

Grundlagenphysik mit Freie-Elektronen-Lasern

A. Ringwald

<http://www.desy.de/~ringwald>



Physikalisches Kolloquium
Jena, 17. Mai 2004

1. Einführung

- In konkreter Planung:

Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich

- **SLAC** (\Rightarrow Linac **C**oherent **L**ight **S**ource)
- **DESY** (\Rightarrow Europäisches Röntgenlaserprojekt **XFEL**)

\Rightarrow Neue Einsichten in **Natur-** und **Lebenswissenschaften**

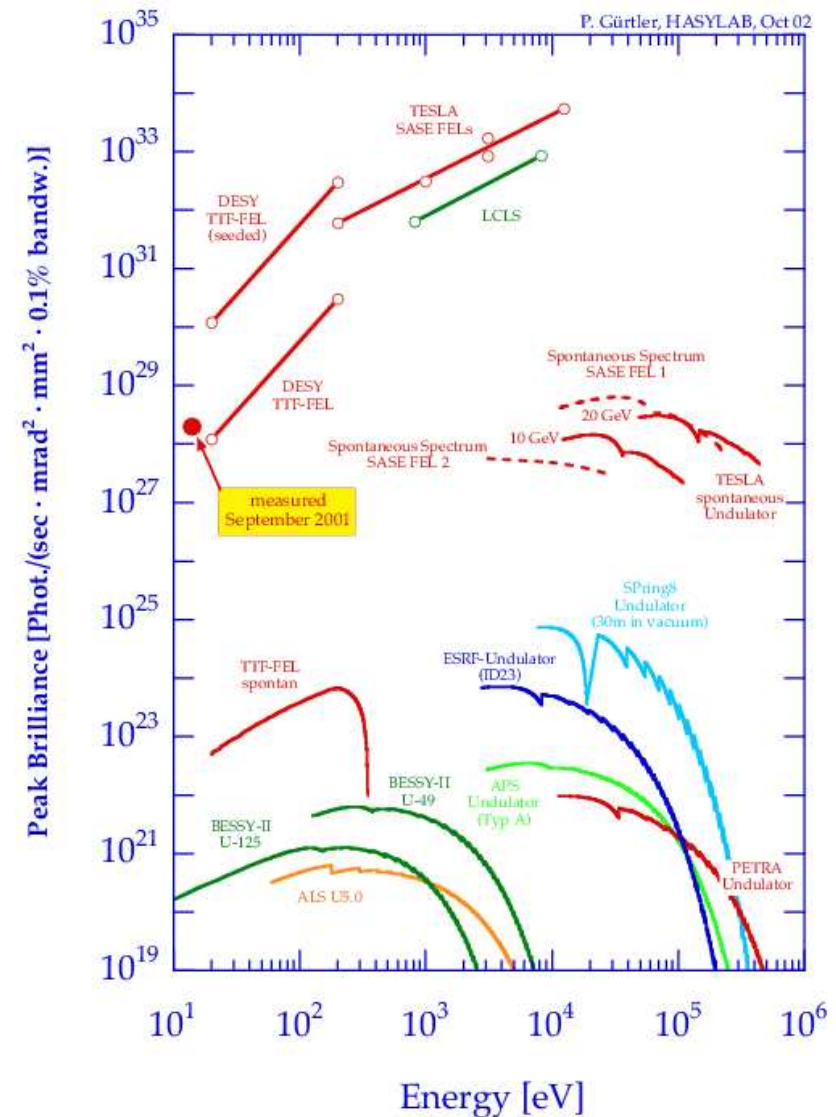
\Leftarrow **Röntgenstrahlen:** Studium von **strukturellen** and **elektronischen** Materieeigenschaften auf **atomarer** Skala

● Spektrale Eigenschaften

- Hohe Leistung
- Kurze Pulslänge
- Enge Bandbreite
- Räumliche Kohärenz
- Stimmbare Wellenlänge

⇒ Anwendungen

- Atom- und Molekülphysik
- Physik der kondensierten Materie
- Materialwissenschaften
- Chemie
- Strukturelle Biologie
- Plasmaphysik
- **Grundlagenphysik?**



Fahrplan:

2. Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich

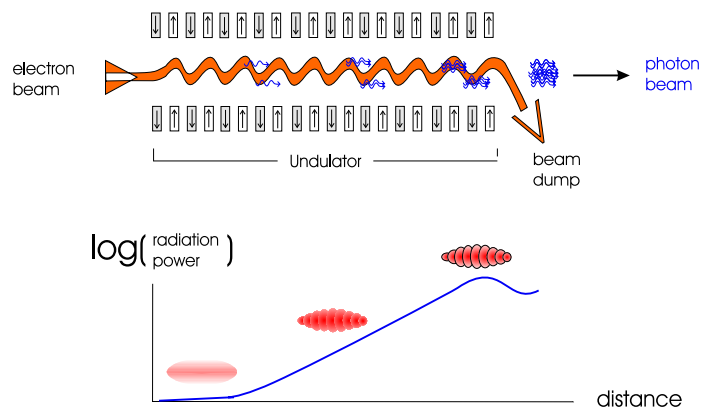
3. Grundlagenphysikalische Anwendungen

- **Kochen des Vakuums**
- **Unruh-Effekt**
- **Axionproduktion**

4. Zusammenfassung

2. Freie-Elektronen-Laser (FEL) im Röntgenbereich

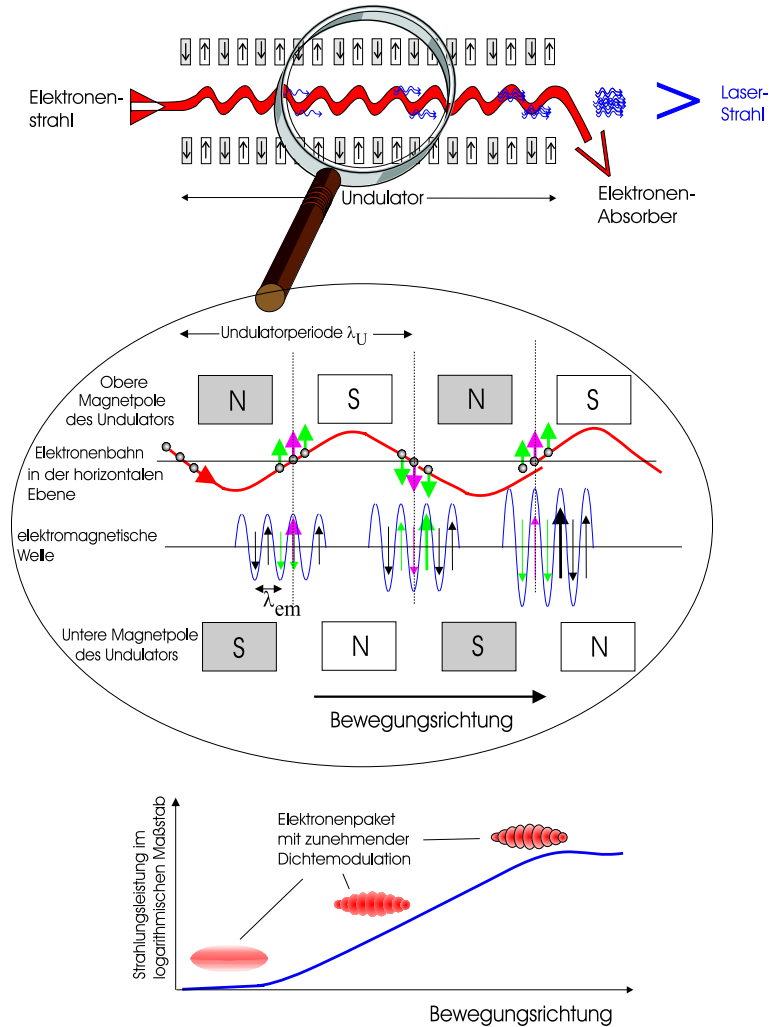
- Konventionelle Laser: Strahlung typischerweise im **optischen** Bereich
 - ⇐ stimulierte Emission von **atomar gebundenen Elektronen**
 - ⇐ Gebrauch von Spiegeln
- Verstärkungsmedium von **FELs** sind **freie (ungebundene) Elektronenbündel**, beschleunigt zu relativistischen Geschwindigkeiten, mit einer charakteristischen **longitudinalen Ladungsdichtemodulation** [Madey '71]



