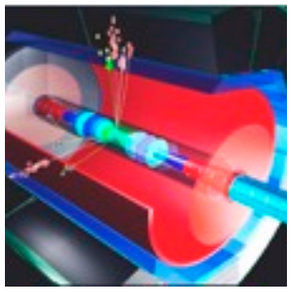
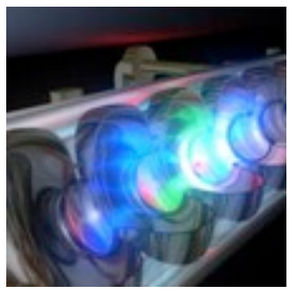
Beschleuniger jenseits von LHC und ILC

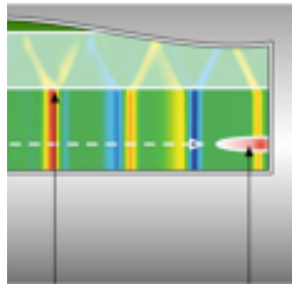
Rasmus Ischebeck, Paul Scherrer Institut



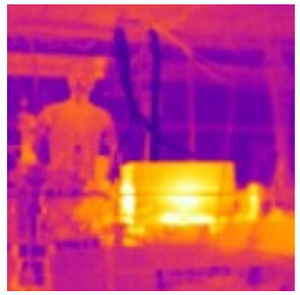
Beschleuniger für TeV Elektronen



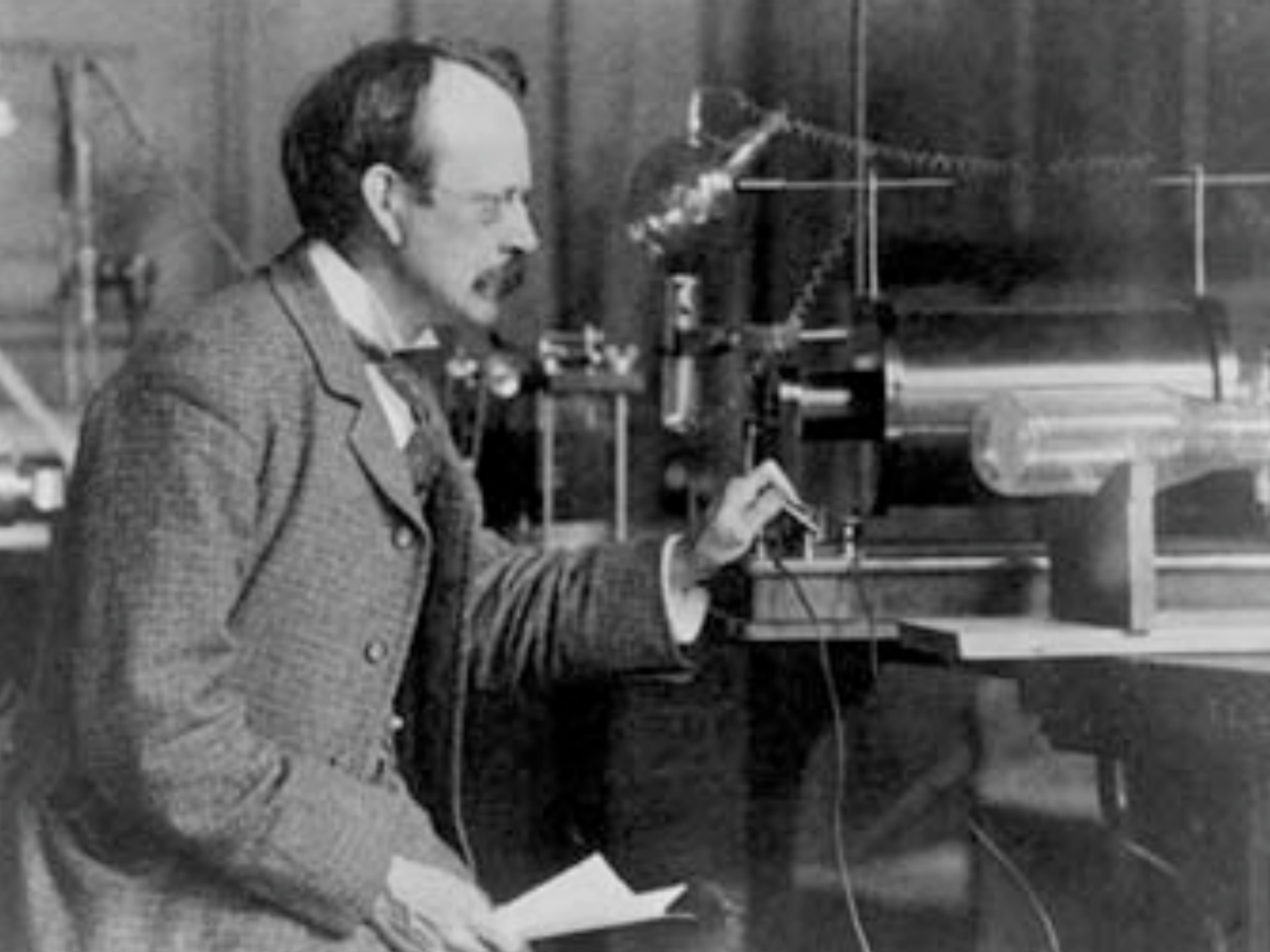
Heutige Technologien

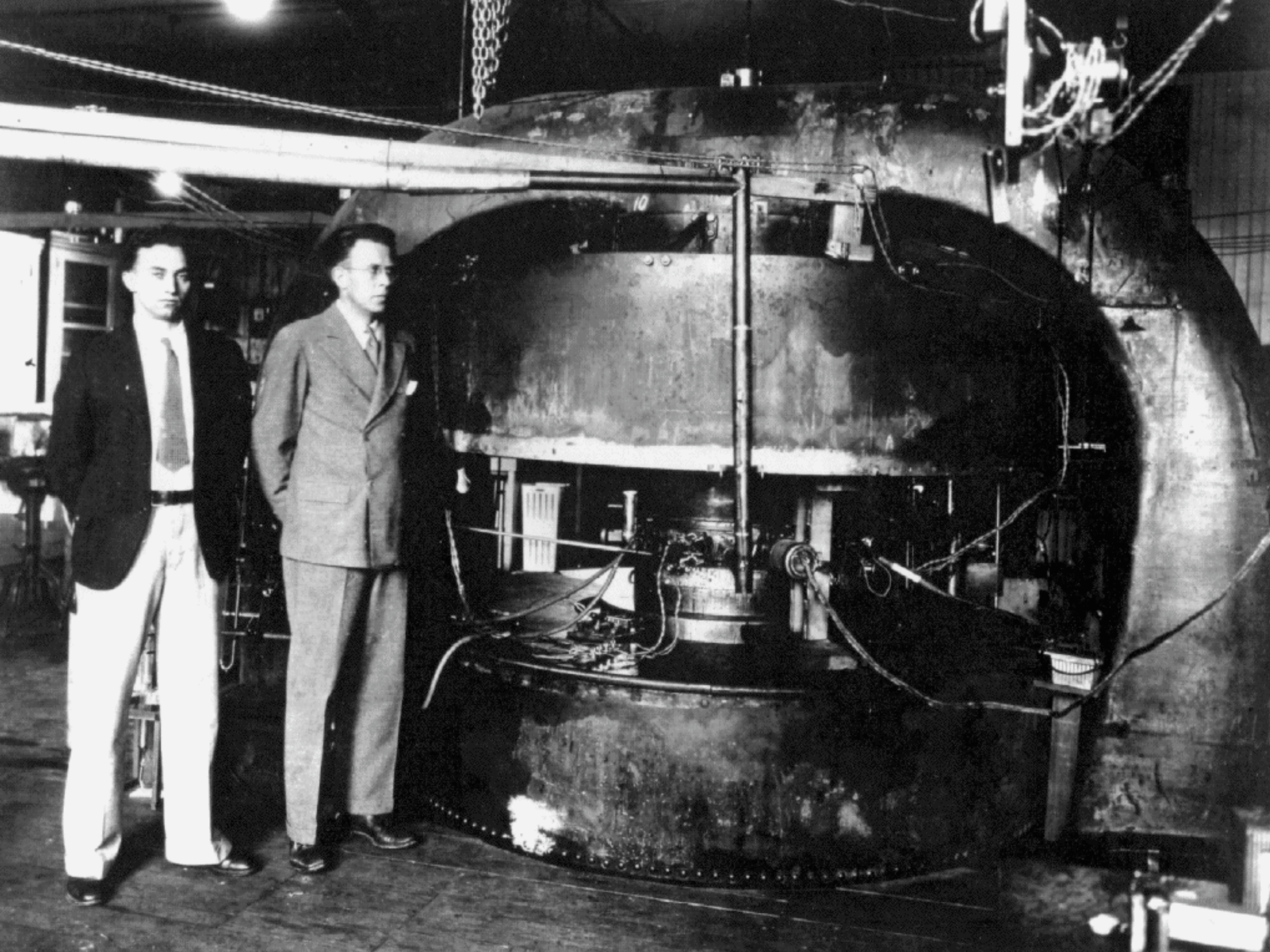


Dielektrische Strukturen

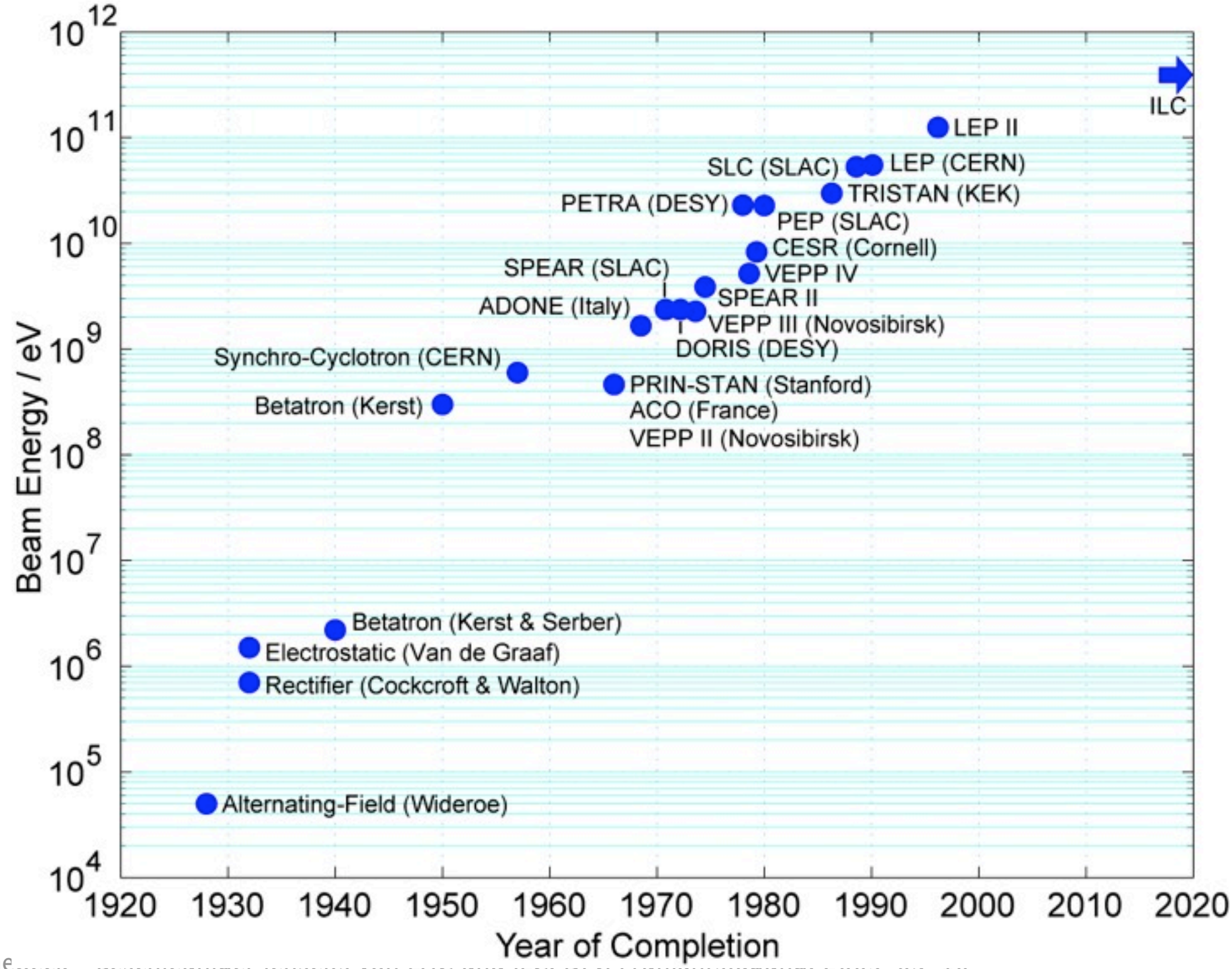


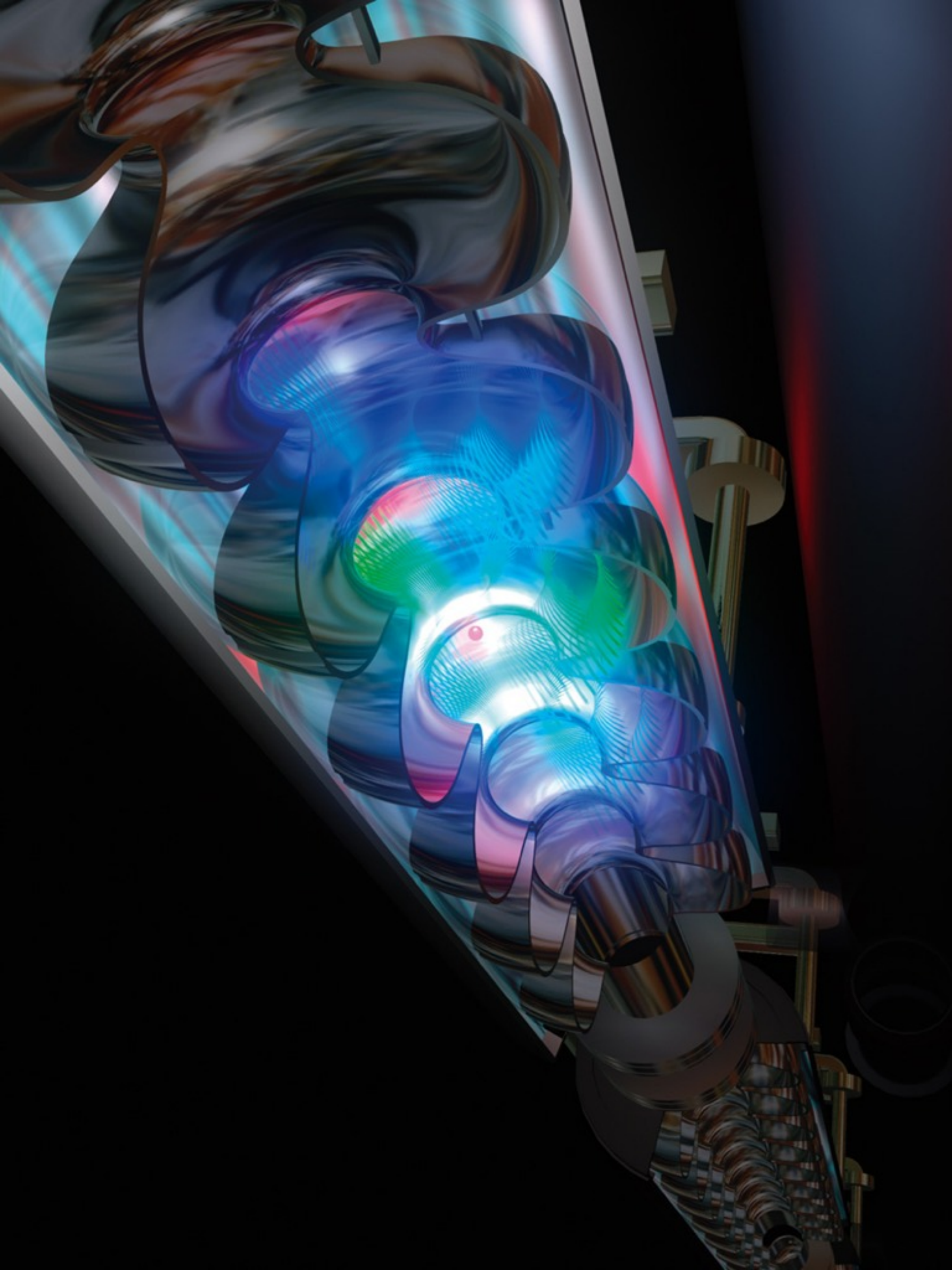
Plasmawellen-Beschleunigung





Historische Entwicklung von Elektronen-Beschleunigern (Livingston-Graph)





Erforderliche Parameter für Beschleuniger nach LHC und ILC

- Energie $W \gtrsim 5$ TeV $W = E \cdot e \cdot L$ (Linac)
- Luminosität $\pounds \gtrsim 10^{35}\ \mathrm{cm}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$ $\pounds = \dfrac{N^2 f}{4\pi\, \sigma_x \sigma_y}$

⇒ Strahlleistung $P \approx 100$ MW $P = U \cdot I$

- Kosten $C \lesssim 5 \cdot 10^9$

- Hohe Beschleunigungsfeldstärken
- Kleine Emittanz (kleiner Strahlquerschnitt)
- Hohe Strahlladung
- Gute Effizienz

Keine Option für 10 TeV:

- Ringbeschleuniger
  - Synchrotronstrahlung ist proportional zu E^4
- Linearbeschleuniger basierend auf RF-Resonatoren mit heutiger Technologie:
  - Beschleunigungsfeld 0.05 GV/m
  - 300 km lang (inkl. Fokussierung)
  - Kosten: $3 \cdot 10^{10}$

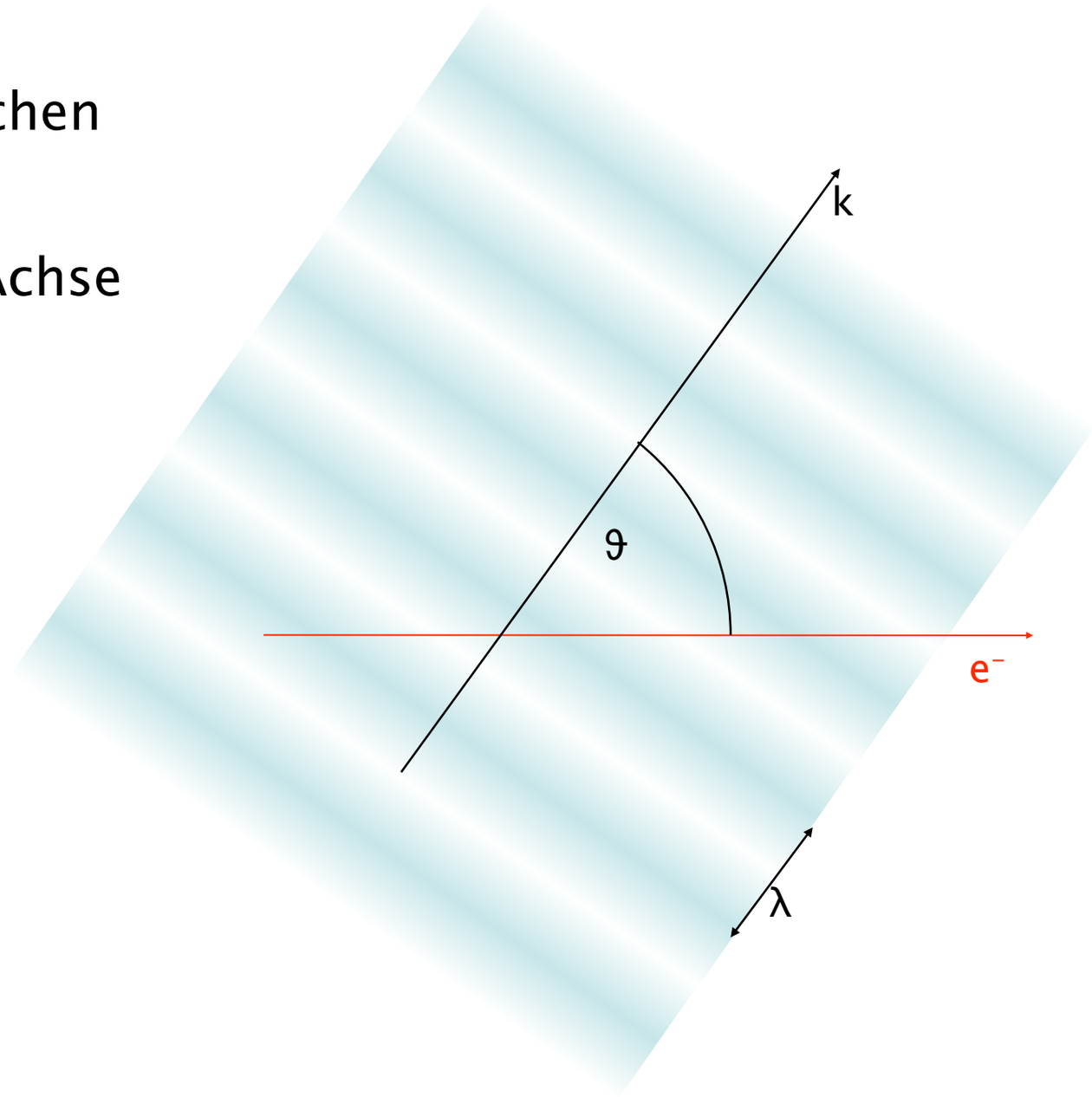
Daher:

- Beschleunigungsfeldsterke muss erhöht werden (ohne dass dabei die Kosten im selben Maße ansteigen)
- Alternative Beschleunigungskonzepte

Beschleunigung geladener Teilchen

Annahme:

- ein ultrarelativistisches Teilchen mit Ladung e
- bewegt sich entlang der z-Achse
- wird mit einer ebenen elektromagnetischen Welle beschleunigt, die sich mit einem Winkel ϑ zur z-Achse ausbreitet

