

# Tópicos de física contemporánea

---

## **ACELERACIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS BASADA EN PLASMA**

---

Eduardo A Orozco, PhD Física  
Universidad Industrial de Santander

**Facultad de Ciencias – Escuela de Física – UIS**  
**Marzo 23, 2023**

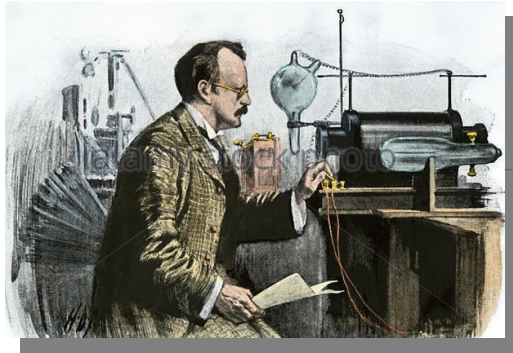


## Introducción

- **Fuerza ponderomotriz**
- **Aceleración wakefield - AWF**
  - AWF impulsada por láser
  - AWF impulsada por partículas cargadas
  - Descripción teórica
- **Estado del arte**



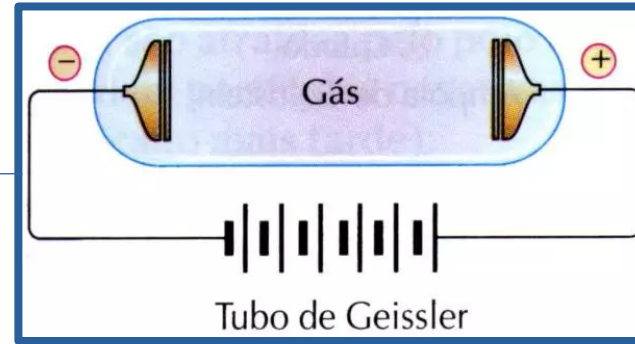
# INTRODUCCIÓN



1896: Se descubre el electrón



1896: Se descubren los Rayos X



$$\Delta U = q\Delta V$$

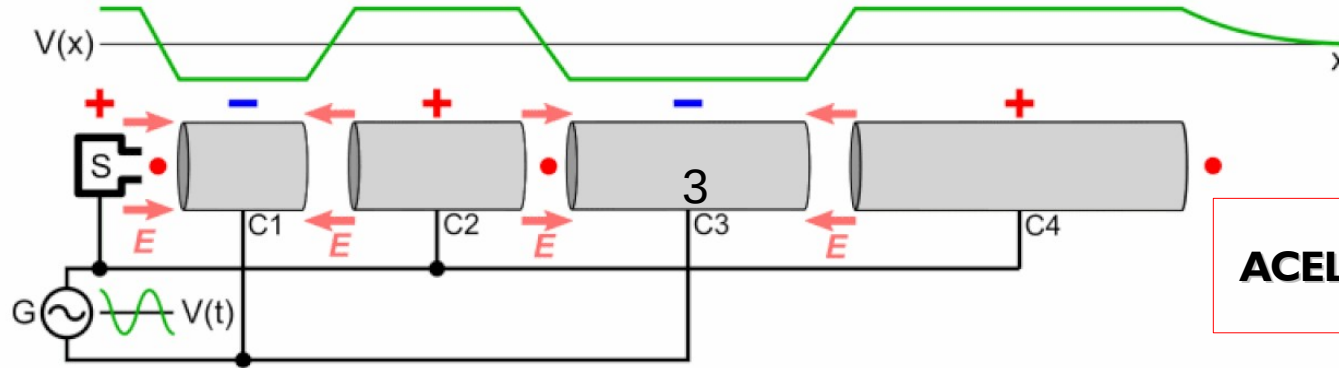
## ACELERADORES ELECTROSTÁTICOS

IMPLANTACIÓN IÓNICA

GENERACIÓN DE RAYOS X

PRE-ACELERACIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS

# INTRODUCCIÓN



## ACELERADORES LINEALES (LINACs)

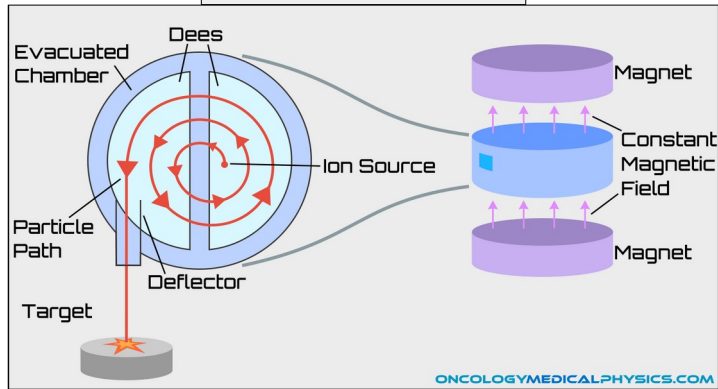
Emplean fuentes de radiofrecuencia para acelerar partículas cargadas



3.2 km: SLAC, Laboratorio Nacional de Aceleradores - California



## CICLOTRÓN

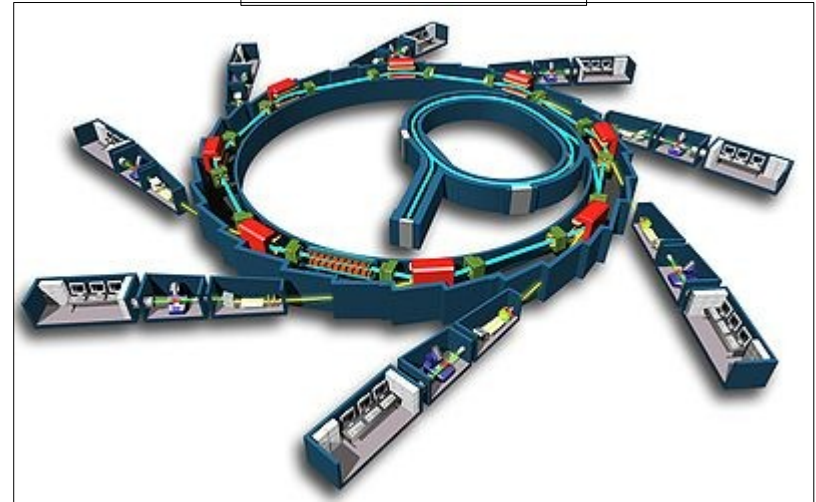


**Límite definido por la  
radiación sincrotrón**



## Aceleradores circulares

## SINCOTRÓN



**Campo magnéticos  
complejos (> desafíos)**

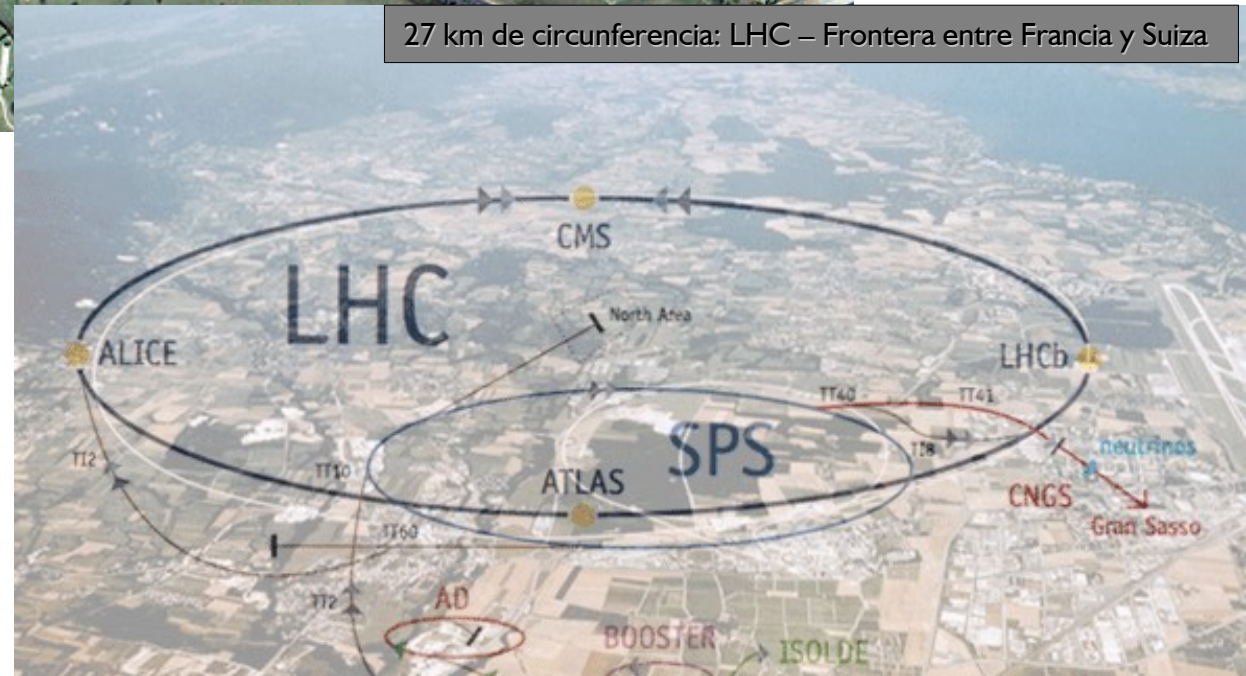
# INTRODUCCIÓN

3.2 km: SLAC, Laboratorio Nacional de Aceleradores - California

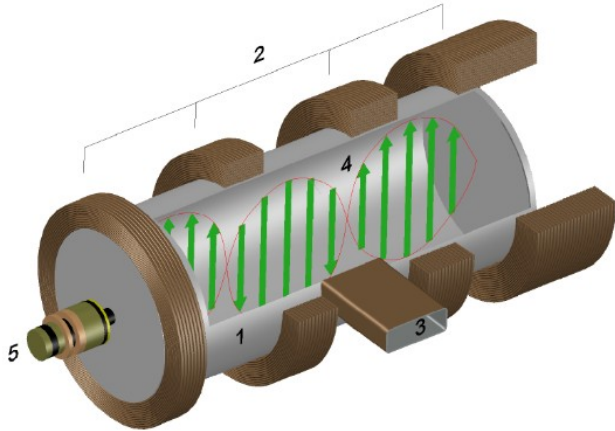


27 km de circunferencia: LHC – Frontera entre Francia y Suiza

**La ganancia de energía  
depende de la longitud  
del dispositivo**



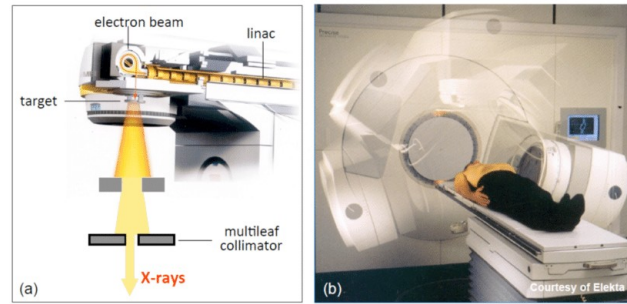
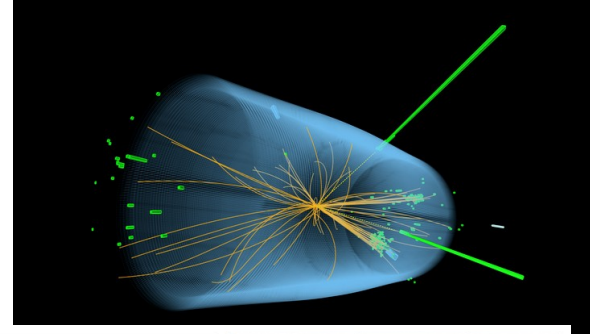
## SARA: Spatial AutoResonant Acceleration