FEL im **Self Amplified Spontaneous Emission (SASE)** Modus

[Kodratenko, Saldin (1980); Bonifacio, Pellegrini (1984)]

– Grundlagenphysik mit Freie-Elektronen-Lasern –



[J. Roßbach/DESY]

A. Ringwald/DESY

Öffnungswinkel

5

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{m_e c^2}{E_e} = 2 \cdot 10^{-5} \left(\frac{25 \text{ GeV}}{E_e} \right)$$

Resonanzbedingung

$$\lambda_{em} = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K_U^2}{2} \right)$$

Undulatorparameter

$$K_U = \frac{e\lambda_U B_U}{2\pi m_e c} \sim 1$$

Strahlungsleistung

$$P \propto e^2 N_e^2 B_U^2 \gamma^2$$

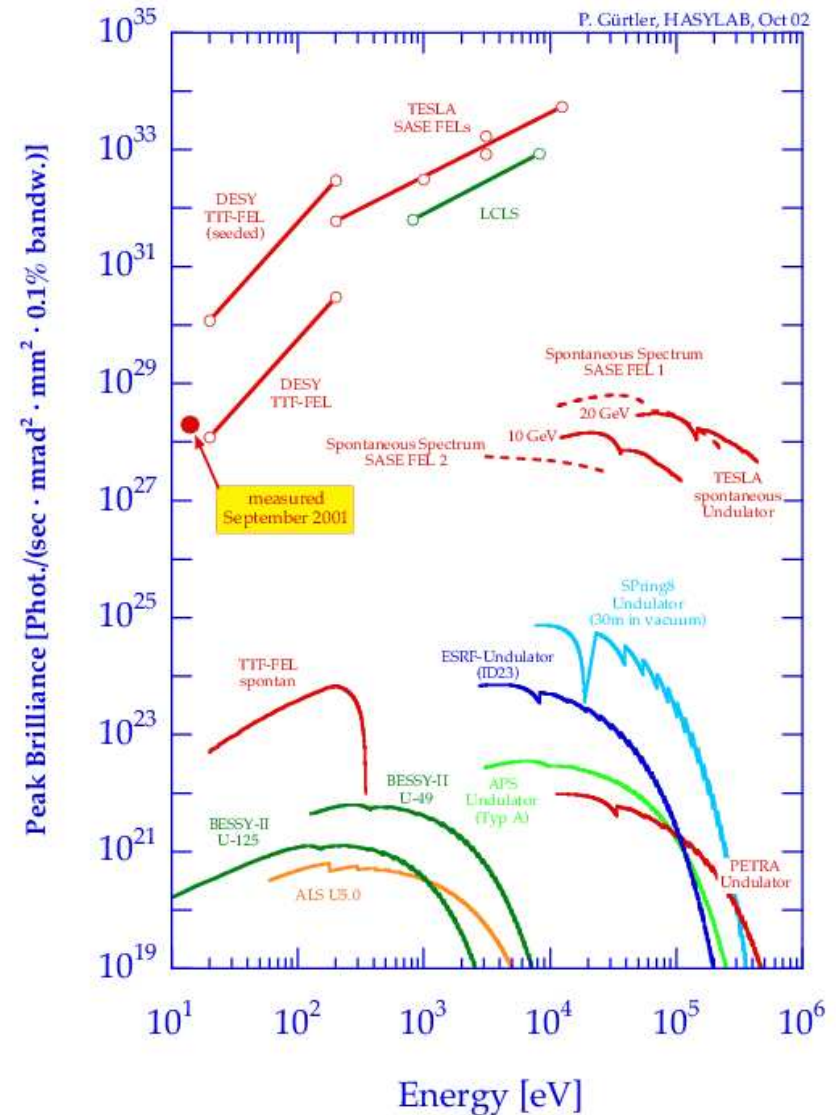
Verstärkung durch Kohärenz

$$N_e = 10^{9 \div 10}$$

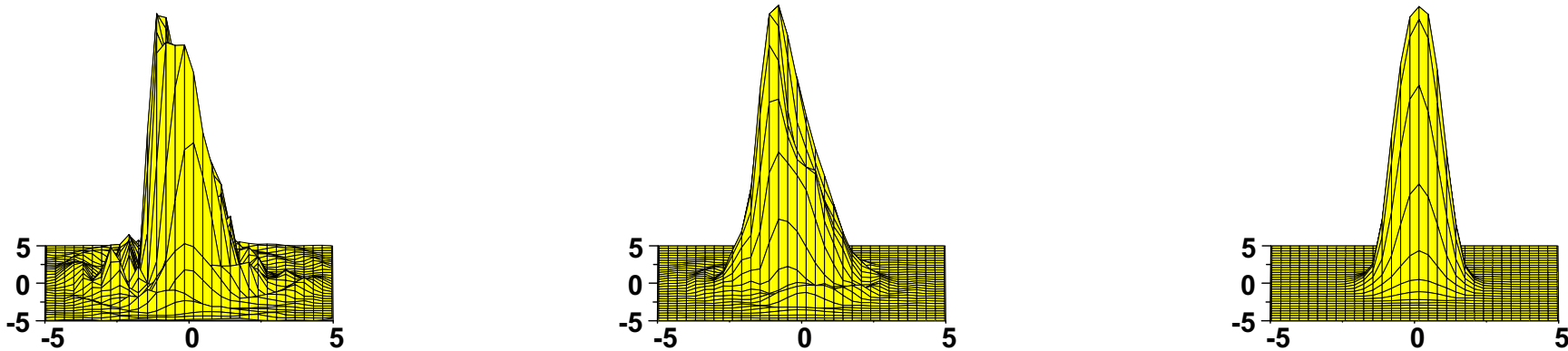
Physikalisches Kolloquium, Jena/D, Mai 2004

⇒ **Spektrale Eigenschaften**

- Hohe Leistung
- Kurze Pulslänge
- Enge Bandbreite
- Räumliche Kohärenz
- Stimmbare Wellenlänge



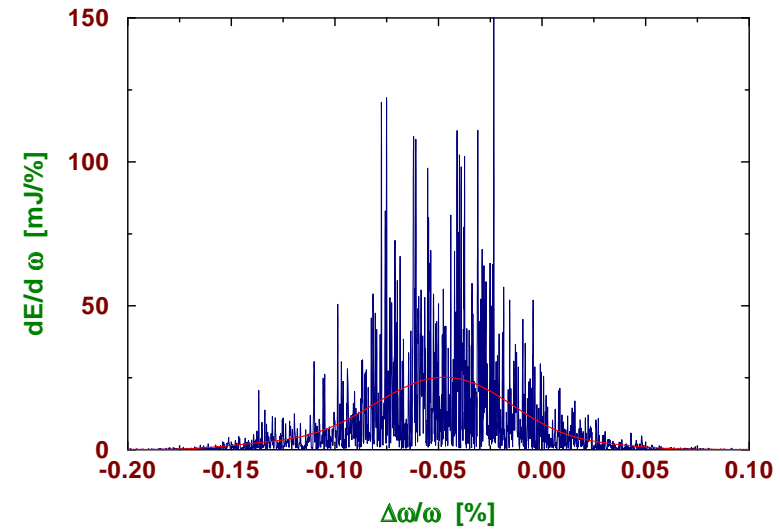
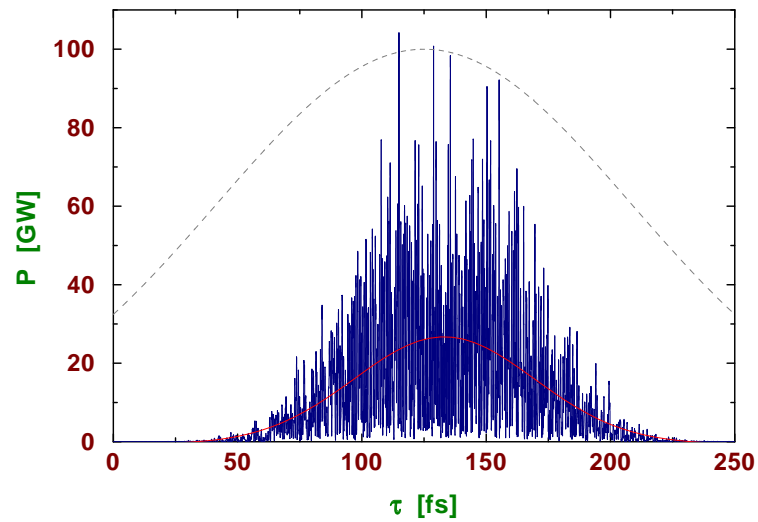
- **Transversale Verteilung der Strahlungsintensität** am Eingang (links), in der Mitte (Mitte), and am Ausgang (rechts) des Undulators



- **Räumliche Verteilung der Strahlungsintensität** in der Mitte (links) und am Ausgang (rechts) des Undulators



- **Zeitliche (links) and spektrale (rechts) Struktur eines Strahlungspulses eines SASE X-FELs** bei einer Wellenlänge von 0.1 nm



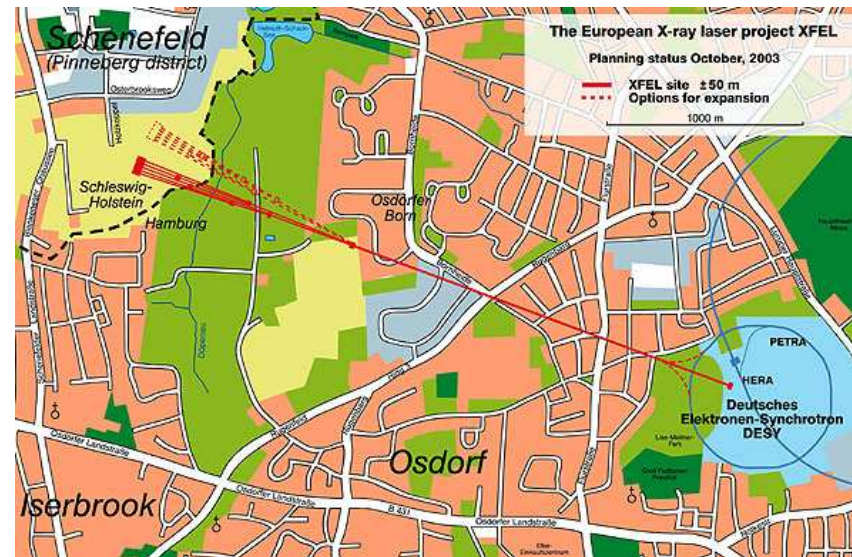
- Existierende und **geplante SASE FELs**

Wo?	λ_{em}	Jahr
Livermore	$\sim 1 \text{ mm}$	1986
LURE/Orsay	$5 \div 10 \text{ } \mu\text{m}$	1997
UCLA/LANL	$12 \text{ } \mu\text{m}$	1998
LEUTL/Argonne	530 nm	1999
	385 nm	2000
TTF1 VUV-FEL /DESY	$80 \div 180 \text{ nm}$	2000
TTF2 VUV-FEL /DESY	$6 \div 40 \text{ nm}$	2004
LCLS /SLAC	0.15 nm	2005 – 2008 Konstr.
XFEL /DESY	$0.085 \div 5.8 \text{ nm}$	2005 – 2011 Konstr.

TTF: TESLA Test Facility

LCLS: Linac Coherent Light Source

- **Das Europäische Röntgenlaserprojekt XFEL**



	Einh.	SASE 1	SASE 2	SASE 3	SASE 4	SASE 5
Wellenlänge	nm	0.1 ÷ 0.5	0.085 ÷ 0.133	0.1 ÷ 0.24	0.1 ÷ 1.0	0.4 ÷ 5.8
Bandbreite (FWHM)	%	0.08	0.07	0.08	0.08	0.29 ÷ 0.7
max. Leistung	GW	37	19	22	30	110 ÷ 200
durchschn. Leistung	W	210	110	125	170	610 ÷ 1100
Photonstrahlgr. (rms)	μm	43	47	53	47	25 ÷ 38
max. Leistungsdichte	W/m ²	$6 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}$	$6 \cdot 10^{19}$

3. Grundlagenphysikalische Anwendungen

- Grundlagenphysik mit **X-FELs**:
 - Paarerzeugung in starkem elektrischen Feld – **“Vakuumkochen”**
 - Unruh-Effekt – **“(Ereignis-)Horizontphysik”**
 - **Axionproduktion**

⇒ Starke elektrische Felder \mathcal{E} \leftrightarrow große Strahlungsdichten $P/(\pi\sigma^2)$

⇐ **Fokussierung** bis hinunter zur **Beugungsgrenze**, $\sigma \gtrsim \lambda_{em} \sim 0.1 \text{ nm}$

⇒ Sehr **starke elektrische Felder** und **Beschleunigungen** möglich,

$$\mathcal{E} = \sqrt{\mu_0 c \frac{P}{\pi\sigma^2}} = 1.1 \cdot 10^{17} \frac{\text{V}}{\text{m}} \left(\frac{P}{1 \text{ TW}} \right)^{1/2} \left(\frac{0.1 \text{ nm}}{\sigma} \right)$$

$$a = \frac{e\mathcal{E}}{m_e} = 1.9 \cdot 10^{28} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \left(\frac{P}{1 \text{ TW}} \right)^{1/2} \left(\frac{0.1 \text{ nm}}{\sigma} \right)$$

viel größer als mit optischen Lasern derselben Spitzenleistung P

Kochen des Vakuums

- **Spontane Teilchenerzeugung aus dem Vakuum**, induziert von einem **äußeren Feld**, zuerst diskutiert im Kontext der e^+e^- **Paarerzeugung in einem statischen, räumlich uniformen elektrischen Feld**

[Sauter (1931); Heisenberg,Euler (1936); Schwinger (1951); . . .]

Faszinierendes, nichtlineares Phänomen in der Quantenfeldtheorie

- Theorie: jenseits der gewöhnlichen Störungstheorie
- Experiment: testet die Theorie in der Domäne sehr starker Felder

- Mechanismus hat viele Anwendungen in moderner Physik:

- Evaporation von schwarzen Löchern [Hawking (1975); Damour,Ruffini (1976); . . .]
- Teilchenproduktion im frühen Universum [Parker (1969); . . .]
- Teilchenproduktion in hadronischen Teilchenkollisionen

[Casher, Neuberger, Nussinov (1979); . . .]

- In statischem, räumlich uniformen elektrischen Hintergrundfeld ist das Vakuum in der **Q**uanten**E**lektro**D**ynamik (**QED**) instabil:

⇒ “Funktensprühen”: spontane Erzeugung von e^+e^- Paaren
– Für beobachtbare Rate, benötige enorme Feldstärke,

$$\mathcal{E}_c \equiv \frac{m_e c^2}{e \lambda_e} = \frac{m_e^2 c^3}{e \hbar} = 1.3 \cdot 10^{18} \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

[Sauter (1931); Heisenberg, Euler (1936)]

so daß

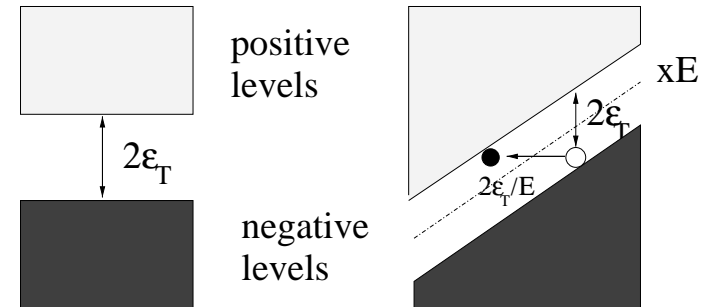
Arbeit des Feldes
an **Einheitsladung** e \approx **Ruheenergie**
über **Comptonwellenlänge** λ_e **von e^+e^- Paar**

$$e \lambda_e \mathcal{E}_c = m_e c^2$$

- Für $\mathcal{E} \ll \mathcal{E}_c$:

[Schwinger (1951)]

- Paarerzeugung: **Quantentunneln**
- Rate **exponentiell unterdrückt**:



$$w = \frac{d^4 n_{e^+e^-}}{d^3x dt} \propto \exp \left[-\pi \frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}} \right] = \exp \left[-\pi \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e \mathcal{E}} \right]$$

- Keine makroskopischen statischen Felder von der Größenordnung \mathcal{E}_c
- In frühen 1970ern:
 - Kritische Felder in **Kernstößen mit $Z_1 + Z_2 \approx 1/\alpha$**

[Zel'dovich, Popov (1971); Müller, Rafelski, Greiner (1972)]

- Kritische Felder **am Fokus¹ oder in der Überschneidung von gekreuzten¹ intensiven optischen Lasern?**

[Bunkin, Tugov (1969); Brezin, Itzykson (1970); Popov (1971);...; Fried *et al.* (2001)]

¹Keine Paarerzeugung in ebener Welle!

- **Am Fokus eines ~ 5 Terawatt X-FEL** könnten 10% der kritischen Feldstärke erreicht werden: [Chen, Pellegrini (1998); Melissinos (1998); AR (2001)]

Laserparameter					
		Optisch	X-FEL		
		Fokus: Beugungsgrenze	Design SASE 5	Fokus: Heute machbar	Fokus: Ziel
Wellenlänge	λ	1 μm	0.4 nm	0.4 nm	0.15 nm
Photonenergie	$\hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$	1.2 eV	3.1 keV	3.1 keV	8.3 keV
max. Leistung	P	1 PW	110 GW	1.1 GW	5 TW
Spotradius (rms)	σ	1 μm	26 μm	21 nm	0.15 nm
kohärente Spikelänge (rms)	Δt	500 fs \div 20 ps	0.04 fs	0.04 fs	0.08 ps
Abgeleitete Größen					
max. Leistungsdichte	$S = \frac{P}{\pi\sigma^2}$	$3 \cdot 10^{26} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$5 \cdot 10^{19} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$8 \cdot 10^{23} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$7 \cdot 10^{31} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
max. electric field	$\mathcal{E} = \sqrt{\mu_0 c S}$	$4 \cdot 10^{14} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$1 \cdot 10^{11} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$2 \cdot 10^{13} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$2 \cdot 10^{17} \frac{\text{V}}{\text{m}}$
max. elektrisches Feld/kritisches Feld	$\mathcal{E}/\mathcal{E}_c$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$	0.1
Photonenergie/ e -Ruheenergie	$\frac{\hbar\omega}{m_e c^2}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0.006	0.006	0.02
Adiabatizitätsparameter	$\eta = \frac{\hbar\omega}{e \mathcal{E} \lambda_e}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^2$	0.1

- Oder, **~ 50 Exawatt ($= 5 \times 10^7$ TW) optischer Laser**

- Etwas Theorie zur Abschätzung der **kritischen Laserparameter** für einen beobachtbaren Effekt [AR (2001)]

⇒ Vereinfachte Näherung für das elektromagnetische Feld der Laserstrahlung:

- Paarerzeugung in der Überschneidung von zwei gekreuzten Laserstrahlen. Nehme an, daß dort das elektromagnetische Feld demjenigen in einer Antinode einer **stehenden Welle** ähnelt:

$$\mathbf{E}(t) = (0, 0, \mathcal{E} \cos(\omega t)), \quad \mathbf{B}(t) = (0, 0, 0), \quad \lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$$

- Nehme an, daß für realistische Laser

$$\mathcal{E} \ll \mathcal{E}_c = \frac{m_e^2 c^3}{e \hbar}, \quad \hbar \omega \ll m_e c^2$$

⇒ Rate der spontanen e^+e^- Erzeugung in **semiklassischer** Weise ($\hbar \ll 1$) berechenbar,

– mit verallgemeinerten WKB Methoden

[Brezin, Itzykson (1970)]

– mit imaginären-Zeit (Instanton) Methoden

[Popov (1971)];...

- Das Verhältnis

$$\eta \equiv \frac{\hbar \omega}{e \mathcal{E} \lambda_e} = \frac{\hbar \omega}{m_e c^2} \frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}} = \frac{m_e c \omega}{e \mathcal{E}} \equiv \frac{\mathcal{E}_\omega}{\mathcal{E}}.$$

ist unabhängig von \hbar and spielt Rolle eines **Adiabatizitätsparameters**

- Laserfrequenz ω tritt in semiklassischer Formel nur in Form des Adiabazitätsparameters $\eta \equiv \hbar\omega / (e\mathcal{E}\lambda_e)$ auf. Grenzfälle:

$$w \equiv \frac{d^4 n_{e^+e^-}}{d^3x dt} \simeq \frac{c}{4\pi^3\lambda_e^4} \times \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_c}\right)^{\frac{5}{2}} \exp\left[-\pi \frac{\mathcal{E}_c}{\mathcal{E}} \left(1 - \frac{1}{8}\eta^2 + \mathcal{O}(\eta^4)\right)\right], & : \eta \ll 1, \\ \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\hbar\omega}{m_e c^2}\right)^{\frac{5}{2}} \sum_{n > 2\frac{m_e c^2}{\hbar\omega}} \left(\frac{e}{4\eta}\right)^{2n} e^{-2\left(n - 2\frac{m_e c^2}{\hbar\omega}\right)} \operatorname{Erfi}\left(\sqrt{2\left(n - 2\frac{m_e c^2}{\hbar\omega}\right)}\right) & : \eta \gg 1, \end{cases}$$

$\eta \ll 1$: Adiabatischer Hochfeld-, Kleinfrequenz-Limit stimmt mit **nichtstörungstheoretischem Ergebnis von Schwinger** für ein statisches, räumlich uniformes Feld überein

$\eta \gg 1$: Nicht-adiabatischer Kleinfeld-, Hochfrequenz-Limit ähnelt **störungstheoretischem Resultat**: entspricht $\geq n$ -ter Ordnung Störungstheorie, wobei n die minimale Anzahl von Laserphotonen ist, die benötigt werden um ein e^+e^- Paar zu erzeugen: $n \gtrsim 2m_e c^2 / (\hbar\omega) \gg 1$

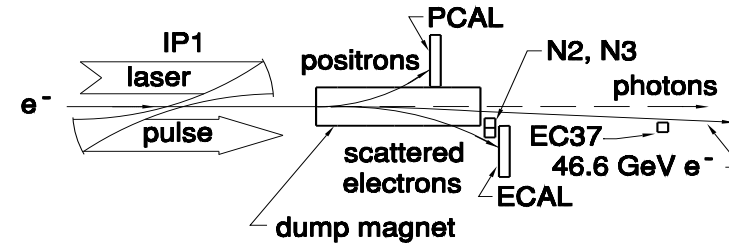
- Nichtstörungstheoretische Vakuum-Paarzeugung schon bei SLAC Experiment E-144 beobachtet?