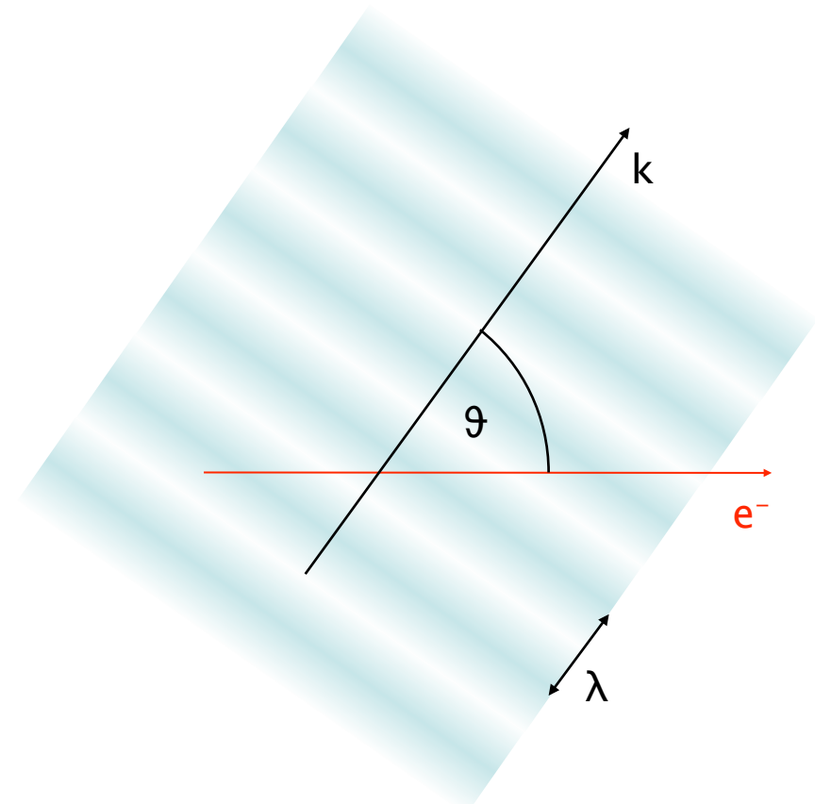


Beschleunigung geladener Teilchen

Dann:

- Position des Elektrons

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ ct \end{pmatrix}$$



- Elektrisches Feld

$$E_{\parallel} = \sin\vartheta \cos\left(\omega t - \frac{z}{2\pi\lambda\cos\vartheta}\right)$$

- Energiegradient

$$\frac{\Delta W}{L} = \frac{\int_L eE_{\parallel} dz}{L} = \frac{\int_L \sin\vartheta \cos(kz(1-\sec\vartheta))dz}{L}$$

$$= \frac{\sin\vartheta \sin(kL(1-\sec\vartheta))\frac{1}{k(1-\sec\vartheta)}}{L} \xrightarrow{L\to\infty} 0$$

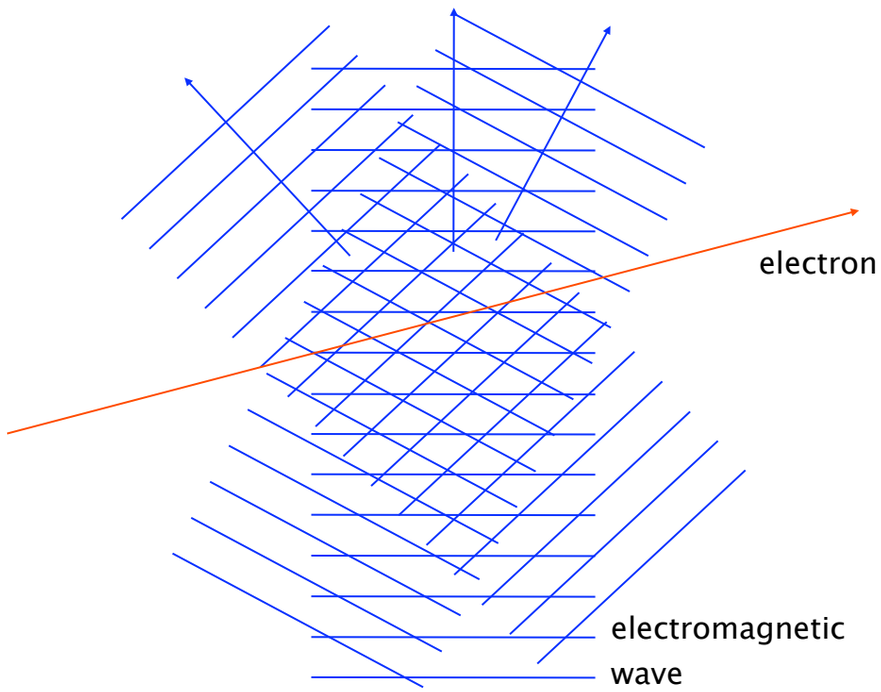
Lawson-Woodward-Satz

- Jede Welle im Fernfeld kann als Überlagerung ebener Wellen dargestellt werden

- Daher ist die Gesamtbeschleunigung
  - ultrarelativistischer Teilchen
  - durch elektromagnetische Wellen im Fernfeld

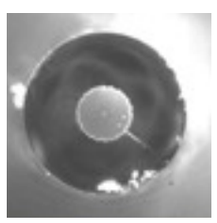
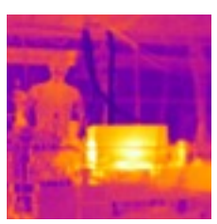
  gleich Null

⇒ Notwendigkeit von Nahfeldstrukturen



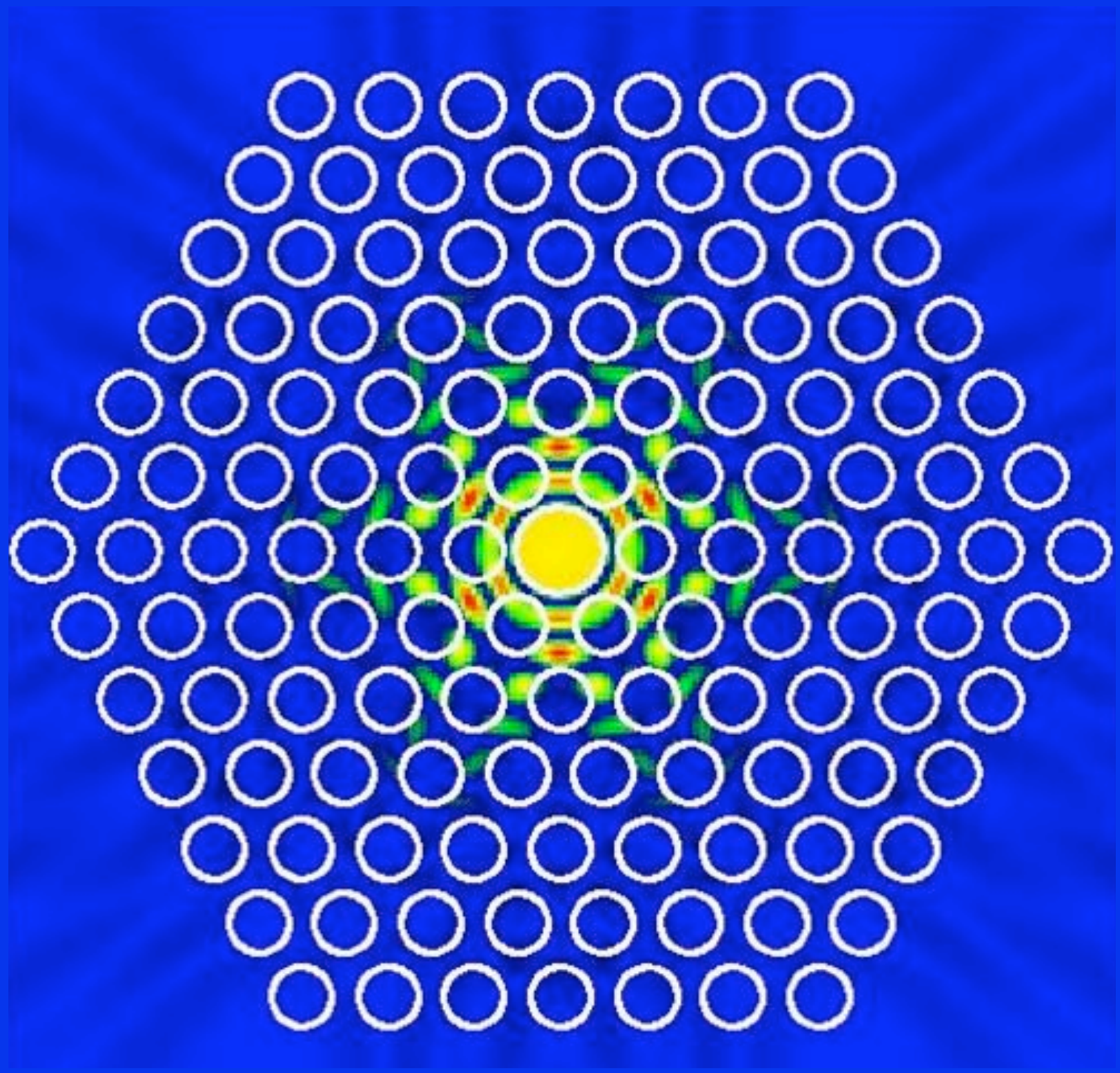
Woodward, J. IEE 93 (1947)
Lawson, IEEE Trans. Nucl. Sci. 26 (1979)
Palmer, Part. Accel. 11 (1980)

Möglichkeiten für Beschleunigerstrukturen

	Struktur	max. Feld (V/m)	Energiequelle	
	Supraleitend	$5 \cdot 10^7$	Festkörper: Halbleiter	Elektronenstrahlen: Klystron
	Metall	$2 \cdot 10^8$	Festkörper: Halbleiter	Elektronenstrahlen: Klystron oder integriert
	Dielektrika	10^9	Laser	Elektronenstrahlen
	Plasma	$\geq 10^{11}$	Laser	Elektronenstrahlen

Außerdem:
Inverse FEL, Einmal-Strukturen, angeregte Atome, Myonenspeicherringe

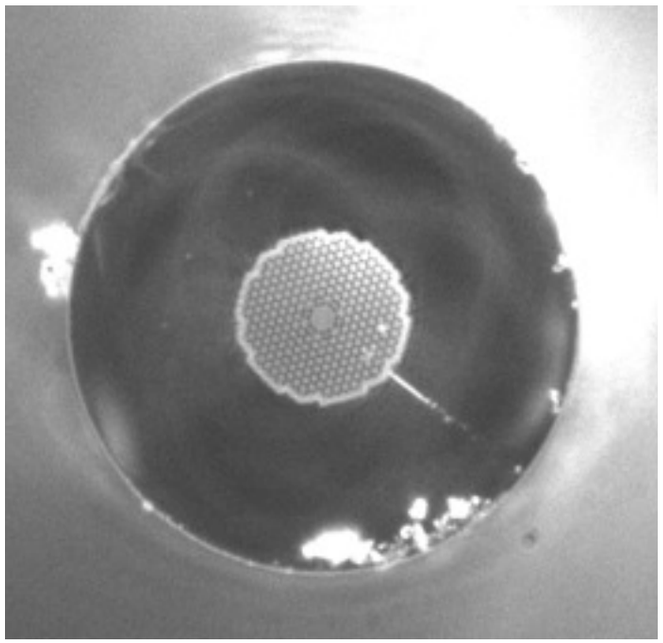
Dielektrische Strukturen



Dielektrische Beschleunigerstrukturen

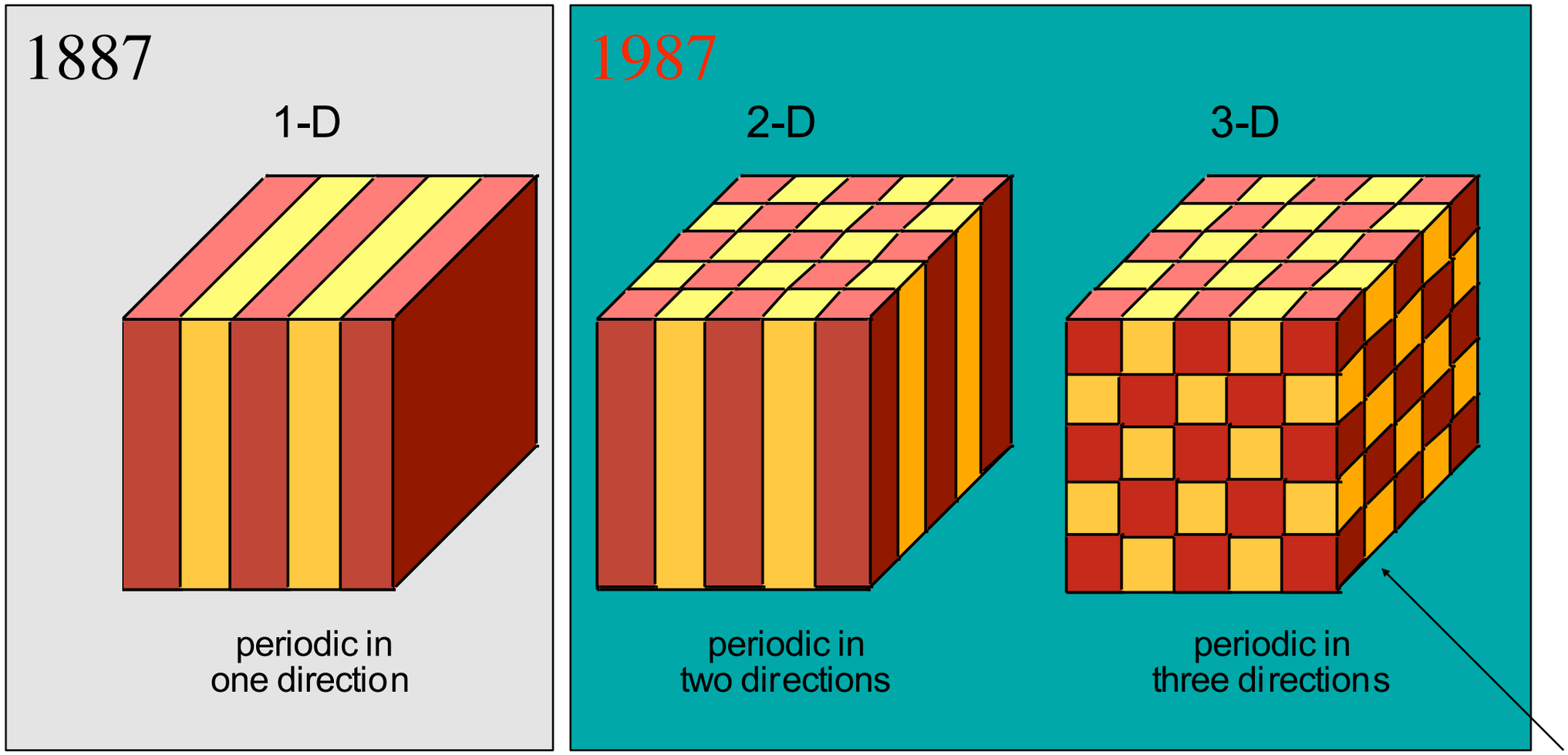
- Verwendung von viel höheren Frequenzen (THz bis optische) und kürzeren Pulsen (ps)
- Dielektrische Strukturen (z.B. SiO_2)
- Vorteil: höhere Zerstörschwelle
  ⇒Größere Beschleunigungsfelder von ~GV/m

- Erzeugung des elektromagnetischen Feldes
  - Cherenkovstrahlung eines Elektronenstrahls
  - Laser
- Begrenzung des Feldes auf die Gegend um den
  - Photonische Bandlücke



Photonische Kristalle

periodic electromagnetic media

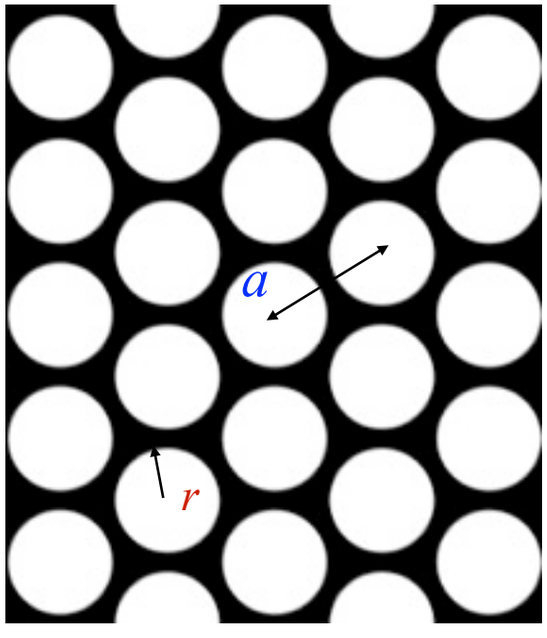


(need a more complex topology)

with photonic band gaps: “optical insulators”

