

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE**  
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI  
CORSO DI LAUREA IN FISICA

Metodi Numerici delle Equazioni Differenziali (Codice: SM054 - 5 CFU)

(Marco Budinich, A.A. 2005 - 2006)

**Fondamenti di architettura** - cpu, bus, ram, I/O. Funzionamento delle varie componenti e registri della cpu nell'esecuzione dettagliata di un'istruzione espressa in un linguaggio ad alto livello (per esempio  $c = b + a$ ). Program counter e stack pointer e loro funzionamento nella chiamata di funzioni.

**Linguaggio C** - Struttura fondamentale del linguaggio C comparata al Fortran: espressioni, funzioni, istruzioni di input/output e di loop. Variabili di tipo intero, char, float e double. Dichiarazioni e inizializzazioni di variabili, cast di variabili, dichiarazione di funzioni, semplice input/output da terminale e su file. Operatori numerici e logici, costanti. Variabili locali e globali; statiche e volatili; dirette e indirette e loro memorizzazione nella ram. Compilatore, assembler e preprocessing. Controllo di flusso: if, for, while e do while, istruzioni break e continue. Definizione di funzioni e loro variabili locali, passaggio di argomenti a una funzione. Funzioni ricorsive e principio di funzionamento. Array uni & multidimensionali, puntatori e puntatori a funzione, allocazione statica e dinamica della memoria (memalloc e free). Vettori di puntatori e loro applicazione per la memorizzazione di matrici, inizializzazione della struttura, confronto con la memorizzazione tradizionale.

**Mathematica** - Il programma Mathematica: organizzazione client-server, variabili con valori numerici e simbolici, grafici di funzioni a una e più variabili. Calcoli numerici e simbolici, assegnazione di valori ( $=$ ) e sostituzioni ( $/.$ ), liste, tabelle e matrici. Funzioni e loro definizione sia differita ( $:=$ ) che immediata ( $=$ ), definizione di funzioni per valori fissi ( $f[0] = 1$ ). Raccolta ed analisi di dati sperimentali, matrici di dati e loro manipolazione, cenni al controllo della precisione numerica nei calcoli, funzioni di approssimazione numerica  $N[]$  e  $Chop[]$ . Soluzione simbolica e numerica di equazioni differenziali, funzioni di interpolazione, funzione  $CForm[]$ . Funzioni utili per la programmazione (If, For, Module), funzioni Sum e D. Animazione di grafici applicata al doppio pendolo.

**Equazioni differenziali** - Equazioni differenziali ordinarie lineari: soluzioni fondamentali dell'omogenea associata, integrali particolari con il metodo del Wronskiano. Equazioni differenziali ordinarie lineari del secondo ordine a coefficienti costanti. Applicazioni all'oscillatore armonico smorzato con forza esterna sinusoidale e impulsiva ( $\delta$  di Dirac). Linearità dell'equazione e soluzione di casi in cui la forza esterna sia sviluppabile in serie di Fourier, caso dell'onda quadra. Piccole oscillazioni e linearizzazione delle equazioni applicate al caso del doppio pendolo, modi e frequenze fondamentali. Cenni ai sistemi dinamici, al caos, agli esponenti di Lyapunov ed alla loro determinazione sperimentale.

**Algoritmi e metodi numerici** - Rappresentazione e precisione delle variabili floating point, errori numerici di troncamento e arrotondamento: esempio di calcolo delle soluzioni di un'equazione di secondo grado. Cenni all'implementazione dell'aritmetica a precisione arbitraria. Metodi di Eulero e di Runge-Kutta per l'integrazione numerica di equazioni differenziali ordinarie; errore sul punto finale e condizioni di stabilità del metodo di Eulero. Scrittura di un semplice programma in C per usare questi metodi con l'equazione dell'oscillatore armonico

smorzato e forzato con vari tipi di forze esterne: nulla (oscillatore libero), periodica (oscillatore forzato) ed impulsiva: discussione della relativa trattazione numerica. Metodo di Runge-Kutta di ordine 4 a passo variabile ed errore controllato. Cenni ad altri metodi per l'integrazione numerica di equazioni differenziali ordinarie ed al caso di integrazione di equazioni differenziali di significato fisico. Funzione ODEint (tratta dal libro Numerical Recipes) e sua applicazione al caso di equazioni dell'oscillatore armonico forzato. Soluzione numerica del doppio pendolo non dissipativo.

