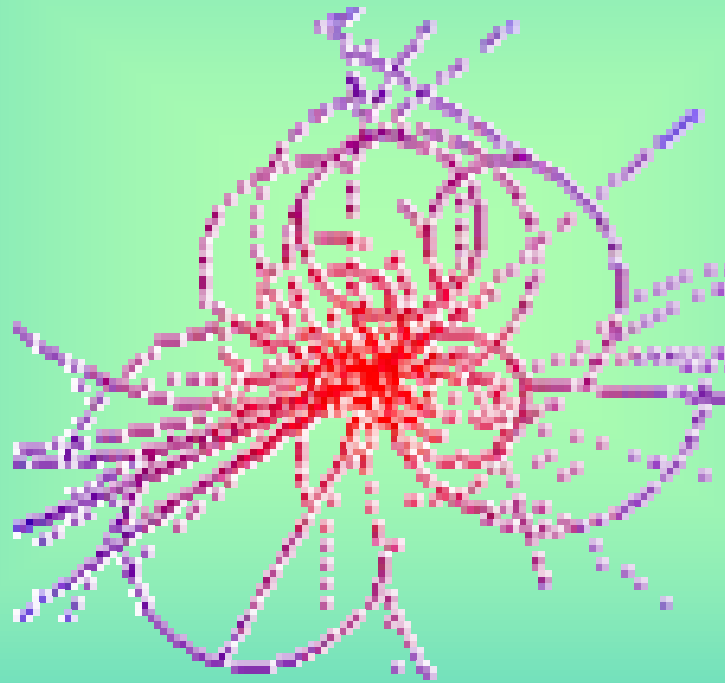
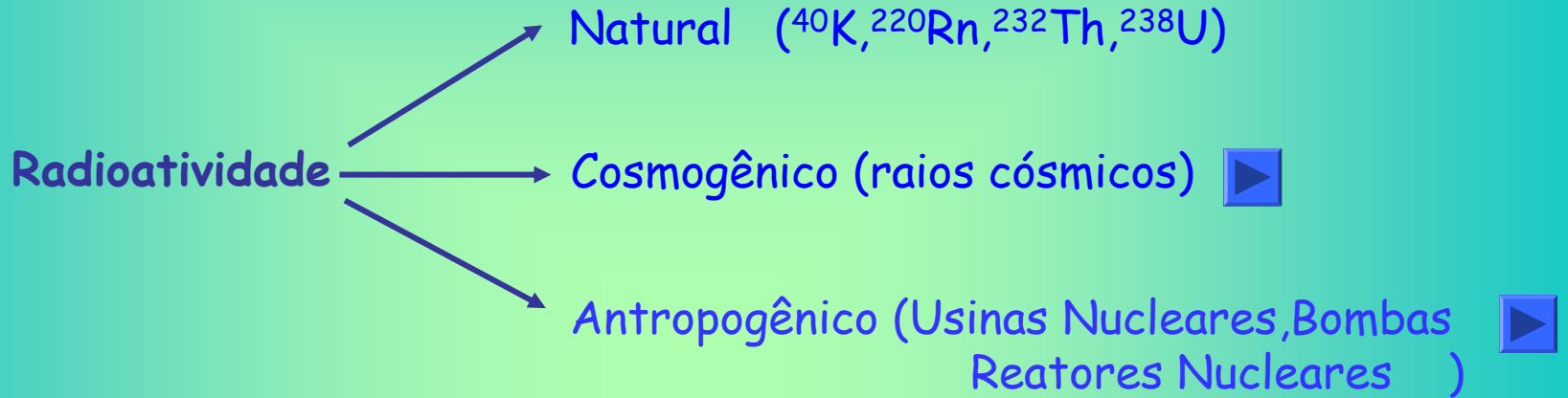


Interação da radiação com a matéria



Raphael Liguori Neto

Fontes de Radiação



Reações Nucleares → Reactores Nucleares e Aceleradores ▶

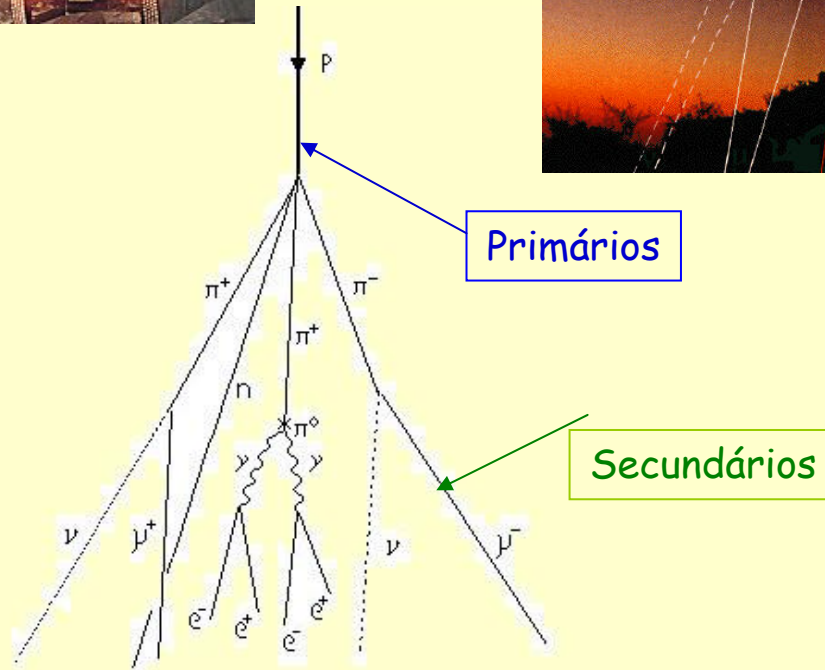
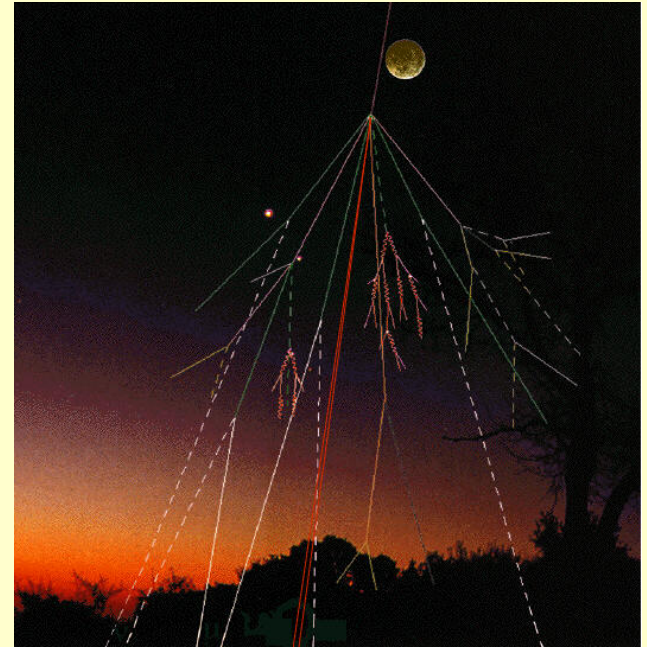
Raios C3smicos

