Introduction to Accelerators and Accelerator Technology SLAC SULI Program talk

J.D. Fox^{1,2}

SULI Tour Contributors:

J. D. Fox^{1,2}, R. Ericson¹, K. Jobe¹, J. Nelson¹, D. Rattner¹

¹Accelerator Research Department, SLAC ²Applied Physics, Stanford University Accelerators

Linear accelera

accelerators Ci

What is an Accelerator?

- Particle Accelerators and Light sources
- A brief History, Applications
 - Principles, Technology of Linear accelerators
 - Principles, technology of Circular Accelerators
- A digression on
 - Harmonic Oscillators
 - Electromagnetic resonators
 - RF cavities for LINACS and Circular Machines
- LINACS
- Circular Accelerators
- Summary
- SLAC Tour

Historical Background over 200 years

- Electrostatic forces cat fur/rubber rods. silk/amber. glass/silk etc ۰
- Crooke's Tubes, crude cathode ray tubes, etc.
- Ising/Wideroe develop linear accelerators, multi-stage acceleration 1920's ٠
- Van de Graff, Crockcroft-Walton, Lawrence-Livingston (cyclotron), Varian(s) Klystron -1930's
- Betatrons, Microwave Linacs, Synchrotrons 1940's
- Alternating Gradient Focusing, technology 1950's
- SLAC Linac 1960's
- Colliding Beam Machines (Frascati-Princeton-Stanford), proton synchrotrons (CERN, • Fermilab)-1970's
- Light sources (SSRL as adjunct to SPEAR) 1970's
- PEP-LEP-DESY colliders, Colliding Linacs (SLC) 1980's, 1990's
- Dedicated Light Sources, (NSLS, ALS, many others) - 1980's 1990's
- B-factory Colliders (SLAC, KEK) Proton-antiproton colliders (Fermilab, CERN) 1990's ۰
- LHC, FEL (Linac) 2000's
- SLAC Summer Science program - 2013

э

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < □ > <

Wavelengths and energy, cross-sections



lar accelerators Tour Pla

Energy Frontier vs. Time



- So what's the log plot telling us?
- This is an Energy Frontier - what about Intensity?

< 17 ▶

ъ

Linear accelera

Tour Plan

Particle accelerator basics

• To generate Accelerated Charged particles you need

- Source of charged particles
- Longitudinal E-Field
- Trajectory control or particle guidance
- Target or Exit port

• Example Electrostatic Accelerator



< 一 →

Lorentz forces

A charged particle (electron, bowling ball, anything) experiences a force if it is in an electric field

F=qE

A moving charged particle in a magnetic field experiences a force as well

$\mathbf{F} = \mathbf{q}(\mathbf{v} \mathbf{X} \mathbf{B})$

Since a current in a wire consists of moving charges, a wire carrying a current (electrons) in a magnetic field experiences a force

$\mathbf{F}=\mathbf{i}(\mathbf{I} \mathbf{X} \mathbf{B})$



- Force from E Field (direction?)
- Force From B and moving charge (direction?)
- Force on a wire? what can we do with this?
- What's this got to do with Accelerators?

Cathode-Ray Tubes



Fig. 2-6.—Two common forms of cathode-ray tubes. (a) Electrostatic deflection-type cathode-ray tube with electron gun designed for zero current to focusing electrode (first ande). (b) Magnetic deflection-type cathode-ray tube with tetrode electron gun.

Linear accelerate

How high can you go this way? (been to the Museum of Science in Boston?)

THE VAN DE GRAAFF GENERATOR

FIG. 21-7. Schematic diagram of a Van de Graaff generator.

Can generate MV DC voltages



FIG. 21-8. Photograph of the Van de Graaff generator at the Massachusetts Institute of Technology. The column at the left houses an installation like that in Fig. 21-7. (Courtesy of M.I.T. News Service.)

Suppose you want more? What limits?

J. D. Fox

Harmonic Oscillators, a review

Equation of motion
$$\ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 = f(t)$$
 where $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Damping term γ proportional to \dot{x}



Parallel RLC Circuit



FIGURE 6.2

A parallel RLC resonator and its response. (a) The parallel RLC circuit. (b) The input impedance magnitude versus frequency.

Fields in a capacitor





æ

・ロト ・回ト ・ヨト ・ヨト

turn an RLC into a cavity



Use RF cavities in a LINAC





Fig. 2.8. Disk loaded accelerating structure for an electron linear accelerator (schematic)

- A time varying Electric (Magnetic) field
- Why? at resonance build up very large voltage
- Fields oscillate at resonance frequency
- To accelerate particles must arrive at proper time
- How do you get the RF in?

