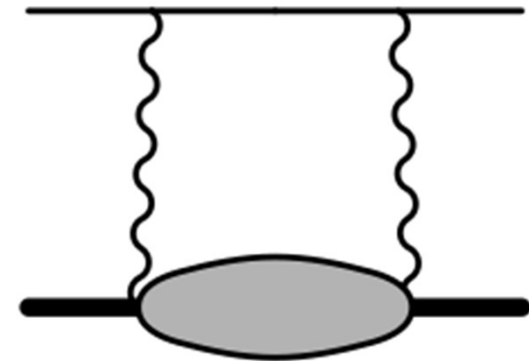
1-Photon-Austausch

Ladungsradius



2-Photonen-Austausch
(elastisch)

Proton-"Halo"



2-Photonen-Austausch
(inelastisch)

Protonen-Polarisierbarkeit

Ja! Die sog. "Polarisierbarkeit des Protons"

Aber der Effekt ist schon berücksichtigt und viel zu klein!

Diskrepanz: 0.31 meV

Polarisierbarkeit: 0.0127 ± 0.0005 meV

Ein neues Teilchen!

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	± 1	
	0	0	0	1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$		
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

Gravitation!

Dunkle Materie?

Dunkle Energie?

Baryonen-Asymmetrie!

Starkes CP-Problem!

...

Ein neues Teilchen!

Physik jenseits des Standardmodells

könnte im Prinzip für die Diskrepanz verantwortlich sein!

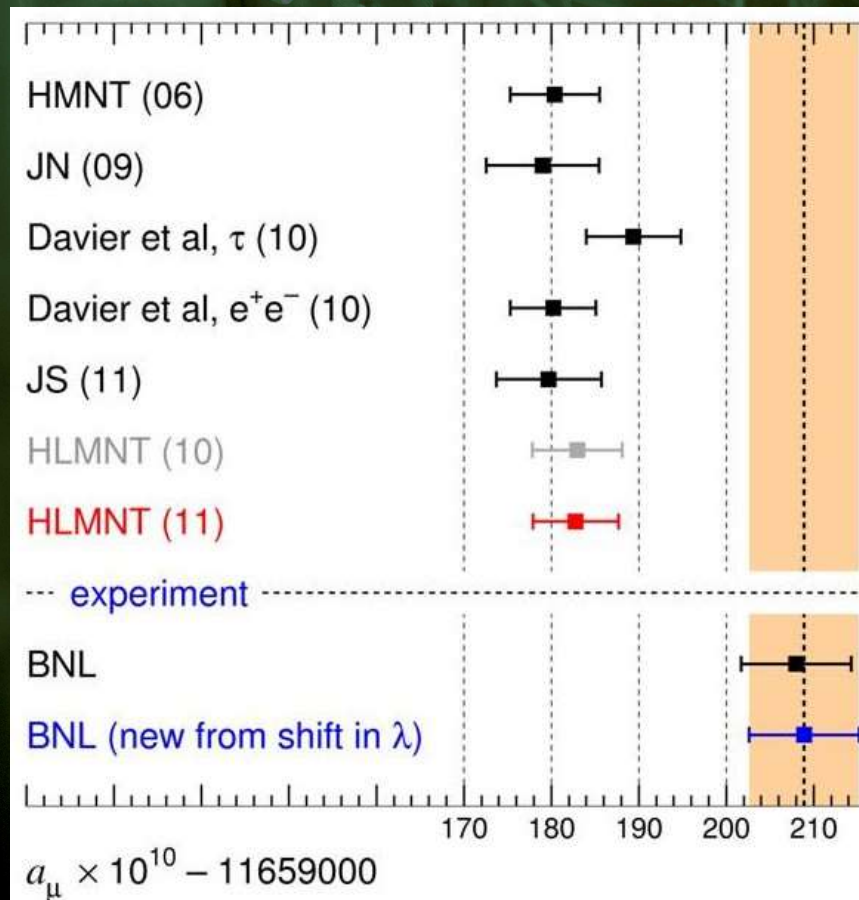
Das wäre ein **neues Teilchen**, das eine **neue Kraft** überträgt!

Diese Teilchen muß aber in das Korsett bestehender
Messungen passen!

Schwierig.....