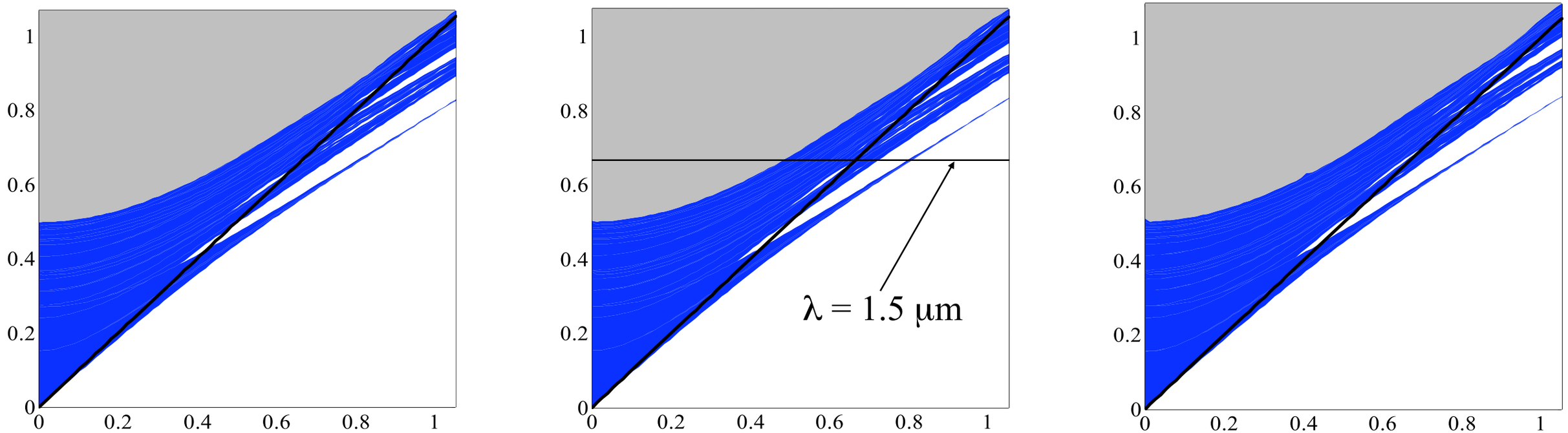
Steven G. Johnson

Bandlücken-Darstellungen



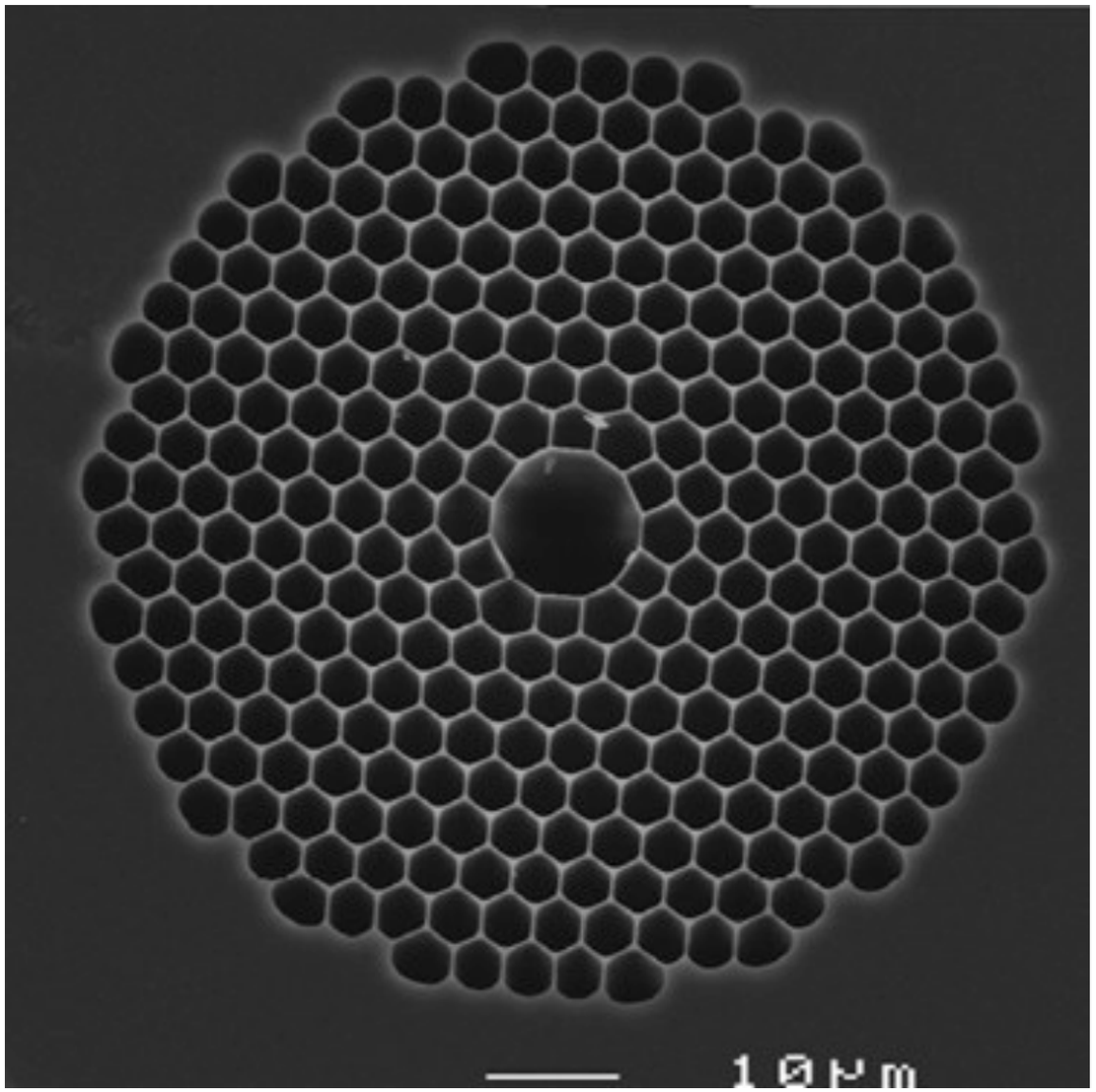
- Lösungen der Wellengleichung

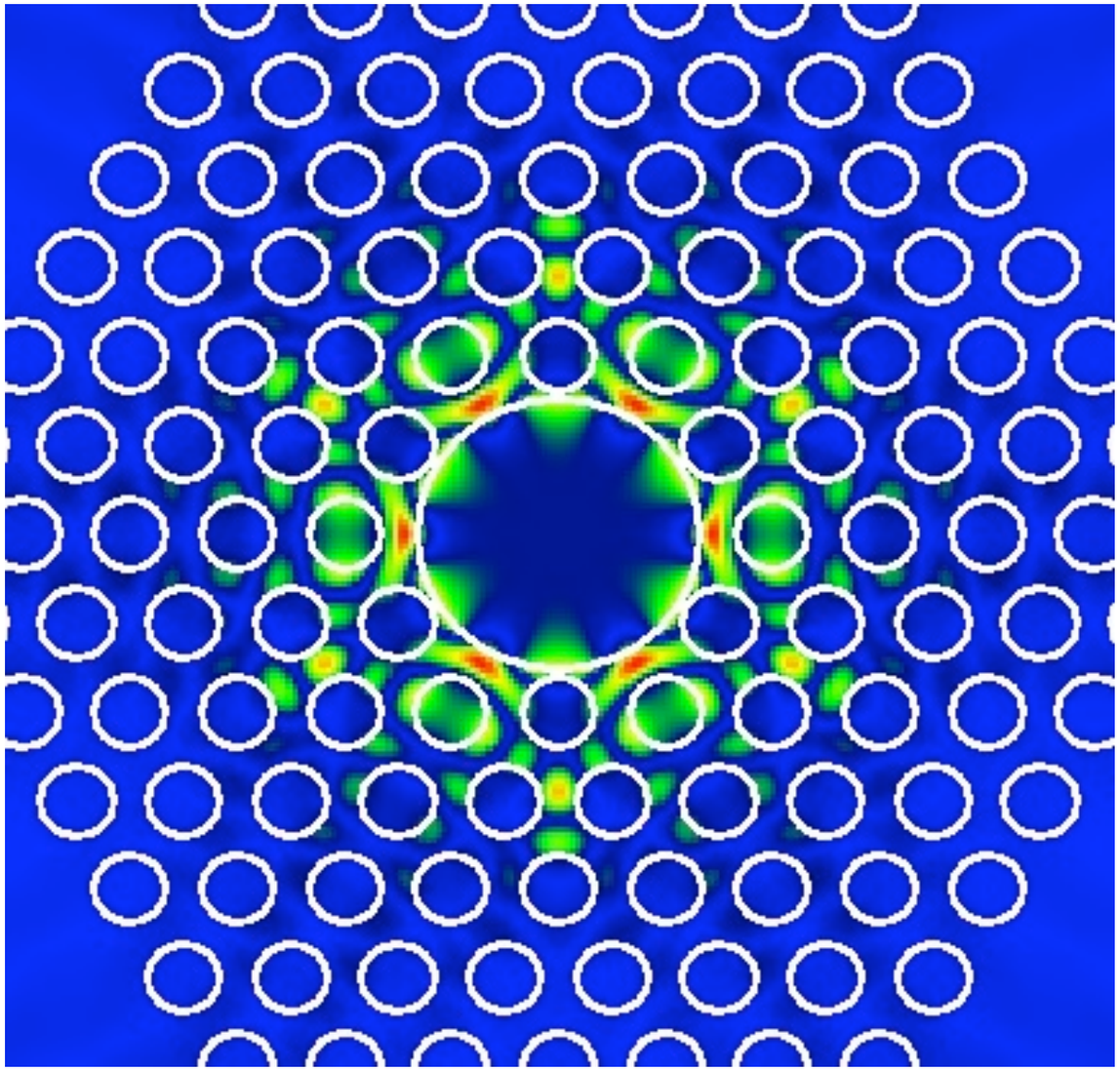
$$\vec{\nabla} \times \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \times \vec{H} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \vec{H}$$



Ben Cowan

Beschleunigerstrukturen aus photonischen Bandlücken

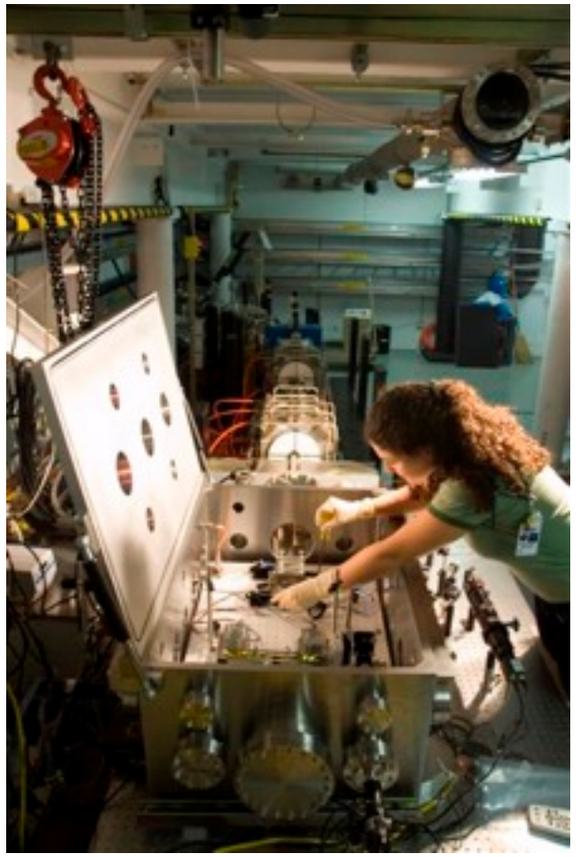


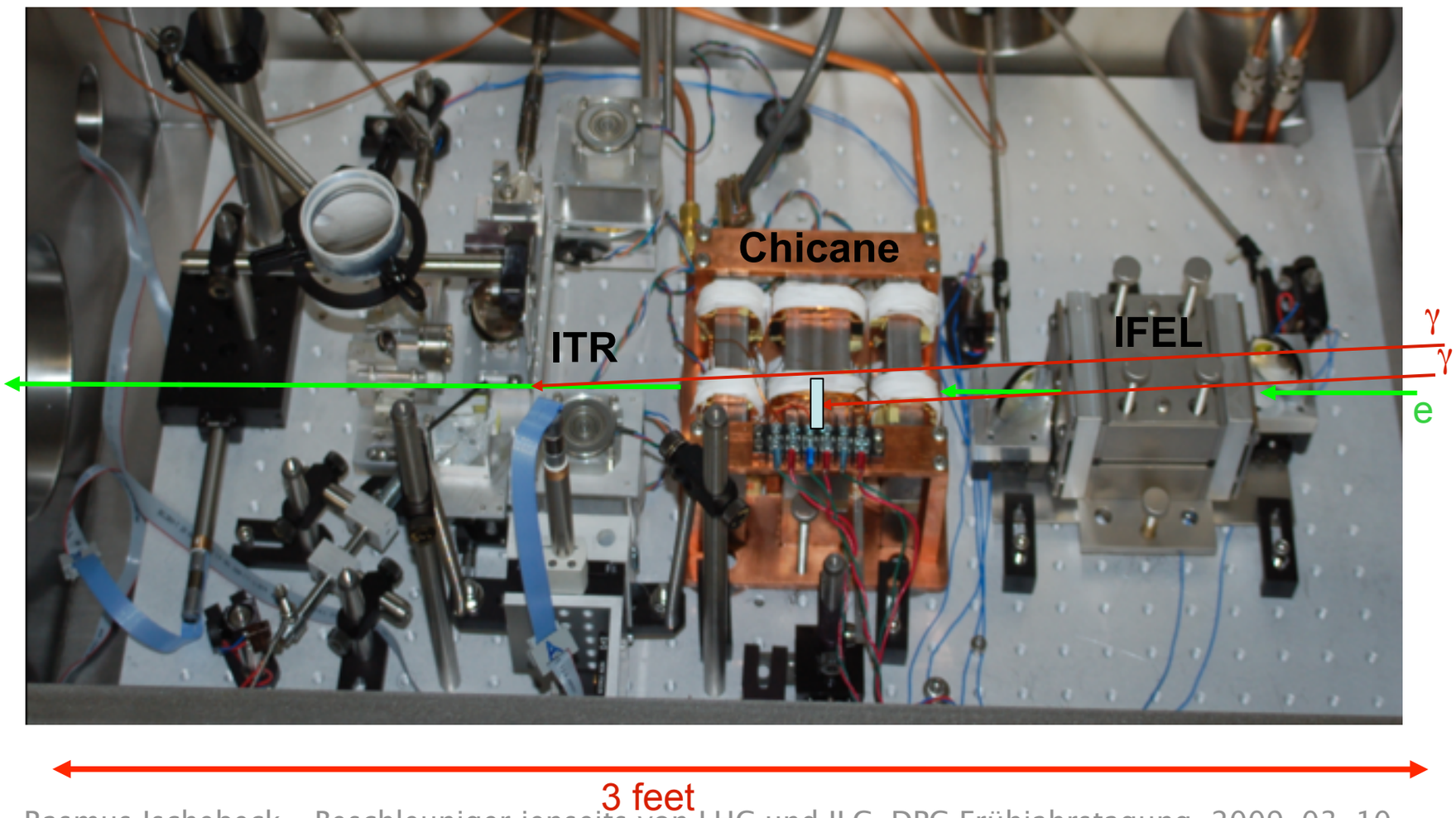


Chris Sramek

Aufbau eines Experimentes

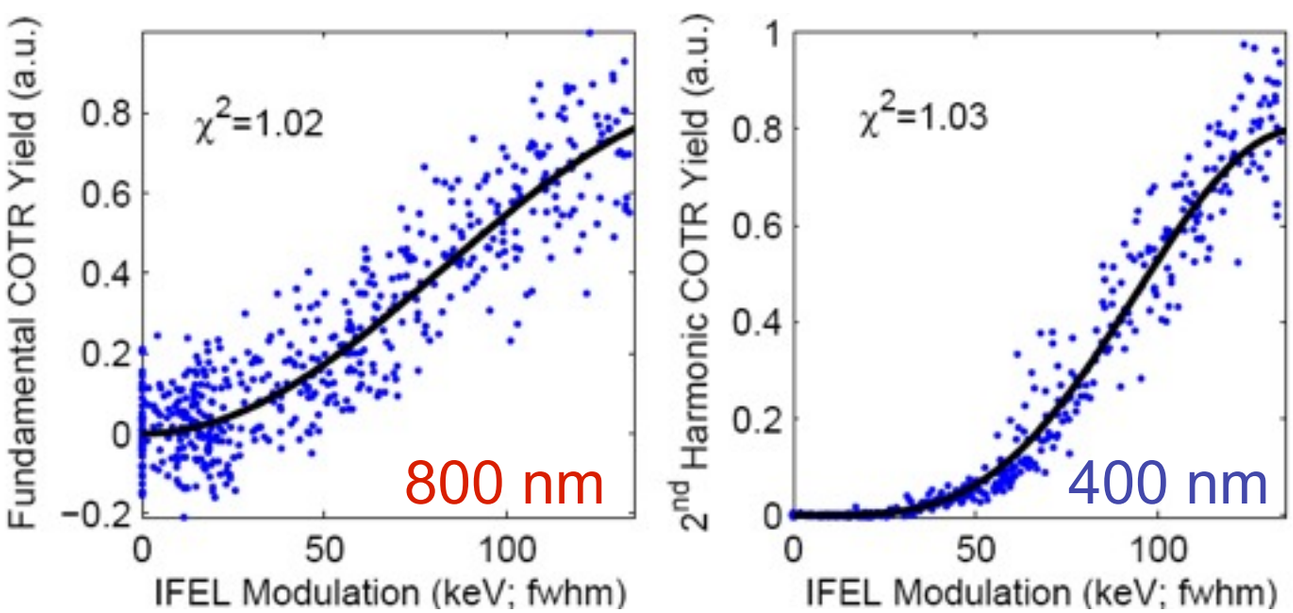
- Erzeugung von 200 nm langen Elektronenpulsen:
  - Energiemodulation in IFEL
  - Pulsformung in Schikane



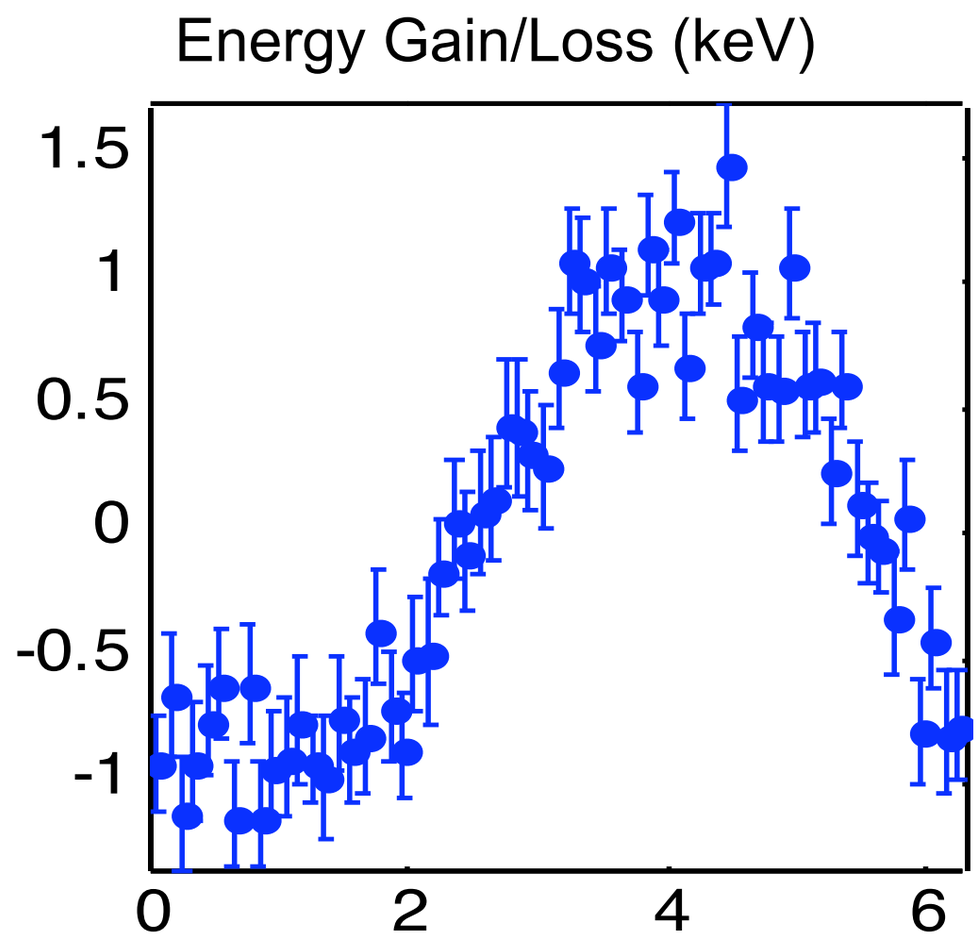


Resultate

Erzeugung von Attosekunden-langen Elektronenpulsen



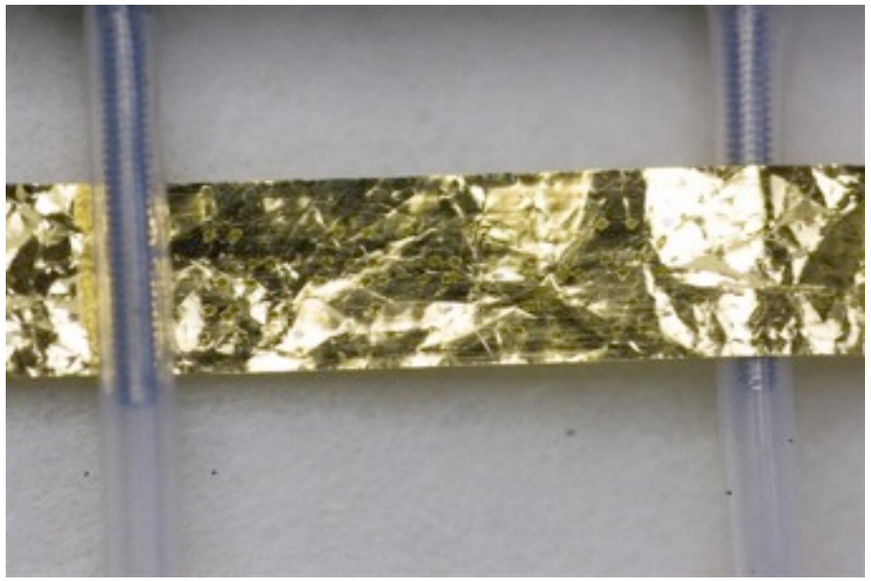
Beschleunigung



Chris Sears,
Eric Colby

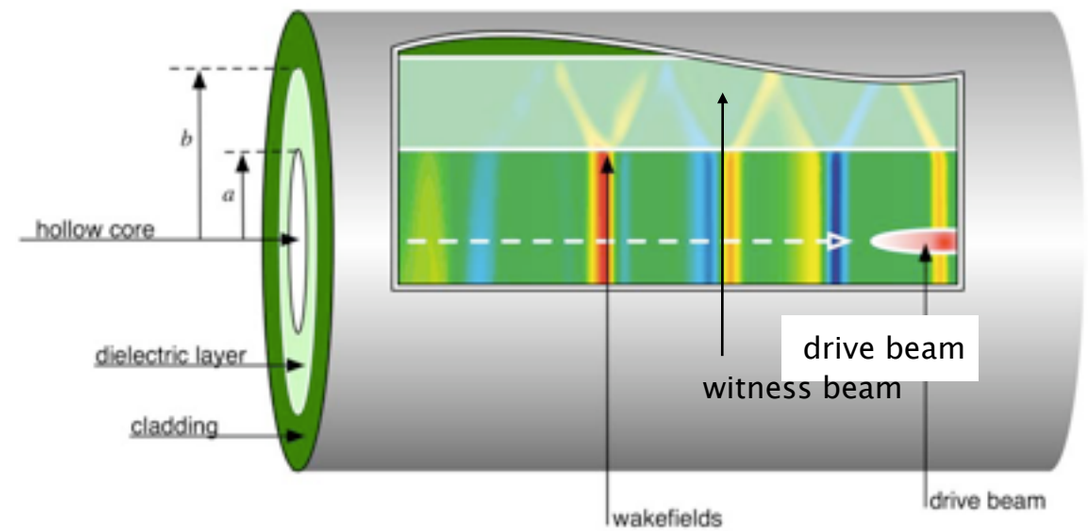
Beschleunigung an Metalloberfläche

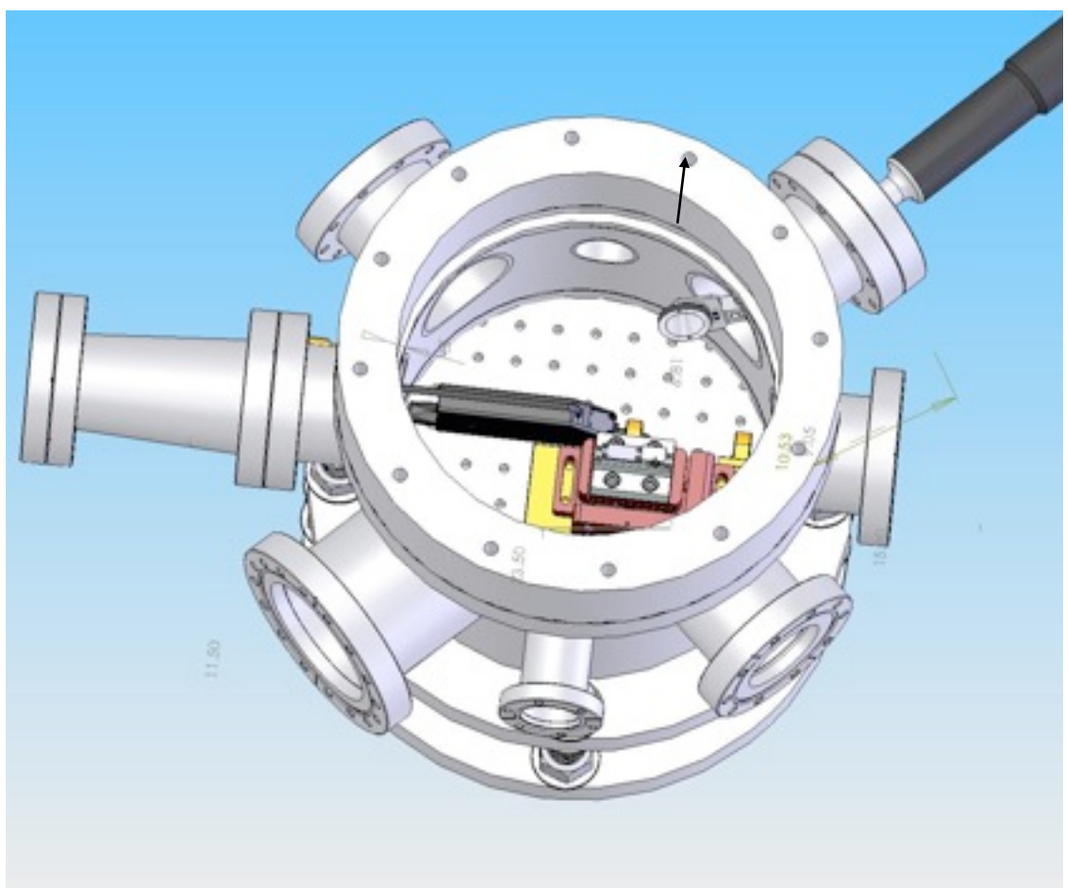
- Inverse Übergangsstrahlung an einer Metalloberfläche

