Компиляция программы. Препроцессор.

Основные этапы компиляции программы (`hello.c` → `a.out`)

- **Разбиение на лексемы:** исходный файл разбивается на «слова» (`tokens`) и пробелы
- **Выполнение директив препроцессора:** присоединяются заголовочный файлы, развёртываются макросы
- **Трансляция:** производится синтаксический и семантический анализ, текст преобразуется в объектный файл
- **Компоновка** (`link`): один или несколько объектных файлов объединяются, добавляются функции внешних библиотек, создается выполняемый файл

Вызов препроцессора (для отладки)

```
gcc -E hello.c
```

Директивы препроцессора

Список директив

```
#include   #define   #undef    #if       #ifdef    #ifndef
#else      #elif     #endif    #line     #error    #pragma
#warning   #embed    #elifdef  #elifndef                    (C23, C++23)
```

Основные правила

- Каждая директива должна находиться на отдельной строке первый символ команды #
- Если директива «не помещается» в одной строке, её можно продолжить поставив в конец строки обратную косую черту '' \ ''

Вставка файла

Директива `#include "file"`

- Вставляет `file` на место строки с `#include`
- В `file` может содержаться вложенный `#include` и так далее
- Имя файла должно быть заключено либо в двойные кавычки `"file"` или в угловые скобки `<file>`

gcc -E hello.c $\rightarrow$ 841 строка

☞ угловые скобки принято использовать для стандартных заголовочных файлов, а кавычки для файлов относящихся к конкретной программе:

"если файл был указан в двойных кавычках и поиск закончился неудачно, то эта директива переобрабатывается как если бы файл был заключен в угловые скобки"

Макроопределения (макросы)

Директива `#define`

`#define ИМЯ_МАКРОСА последовательность_символов`

- Осуществляется **текстовая подстановка:**
  `ИМЯ_МАКРОСА` $\rightarrow$ `последовательность_символов`
- Признаком конца директивы является конец строки
- Если `ИМЯ_МАКРОСА` внутри кавычек, то замены не будет

Именованные константы

```
#define MAX_SIZE 100
#define MIN_SIZE MAX_SIZE / 2
#define LONG_STRING "this is a very long " \
                    "string used as an example\n"
#define TEST this is test
```

```
double array[MAX_SIZE];
for(i = MIN_SIZE; i < MAX_SIZE; i++) ...
printf(LONG_STRING);
printf("TEST\n");
```

«Output: gcc -E »

```
double array[100];
for(i = 100 / 2; i < 100; i++) ...
printf("this is a very long " "string used as an example\n");
printf("TEST\n");
```

Часто используемые предопределенные макросы

- `__DATE__` и `__TIME__` макросы содержащие дату и время вызова препроцессора (`C-стринги из 11 символов`)
- `__FILE__` имя текущего обрабатываемого файла (`C-стринг`)
- `__LINE__` номер строки в этом файле (`целое число`)
- ~~`__FUNCTION__` имя текущей функции (`C-стринг`) (obsolete)~~

Вместо `__FUNCTION__` в стандарте языка (C99,C++) имеется

- `__func__` – **переменная** содержащая имя выполняемой функции:
  `static const char __func__[] = "function name";`

Пример отладочной печати

```
printf(" Error ... at %s, line %d.\n", __FILE__, __LINE__);
printf("I am in %s function\n", __func__);
```

Макроподстановки: макросы с параметрами

Макросы с формальными параметрами

```
#define ABS(x)   ((x) < 0 ? -(x) : (x))
#define MIN(x,y) (((x)<(y)) ?  (x) : (y))
```

Пример

```
result1 = ABS(a);
result2 = MIN(a,b);
```

«Output: gcc -E »

```
result1 = ((a) < 0 ? -(a) : (a));
result2 = (((a)<(b)) ? (a) : (b));
```

Правила написания

- ☞ Нельзя ставить пробел между именем макроса и скобками
- ☞ Лишняя скобка не повредит!