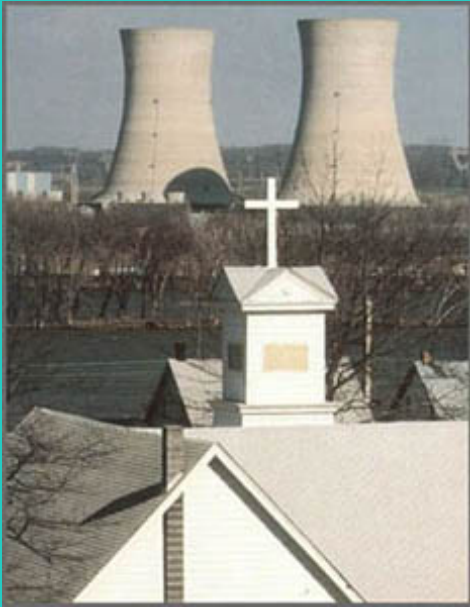
Baixa energia

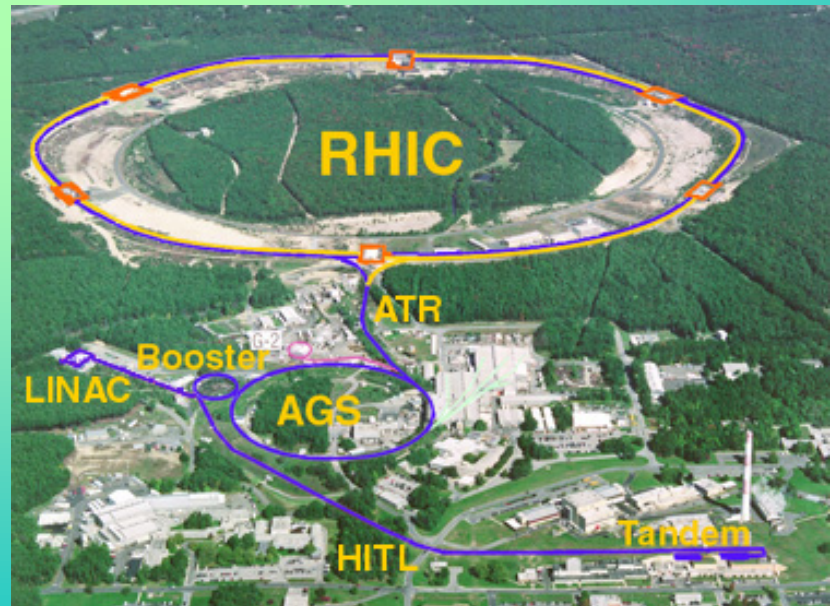


Aurora Boreal

Alta energia







Que Matéria?

**A radiação é democrática e não discriminatória:
interage com tudo e com todos!**

Para os físicos interessa principalmente:

1) Interação com materiais biológicos

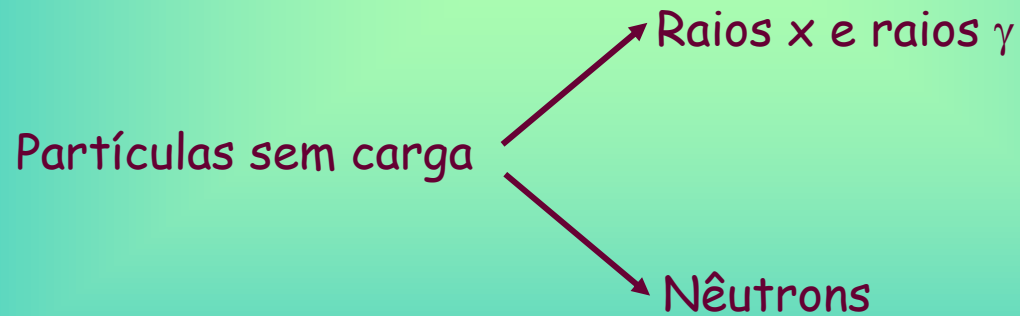
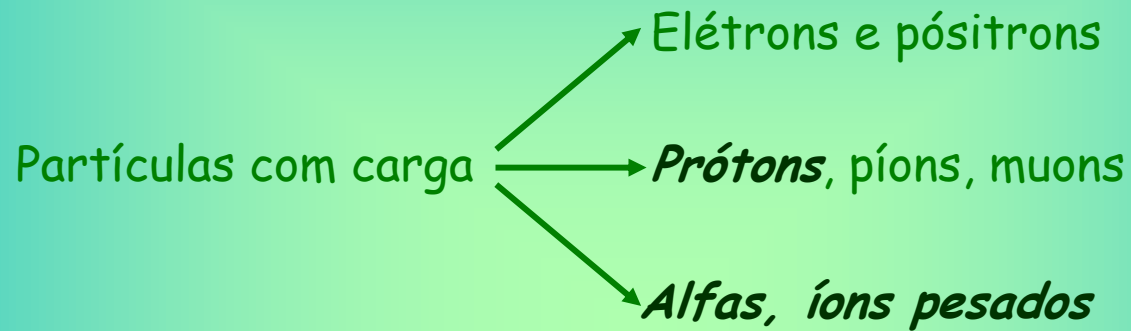
- a) Radioterapia**
- b) Diagnósticos**