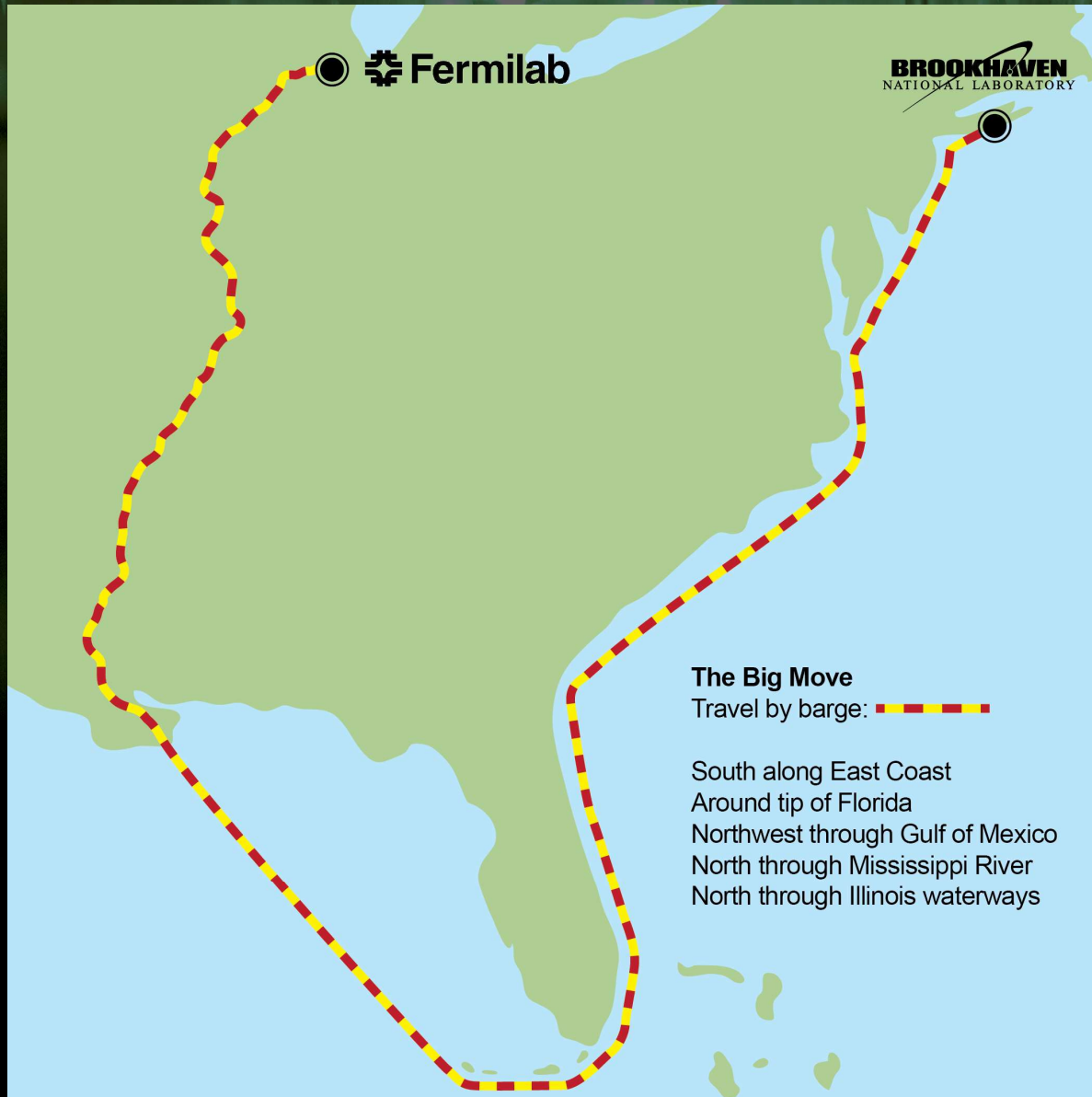
Das Myon macht uns **zwei** Probleme!

Anomales magnetisches Moment des Myons ($g-2$)



Seit 10 Jahren existiert eine ca. 3.6σ Diskrepanz zum Standardmodell

Das neue Myon g-2 Experiment



Umzug: Sommer 2013
Messung: 2017/18
Resultate: 7. April 2021!

Zusammenfassung

Das Rätsel um das geschrumpfte Proton ist spannend....

Vielleicht will uns das Myon etwas sagen?

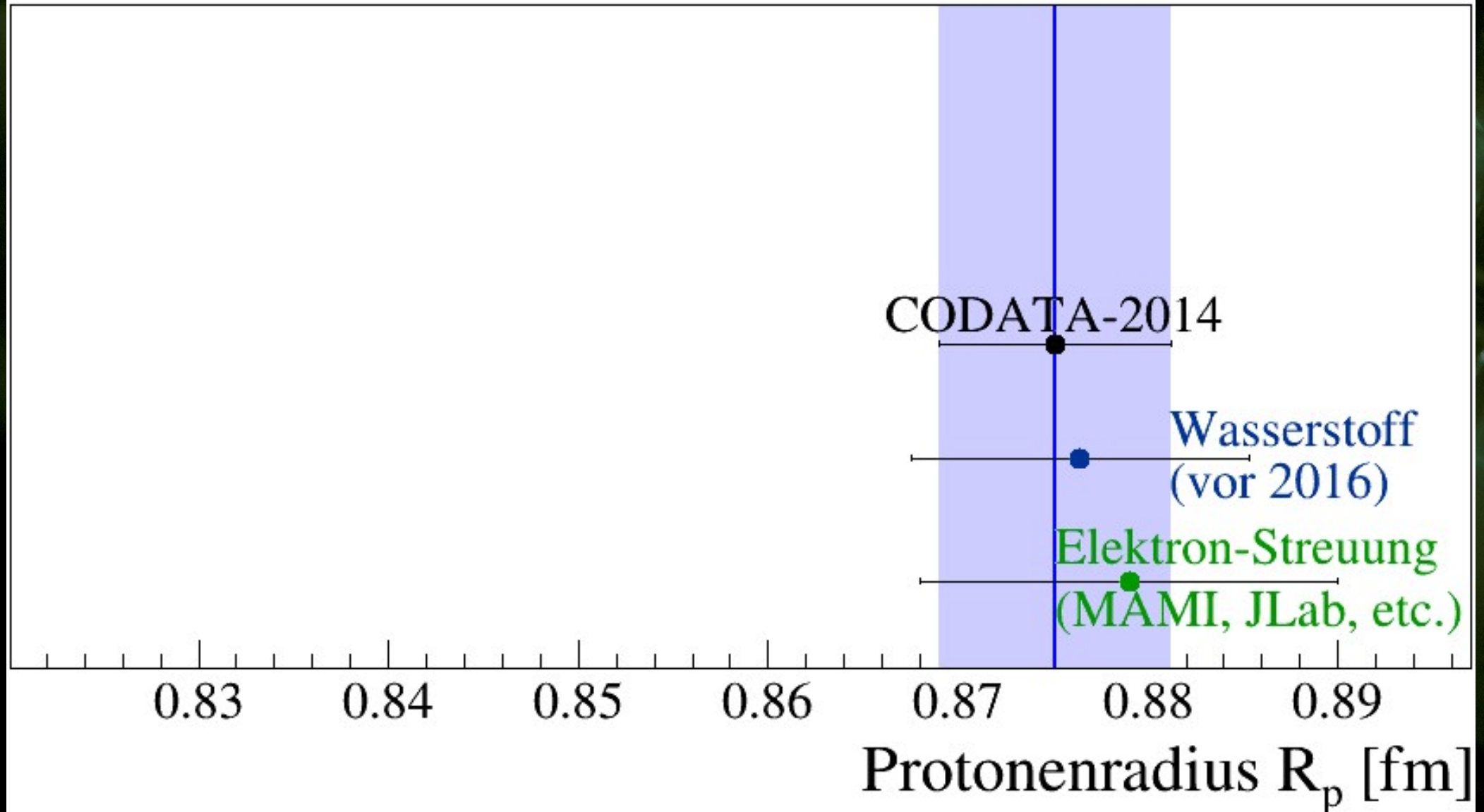
Oder ein **Meßfehler**?

