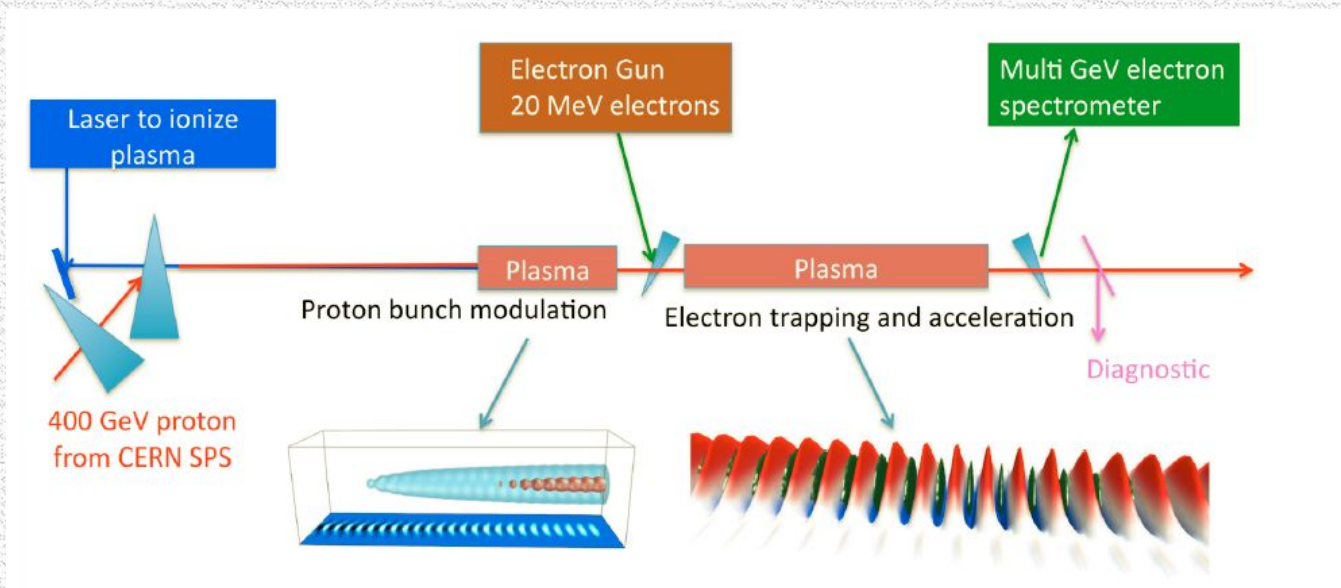


# КІЛЬВАТЕРНЕ ПРИСКОРЕННЯ ЧАСТИНОК В ПЛАЗМІ

(PLASMA WAKEFIELD ACCELERATION)



# План лекції

1. Обмеження стандартних методів прискорення заряджених частинок
2. Основи кільватерного методу лазерного прискорення
3. Використання потужних лазерів та пучків заряджених частинок (електронів, протонів) для формування «бульбашкових» зон у плазмі.
4. Останні досягнення в області плазмового прискорення і найбільші проекти дослідження методів і інструментів для кільватерного прискорення в плазмі

# Вимоги часу

- **Енергії до 100 TeV для адронів – «нова фізика»**
- **Колайдери електронів-позитронів – точні і однозначні визначення фундаментальних модельних параметрів**

# LHC - > 6 млрд. долларів

## FCC:

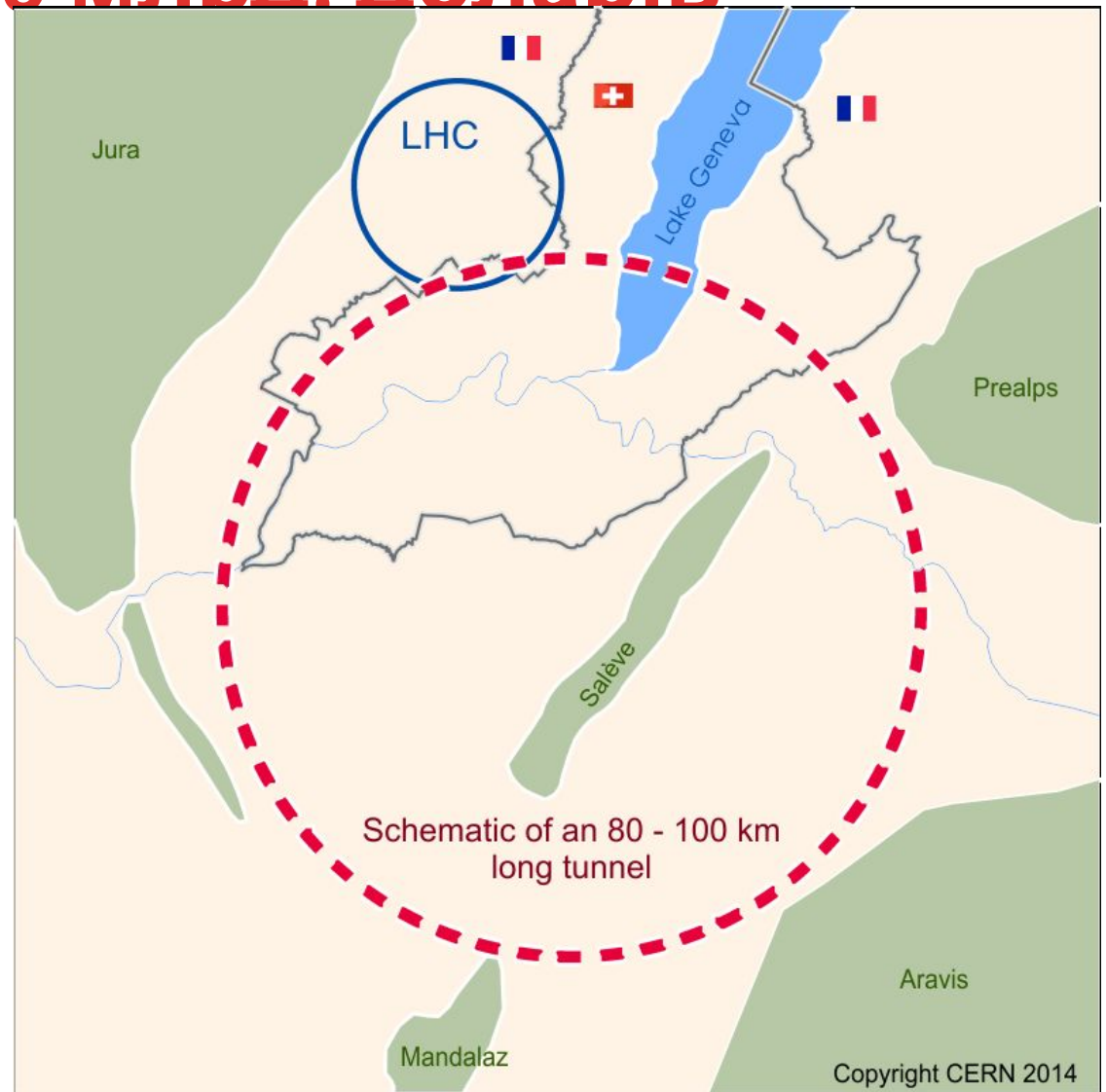
Future Circular Collider

100 TeV (pp)

340 GeV (e-e-)

80-100 км тунель

15-20 Т маг. поле



# FCC - > ?? млрд долларів

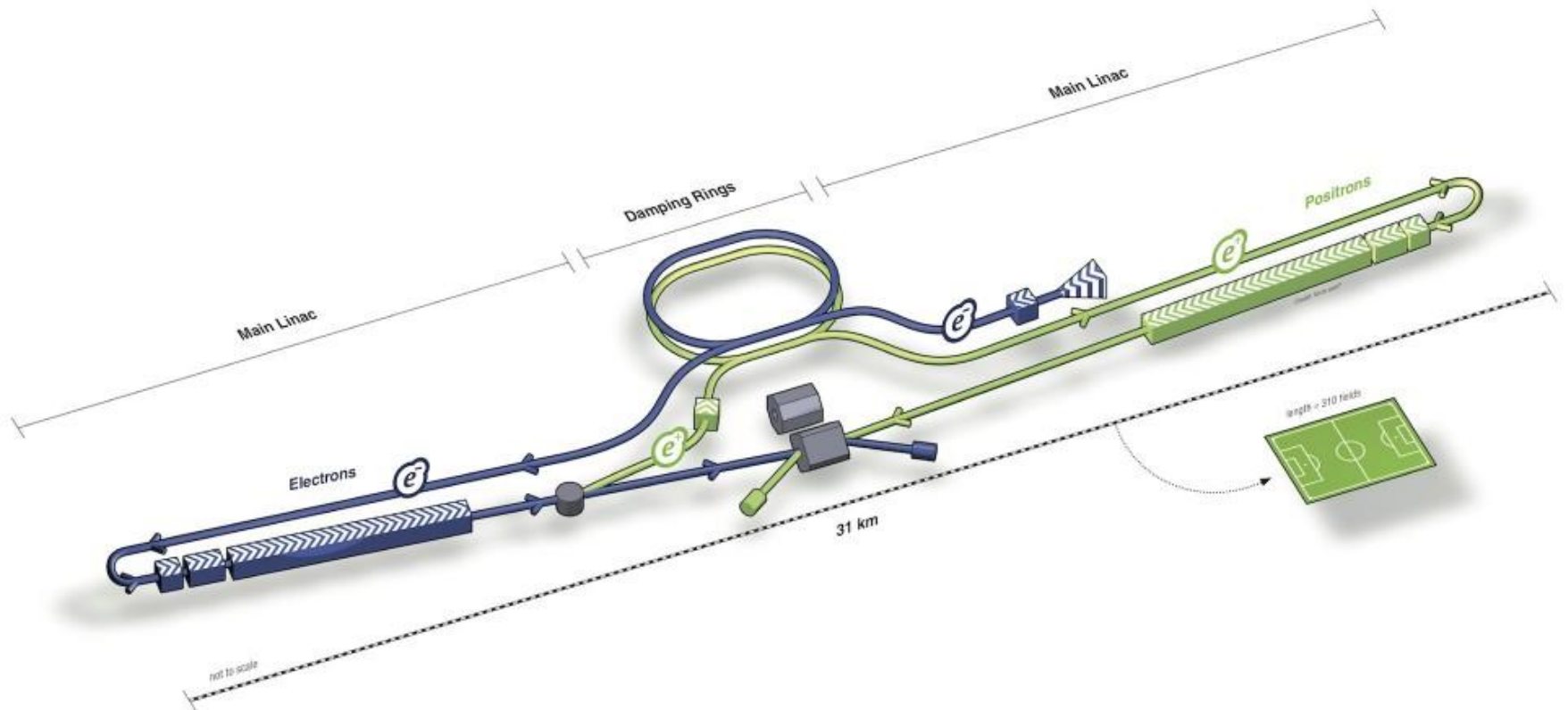


# ILC - CLIC

Оцінена вартість – від 8 до 20 млрд.  
доларів

Обмеження:

- 100 МВ/м
- Синхротронн  
е  
випромінювання





Fermilab

**VLHC**  
(60 TeV p-p)

**LHC**  
(14 TeV p-p)

**International Linear Collider ILC** (0.5 – 1.0 TeV  $e^+e^-$ )

 **FMC** (0.5 TeV  $\mu^+\mu^-$ )

 **NMC**  
(4 TeV  $\mu^+\mu^-$ )

10 Km

A black double-headed arrow with "10 Km" written above it.