2) Interação com materiais orgânicos ou inorgânicos

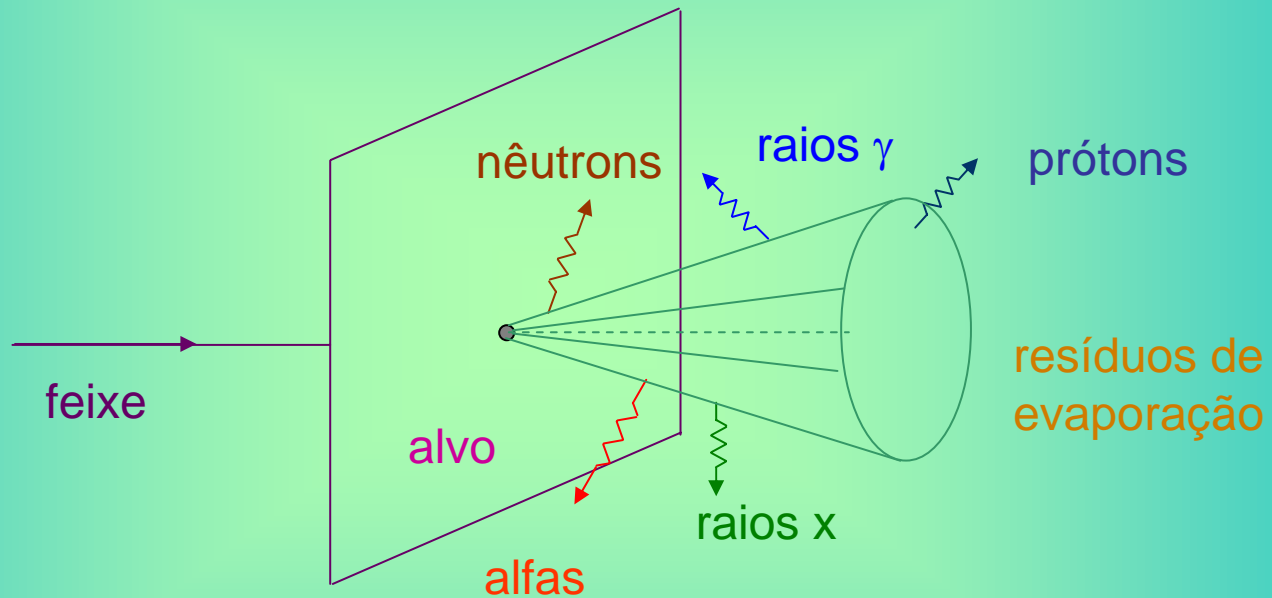
- a) Modificação de materiais**
- b) Proteção Radiológica**
- c) Detecção e Identificação**

Cada tipo de radiação interage de maneira diferente com os diferentes materiais

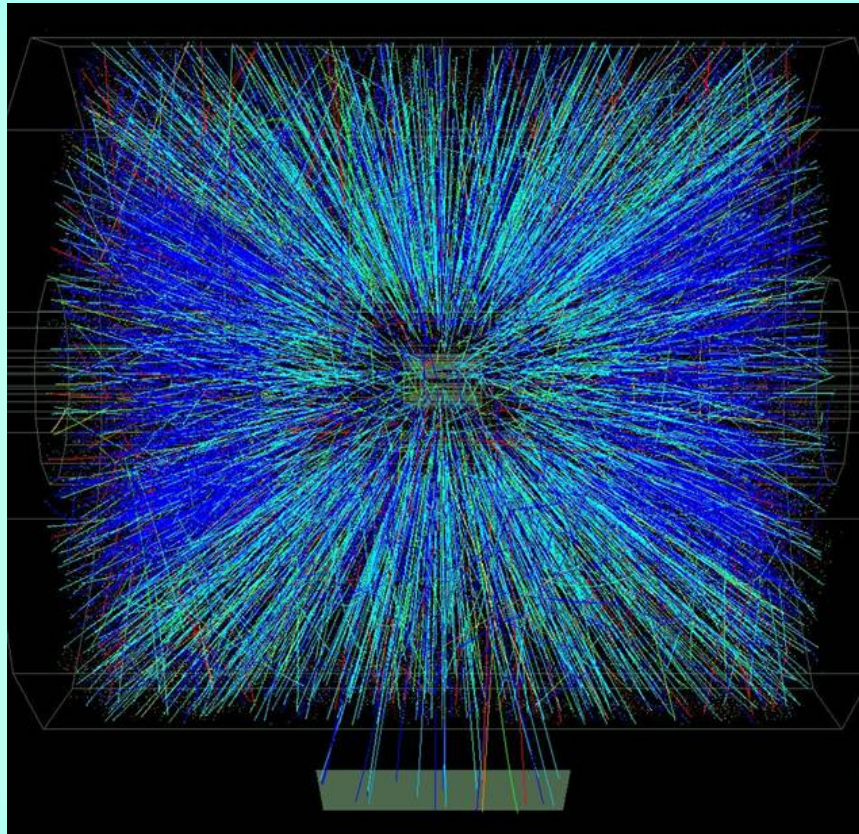
Tipos de Radiação



Colisão de íons pesados em baixas energias



Colisão de íons pesados relativísticos



Tipos de Interação

A radiação "enxerga" a matéria em termos de seus constituintes microscópicos, ou seja, como um agregado de átomos, seus núcleos e elétrons. As interações da radiação com matéria são regidas, portanto, pelas leis da mecânica quântica, que permitem calcular a probabilidade de cada uma das possíveis interações.

Interação predominante

Partículas carregadas → Interação eletromagnética (Coulomb)

Partículas sem carga → Interação com átomos e elétrons
para raios x e raios γ
→ Interação com os núcleos atômicos
para nêutrons

Algumas definições e conceitos

- 1) Energia - Unidade no SI - Joule (J)
Física Nuclear e Partículas - eV (MeV, GeV)
 $1 \text{ MeV} \Rightarrow 1,6 \times 10^{-13} \text{ J}$

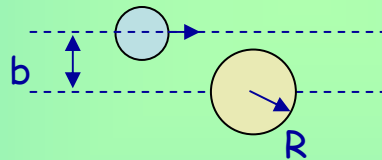
Feixe de ^{16}O com 64 MeV de Energia $\Rightarrow v/c \sim 0,089$

(RHIC - ^{197}Au - $E \sim 200 \text{ GeV}/n \Rightarrow v/c = 0.99995$)



- 2) Secção de Choque - medida da probabilidade para cada tipo de interação

Visão Clássica



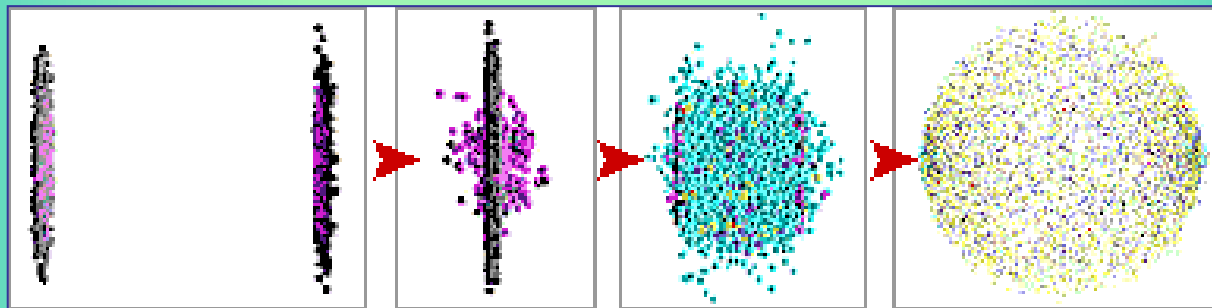
$\sigma = \pi R^2$ (Secção de choque geométrica) [σ]=Área

E a Quântica?

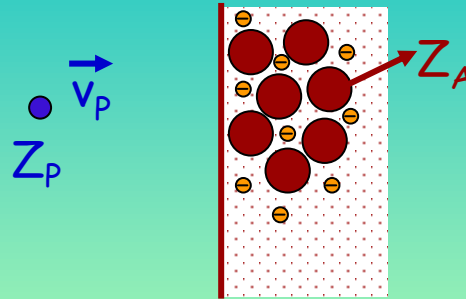
Embora a visão geométrica não seja correta
o conceito de secção de choque permanece

Valores típicos de σ : 10^{-16} cm^2 (atômico) 10^{-26} cm^2 (nuclear)
A secção de choque depende fortemente da energia : $\sigma = \sigma(E)$
(1 barn = 10^{-24} cm^2)





Interação de partículas carregadas com a matéria



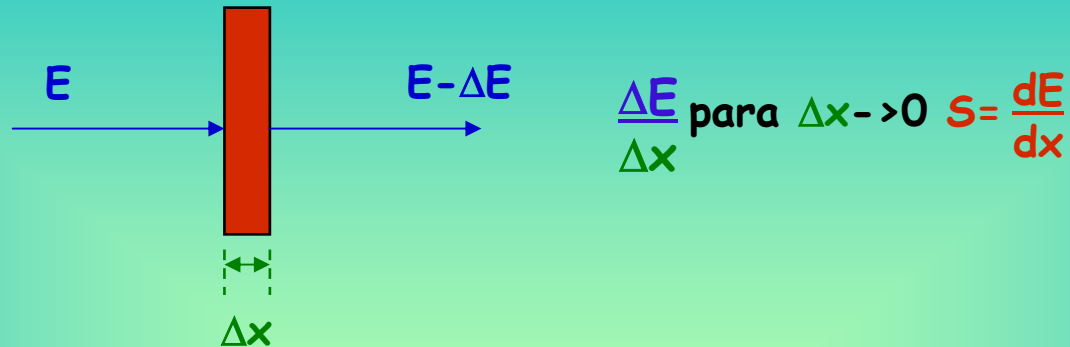
Interação Eletromagnética

- 1) Entre a **carga nuclear do projétil** com **elétrons** do alvo. Através de colisões inelásticas a energia do projétil é transferida para os elétrons do alvo (excitação ou ionização).
- 2) Entre a **carga nuclear do projétil** e do **alvo**. Através de colisões elásticas a energia do projétil é transferida para os núcleos do alvo.

Os processos acima tem natureza estatística, com probabilidade calculada através da mecânica quântica. Nas colisões inelásticas a secção de choque é elevada ($\sigma \sim 10^{-16} - 10^{-17} \text{ cm}^2$), e o número de colisões por caminho unitário é muito grande. Deste modo as flutuações na perda de energia total é pequena e podemos utilizar o conceito de energia perdida média por caminho unitário.