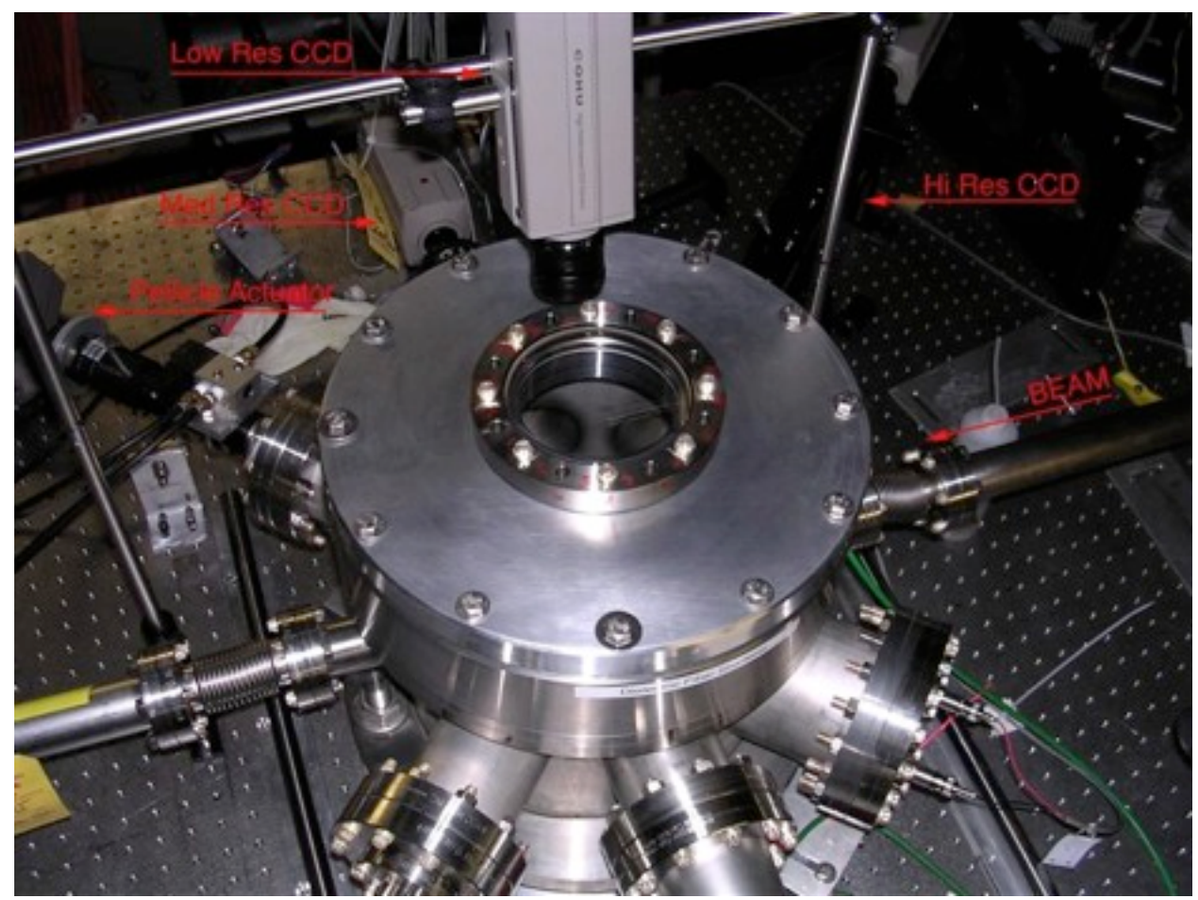


Dielektrische Strukturen

Erzeugung des Beschleunigungsfeldes durch einen Elektronenstrahl





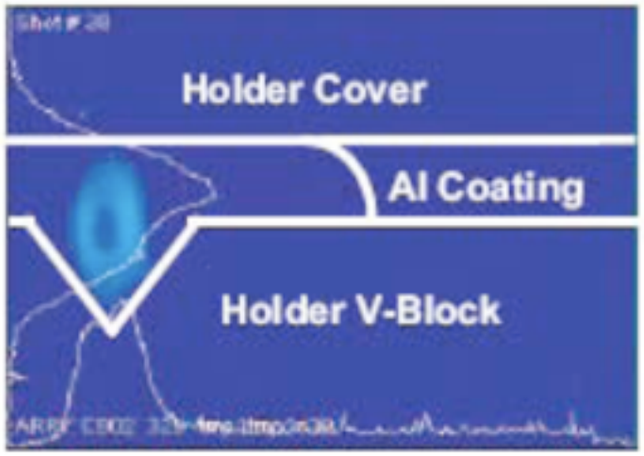


Hristo Badakov, Gil Travish

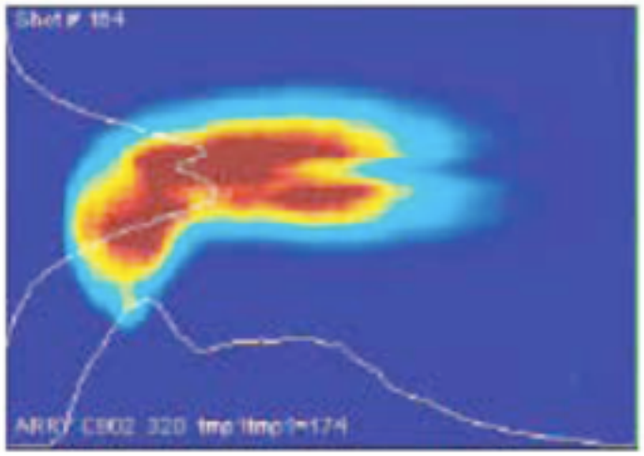
Studien zur maximalen Feldstärke

Emission von Cherenkovlicht

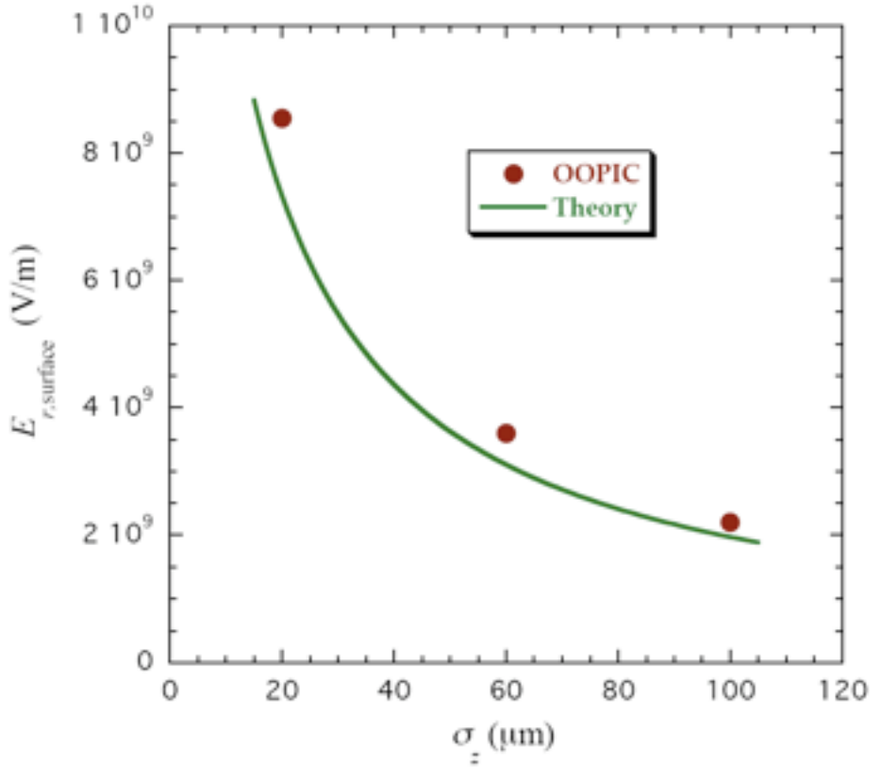
100 µm Pulslänge

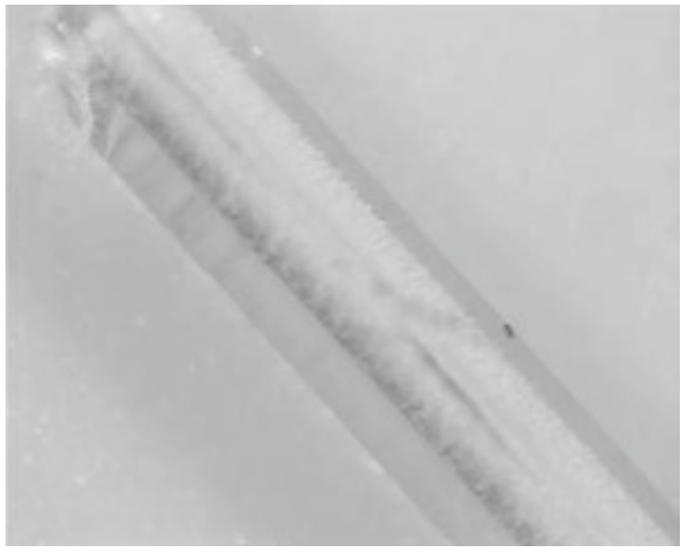


20 µm Pulslänge



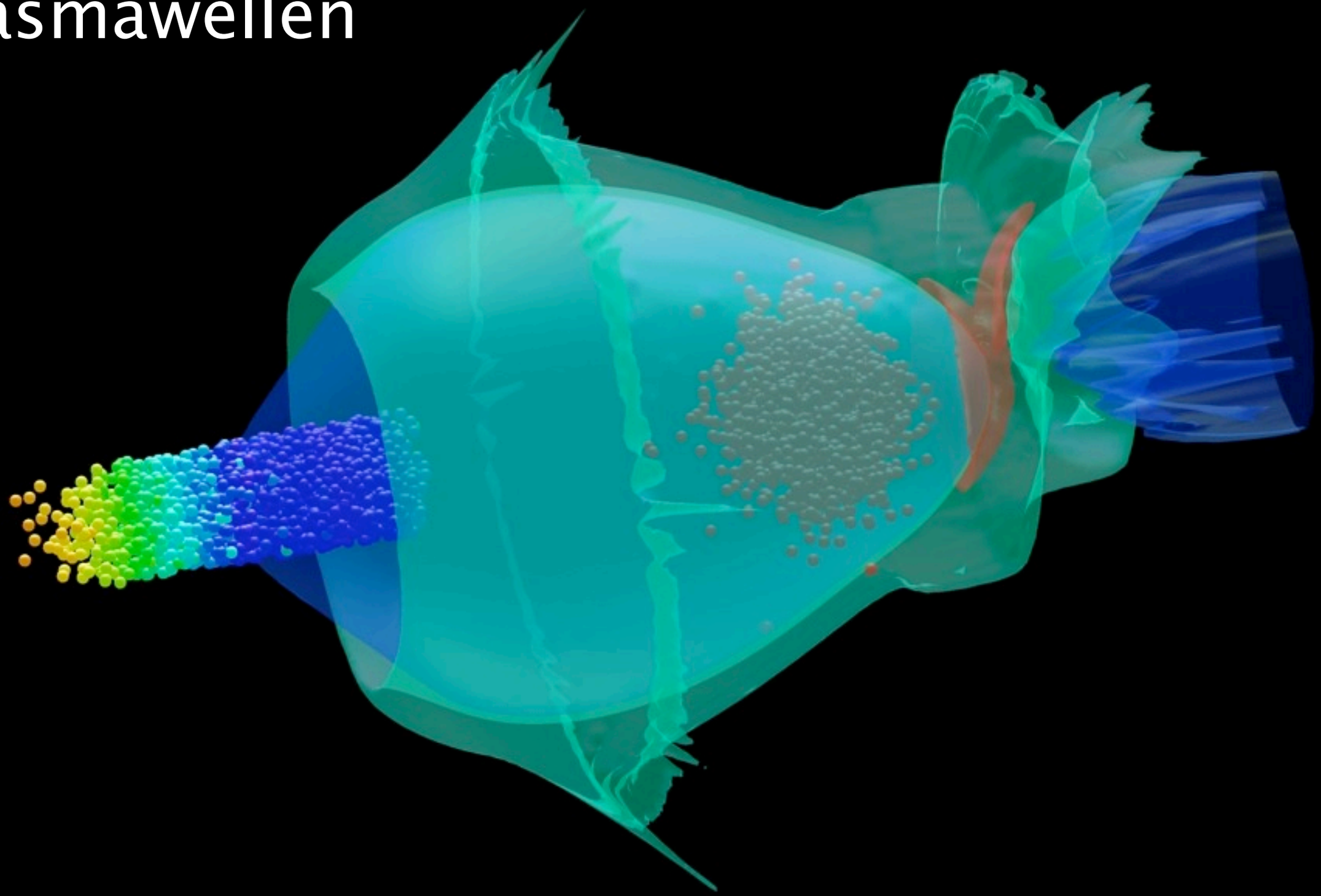
Berechnete Oberflächenfelder





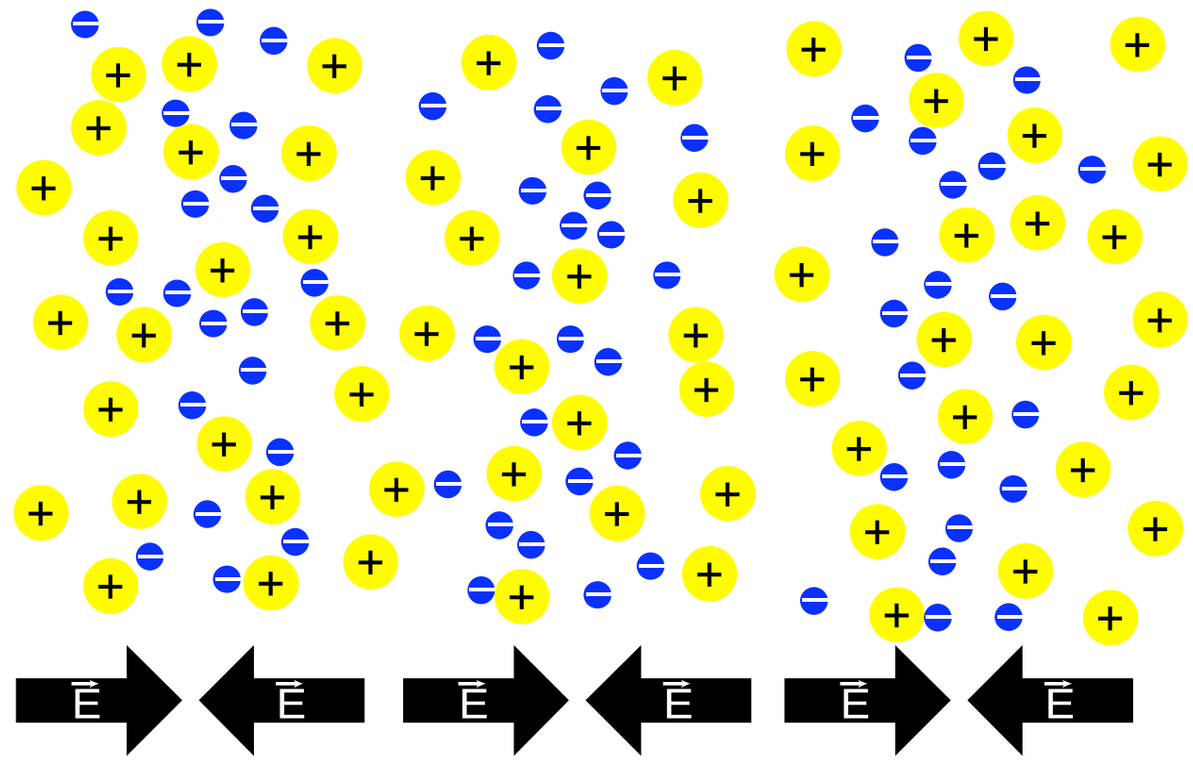
Risse im Dielektrikum

Plasmawellen



Plasmawellen – Theorie

- In herkömmlichen Beschleunigern werden Hohlraumresonatoren eingesetzt, um Feldverteilungen mit einer longitudinalen E-Komponente zu erzeugen
- Das Beschleunigungsfeld ist durch Resonatormaterial begrenzt
- Plasmawellen können ein longitudinales elektrisches Feld haben



- Lineare Plasmawelle:

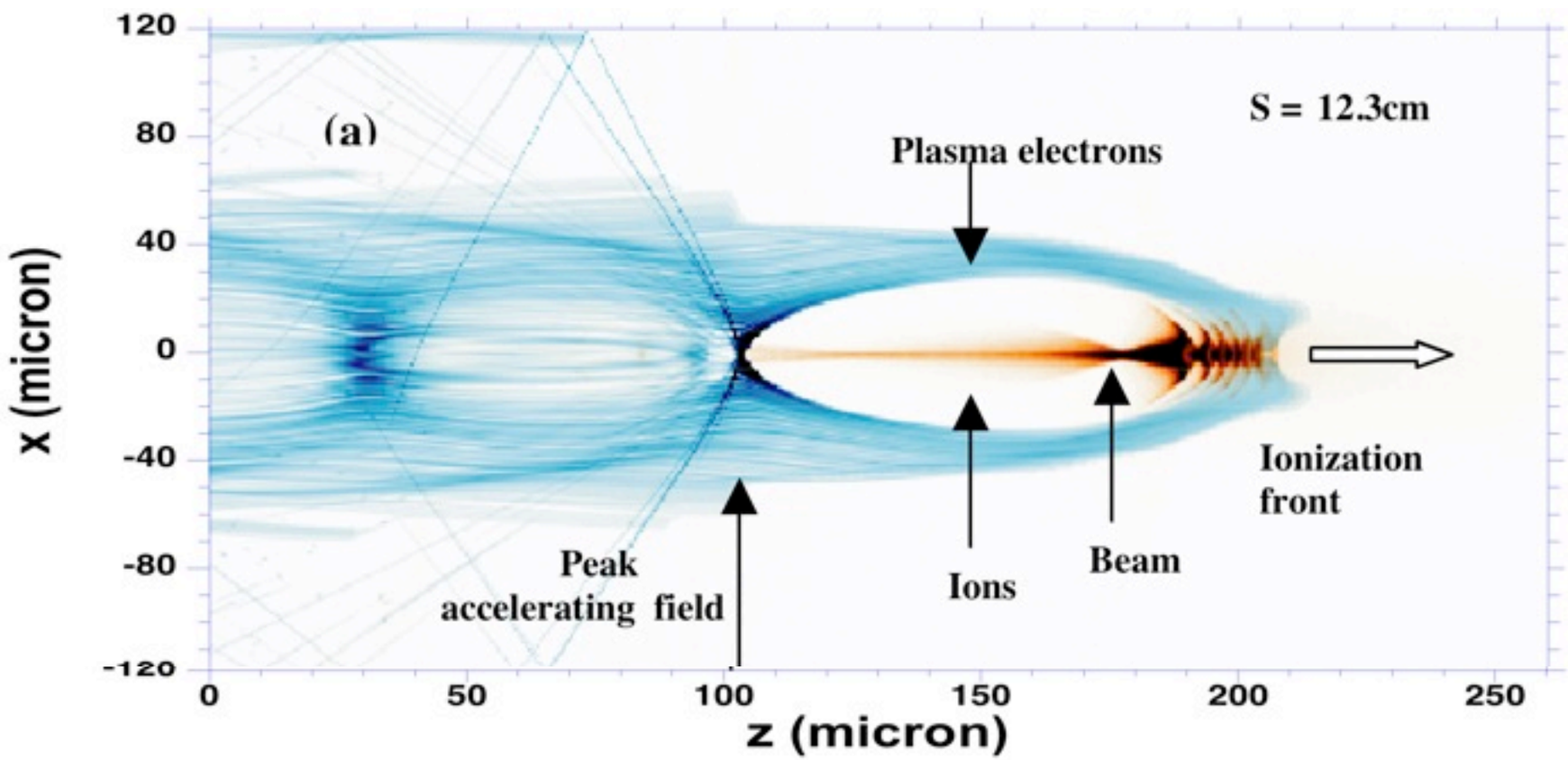
$$\lambda_p \approx \sqrt{\frac{10^{15}\mathrm{cm}^{-3}}{n_p}} \quad \mathrm{mm}$$

  - Limit:

$$E_0 = \frac{4\pi\,\varepsilon_0\,c\,m_e}{e}\,\omega_p \quad \approx \sqrt{\frac{n_p}{\mathrm{cm}^{-3}}} \quad \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{cm}}$$