Обмеження в циклічному адронному  
колайдері

$$p = e R B_y$$

Обмеження в циклічному лептонному (e-e<sup>+</sup>)  
колайдері

$$U_{loss} \propto \frac{E^4}{R}$$





Обмеження:

- 100 МВ/м
- Синхротронн  
е

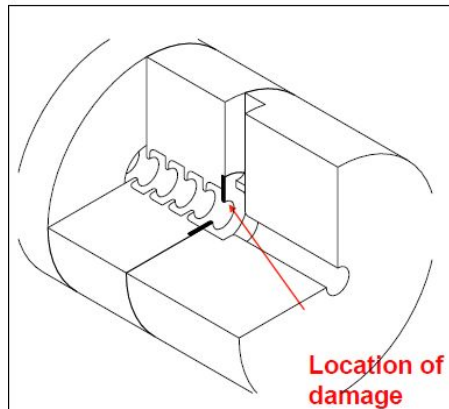
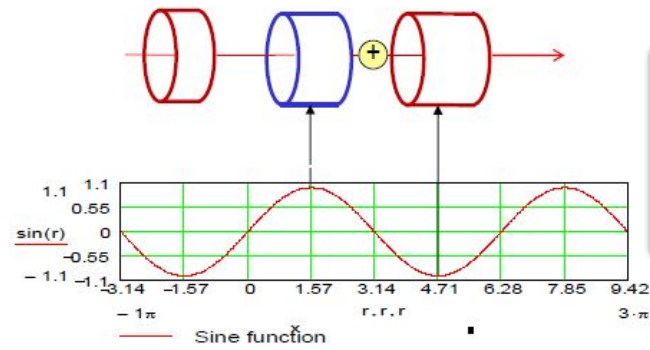
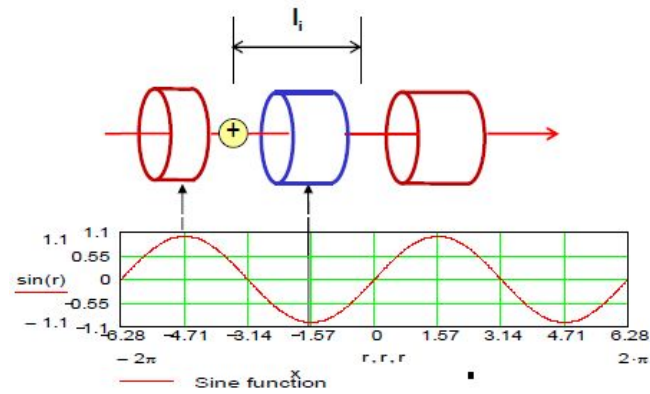
випромінюванн  
я



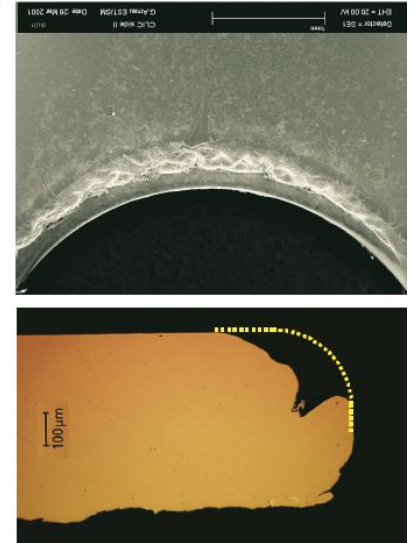
Відмовляючись від циклічних прискорювачів – уникаємо проблеми потужних магнітів для повороту і втрат на синхротронне випромінювання

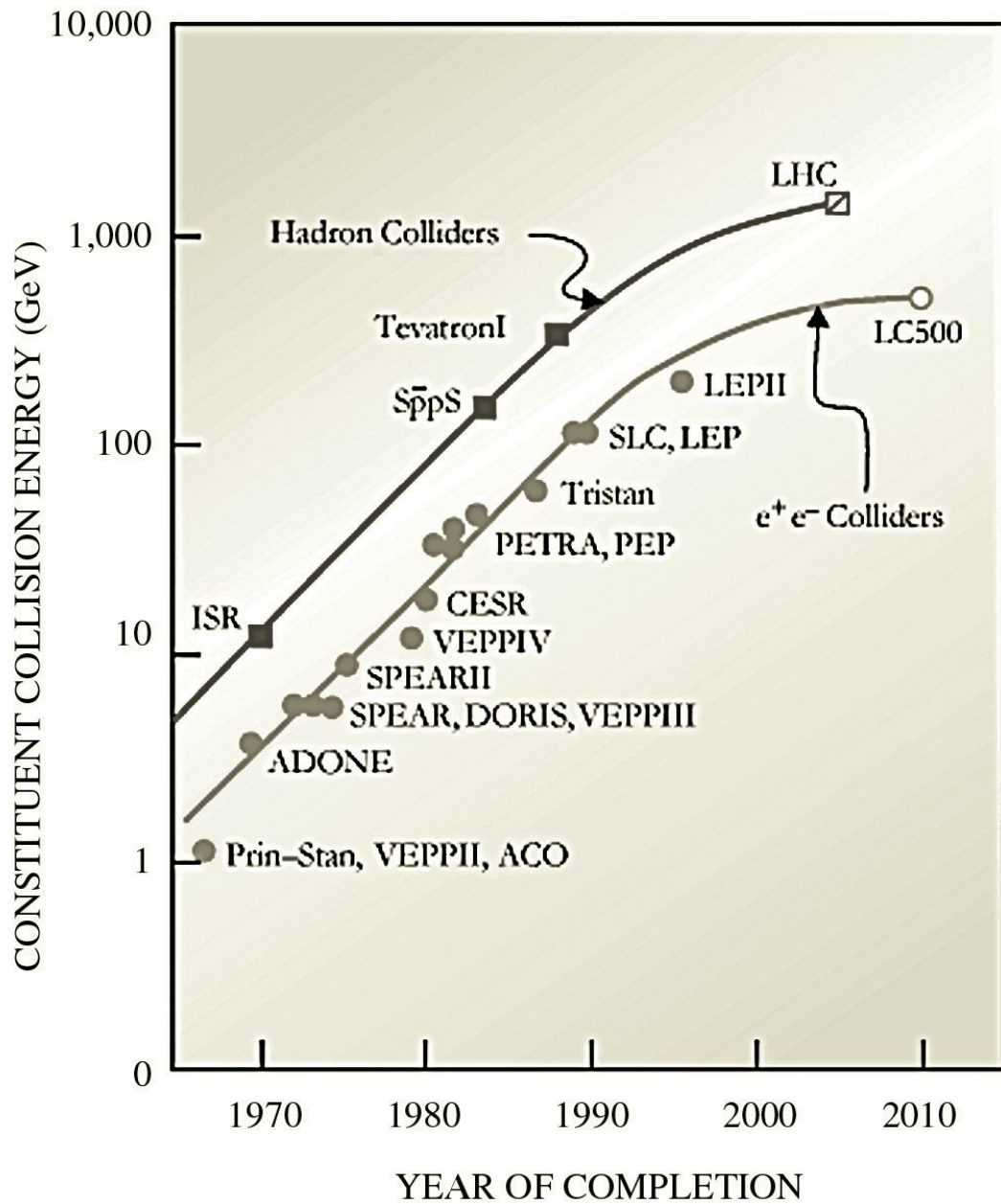
Але обмеження по градієнту поля вимагають довжин прискорюючих структур в 30 - 50 км

Project	Gradient	Type	Year
SLC	<b>20 MV/m</b>	Room-temperature	1988 – 1997
ILC	<b>35 MV/m</b>	Super-conducting	design
XFEL	<b>24 MV/m</b>	Super-conducting	In construction
CLIC	<b>100 MV/m</b>	Room-temperature	design



Single feed power coupler  
30 GHz, 16 ns, 66 MV/m  
local accelerating gradient





## Діаграма Лівінгстона

Експоненційний ріст  
припиняється

# Де вихід з глухого

кута???!!!!



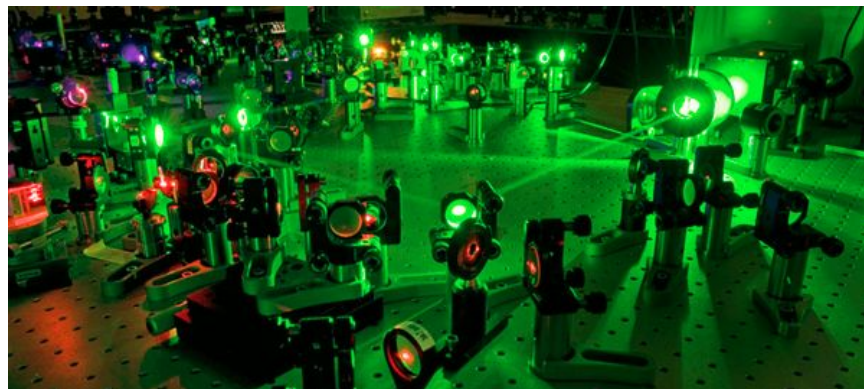
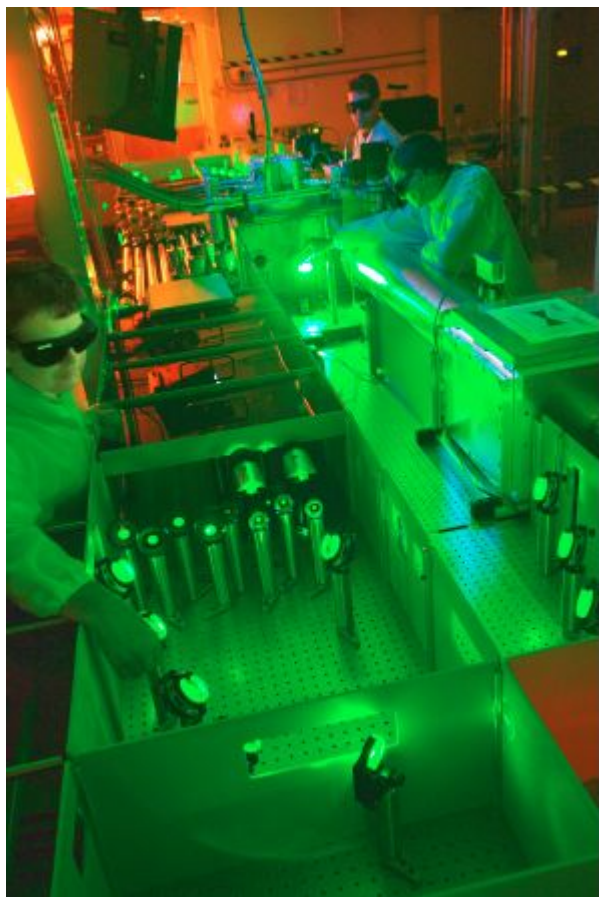
Як мінімум один тунель, здається, закінчується світлом



Plasma acceleration

Плазмові методи  
прискорення





Прогрес в розвитку потужних лазерів – мультитераватні і петаватні лазери

Напруженості поля - гігавольти і теравольти на м

**Але це напруженості в поперечному напрямку,  
а потрібно – в повздовжньому напрямку**

# Transverse to Longitudinal

- Ідея: використати плазму для конвертування поперечного електричного поля лазерного випромінювання в поздовжнє поле в плазмі

VOLUME 43, NUMBER 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

23 JULY 1979

## Laser Electron Accelerator

T. Tajima and J. M. Dawson

*Department of Physics, University of California, Los Angeles, California 90024*

(Received 9 March 1979)

An intense electromagnetic pulse can create a wake of plasma oscillations through the action of the nonlinear ponderomotive force. Electrons trapped in the wake can be accelerated to high energy. Existing glass lasers of power density  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> shone on plasmas of densities  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup> can yield gigaelectronvolts of electron energy per centimeter of acceleration distance. This acceleration mechanism is demonstrated through computer simulation. Applications to accelerators and pulsers are examined.