*Esta grandeza, dE/dx , é conhecida como **stopping power**, ou **poder de freamento***

Interpretação física do poder de freamento

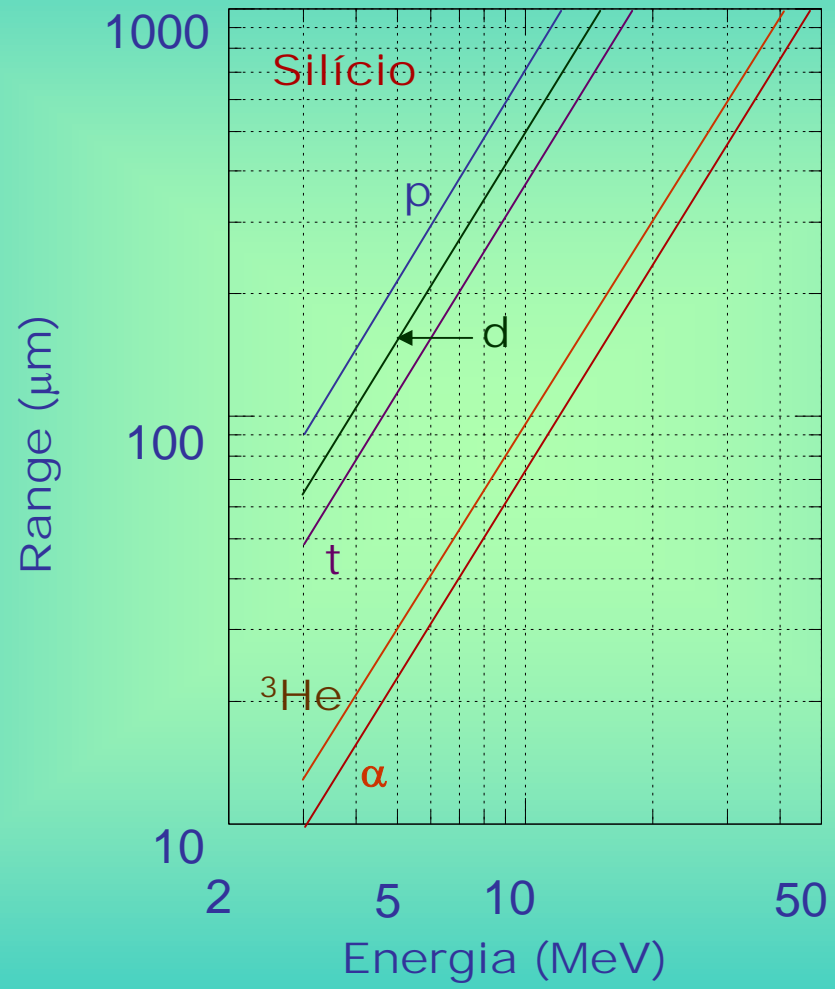


Poder de freamento: força média que atuando sobre a partícula reduz a sua energia cinética.

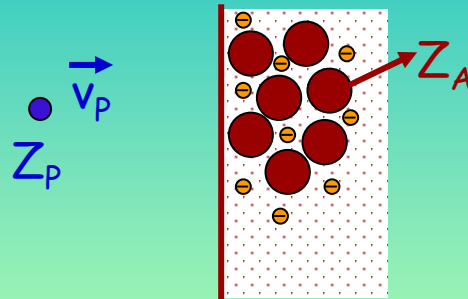
Mass stopping power: $S = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$, ρ -> densidade de massa

Unidades de poder de freamento : *MeV/cm ; eV/A ; MeV/mg/cm²*

Grandeza importante : Alcance $R = \int_E^0 \left(-\frac{dE'}{dx} \right)^{-1} dE' = \int_E^0 \left(-S(E') \right)^{-1} dE'$



Interação de partículas carregadas com a matéria



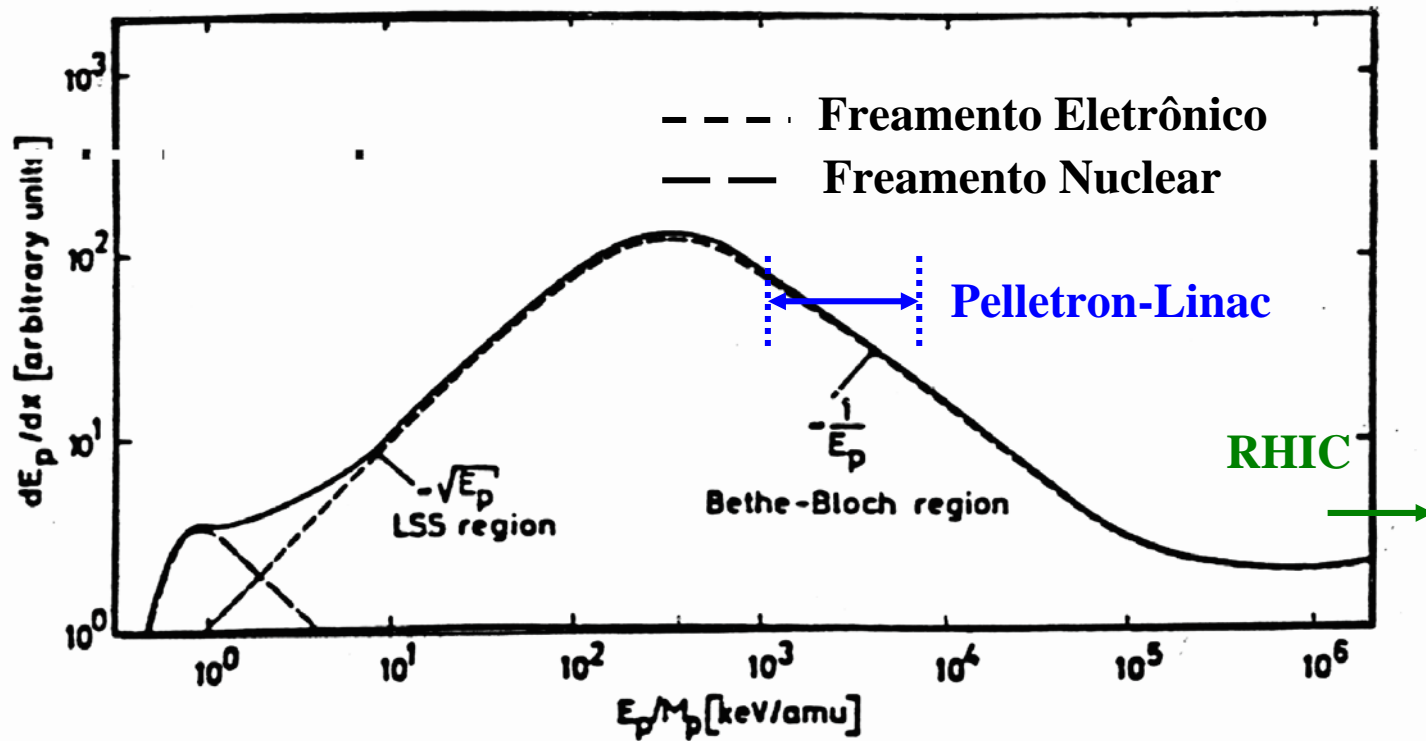
- 1) Entre a **carga nuclear do projétil** com **elétrons** do alvo. Através de colisões inelásticas a energia do projétil é transferida para os elétrons do alvo (excitação ou ionização).

