

2º curso / 2º cuatr.

Grados en
Ing. Informática

Arquitectura de Computadores

Coprocesadores en OpenMP

Material elaborado por Mancia Anguita

Profesores: Mancia Anguita, Maribel García y Christian Morillas



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**



Departamento de
Ingeniería de Computadores,
Automática y Robótica
UNIVERSIDAD DE GRANADA


Bibliografía

- Especificaciones OpenMP para coprocesadores:
 - Sec. 2.14 (*“Device Directives”*):
 - ▶ <https://www.openmp.org/specifications/>
- Compilador nvc de Nvidia (instalado en atcgrid4, implementa parte de OpenMP 5.0):
 - <https://docs.nvidia.com/hpc-sdk/compiler/hpc-compilers-user-guide/index.html#openmp-use>
 - <https://docs.nvidia.com/hpc-sdk/compiler/hpc-compilers-user-guide/index.html#openmp-subset>

Contenidos

- **OpenMP 5**
- Coprocesador en atcgrid
- Arquitectura CPU + coprocesador
- Construcciones/Directivas para ejecutar código en coprocesadores
- Construcciones/Directivas target, teams, distribute, parallel y for
 - Combinar construcciones/directivas
- Construcción/Directiva target data
- Construcciones/Directivas target enter data y target exit data
- Cláusulas
- Variables de control y funciones

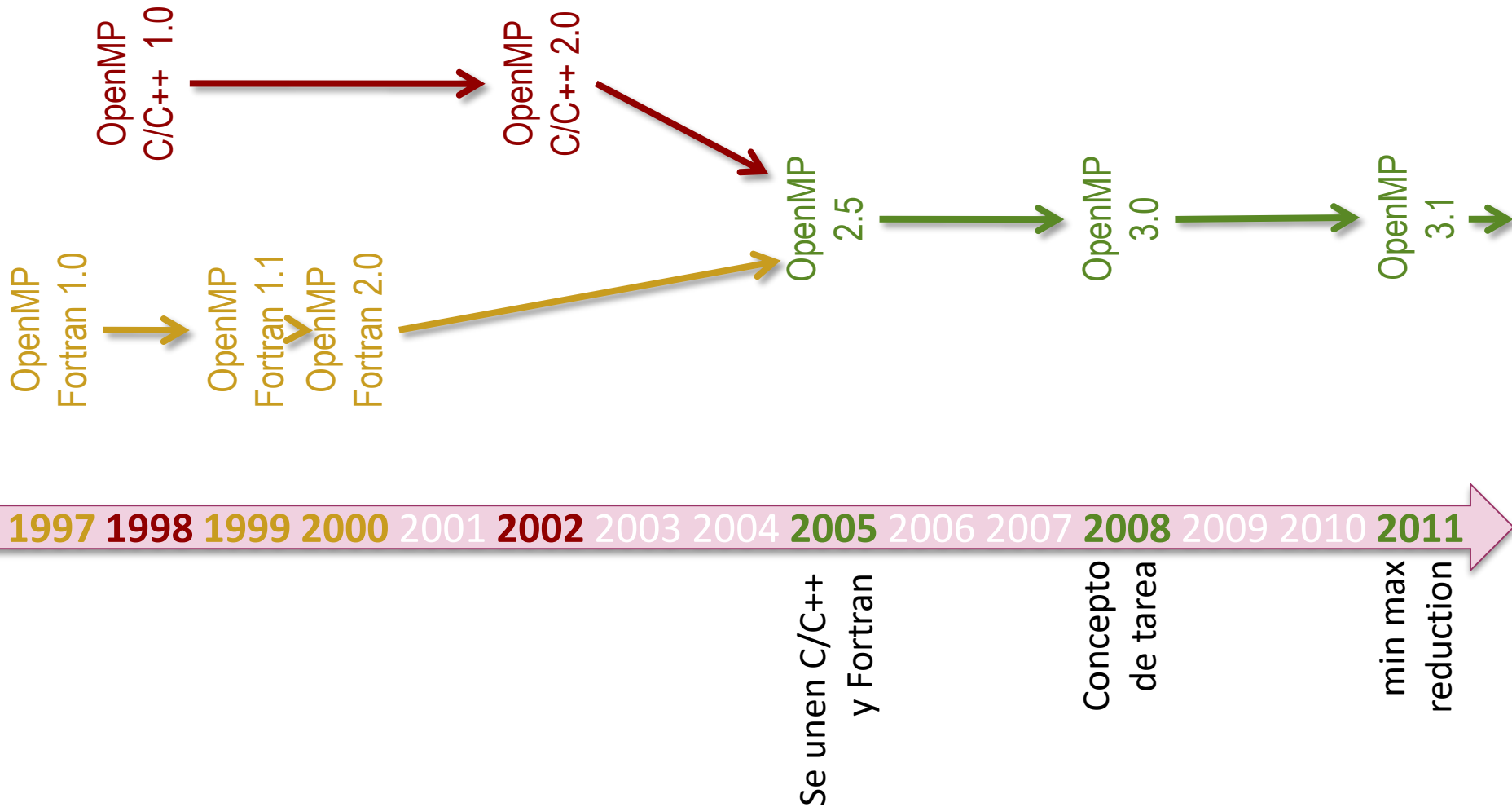
¿Qué es OpenMP 5?

- Es una API para C/C++ y Fortran para  escribir **código paralelo**, usando **directivas** y **funciones**, con el paradigma/estilo de programación de
 - **variables compartidas** para ejecutar aplicaciones en paralelo en varios **threads** en una CPU
 - desde 2013, también con el estilo de programación de **paralelismo de datos** para ejecutar código paralelo en aceleradores (**coprocesadores**)
- API (*Application Programming Interface*):
 - **Capa de abstracción** que permite al programador acceder cómodamente a través de una interfaz a un conjunto de funcionalidades.
- La API OpenMP define/comprende:
 - **Directivas** del compilador, **funciones** de biblioteca, y **variables** de entorno.