Eine Menge neuer Experimente sind auf dem Weg.

Zum Beispiel **Myonisches Deuterium, etc.**
Normaler Wasserstoff
Elektronenstreuung
Myonenstreuung

Die “alten” Messungen

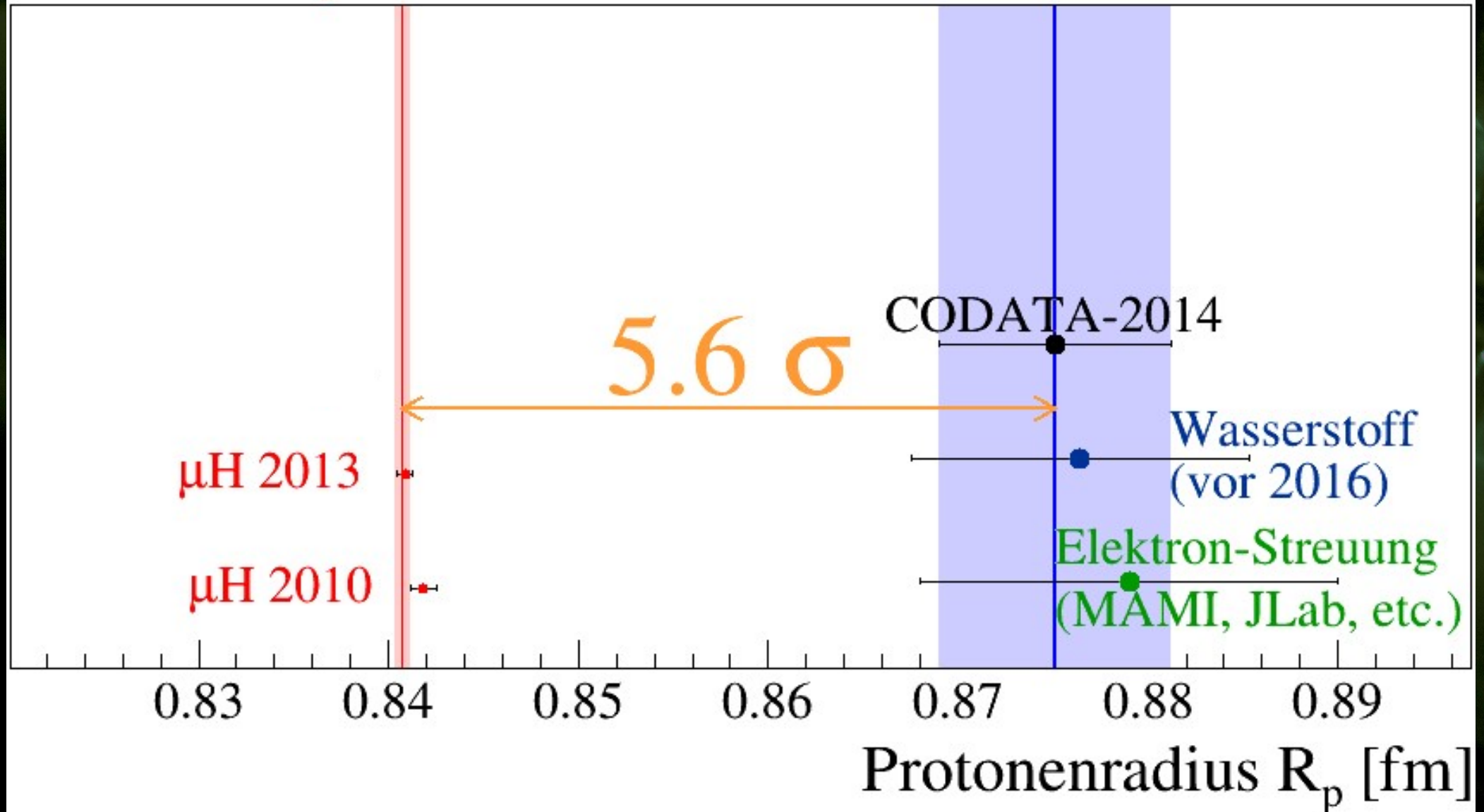
Elektronen



Das “Proton Radius Puzzle”