Freamento Eletrônico - $S_e(E)$: Mecanismo predominante

- 2) Entre a **carga nuclear do projétil** e do **alvo**. Através de colisões elásticas a energia do projétil é transferida para os núcleos do alvo.

**Freamento nuclear: $S_n(E)$ Somentemente relevante em baixas energias
($E \sim \text{keV/n}$ -Região de implantação iônica)**

Comportamento típico do poder de freamento para qualquer combinação de projétil e alvo



Freamento Eletrônico para Prótons

A energia do projétil é transferida para os elétrons dmeio freador
(*excitação e ionização*)

Energias intermediárias e altas : **Bethe-Bloch** (início do século passado).

$$S_e = \frac{4\pi\pi_P^2 Z_T e^2}{m_e v_P^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e v_P^2}{I} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(1 - \frac{v_P^2}{c^2} \right) - \frac{v_P^2}{c^2} + \sum c_i \right]$$

Energia de ionização Correções relativísticas Correções de camada

Baixas energias : **Lindhart, Sharff e Schiott (LSS)**

$$S_e = Z_P^{1/6} 8\pi\pi^2 a_0 \frac{Z_P Z_T}{\left(Z_P^{2/3} + Z_T^{2/3} \right)^{3/2}} \frac{v_P}{v_0} = kv_P$$

a_0 e v_0 - raio e velocidade de Bohr

Resultados anteriores válidos para projétil (próton) completamente ionizado.
Íons pesados : carga efetiva.

$$Z_P^* = \gamma Z_P ; 0 < \gamma \leq 1$$

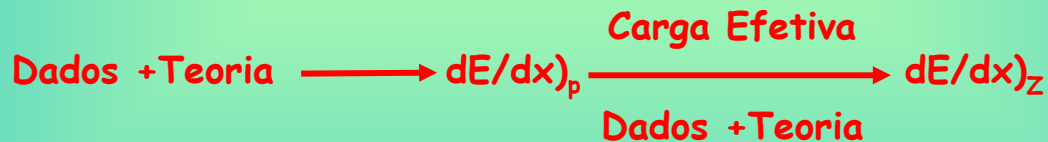
Para diferentes íons A e B (mesma velocidade):

$$\frac{1}{Z_A^*} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{A,v} = \frac{1}{Z_B^*} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{B,v}$$

Para íons pesados determina-se γ comparando-se o poder de freamento com aquele do próton, (em primeira aproximação carga efetiva unitária) ou seja :

$$\frac{1}{\gamma Z} \left(\frac{dE}{dx} \right)_Z = \left(\frac{dE}{dx} \right)_p$$

Na prática o poder de freamento é obtido através de métodos semi-empíricos, cujo princípio básico é o seguinte:



Programa muito utilizado no Pelletron : STOPX (DEDX ZBL)
Não tão utilizado, mas útil: NEGRO (DEDX Montenegro)

O mais utilizado (de longe.....) pela comunidade



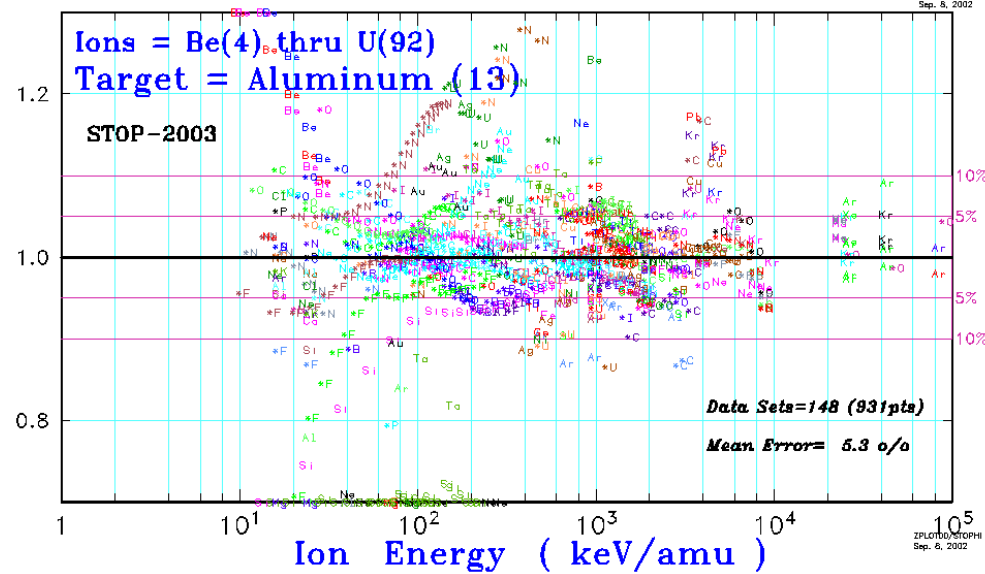
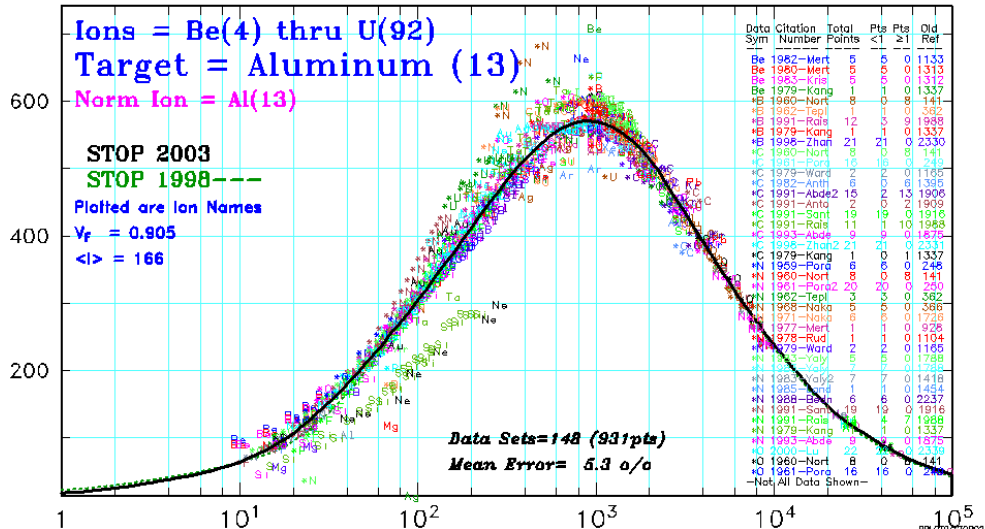
<http://www.srim.org>