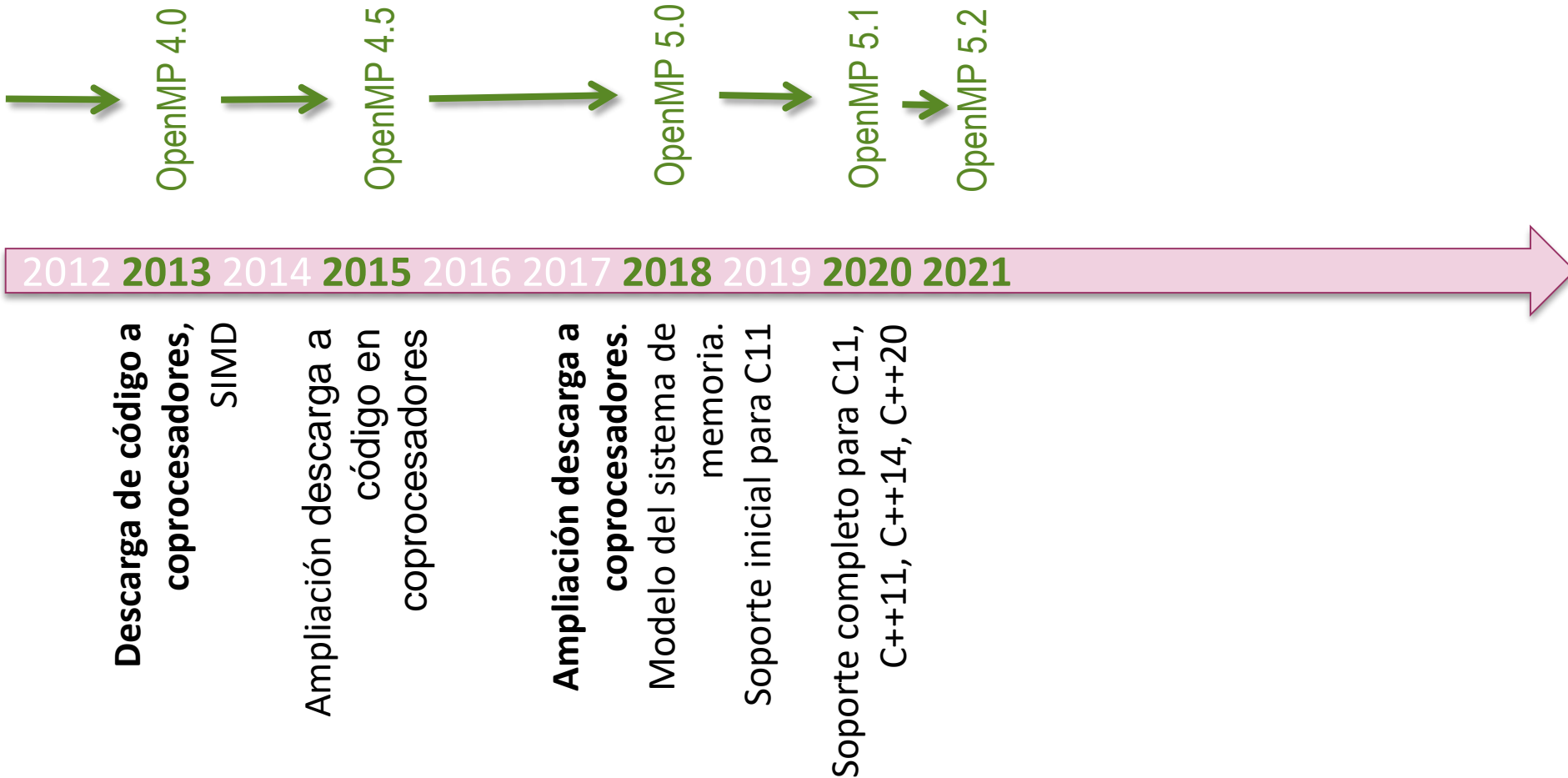
¿Qué es OpenMP 5?

- Es una herramienta para programación paralela:
 - No automática (no extrae paralelismo implícito)
 - Con un modelo de programación:
 - ▶ Basado el paradigma/estilo de variables compartidas y en **paralelismo de datos** (Lección 4/Tema 2)
 - Ofrece al programador los medios para distribuir la ejecución de un programa entre diferentes recursos computacionales, llamados dispositivos (*devices*) en las especificaciones de OpenMP (CPUs, GPUs, DSPs, ...), en un sistema de cómputo heterogéneo.
 - ▶ Multithread
 - Los threads de un dispositivo no pueden migrar a otro.
 - La ejecución comienza en el dispositivo anfitrión (*host*).
 - Los threads tienen los datos en memorias. Los dispositivos pueden o no compartir memoria.
 - ▶ Basada en directivas del compilador y funciones (Lección 4/Tema2):
 - El código paralelo OpenMP es código escrito con un **lenguaje secuencial** (C, C++ o Fortran) + **directivas y funciones** de la interfaz OpenMP
 - Portable.

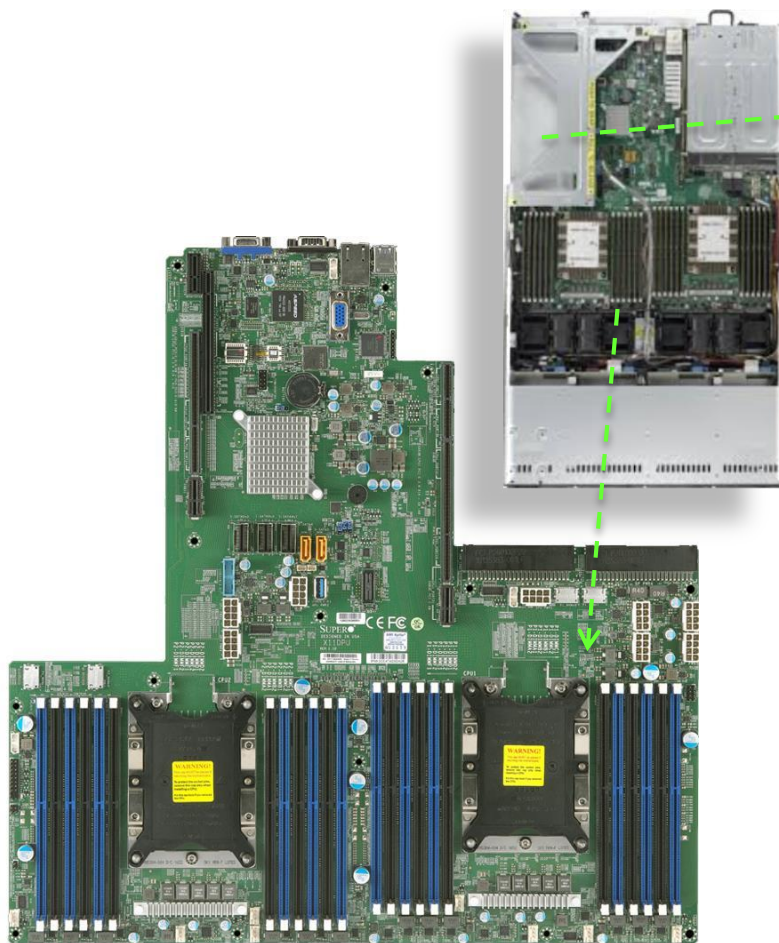
Evolución de OpenMP



Evolución de OpenMP

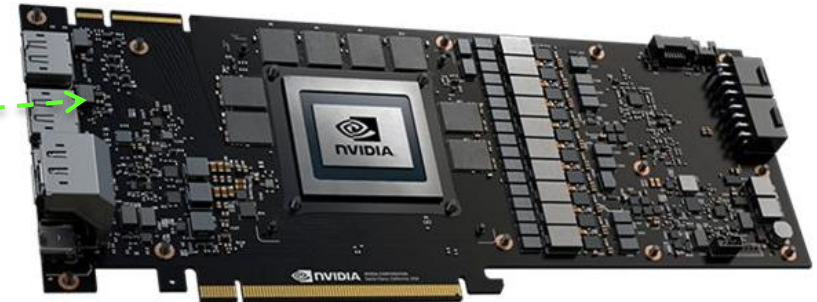


Nodo con coprocesador en atcgrid: atcgrid4

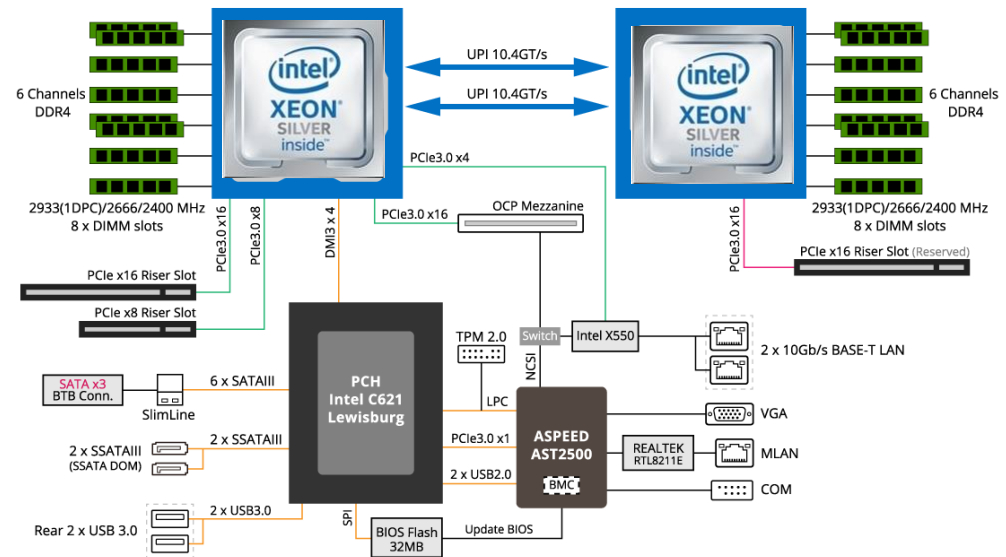


Supermicro SYS-6019U-TR4 1U

<https://www.supermicro.com/en/products/motherboard/X11DPU>



Nvidia Quadro RTX 5000 (3,072 núcleos)