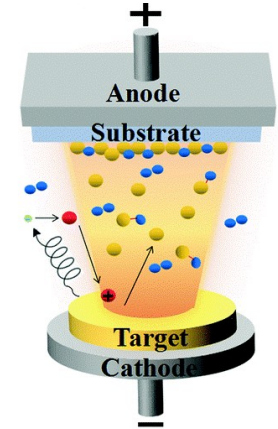
El campo magnetostático se ajusta a lo largo del eje de la cavidad resonante para mantener el régimen de aceleración a medida que los electrones se mueven en trayectorias helicoidales.



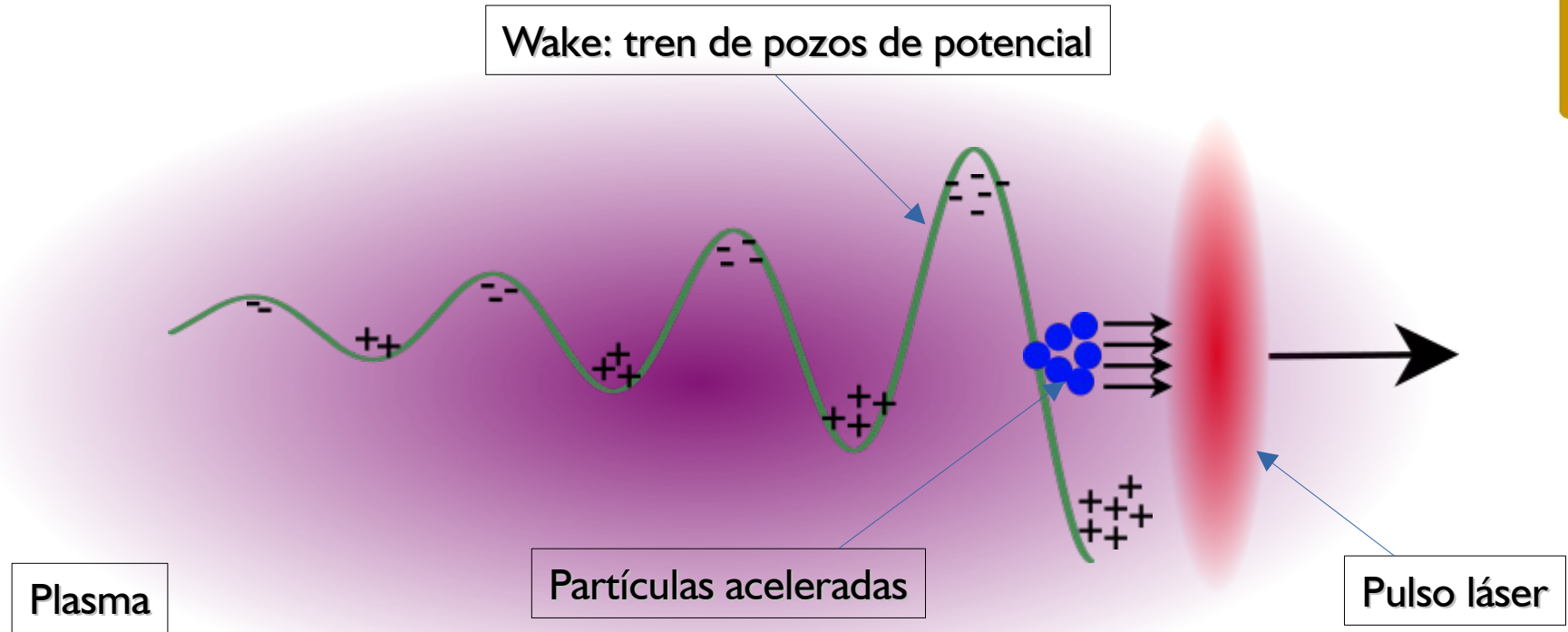
## APLICACIONES



En 2010, se registró que cerca del 85% de los aceleradores en el mundo se usan para aplicaciones industriales y de este porcentaje, la mitad para terapias médicas





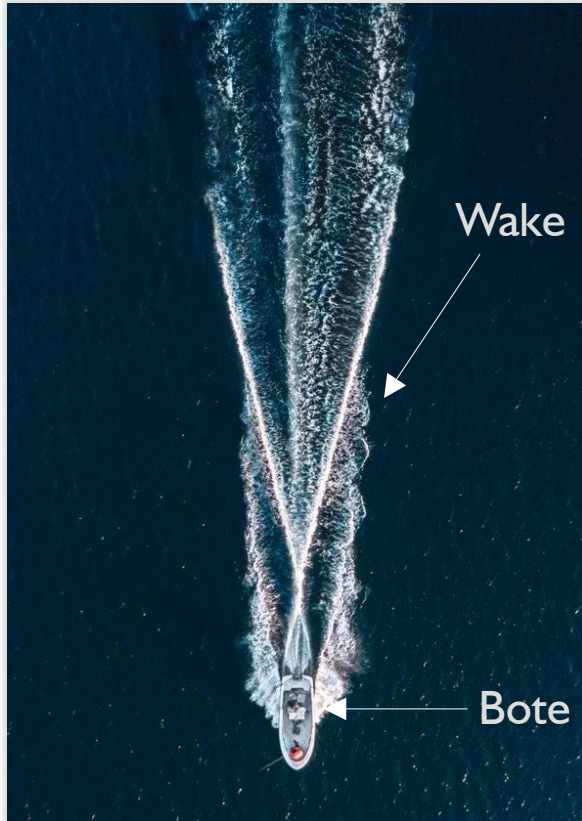


## LASER WAKEFIELD ACCELERATION

*T. Tajima & J.M. Dawson (PRL:1979)*



# ACELERACIÓN BASADA EN PLASMA



- Cuando el bote navega en el agua, genera una onda detrás de él, conocida como “Wake”.
- La velocidad de fase de la onda es la rapidez del bote.
- Por lo que podemos usar un pulso láser que viaja a cerca de  $c$  en un plasma para impulsar una fuerte ola detrás de él.
- La onda en este caso es una oscilación electrónica en el plasma:

$$\omega_p = \left( \frac{n_0 e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

¡¡La formación del wake es similar a la estela de un bote en el agua !!

# ACELERACIÓN BASADA EN PLASMA

Wake



**Importante:**

Es la onda plásmica, wake, quien acelera las partículas cargadas, **NO** el pulso láser.



giphy.com



Partículas aceleradas

Sin el wake, No hay aceleración

# ACELERACIÓN BASADA EN PLASMA

¿Siempre hay aceleración?

Es necesario inyectar a las cargas  
electricas con una fase adecuada

$$0 < \zeta\kappa < \pi$$
$$\zeta = z - v_g t \quad \kappa = \frac{\omega_p}{v_g}$$

Calidad de los electrones acelerados

$$L = \lambda_p$$

Baja dispersión energética ~ Aceleración monoenergéticos

Régimen BlowOut: Se crean zonas completamente libres de electrones





# ACELERACIÓN BASADA EN PLASMA



El campo eléctrico que puede soportar un plasma depende fuertemente de la concentración electrónica

$$E_{max} = \frac{m_e c}{e} \omega_p$$
$$\omega_p^2 = \frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}$$

si  $n_e = 10^{18} / cm^3$

$$E_{max} \sim 96 GV/m$$

LINACs

$$E_{max} \sim 100 MV/m$$

$$E_{max}^{plasma} \sim 1000 E_{max}^{LINAC}$$

**ATRACTIVO:**

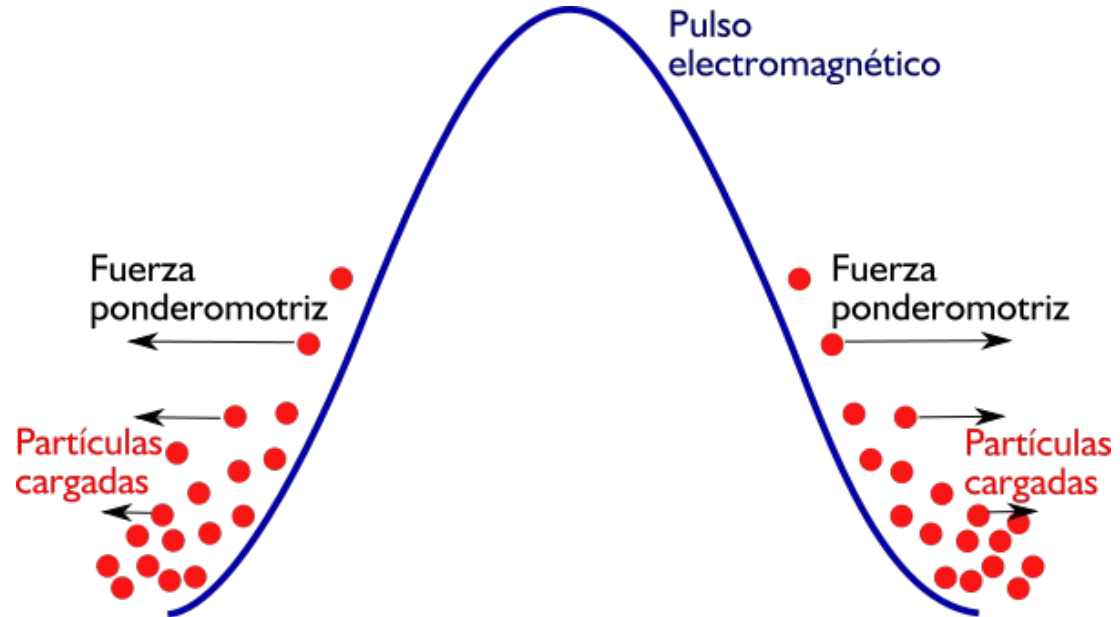
**Reducir drásticamente la longitud de aceleración  
respecto a los aceleradores convencionales**