The Stopping and Range of Ions in Matter

SRIM is a group of programs which calculate the stopping and range of ions (10 eV - 2 GeV/amu) into matter using a full quantum mechanical treatment of ion-atom collisions (this manual refers to the moving atom as an "ion", and all target atoms as "atoms"). This calculation is made very efficient by the use of statistical algorithms which allow the ion to make jumps between calculated collisions and then averaging the collision results over the intervening gap. During the collisions, the ion and atom have a screened Coulomb collision, including exchange and correlation interactions between the overlapping electron shells. The ion has long range interactions creating electron excitations and plasmons within the target. These are described by including a description of the target's collective electronic structure and interatomic bond structure when the calculation is setup (tables of nominal values are supplied). The charge state of the ion within the target is described using the concept of effective charge, which includes a velocity dependent charge state and long range screening due to the collective electron sea of the target. A full description of the calculation is found in our tutorial book "*The Stopping and Range of Ions in Solids*", by J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, Pergamon Press, New York, 1985 (new edition in late 1996). This book presents the physics of ion penetration of solids in a simple tutorial manner, then presents the source code for SRIM programs with a full explanation of its physics. Further chapters document the accuracy of SRIM and show various applications.

TRIM (the Transport of Ions in Matter) is the most comprehensive program included. TRIM will accept complex targets made of compound materials with up to eight layers, each of different materials. It will calculate both the final 3D distribution of the ions and also all kinetic phenomena associated with the ion's energy loss: target damage, sputtering, ionization, and phonon production. All target atom cascades in the target are followed in detail. The programs are made so they can be interrupted at any time, and then resumed later. Plots of the calculation may be saved, and displayed when needed (it takes 5 seconds to begin viewing a saved calculation).

Stopping Experiment/Theory Aluminum Stopping ($\text{eV}\cdot\text{cm}^2/10^{16}$)



<http://www.exphys.uni-linz.ac.at/stopping/>

Stopping Power for Light Ions

Graphs, Data, Comments and Programs

This page will never be finished, but I keep trying!

Last update: 11 Mar 2004



My name is [Helmut Paul](#). For years, I have been collecting data on the stopping power of light ions while my colleagues at the University of Linz measured them. I plotted the data versus energy (or energy/nucleon), compared them to each other and to the theoretical or semi-empirical curves available in the literature. Recently, together with A. Schinner, I produced a program that will predict stopping powers. You are welcome to look at the plots and to use the program.

.....
The following computer programs for stopping power are available on the internet:

[PSTAR and ASTAR](#) by M.J.Berger for protons and alphas.

[MSTAR](#) by H.Paul and A.Schinner for ions from Li to Ar. This program can be downloaded from here. The instructions for use include an overview of the program's accuracy compared to experimental data (appendix).

[SRIM](#) by J.Biersack and J.F.Ziegler for all ions. See my [list of programs](#) for remarks about the year-to-year changes of Ziegler's programs.

[ATIMA](#) by H.Geissel and C.Scheidenberger.

[CasP](#) by P.L.Grande and G.Schiwietz for all ions.

For a critical comparison, see also:

["Judging the reliability of stopping power tables and programs for heavy ions"](#),
Nucl. Instr. Methods Phys. Res. B 209 (2003) 252,

by Matej Mayer

(<http://www.rzg.mpg.de/~mam/>)

- [Introduction](#)
- [New in SIMNRA 5.0](#)
- [Examples](#)
- [Installation / Registration](#)
- [References](#)
- [Download](#)
- [Cross-section data](#)
- [What's new](#)
- [Site info](#)