Collective plasma accelerators have recently received considerable theoretical and experimental investigation. Earlier Fermi<sup>1</sup> and McMillan<sup>2</sup> considered cosmic-ray particle acceleration by moving magnetic fields<sup>1</sup> or electromagnetic waves.<sup>2</sup> In terms of the realizable laboratory technology for collective accelerators,

the wavelength of the plasma waves in the wake:

$$L_1 = \lambda_w / 2 = \pi c / \omega_p. \quad (2)$$

An alternative way of exciting the plasmon is to inject two laser beams with slightly different frequencies (with frequency difference  $\Delta\omega \sim \omega_p$ ) so that the beat distance of the packet becomes



# Concepts For Plasma-Based Accelerators

Pioneered by J.M. Dawson

- Plasma Wake Field Accelerator(PWFA)

A high energy electron/proton bunch

- Laser Wake Field Accelerator(LWFA)

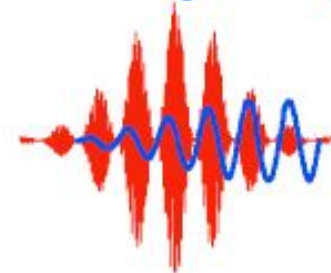
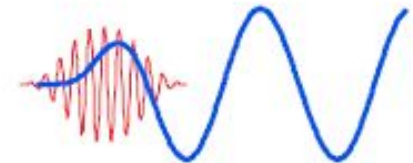
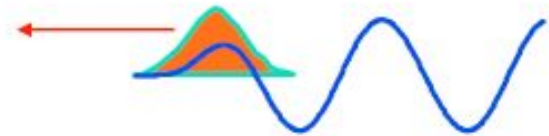
A single short-pulse of photons

- Plasma Beat Wave Accelerator(PBWA)

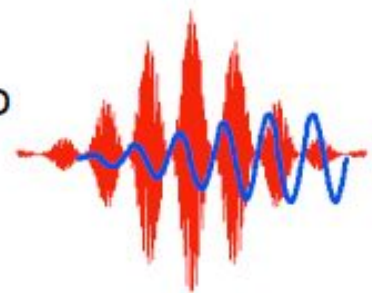
Two-frequencies, i.e., a train of laser pulses

- Self Modulated Laser Wake Field Accelerator (SMLWFA)

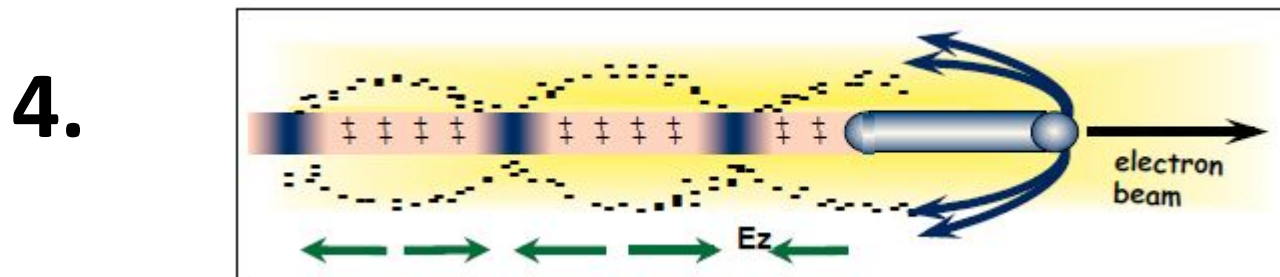
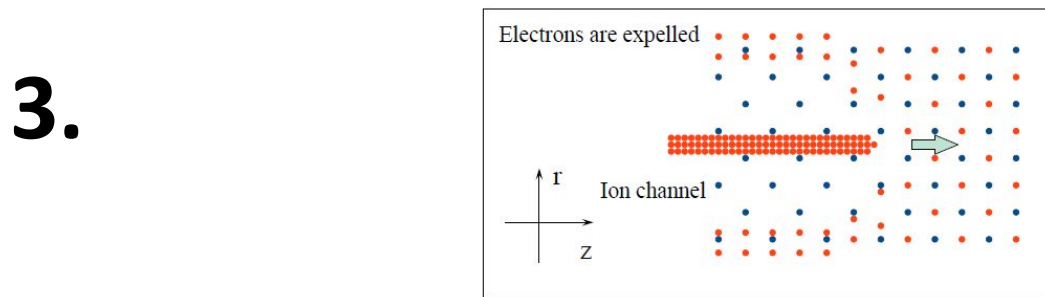
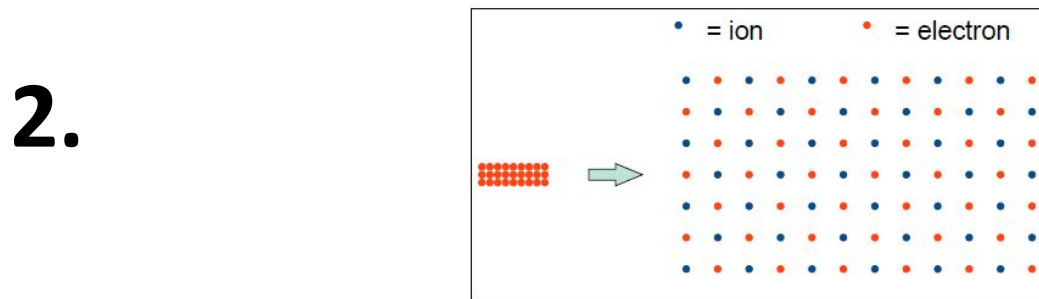
Raman forward scattering  
Instability



evolves to



# Принцип дії кильватерного поля

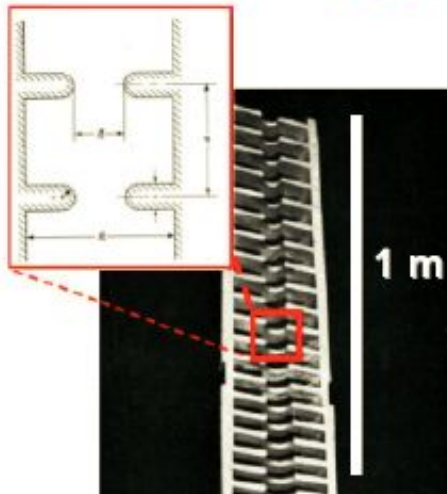


# Звичайний лінійний прискорювач

*Copper Structure with irises*

*Powered by microwaves*

*Energy Gain 20 MV/m  
Structure Diameter 10cm*



**BIG PHYSICS BECOMES SMALL**

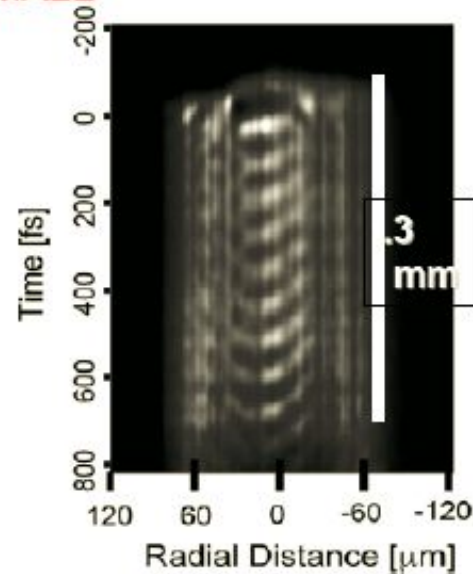
# Плазменний прискорювач

*Ionized Gas*

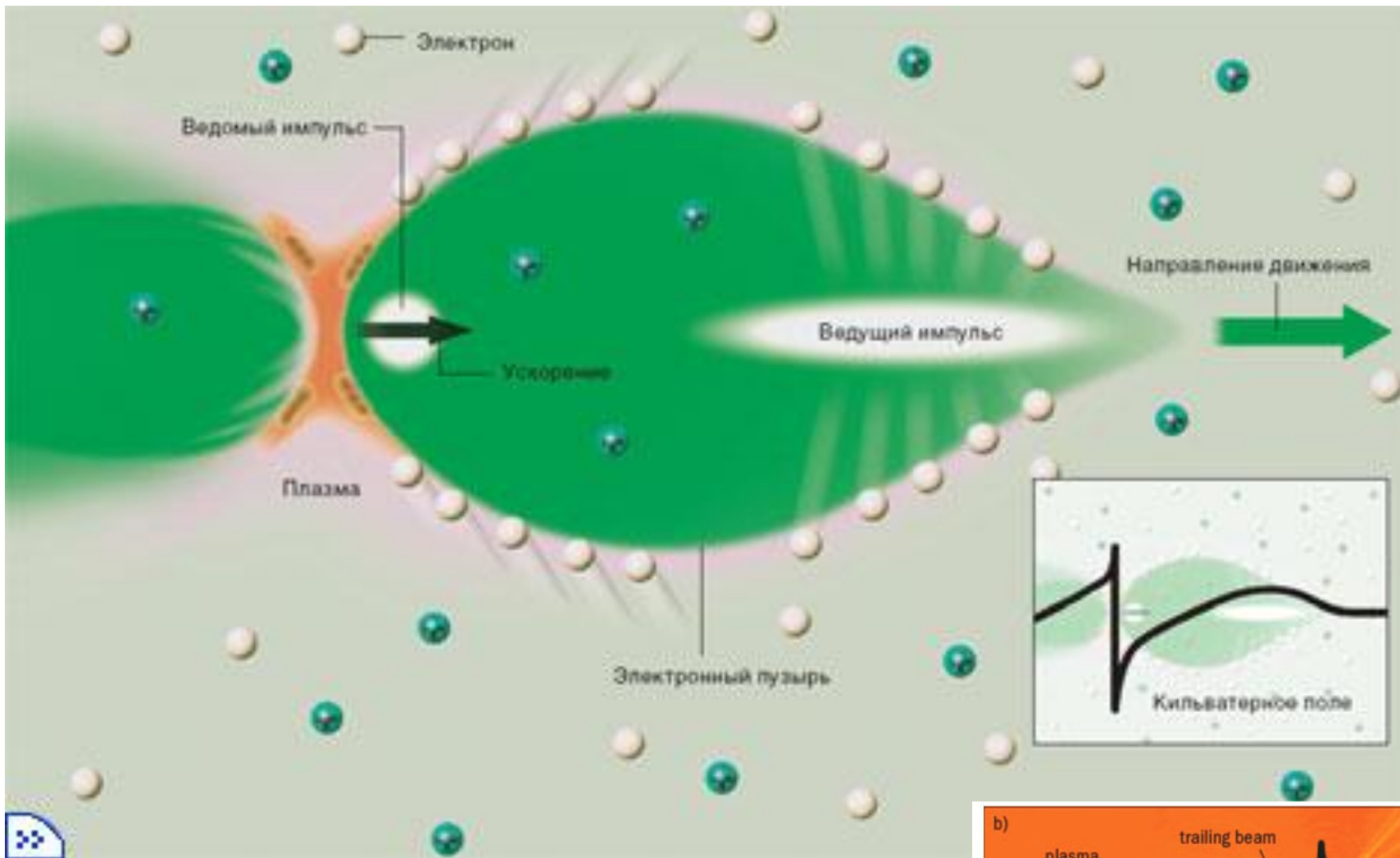
*Lifetime, few picoseconds*

*Powered by a Laser or  
electron beam pulse*

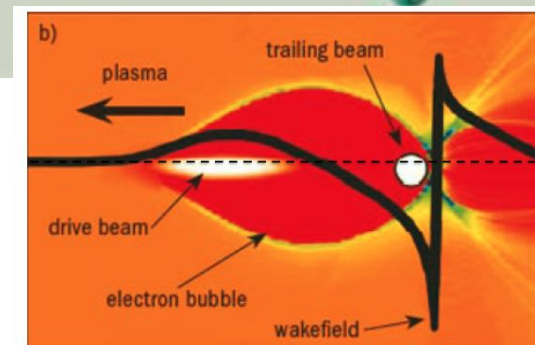
*Energy Gain 20 GV/m  
Diameter 0.1-1 mm*