Plasmawellen – Theorie

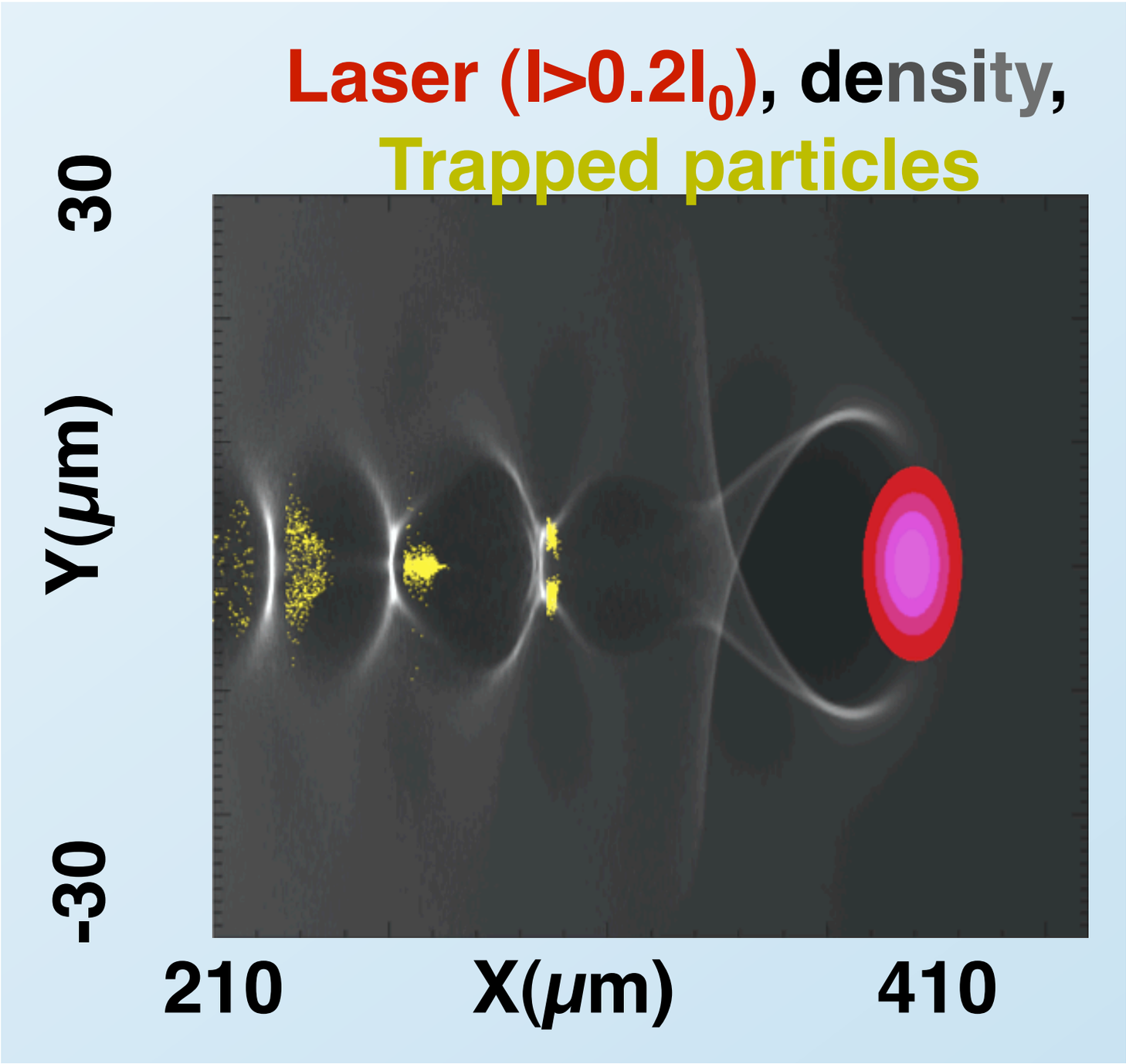
- Jenseits dieser Grenze: nichtlineare Wellen, „Plasmawirbel“
- Felder können nur mit numerischen Methoden bestimmt werden



- Typische Wellenlänge: 50 µm
- Typische Beschleunigungsfelder: 50GV/m

Miaomiao Zhou

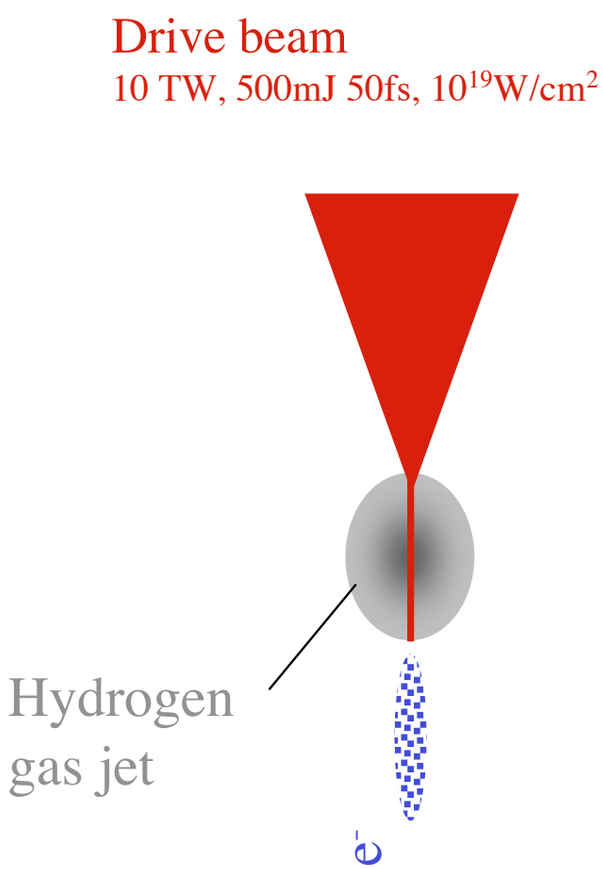
Einfang von Plasmaelektronen



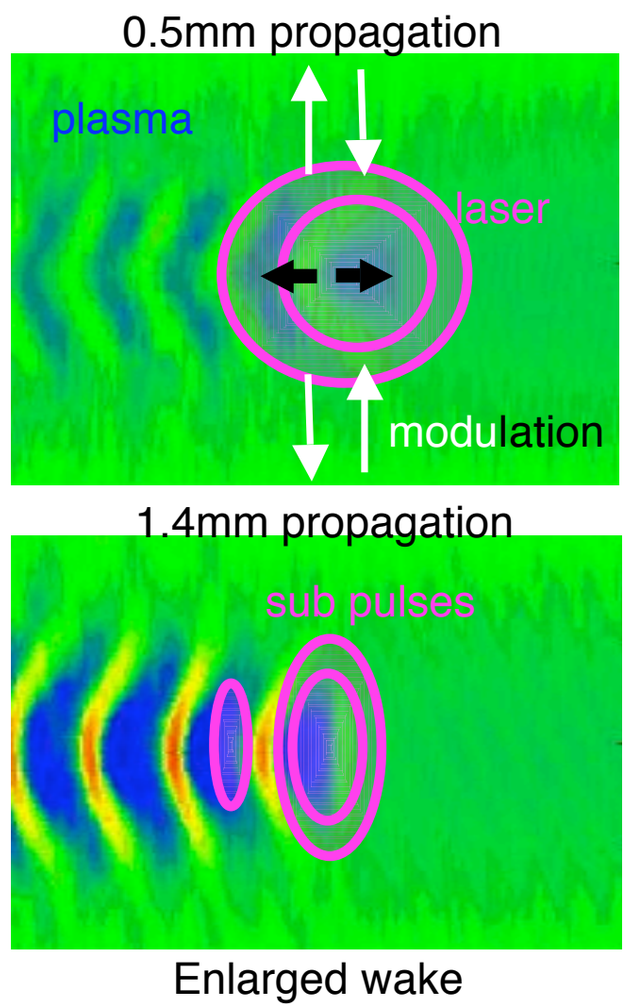
Cameron Geddes

Plasmabeschleunigung – Stand 2003

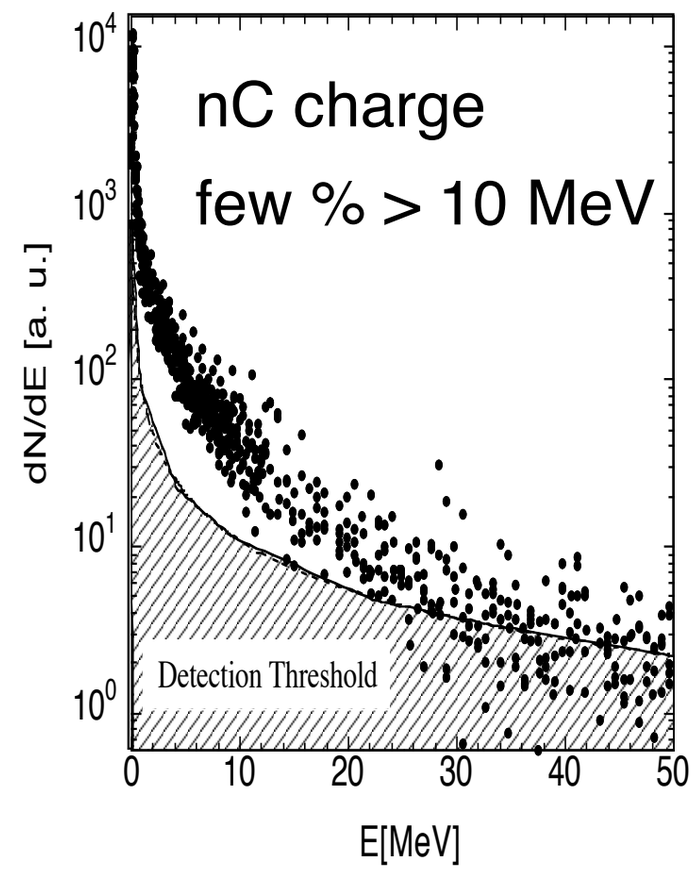
Tightly focused laser
ionized gas jet
& drove wake



Laser self modulation
to plasma period
drives wake to trapping

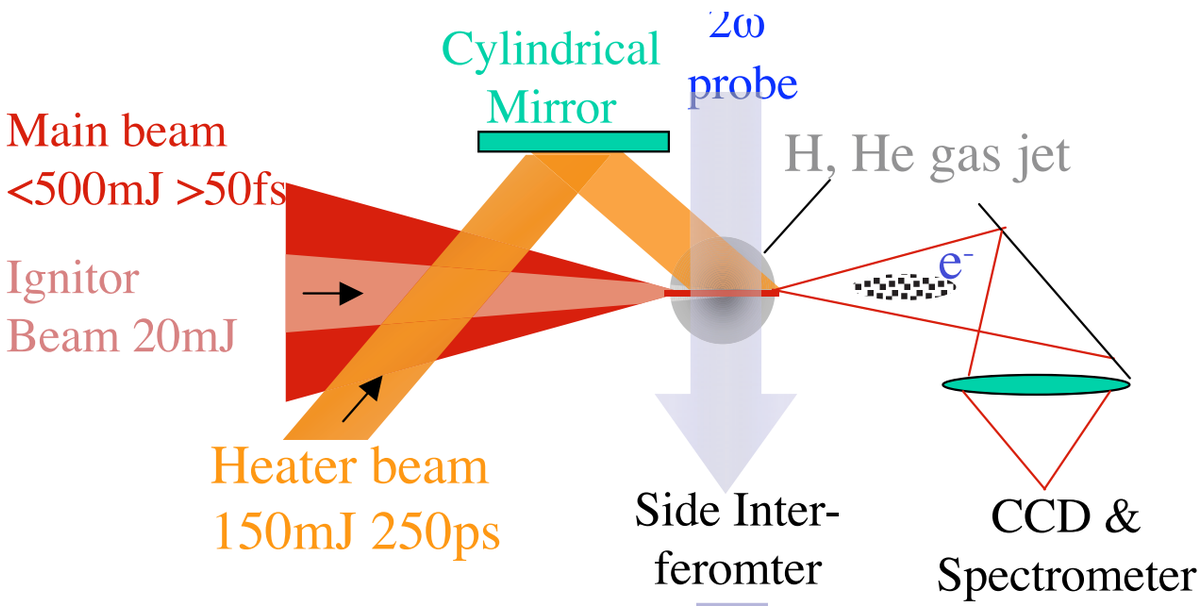


Acceleration to
50 MeV in ~1 mm



Cameron Geddes

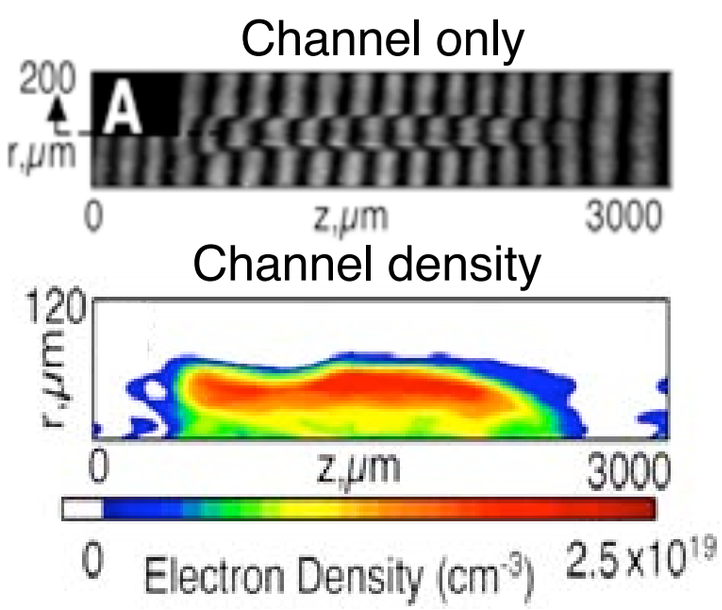
Hydrodynamische Plasmakanäle



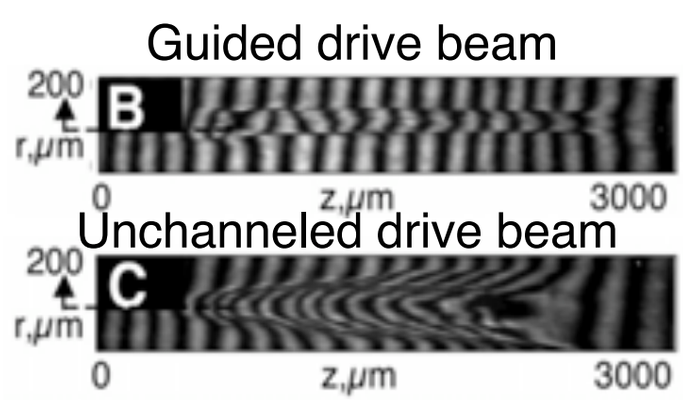
Plasma ionized by ignitor heated by heater