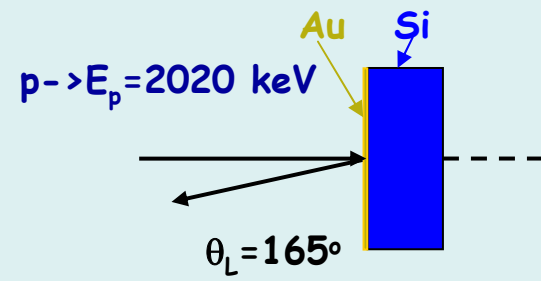
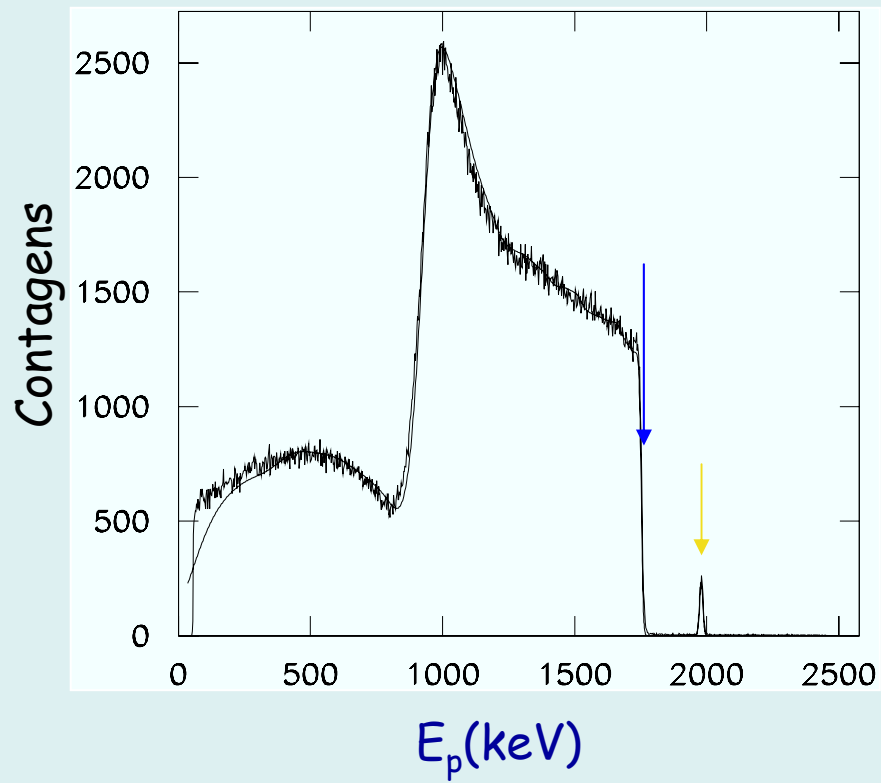
INTRODUCTION

SIMNRA is a Microsoft Windows program for the simulation of backscattering spectra for ion beam analysis with MeV ions. SIMNRA is mainly intended for the simulation of non-Rutherford backscattering, nuclear reactions and elastic recoil detection analysis (ERDA). More than 300 different non-Rutherford and nuclear reactions cross-sections for incident protons, deuterons, ^3He , ^4He and Li-ions are included. SIMNRA can calculate any ion-target combination including incident heavy ions and any geometry including arbitrary foils in front of the detector. - Fully graphical user interface

- Andersen-Ziegler or Ziegler-Biersack stopping powers for swift and heavy ions, identical to SRIM 97
 - Chu energy loss straggling, propagation of straggling in thick layers
 - Geometrical straggling due to finite beam width and detector aperture
 - Multiple small angle scattering
 - Plural large angle scattering
 - Surface roughness (rough layers, rough substrate)
 - Data fitting (layer thicknesses, compositions etc.) by means of the Simplex algorithm
 - Data analysis tools (calculation of scattering kinematics, stopping, peak integrals, ...)
 - OLE automation for automatic analysis of large numbers of spectra
- SIMNRA is not free. It is a shareware program, which can be used for a trial period of 30 days without fee. If you want to use SIMNRA after this period, you have to register. See [Installation/Registration](#) for registration and pricing details. SIMNRA is used at more than 90 laboratories world wide, and referenced in more than 91 publications (August 2003).

To download the program click [here](#).

Last update: November 3, 2003



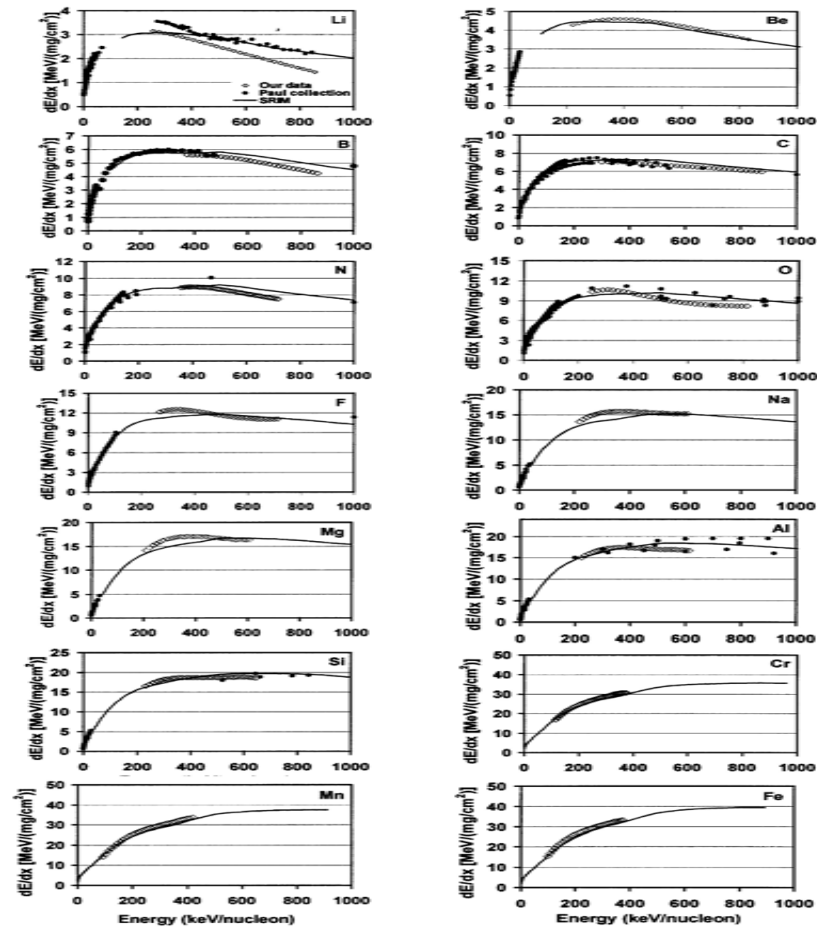


Fig. 6. Comparison of measured data (thick foil) with literature values taken from Paul's compilation [24] and ZBL stop code [5,6].