Myonen

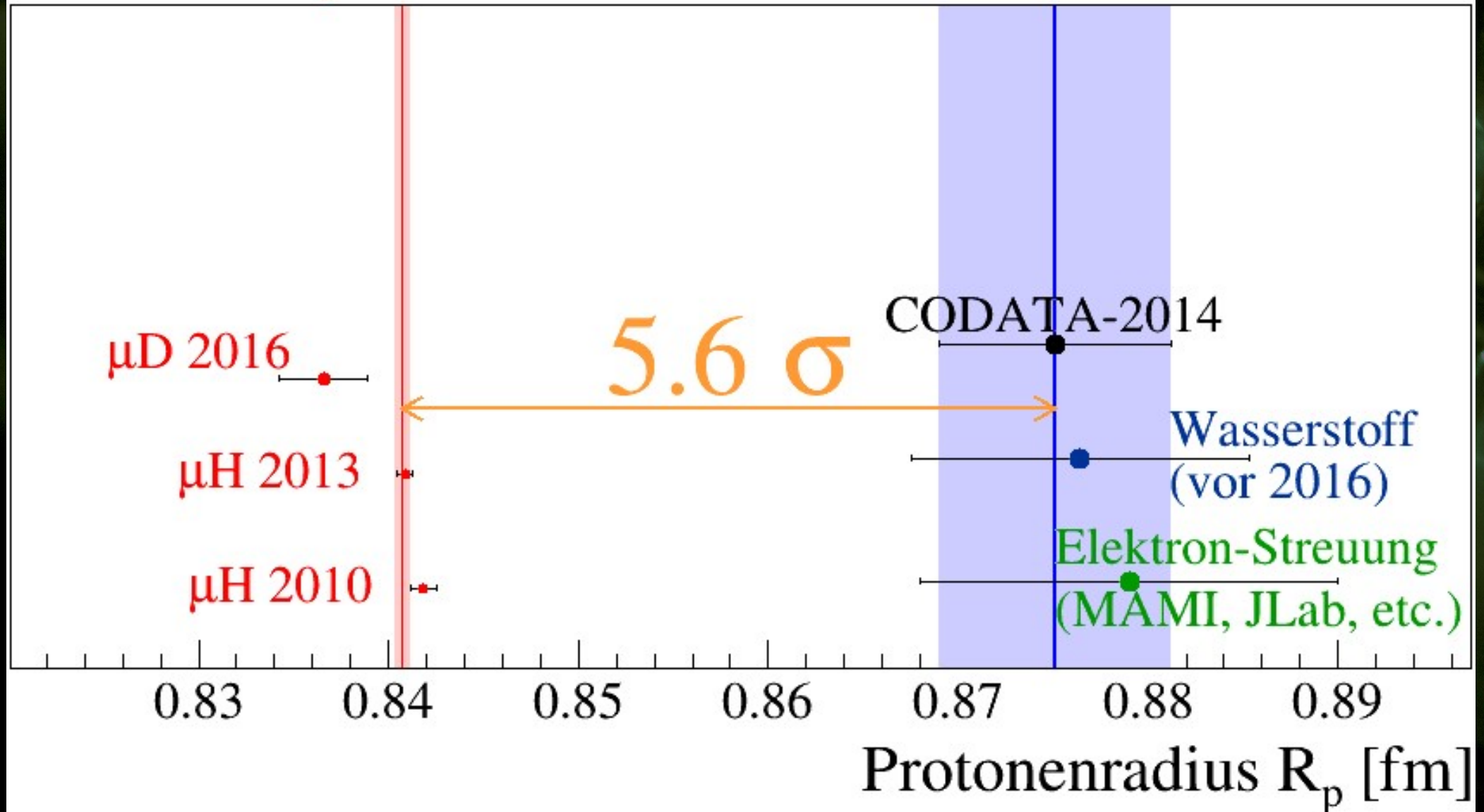
Elektronen



Das “Proton Radius Puzzle”