Expansion shock yields guiding profile

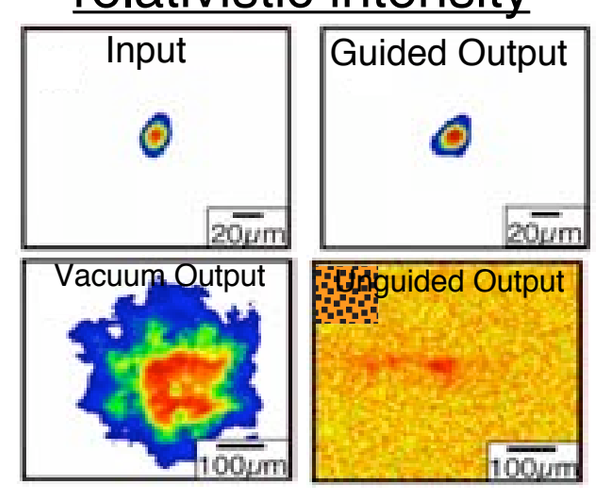
Channel profile



No channel leakage



Guiding over > 10 ZR ~ 2mm relativistic intensity

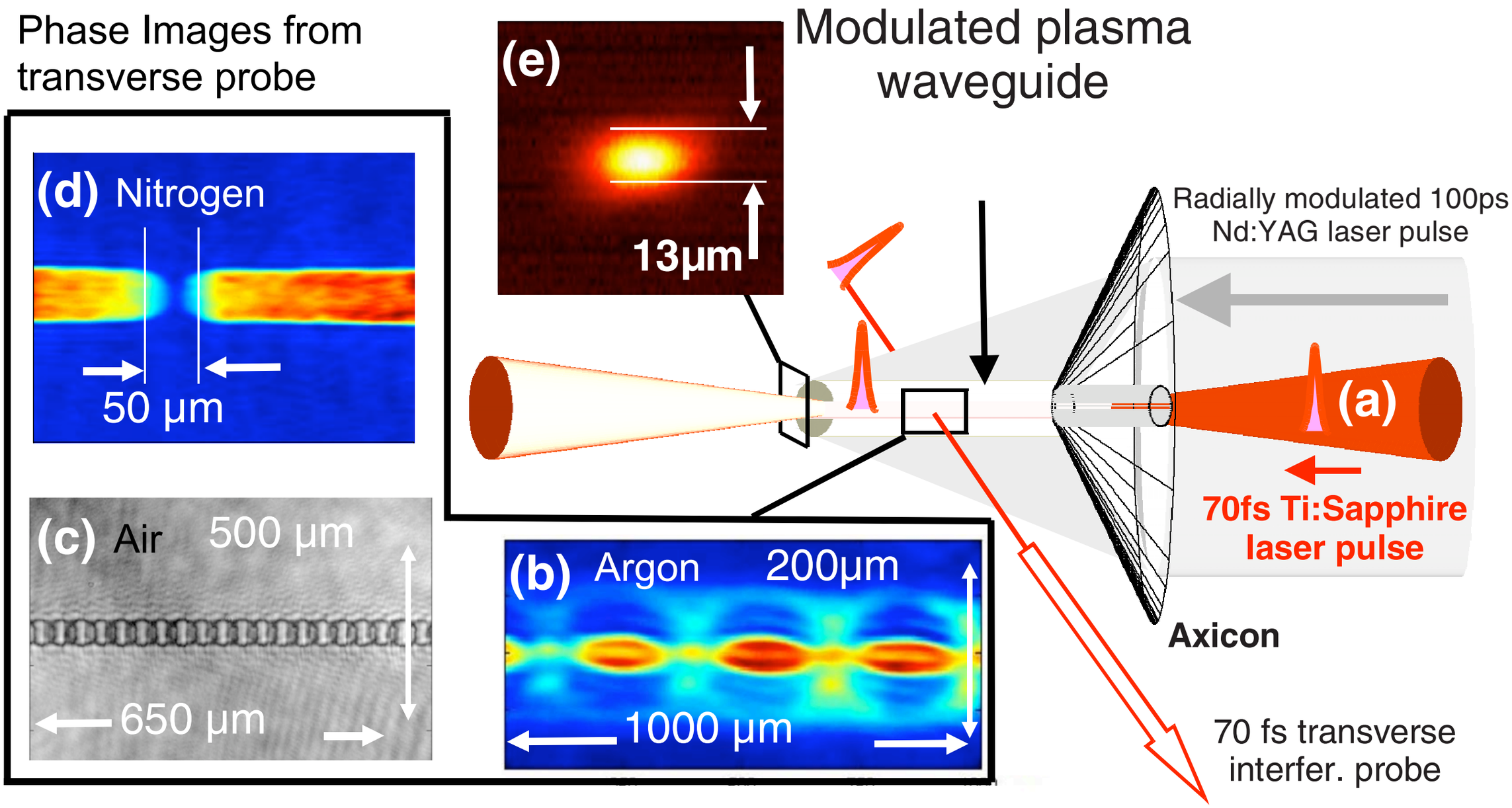


High quality guiding up to 4TW

C.G.R. Geddes et al, PRL, 2005

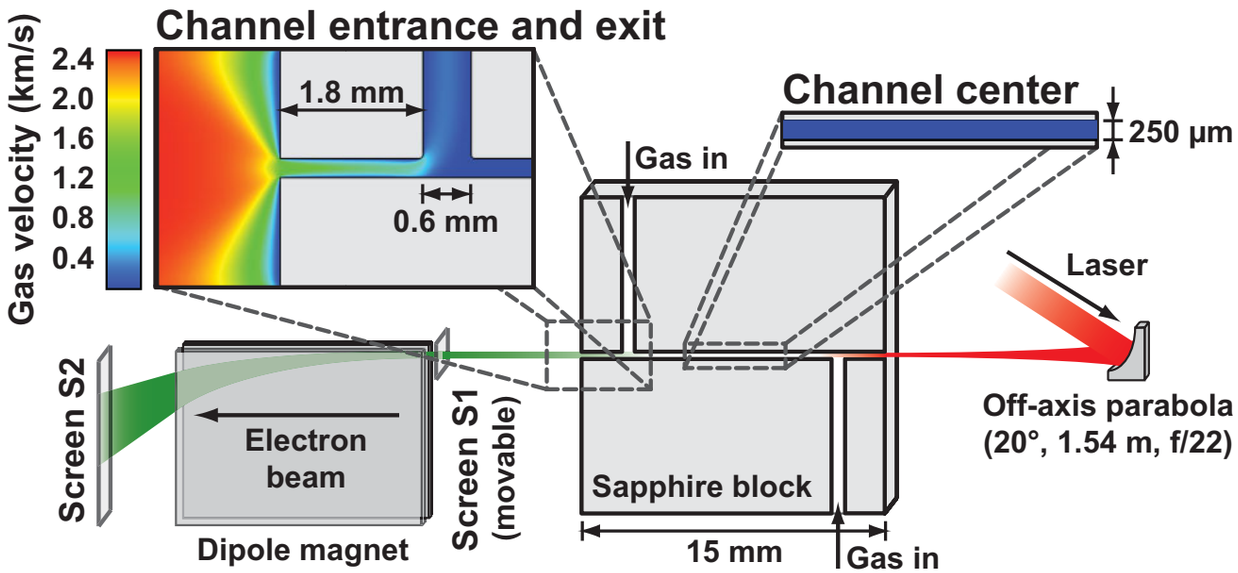
Cameron Geddes

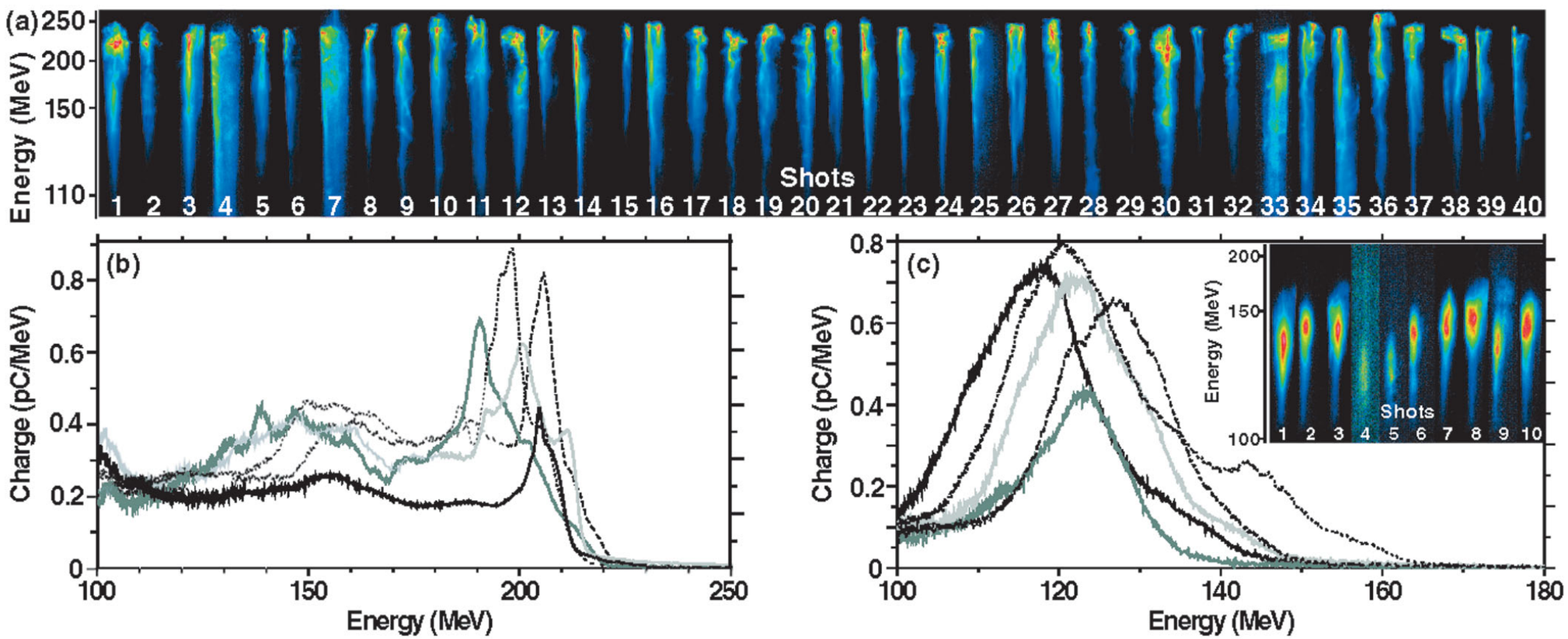
Plasma-Wellenleiter



Andrew York

Plasmabeschleunigung in Kapillaren

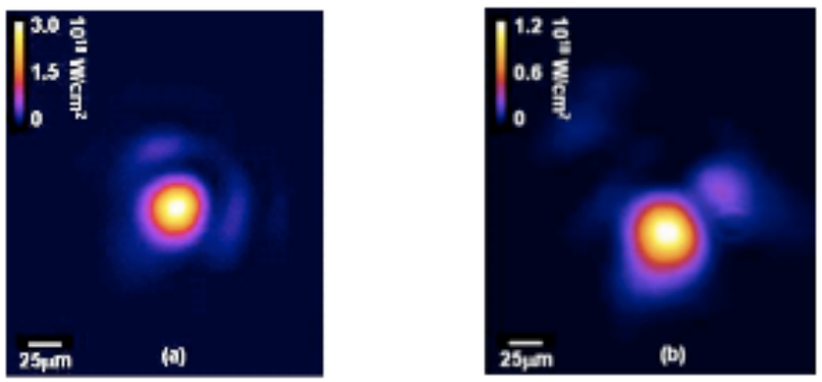




Jens Osterhoff,
Stefan Karsch

Teilchenenergien bis 1 GeV

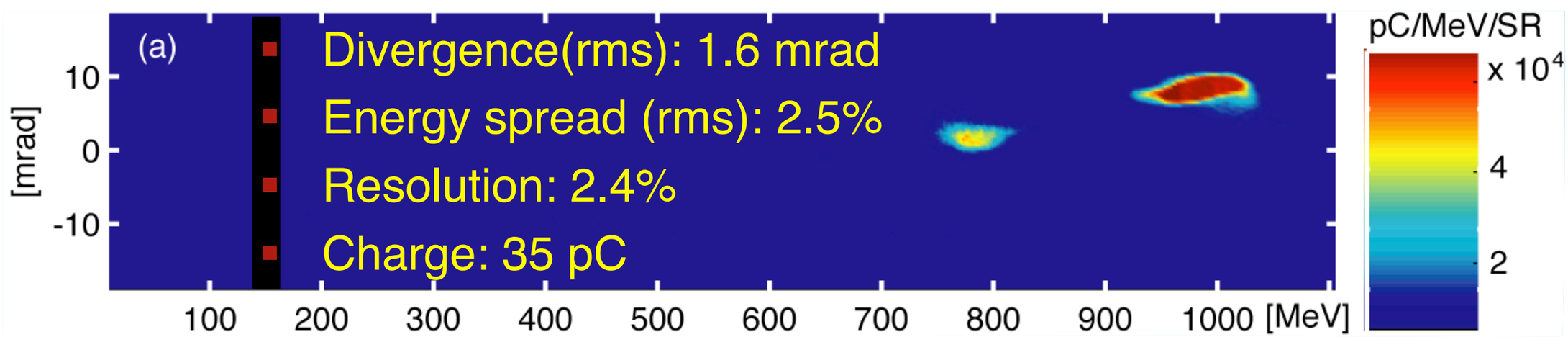
Waveguide:
Guiding of 40 TW laser pulses:
- in capillary discharge waveguide
- over 33 mm of plasma



Input spot Exit spot

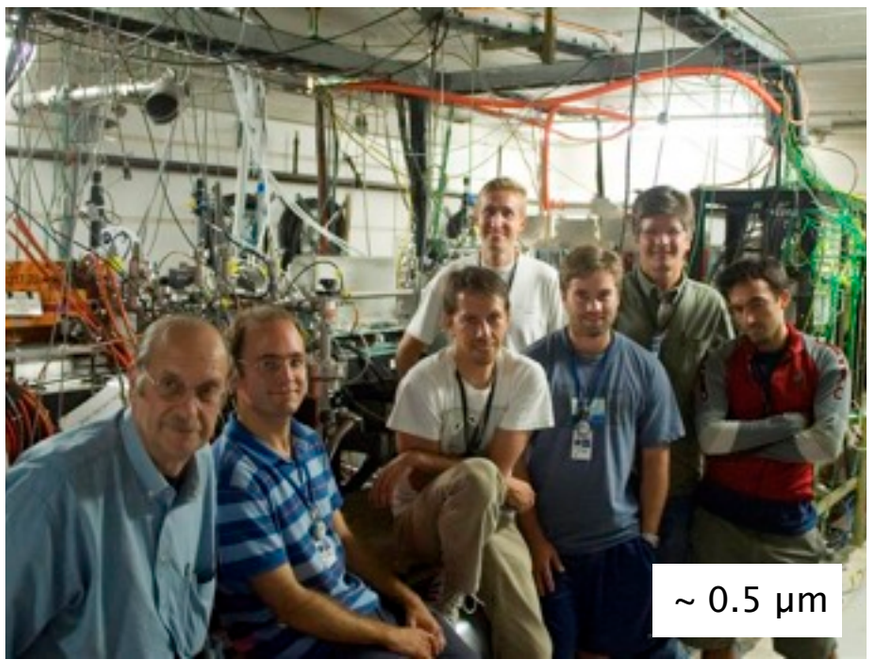
- a_0 ~ 1.46 (40 TW, 37 fs)
- n_e ~ 4×10^{18} cm^{-3}, P_{crit} ~ 7 TW

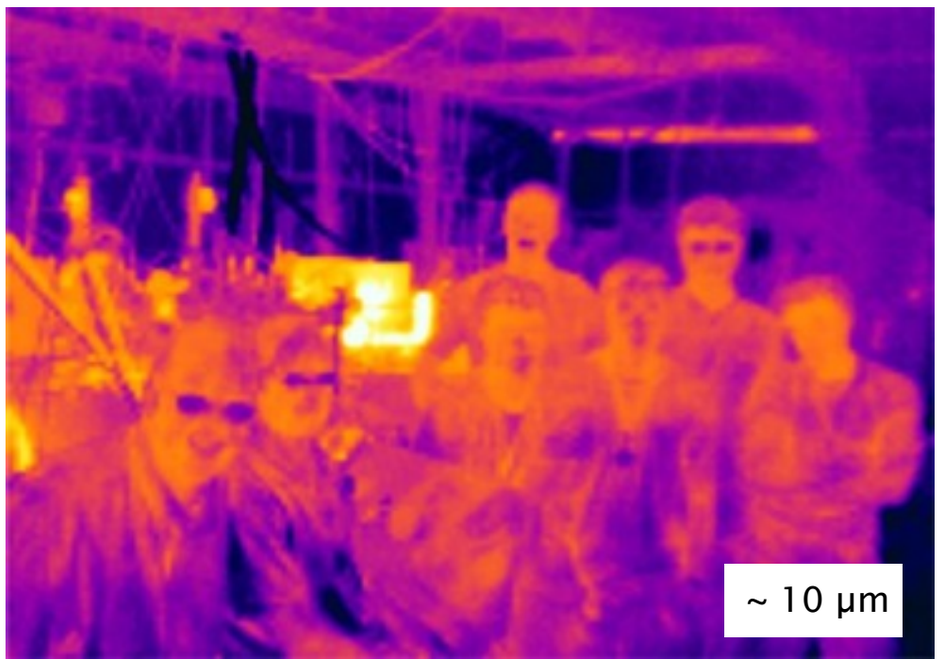
1 GeV BEAM



Cameron Geddes

Plasmawellen-Beschleunigung mit Elektronen



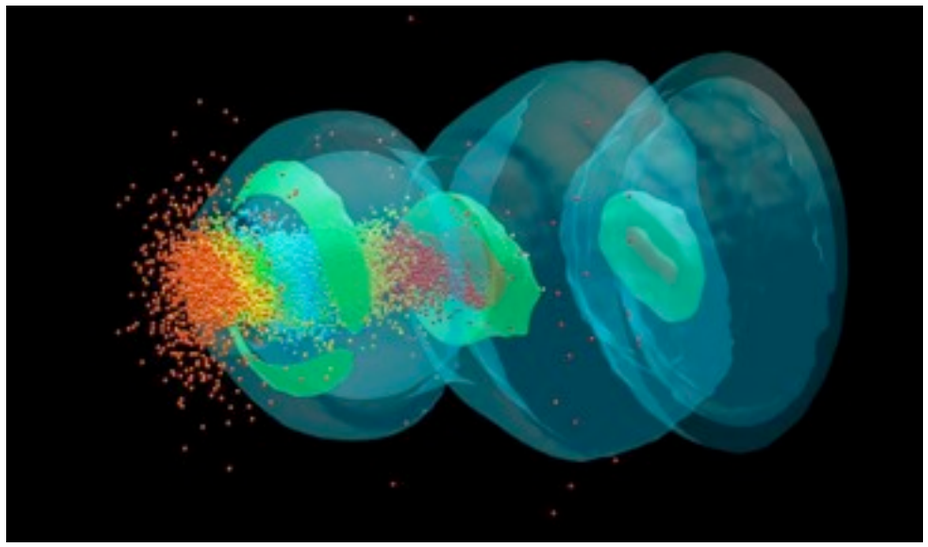


Energiequelle: Elektronenstrahl

- 42 GeV Teilchenenergie
- 3,2 nC Ladung im Teilchenpaket
- Strahlleistung: ~10^{15} W = 1 TW
- Leistungsdichte: ~10^{24} W/m^2 =1 YW/m^2

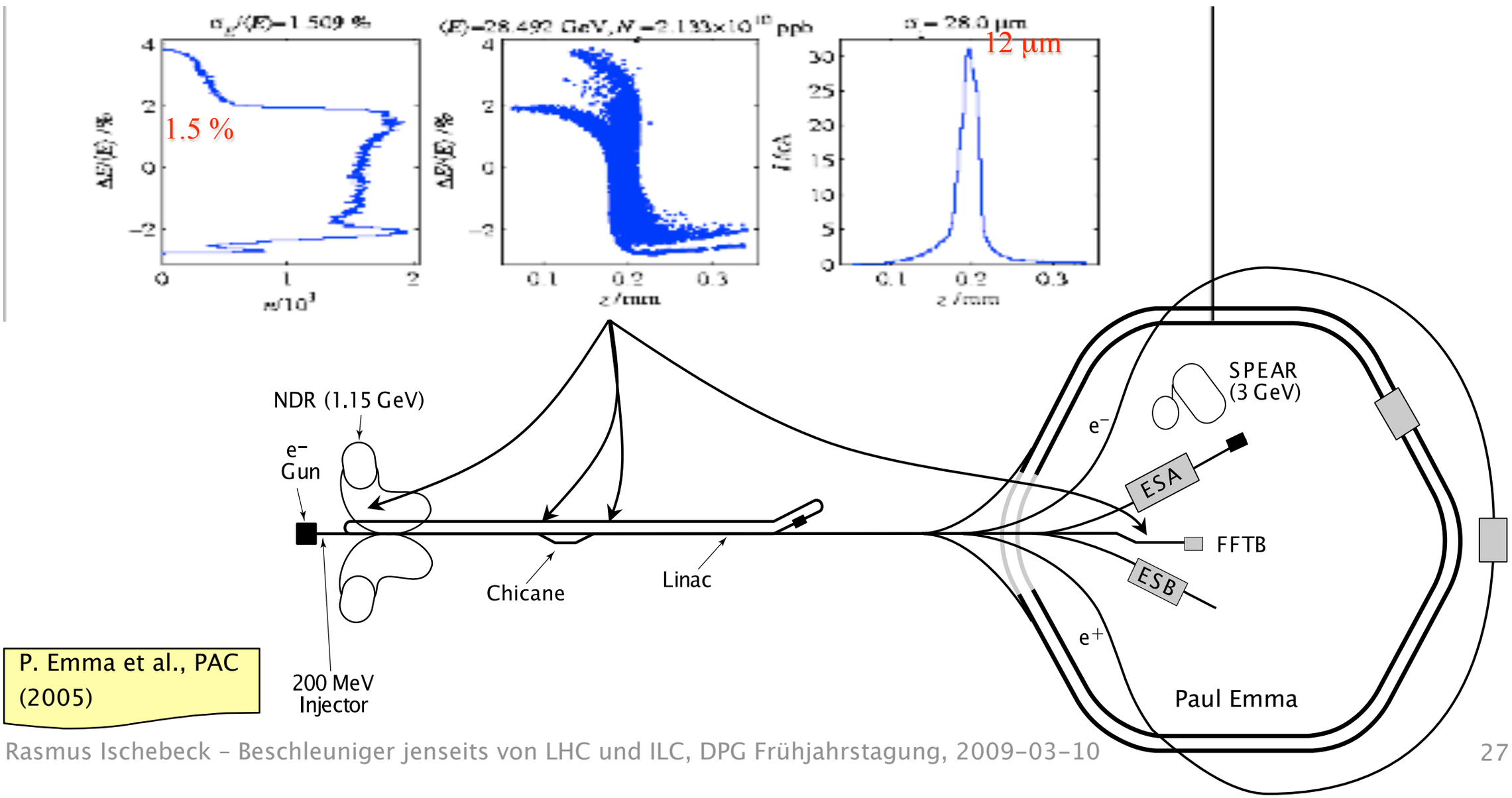
Plasmaquelle: Lithiumofen

- Teilchendichte: ~10^{23} / m^3



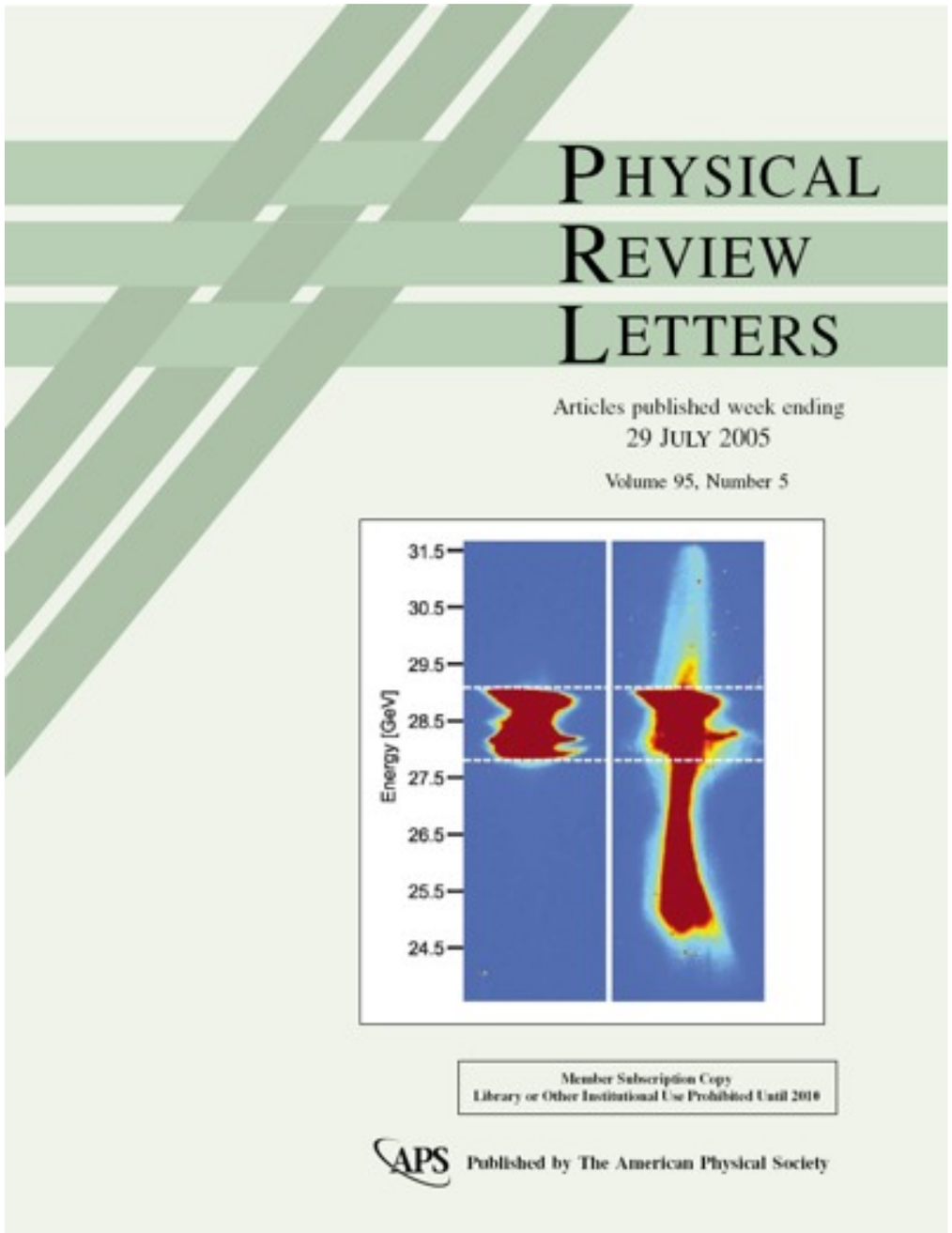
Plasmabeschleunigung bei SLAC

Beschleunigung, Kompression und Fokussierung des Strahls, um eine Spitzenleistungsdichte von 5 YW/m² zu erreichen