Поперечні поля в кільватерному методі треба контролювати



Лазерне і плазмове кильватерні поля



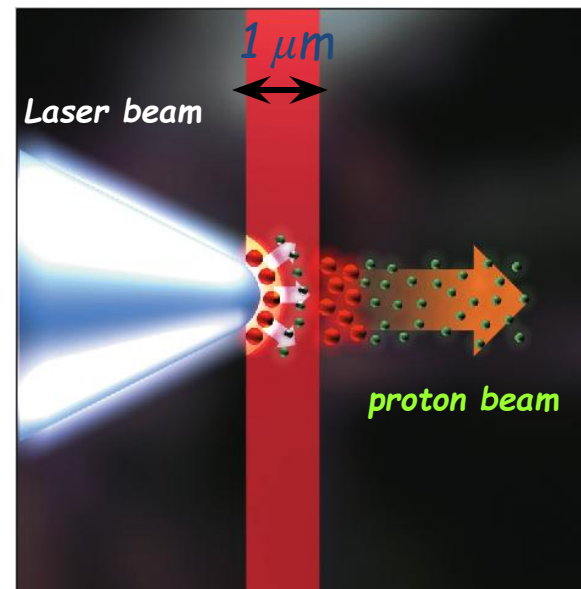
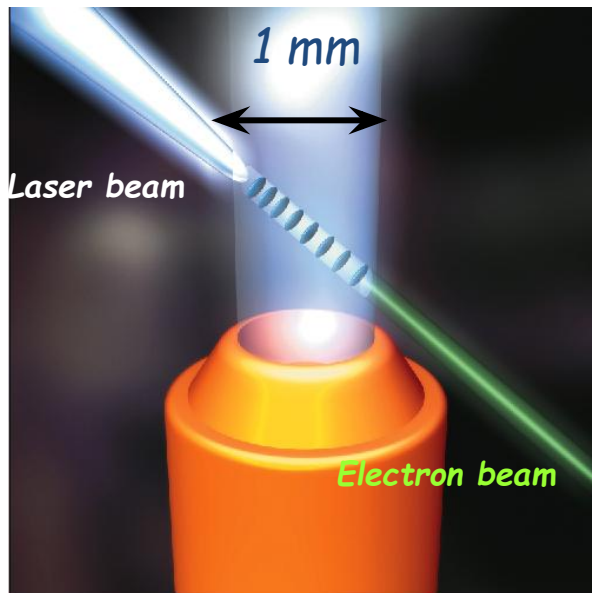
On axis net charge: + - +

Експерименти у Французькому політехнічному  
інституті

# State of Art of Laser-Plasma Accelerators

Victor Malka

*LOA, ENSTA - CNRS - École Polytechnique,  
91761 Palaiseau cedex, France*





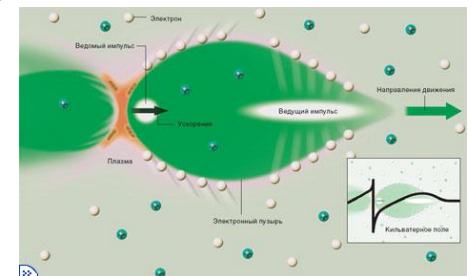


Режим фокусування і «автофазування»

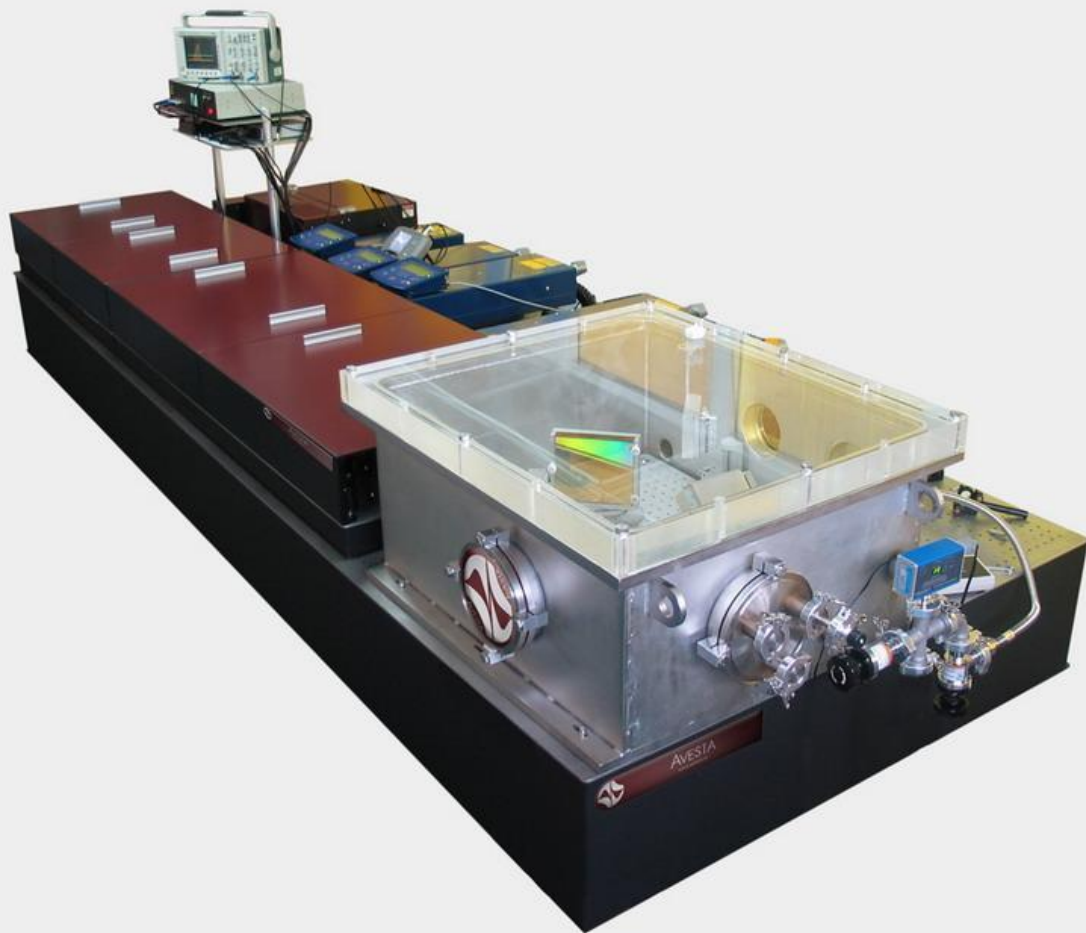
Потужність лазерів від 10 ГВт (настільні системи) і більше

Імпульси електронів **довжиною до 10 фс !!!!!!!**

Розкид по енергії менше 10%, малий розкид по куту







## Титан-сапфировая тераваттная система AVET

Располагается на одном оптическом столе \*

Коммерческий продукт \*

Длительность импульса менее 45 фс \*

Высокое качество пучка \*

Высокая стабильность \*

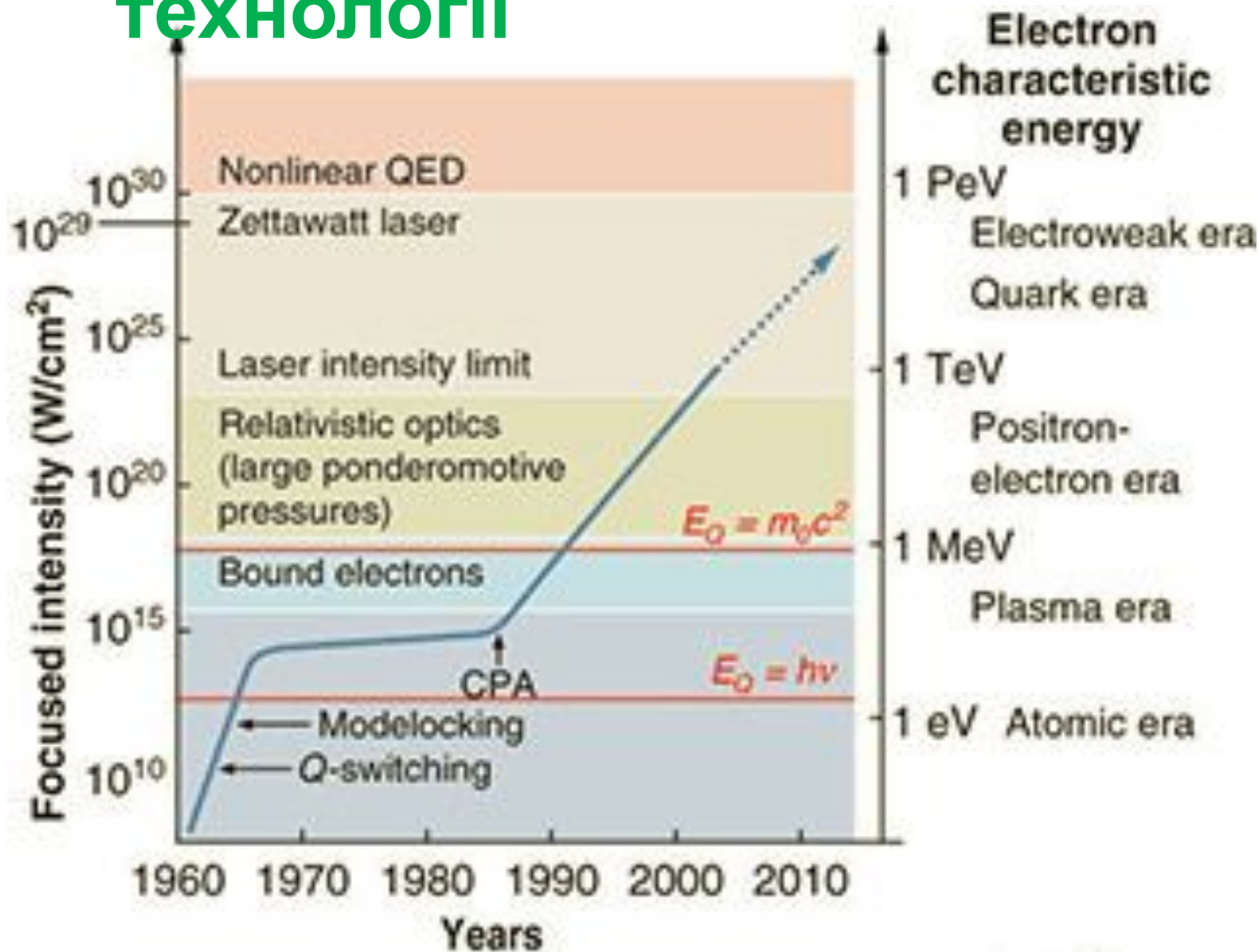
### Применение:

- Лазерное ускорение частиц
- Исследования по термоядерному синтезу
- Генерация рентгеновского излучения и аттосекундных импульсов
- Задающий блок для систем петаваттного уровня
- Изучение плазмы
- Исследования атмосферы и контроль электрических разрядов

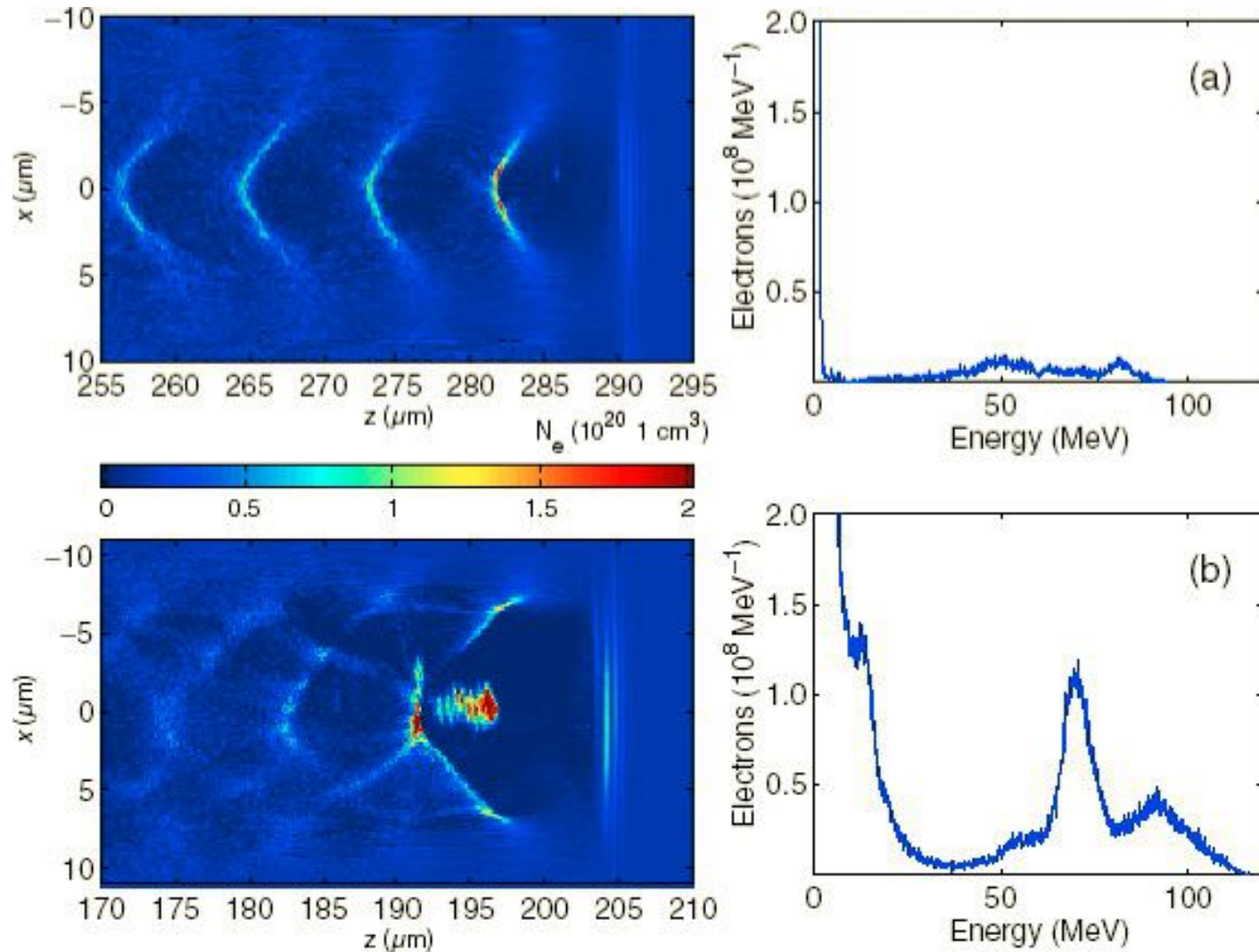
Потужність лазерів від 10 ТВт (настольні системи) і більше