Myonen

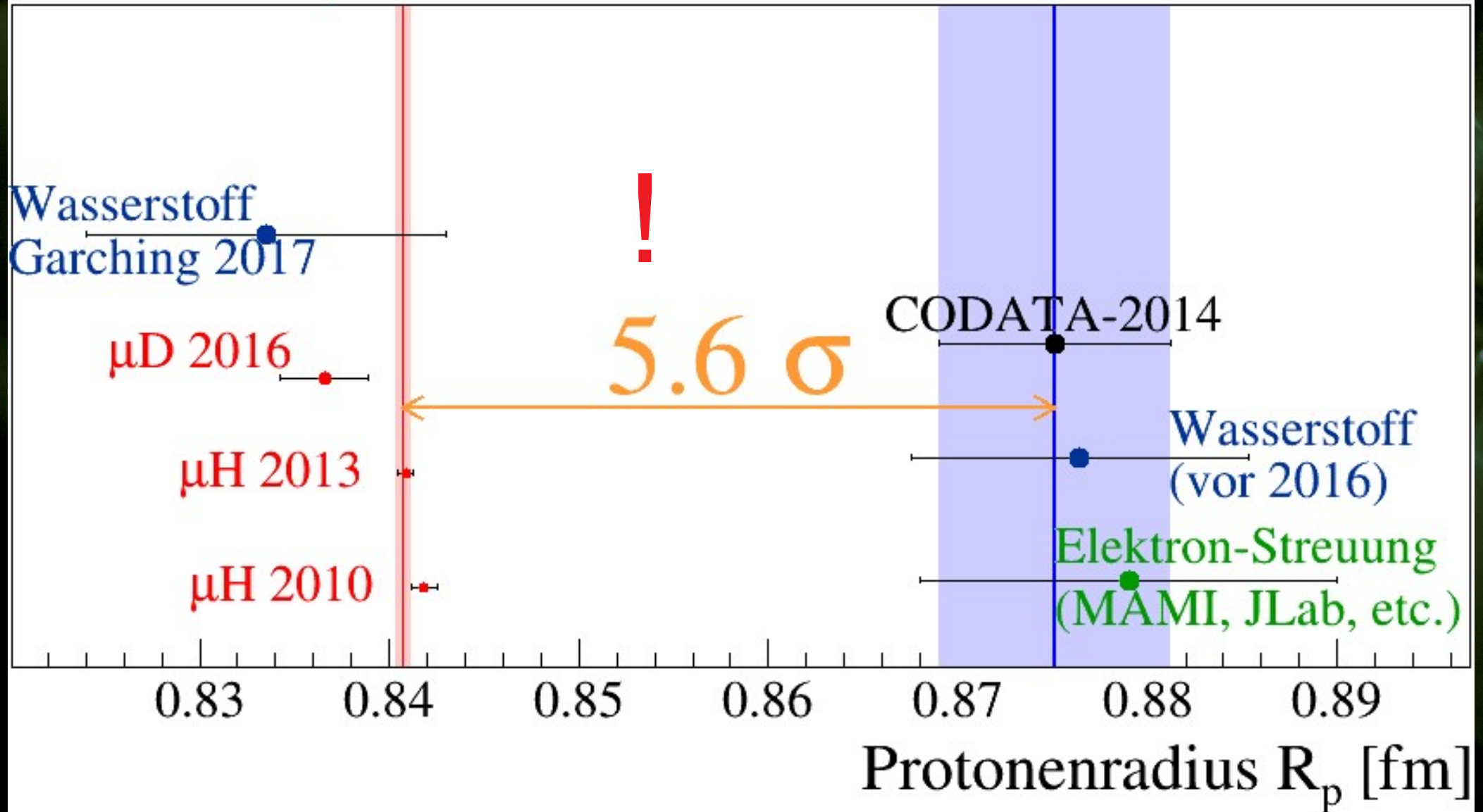
Elektronen



Neue Messungen

Myonen

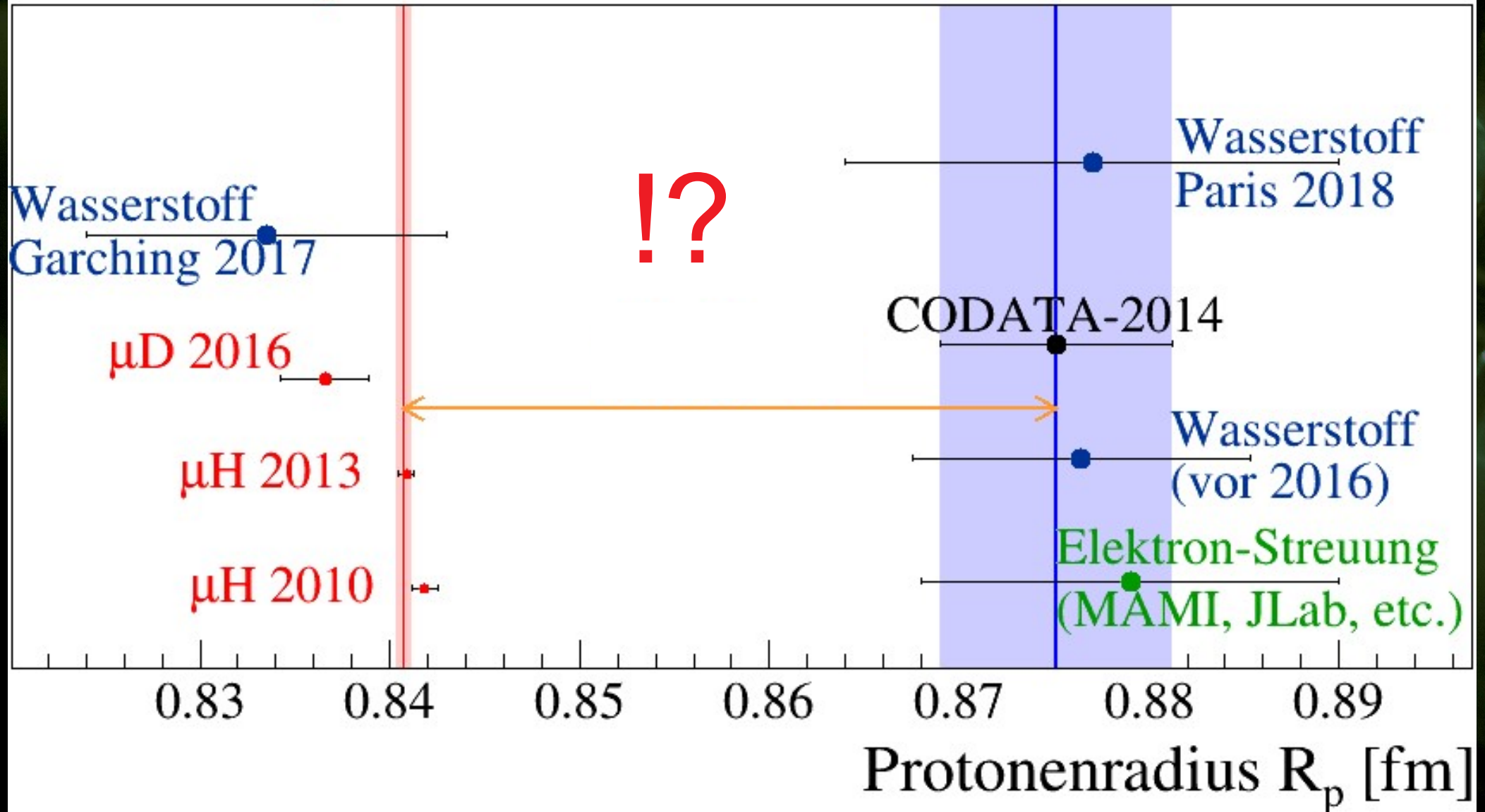
Elektronen



Neue Messungen