# FUERZA PONDEROMOTRIZ

De naturaleza NO lineal

Surge de la interacción de  
un campo EM armónico  
con partículas cargadas  
eléctricamente



$$\mathbf{F}_{pond} = -\frac{q^2}{4\gamma m^2 \omega^2} \nabla [E^2(\mathbf{r})]$$

Desplazamiento de carga  
eléctrica a zonas de menor  
intensidad de campo EM

# FUERZA PONDEROMOTRIZ

1) Considerando  $q\mathbf{E}$  como fuerza primaria

2) Fuerza  $q\mathbf{V} \times \mathbf{B}$  como perturbación

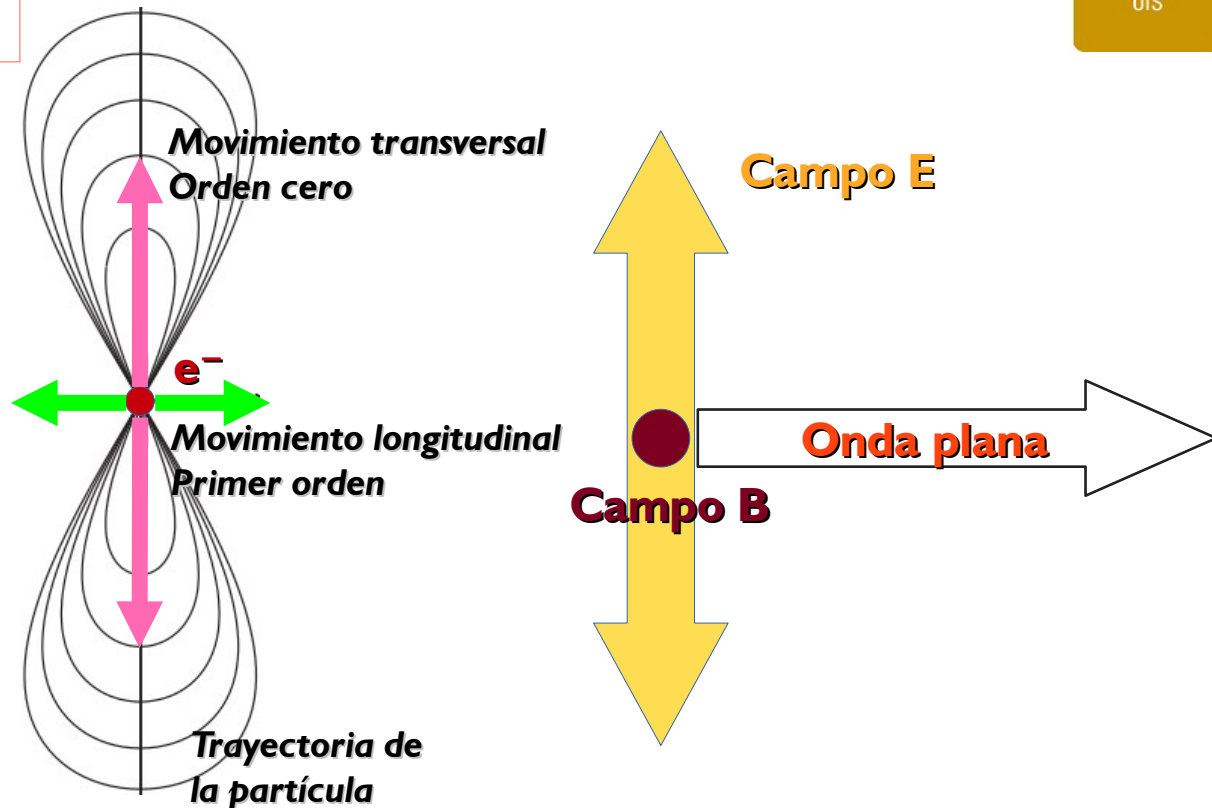
**La fuerza neta promedio es NULA**

**Pulsos**

Alta intensidad, aumenta la dinámica longitudinal

Corta duración: Altas variaciones, descompensación

$$\mathbf{F}_N \neq 0$$





La aceleración basada en plasma es un mecanismo en el que se emplea el campo eléctrico longitudinal de una **onda plásmica** de gran amplitud para acelerar partículas cargadas.

**Pulsos Láser**

**FORZADOR**

**Partículas cargadas**

El haz impulsor puede ser electrones o protones, cada uno tiene sus ventajas:

$$m_p \gg m_e$$

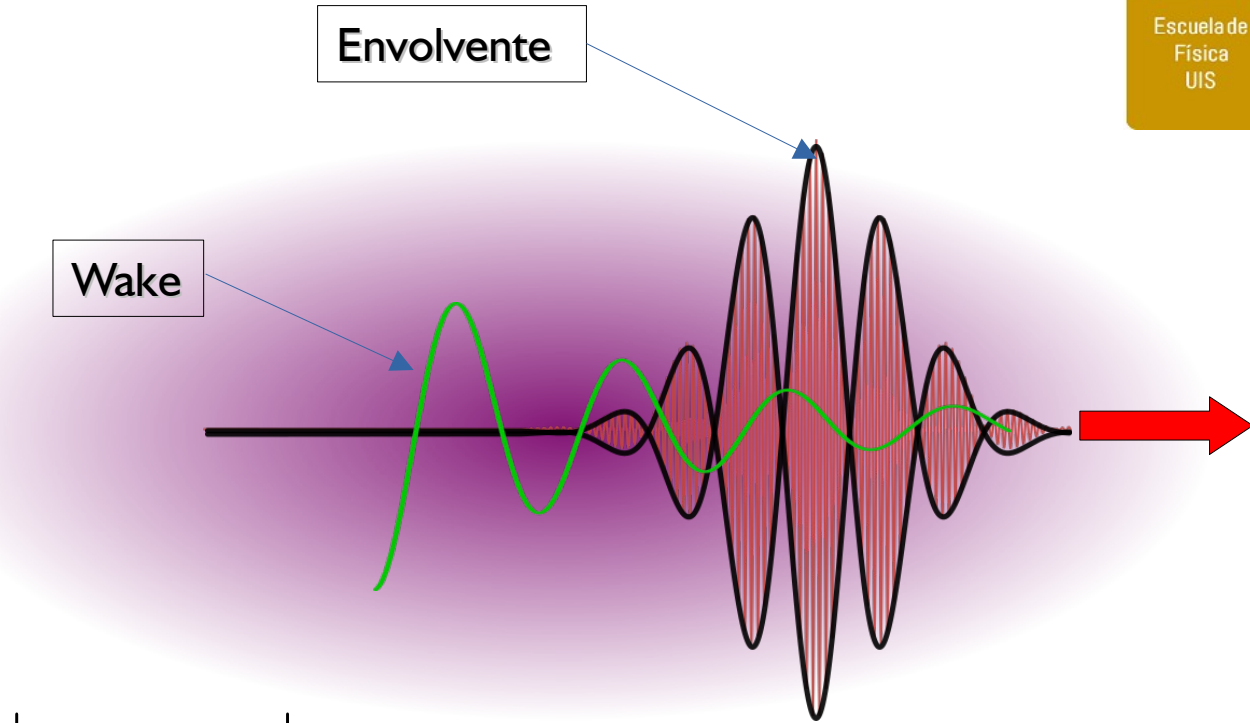
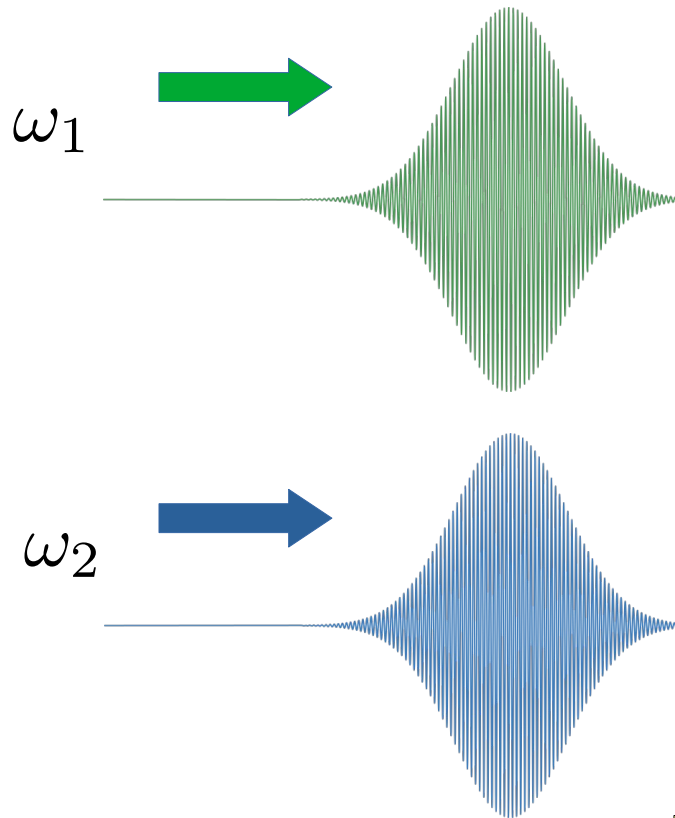
$$v_{ph}^{wake} = v_g^{laser} = c \sqrt{1 - \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^2}$$

**FRECUENCIA CRÍTICA**

1) Se inyecta un haz de partículas cargadas que genera el wake debido a la interacción coulombiana

2) Se inyecta un segundo haz de partículas cargadas adecuadamente para que sea acelerado por el campo del wake