[Burke *et al.* (1997); Melissinos (1998)]

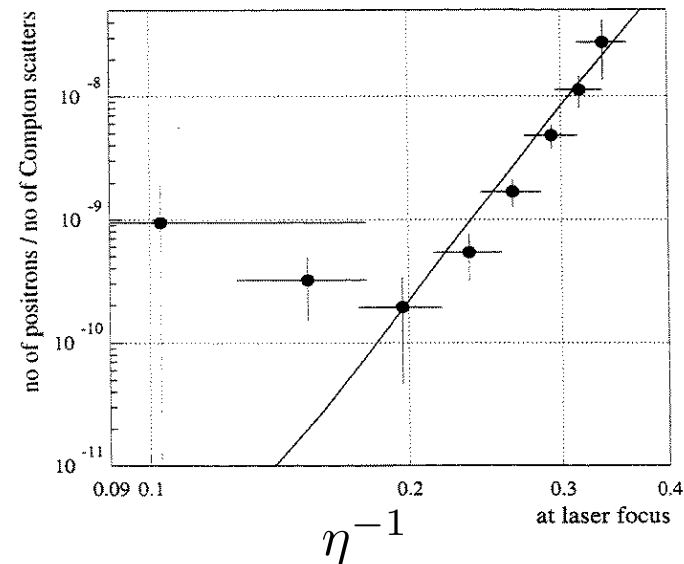
$\Leftarrow e^+e^-$ Paarerzeugung in Kollisionen von 46.6 GeV/c Elektronen mit TW optischen Laserpulsen \Rightarrow im Ruhesystem der einlaufenden Elektronen

$$\mathcal{E} \sim 5 \times 10^{17} \text{ V/m}, \quad \eta \sim 3$$

\Rightarrow **Störungstheoretisches Multi-Photon-Regime**, aber nahe Schwinger-Regime



[Burke *et al.* (1997)]



- **Minimal-notwendige Leistung** für beobachtbaren Effekt: [AR (2001)]

	λ	σ	Δt	P_{\min}	S_{\min}	\mathcal{E}_{\min}
Fokussierter X-FEL: (\approx "Ziel")	0.1 nm	0.1 nm	0.1 ps	2.5 TW	$7.8 \cdot 10^{31} \text{ W/m}^2$	$1.7 \cdot 10^{17} \text{ V/m}$
	0.1 nm	0.1 nm	0.1 fs	4.5 TW	$1.4 \cdot 10^{32} \text{ W/m}^2$	$2.3 \cdot 10^{17} \text{ V/m}$
Fokussierter X-FEL: (\approx "Heute machbar")	0.1 nm	20 nm	0.1 ps	38 PW	$3.0 \cdot 10^{31} \text{ W/m}^2$	$1.1 \cdot 10^{17} \text{ V/m}$
	0.1 nm	20 nm	0.1 fs	55 PW	$4.3 \cdot 10^{31} \text{ W/m}^2$	$1.3 \cdot 10^{17} \text{ V/m}$
Fokussierter optischer Laser: Beugungsgrenze	1 μm	1 μm	10 ps	49 EW	$1.6 \cdot 10^{31} \text{ W/m}^2$	$7.7 \cdot 10^{16} \text{ V/m}$
	1 μm	1 μm	100 fs	58 EW	$1.8 \cdot 10^{31} \text{ W/m}^2$	$8.3 \cdot 10^{16} \text{ V/m}$

s.a.: [Alkofer,Hecht,Roberts,Schmidt,Vinnik (2001); Roberts,Schmidt,Vinnik (2002); Bulanov,Narozhny,Mur,Popov (2004)]

- Brauche \sim **50 EW optischen Laser** oder **5 TW - 50 PW X-FEL**
- \Leftarrow Mit heute verfügbaren Techniken erreichbare Leistungsdichten noch zu klein für beobachtbaren Effekt (cf. extra Tabelle)
- Denkbare **Verbesserungen** in **X-FEL** Technologie:
 - Röntgenoptik, um näher an Beugungsgrenze, $\sigma \gtrsim \lambda$, zu kommen
 - Energieextraktion, um Leistung zu vergrößern
- \Rightarrow Schwinger-Effekt zum ersten Mal in Reichweite (\gtrsim 2020)! Spannendes Rennen zwischen X-FEL und optischen Lasern!

Laserparameter					
		Optisch	X-FEL		
		Fokus: Beugungsgrenze	Design SASE 5	Fokus: Heute machbar	Fokus: Ziel
Wellenlänge	λ	1 μm	0.4 nm	0.4 nm	0.15 nm
Photonenergie	$\hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$	1.2 eV	3.1 keV	3.1 keV	8.3 keV
max. Leistung	P	1 PW	110 GW	1.1 GW	5 TW
Spotradius (rms)	σ	1 μm	26 μm	21 nm	0.15 nm
kohärente Spikelänge (rms)	Δt	500 fs \div 20 ps	0.04 fs	0.04 fs	0.08 ps
Abgeleitete Größen					
max. Leistungsdichte	$S = \frac{P}{\pi\sigma^2}$	$3 \cdot 10^{26} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$5 \cdot 10^{19} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$8 \cdot 10^{23} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$7 \cdot 10^{31} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
max. electric field	$\mathcal{E} = \sqrt{\mu_0 c S}$	$4 \cdot 10^{14} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$1 \cdot 10^{11} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$2 \cdot 10^{13} \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$2 \cdot 10^{17} \frac{\text{V}}{\text{m}}$
max. elektrisches Feld/kritisches Feld	$\mathcal{E}/\mathcal{E}_c$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$	0.1
Photonenergie/ e -Ruheenergie	$\frac{\hbar\omega}{m_e c^2}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0.006	0.006	0.02
Adiabatizitätsparameter	$\eta = \frac{\hbar\omega}{e\mathcal{E}\lambda_e}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^2$	0.1

Unruh-Effekt

- Was ist der Unruh-Effekt?
 - Ein **beschleunigter** Beobachter sieht die Vakuumschwankungen als ein **Wärmebad** [Unruh (1976)]

$$T_{\text{Unruh}} = \frac{\hbar a}{2 \pi c k} = 4 \cdot 10^{-21} \text{ K} \left(\frac{a}{1 \text{ m/s}^2} \right)$$

- Ähnliche Situation für einen Beobachter in der Nähe eines **schwarzen Lochs** [Hawking (1975)]

$$T_{\text{Hawking}} = \frac{\hbar \kappa}{2 \pi k} = 6 \cdot 10^{-8} \text{ K} \left(\frac{1 M_{\odot}}{M_{\text{SL}}} \right)$$