Плохая идея

```
#define SQR(x)        x*x    // ERROR
  result = SQR(a+b);
```

«Output: gcc -E »

```
  result = a+b*a+b;
```

Плохая идея

```
#define SQR(x)        x*x    // ERROR
  result = SQR(a+b);
```

«Output: gcc -E »

```
  result = a+b*a+b;
```

Плохо продуманная идея

```
#define SQR(x)        (x)*(x)   // ERROR
  result = 1./SQR(a);
```

«Output: gcc -E »

```
  result = 1./(a)*(a);
```

Плохая идея

```
#define SQR(x)        x*x    // ERROR
  result = SQR(a+b);
```

«Output: gcc -E »

```
  result = a+b*a+b;
```

Плохо продуманная идея

```
#define SQR(x)        (x)*(x)   // ERROR
  result = 1./SQR(a);
```

«Output: gcc -E »

```
  result = 1./(a)*(a);
```

Правильный вариант

```
#define SQR(x)        ((x)*(x))       // OK!
```

☞ Макросы не функции!

тестируем макрос

```
#define MIN(x,y) (((x)<(y)) ?  (x) : (y))
```

```
  a = 1;
  b = 10;
  result = MIN(a++,b);
  printf(" a= %i, b= %i, result= %i\n",a,b,result);
Result> a= 3, b= 10, result= 2
```

«Output: gcc -E »

```
  result = (((a++)<(b)) ? (a++) : (b));
```

Директива #undef имя_макроса

- «удаляет» ранее определенный макрос

Используйте inline functions вместо «функций-макросов»

```
#undef MIN   // удаляем макрос MIN

inline int MIN(int x,int y) { // добавляем функцию MIN()
  return (x < y) ? x : y;
}

  a = 1;
  b = 10;
  result = MIN(a++,b); // this is now a function
  printf(" a= %i, b= %i, result= %i\n",a,b,result);
Result> a= 2, b= 10, result= 1
```

Условная компиляция: if - else

Директивы #if, #else, #elif и #endif

```
#if константное выражение 1
        «включается» если выражение 1 истинно
#elif константное выражение 2
        иначе, если выражение 2 истинно
#else
        ...
#endif
```

☞ Промежуточные #else и #elif необязательны

```
#if MAX_SIZE>99
  printf("If size of the array is 100 and more\n");
#else
  printf("The case of a small array.\n");
#endif
```

Директивы #ifdef и #ifndef

```
#ifdef ИМЯ_МАКРОСА   // идентично #if defined(ИМЯ_МАКРОСА)
   «включается» если ИМЯ_МАКРОСА определено
#endif
#ifndef ИМЯ_МАКРОСА  // идентично #if !defined(ИМЯ_МАКРОСА)
   «включается» если ИМЯ_МАКРОСА не определено
#endif
```

- `#elifdef ИМЯ_МАКРОСА` ≡ `#elif defined ИМЯ_МАКРОСА` (C23,C++23)
- `#elifndef ИМЯ_МАКРОСА` ≡ `#elif !defined ИМЯ_МАКРОСА` (C23,C++23)

```
#ifdef DEBUG
   printf(" x=..."); // отладочная печать, если определен DEBUG
#endif
```

```
#ifdef ABRAKADABRA
   что-то, что мы хотим временно закомментировать
#endif
```

#ifndef в заголовочных файлах

В заголовочных файлах рекомендуется использовать конструкцию:

```
/* example.h */
#ifndef EXAMPLE_H
#define EXAMPLE_H
...
#endif
```

- ✓ Имя макроса проверяется и если оно не определено тут же определяется
- ✓ Имя макроса должно быть уникально для каждого файла, обычно конструируется из имени заголовочного файла

☞ Многократная вставка такого заголовочного файла безопасна

```
/* example.c */
#include "example.h"
#include "example.h"    // безопасно
```

Операторы # и

Используются внутри макросов

- # – создает C-стринг из аргумента перед которым стоит
- ## – объединяет (склеивает) две лексемы

Пример с

```
#define showtype(t) printf("sizeof(%s) = %zu\n",#t,sizeof(t))
showtype(long double); // sizeof(long double) = 16
```

Пример с

```
#define INT3(x) int x##1, x##2, x##3
INT3(a); // => int a1, a2, a3;
a1 = 1; a2 = a1++; a3 = a2++;
printf("a1= %i, a2= %i, a3= %i\n",a1,a2,a3); // a1= 2, a2= 2, a3= 1
```

Проверка (assertion) при компиляции

`static_assert(int_expr, message)` **since C11, keyword in C23**

- Определено в `<assert.h>`: проверка «логического» выражения во время компиляции и если выражение равно нулю (ложно) остановка компиляции с выводом сообщения `message`

☞ в C++11 имеется похожая декларация:
`static_assert(bool_constexpr, message)`

Пример: проверка, что `long` занимает 8 байт

```
#include <assert.h>
static_assert(sizeof(long) == 8, "long int must be exactly 8 bytes");
// возможная ошибка во время компиляции:
// error: static assertion failed: "long int must be exactly 8 bytes"
```

Проверка доступности «заголовочного» файла

`__has_include("filename")` — C23, C++17

- Препроцессорный оператор позволяющий проверить, что `filename` доступен для использования в директиве `#include`

```
#if __has_include("fun_prt.cc")
  #include "fun_prt.cc"
#else
  #define EMPTY_FUN_PRT
  void fun_prt() { printf("Empty function\n"); }
#endif
int main() {
   fun_prt();
#ifdef EMPTY_FUN_PRT
   FILE* f = fopen("fun_prt.cc","w");
   fprintf(f,"void fun_prt() { printf(\"Good function\\n\"); }\n");
   fclose(f);
#endif
}
```

Введение в абстрактные типы данных

Структура данных в программировании

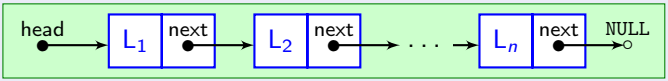
- **Структура данных (data structure):** специальный способ хранения данных удобный для построения эффективных алгоритмов
- **Абстрактные типы данных**: математические модели структур данных

Некоторые абстрактные типы данных

- Список (List)
- Стек (Stack)
- Очередь (Queue)
- Дерево (Tree)

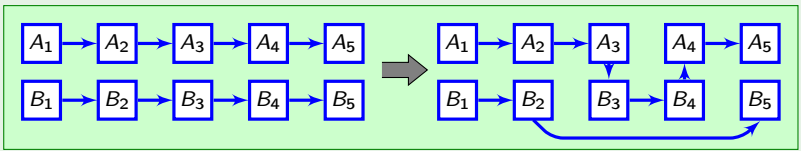
Список (List)

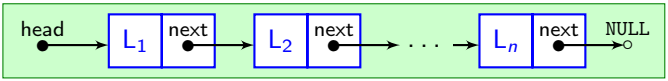
Односвязный список (Singly linked list)



- Последовательность узлов (nodes) в которых содержится:
  - ✓ L_i – сколь угодно большие, сложные данные
  - ✓ next – указатель на следующий узел, последний в списке = NULL
- Указатель на самый первый узел списка: head

☞ основное свойство: легко добавлять и удалять элементы списка





Возможная реализации списка

```
struct node_ {  // one node == list consisting of one node
   double v;
   struct node_ * next;
};
typedef struct node_ Node;
```

Функциональная спецификация: ожидаемый набор функций

1. Создание нового узла $\rightarrow$ список из одного узла
2. Вставка «другого» списка $\rightarrow$ в начало, в конец, *в заданное место*
3. Удаление одного узла $\rightarrow$ из начала, из конца, *из заданного места*
4. Подсчет числа узлов в списке: имеет сложность $O(n)$
5. *Разбиение списка на два в заданном месте*

```
Node* CreateNode(double value) { // (1)
   Node* nn = (Node*) malloc(sizeof(Node)); // new node
   nn->v = value;
   nn->next = NULL;
   return nn;
}
void InsertAtHead(Node** head, Node* nn) { //(2a)
   Node* tmp = nn; // search for end node of 'nn'-list
   while ( tmp->next != NULL ) { tmp = tmp->next; }
   tmp->next = *head;
   *head = nn;
}
void AppendToEnd(Node** head, Node* nn) { // (2b)
   if ( *head == NULL ) {
      *head = nn;
   } else {
      Node* tmp = *head; // search for end node
      while ( tmp->next != NULL ) { tmp = tmp->next; }
      tmp->next = nn; // append to the end
   }
}
```

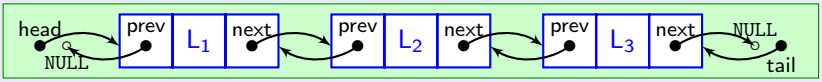
```
void DeleteFromHead(Node** head) { // (3a)
   if ( *head == NULL ) {
      printf("\n%s ERROR: List is empty\n",__func__);
   } else {
      Node* tmp = *head;
      *head = tmp->next;
      free(tmp);
   }
}
size_t PrintList(Node* head) { // (4) return size of List
   size_t n = 0;
   while(head) {
      printf("%.1f -> ",head->v);
      n++;
      head = head->next;
   }
   printf("null; [size= %zu]\n",n);
   return n;
}
```

Test of singly linked list

```
Node* head = NULL; // first list
for ( int i = 0; i <= 2; ++i )
   InsertAtHead(&head,CreateNode((double)i));
PrintList(head); // 2.0 -> 1.0 -> 0.0 -> null; [size= 3]

Node* list2 = NULL; // second list
for ( int i = 1; i <= 2; ++i )
   AppendToEnd(&list2,CreateNode(-10.*i));
PrintList(list2); // -10.0 -> -20.0 -> null; [size= 2]

AppendToEnd(&head,list2);
PrintList(head); // 2.0 -> 1.0 -> 0.0 -> -10.0 -> -20.0 -> null;

DeleteFromHead(&head);
DeleteFromHead(&head);
PrintList(head); // 0.0 -> -10.0 -> -20.0 -> null; [size= 3]
```

Другие разновидности списков

Двусвязный список (Doubly linked list)



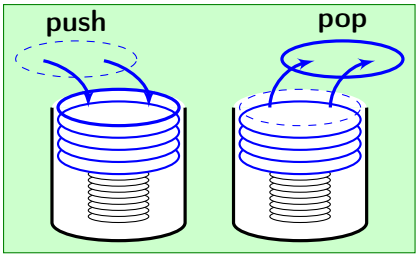
- в каждом узле имеется ссылка на предыдущий узел: prev
- возможен указатель на последний узел списка: tail

Кольцевой список (Circularly linked list)

- двусвязный список, где next в последнем узле списка указывает на первый узел, а prev в первом узле указывает на последний узел

☞ список (list) в Python это массив указателей на PyObjects и не имеет отношения к рассматриваемой структуре

Стек (Stack)



Принцип организации

- Последним пришел, первым вышел (last-in, first-out: LIFO)
- Доступ, извлечение только последнего элемента

Функциональная спецификация

1. Создание стека → функция создающая пустой стек
2. Проверка является ли стек пустым
3. Добавление элемента → сохранение элемента в стеке: push
4. Извлечение верхнего элемента: pop

на основе списка

```
struct stack_sl {
   Node* head; // singly linked list
};
typedef struct stack_sl Stack;
```

на основе массива

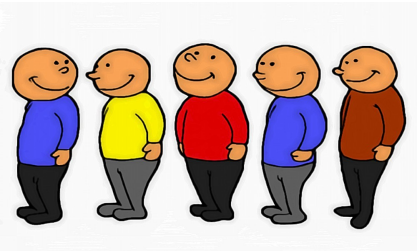
```
struct stack {
   double* v;
   int top;
};
```

```
void init(Stack* S) { S->head = nullptr; }                                  // (1)
bool is_empty(Stack* S) { return (S->head == nullptr); }                    // (2)
void push(Stack *S, double val) {                                           // (3)
   InsertAtHead(&S->head,CreateNode(val));
}
double pop(Stack* S) {                                                      // (4)
   if ( is_empty(S) ) {
      printf("\n%s ERROR: Stack is empty\n",__func__);
      exit(1);
   }
   double val = S->head->v;
   DeleteFromHead(&S->head);
   return val;
}
```

Test of Stack

```
Stack S;
init(&S);                       // initialize

for(int i = 1; i < 5; ++i) {
   push(&S, 1.1*i);             // push a few elements
}

while( !is_empty(&S) ) {
   printf("%g ", pop(&S));      // use return value in printf
}
printf("\n");                   // 4.4 3.3 2.2 1.1
```

Очередь (Queue)



Принцип организации

- Первым пришел – первым вышел (first-in, first-out: FIFO)
- Доступ, извлечение только первого элемента

Функциональная спецификация

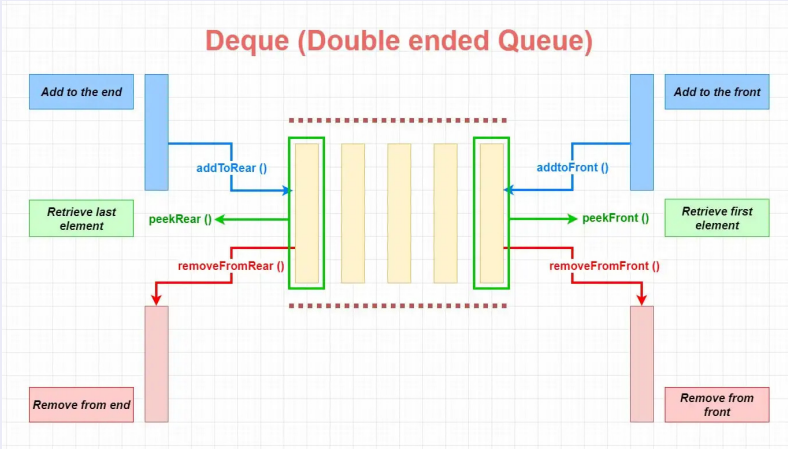
1. Создание $\rightarrow$ функция создающая пустую очередь
2. Проверка является ли очередь пустой
3. Добавление элемента в конец очереди
4. Извлечение первого элемента из очереди

Очередь на основе односвязного списка

```
struct queue_sl {
   Node* head; // singly linked list
};
typedef struct queue_sl Queue;
// Все функции как в Stack за исключением (3)
void push(Queue *Q, double val) {                                    // (3)
   AppendToEnd(&Q->head,CreateNode(val));
}
```

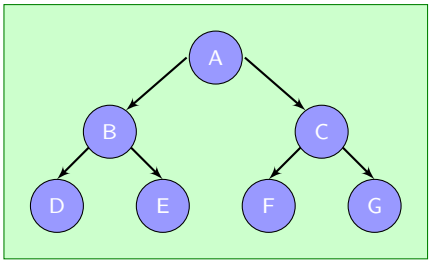
```
Queue Q;                        // Queue for testing
init(&Q);                       // initialize
for(int i = 1; i < 5; ++i) {
   push(&Q, 1.1*i);             // push a few elements
}
while( !is_empty(&Q) ) {
   printf("%g ", pop(&Q));      // use return value in printf
}
printf("\n");                   // 1.1 2.2 3.3 4.4
```

Дек (Double-Ended Queue): двухсторонняя очередь



☞ Обобщает концепции стека и очереди: элементы можно добавлять, удалять и читать как в начало, так и в конец DEQ

Дерево (Tree)



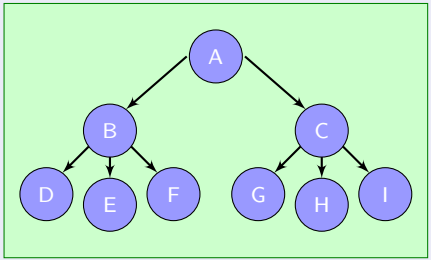
Основное свойство

☞ Дерево – иерархический набор узлов (node), связанных ребрами (edge), организованный так, что имеется единственный путь (path) от одного узла к другому

Терминология

- A – корень (`root node`)
- Соединение двух узлов – ребро (`edge`); для N узлов всего $N - 1$ ребро
- Путь – последовательность узлов и ребер между узлами: `path(AD) = A-B-D`, длина пути – полное число узлов в пути (3)
- Глубина дерева (`Depth of Tree`) – самый длинный путь из корня

Дерево общего вида



Терминология

- A,B,C – родительские (parent) узлы; B и C – родственники (siblings) и дети (childes) узла A
- Бинарное дерево – число детей любого узла не больше двух
- узлы D,E,F,G,H,I без детей – листья (leaf) или терминальные (terminal) узлы
- Каждый дочерний узел формирует поддерево (sub-tree)

1 возможная реализация на C++

```
// like sl-list where node* next is replaced by vector<node*> children
struct node {
   node(int p = 0) : pdg_code(p){}; // constructor
   int pdg_code = 0;
   std::vector<std::unique_ptr<node>> children = {};
};
```

«Обход» дерева – печать элементов

```
void print_tree(const node& A, int lv = 0) {
   std::cout << A.pdg_code << '(';
   for ( size_t i = 0; i < size(A.children); ++i ) {
      print_tree(*A.children[i],lv+1); // recursion
   }
   std::cout << ')' << (lv > 0 ? ' ' : '\n');
}
```

Пример: дерево распадов $\eta \to \pi^+\pi^-\pi^0$; $\pi^0 \to \gamma\gamma$

```
auto eta = std::make_unique<node>(221); // root: eta = 221
eta->children.emplace_back(std::make_unique<node>(211)); // pi+ = 211
eta->children.emplace_back(std::make_unique<node>(-221)); // pi- =-211
eta->children.emplace_back(std::make_unique<node>(111)); // pi0 = 111

auto& pi0 = eta->children[2];
pi0->children.emplace_back(std::make_unique<node>(22)); // gamma = 22
pi0->children.emplace_back(std::make_unique<node>(22)); // gamma = 22

print_tree(*eta); // 221(211() -221() 111(22() 22() ) )
```

Дополнительные слайды

Type generic selection in C11

Новое ключевое слово _Generic

- Позволяет во время компиляции сделать выбор на основе типа переменной
- Синтаксис похож на switch, проверяется тип первой переменной а далее идут пары: имя типа (или default) и результат

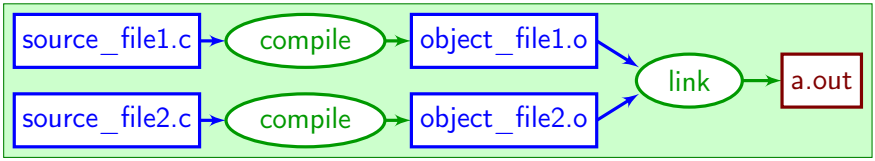
☞ Отсутствует в C++

Пример

```
#define SIN(X)  _Generic( (X),  \
        double: sin(X),         \
   long double: sinl(X),        \
        float:  sinf(X)          )
...
float y=2.;
auto sy = SIN(y);
```

Раздельная компиляция

- ☞ независимая трансляция частей программы разделенной на отдельные файлы с последующим объединением их компоновщиком в один исполняемый файл:



Цели и преимущества

- разделение большой программы на небольшие, более понятный части
- отладка каждой из частей делается независимо
- изменениях в одной из частей ведет к компиляции только этой части

main.c

```
#include "functions.h"
int main() {
  fun_debug = 1; // debug mod
  init();
  run(10);
  stop();
}
```

functions.h

```
#ifndef FUNCTIONS_H
#define FUNCTIONS_H
extern int fun_debug; // external variable
void init();
int run(int nevents);
void stop();
#endif
```

functions.c

```c
#include <stdio.h>
#include "functions.h"

// definition of fun_debug
int fun_debug = 0;

// invisible outside this file
static int init_done = 0;

void init() {
  if( init_done ) return;
  if( fun_debug ) {
    printf("This is init()\n");
  }
  init_done = 1;
}
```

```c
int run(int nevents) {
  if( fun_debug )
    printf("This is run()\n");
  for(int i=0; i<nevents; ++i) {
    if( fun_debug )
      printf(" event# %i\n",i);
  }
  return 1;
}

void stop() {
  if( fun_debug )
    printf("This is stop()\n");
  init_done = 0;
}
```

Спецификатор `extern`

- спецификатор `extern` используется чтобы *декларировать* переменную или функцию, определённую в другом файле
- все функции по умолчанию `extern`
- определение функции или выделение памяти для переменной должна выполнятся только один раз, в одном месте
- проверка, что переменная или функция действительно существуют выполняется компоновщиком

Note: сравните со `static`

☞ `static` для глобальной переменной или функции ограничивает их область видимости единицей трансляции («файлом») в котором они определены

Компиляция примера

- За один заход:
  ```
  gcc main.c functions.c
  ```
- Поэтапно:
  ```
  gcc -c main.c
  gcc -c functions.c
  gcc main.o functions.o
  ```

Output:

```
This is init() function
This is run() function
 event# 0
 event# 1
...
 event# 9
This is stop() function
```

Введение в make и Makefile

Автоматизация раздельной компиляции с make

- Существует несколько версий make: очень популярна gmake (GNU make)

Очень простой пример файла Makefile

```
PROGRAM := test                          # variable

all: $(PROGRAM)                          # target-1: component

$(PROGRAM): functions.o  main.o          # target-2: component
        @echo "Hello make, example"     # TAB before the command
        $(CC) -o $(PROGRAM) functions.o  main.o
```

```
> make [target]
```

```
cc    -c -o functions.o functions.c
cc    -c -o main.o main.c
Hello make, example
cc -o test                    functions.o  main.o
```

Чуть более сложный пример Makefile

```
PROGRAM := test                    # program name
SRCS    := functions.c  main.c     # source files
OBJS    := $(SRCS:.c=.o)           # transform filenames .c -> .o
CFLAGS  := -Wall -I.               # compilation flags
LIBS    := -lm                     # options for linking

# add GSL-library
GSLCFLAGS  := $(shell gsl-config --cflags)  # shell-command
CFLAGS     += $(GSLCFLAGS)
GSLLIBS    := $(shell gsl-config --libs)    # shell-command
LIBS       += $(GSLLIBS)

%.o : %.c                          # suffix rule
        $(CC) -c $(CFLAGS) $<

all:    $(PROGRAM)                 # target-1

# see next slide
```

. . . продолжение

```
$(PROGRAM): $(OBJS)                # target-2
        $(CC) $(CFLAGS) $(OBJS) $(LIBS) -o $(PROGRAM)
        @echo "done, $(PROGRAM)"

clean:                             # target-3
        @rm -f *.o $(PROGRAM)

depend:                            # target-4
        @echo "Generating make.depends"
        @rm -f make.depends
        $(CC) -MM $(CFLAGS) $(SRCS) > make.depends
        @echo "done"

include $(wildcard *.depends)      # include dependency files
```

```
> make depend создания файла «зависимостей»
> make        сборка программы
> make clean  «очистка»
```

Введение в cmake и CMakeLists.txt

Автоматизация создания Makefile

- Утилита cmake создает из файла сценария CMakeLists.txt файлы для сборки с помощью make, MVS, Android Studio ...

Очень простой пример файла CMakeLists.txt

```
CMAKE_MINIMUM_REQUIRED( VERSION 2.4 )
PROJECT(test)
INCLUDE_DIRECTORIES($PROJECT_SOURCE_DIR)
ADD_EXECUTABLE(test functions.c main.c)
```

Как использовать:

```
# создаем папку для Makefiles в которой будем собирать проект
> mkdir build
> cd build
> cmake ../          # папка где лежит CMakeLists.txt
> make
```

2 возможная реализация дерева на C++

```
struct Node {
   Node(int p=0) : pdg_code(p) {}; // constructor
   int pdg_code = 0;
   std::vector<size_t> children; // position of children in Tree.nodes
};
struct Tree {
   Tree() {nodes.reserve(2);} // constructor
   std::vector<Node> nodes;
};
```

«Обход» дерева – печать элементов

```
void print_node(const Tree& tr, size_t ch = 0) {
   const Node& N = tr.nodes[ch];
   std::cout << N.pdg_code << '(';
   for ( auto ch : N.children ) {
      print_node(tr, ch); // recursion
   }
   std::cout << ')' << (ch > 0 ? ' ' : '\n');
}
```

Пример: дерево распадов $\eta \to \pi^+\pi^-\pi^0$; $\pi^0 \to \gamma\gamma$

```
Tree root;
root.nodes.push_back(221);  // [0] == root, eta = 221

root.nodes.push_back(211);  // [1], pi+ = 211
root.nodes[0].children.push_back(1);
root.nodes.push_back(-211); // [2], pi- = -211
root.nodes[0].children.push_back(2);
root.nodes.push_back(111);  // [3], pi0 = 111
root.nodes[0].children.push_back(3);

root.nodes.push_back(22);   // [4], gamma = 22
root.nodes[3].children.push_back(4);
root.nodes.push_back(22);   // [5], gamma = 22
root.nodes[3].children.push_back(5);

print_node(root); // 221(211() -211() 111(22() 22() ) )
```