Myonen

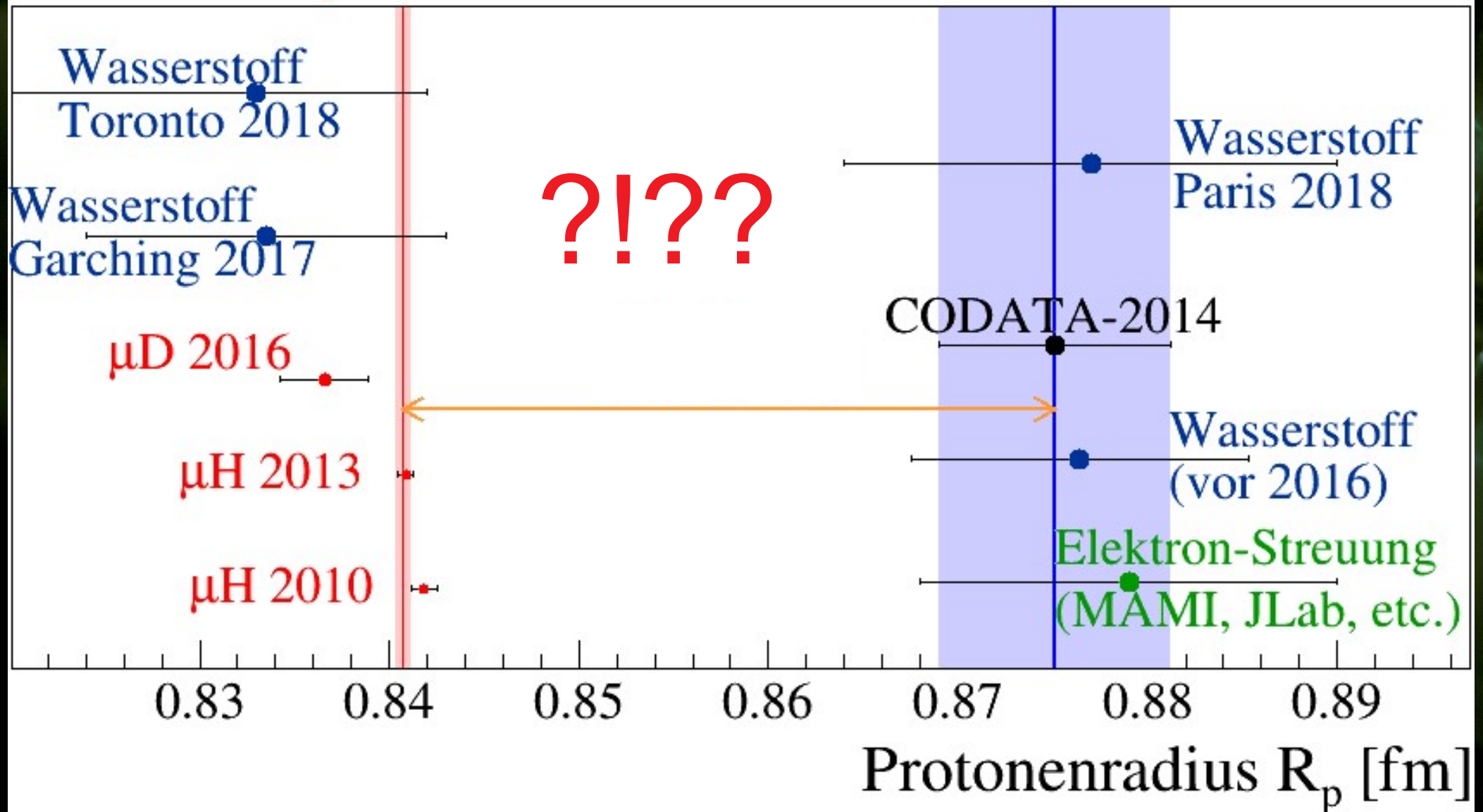
Elektronen



Neue Messungen

Myonen

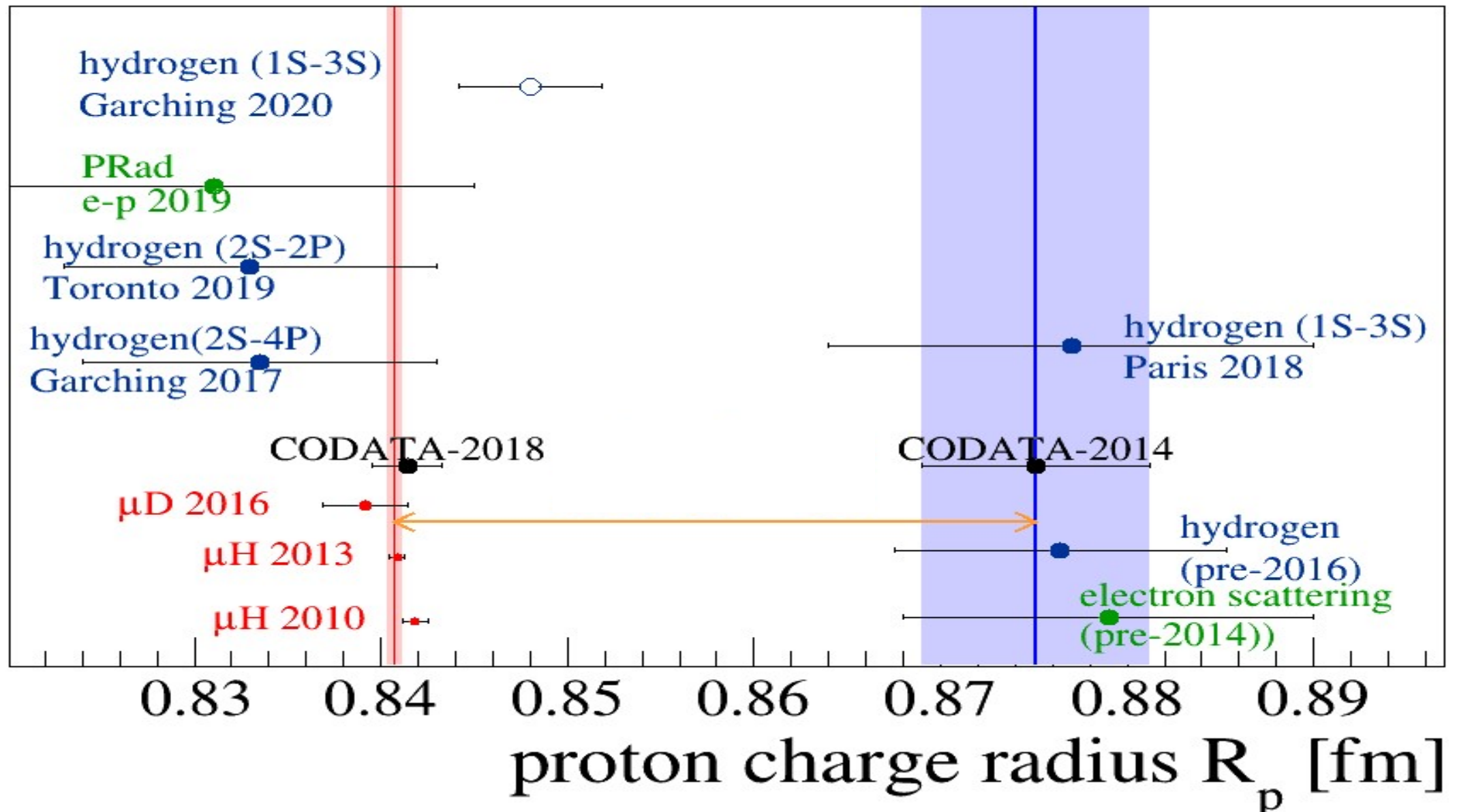
Elektronen



Alle Messungen.....