Імпульси електронів **довжиною до 10 фс !!!!!!!**

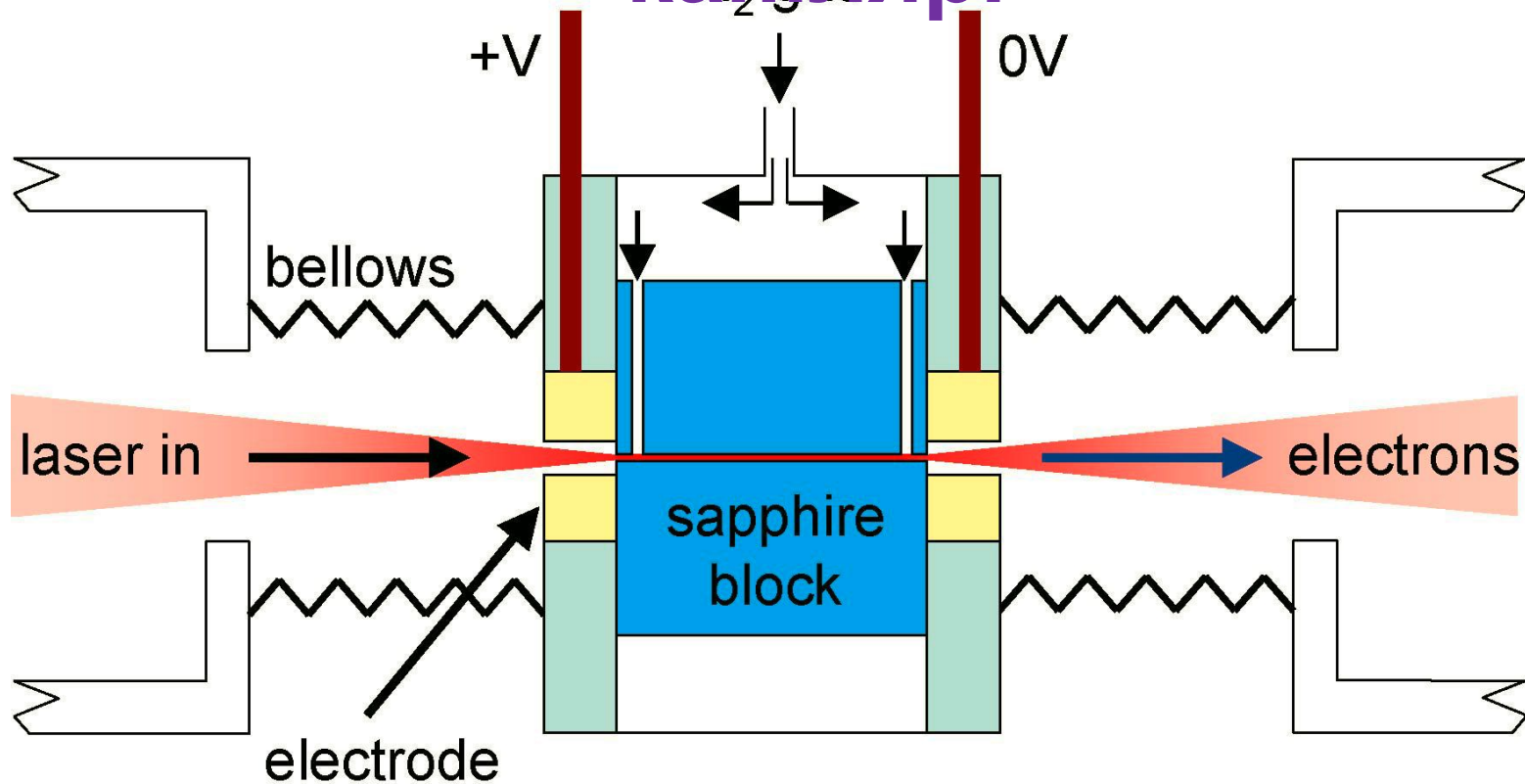
# Прогрес в лазерній технології



# Ефект достатньої потужності лазера для утворення нелінійного режиму з кавітаційними бульбашками



# Прискорення в капілярі

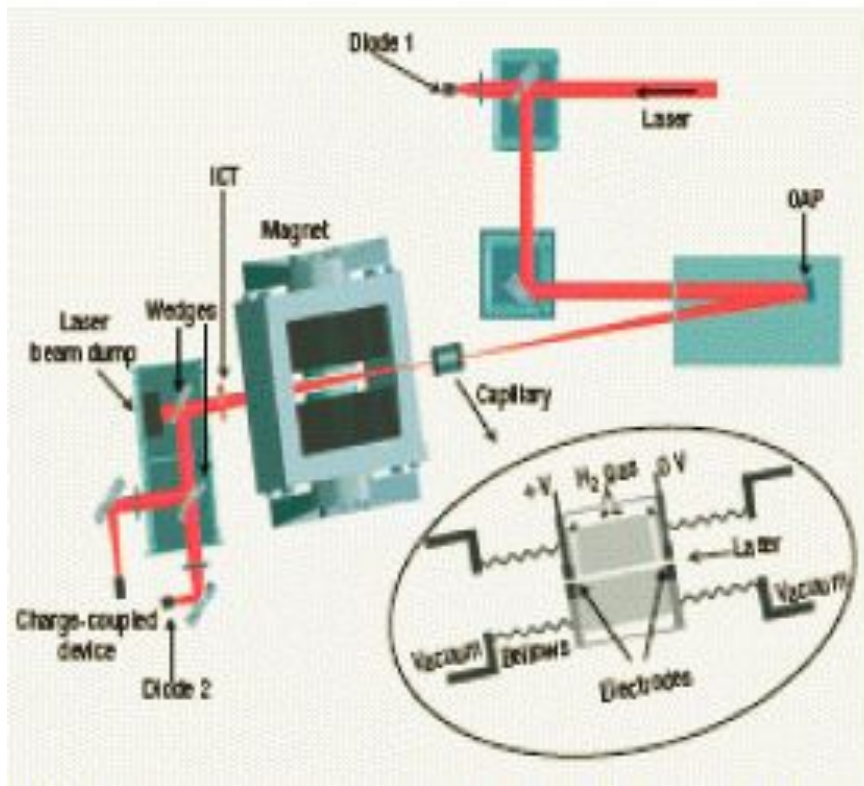


Частково вирішує проблему зменшення густини плазми при одночасному забезпеченні значної довжини прискорення

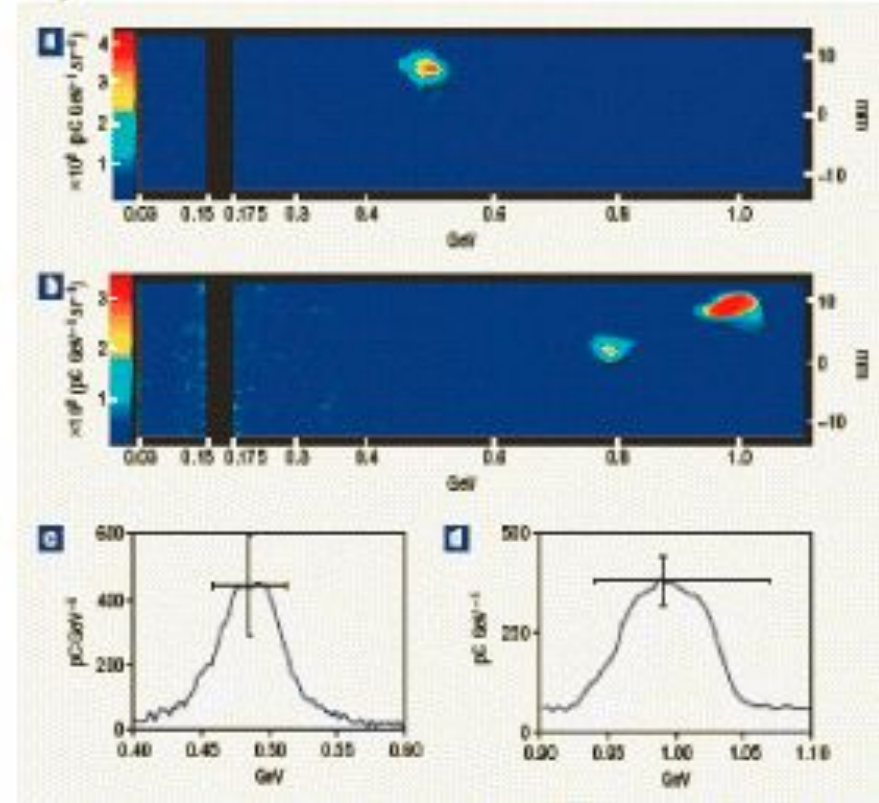


В 2006 році досягнуто енергії 1 Гев з використанням прискорення в капілярі

a)



b)



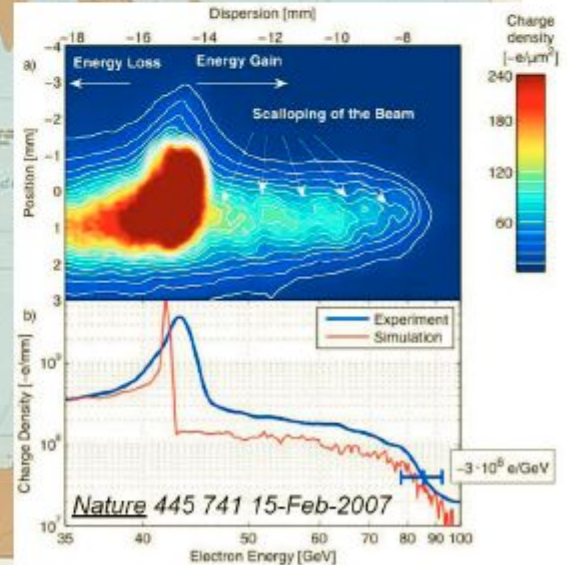
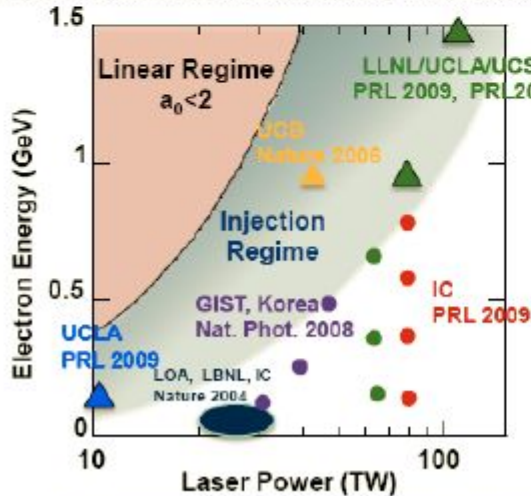
# World-Wide Interest in Plasma Acc.