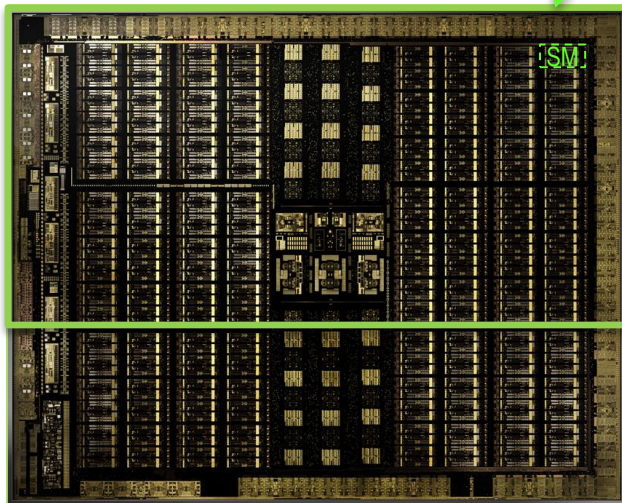


Intel® C621 Chipset

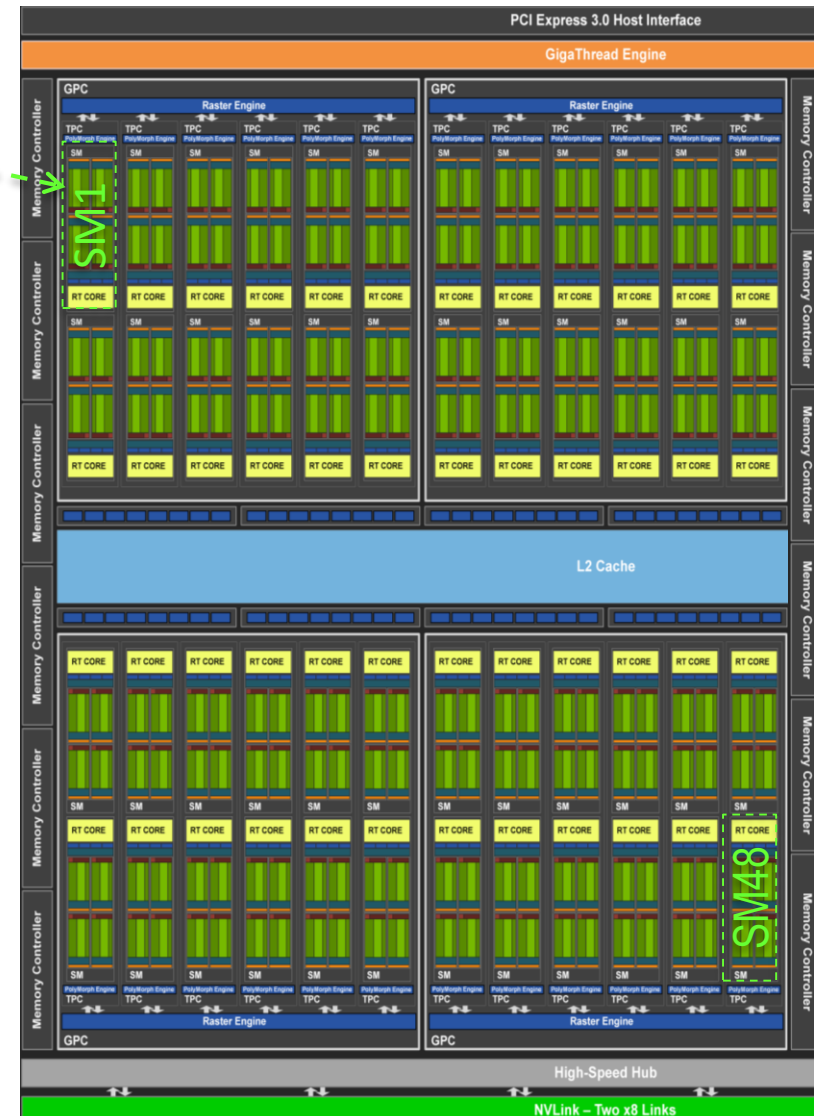
Nvidia Quadro RTX 5000



Características	Quadro RTX 5000
Núcleos de procesamiento paralelo	3072
Streaming Multiprocessor (SM) SIMT	48
Máximo de <i>threads</i> por SM (o CUDA Block)	1024
Nº de threads en un warp (los threads se envían a ejecución agrupados en unidades llamadas <i>warp</i> en CUDA)	32
Memoria de la GPU en la tarjeta	GDDR6 de 16 GB
Bus para conexión con host	PCI Express 3.0 x 16



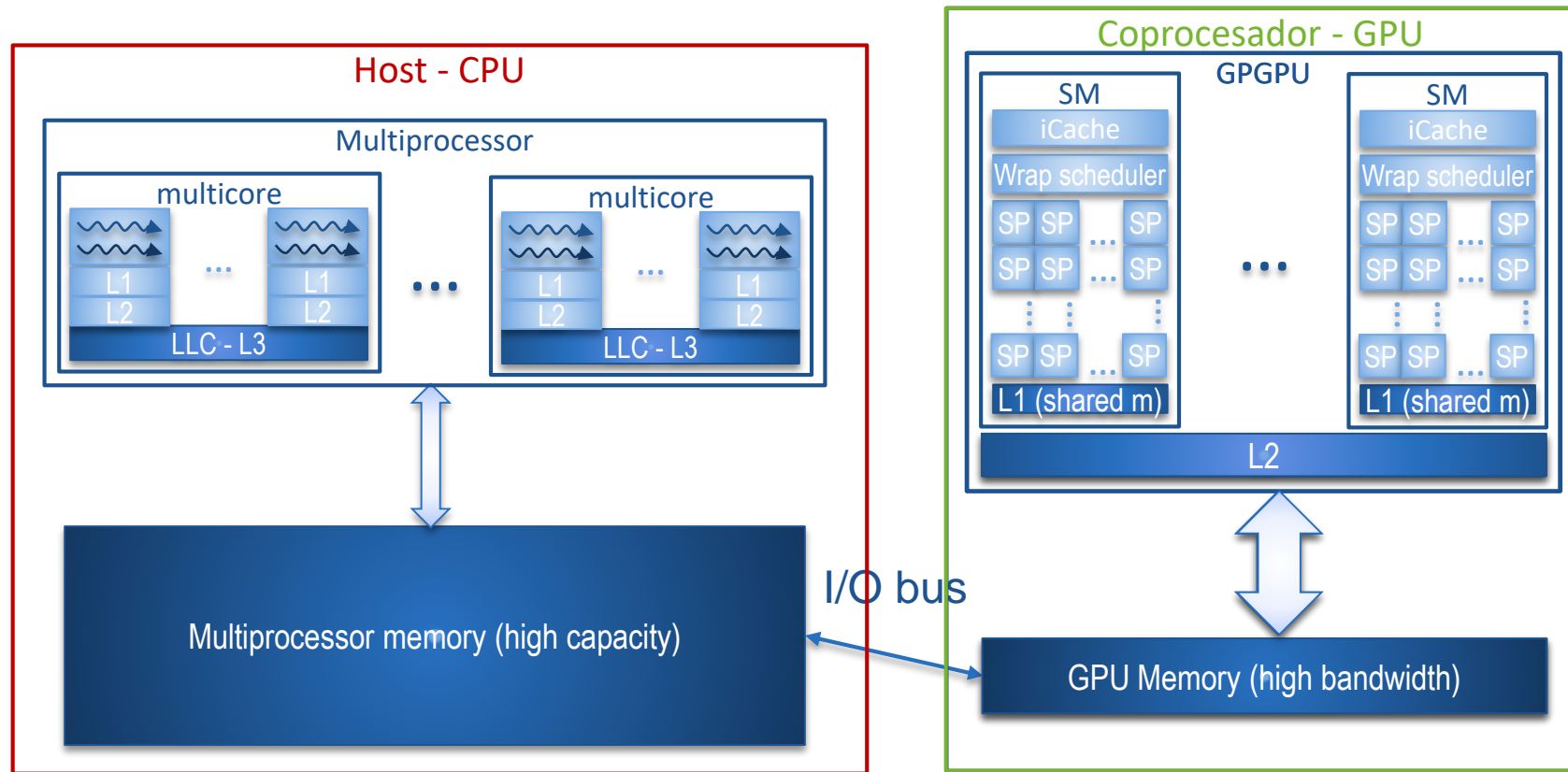
Nvidia Quadro RTX 5000 tiene 2/3 de núcleos que el chip mostrado (48 SM en lugar de 72)