Muons

Old value





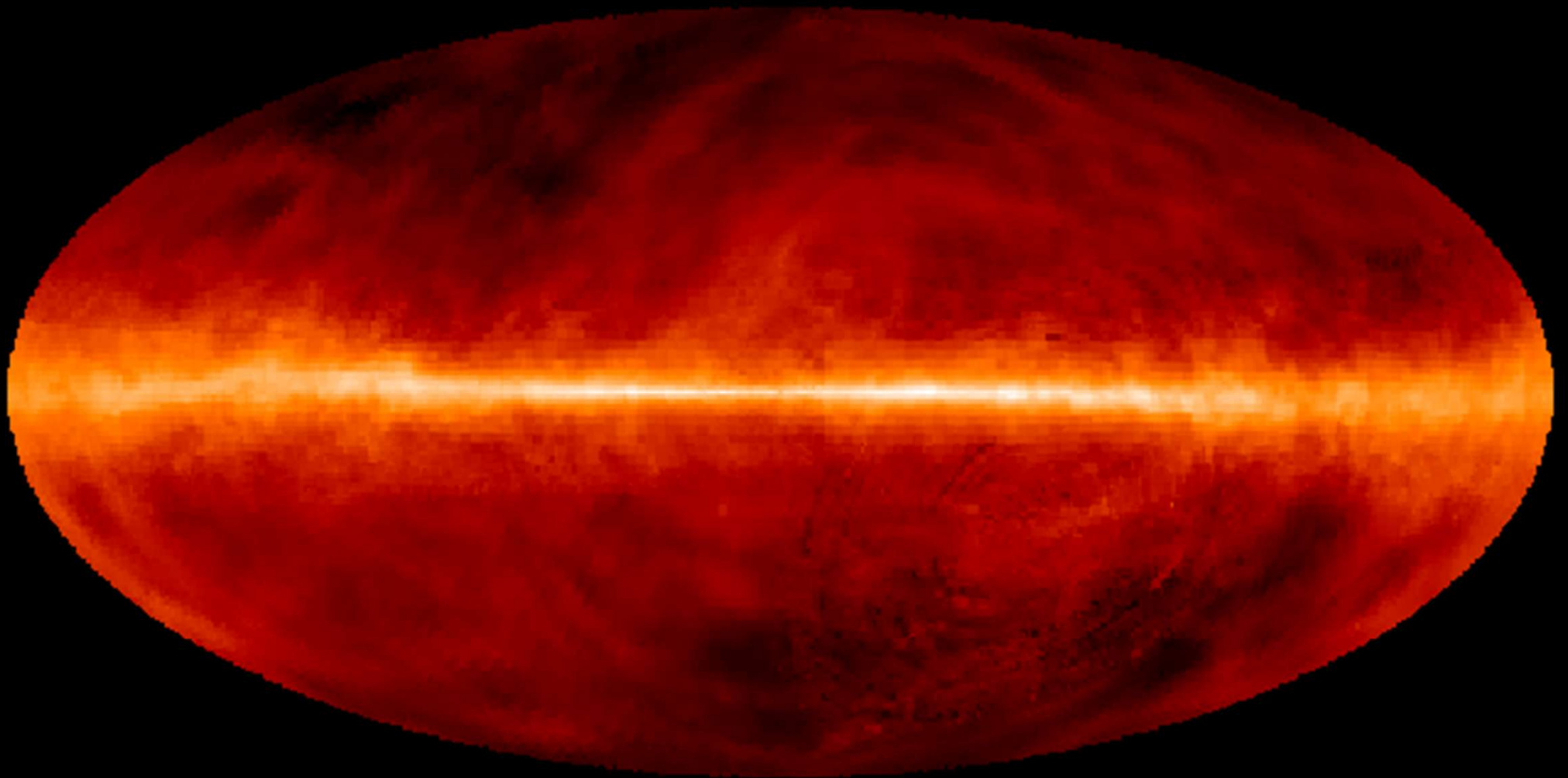
Die Zukunft:

Hyperfeinstruktur in myonischem Wasserstoff

CREMA-3 / HyperMu at PSI
(R16.02)