⇒ Studium der Physik schwarzer Löcher im Labor

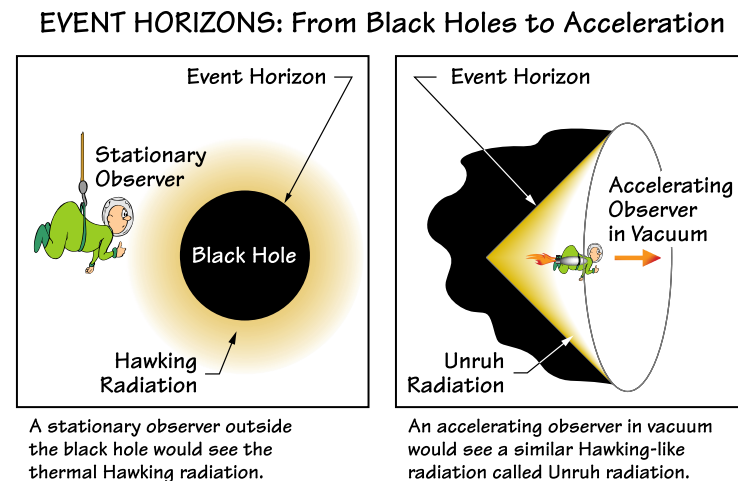


Fig. 1

[P. Chen/SLAC]

- **Experimentelle Nachweismöglichkeiten:**

[Rosu (1996)]

- Hydrodynamisches Analogon zur Schwarzschild-Metrik

[Unruh (1981)]

- Depolarisation von Elektronen in Speicherringen

[Bell, Leinaas (1983÷87)]

$T \approx 1200$ K am LEP/CERN; aber: zirkulärer vs. linearem Unruh-Effekt? Thermische Interpretation?

- Kristall-“Channeling”

[Darbinian *et al.* (1989)]

$a \approx 10^{31}$ m/s² für ultra-relativistische Teilchen, $\gamma \sim 10^8$; Bremsstrahlungsuntergrund problematisch

- Zentripetale Beschleunigung

[Darbinian *et al.* (1990)]

brauche $B \sim 5 \cdot 10^7$ G, $\gamma \sim 10^9$, um Synchrotronstrahlungsuntergrund zu überbieten

- **Lineare Beschleunigung am Fokus eines ultra-intensiven Lasers**

[Chen, Tajima (1999)]

- Beschleunige Elektron in stehender Laserwelle, $a \approx 10^{26} \text{ m/s}^2$

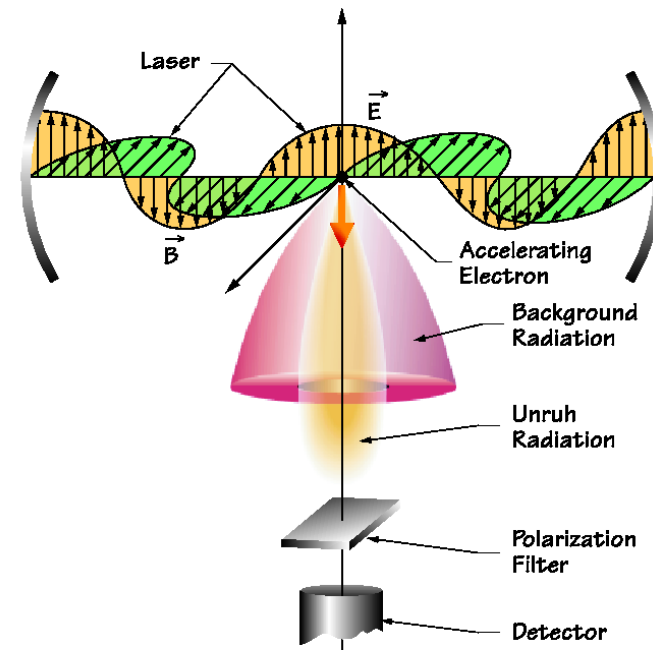
⇒ Modifizierte Nullpunktfuktuationen

$$\langle E_i(-\tau/2)E_j(+\tau/2) \rangle = \frac{4\hbar}{\pi c^3} \delta_{ij} \frac{(a/c)^4}{\sinh^4(a\tau/2c)}$$

⇒ Zusätzliche Zitterbewegung des Elektrons

⇒ Modifikation in emittierter Strahlung, zusätzlich zur klassischen Larmorstrahlung

- * gekipptes thermisches Spektrum
- * charakteristische Winkelabhängigkeit



Schematic Diagram for Detecting Unruh Radiation

[P. Chen/SLAC]

Axionproduktion

- Was ist ein **Axion**?

[Peccei, Quinn (1977); S. Weinberg (1978); Wilczek (1978)]

- Hypothetisches, sehr leichtes, schwach gekoppeltes (pseudo-)skalares Teilchen, A^0 : “Pseudo-Nambu-Goldstone-Boson”
- Natürliche Lösung des **starken CP Problems**:
Wieso ist der effektive θ -Parameter in der **QCD** Lagrange-Funktion

$$\mathcal{L}_\theta = \theta_{\text{eff}} \frac{\alpha_s}{8\pi} F^{\mu\nu a} \tilde{F}_{\mu\nu a}$$

so klein, $\theta_{\text{eff}} \lesssim 10^{-9}$ (\Leftarrow elektrisches Dipolmoment des Neutrons)?

- **Peccei-Quinn-Skala** f_A bestimmt die Masse,

$$m_A = 0.62 \cdot 10^{-3} \text{ eV} \times \left(\frac{10^{10} \text{ GeV}}{f_A} \right)$$

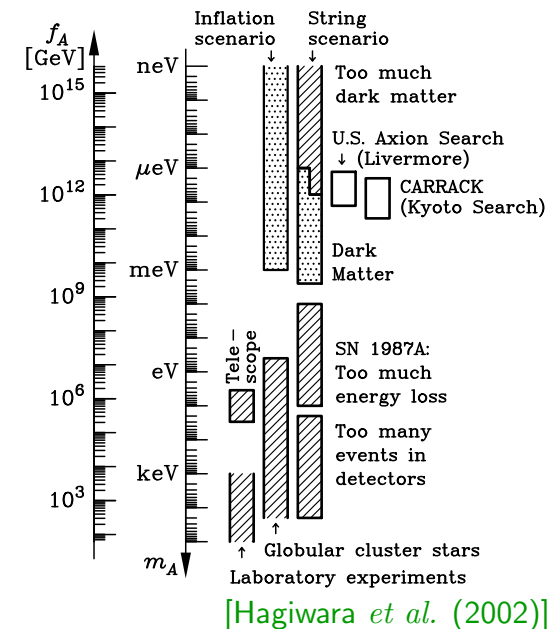
- Wechselwirkungen mit Standardmodellteilchen **modellabhängig**, z. B. Axion-Photon-Kopplung,

$$\mathcal{L}_{\text{WW}} = -g_{A\gamma} A \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}; \quad g_{A\gamma} = \frac{\alpha}{2\pi f_A} \left(\frac{E}{N} - 1.92 \right)$$

• Astrophysikalische Einschränkungen

[Raffelt . . .]

- Axionen werden in heißen Plasmen erzeugt und führen zu Energieverlusten durch Abstrahlung
- Lebenszeiten von Sternen \Rightarrow Einschränkungen an Wechselwirkungsstärken mit Photonen, Elektronen, Nukleonen \Rightarrow Einschränkungen an $g_{A\gamma}$ ($\Rightarrow f_A$ und m_A).