Contenidos

- OpenMP 5
- Coprocesador en atcgrid
- **Arquitectura CPU + coprocesador**
- Construcciones/Directivas para ejecutar código en coprocesadores
- Construcciones/Directivas target, teams, distribute, parallel y for
 - Combinar construcciones/directivas
- Construcción/Directiva target data
- Construcciones/Directivas target enter data y target exit data
- Cláusulas
- Variables de control y funciones

Arquitectura CPU + coprocesador GPU



 Los núcleos (cores) de una CPU pueden ejecutar dos hilos ( = 1 hilo)

SP (*Streaming Processor*) o núcleo CUDA

SM (*Streaming Multiprocessor*)

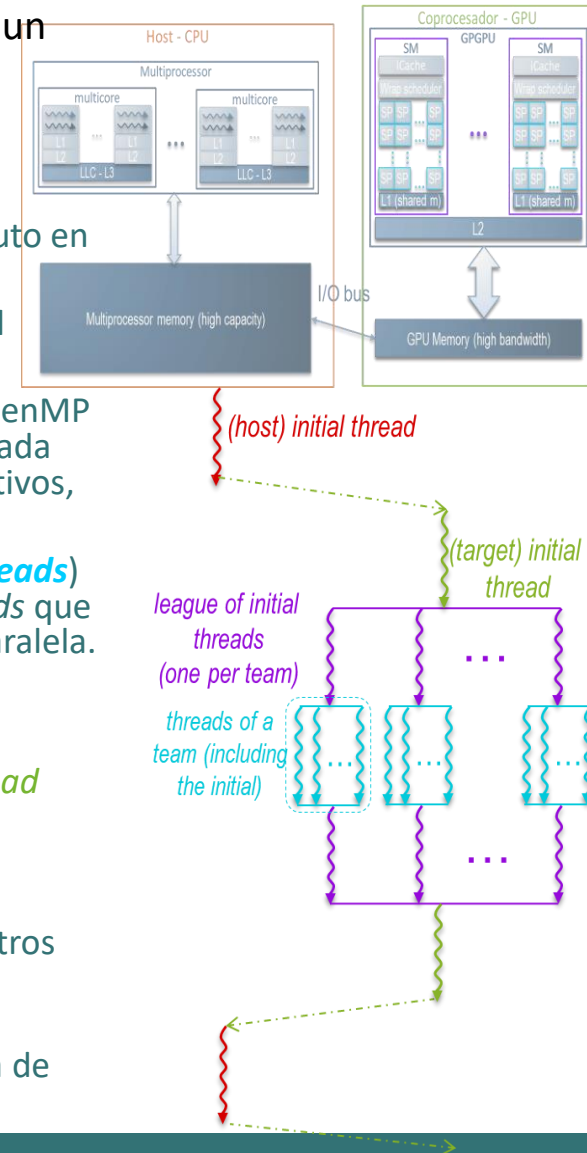
GPGPU (*General purpose GPU*)



Se usa un bus de E/S (*Input/Output*) para la comunicación entre el host y la GPU (transferencias entre memorias)

Uso de coprocesadores en OpenMP: terminología y definiciones

- OpenMP, desde la versión 4.0, permite la distribución de la ejecución de un código entre los diferentes dispositivos de cómputo disponibles en una plataforma.
- Ejecución de programas:
 - Para OpenMP un **dispositivo** o **device** (CPU, GPU, DSP, ...) es un recurso de cómputo en el que se puede ejecutar una **región** de código
 - El dispositivo anfitrión o **host device** es aquel en el que comienza la ejecución del programa OpenMP. Si hay un total de N dispositivos, el host se identifica por N.
 - Los dispositivos usados como coprocesadores/aceleradores se denominan en OpenMP dispositivo destino o **target devices**. Desde el host se enviará trabajo a estos. A cada uno se le asigna un identificador, de 0 a N-1, siendo N el número total de dispositivos, incluido el host.
 - Cada dispositivo tendrá un conjunto de flujo de instrucciones o hilos/hebras (**threads**) propio que no pueden migrar a otro dispositivo. Hay flujos llamados *initial threads* que crearán a otros **flujos** que junto a él colaborarán en la ejecución de una región paralela. Estos flujos se pueden organizar en equipos, cada uno tendrá un **initial threads**.
 - El primer flujo que se ejecuta en el host es el **initial thread** del host.
 - Cuando se quiere ejecutar código en un dispositivo destino se crea un **initial thread** asociado a este.
- Gestión de datos:



Contenidos

- OpenMP 5
- Coprocesador en atcgrid
- Arquitectura CPU + coprocesador
- **Construcciones/Directivas para ejecutar código en coprocesadores**
- Construcciones/Directivas target, teams, distribute, parallel y for
 - Combinar construcciones/directivas
- Construcción/Directiva target data
- Construcciones/Directivas target enter data y target exit data
- Cláusulas
- Variables de control y funciones

Directivas para usar coprocesadores (4.5)



TYPES		Executable				Declarative
Devices		target, target data			target enter data/ target exit data, target update	declare target/end declare target, declare target
Teams		teams	distribute			
Threads	Parallel	parallel				
	Work-sharing	single	for			
		sections				
	Synchroni- zation	critical*		atomic	barrier, flush*	
TYPES		With structure block	With an associated loop	With a statement	Stand-alone	With declaration- definition of variables, functions

- ▶ * solo soportada para cpu en **nvc**, error para gpu
- ▶ *Stand-alone directives*: directivas ejecutables que no tienen código de usuario asociado
- ▶ Se han destacado en **color** las directivas añadidas en v4 para el uso de coprocesadores

Contenidos

- OpenMP 5
- Coprocesador en atcgrid
- Arquitectura CPU + coprocesador
- Construcciones/Directivas para ejecutar código en coprocesadores
- **Construcciones/Directivas target, teams, distribute, parallel y for**
 - Combinar construcciones/directivas
- Construcción/Directiva target data
- Construcciones/Directivas target enter data y target exit data
- Cláusulas
- Variables de control y funciones

Directivas target, teams, distribute, parallel y for en coprocesadores

TYPES		Executable				Declarative
Devices		target, target data			target enter data/ target exit data, target update	declare target/ end declare target, declare target, declare target
Teams		teams	distribute			
Threads	Parallel	parallel				
	Work-sharing	single	for			
		sections				
	Synchroni- zation	critical*		atomic	barrier, flush*	
TYPES		With structure block	With an associated loop	With a statement	Stand-alone	With declaration- definition of variables, functions

- **#pragma omp target** delimita el código a ejecutar en un dispositivo coprocesador. El entorno de datos queda definido por el mapeo implícito y explícito de variables
- **#pragma omp teams** crea una liga de equipos de trabajo, en particular crea los hilos iniciales (*initial threads*) de cada equipo.
- **#pragma omp distribute** distribuye las iteraciones de un bucle entre los equipos (*teams*)
- **#pragma omp parallel** cada hilo inicial que encuentra esta construcción crea el resto de hilos que conforma el equipo.
- **#pragma omp for** distribuye las iteraciones de un bucle entre los hilos de un equipo.