### **Esperienze svolte in laboratorio**

1. Uso del programma Mathematica: esempi di calcoli numerici e simbolici, grafici di funzioni ad una e due variabili, costruzioni di semplici tabelle, calcolo simbolico dei termini dello sviluppo in serie di Taylor.
2. Programmazione in C: tabulazione di una funzione da programma e suo display con Mathematica; confronto dei risultati ottenuti con quelli esatti ottenuti con Mathematica, discussione degli errori numerici commessi dal programma in C; eventuale scrittura di un programma per la determinazione della precisione della macchina.
3. Stesura di un programma in C per la soluzione numerica di equazioni differenziali ordinarie di primo ordine con i metodi di Eulero e Runge-Kutta. Confronto dei risultati con la soluzione esatta ottenuta con Mathematica; studio degli errori e della loro dipendenza dal passo.
4. Scrittura di una funzione in C per la soluzione numerica, con il metodo di Eulero di un sistema di equazioni differenziali ordinarie di secondo ordine a coefficienti costanti. Confronto dei risultati con la soluzione esatta calcolata con Mathematica (soluzione generale dell'oscillatore armonico smorzato e forzato).
5. In continuazione dell'esperienza precedente studio dell'oscillatore armonico smorzato con forza impulsiva ( $\delta$  di Dirac) con integrazione numerica con il metodo di Runge-Kutta. Confronto dei risultati con la soluzione analitica calcolata con Mathematica.
6. Uso della funzione di libreria Odeint per la soluzione numerica di equazioni differenziali ordinarie con passo variabile ed errore predeterminato. Applicazione all'oscillatore armonico smorzato soggetto ad una forza "ad onda quadra". Soluzione in Mathematica mediante sviluppo in serie discreta di Fourier e confronto con le soluzioni numeriche di Odeint. Confronto degli errori ottenuti nello sviluppo della forza e della rispettiva soluzione.
7. Soluzione numerica del doppio pendolo non dissipativo, eccitazione dei modi normali e confronto dei periodi con quelli teorici, confronto dell'algoritmo di Eulero e Runge Kutta. Generazione di un 'animazione' della soluzione numerica con l'ausilio di Mathematica.
8. Soluzione numerica del doppio pendolo non dissipativo, caso caotico con stima degli esponenti di Lyapunov.

### **Alcuni esercizi "per casa" di varia difficoltà**

- Controllo dell'errore di arrotondamento dell'ultimo bit in una variabile floating point e poi
- grafico di  $\Delta x/x$  al variare di  $x$  nell'errore di arrotondamento dell'ultimo bit
- Programma in C per calcolare l' $\epsilon$  della macchina ( $1. + \text{eps} == 1.$ )
- Programma in C per il calcolo dei coefficienti binomiali con funzioni ricorsive e poi
- calcolo del numero di chiamate per i coefficienti binomiali ricorsivi nei 2 modi proposti
- Integrare il problema dei 3 corpi in formulazione Hamiltoniana con 4 gradi di libertà.
- Applicare Odeint ai 3 corpi e animazione con dati interpolati con Mathematica.
- Integrazione di un pendolo smorzato e forzato.
- Verifica, con Mathematica, dell'errore in Runge Kutta di ordine 2 e 4.
- Scrittura in C di una funzione per l'allocazione dinamica e l'inizializzazione di una matrice dichiarata nel main come `**mat` eventualmente con indici che partono da 1 (invece che da 0).

**Testi consigliati**

Collocazione biblioteca Dipartimento di Fisica:

Kernighan B.W. & Ritchie D.M. I - 288  
The C Programming Language  
Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ USA 1998, second edition, pp. xii 272

Press William H., Flannery Brian P., Teukolsky Saul A. & Vetterling William T. I - 296  
Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing  
Cambridge University Press, Cambridge 1988/9/92, second edition, pp. xxvi 994

Wolfram Stephen  
The Mathematica Book  
Cambridge, fourth edition

Saff E.B. & Snider A.D. I - 389  
Fundamentals of Complex Analysis for Mathematics Science and Engineering  
Prentice Hall, NJ USA 1993, second edition, pp. xii 468

Landau Rubin H. & Páez Manuel J. I - 433  
Computational Physics Problem Solving with Computers  
John Wiley & Sons Inc., New York USA 1997, pp. xxx 520

**Sessioni ufficiali d'esame di: Metodi Numerici delle Equazioni Differenziali**

	11 aprile 2006	26 giugno 2006 14 luglio 2006	14 settembre 2006
--	----------------	----------------------------------	-------------------

Tutti gli esami si svolgono alle ore 9:30 al Dipartimento di Fisica