# Laser Beat-Wave Acceleration: LBWA



$$|\omega_1 - \omega_2| = \omega_p$$

Generación del wakefield bajo la excitación resonante del plasma

# Self-Modulated Laser Wakefield Acceleration: SM-LWFA

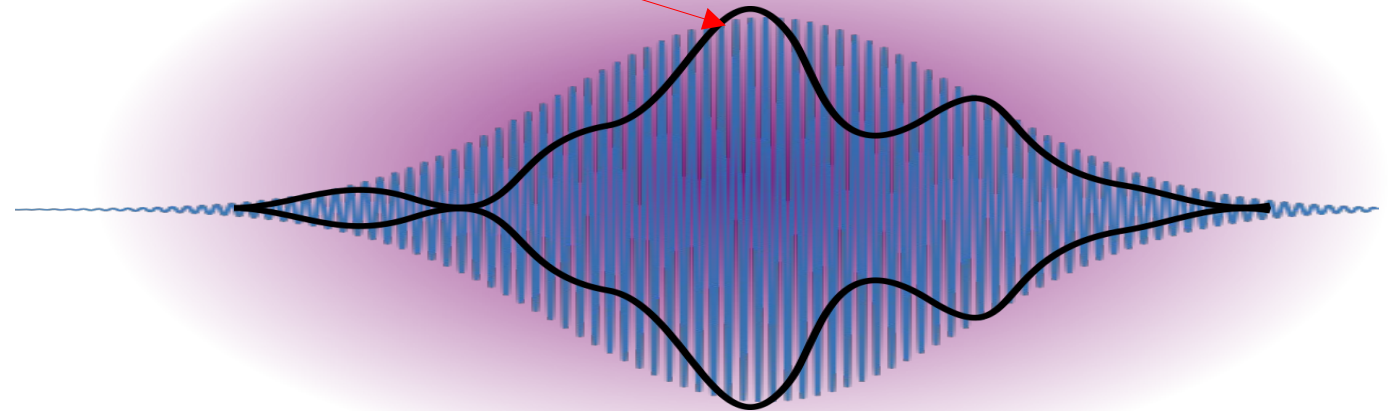
Se emplean pulsos láser de mayor duración en plasmas de **mayor concentración** respecto a los anteriores esquemas (LWFA & LBWA)

Wakefield es generado debido a la auto-modulación

El pulso láser es modulado a la frecuencia plásmica.

Automodulación del perfil envolvente

Mayor intensidad de campo para la aceleación



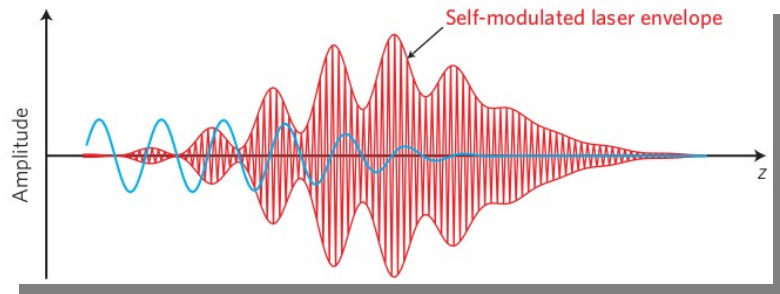
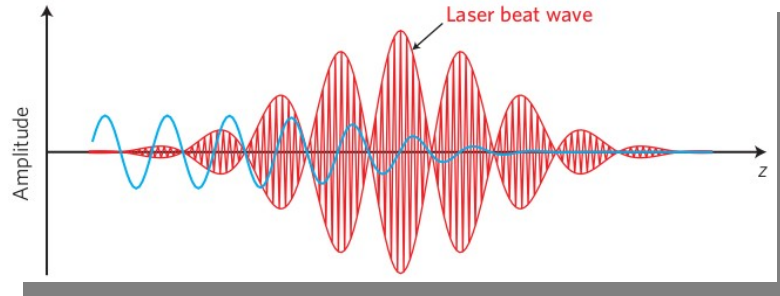
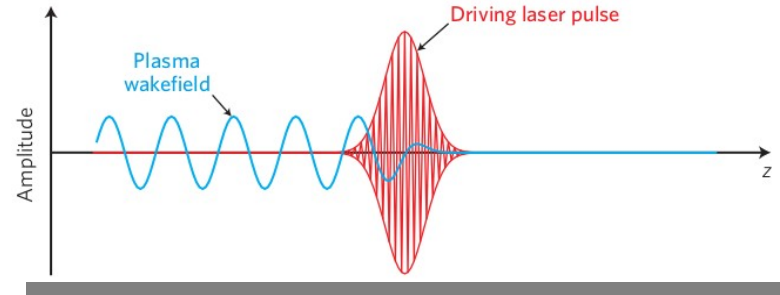


# Aceleración Wakefield impulsada por láser: (Resumen)

- \* Aceleración cuasi-monoenergética
- \* Pulsos muy cortos e intensos

- \* Pulsos láser de mayor duración
- \* Interacción resonante con el plasma

- \* Mayor intensidad del wakefield
- \* Baja calidad de electrones acelerados



# Plasma WakeField Acceleration: PWFA

Wakefield impulsado por partículas cargadas

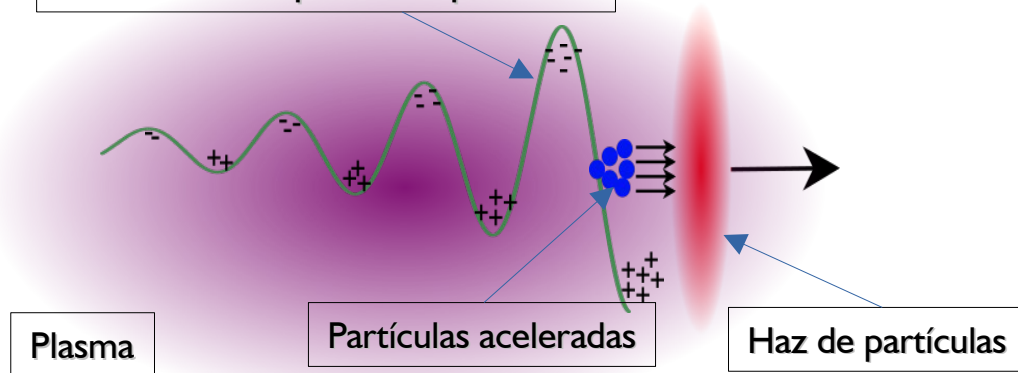
El haz impulsor puede ser electrones o protones, cada uno tiene sus ventajas:

$$m_p \gg m_e$$

1) Se inyecta un haz de partículas cargadas que genera el wake debido a la interacción coulombiana

2) Se inyecta un segundo haz de partículas cargadas adecuadamente para que sea acelerado por el campo del wake

Wake: tren de pozos de potencial



# Descripción teórica del fenómeno

La formación del wake se debe a la interacción NO lineal del agente forzador con el plasma

Propagación del forzador por el plasma genera la onda plásmica

TRANSFERENCIA DE ENERGÍA Y MOMENTO

FORZADOR

PLASMA

Fenómeno  
autoconsistente

Reducción en la amplitud y velocidad del forzador

Afectación directa de la amplitud y velocidad de fase del wakefield

# Descripción teórica del fenómeno



Dinámica 3D

Paralela: A lo largo de la dirección de propagación del forzador

Transversal: Efectos de focalización del haz acelerado

Efectos NO lineales

Ruptura de la onda plásmica: Posibilidad de auto-inyección de electrones

Dinámica autoconsistente

Transferencia de energía y momento

**MODELOS  
ANALÍTICOS**

Efectos relativistas

**MODELOS NUMÉRICOS / SIMULACIONES  
COMPUTACIONALES**





# Modelo analítico: Generación del wake por pulsos láser

## Modelo 1D, NO lineal y autoconsistente

R. Bingham and et. Al, 1992

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + v_z \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial z} = -e (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\mathbf{p} = m_e \gamma \mathbf{v}$$

$$\gamma = (1 + p^2/m_e^2 c^2)^{1/2}$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}_\perp}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \hat{\mathbf{z}}$$

$$\mathbf{A}_\perp = A_x \hat{\mathbf{x}} + A_y \hat{\mathbf{y}}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}_\perp$$

$$\gamma = \gamma_a \gamma_\parallel$$

$$\gamma_a = (1 + a^2)^{1/2}$$

$$\mathbf{a} = \frac{e}{m_e c} \mathbf{A}_\perp = \frac{\mathbf{p}_\perp}{m_e c}$$

$$\gamma_\parallel = (1 - \beta^2)^{-1/2}$$

$$\beta = v_z/c$$

El modelo incorpora las ecuaciones de continuidad, Poisson y de Onda para cerrar el sistema

$$\mathbf{a}(z, t) = \frac{1}{2} \mathbf{a}_o(\xi, \tau) e^{-i\theta}$$

propagación  
 $\theta = \omega_o t - k_o z$

Envolvente(forma del pulso)

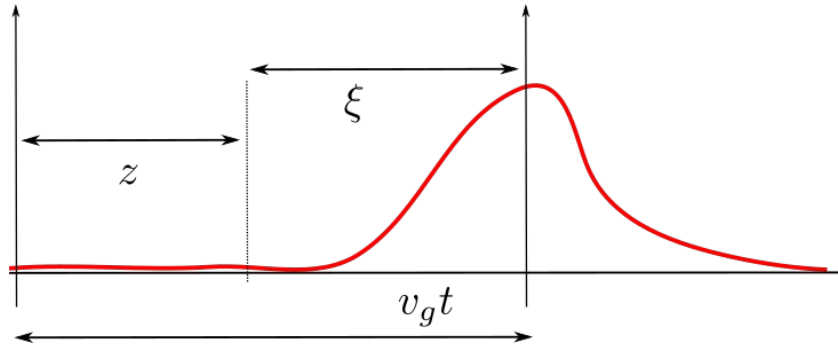
$$\xi = z - v_g t$$

$$v_g = \partial \omega_o / \partial k_o$$

# Modelo analítico: Generación del wake por pulsos láser

## Escalas propias del fenómeno

Espacial:  $\xi$



Temporal:  $\tau$

$$\omega_o^2 \gg a_o^{-1} \frac{\partial^2 a}{\partial \tau^2}$$

Aproximación cuasiestática:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rightarrow 0 \begin{cases} \text{Ecuación de continuidad} \\ \text{Ecuación de momentum} \end{cases}$$

$$\gamma_a \left( \gamma_{\parallel} - \beta_o \sqrt{\gamma_{\parallel}^2 - 1} \right) - \varphi = 1$$

$$n \left( \beta_o \gamma_{\parallel} - \sqrt{\gamma_{\parallel}^2 - 1} \right) = n_o \beta_o \gamma_{\parallel}$$