Plasma Acceleration on the Globe, T. Katsuoelas



D. H. Froula

2010 Advanced Accelerator Conference



● Laser Wake Expts

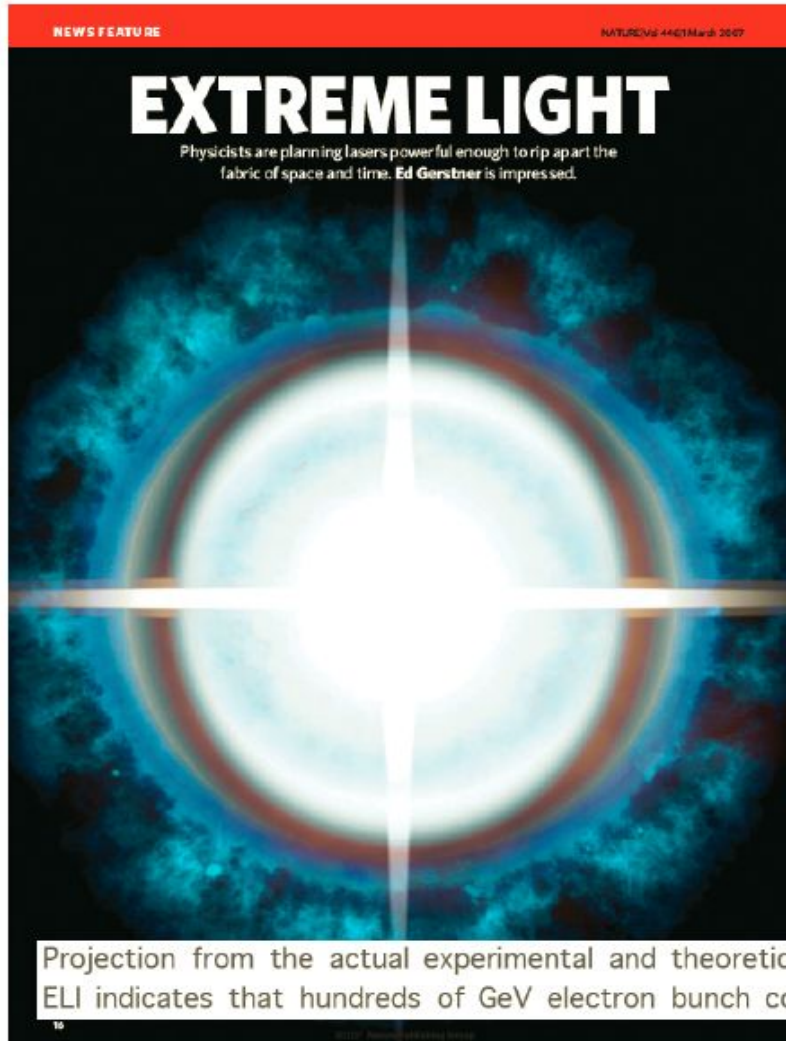
● Electron Wake Expts

● e-/e+ Wake Expts



# Найбільші проекти (вибране)

<http://www.eli-laser.eu/>



## Europe: ELI

**European Project  
for development of  
extreme light**

**Beam acceleration  
is one work package**

**Budget for 4 Euro-  
pean sites:**

**1 billion €**

**... hundreds of GeV ...**

# BELLA

28 МЛН.  
доларів

<http://www.lbl.gov/community/bella/>

To use laser light to accelerate an electron beam to 10 GeV (10 billion electron volts) or more in the comparatively short distance of approximately one meter



[About the Lab](#)

[Leadership/Organization](#)

[Calendar](#)

[News Center](#)

[Today At Berkeley Lab](#)

## BELLA: The Berkeley Lab Laser Accelerator

[Community](#)

[Richmond Bay Campus](#)

[Planning](#)

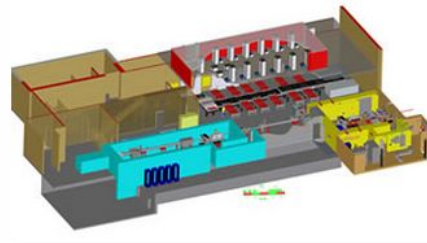
[Tours](#)

[Community Programs](#)

[Friends of Berkeley Lab](#)

### Project Description

BELLA, the Berkeley Laboratory Laser Accelerator will create an experimental facility for further advancing the development of laser-driven plasma acceleration.



BELLA's unique attribute is the ability to use laser light to accelerate an electron beam to 10 GeV (10 billion electron volts) or more in the comparatively short distance of approximately one meter.

This technology holds great promise for dramatically reducing the size, cost, energy usage, and environmental impact of future accelerators, particularly high-energy electron-positron colliders. BELLA's development could pave the way for future accelerators to be hundreds of times shorter and more compact than current technologies while producing high quality

### IN PROCESS

- Computational Research and Theory (CRT) Facility
- Solar Energy Research Center (SERC)
- Seismic Life Safety, Modernization, and





# FACET

20 млн.  
доларів

[https://portal.slac.stanford.edu/sites/ard\\_public/facet/Pages/default.aspx](https://portal.slac.stanford.edu/sites/ard_public/facet/Pages/default.aspx)

FACET provides high energy density electron and positron beams with peak currents of approximately **20 kA** that are focused down to below **30x30 micron** transverse spot size at an energy of **20 GeV**.



DOE | Stanford | SLAC | SSRL | LCLS | AD | PPA | Photon Science | PULSE | SIMES

FACET  
An Office of Science User Facility

SIGN IN



± SLAC Detailed Index | SLAC Web | People

About FACET & Test Facilities

AD SLACPortal > Accelerator Research Division > FACET User Facility

FACET & Test Facilities User Portal

User Registration and Resources

Proposal Process

FACET Facility

NLCTA Facility

ESTB Facility

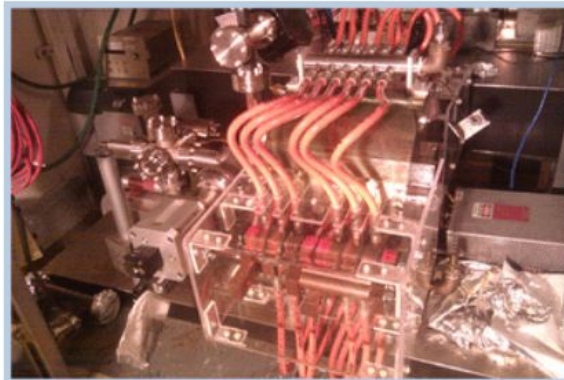
ASTA Facility

FACET Division (Password Required)

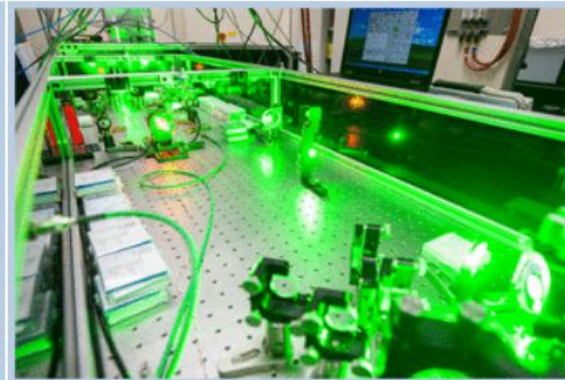
FACET&TF News

Old FACET Users Portal

Old ESTB Users Portal



X-band RF photo injector in the ASTA test stand



10TW Ti-Sapphire laser in FACET

## FACET and Test Beam Facilities

SLAC National Accelerator Laboratory's accelerator test facilities - **FACET, NLCTA, ESTB & ASTA** - are powerful tools for accomplishing great science. These four facilities span a range of beam energies and capabilities, providing a unique opportunity for researchers to find a beam perfectly matched to their experimental needs. For more information contact: [Vitaly Yakimenko, FACET & TF Division Director](#)

FACET (Facility for Advanced Accelerator Experimental Tests):



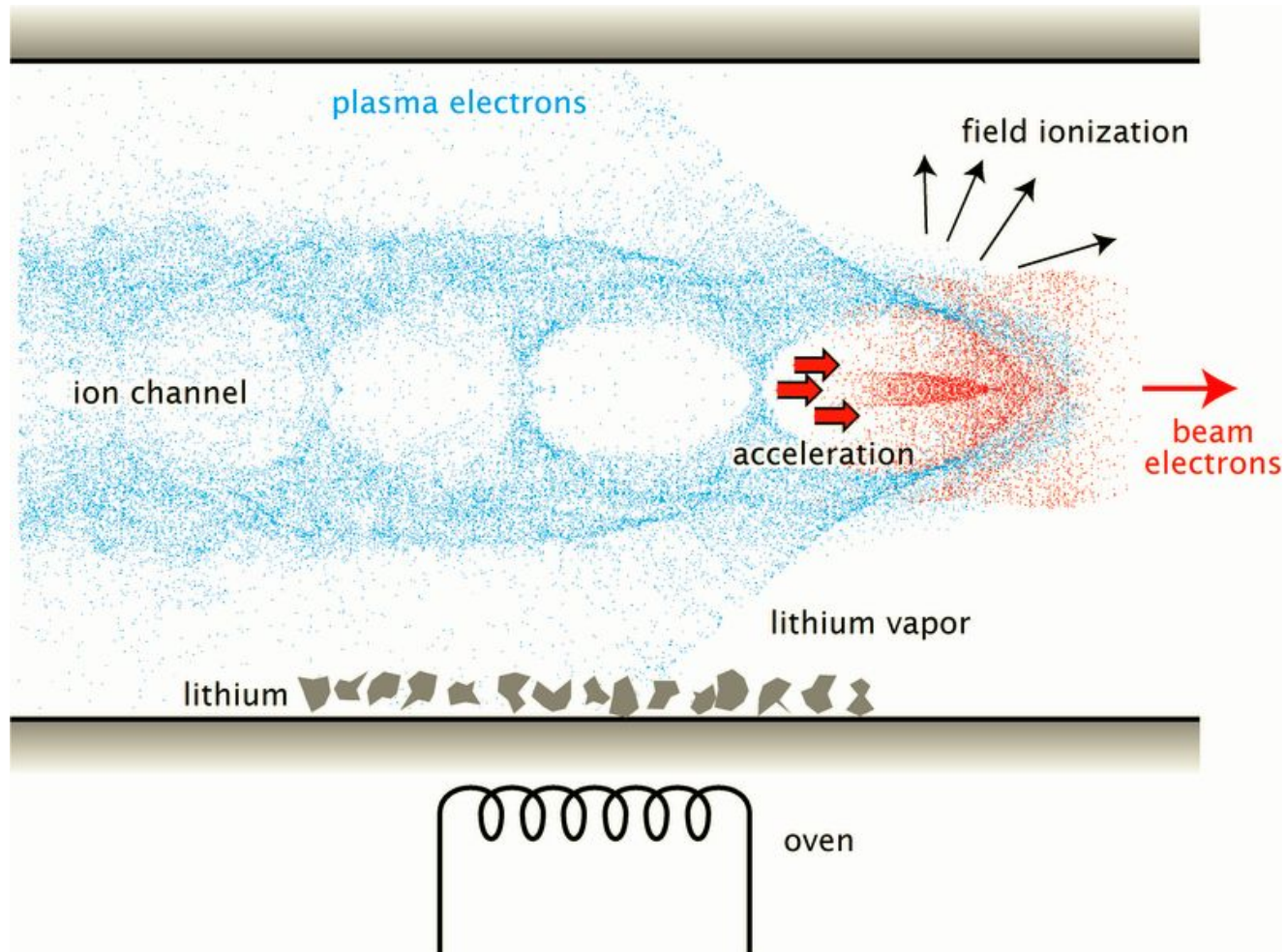
### Announcements

- FACET & TF User Meeting  
September 2014
- Fifth SAREC Review  
(September 2014)