● Experimentelle Grenzen

Stärkste Grenzen:

Produktion im **frühen Universum** oder in **astrophysikalischen Quellen**;

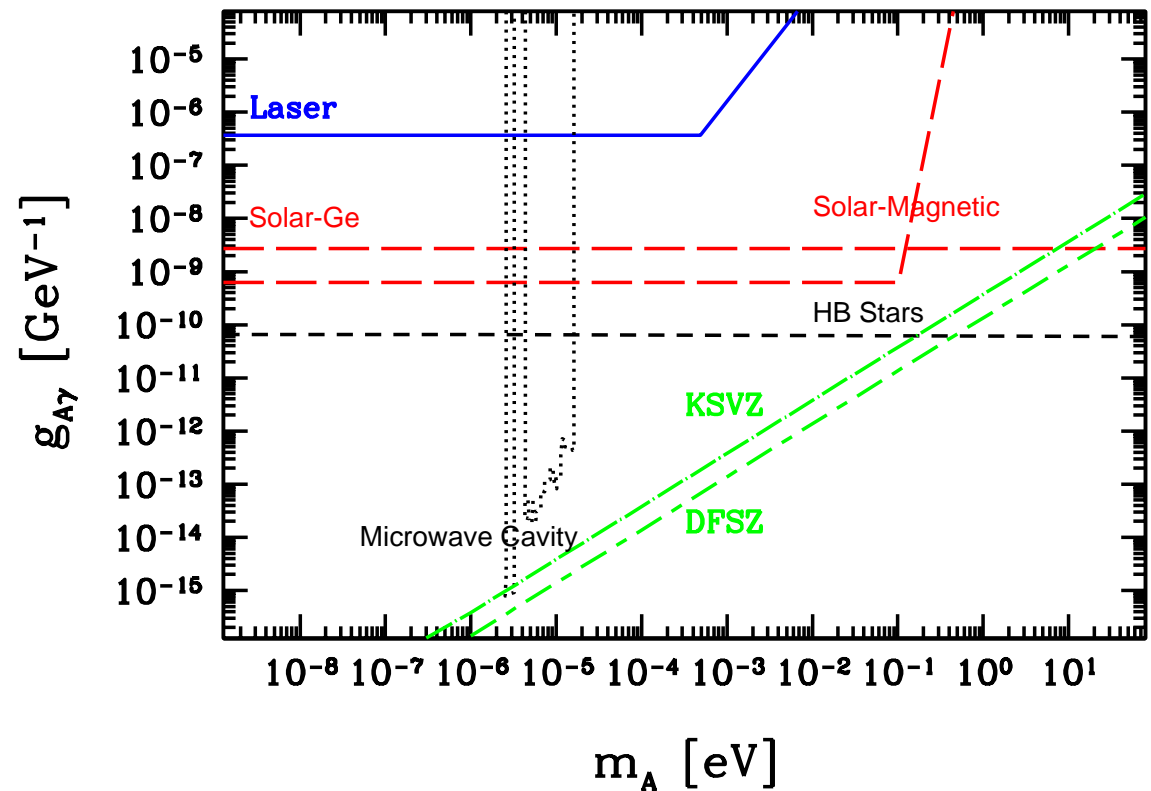
Detektion im Labor:

- Suche nach **dunkler Materie**
 - * Mikrowellen-Hohlraum-Experimente
- Suche nach **solaren Axionen**
 - * **Solar-magnetisch**
(**CAST**: Verbesserung um eine GrO in 2004)
 - * **Solar-Germanium**

Viel schwächer:

Reine Laborexperimente (Detektion **und** Produktion im Labor):

- **Laserexperimente**



[PDG (2002); AR '03]

Photonregeneration

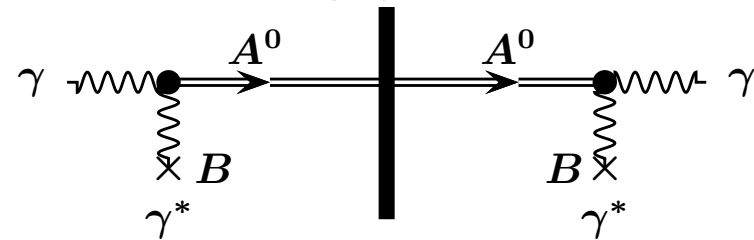
- **Produktion:** Polarisiertes Laserstrahl in **supraleitendem Dipolmagneten**, so daß $\mathbf{E} \parallel \mathbf{B} \Rightarrow$ Konversion $\gamma \rightarrow A$
- Absorbieren Laserstrahl in Wand
- **Detektion:** Nachweis der hinter der Wand in einem zweiten Magnetfeld durch Rückkonversion ($A \rightarrow \gamma$) entstandenen Photonen

$$\text{Rate} \propto \frac{1}{16} \underbrace{(g_{A\gamma} B \ell)^4}_{P_{\gamma \leftrightarrow A}^2} \frac{\langle P \rangle}{\omega} \epsilon$$

Kohärenzbedingung

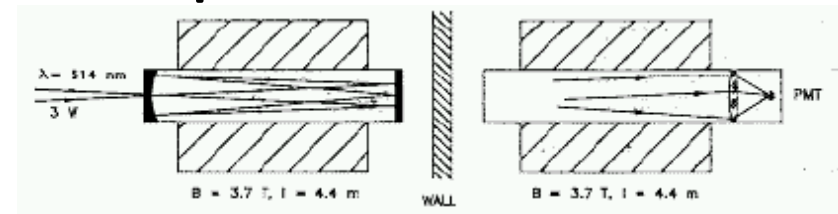
$$m_A \ll 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ eV} \left(\frac{\hbar \omega}{1 \text{ eV}} \frac{1 \text{ m}}{\ell} \right)^{1/2}$$

“Durch die Wand scheinendes Licht” 28



[Ansel'm (1985); Van Bibber *et al.* (1987)]

Pilotexperiment:



[Cameron *et al.* (1993)]

$$B = 3.7 \text{ T}, \ell = 4.4 \text{ m}, \langle P \rangle = 3 \text{ W}, \lambda = 514 \text{ nm}$$

$$\Rightarrow g_{A\gamma} < 6.7 \cdot 10^{-7} \text{ GeV}^{-1} \text{ for } m_A < 10^{-3} \text{ eV}$$

⇒ Sensitivität eines **X-FEL** Photonregenerationsexperiments:

– **SASE-5:**

$$\langle P \rangle = 1.1 \text{ kW} \quad , \quad \lambda = 5.8 \text{ nm}$$

$$B = 10 \text{ T} \quad , \quad \ell = 10 \text{ m}$$

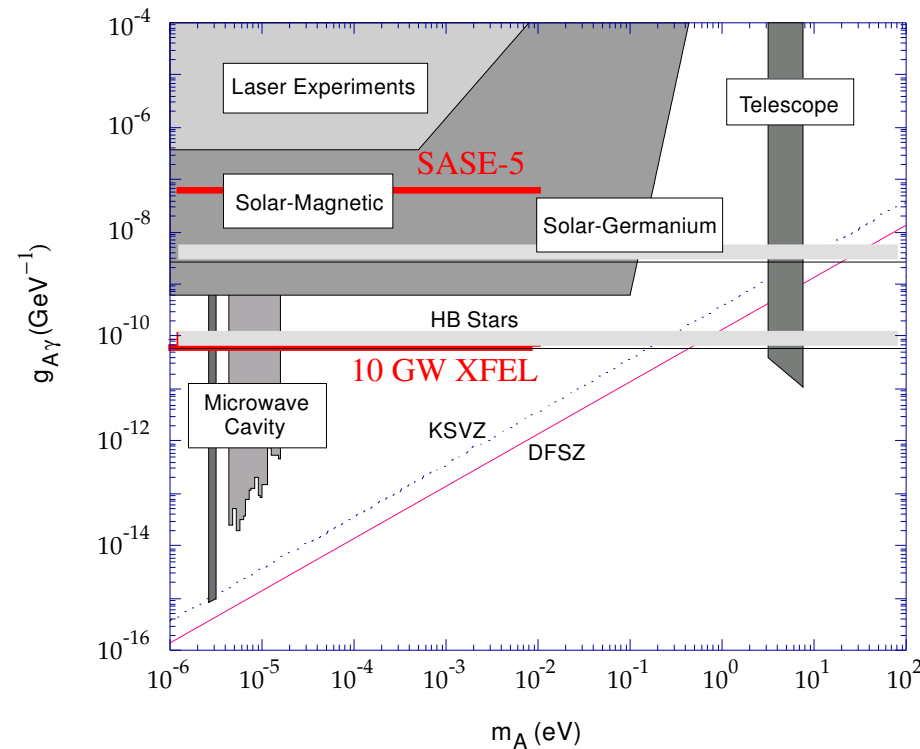
– **10 GW X-FEL:**

$$\langle P \rangle = 10 \text{ GW} \quad , \quad \lambda = 5.8 \text{ nm}$$

$$B = 40 \text{ T} \quad , \quad \ell = 40 \text{ m}$$

- Unrealistisch: nur gültig, wenn Kohärenzlänge $l_c \gg \ell$; realistisch derzeit $l_c \lesssim 30 \mu\text{m} \Rightarrow$ Reduktion der Sensitivität um Faktor $(\ell/l_c)^{1/2} \gtrsim 1000$ [AR (2003)]