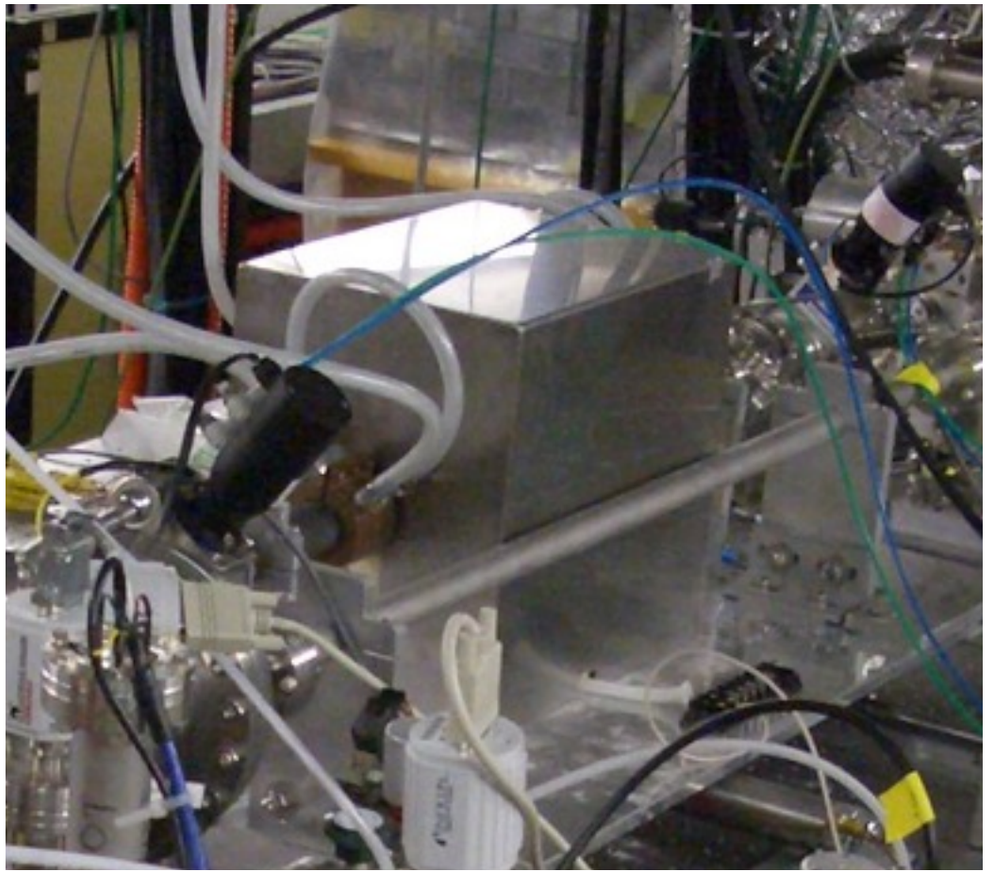


P. Emma et al., PAC (2005)

Erste Ergebnisse

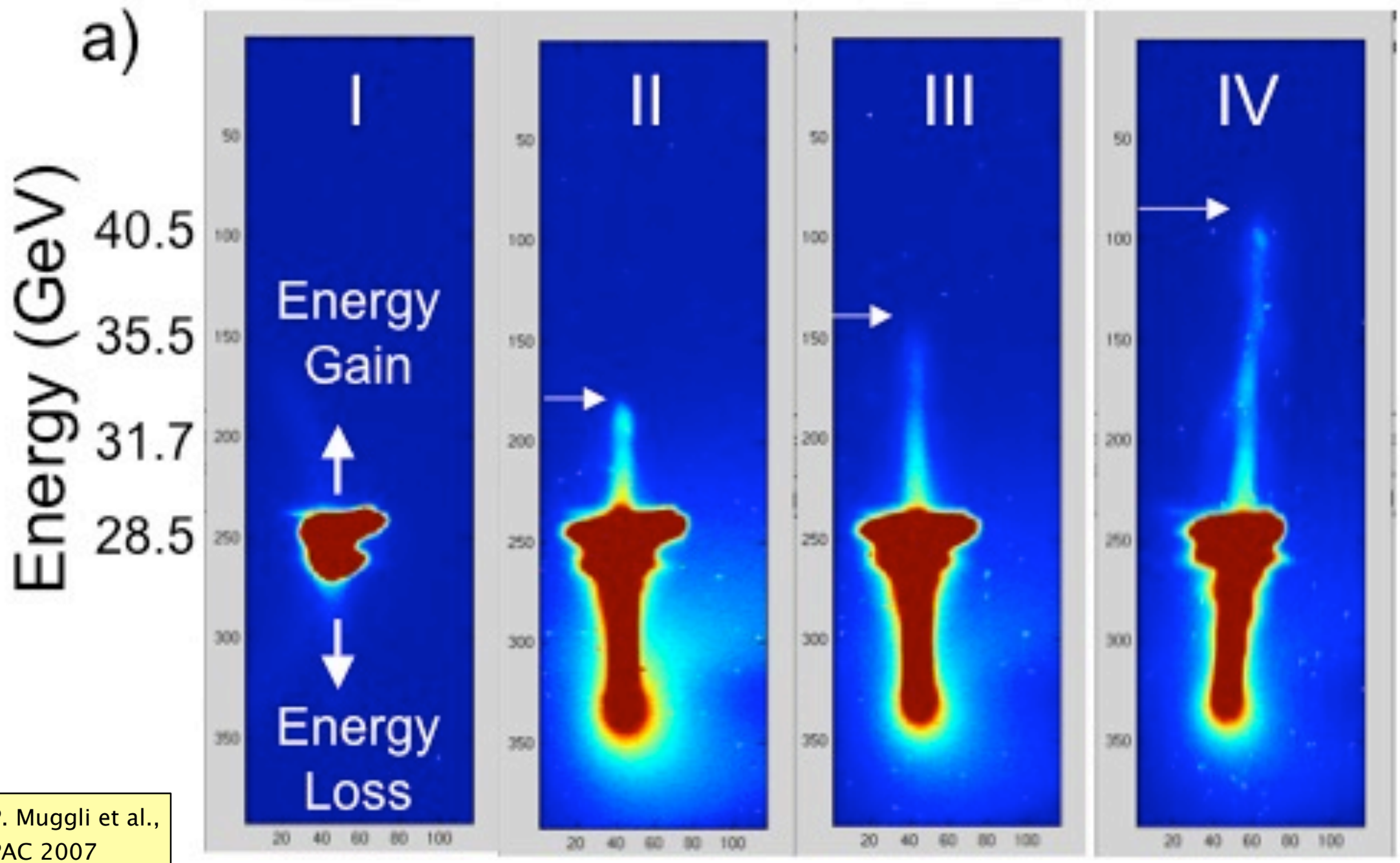


Über 3 GeV Energiegewinn
in 10 cm Plasmalänge



M. J. Hogan et al., PRL 95 (2005)

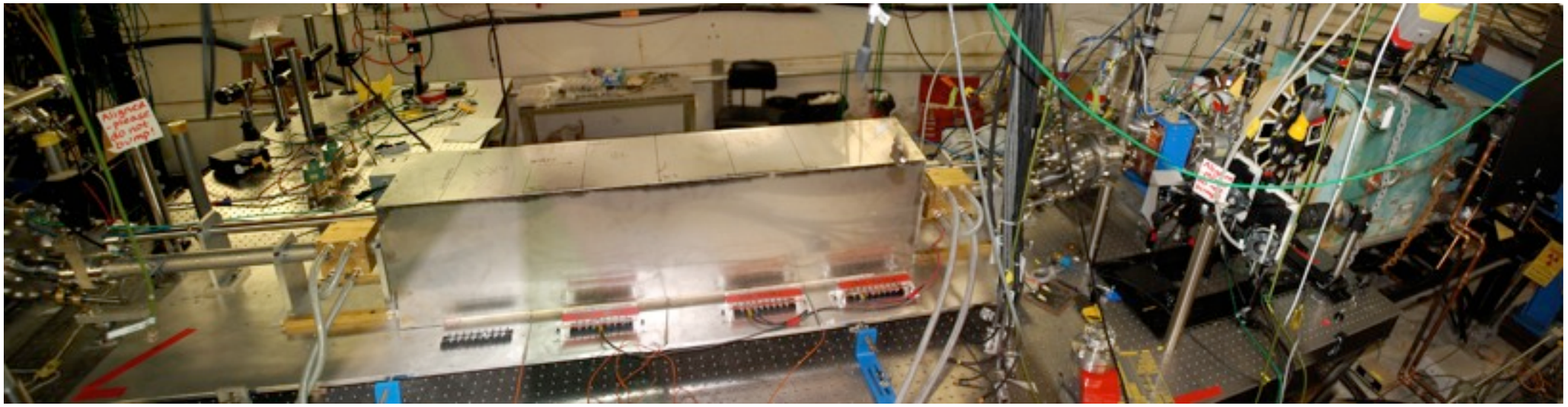
Erhöhung der Plasmalänge auf 30,5 cm



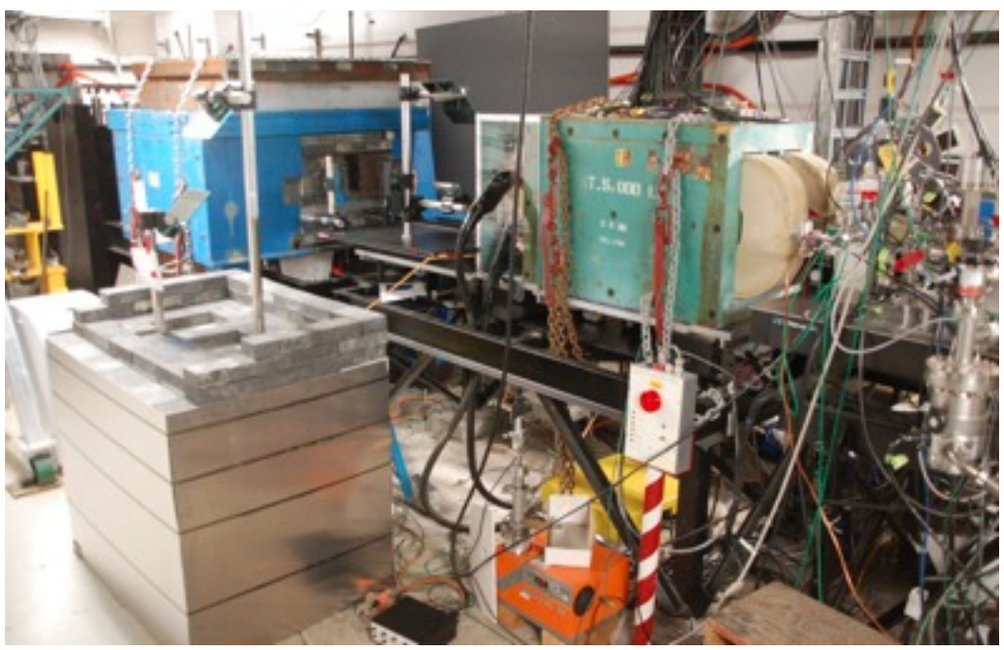
P. Muggli et al., PAC 2007

Patric Muggli

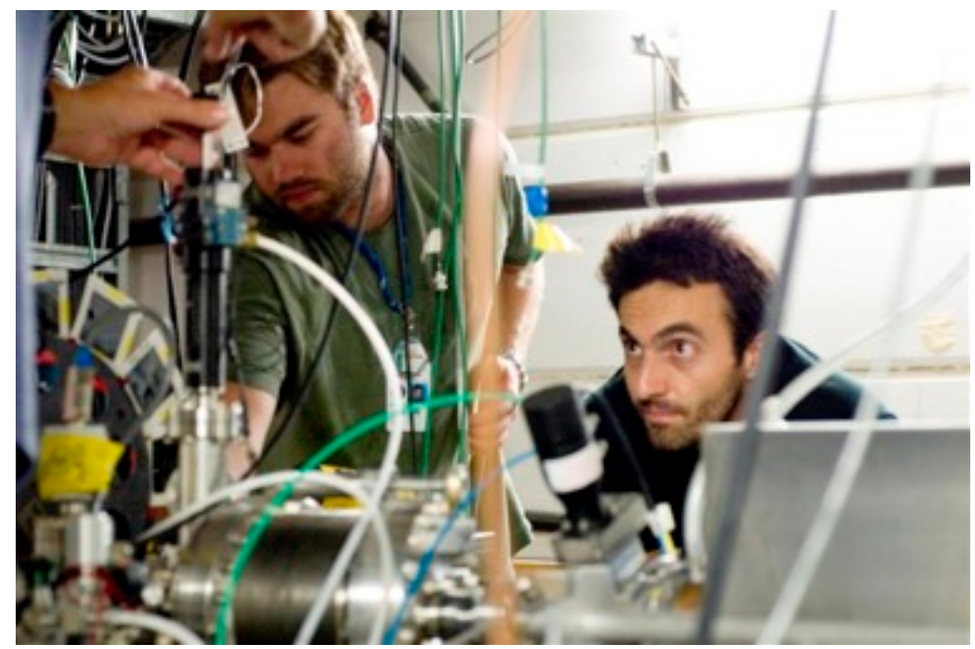
1 Meter langes Plasma



Größerer Plasmaofen



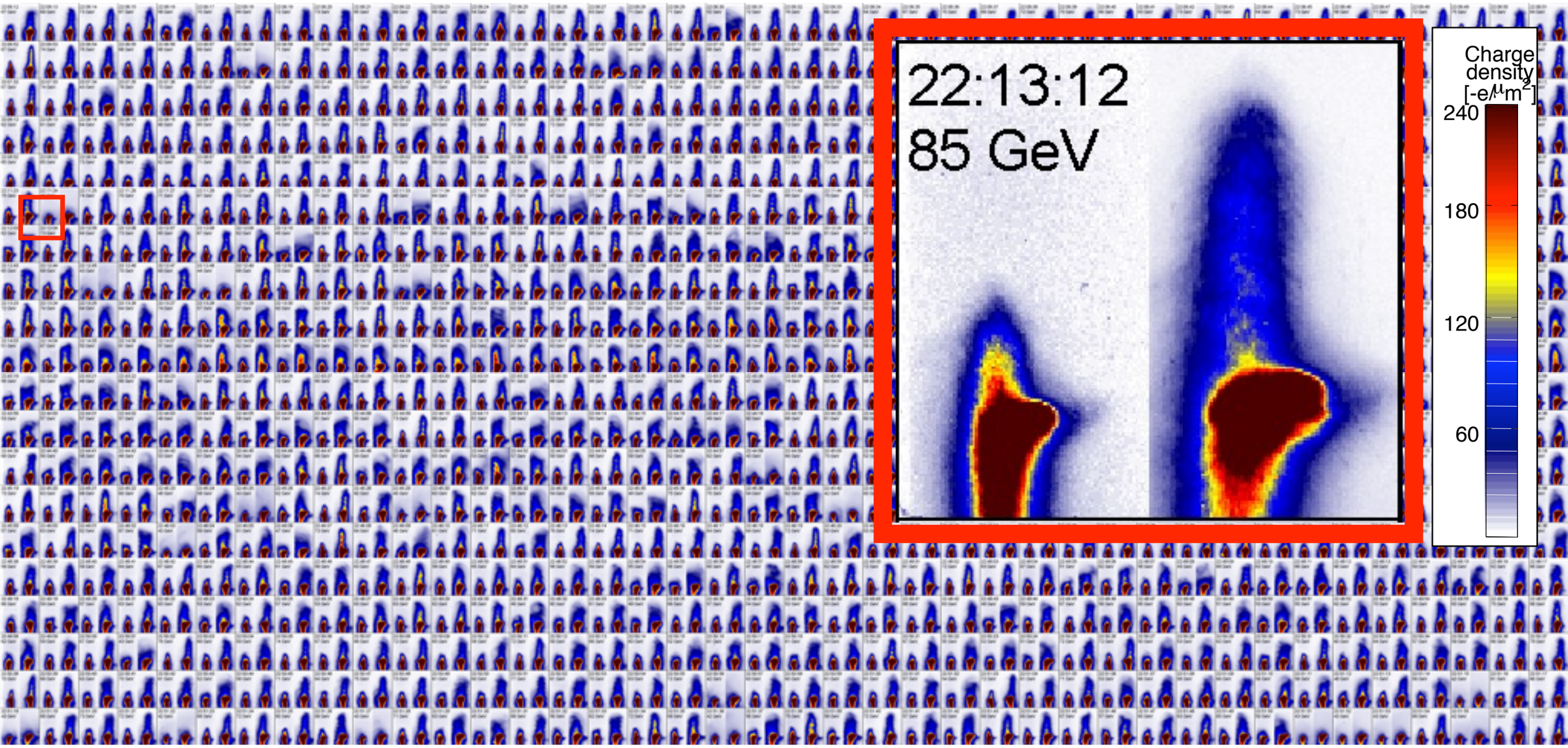
Neues Spektrometer



Diagnostik für eingefangene Teilchen

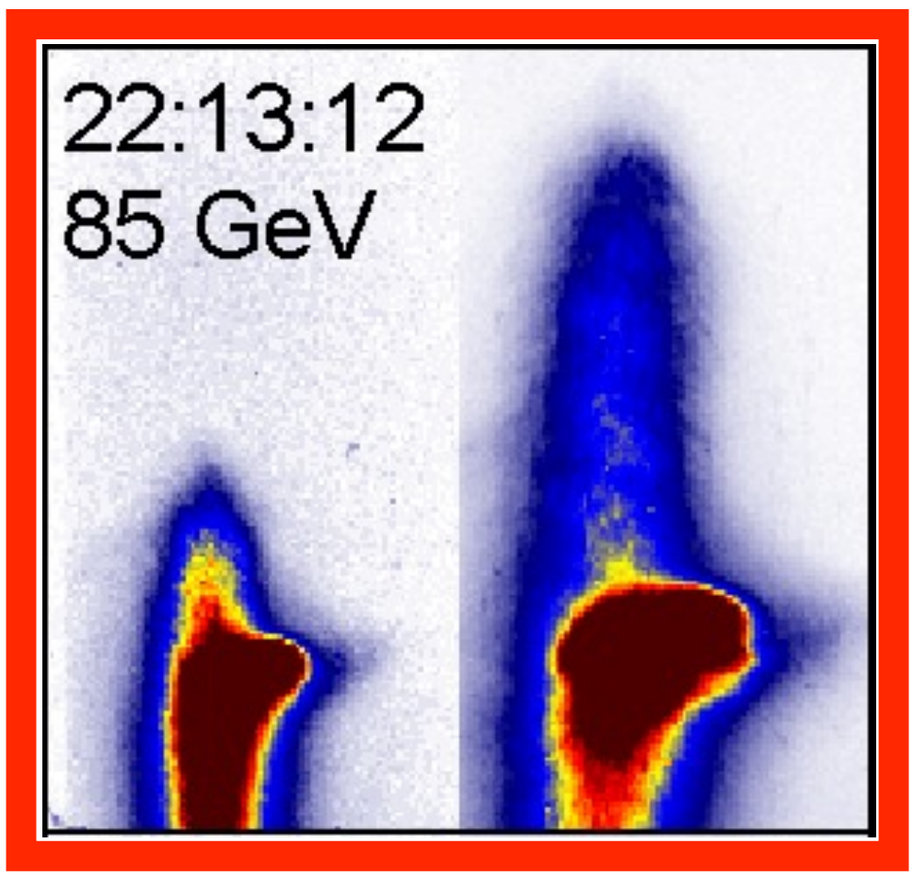
Höhere Energie im einkommenden Elektronenstrahl

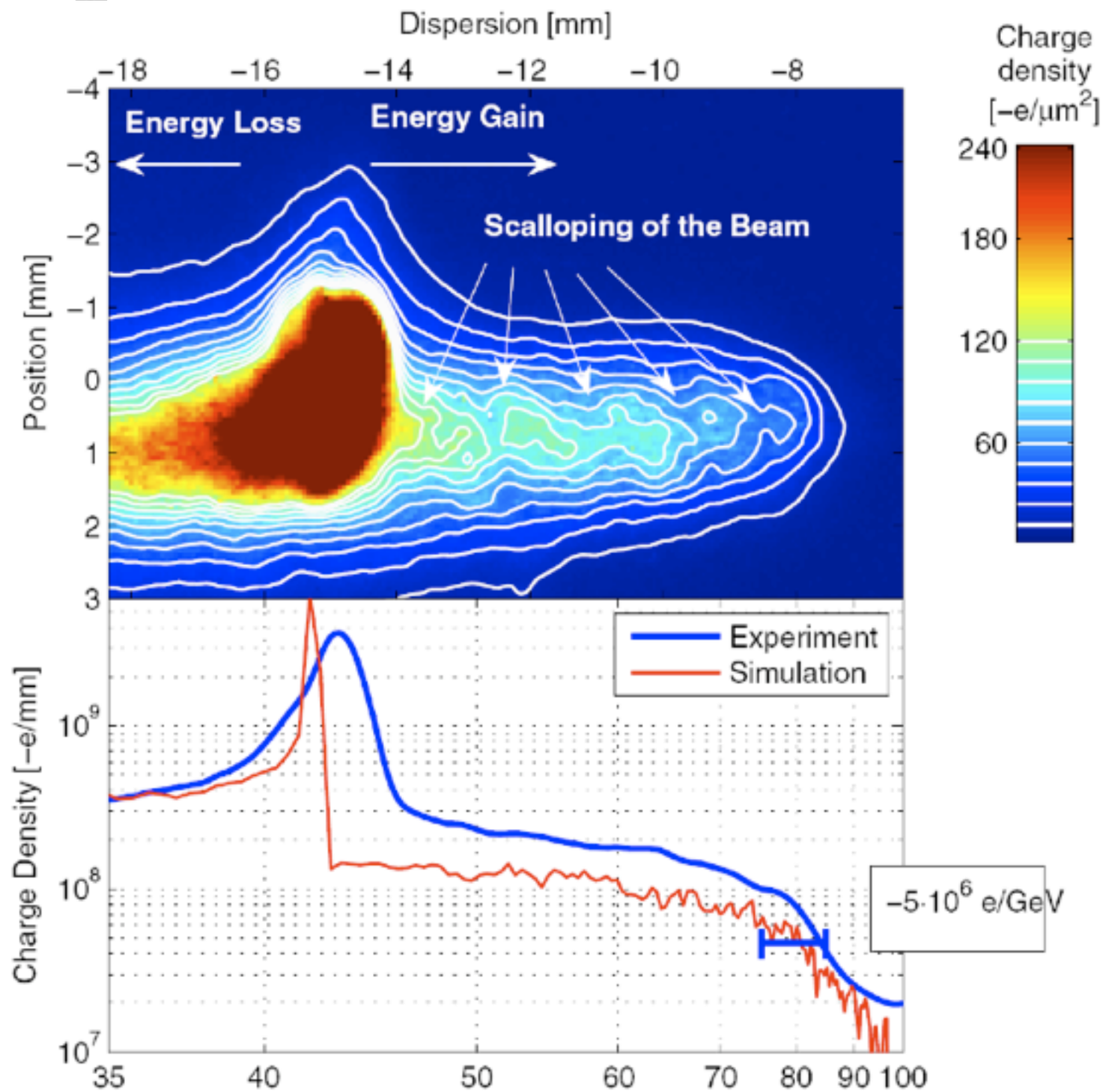
Bilder in beiden Spektrometerebenen von 800 aufeinanderfolgenden Ereignissen



Energieverdopplung

- Plasmalänge: 85 cm
- Dichte: $2{,}7 \bullet 10^{17}\ cm^{-3}$
- Anfangsenergie: 42 GeV
- Spitzenenergie: 85 GeV