→ Ξ →

< 17 ▶

Magnetic field as a guide element



- Field uniform in volume
- What is the Lorentz force? What direction?
- What is the equivalent of "chromatic aberration?"

・ ロ ト ・ 同 ト ・ 回 ト ・

.⊒ →

Quadrupole Magnetic field as a guide element









∃→ < ∃→

- Field proportional to r linear thin lens
- What is the equivalent of "chromatic aberration?"
- Is this the same in both x,y planes?

The SLAC Linac



In the Tunnel (downstairs) ۰



- In the Galery(upstairs)
- 270 60 MW power sources feed the accelerating structure

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

J. D. Fox

Circular Accelerators

Basic Idea - use one accelerating gap many times - get nX the voltage



- Required components
- Vacuum chamber
- Injection System
- Trajectory Control and Focusing
- Accelerating Structure
- External RF power source
- (extraction system, or colliding target, or synchrotron light port)

J. D. Fox

Linear accelera

Cyclotrons and history





< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

• Cyclotron with "D" RF electrodes

- Lawrence and Team in Berkeley
- That's a big magnet and volume

Elements of a circular accelerator or storage ring

Particle trajectories are contained within the vacuum chamber.

Dipole magnets bend the trajectories so that particle at the nominal energy follows the design orbit. Additional magnetic elements provide transverse focusing.

Energy loss via synchrotron radiation is restored in the RF cavity. The power lost in synchrotron radiation can be a useful important tool for materials science, protein structure determination, other applications of synchrotron radiation. It can be megawatts of heat to get rid of for high-energy colliders.

Intensity is proportional to the number of particles stored in the ring - usually expressed as beam current.



< ロ > < 同 > < 回 > < 回 >

The trajectories of the particles are the results of restoring mechanisms and excitation mechanisms. The particles will oscillate around a "design orbit" - transverse motion is called betatron oscillation, Energy or longitudinal motion is called synchrotron motion. If either type of oscillation gets too large the particles can be lost from the system.

Accelerators

ression on resonato

Linear accele

Circular accelerators Tour Pla

The LHC and CERN Accelerator Complex





(日)

Accelerators Accelerator

Acceleration and RF cavities

- Energy is added to the particles in RF cavities, with Oscillatory longitudinal RF fields
- Synchronous Phase position which slope has stability?
 - Storage ring (constant energy) make up any losses from synchrotron radiation
 - Accelerator add energy to particle



Limiting Factors

- Accelerating E-field maximum voltage, breakdown effects
- RF power technologies, RF cavity issues (breakdown voltages, cooling)
- Rf cavity Material issues (superconducting vs. normal conducting)
- Linac Energy set by length of linear accelerator, number of accelerating cavities
- Synchrotron Energy set be bending field, radius, (available RF voltage?)
- Synchrotron stored current set by RF power and radiated power
- Trajectory control limits dynamics due to imperfections, magnet technology field quality and strength
- \$\$

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Accelerators

A digression on resonators

Linear accelerato

Diagnostics and Control

- Important to understand what is happening - this is complicated
- Extensive instruments, control system
 - Particle Intensity (number of particles or a current)
 - Trajectory
 - Energy and energy spread (distributions)
 - Transverse distributions
- With Instrumentation and Diagnostics you have a Control System



• □ ▶ • (□ ▶ • □ ▶)

Today's Tour

- Stop 1 LINAC Visitor's Alcove. A special spot upstairs, with a mock-up of what's downstairs we can see the accelerating structure, the waveguide feeds, magnets, diagnostics, etc.
- Stop 2 Main Control Center
- Stop 3 NLCTA test accelerator. A special test facility where new ideas are developed. See the injector, acceleration by RF and plasma, optical methods, diagnostics
- Stop 4 LCLS Undulator gallery see where special periodic magnets shake the LINAC beam to amplify X-ray radiation

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < □ > <

To Learn More

- many wonderful and interesting details on electromagnetics and charged particles are in the Feynman Lectures on Physics
- Electricity and Magnetism Purcell, Berkeley Physics series
- Particle Accelerator Physics Wiedemann
- SLAC Publication 121, The Physics of Electron Storage Rings -An Introduction by Matt Sands
- In today's informal talk I have freely used figures from Feynman,Wiedemann, Sears and Zemansky, Sands and others without proper attribution. I thanks them for their generosity and good will for this informal use.

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >