

Синтаксический анализатор: алгоритмы синтаксического разбора

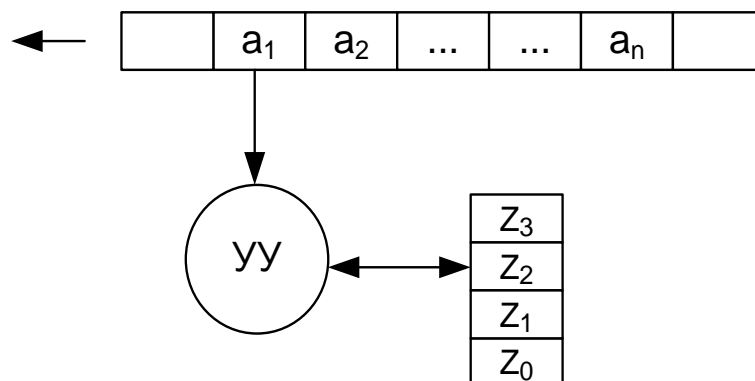
Цель: ознакомление с назначением и принципами работы синтаксического анализатора, получение практических навыков построения синтаксического анализатора для заданной грамматики.

1. Синтаксический анализатор: часть компилятора, выполняющая синтаксический анализ.

Вход: таблица лексем (ТЛ) и таблица идентификаторов (ТИ).

Выход: дерево разбора.

2. Схема работы автомата с магазинной памятью:



3. Формальное описание МП-автомата:

$$M = \langle Q, V, Z, \delta, q_0, z_0, F \rangle$$

Q – множество состояний;

V – алфавит входных символов;

Z – специальный алфавит магазинных символов;

δ – функция переходов автомата $Q \times (V \cup \{\lambda\}) \times Z \rightarrow P(Q \times Z^*)$,

где $P(Q \times Z^*)$ – множество подмножеств $Q \times Z^*$;

$q_0 \in Q$ – начальное состояние автомата;

$z_0 \in Z$ – начальное состояние магазина (маркер дна);

$F \subseteq Q$ – множество конечных состояний.

4. Работа МП-автомата $M = \langle Q, V, Z, \delta, q_0, z_0, F \rangle$

- 1) текущее состояние автомата – $(q, a\alpha, z\beta)$
- 2) возможны два случая:
 - а. читает символ a , находящийся под головкой (сдвигает ленту);
 - б. не читает ничего (читает λ , не сдвигает ленту);
- 3) по функции переходов δ определяет новое состояние q' , если $(q', \gamma) \in \delta(q, a, z)$ или $(q', \gamma) \in \delta(q, \lambda, z)$.
- 4) читает верхний символ z (в магазине) и записывает цепочку γ т.к. $(q', \gamma) \in \delta(q, a, z)$, при этом, если $\gamma = \lambda$, то верхний символ магазина просто удаляется.
- 5) работа автомата заканчивается, когда (q, λ, λ)

Напоминание:

на каждом шаге автомата возможны три случая:

- 1) функция $\delta(q, a, z)$ определена – осуществляется переход в новое состояние;
 - 2) функция $\delta(q, a, z)$ не определена, но определена $\delta(q, \lambda, z)$ – осуществляется переход в новое состояние (лента не продвигается);
 - 3) функции $\delta(q, a, z)$ и $\delta(q, \lambda, z)$ не определены – дальнейшая работа автомата не возможна (цепочка не разобрана).
-

По произвольной КС-грамматике $G_{II} = \langle T, N, P, S \rangle$ всегда можно построить недетерминированный МП-автомат, который допускает цепочки языка, заданного данной грамматикой.

Работа распознавателя:

- 1) если верхний символ магазина (вершина стека) МП-автомата является нетерминальным символом A , то его можно заменить на цепочку символов α при условии, что в грамматике языка есть правило $A \rightarrow \alpha$, где $A \in N$, $\alpha \in V^*$. Считывающая головка автомата при этом не сдвигается (этот шаг работы называется «подбор альтернативы» или выбор правила);
- 2) если верхний символ магазина (вершина стека) является терминальным символом a , который совпадает с текущим символом входной цепочки, то этот символ выталкивается из стека и считывающая головка передвигается на одну позицию вправо.

5. Дано описание языка:

<i>Компонента</i>	<i>Описание</i>
Символы	Windows-1251
Символы-сепараторы	пробел – допускается везде кроме идентификаторов и ключевых слов; ; (точка с запятой) – разделитель инструкций; { } – программный блок; () – параметры; () – приоритетность операций.
Идентификаторы	только латинские буквы в нижнем регистре, от 1 до 5 букв; идентификатор не может совпадать с ключевыми словами; максимальное количество идентификаторов 2^{16}
Типы данных	integer – целочисленные данные (четыре байта, значения от -2^{31} до $2^{31}-1$), автоматическая инициализация 0, LE; string – строка символов (любые символы, макс. 255, первый байт – длина строки), автоматическая инициализация строкой длины 0
Операции с данными	+ – бинарный, суммирование, (integer, integer); + – бинарный, конкатенация, (string, string); – – бинарный, вычитание, (integer, integer); * – бинарный, умножение, (integer, integer); / – бинарный, деление, (integer, integer)
Программные конструкции	главная функция (точка входа): <pre>main { return <integer-идентификатор> <integer-литерал>; }</pre> Функции: <pre><тип данных> function <идентификатор> (<тип данных> <идентификатор>, ...) { return <идентификатор>; }</pre> Параметры функции: передаются по значению.
Литералы	числа от -2^{31} до $2^{31}-1$, интерпретируются как integer , могут быть только rvalue; строки , символы, заключенные в ' ' (одинарные кавычки), могут быть только rvalue

Выражения	- арифметические с применением +, −, /, *, (); - строковые с применением +,()
...	...

6. Пример правильной программы:

```
integer function fi(integer x, integer y)
{
  declare integer z;
  z= x*(x+y);
  return z;
}
string function fs (string a, string b)
{
  declare string c;
  declare string function substr(string a, integer p, integer n);
  c = substr(a, 1,3)+ b;
  return c;
};
main
{
  declare integer x;
  declare integer y;
  declare integer z;
  declare string sa;
  declare string sb;
  declare string sc;
  declare integer function strlen(string p);
  x = 1;
  y = 5;
  sa = '1234567890';
  sb = '1234567890';
  z = fi(x,y);
  sc = fs(sa,sb);
  print 'контрольный пример';
  print z;
  print sc;
  print strlen(sc);
  return 0;
};
```

7. Лексемы:

<i>конструкция</i>	<i>лексема</i>	<i>примечание</i>
integer string	t	ТИ: integer или string, значение по умолчанию: для integer – нуль, для string – пустая строка
идентификатор	i	ТИ: строка идентификатора, усеченная до 5 символов. Префикс: имя конструкции
литералы	l	integer или string, значение.
function	f	
declare	d	
return	r	
print	p	
main	m	
;	;	
,	,	
{	{	
}	}	
((
))	
=	=	
+	v	
–		
*		
/		

8. Лексический анализатор:

- **убрать все лишние пробелы:**
 - подстроки, состоящие из более, чем из одного пробела заменить на один пробел;
 - пробельные префиксы и суффиксы для символов `;,}{()=+–/*;`
 - ввести специальный символ для подсчета номера строки `|`.
- **построить регулярные выражения для лексем:**
 - например, для ключевого слова `main` регулярное выражение `→ main`
- **выполнить распознавание лексем:**
 - распознавателем регулярного языка является конечный автомат
- **построить таблицу лексем и таблицу идентификаторов:**
 - на выходе лексический анализатор формирует ТЛ и ТИ
- **при неуспешном распознавании или обнаружении некоторых ошибок во входном тексте выдать сообщение об ошибке.**

Результат лексического разбора (таблица лексем):

<i>Вход лексического анализатора</i>	<i>Выход (таблица лексем)</i>	<i>Дополнительная информация (таблица идентификаторов)</i>
integer	t	
function	f	
fi	i	fi – идентификатор функции, integer
((
integer	t	
x	i	fix – имя, параметр, integer
,	,	
integer	t	
y	i	fiy– имя, параметр integer
))	
{	{	
declare	d	
integer	t	
z	i	fiz – имя, integer, значение: 0
;	;	
z	i	указатель на fiz
=	=	
x	i	указатель на fix
*	v	*
((

x	i	указатель на fix
+	v	+
y	i	указатель на fiy
))	
;	;	
return	r	
z	i	указатель на fiz
;	;	
}	}	
string	t	
function	f	
fs	i	fs –идентификатор функции, string
((
string	t	
a	i	fsa – имя,параметр string
,	,	
string	t	
b	i	fsb – имя, параметр string
)		
{		
declare	d	
string	t	
c	i	fsc – имя, string, значение: пустая строка
;		
declare	d	
string	t	
function	f	
substr	i	substr – идентификатор функции, string
(
string	t	
a	i	substra – имя, параметр string
,	,	
integer	t	
p	i	substp – имя, параметр integer
,	,	
integer	t	
n	i	substrn – имя, параметр integer
))	
;		
c	i	указатель на fsc

=	=	
substr	i	указатель на substr
((
a	i	указатель на fsa
,		
1	l	L01 – литерал, integer, значение:1
,	,	
3	l	L02 – литерал, integer, значение:3
)		
+	v	+
b	i	указатель на fsb
;		
return	r	указатель на fsc
c	i	
;	;	
}	}	
main	m	
{	{	
declare	d	
integer	t	
x	i	mainx – имя, integer, значение: 0
;	;	
declare	d	
integer	t	
y	i	mainy – имя, integer, значение: 0
;		
declare	d	
integer	t	
z	i	mainz – имя, integer, значение: 0
declare	d	
string	t	
sa	i	mainsa – имя, string, значение: пустая строка
;	;	
declare	d	
string	t	
sb	i	mainsb – имя, string, значение: пустая строка
;	;	
declare	d	
string	t	
sc	i	mainsc – имя, string, значение: пустая строка

;	;	
declare	d	
integer	t	
function	f	
strlen	i	strlen – идентификатор функции, integer
(
string	t	
p	i	strlenp – имя, параметр string
)		
;	;	
x	i	указатель на mainx
=	=	
l	l	указатель на L01
;		
y	i	указатель на mainy
=	=	
5	l	L03 – литерал, integer, значение:5
;		
sa	i	указатель на mainsa
=	=	
'1234567890'		L03 – литерал, string, значение: [10]1234567890
;		
sb	i	указатель на mainsb
=	=	
'1234567890'	l	указатель на L03
;	;	
z	i	
=	=	
fi	i	указатель на fi
((
x	i	указатель на mainx
,	,	
y	i	указатель на mainy
))	
;	;	
sc	i	указатель на mainsc
=	=	
fc	i	указатель на fc
((
sa	i	указатель на mainsa
,	,	

sb	i	указатель на mainsb
))	
;	;	
print	p	
'контрольный пример'	l	L04 – литерал, string, значение: [17]контрольный пример
;	;	
print	p	
z	i	указатель на mainz
;	;	
print	p	
sc	i	указатель на mainc
;	;	
print	p	
strlen	i	указатель на strlen
((
sc	i	указатель на mainsc
))	
;	;	
return	r	
0	l	L05 – литерал, integer, значение:0
;	;	
}	}	
;	;	

9. Синтаксический анализатор

Грамматики типа 2 иерархии Хомского:

$G_{II} = \langle T, N, P, S \rangle$ – контекстно-свободные грамматики.

Правила имеют вид: $A \rightarrow \alpha$, где $A \in N$, $\alpha \in V^*$.

Грамматика:

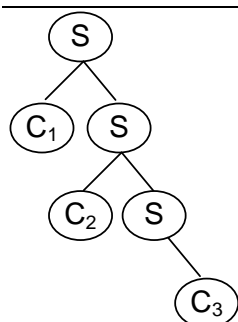
<i>Терминалы</i>	<i>Назначение</i>
t	тип данных
i	идентификатор
l	литерал
f	function
d	declare
r	return
p	print
m	main
;	;
,	,
{	{
}	}
((
))
v	+ – * /

Правила грамматики:

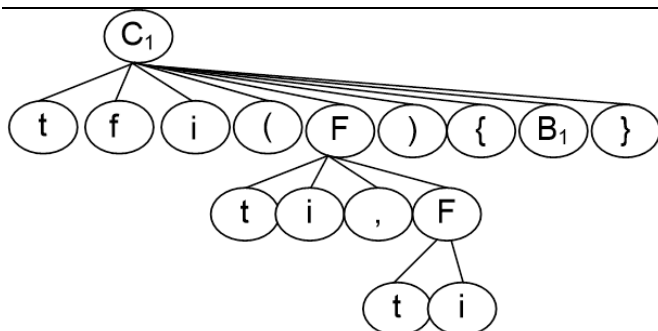
$S \rightarrow C; | CS;$
 $C \rightarrow t f i(F) \{ B \}; | m \{ B \};$
 $B \rightarrow N r E;$
 $N \rightarrow O | ON$
 $O \rightarrow d t i; | r E; | i = E; | d t f i(F);$
 $E \rightarrow i | l | (E) | E v E | i(W)$
 $F \rightarrow t i | t i, F$
 $W \rightarrow i | l | i, W | l, W$

Назначение нетерминалов:

Стартовый символ (2 альтернативы)
 Программная конструкция
 Тело программной конструкции
 Последовательность операторов
 Оператор программы
 Выражение
 Параметры функции
 Подвыражение



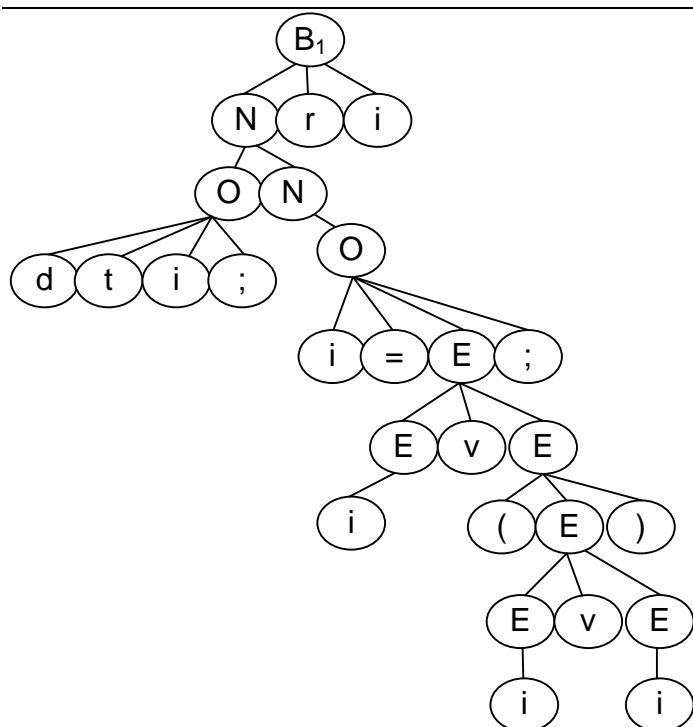
$S \rightarrow CS$; (второе правило для S)



```

integer function fi(integer x, integer y)
{
  declare integer z;
  z= x*(x+y);
  return z;
}
  
```

(первое правило для $C \rightarrow tfi(F)\{B\}$;
 (для двух параметров функции
 применяется второе правило $F \rightarrow ti, F$,
 затем первое $F \rightarrow ti$)



```

{
  declare integer z;
  z= x*(x+y);
  return z;
}
  
```

(единственное правило для $B \rightarrow NrE$;
 (второе правило для $N \rightarrow ON$)
 (первое правило для $O \rightarrow dti$;
 (первое правило для $N \rightarrow O$)
 (третье правило для $O \rightarrow i=E$;
 (первое правило для $E \rightarrow i$)
 (третье правило для $E \rightarrow EvE$)
 (первое правило для $E \rightarrow i$)
 (первое правило для $E \rightarrow i$)

10. Семантика компилятора:

№	Правило
1	Наличие функции main
2	Усечение слишком длинных идентификаторов до 5 символов
3	Сначала осуществляется проверка на ключевые слова, а затем на идентификатор. Не допускаются идентификаторы, совпадающие с ключевыми словами
4	Нет повторяющихся наименований функций
5	Нет повторяющихся объявлений идентификаторов
6	Предварительное объявление, применяемых функций
7	Предварительное объявление, применяемых идентификаторов.
8	Соответствие типов формальных и фактических параметров при вызове функций
9	Усечение слишком длинного значения string-литерала
10	Округление слишком большого значения integer-литерала
11	Если ошибка возникает на этапе лексического анализа, синтаксический анализ не выполняется
12	При возникновении ошибки в процессе лексического анализа, ошибочная фраза игнорируется (предполагается, что ее нет) и осуществляется попытка разбора следующей фразы. Граница фразы, любой сепаратор (пробел, скобка, запятая, точка с запятой и пр.)
13	Если 3 подряд фразы не разобраны, то работа транслятора останавливается
14	При возникновении ошибки в процессе синтаксического анализа, ошибочная фраза игнорируется (предполагается, что ее нет) и осуществляется попытка разбора следующей фразы. Граница фразы – точка с запятой.

11. Построение МП-автомата $M = \langle Q, V, Z, \delta, q_0, z_0, F \rangle$

Пусть $G = \langle T, N, P, S \rangle$ – контекстно-свободная грамматика.

Магазинный автомат $M = \langle Q, V, Z, \delta, q_0, z_0, F \rangle$:

$$Q = \{q_0\}, V = T, F = \{q_0\}, Z = T \cup N \cup \{z_0\}$$

$$\forall A: (A \rightarrow \alpha) \in P \Rightarrow \delta(q_0, \lambda, A) = (q_0, \alpha^R)$$

$$\forall a \in T \Rightarrow \delta(q_0, a, a) = (q_0, \lambda)$$

$$\delta(q_0, \lambda, z_0) = (q_0, \lambda)$$

Стартовая конфигурация МП-автомата: $(q_0, w, z_0 S)$

12. *Пример:* $G = \langle T, N, P, S \rangle$

$$S \rightarrow C|CS$$
$$C \rightarrow \text{tfi}(F)\{B\}; |m\{B\};$$
$$B \rightarrow NrE;$$
$$\mathbf{N} \rightarrow \mathbf{O} | \mathbf{O} \mathbf{N}$$
$$O \rightarrow dti; |rE; |i=E; |dtfi(F);$$
$$E \rightarrow i|1|(E)|E \vee E|i(W)$$
$$F \rightarrow ti|ti, F$$
$$W \rightarrow i|1|i, W|1, W$$

а) Определим компоненты МП-автомата:

$$Q = \{q_0\}, V = \{d, f, i, l, r, t, v, \backslash\}, \backslash\{\backslash\}\backslash(, :, =$$

$$Z = V \cup \{S, C, B, N, O, E, F, W\} \cup \{z_0\}$$

б) Функция переходов $\forall A : (A \rightarrow \alpha) \in P \Rightarrow \delta(q_0, \lambda, A) = (q_0, \alpha^R)$

аргументы	α^R	α^R	α^R	α^R	α^R
q_0, λ, S	C	SC			
q_0, λ, C	; }B{)F(ift	; }B{ m			
q_0, λ, B	;ErN				
q_0, λ, N	O	NO			
q_0, λ, O	;itd	;Er	;E=i	;)F(ift d	
q_0, λ, E	i	l)E(EvE)W(i
q_0, λ, F	it	F, it			
q_0, λ, W	i	l	W, i	W, l	

Стек – список элементов, организованных по принципу LIFO.

Обозначения:

S – стартовый символ.

z_0 – символ дна стека (в программе можно использовать знак \$).

Конец входной ленты обозначим символом, совпадающим с символом дна стека \$ (используется как признак завершения разбора).

с) Функция переходов $\forall a \in T \Rightarrow \delta(q_0, a, a) = (q_0, \lambda)$

(на вершине стека находится терминальный символ, который совпадает с текущим символом входной цепочки. Этот символ выталкивается из стека, считывающая головка передвигается на одну позицию вправо)

аргументы	Значение
q_0, d, d	q_0, λ
q_0, f, f	
q_0, i, i	
q_0, r, r	
q_0, t, t	
$q_0, \}, \}$	
$q_0, \{, \{$	
$q_0, (, ($	
$q_0,),)$	
$q_0, :, :$	

d) Функция переходов $\delta(q_0, \lambda, z_0) = (q_0, \lambda)$

z_0 - начальное состояние (маркер дна)

е) Работа магазинного автомата.

1	начальное состояние МП-автомата
Лента	$tfi(ti, ti) \{ dti; i=iv(ivi); ri; \} tfi(ti, ti) \{ dti; dtfi(ti, ti, ti); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m \{ dti; dti; dti; dti; dti; dti; dtfi(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	Z_0S

1.1	подбор подходящего правила грамматики по нетерминалу
Лента (не продвигается)	$tfi(ti, ti) \{ dti; i=iv(ivi); ri; \} tfi(ti, ti) \{ dti; dtfi(ti, ti, ti); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m \{ dti; dti; dti; dti; dti; dti; dtfi(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	Z_0C (1-е правило для $S \rightarrow C$)

На каждом шаге работы МП-автомата сохраняется его состояние (позиция на ленте, состояние магазина, номер правила)

1.1.1	
Лента	$t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); r_i; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)v_i; r_i; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); p_l; p_i; p_i; p_i(i); r_l; \};$
Магазин	$Z_0; \} B \{ \} F(ift \text{ (1-е правило для } C \rightarrow t\bar{f}i(F) \{ B \};)$
Лента	$t_i, t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); r_i; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)v_i; r_i; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); p_l; p_i; p_i; p_i(i); r_l; \};$
Магазин	$Z_0; \} B \{ \} F$

1.1.1.1	
Лента	$t_i, t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); r_i; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)v_i; r_i; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); p_l; p_i; p_i; p_i(i); r_l; \};$
Магазин	$Z_0; \} B \{ \} it \text{ (1-е правило для } F \rightarrow t_i)$
Лента	$t_i, t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); r_i; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)v_i; r_i; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); p_l; p_i; p_i; p_i(i); r_l; \};$
Магазин	$Z_0; \} B \{ \} it$
Лента	$, t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); r_i; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)v_i; r_i; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); p_l; p_i; p_i; p_i(i); r_l; \};$
Магазин	$Z_0; \} B \{ \}$
Автомат остановлен	

1.1.1.2 возврат к сохраненному сост. 1.1.1.1, выбор другого правила для F	
Лента	$t_i, t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); r_i; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)v_i; r_i; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); p_l; p_i; p_i; p_i(i); r_l; \};$
Магазин	$Z_0; \} B \{ \} F, it \text{ (2-е правило для } F \rightarrow t_i, F)$
Лента	$t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); r_i; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)v_i; r_i; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); p_l; p_i; p_i; p_i(i); r_l; \};$
Магазин	$Z_0; \} B \{ \} F$

1.1.1.2.1	
Лента	$t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); r_i; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)v_i; r_i; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); p_l; p_i; p_i; p_i(i); r_l; \};$
Магазин	$Z_0; \} B \{ \} it \text{ (1-е правило для } F \rightarrow t_i)$
Лента	$dt_i; i=iv(iv_i); r_i; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)v_i; r_i; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); p_l; p_i; p_i; p_i(i); r_l; \};$
Магазин	$Z_0; \} B$

1.1.1.2.2	
Лента	$dti; i=iv(ivi); ri; \} tfi(ti, ti) \{ dti; dtfi(ti, ti, ti); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m\{ dti; dti; dti; dti; dti; dtfi(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0; \}; ErN$ (правило для $B \rightarrow NrE;$)
Лента	$dti; i=iv(ivi); ri; \} tfi(ti, ti) \{ dti; dtfi(ti, ti, ti); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m\{ dti; dti; dti; dti; dti; dtfi(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0; \}; ErO$ (1-е правило для $N \rightarrow O$)
Лента	$dti; i=iv(ivi); ri; \} tfi(ti, ti) \{ dti; dtfi(ti, ti, ti); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m\{ dti; dti; dti; dti; dti; dtfi(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0; \}; ErNO$ (2-е правило для $N \rightarrow ON$)
Лента	$dti; i=iv(ivi); ri; \} tfi(ti, ti) \{ dti; dtfi(ti, ti, ti); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m\{ dti; dti; dti; dti; dti; dtfi(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0; \}; ErN; itd$ (1-е правило для $O \rightarrow dti;$)
Лента	$i=iv(ivi); ri; \} tfi(ti, ti) \{ dti; dtfi(ti, ti, ti); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m\{ dti; dti; dti; dti; dti; dtfi(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0; \}; ErN$
Лента	$i=iv(ivi); ri; \} tfi(ti, ti) \{ dti; dtfi(ti, ti, ti); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m\{ dti; dti; dti; dti; dti; dtfi(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0; \}; ErO$ (1-е правило для $N \rightarrow O$)
Лента	$i=iv(ivi); ri; \} tfi(ti, ti) \{ dti; dtfi(ti, ti, ti); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m\{ dti; dti; dti; dti; dti; dtfi(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0; \}; Er; itd$ (1-е правило для $O \rightarrow dti;$)
Автомат остановлен	

1.1.2	
Лента	$tfi(ti, ti) \{ dti; i=iv(ivi); ri; \} tfi(ti, ti) \{ dti; dtfi(ti, ti, ti); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m\{ dti; dti; dti; dti; dti; dtfi(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0; \} B \{ m$ (2-е правило для $C \rightarrow m\{ B \};$)
Автомат остановлен	

1.2	
Лента	$tfi(ti, ti) \{ dti; i=iv(ivi); ri; \} tfi(ti, ti) \{ dti; dtfi(ti, ti, ti); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m\{ dti; dti; dti; dti; dti; dtfi(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	Z_0SC

1.2.1	
Лента	$t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); ri; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \} B \{ \} F(ift \text{ (1-е правило для } C \rightarrow t\bar{f}i(F)\{B\};)$
Лента	$t_i, t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); ri; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	и т.д.

Правильная траектория:

	$t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); ri; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	Z_0S
Магазин	Z_0SC
Магазин	$Z_0S \} B \{ \} F(ift$
Лента	$t_i, t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); ri; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0S \} B \{ \} F$
Магазин	$Z_0S \} B \{ \} F, t_i$
Лента	$t_i) \{ dt_i; i=iv(iv_i); ri; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0S \} B \{ \} F$
Магазин	$Z_0S \} B \{ \} it$
Лента	$dt_i; i=iv(iv_i); ri; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0S \} B$
Магазин	$Z_0S \}; ErN$
Магазин	$Z_0S \}; ErNO$
Магазин	$Z_0S \}; ErN; itd \text{ (1-е правило для } O \rightarrow dt_i;)$
Лента	$i=iv(iv_i); ri; \} t\bar{f}i(t_i, t_i) \{ dt_i; dt\bar{f}i(t_i, t_i, t_i); i=i(i, l, l)vi; ri; \}; m \{ dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt_i; dt\bar{f}i(t_i); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \};$
Магазин	$Z_0S \}; ErN$
Магазин	$Z_0S \}; ErO \text{ (1-е правило для } N \rightarrow O)$
Магазин	$Z_0S \}; Er; E=i \text{ (1-е правило для } O \rightarrow i=E;)$