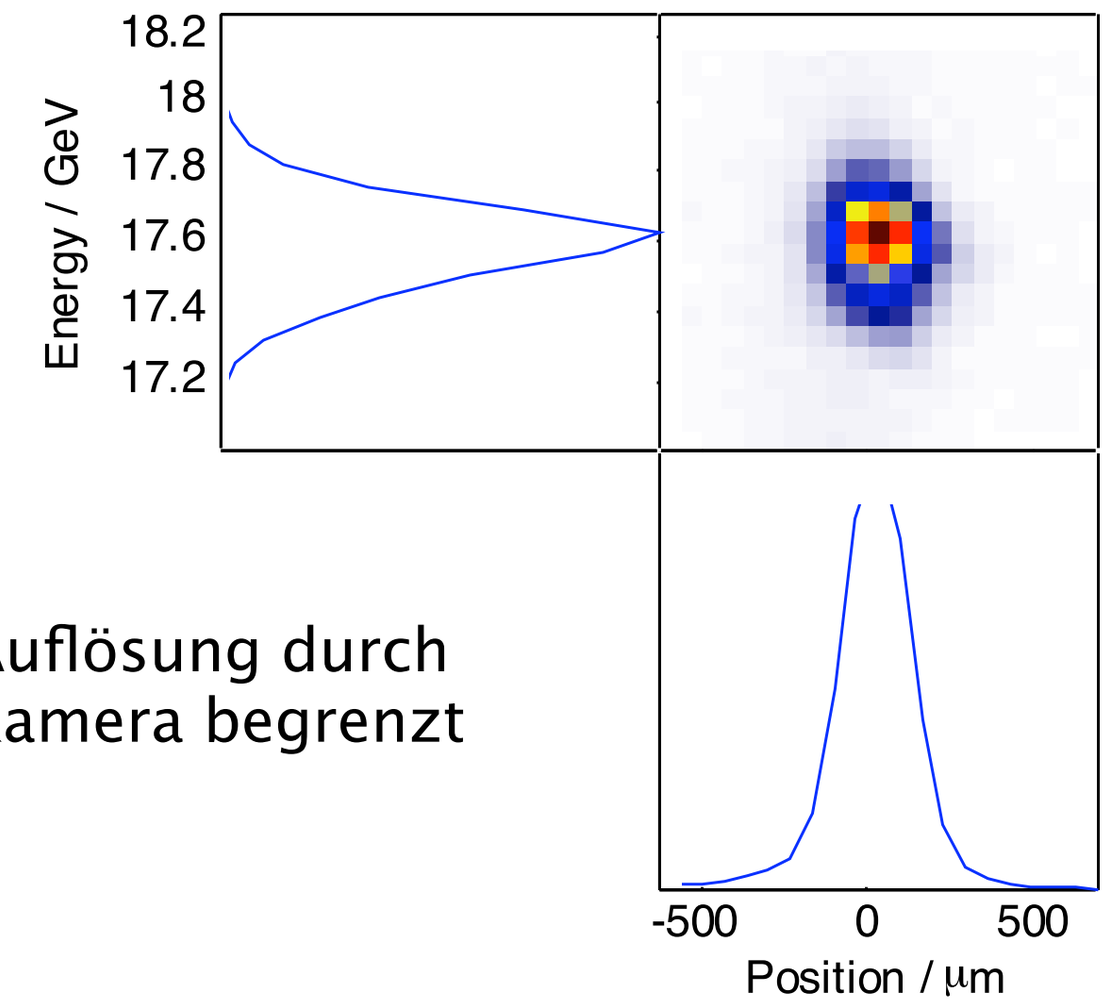


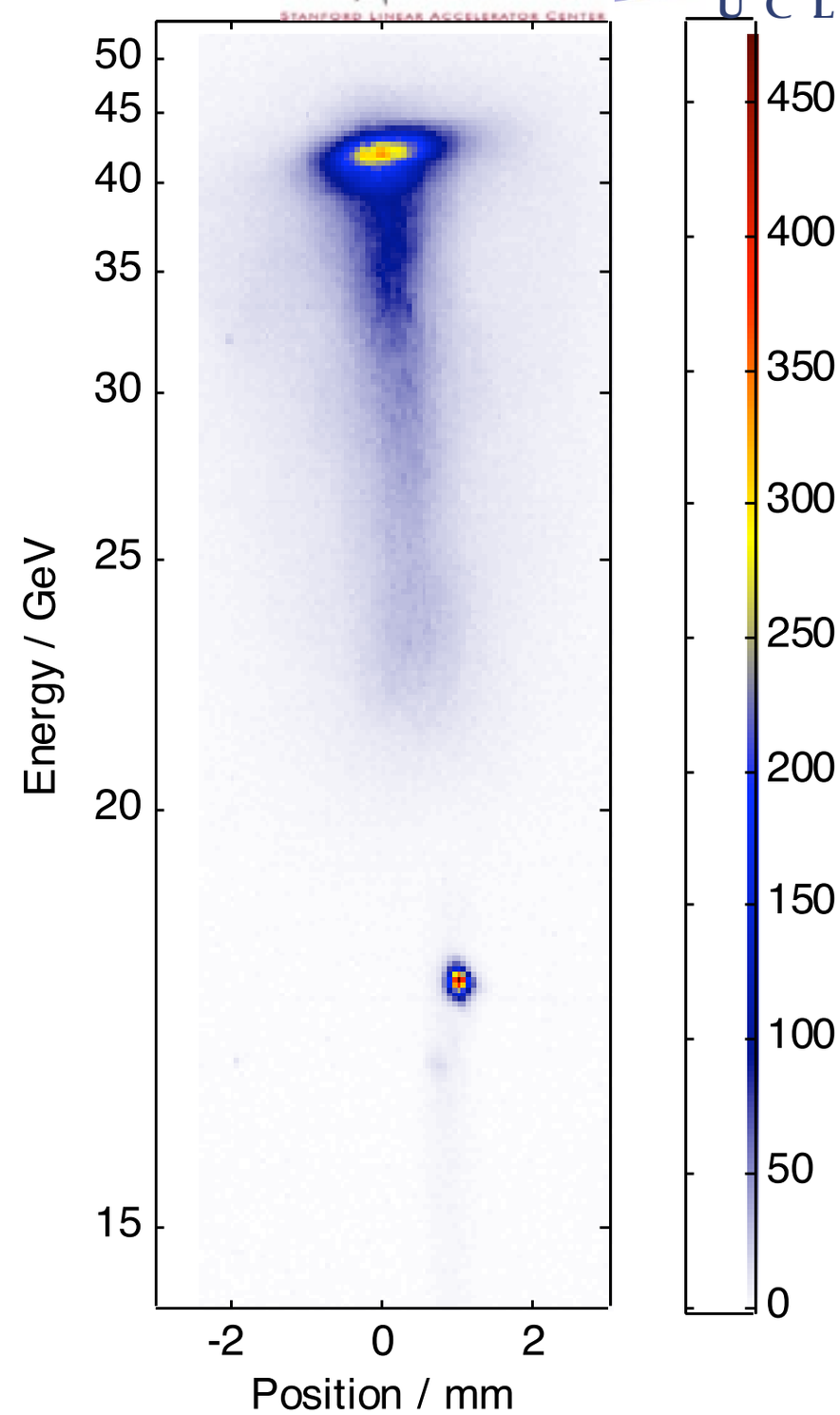
I. Blumenfeld et al., Nature 445, p. 741 (2007)

Einfang von Plasmaelektronen

- Sehr kleiner Austrittswinkel vom Plasma:

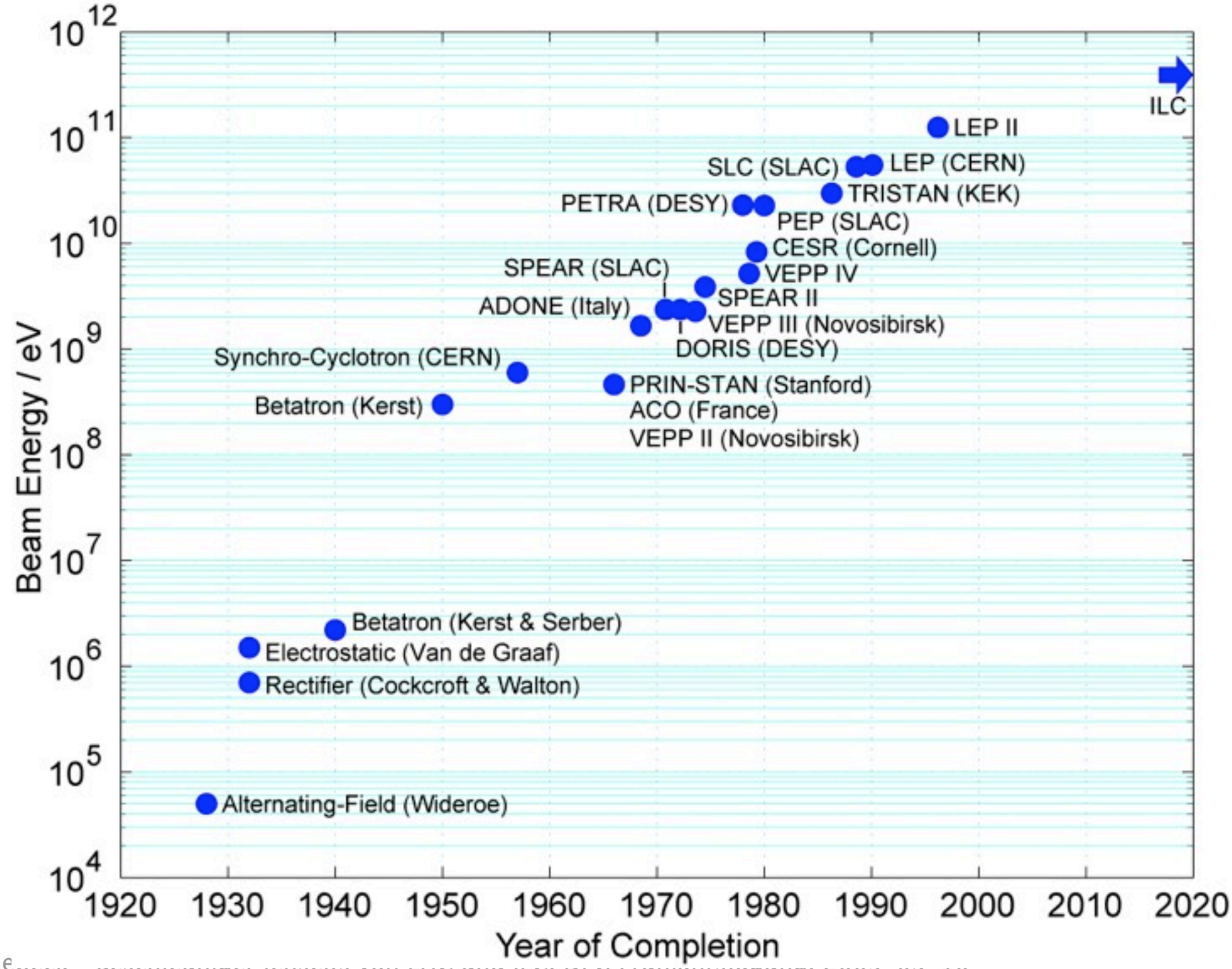
$$\langle \dot{x}^2 \rangle \lesssim 33\,\mu\mathrm{rad}$$



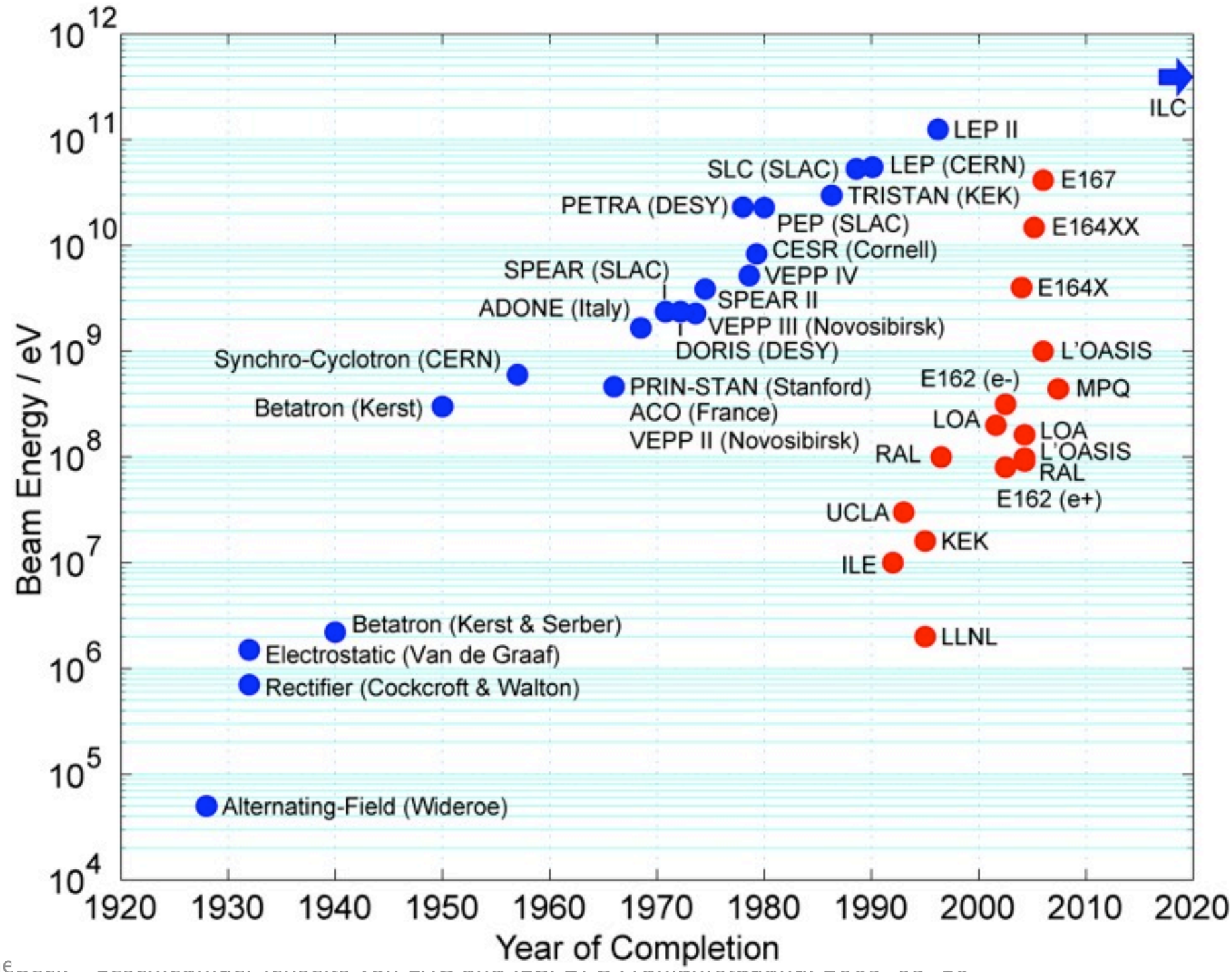


- Auflösung durch Kamera begrenzt

Historische Entwicklung von Elektronen-Beschleunigern (Livingston-Graph)



Ein nicht ganz fairer Vergleich



Zu Beschleunigungsstrukturen gehört mehr als das Beschleunigungsfeld

- Energiequellen
- Synchronisierung und Ausrichtung
- Erhalt der Emittanz

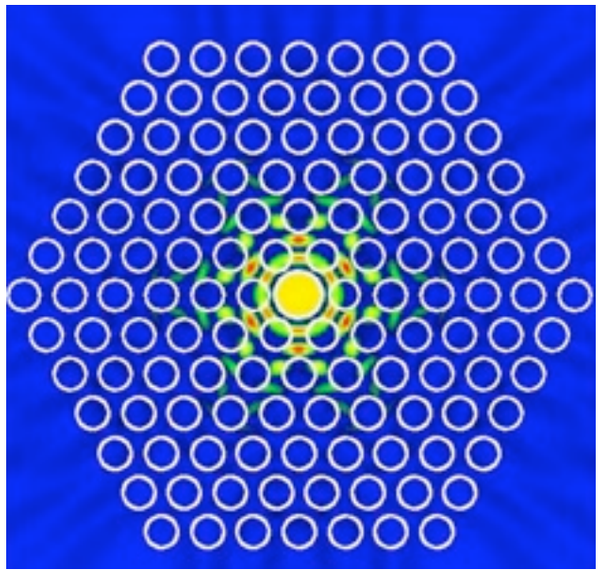
Zu einem Beschleuniger gehört noch viel mehr als die Beschleunigungsstrukturen

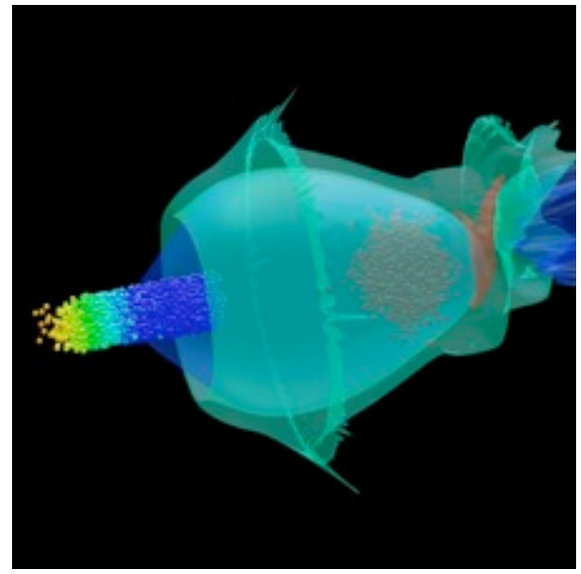
- Teilchenquellen (Injektoren)
- Strahldynamik
- Fokussierung auf den Wechselwirkungspunkt
- Detektoren

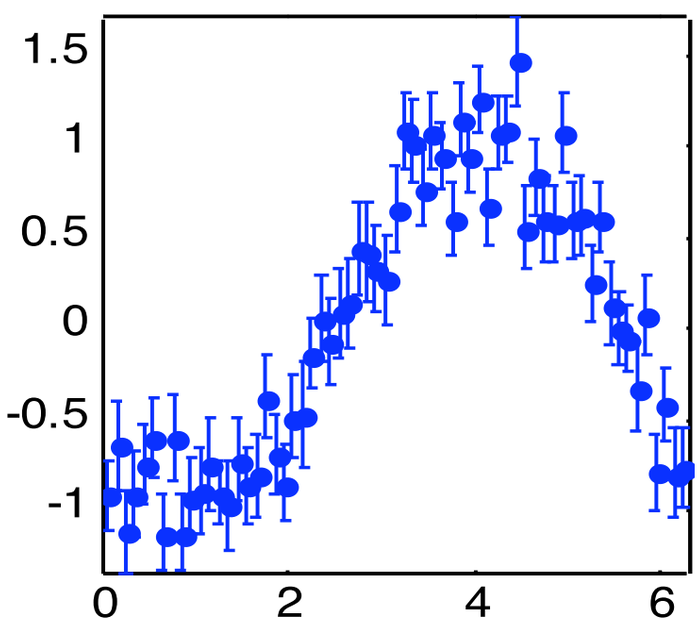
Einmal gezeigt heißt nicht für Anwender verfügbar

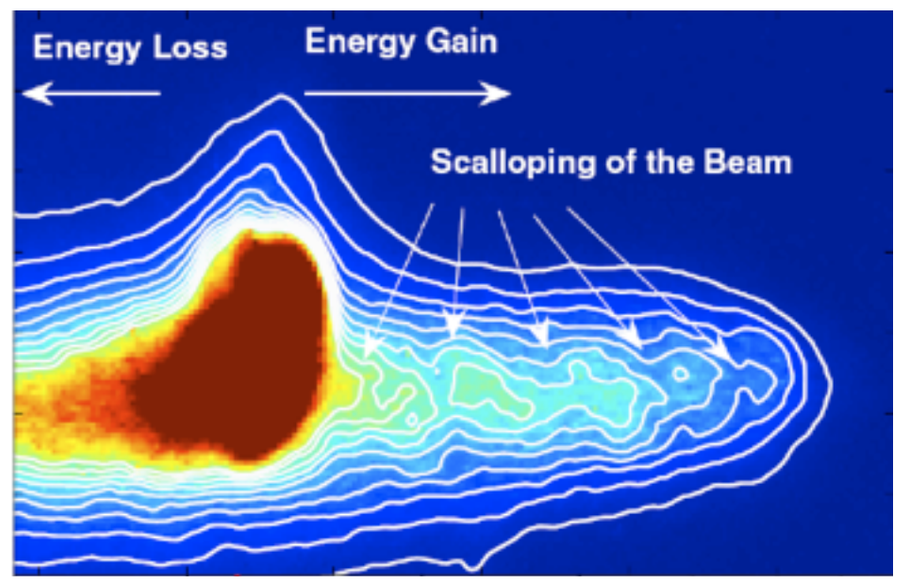
Aber

- Der nächste Elektronen-Collider nach ILC lässt sich nicht mit heutigen Technologien verwirklichen









Vielen Dank!

- The E-167 Collaboration
  - M. Berry, I. Blumenfeld, F.-J. Decker, P. Emma, M.J. Hogan*, R. Ischebeck, R.H. Iverson, N. Kirby, P. Krejcik, R.H. Siemann, and D. Walz (SLAC)
  - C.E. Clayton, C. Huang, D. Johnson, C. Joshi*, W. Lu, K.A. Marsh, W.B. Mori, and M. Zhou (UCLA)
  - S. Deng, T. Katsouleas, P. Muggli* and E. Oz (USC)

- The E-163 Collaboration
  - R. Siemann, R. Noble, E. Colby, J. Spencer, R. Ischebeck, M. Lincoln, B. Cowan, C. Sears, S. Tantawi, D. Walz, D.T. Palmer, N. Na, C.D. Barnes, M. Javanmarad, X.E. Lin, and Z. Zhang (SLAC)
  - R. Byer, T.I. Smith, Y.C. Huang, T. Plettner, P. Lu, and J.A. Wisdom (Stanford)
  - L. Schächter (Techion Israeli Institute of Technology)
  - J. Rosenzweig (UCLA)

- The GigaWake Dielectric Accelerator Experiment
  - M.C. Thompson, H. Badakov, J. Rosenzweig, and G. Travish (UCLA)
  - M.J. Hogan, R. Ischebeck, N. Kirby, R. Siemann, and D. Walz (SLAC)
  - P. Muggli (USC)
  - A. Scott (UCSB)
  - R. Yoder (Manhattan College)

- Special thanks for results, plots and illustrations
  - H. Weise (DESY), F. Tecker, D. Sutter (DOE), N. Kirby (SLAC), E. Oz (USC)
  - A. York, H. Milchberg (UMD)
  - S. Johnson (MTI)
  - S. Karsch (MPQ)

- Work supported by Department of Energy contracts DE-AC02-76SF00515 (SLAC), DE-FG03-92ER40745, DE-FG03-98DP00211, DE-FG03-92ER40727, DE-AC-0376SF0098, DE-AC02-76SF00515 and National Science Foundation grants No. ECS-9632735, DMS-9722121 and PHY-0078715.