Wasserstoff im Himmel



Hyperfein - Struktur in H / μp

Die 21 cm - Linie in Wasserstoff (1S Hyperfine-Aufspaltung) wurde vor 50 Jahren(!) auf 12 Stellen genau gemessen (0.001 Hz):

$$\nu_{\text{exp}} = 1\,420\,405.751\,766\,7 \pm 0.000\,001 \text{ kHz}$$

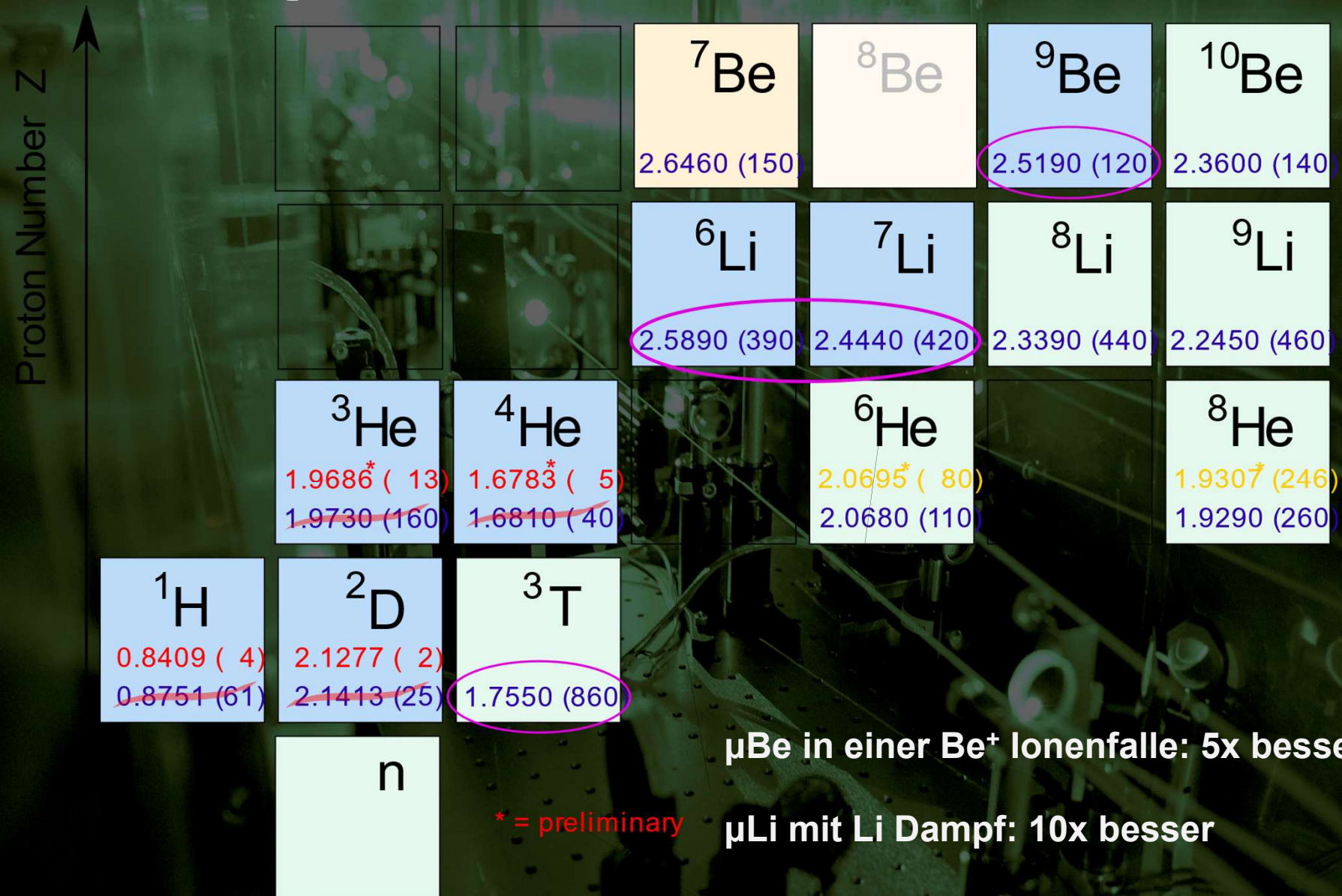
Essen et al., Nature 229, 110 (1971)

QED - Test limitiert auf 6 Stellen (800 Hz) wegen der magnetischen Struktur des Protons

$$\nu_{\text{theo}} = 1\,420\,403.1 \pm 0.6_{\text{Radius}} \pm 0.4_{\text{Polarisierbarkeit}} \text{ kHz}$$

Eides et al., Springer Tracts 222, 217 (2007)

Ladungsradien: Die Zukunft



μBe in einer Be^+ Ionenfalle: 5x besser

μLi mit Li Dampf: 10x besser

T(1S-2S) : 400x besser

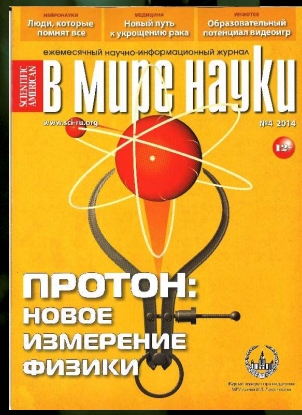
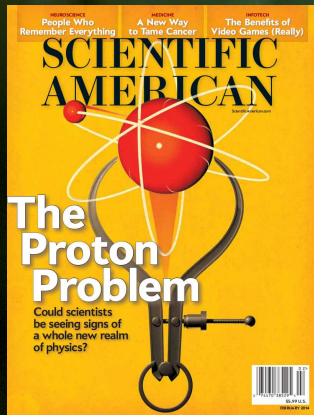


Proton Size Investigators thank you for your attention



Zusammenfassung

Das “Proton Radius Puzzle”



Jan Bernauer & Randolph Pohl, 2014

AG Pohl



Vielen Dank!

Herbst 2019