⇒ Astrophysikalische Grenzen für **X-FEL** außer Reichweite

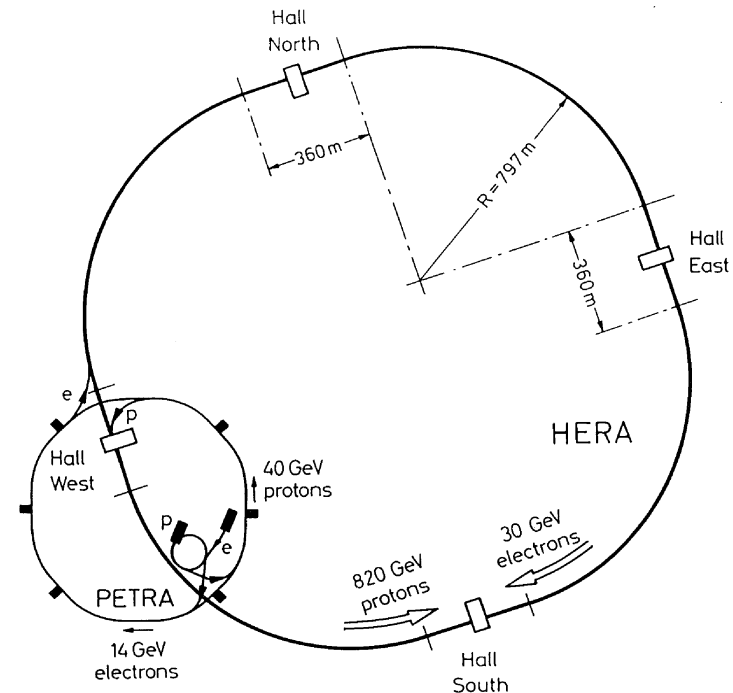


- Einzigartige Gelegenheit für Suchen nach Axionen:

- Ende 2006 wird **HERA** außer Betrieb genommen.

- ⇒ Seine ≈ 400 supraleitenden **Dipolmagnete**, mit jeweils $B = 5 \text{ T}$ und $\ell = 10 \text{ m}$, können **wiederverwertet** werden und

- ⇒ für **Photonregenerationsexperiment** benutzt werden [AR'03]



- Sensitivitäten eines **optischen** Photonregenerationsexperiments mit **wiederverwerteten HERA Magneten**

– **in HERA-Tunnel:**

$$\langle P \rangle = 10 \text{ W} \quad , \quad \hbar\omega = 1 \text{ eV}$$

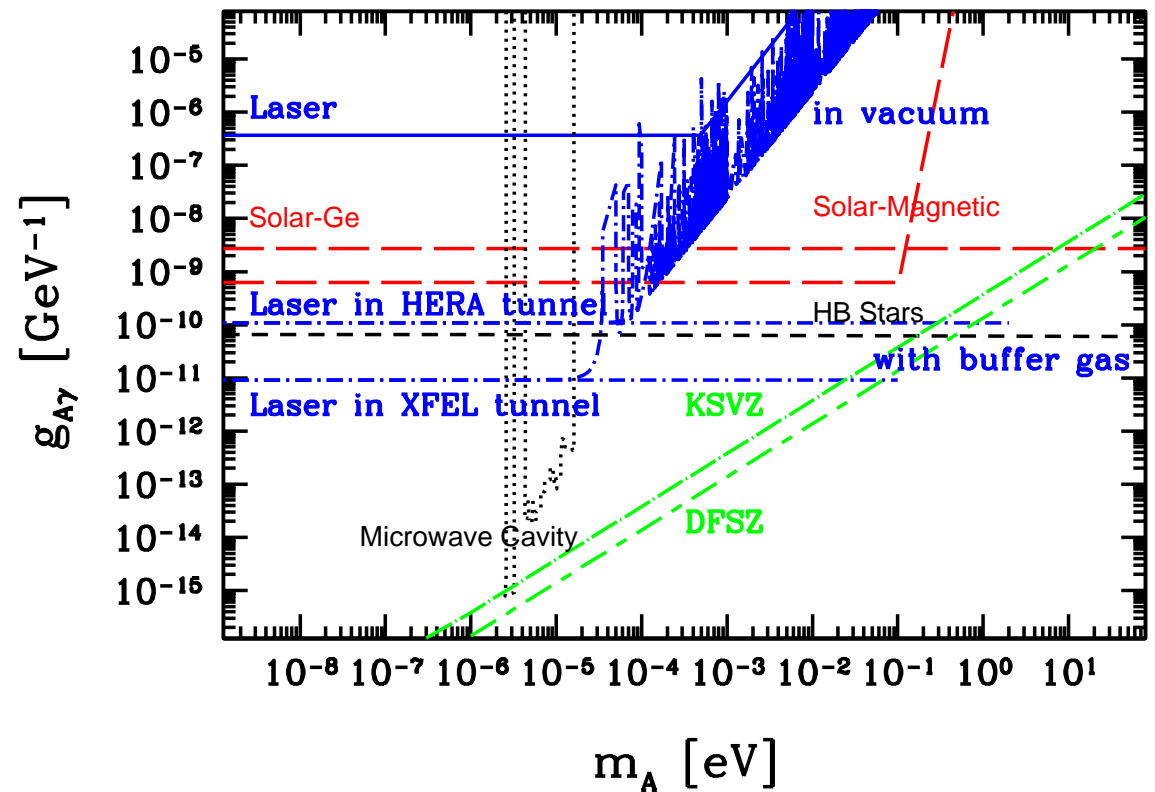
$$B = 5 \text{ T} \quad , \quad \ell = 17 \times 10 \text{ m}$$

– **in XFEL-Tunnel:**

$$\langle P \rangle = 10 \text{ W} \quad , \quad \hbar\omega = 1 \text{ eV}$$

$$B = 5 \text{ T} \quad , \quad \ell = 200 \times 10 \text{ m}$$

⇒ Kompetitiv mit astrophysikalischen Grenzen



[AR '03]

4. Zusammenfassung

- **SASE FELs** im **Röntgenbereich**:
 - können gebaut werden:
 - ← **TESLA Test Facility und VUV-FEL** bei DESY
 - Konstruktion von **LCLS** am SLAC
 - Aufbau des **Europäischen Röntgenlaserlabors XFEL** bei DESY
 - haben zahlreiche Anwendungen:
 - * Materialwissenschaften
 - * Chemie
 - * Biologie
 - * ...
 - * Plasmaphysik
 - * **Grundlagenphysik**

- Grundlagenphysikalische Ambitionen bei DESY dadurch nicht erschöpft:

⇒ Teilchenphysikalisches Zukunftsprojekt:

TESLA – TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator