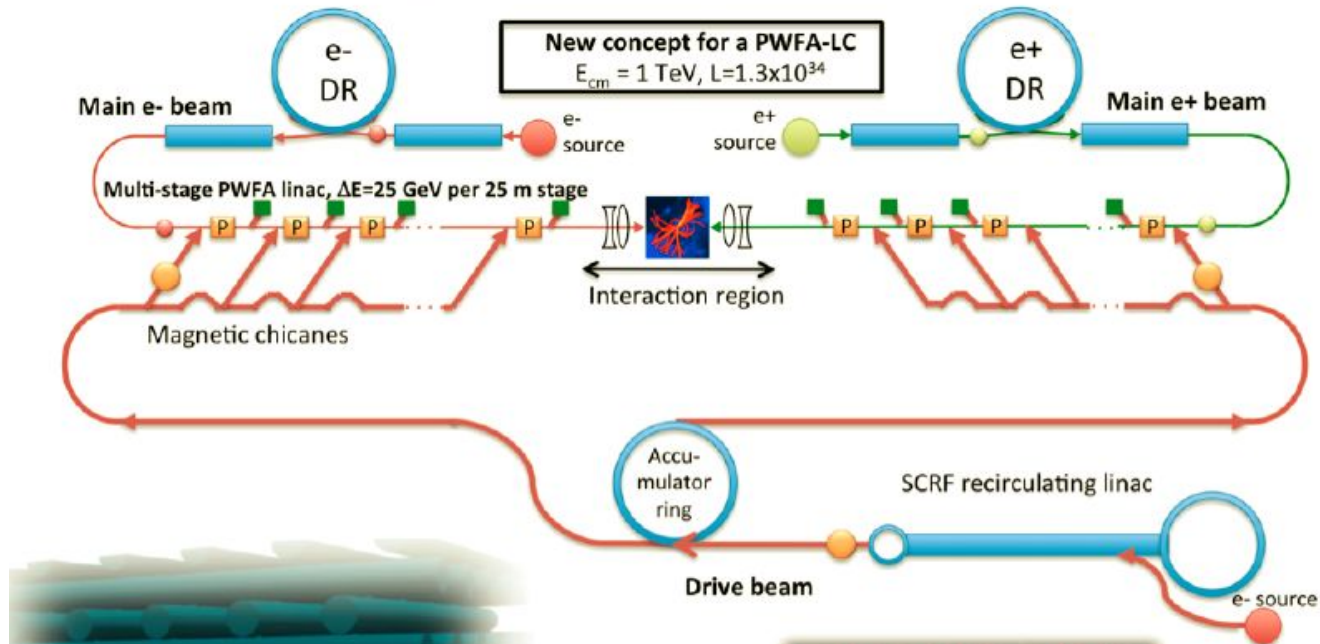
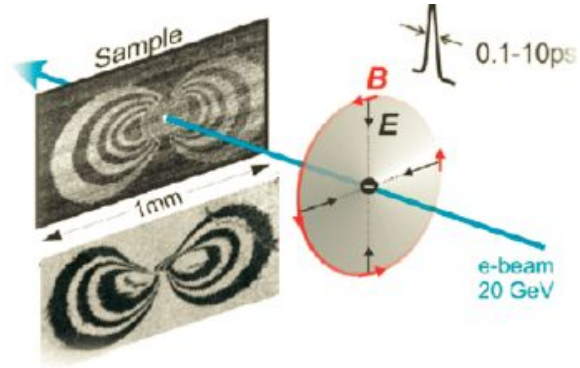
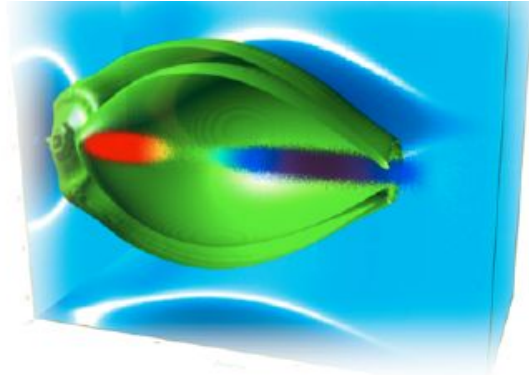
### Contacts

- Carsten Hast, Test Facilities  
Department Head
- FACET Science - Mark Hoger

# FACET

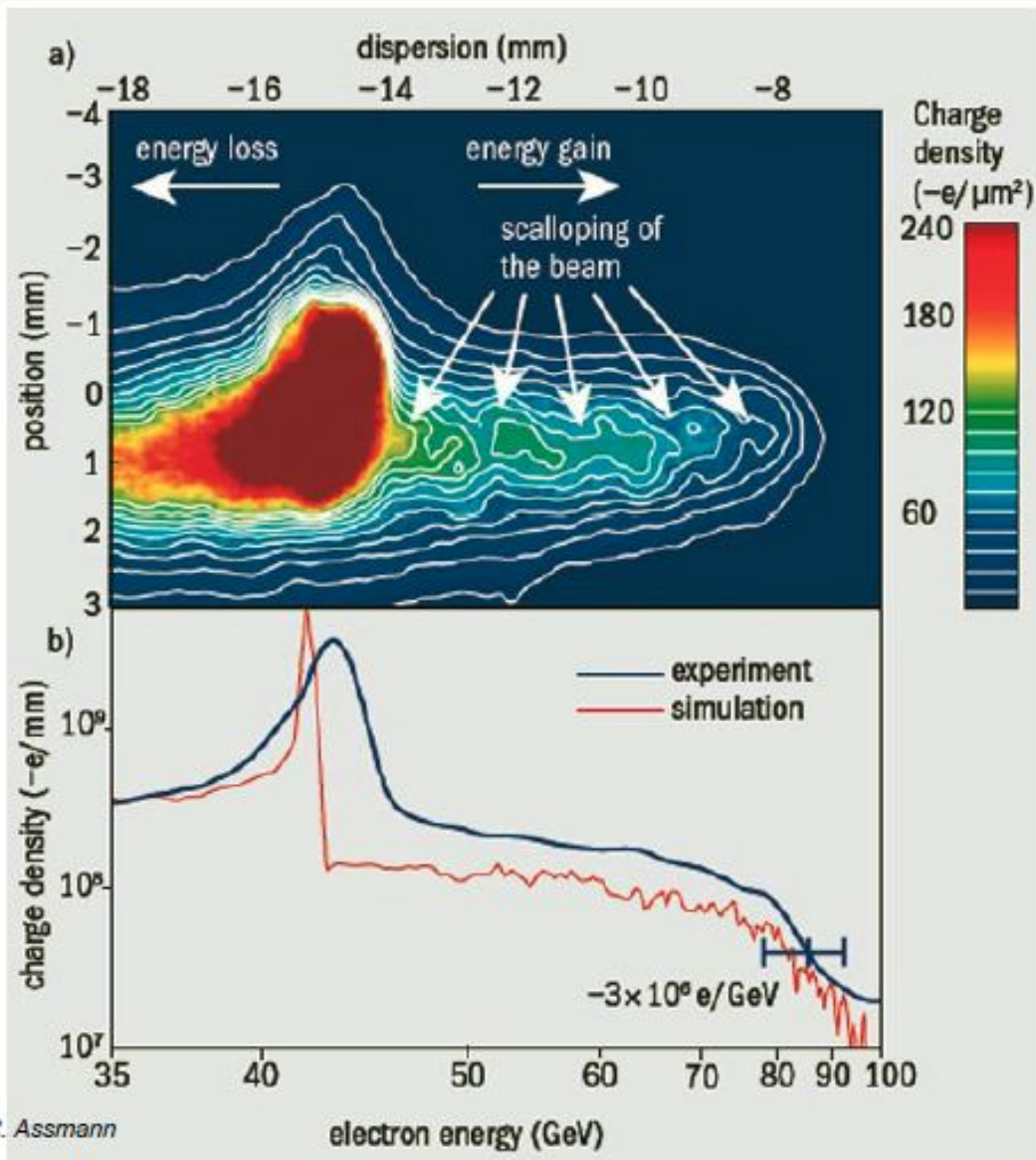


# FACET-II

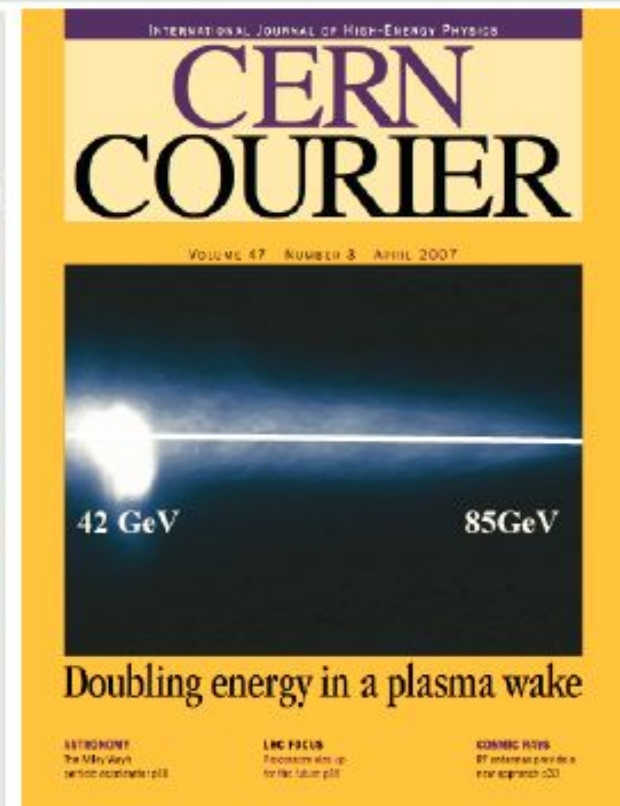




# Record Acceleration: 42 GeV



R. Assmann



E167 collaboration  
SLAC, UCLA, USC

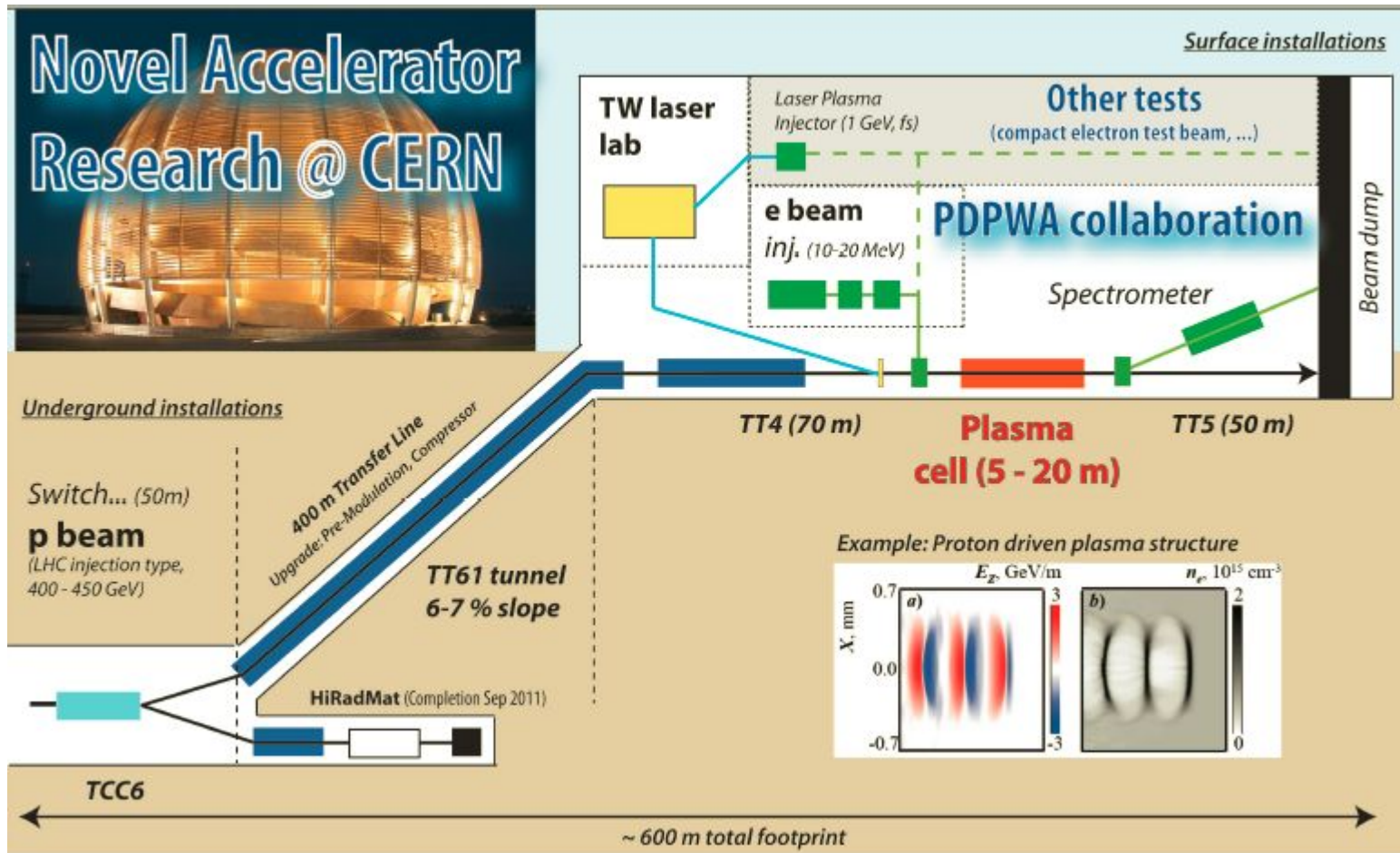
I. Blumenfeld et al, Nature 445,  
p. 741 (2007)



# CERN:

# AWAKE

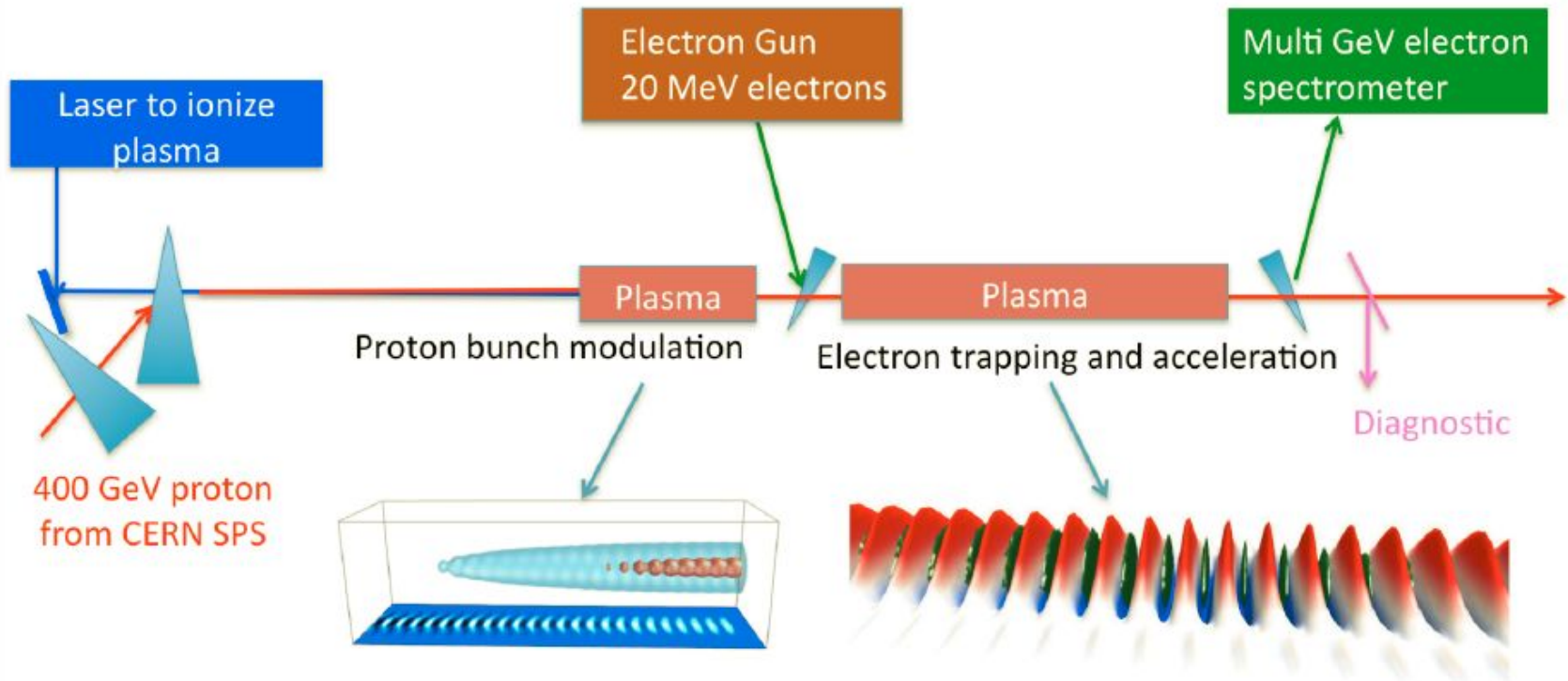
<http://awake.web.cern.ch/awake/>



# CERN:

# AWAKE

<http://awake.web.cern.ch/awake/>



# LAOLA

DESY & Uni Hamburg

<http://laola.desy.de/>

**20 МЛН.**  
**€вро**



[ACCELERATORS](#) | [PHOTON SCIENCE](#) | [PARTICLE PHYSICS](#)

Deutsches Elektronen-Synchrotron  
A Research Centre of the Helmholtz Association

Google™ Custom Search

[DESY HOME](#) | [RESEARCH](#) | [NEWS](#) | [ABOUT DESY](#) | [CONTACT](#)

## LAOLA

Laboratory for Laser- and beam-driven plasma Acceleration



[HOME](#)

Home /

[PROJECTS](#)

## Laboratory for Laser- and beam-driven plasma Acceleration

[CONTACT](#)

[OPEN POSITIONS](#)

[PUBLICATIONS](#)

**LAOLA**, the **L**aboratory for **L**aser- and beam-driven plasma **A**cceleration is a collaboration between groups from **DESY** and the **University of Hamburg**. Its **mission** is to complement basic research in the relatively new field of plasma wakefield acceleration (PWA) by an explicit combination with DESY's conventional, modern accelerators.

[INTERNAL](#) 

Plasma Wakefield Accelerators attract great interest from accelerator and applied physics due to their unprecedented ultra-high field gradients on the order of TV/m as well as their

### Links

- » [PITZ](#)
- » [REGAE](#)
- » [FLA](#)
- » [ARD](#)
- » [PIER](#)
- » [Contact](#)

# Central LC Parameters (Selected)

Parameter	Conventional LC	Plasma LC
Beam energy	1.5 TeV	1.5 TeV
<i>Acc. gradient</i>	100 MV/m	> 1 GV/m
<i>Linac RF length</i>	<b>15 km</b>	<b>&lt; 1.5 km</b>
Luminosity	$10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
<i>Beam sizes at IP</i>	~ nm	~nm
<i>Beam power</i>	15 MW	15 MW
<i>Site power</i>	200 MW	200 MW

A plasma linear collider helps achieving high energy by reducing the linac length!  
Other parameters remain challenging (consequence of required luminosity).

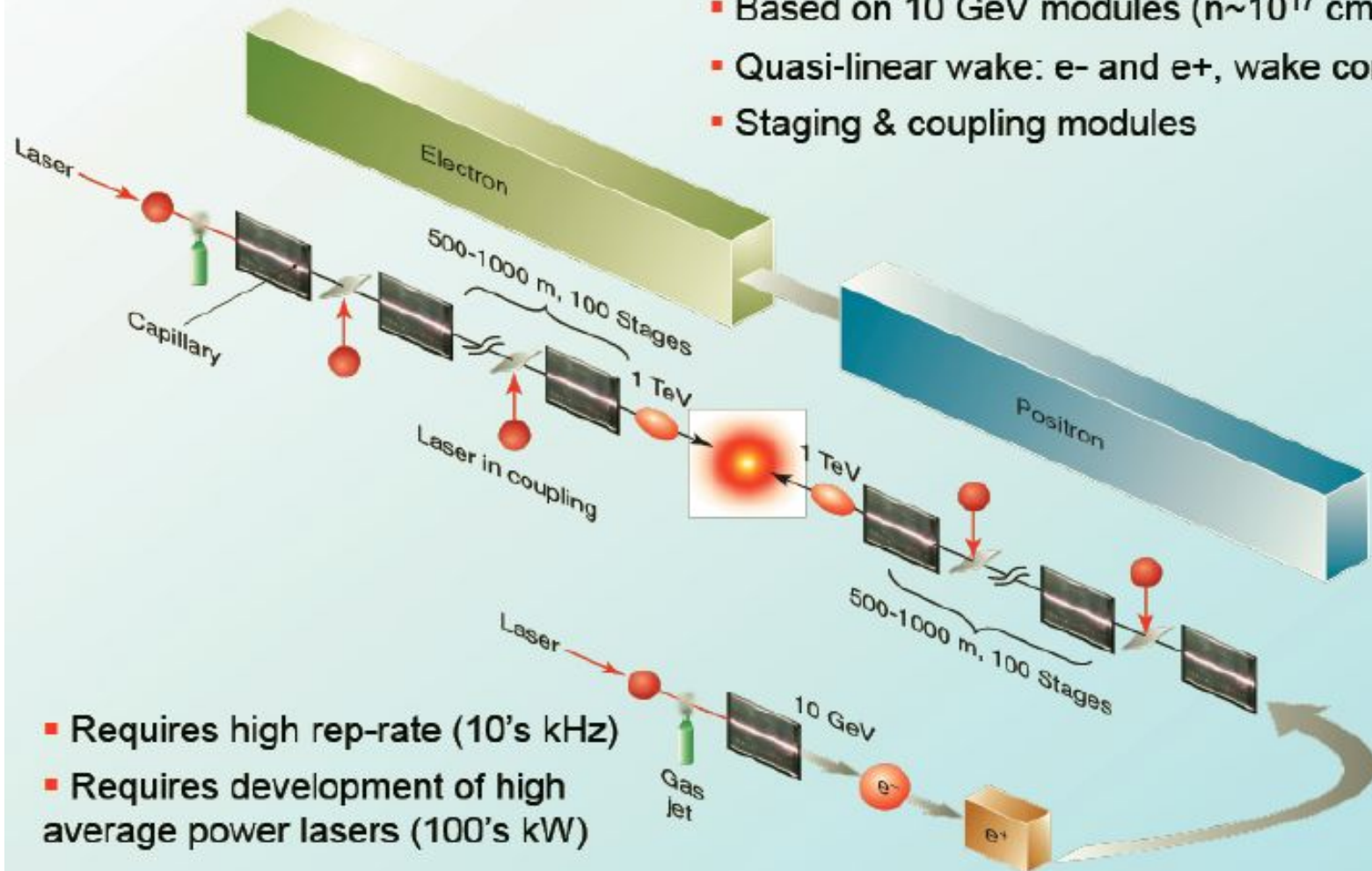




# Conceptual LPA Collider

Slide C.B. Schroeder

- Based on 10 GeV modules ( $n \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )
- Quasi-linear wake:  $e^-$  and  $e^+$ , wake control
- Staging & coupling modules



- Requires high rep-rate (10's kHz)
- Requires development of high average power lasers (100's kW)

## Висновки

1. Обмеження стандартних методів прискорення заряджених частинок
2. Основи кільватерного методу лазерного прискорення
3. Використання потужних лазерів та пучків заряджених частинок (електронів, протонів) для формування «бульбашкових» зон у плазмі.
4. Останні досягнення в області плазмового прискорення і найбільші проекти дослідження методів і інструментів для кільватерного прискорення в плазмі