Constantes aproximadas del modelo

# Modelo analítico: Generación del wake por pulsos láser

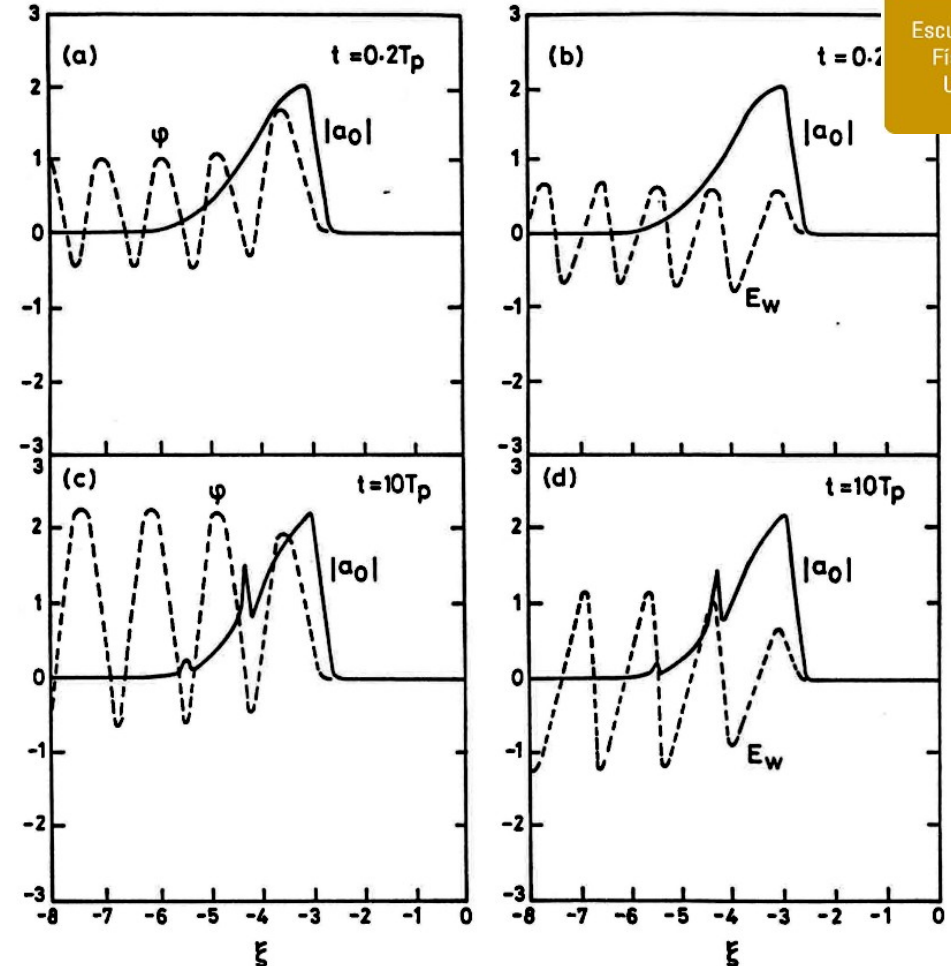
Finalmente el modelo queda completamente definido por la ecuación de Poisson y la ecuación de onda

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} = \frac{\omega_{po}^2}{c^2} G$$

$$2i\omega_o \frac{\partial a_o}{\partial \tau} + 2c\beta_o \frac{\partial^2 a_o}{\partial \tau \partial \xi} + \frac{c^2 \omega_{po}^2}{\omega_o^2} \frac{\partial^2 a_o}{\partial \xi^2} = -\omega_{po}^2 H a_o$$

$$G = \frac{\sqrt{\gamma_{\parallel}^2 - 1}}{\beta_o \gamma_{\parallel} - \sqrt{\gamma_{\parallel}^2 - 1}}$$

$$H = 1 - \frac{\beta_o}{\gamma_a (\beta_o \gamma_{\parallel} - \sqrt{\gamma_{\parallel}^2 - 1})}$$



# Modelo computacional: Simulación Particle In Cell

Las simulaciones PIC-EM (Particle In Cell ElectroMagnéticas) tridimensionales y relativistas resultan ser una de las mejores herramientas teóricas para estudiar la aceleración wakefield

Punto de partida: **Sistema de Vlasov-Maxwell**

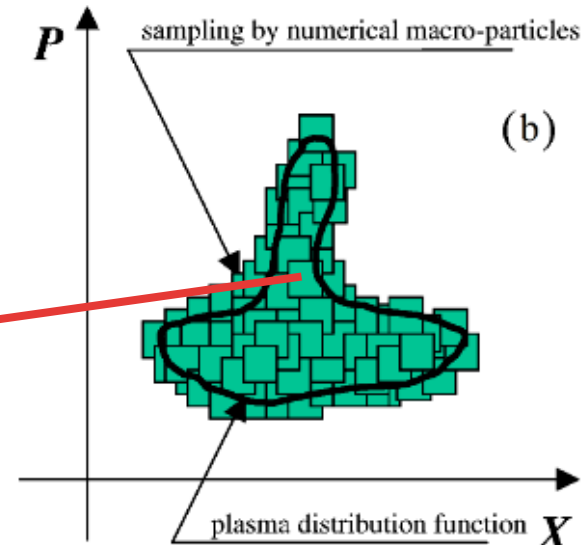
$$\bullet \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f_{\alpha} + \frac{q_{\alpha}}{m_{\alpha}} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_{\mathbf{v}} \frac{f_{\alpha}}{\gamma} = 0$$

$$\bullet \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\bullet \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} - \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

donde,  $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \sum_{\alpha} q_{\alpha} \int \gamma \mathbf{v} f_{\alpha} d\mathbf{v}$

$$f_{\alpha}(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = \sum_p f_p(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$$





# Modelo computacional: Simulación Particle In Cell

SuperPartícula:

$$f_p(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = N_p S_r(\mathbf{r} - \mathbf{r}_p(t)) \delta(\mathbf{v} - \mathbf{v}_p(t))$$

$$S_r(\mathbf{r} - \mathbf{r}_p(t)) = \prod_{j=1}^3 b_0 \left( \frac{x_j - x_{jp}(t)}{\Delta x_j} \right)$$

La dinámica de cada SP está definida por la ecuación de Newton-Lorentz:

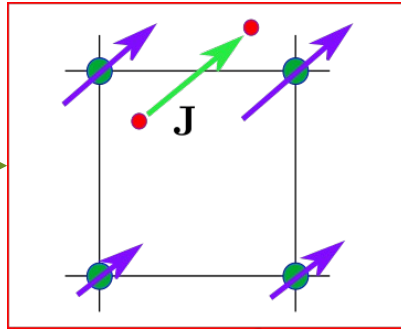
$$\frac{d\mathbf{r}_p}{dt} = \mathbf{v}_p, \quad \frac{d(\gamma m_s \mathbf{v}_p)}{dt} = q_s (\mathbf{E}_p + \mathbf{v}_p \times \mathbf{B}_p)$$

$$\mathbf{E}_p = \sum_g \mathbf{E}_g W(\mathbf{r}_g - \mathbf{r}_p) d\mathbf{r}$$

$$W(\mathbf{r}_g - \mathbf{r}_p) = \prod_{j=1}^3 b_1 \left( \frac{x_{jg} - x_{jp}(t)}{\Delta x_j} \right)$$

Campos promediados que satisfacen los momentos de la ecuación de Vlasov

# Modelo computacional: Simulación Particle In Cell



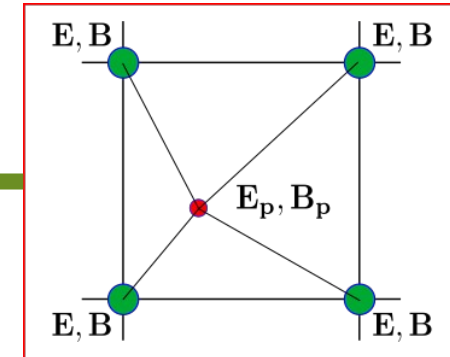
1) Cálculo de la densidad de corriente en los puntos de malla

2) Cálculo de los campos eléctricos y magnéticos autoconsistentes en los puntos de malla

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E}^{\text{sc}} &= -\frac{\partial \mathbf{B}^{\text{sc}}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B}^{\text{sc}} &= \mu_o \mathbf{J} - \mu_o \epsilon_o \frac{\partial \mathbf{E}^{\text{sc}}}{\partial t}\end{aligned}$$

4) Movimiento de las superpartículas: Cálculo de nuevas posiciones y velocidades

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{r}_p}{dt} &= \mathbf{v}_p \\ \frac{d(\gamma m_s \mathbf{v}_p)}{dt} &= q_s (\mathbf{E}_p + \mathbf{v}_p \times \mathbf{B}_p)\end{aligned}$$



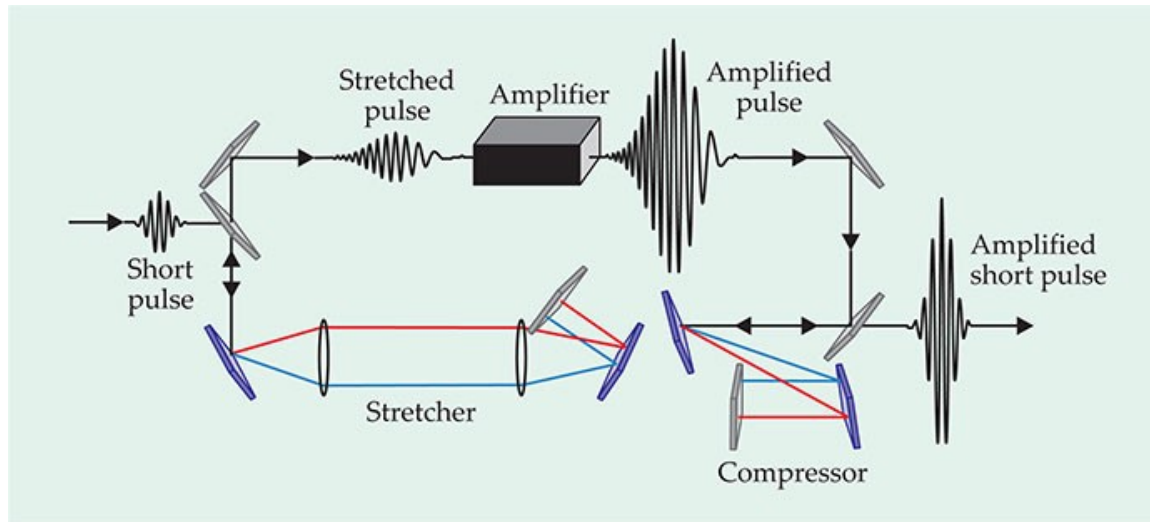
3) Cálculo de los campos E y B netos en la posición de la superpartícula

**1979:** Tajima y Dawson propusieron la aceleración wakefield - LWFA

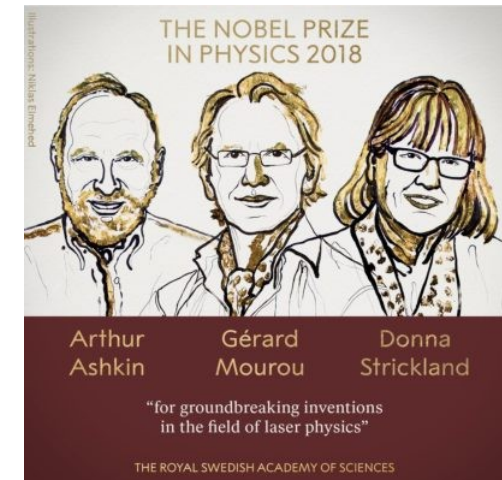
**Inviabile para la época**

**1985,** Universidad de California:  
**Primera evidencia experimental**

Se propone el esquema LBWA como alternativa



**1985:** Se desarrolla la técnica  
**chirped pulse amplification-(CPA)**  
por Strickland y Mourou



En el **2004 se presentó la primera evidencia experimental** de la generación del wakefield por pulsos láser para la aceleración de electrones (LWFA)

## High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding

**C. G. R. Geddes<sup>1,2</sup>, Cs. Toth<sup>1</sup>, J. van Tilborg<sup>1,3</sup>, E. Esarey<sup>1</sup>, C. B. Schroeder<sup>1</sup>, D. Bruhwiler<sup>4</sup>, C. Nieter<sup>4</sup>, J. Cary<sup>4,5</sup> & W. P. Leemans<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Road, Berkeley, California 94720, USA

<sup>2</sup>University of California, Berkeley, California 94720, USA

<sup>3</sup>Technische Universiteit Eindhoven, Postbus 513, 5600 MB Eindhoven, the Netherlands

<sup>4</sup>Tech-X Corporation, 5621 Arapahoe Ave. Suite A, Boulder, Colorado 80303, USA

<sup>5</sup>University of Colorado, Boulder, Colorado 80309, USA

## A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams

**J. Faure<sup>1</sup>, Y. Glinec<sup>1</sup>, A. Pukhov<sup>2</sup>, S. Kiselev<sup>2</sup>, S. Gordienko<sup>2</sup>, E. Lefebvre<sup>3</sup>, J.-P. Rousseau<sup>1</sup>, F. Burgy<sup>1</sup> & V. Malka<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Laboratoire d'Optique Appliquée, Ecole Polytechnique, ENSTA, CNRS, UMR 7639, 91761 Palaiseau, France

<sup>2</sup>Institut für Theoretische Physik, 1, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 40225 Düsseldorf, Germany

<sup>3</sup>Département de Physique Théorique et Appliquée, CEA/DAM Ile-de-France, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

## Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions

**S. P. D. Mangles<sup>1</sup>, C. D. Murphy<sup>1,2</sup>, Z. Najmudin<sup>1</sup>, A. G. R. Thomas<sup>1</sup>, J. L. Collier<sup>2</sup>, A. E. Dangor<sup>1</sup>, E. J. Divall<sup>2</sup>, P. S. Foster<sup>2</sup>, J. G. Gallacher<sup>3</sup>, C. J. Hooker<sup>2</sup>, D. A. Jaroszynski<sup>3</sup>, A. J. Langley<sup>2</sup>, W. B. Mori<sup>4</sup>, P. A. Norreys<sup>2</sup>, F. S. Tsung<sup>4</sup>, R. Viskup<sup>3</sup>, B. R. Walton<sup>1</sup> & K. Krushelnick<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>The Blackett Laboratory, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK

<sup>2</sup>Central Laser Facility, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxon, OX11 0QX, UK

<sup>3</sup>Department of Physics, University of Strathclyde, Glasgow G4 0NG, UK

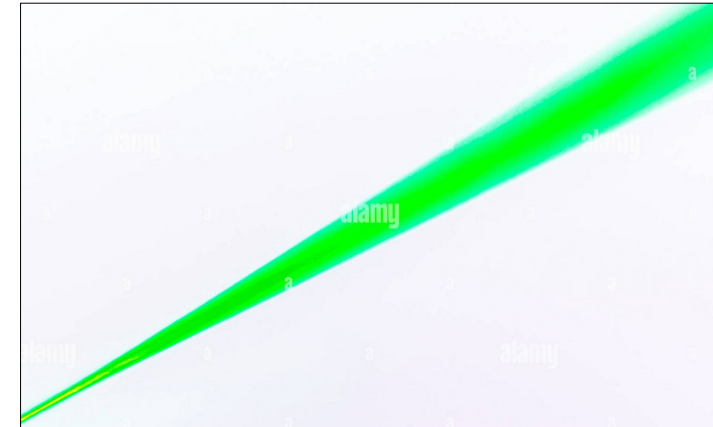
<sup>4</sup>Department of Physics and Astronomy, UCLA, Los Angeles, California 90095, USA



Actualmente el esquema LWFA es la técnica más empleada por dos grandes razones:

- Las técnicas **LBWA** y **SM-LWFA** excitan resonantemente el wake y al aumentar considerablemente la velocidad de las partículas estas **pierden la condición de resonancia**, imponiendo así un **limitante** en la amplitud del wakefield
- Un pulso láser de corta duración propensa a la **aceleración monoenergética** de los electrones, este fenómeno se conoce como **régimen BlowOut**

**Limitante: divergencia del haz**, de modo que el área de enfoque (spot) se incrementa a medida que el pulso se propaga en el plasma debido a la difracción, limitando así, la distancia efectiva de aceleración



El **récord** energético actual de electrones acelerados por este mecanismo es de **7,8GeV** obtenidos en el Laboratorio **BELLA** - Berkeley Lab Laser Accelerator en el **2019**

Pulso láser con un pico de potencia de **0.85PW** y divergencia de **0.2mrad**

$$n \sim 10 \times 10^{17} cm^{-3}$$

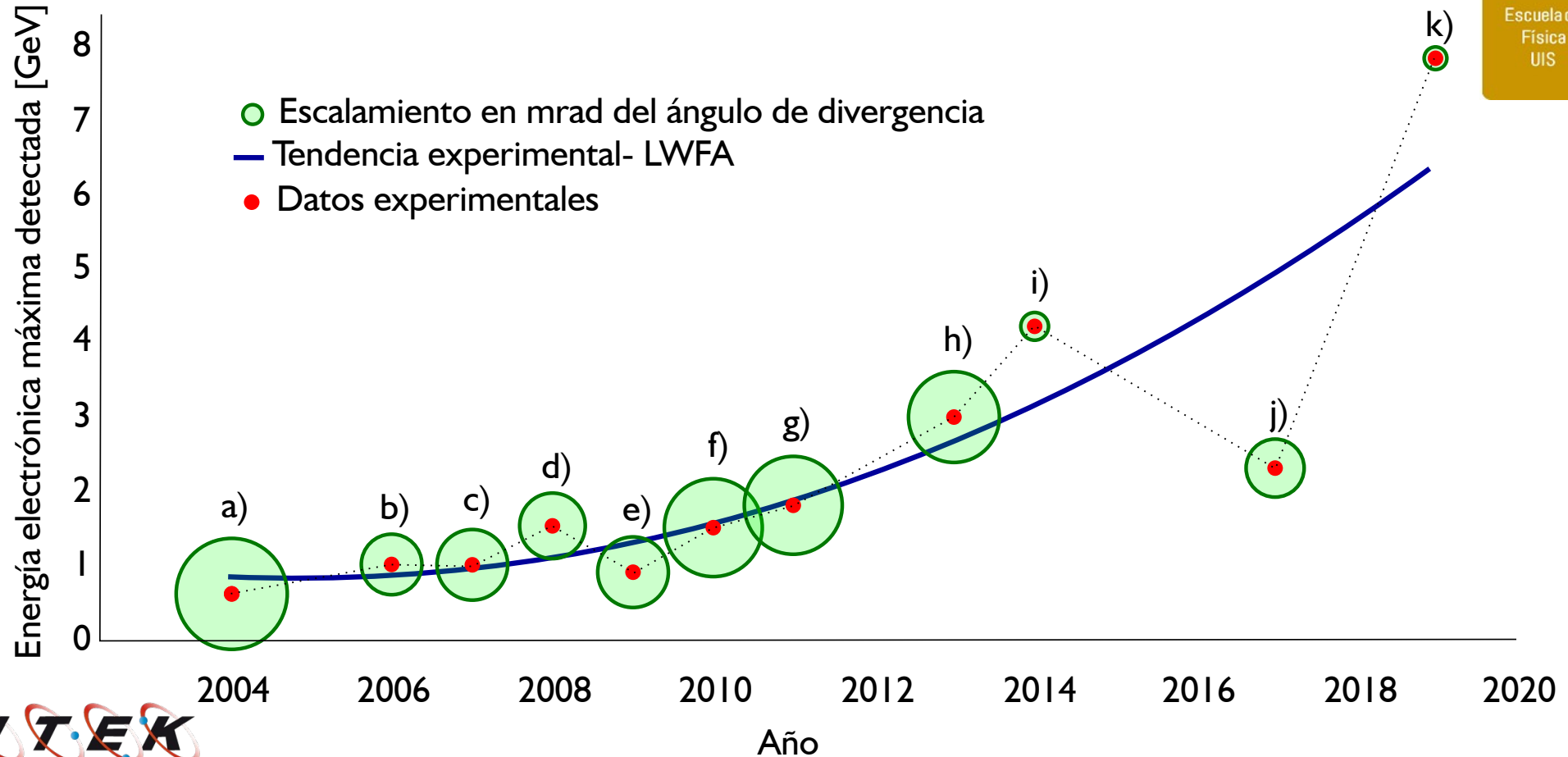
El éxito de este experimento se centra en la mejora de las técnicas de guiado de pulsos láser de clase PW, reduciendo su divergencia

En **DESY** - Deutsches Elektronen-Synchrotron se logró demostrar la gran estabilidad operacional del mecanismo

Aceleración de una nube electrónica cada segundo durante 30 horas aprox.

**368MeV**

Experimento	Año	Energía alcanzada [GeV]	Gradiente de aceleración [GeV/m]	Ángulo de divergencia [mrad]
a) Faure, J. et al. [88]	2004	0.17	57	10
b) Leemans, W. P. et al. [93]	2006	1	30	1.6
c) Karsch, et al. [94]	2007	1	66	2
d) Hafz, N. A. M. et al. [95]	2008	1.5	300	1.8
e) Froula, D. H. et al. [96]	2009	0.72	90	2.85
f) Clayton, C. E. et al. [97]	2010	1.45	111	4.4
g) Lu, H. et al. [98]	2011	1.8	45	4.5
h) Kim, H. T. et al. [99]	2013	3	300	4
i) BELLA, (2014) [92]	2014	4.2	46	0.3
j) Kim, H. T. et al. [100]	2017	2.3	230	1.4
k) BELLA, (2019) [91]	2019	7.8	86	0.2





**1988**, Laboratorio nacional de Agonne: **Primera evidencia experimental de la aceleración impulsada por partículas**

VOLUME 61, NUMBER 1

PHYSICAL REVIEW LETTERS

4 JULY 1988

## Experimental Observation of Plasma Wake-Field Acceleration

J. B. Rosenzweig, D. B. Cline, <sup>(a)</sup> B. Cole, <sup>(b)</sup> H. Figueroa, <sup>(c)</sup> W. Gai, R. Konecny, J. Norem, P. Schoessow, and J. Simpson

*High Energy Physics Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439*  
(Received 21 March 1988)

We report the first experimental test of the physics of plasma wake-field acceleration performed at the Argonne National Laboratory Advanced Accelerator Test Facility. Megavolt-per-meter plasma wake fields are excited by a intense 21-MeV, multipicosecond bunch of electrons in a plasma of density  $n_e \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , and probed by a low-intensity 15-MeV witness pulse with a variable delay time behind the intense bunch. Accelerating and deflecting wake-field measurements are presented, and the results compared to theoretical predictions.

PACS numbers: 52.75.Di, 52.40.Mj

El récord actual lo se le atribuye al experimento realizado en el SLAC en el 2007

Electrones acelerados hasta **84 GeV** en un plasma con  $n \sim 2.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  con una nube electrónica impulsora de **42 GeV**.

[Published: 15 February 2007](#)

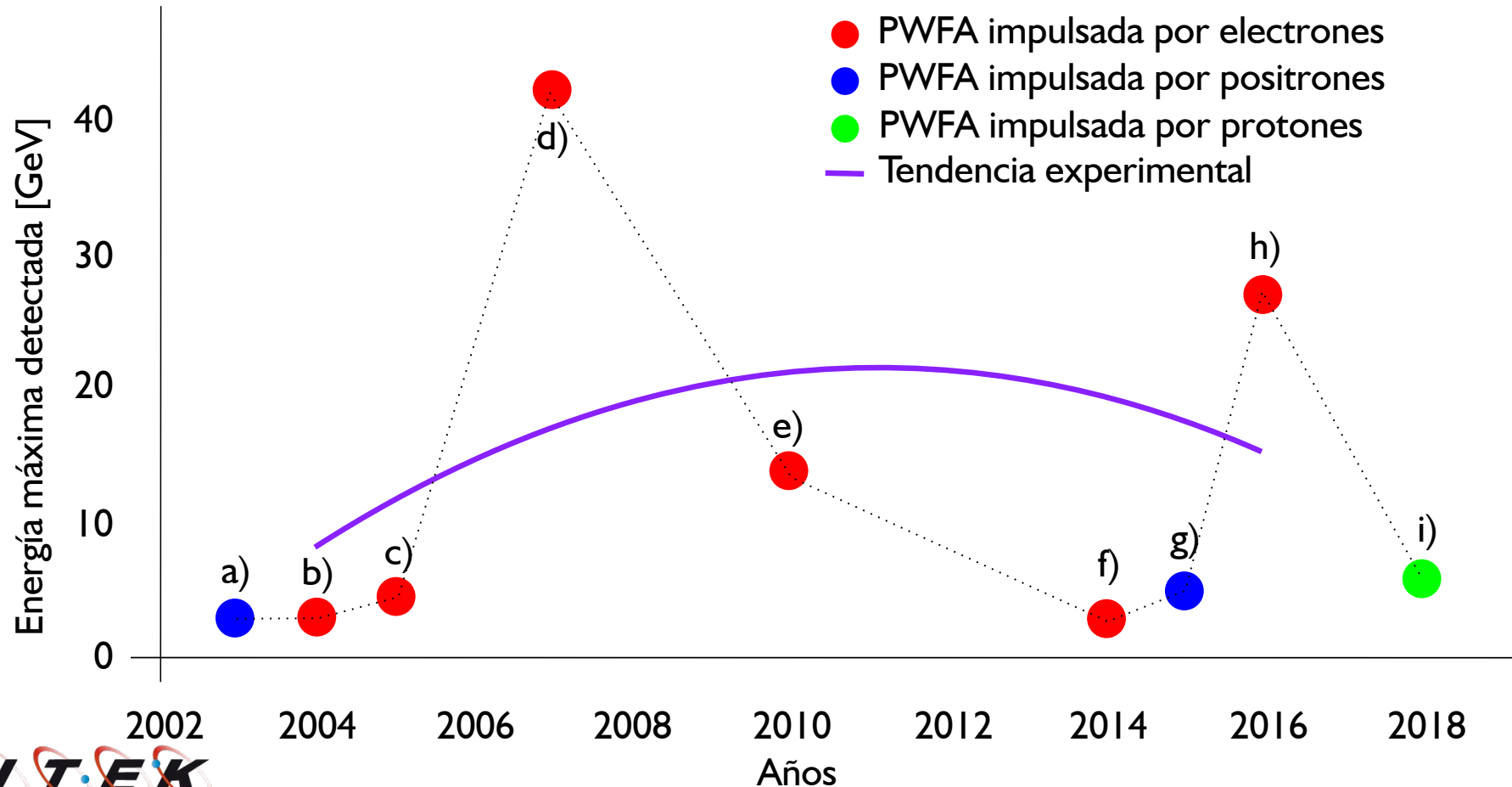
## Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator

[Ian Blumenfeld](#), [Christopher E. Clayton](#), [Franz-Josef Decker](#), [Mark J. Hogan](#), [Chengkun Huang](#), [Rasmus Ischebeck](#), [Richard Iverson](#), [Chandrashekhar Joshi](#) , [Thomas Katsouleas](#), [Neil Kirby](#), [Wei Lu](#), [Kenneth A. Marsh](#), [Warren B. Mori](#), [Patric Muggli](#), [Erdem Oz](#), [Robert H. Siemann](#), [Dieter Walz](#) & [Miaomiao Zhou](#)

[Nature](#) **445**, 741–744 (2007) | [Cite this article](#)

**5416** Accesses | **570** Citations | **49** Altmetric | [Metrics](#)

Experimento	Año	Energía ganada [GeV]	Gradiente de acel. [GeV/m]	Partícula impulsora	Energía haz impulsor [GeV]
a) Blue, B. E. et al [108]	2003	0.08	0.056	Positrón	28.5
b) Muggli, P. et al. [109]	2004	0.28	0.2	Electrón	28.5
c) Hogan, M. J. et al. [110]	2005	2.7	27	Electrón	28.5
d) Blumenfeld, I. et al. [107]	2007	42	52	Electrón	42
e) Muggli, P. et al. [111]	2010	14	36	Electrón	28.5
f) Litos, M. et al. [112]	2014	1.6	4.4	Electrón	28.5
g) Corde, S. et al. [113]	2015	5	1.3	Positrón	20.35
h) Corde, S. et al. [114]	2016	27	150	Electrón	20.35
i) Adli, E. et al. [115]	2018	2	0.2	Protón	400



En los experimentos **PWFA** la energía final es mayor que en los experimentos **LWFA**

- 1) La energía de las partículas impulsoras es del mismo orden que la energía de las partículas aceleradas  $\sim \text{GeV}$
- 2) los gradientes de aceleración son significativamente menores

La aceleración basada en pulsos láser muy intensos y de corta duración es más atractiva

La aceleración impulsada por **protones** se está implementando y se tiene grandes expectativas debido a que protones con gran energía pueden generar altos gradientes de aceleración

En general, la aceleración wakefield aunque eficiente, requiere de instrumentación sofisticada

Implementación experimental costosa

Las microondas se postulan como una alternativa de bajo presupuesto

- \* Generadores de pulsos láser ultra-intensos y de corta duración
- \* Partículas altamente aceleradas
- \* Dispositivos para la medición en escalas temporales ultra-rápidas

Gracias al avance en el desarrollo de pulsos de microondas cortos y potencia  $\sim$  GW

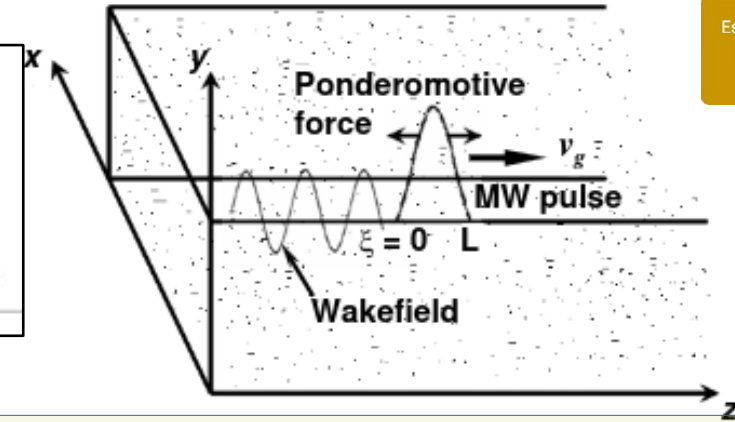
En guías de ondas, la energía EM se mantiene en una área fija. Mitiga el problema de difracción.



## Numerical studies on wakefield excited by Gaussian-like microwave pulse in a plasma filled waveguide

Anil K. Aria, Hitendra K. Malik \*

Plasma Waves and Particle Acceleration Laboratory, Department of Physics, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi 110016, India



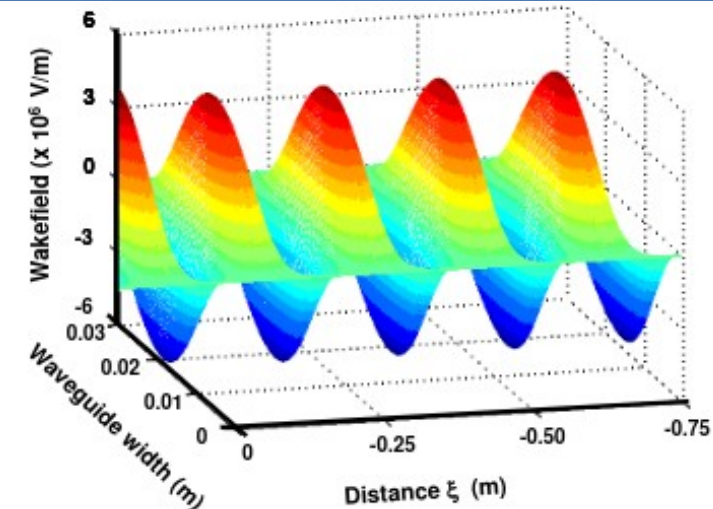
$$\phi'' + \frac{c}{2mv_g^2}\phi^2 + \frac{\omega_p^2}{v_g^2}\phi - \frac{1}{2}\left(\frac{E_0^2 c^2 e}{mv_g^4}\right)\sin^2\left(\frac{\pi x}{b}\right) \times \left[ \left(1 - \frac{v_g^2}{c^2}\right) [1 + \cos\{2\pi(\xi - L/2)/L\}]^2 - \frac{\pi^2}{b^2} \left(\xi + \frac{L}{2\pi} \sin\{2\pi(\xi - L/2)/L\}\right)^2 \right] = 0$$

Open Access

## Wakefield Generation in a Plasma Filled Rectangular Waveguide

Anil Kumar Aria and Hitendra Kumar Malik \*

Plasma Waves and Particle Acceleration Laboratory, Department of Physics, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi-110 016, India





## A CONCEPTUAL DESIGN OF A COMPACT WAKEFIELD ACCELERATOR FOR A HIGH REPETITION RATE MULTI USER X-RAY FREE-ELECTRON LASER FACILITY\*


A. Zholents<sup>†</sup>, S. Doran, W. Jansma, M. Kasa, R. Kustom, A. Nassiri, J. Power, S. Sorsher,  
N. Strelnikov, K. Suthar, E. Trakhtenberg, I. Vasserman, G. Walschmidt, J. Xu,  
Argonne National Laboratory, Lemont, IL, USA  
S.S. Baturin, the University of Chicago, PSD Enrico Fermi Institute, Chicago, IL, USA  
H. Perez, Illinois Institute of Technology, Chicago, IL, USA

### Design of a cylindrical corrugated waveguide for a collinear wakefield accelerator

A. Siy<sup>1,2,\*</sup>, N. Behdad<sup>1</sup>, J. Booske<sup>1</sup>, G. Walschmidt<sup>2</sup> and A. Zholents<sup>2,†</sup>

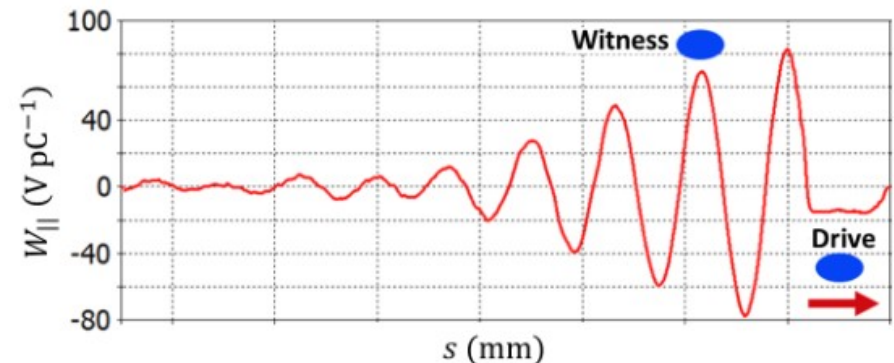
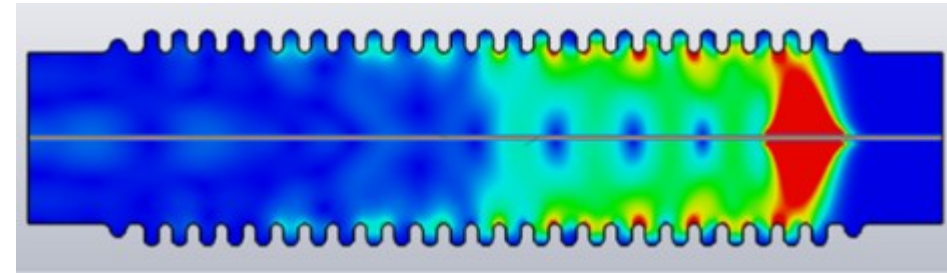
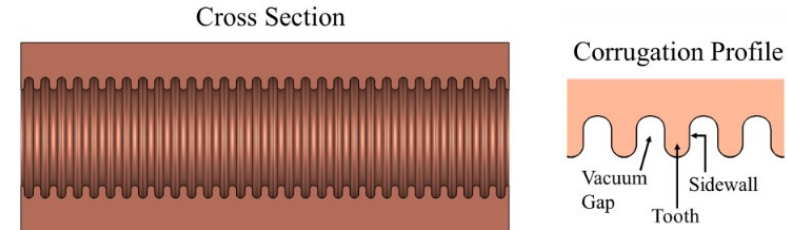
<sup>1</sup>University of Wisconsin, Madison, Wisconsin 53715, USA

<sup>2</sup>Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439, USA

 (Received 30 May 2022; accepted 7 November 2022; published 7 December 2022)



Física y Tecnología del Plasma y Corrosión



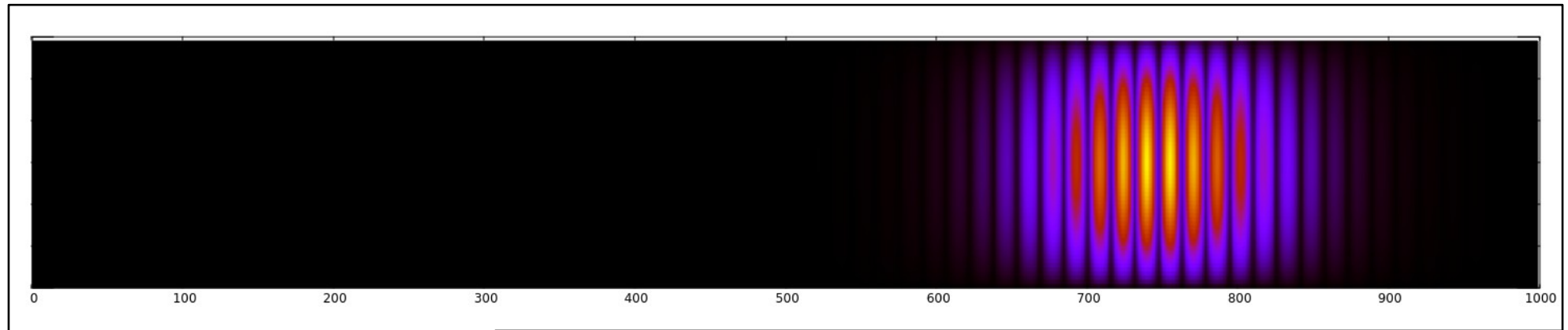
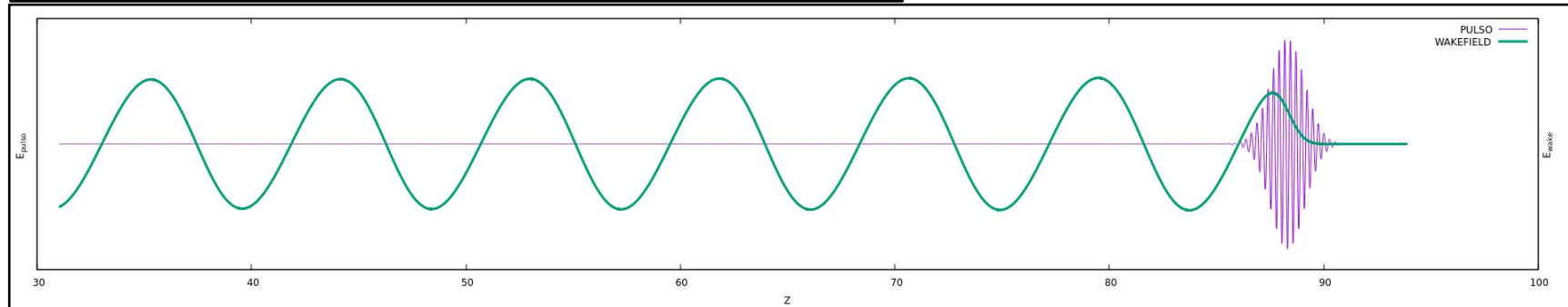


¿Pueden acelerarse electrones mediante wakefields generados por pulsos de microondas intensos y de corta duración en un plasma de baja densidad en una guía de ondas, de modo que permitan proyectar este esquema de aceleración como la base de funcionamiento de generadores de rayos X compactos; e incluso, promover a la investigación experimental de este fenómeno con tecnologías menos sofisticadas?

## Objetivo general

Simular computacionalmente la aceleración de electrones por wakefields generados por pulsos de microondas en una guía de onda rectangular llena de plasma

## Simulación unidimensional: LWFA. PIC-EM-ID



## Simulación 3D: Pulso de microondas en guía rectangular. Modo $TE_{10}$

**Aceleración wakefield:** Base del desarrollo de la nueva generación de aceleradores

## METAS

**Aceleradores de alta energía:**  
Alcanzar energías  $\sim$  TeV

Alcanzar energías  $\sim$  100 GeV

**Desarrollo tecnológico:**  
Fuentes de radiación compactas

## RETOS

Aumentar la potencia de los pulsos, o aumentar su repetición

Diseño e implementación eficiente y de costo accesible



# GRACIAS!