Лента	$iv(i,vi);ri; \} t_{fi}(ti,ti) \{ dti; dt_{fi}(ti,ti,ti); i=i(i,l,l)vi;ri; \} ; m \{ dti; dti; dti; dti; dti; dti; dt_{fi}(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i,i); i=i(i,i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \} ;$
Магазин	$Z_0S \} ; Er; E$
Магазин	$Z_0S \} ; Er; EvE$
Магазин	$Z_0S \} ; Er; Evi$
Лента	$(ivi);ri; \} t_{fi}(ti,ti) \{ dti; dt_{fi}(ti,ti,ti); i=i(i,l,l)vi;ri; \} ; m \{ dti; dti; dti; dti; dti; dti; dt_{fi}(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i,i); i=i(i,i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \} ;$
Магазин	$Z_0S \} ; Er; E$
Магазин	$Z_0S \} ; Er;)E($
Лента	$ivi);ri; \} t_{fi}(ti,ti) \{ dti; dt_{fi}(ti,ti,ti); i=i(i,l,l)vi;ri; \} ; m \{ dti; dti; dti; dti; dti; dti; dt_{fi}(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i,i); i=i(i,i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \} ;$
Магазин	$Z_0S \} ; Er;)E$
Магазин	$Z_0S \} ; Er;)EvE$
Магазин	$Z_0S \} ; Er;)Evi$
Лента	$i);ri; \} t_{fi}(ti,ti) \{ dti; dt_{fi}(ti,ti,ti); i=i(i,l,l)vi;ri; \} ; m \{ dti; dti; dti; dti; dti; dti; dt_{fi}(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i,i); i=i(i,i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \} ;$
Магазин	$Z_0S \} ; Er;)E$
Магазин	$Z_0S \} ; Er; i$
Лента	$i; \} t_{fi}(ti,ti) \{ dti; dt_{fi}(ti,ti,ti); i=i(i,l,l)vi;ri; \} ; m \{ dti; dti; dti; dti; dti; dti; dt_{fi}(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i,i); i=i(i,i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \} ;$
Магазин	$Z_0S \} ; E$
Магазин	$Z_0S \} ; i$
Лента	$t_{fi}(ti,ti) \{ dti; dt_{fi}(ti,ti,ti); i=i(i,l,l)vi;ri; \} ; m \{ dti; dti; dti; dti; dti; dti; dt_{fi}(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i,i); i=i(i,i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \} ;$
Магазин	Z_0S
Магазин	Z_0SC
Магазин	$Z_0S; \} B \{) F(ift$
Лента	$ti,ti) \{ dti; dt_{fi}(ti,ti,ti); i=i(i,l,l)vi;ri; \} ; m \{ dti; dti; dti; dti; dti; dti; dt_{fi}(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i,i); i=i(i,i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \} ;$
Магазин	$Z_0S; \} B \{) F$
Магазин	$Z_0S; \} B \{) F,it$
Лента	$ti) \{ dti; dt_{fi}(ti,ti,ti); i=i(i,l,l)vi;ri; \} ; m \{ dti; dti; dti; dti; dti; dti; dt_{fi}(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i,i); i=i(i,i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \} ;$
Магазин	$Z_0S; \} B \{) F$
Магазин	$Z_0S; \} B \{) it$
Лента	$dti; dt_{fi}(ti,ti,ti); i=i(i,l,l)vi;ri; \} ; m \{ dti; dti; dti; dti; dti; dti; dt_{fi}(ti); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i,i); i=i(i,i); pl; pi; pi; pi(i); rl; \} ;$
Магазин	$Z_0S; \} B$
Магазин	$Z_0S; \} ; ErN$
Магазин	$Z_0S; \} ; ErNO$

Магазин	$Z_0S; \};ErN;itd$
Лента	$dtfi(ti,ti,ti);i=i(i,l,l)vi;ri; \};m\{ dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=1;i=1;i=1;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};ErN$
Магазин	$Z_0S; \};ErNO$
Магазин	$Z_0S; \};ErN;)F(ift d$
Лента	$ti,ti,ti);i=i(i,l,l)vi;ri; \};m\{ dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=1;i=1;i=1;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};ErN;)F$
Магазин	$Z_0S; \};ErN;)F,it$
Лента	$ti,ti);i=i(i,l,l)vi;ri; \};m\{ dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=1;i=1;i=1;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};ErN;)F$
Магазин	$Z_0S; \};ErN;)F,it$
Лента	$ti);i=i(i,l,l)vi;ri; \};m\{ dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=1;i=1;i=1;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};ErN;)F$
Магазин	$Z_0S; \};ErN;)it$
Лента	$i=i(i,l,l)vi;ri; \};m\{ dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=1;i=1;i=1;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};ErN$
Магазин	$Z_0S; \};ErO$
Магазин	$Z_0S; \};Er;E=i$
Лента	$i(i,l,l)vi;ri; \};m\{ dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=1;i=1;i=1;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};Er;E$
Магазин	$Z_0S; \};Er;EvE$
Магазин	$Z_0S; \};Er; Ev)W(i$
Лента	$i,l,l)vi;ri; \};m\{ dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=1;i=1;i=1;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};Er; Ev)W$
Магазин	$Z_0S; \};Er; Ev)W,i$
Лента	$l,l)vi;ri; \};m\{ dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=1;i=1;i=1;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};Er; Ev)W$
Магазин	$Z_0S; \};Er; Ev)W,l$
Лента	$l)vi;ri; \};m\{ dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=1;i=1;i=1;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};Er;Ev)W$
Магазин	$Z_0S; \};Er; Ev)l$
Лента	$l;ri; \};m\{ dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=1;i=1;i=1;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};Er;E$

Магазин	$Z_0S; \};Er;l$
Лента	$ri; \};m\{dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=l;i=l;i=l;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};Er$
Лента	$i; \};m\{dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=l;i=l;i=l;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0S; \};E$
Магазин	$Z_0S; \};i$
Лента	$m\{dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=l;i=l;i=l;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	Z_0S
Магазин	Z_0C
Магазин	$Z_0; \}B\{m$
Лента	$dti;dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=l;i=l;i=l;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0; \}B$
Магазин	$Z_0; \};ErN$
Магазин	$Z_0; \};ErNO$
Магазин	$Z_0; \};ErN;itd$
Лента	$dti;dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=l;i=l;i=l;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0; \};ErN$
Магазин	$Z_0; \};ErNO$
Магазин	$Z_0; \};ErN;itd$
Лента	$dti;dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=l;i=l;i=l;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0; \};ErN$
Магазин	$Z_0; \};ErNO$
Магазин	$Z_0; \};ErN;itd$
Лента	$dti;dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=l;i=l;i=l;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0; \};ErN$
Магазин	$Z_0; \};ErNO$
Магазин	$Z_0; \};ErN;itd$
Лента	$dti;dti;dtfi(ti);i=i;i=l;i=l;i=l;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0; \};ErN$
Магазин	$Z_0; \};ErNO$
Магазин	$Z_0; \};ErN;itd$
Лента	$dti;dtfi(ti);i=i;i=l;i=l;i=l;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$
Магазин	$Z_0; \};ErN$
Магазин	$Z_0; \};ErNO$
Магазин	$Z_0; \};ErN;itd$
Лента	$dtfi(ti);i=i;i=l;i=l;i=l;i=i(i,i);i=i(i,i);pl;pi;pi;pi(i);rl; \};$

Магазин	$Z_0; \}; \text{ErN}$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErNO}$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErNO}; \text{F(ift}$
Лента	$\text{ti}); i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); \text{pl}; \text{pi}; \text{pi}; \text{pi}(i); \text{rl}; \};$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErNO}; \text{F}$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErNO}; \text{it}$
Лента	$i=i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); \text{pl}; \text{pi}; \text{pi}; \text{pi}(i); \text{rl}; \};$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErNO}$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErN}; \text{E}=i$
Лента	$i; i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); \text{pl}; \text{pi}; \text{pi}; \text{pi}(i); \text{rl}; \};$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErN}; \text{E}$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErN}; i$
Лента	$i=l; i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); \text{pl}; \text{pi}; \text{pi}; \text{pi}(i); \text{rl}; \};$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErN}$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErNO}$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErN}; \text{E}=i$
Лента	$i=l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); \text{pl}; \text{pi}; \text{pi}; \text{pi}(i); \text{rl}; \};$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErN}$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErNO}$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErN}; \text{E}=i$
Лента	$l; i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); \text{pl}; \text{pi}; \text{pi}; \text{pi}(i); \text{rl}; \};$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErN}; \text{E}$
Магазин	$Z_0; \}; \text{ErN}; l$
Лента	$i=l; i=i(i, i); i=i(i, i); \text{pl}; \text{pi}; \text{pi}; \text{pi}(i); \text{rl}; \};$
...	...
Лента	
Магазин	Z_0
Магазин	
<i>Цепочка разобрана</i>	

аргументы	α^R	α^R	α^R	α^R	α^R
q_0, λ, S	C	SC			
q_0, λ, C	$; \} B \{ \text{F(ift}$	$; \} B \{ m$			
q_0, λ, B	$; \text{ErN}$				
q_0, λ, N	O	NO			
q_0, λ, O	$; \text{itd}$	$; \text{Er}$	$; \text{E}=i$	$; \text{F(ift}$	
q_0, λ, E	i	l	$) \text{E(}$	EvE	$) \text{W(i}$
q_0, λ, F	it	F, it			
q_0, λ, W	i	l	W, i	W, l	