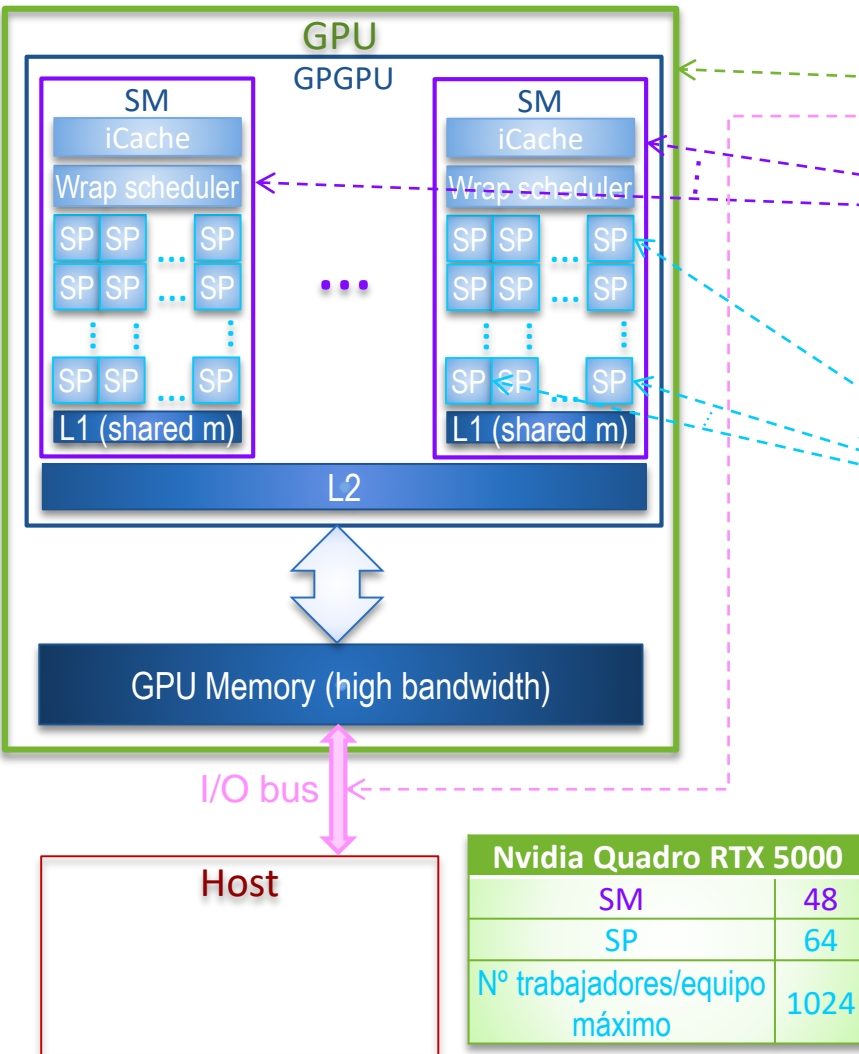
Construcciones/directivas y hardware

daxpyz_off.c

$$z_i = a \times x_i + y_i$$

```
...
init(x,y);
...
#pragma omp target \ //delimita trabajo para coprocesador
map(to:N,alpha,x[:N],y[:N]) map(from:z[:N])
{
    #pragma omp teams \ //crea una liga de equipos de trabajo
    num_teams(nteams) thread_limit(mthreads)
    {
        int s_block = N / omp_get_num_teams();
        #pragma omp distribute //reparte trabajo entre equipos
        for (i = 0; i < N; i += s_block) {
            #pragma omp parallel //crea los trabajadores de los equipos
            {
                #pragma omp for //reparte trabajo entre trab./equipo
                for (int j=i; j<i+s_block; j++) {
                    z[j] = alpha * x[j] + y[j];
                }
            }
        }
    }
    print_results(N,z);
    ...
    #pragma omp target \ //delimita trabajo para coprocesador
    map(to:N,x[:N],y[:N]) map(tofrom:z[:N])
    {...}
}
```

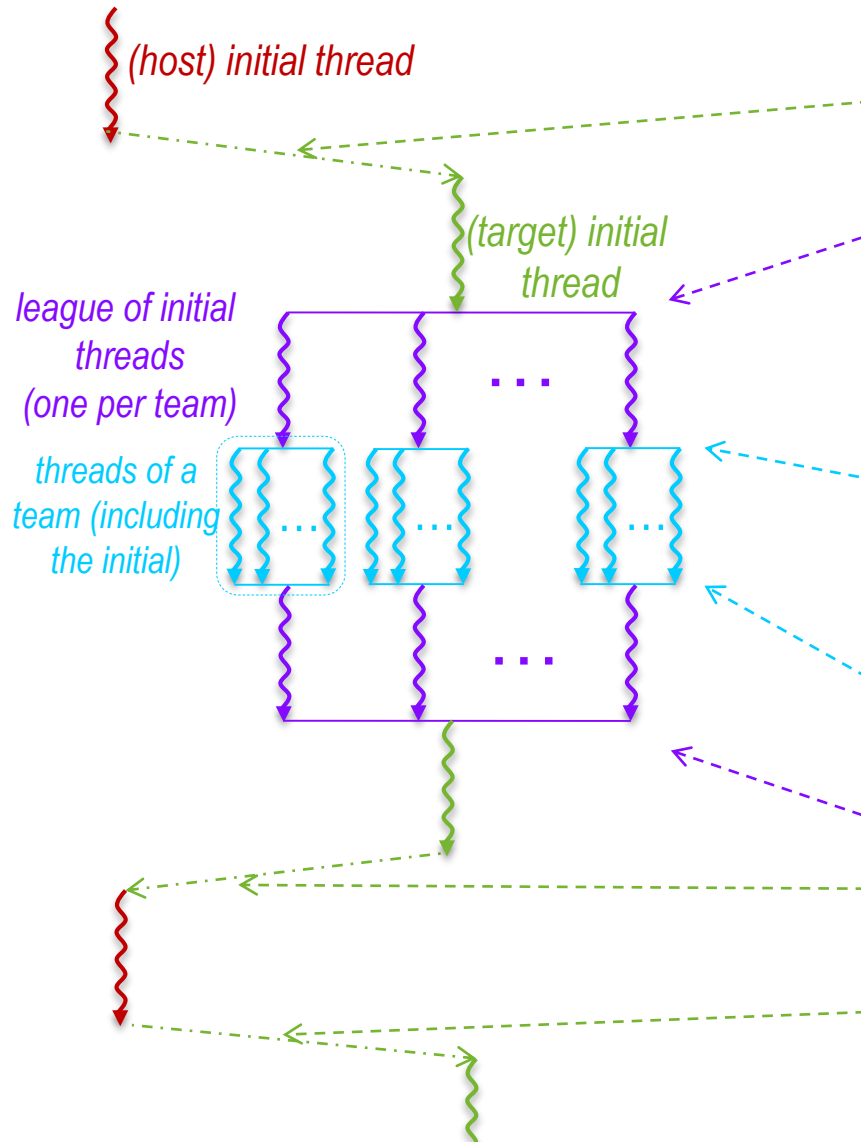
Elemento	OpenMP
coprocesador	<i>target device</i>
trabajo coprocesador	<i>target task</i>
liga de equipos	<i>league</i>
equipo de trabajadores	<i>team</i>
trabajador	<i>thread</i>



Directivas y flujos de instrucciones

daxpyz_off.c

$$z_i = a \times x_i + y_i$$



```
...
init(x,y);
...
#pragma omp target \ //delimita trabajo para coprocesador
map(to:N,alpha,x[:N],y[:N]) map(from:z[:N])
{
    #pragma omp teams \ //crea una liga de equipos de trabajo
    num_teams(nteams) thread_limit(mthreads)
    {
        int s_block = N / omp_get_num_teams();
        #pragma omp distribute //reparte trabajo entre equipos
        for (i = 0; i < N; i += s_block) {
            #pragma omp parallel //crea trabajadores/equipo
            {
                #pragma omp for //reparte trabajo entre trab./equipo
                for (int j=i; j<i+s_block; j++) {
                    z[j] = alpha * x[j] + y[j];
                }
            }
        }
    }
    print_results(N,z);
    ...
    #pragma omp target \ //delimita trabajo para coprocesador
    map(to:N,x[:N],y[:N]) map(tofrom:z[:N])
    {...}
}
```

Elemento	OpenMP
coprocesador	<i>target device</i>
trabajo coprocesador	<i>target task</i>
liga de equipos	<i>league</i>
equipo de trabajadores	<i>team</i>
trabajador	<i>thread</i>

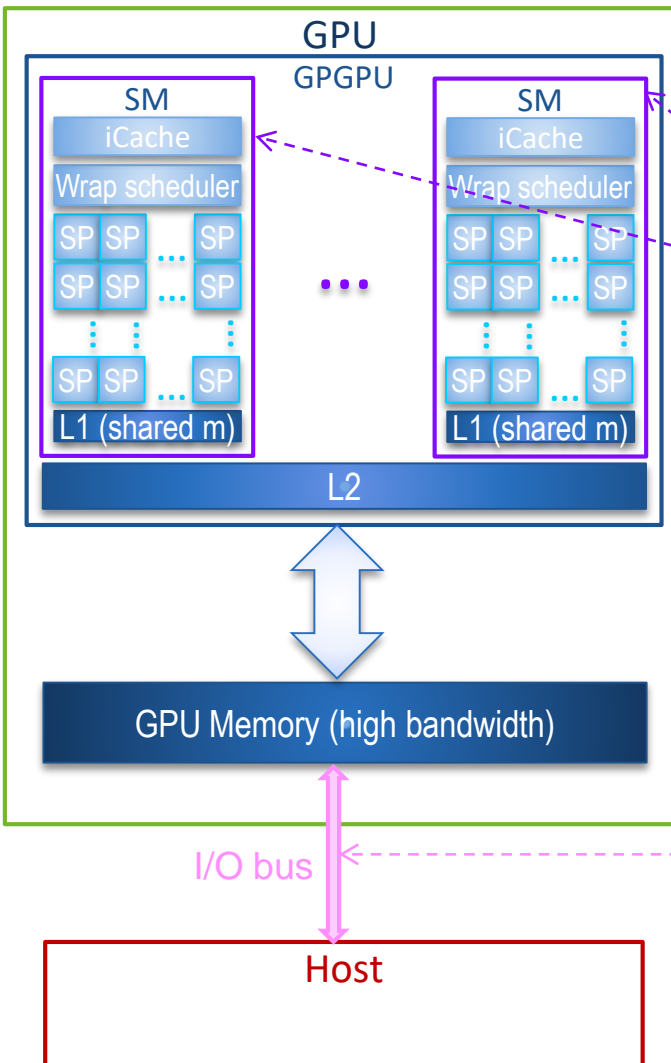
host

coprocesador

host coproc.

Combinar directivas

daxpyz_off2.c



```
...
init(x,y);
...
#pragma omp target teams \
num_teams(nteams) thread_limit(mthreads) \
map(to:N,alpha,x[:N],y[:N]) map(from:z[:N])
{
#pragma omp distribute parallel for
for (i = 0; i < N; i++) {
    z[i] = alpha * x[i] + y[i];
}
}
print_results(N,z);
...
#pragma omp target\ //delimita trabajo para coprocesador
map(to:N,x[:N],y[:N]) map(tofrom:z[:N])
{...}
```

host

device

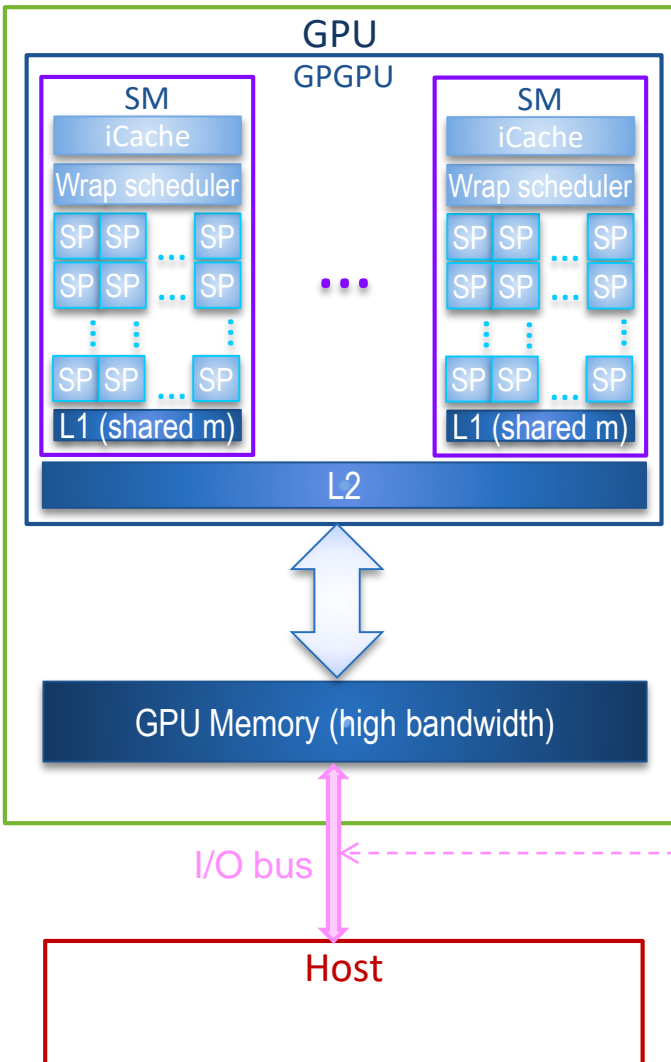
host

device

➤ Más trabajo para la herramienta de programación

Combinar directivas II

daxpyz_off3.c



```
...  
init(x,y);  
...  
#pragma omp target teams distribute parallel for\  
num_teams(nteams) thread_limit(mthreads) \  
map(to:N,alpha,x[:N],y[:N]) map(from:z[:N])  
{  
    for (i = 0; i < N; i++) {  
        z[j] = alpha * x[j] + y[j];  
    }  
}  
print_results(N,z);  
...  
#pragma omp target //delimita trabajo para coprocesador  
map(to:N,x[:N],y[:N]) map(tofrom:z[:N])  
{...}
```

host

device

host

device

- Más trabajo para la herramienta de programación

Contenidos

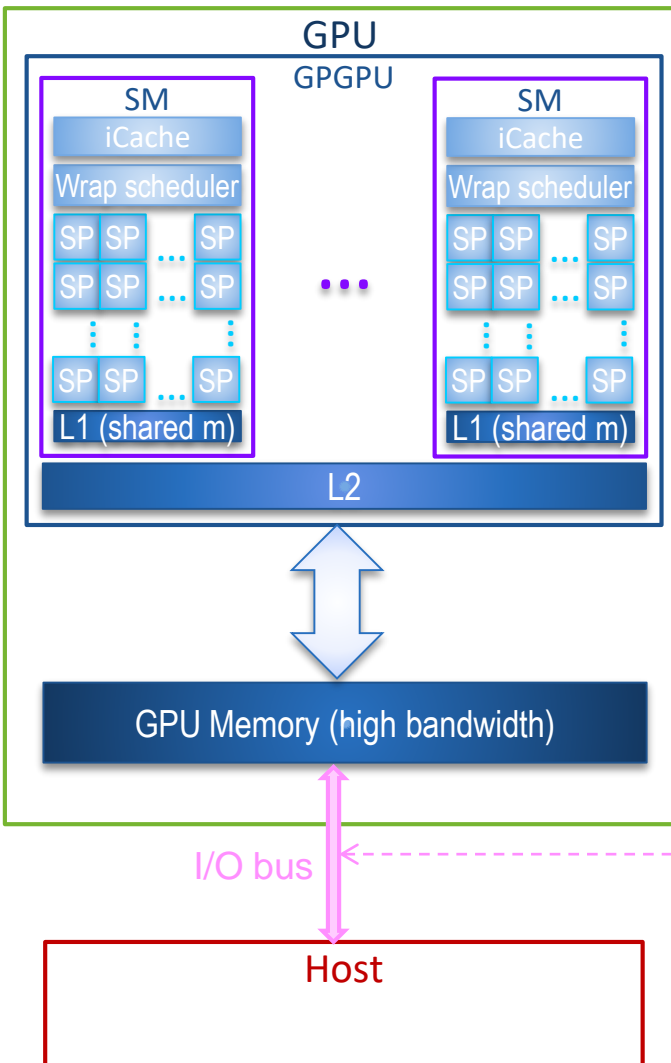
- OpenMP 5
- Coprocesador en atcgrid
- Arquitectura CPU + coprocesador
- Construcciones/Directivas para ejecutar código en coprocesadores
- Construcciones/Directivas target, teams, distribute, parallel y for
 - Combinar construcciones/directivas
- **Construcción/Directiva target data**
- Construcciones/Directivas target enter data y target exit data
- Cláusulas
- Variables de control y funciones

Construcción target data

TYPES		Executable				Declarative
Devices		target, target data			target enter data/ target exit data, target update	declare target/end declare target, declare target
Teams		teams	distribute			
Threads	Parallel	parallel				
	Work-sharing	single	for			
		sections				
	Synchroni- zation	critical*		atomic	barrier, flush*	
TYPES		With structure block	With an associated loop	With a statement	Stand-alone	With declaration- definition of variables, functions

- **#pragma omp target data:** crea un ámbito de datos de dispositivo

Construcción target data: crea un ámbito de datos de dispositivo



```
...
init(x,y);
...
#pragma omp target data \
map(to:N,alpha,x[:N],y[:N]) map(from:z[:N])
{
    #pragma omp target teams distribute parallel for \
    num_teams(nteams) thread_limit(mthreads)
    for (i = 0; i < N; i++) {
        z[i] = alpha * x[i] + y[i];
    }

    #pragma omp target
    {...}
}
```

daxpyz_off4.c

host

device

- Ámbito de datos compartido por varios targets (2 en ej.)
- **Target data** reserva espacio en el dispositivo para las variables en **map**, inicializa aquellas con **to**, y transfiere al host el contenido de aquellas con **from** cuando termine la ejecución de los `targets` que engloba.

Contenidos

- OpenMP 5
- Coprocesador en atcgrid
- Arquitectura CPU + coprocesador
- Construcciones/Directivas para ejecutar código en coprocesadores
- Construcciones/Directivas target, teams, distribute, parallel y for
 - Combinar construcciones/directivas
- Construcción/Directiva target data
- **Construcciones/Directivas target enter data y target exit data**
- Cláusulas
- Variables de control y funciones

Directivas target enter data, target exit data y target update

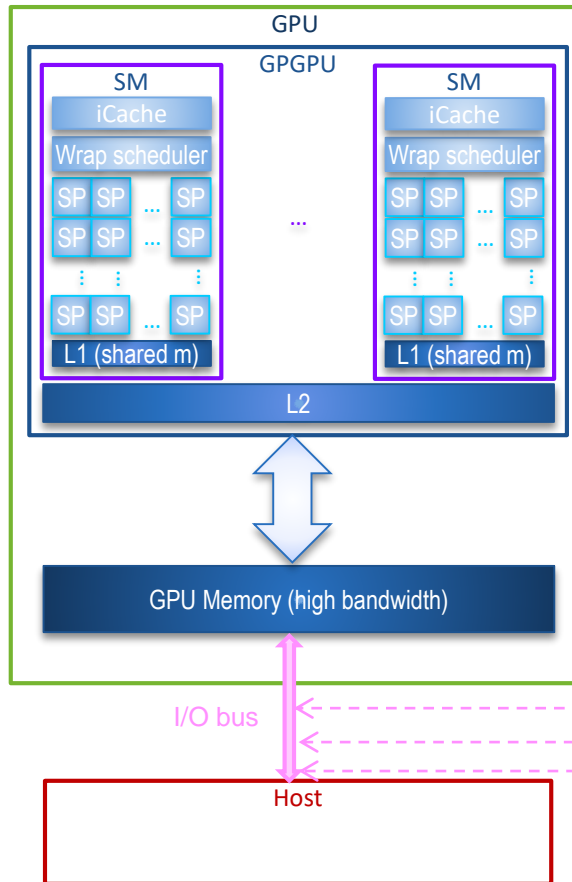
TYPES		Executable				Declarative
Devices		target, target data			target enter data/ target exit data, target update	declare target/end declare target, declare target
Teams		teams	distribute			
Threads	Parallel	parallel				
	Work-sharing	single	for			
		sections				
	Synchroni- zation	critical*		atomic	barrier, flush*	
TYPES		With structure block	With an associated loop	With a statement	Stand-alone	With declaration- definition of variables, functions

- **#pragma omp target enter data:** mapea variables a un ámbito de datos de coprocesador (reserva espacio variables en el coprocesador)
- **#pragma omp target exit data:** desmapea variables de un ámbito de datos de coprocesador
- **#pragma omp target update:** actualizar variables (host->coprocesador, host<-coprocesador)

Directivas target enter data, target exit data y target update

$$z_i = a \times x_i + b \times y_i$$

daxpbyz32_off.c



```
//Calcula  $z = a \cdot x + b \cdot y$  (x, y, z vectores dinámicos float, a y b escalares)
```

```
...
hostlee(N,a,b);
hostreserva(x,y,z); hostinicia(x); p = a;
t1 = omp_get_wtime();
#pragma omp target enter data map(to:N,p,x[:N]) \
map(alloc:z[:N],y[0:N])
t2 = omp_get_wtime();
#pragma omp target teams distribute parallel for
for (int i = 0; i < N; i++) z[i] = p * x[i];
t3 = omp_get_wtime();
hostinicia(y); p = b;
t4 = omp_get_wtime();
#pragma omp target update to(p, y[:N])
t5 = omp_get_wtime();
#pragma omp target teams distribute parallel for
for (int i = 0; i < N; i++) z[i] = z[i] + p * y[i];
t6 = omp_get_wtime();
#pragma omp target exit data map(delete:N,p,x[:N],\
y[0:N]) map(from: z[:N])
t7 = omp_get_wtime();
...
hostprint_result(N,z,t1-t0,t2-t1,t3-t2,t4-t3,t5-t4,t6-
t5,t7-t6,t7-t0);
...
```

Construcción declare target

TYPES		Executable				Declarative
Devices		target, target data			target enter data/ target exit data, target update	declare target/ end declare target, declare target
Teams		teams	distribute			
Threads	Parallel	parallel				
	Work-sharing	single	for			
		sections				
	Synchroni- zation	critical*		atomic	barrier, flush*	
TYPES		With structure block	With an associated loop	With a statement	Stand-alone	With declaration- definition of variables, functions

■ #pragma omp declare target:

- Solo para variables globales y funciones.
- Crea versiones en el coprocesador para variables y funciones, y asigna almacenamiento en el dispositivo.

#pragma omp declare target

declarations-definition-seq

#pragma omp end declare target

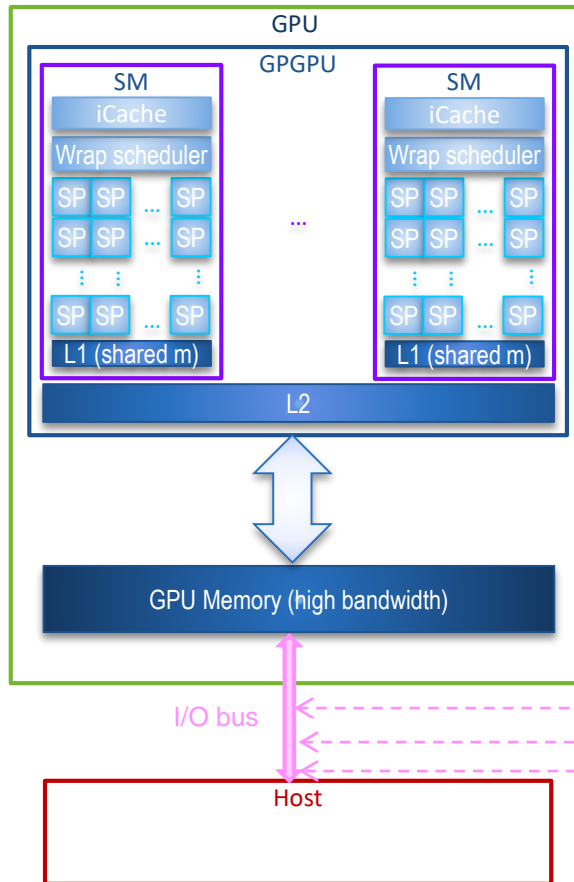
#pragma omp declare target (*extended-list*)

#pragma omp declare target *clause* [*,* *clause* ...]

Directiva declare target

$$z_i = a \times x_i + b \times y_i$$

daxpbyz32_off.c



```
//Calcula  $z = a \cdot x + b \cdot y$  (x, y, z vectores globales float, a y b escalares float)
...
#define MAX 50331648 //100663296
#pragma omp declare target
    float x[MAX], y[MAX], z[MAX], p;  int N;
#pragma omp end declare target
int main(int argc, char **argv) {
    ...
    hostlee(N,a,b);
    hostinicia(x); p = a;
    t1 = omp_get_wtime();
    #pragma omp target update to(N, p, x[:N])
    t2 = omp_get_wtime();
    #pragma omp target teams distribute parallel for
    for (int i = 0; i < N; i++) z[i] = p * x[i];
    t3 = omp_get_wtime();
    hostinicia(y); p = b;
    t4 = omp_get_wtime();
    #pragma omp target update to(p, y[:N])
    t5 = omp_get_wtime();
    #pragma omp target teams distribute parallel for
    for (int i = 0; i < N; i++) z[i] = z[i] + p * y[i];
    t6 = omp_get_wtime();
    #pragma omp target update from(z[:N])
    t7 = omp_get_wtime();
    ...
    hostprint_result(N,z,t1-t0,t2-t1,t3-t2,t4-t3,t5-t4,t6-t5,t7-t6,t7-t0);
    ...
}
```


Contenidos

- OpenMP 5
- Coprocesador en atcgrid
- Arquitectura CPU + coprocesador
- Construcciones/Directivas para ejecutar código en coprocesadores
- Construcciones/Directivas target, teams, distribute, parallel y for
 - Combinar construcciones/directivas
- Construcción/Directiva target data
- Construcciones/Directivas target enter data y target exit data
- **Cláusulas**
- Variables de control y funciones

Cláusulas que se van a utilizar en el bloque práctico

Tipo	Clause	target	teams	distribute	parallel	for	target data	target enter data	target exit data	target update	declare target (extended-list)
Dispositivo	device (integer-expression) (1)	X					X	X	X		
Control nº threads	thread_limit (integer-expression)		X								
	num_teams (upper-bound)		X								
Control ámbito	reduction (reduction-identifier: list)		X		X	X					
Compartición datos dispositivo	map ([map-type:] list item)	X					X	X	X		

- (1): se puede usar una vez
- **list**: lista de variables separadas por comas
- **list item**: pueden ser variables o secciones de vectores o matrices
- **map-type**: puede ser `alloc`, `to`, `from`, `tofrom`, `release`, `delete`
 - Por defecto, en OpenMP 4.0 se usa **tofrom**, a partir de OpenMP 4.5 `firstprivate`.

Contenidos

- OpenMP 5
- Coprocesador en atcgrid
- Arquitectura CPU + coprocesador
- Construcciones/Directivas para ejecutar código en coprocesadores
- Construcciones/Directivas target, teams, distribute, parallel y for
 - Combinar construcciones/directivas
- Construcción/Directiva target data
- Construcciones/Directivas target enter data y target exit data
- Cláusulas
- **Variables de control y funciones**

Variables de entorno relacionadas con coprocesadores



Variable de control	Ámbito	Valor (valor inicial)	¿Qué controla?	Consultar /Modificar
<i>default-device-var</i>	entorno de datos	Es un entero no negativo (depende de la implementación)	Nº de dispositivo a utilizar por defecto en las construcciones (directivas) de dispositivo	sí(f) /sí(ve,f)
<i>target-offload-var</i>	global	mandatory disabled default (default)	Controla la descarga de código a dispositivos externos	no /sí(ve)
<i>team-size-var</i>	team	(one)	Tamaño del equipo actual. Una copia por entorno de datos	sí(f) /no
<i>nteam-var</i>	dispositivo	(zero)	Nº de equipos que solicitará una región teams	sí(f) /sí(ve,f)
<i>teams-thread-limit-var</i>	dispositivo	(zero)	Nº máximo de threads en un team	sí(f) /sí(ve,f)

v5.1 no disponible en nvc

Variables de entorno relacionadas con descarga de código a dispositivos externos

Variable de control	Variable de entorno para inicializar valor	Función para modificar	Función para leer
<i>default-device-var</i>	OMP_DEFAULT_DEVICE	omp_set_default_device()	omp_get_default_device()
<i>target-offload-var</i>	OMP_TARGET_OFFLOAD		
<i>team-size-var</i>			omp_get_num_threads()
<i>ntteams-var</i>	OMP_NUM_TEAMS	omp_set_num_teams()	omp_get_max_teams()
<i>teams-thread-limit-var</i>	OMP_TEAMS_THREAD_LIMIT	omp_set_teams_thread_limit()	omp_get_teams_thread_limit()

v5.1 no disponible en nvc

Otras rutinas del entorno de ejecución

- `omp_get_team_num()`
 - Devuelve al *thread* el identificador del *team* al que pertenece
- `omp_get_num_teams()`
 - Devuelve el total de *teams* en un región
- `omp_get_num_devices()`
 - Devuelve el número de coprocesadores disponibles en el nodo

Funciones relacionadas con ejecución en coprocesadores

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
#define MAX 33554432
int inf[MAX][4];

int main(int argc, char **argv) {
    if (argc < 4) { printf("Faltan nº de iteraciones bucle, nº de teams o nº de threads/teams");
                    exit(-1);}
    int N = atoi(argv[1]); int nteams = atoi(argv[2]); int mthreads = atoi(argv[3]);
    printf("Hay %d dispositivo(s) además del host \n ", omp_get_num_devices());
    printf("Nº de núcleos lógicos en CPU=%d\n", omp_get_num_procs());
    #pragma omp target teams distribute parallel for map(from:inf[:N][4]) map(to:N) \
        num_teams(nteams) thread_limit(mthreads)
        for (i = 0; i < N; i++) {
            inf[i][0] = omp_get_thread_num();
            inf[i][1] = omp_get_num_threads();
            inf[i][2] = omp_get_team_num();
            inf[i][3] = omp_get_num_teams();
        }
    for (int j=0; j < N; j++)
        printf("Iteracción %d, en thread %d/%d del team %d/%d\n",j,inf[j][0],inf[j][1],inf[j][2],in
f[j][3]);
    return 0;
}
```