

Cats

Paradigmi di programmazione e sviluppo

Andrea Rettaroli

0000977930

andrea.rettaroli@studio.unibo.it

1 Maggio 2023

Indice

1	Introduzione	4
2	Cats	5
2.1	Storia	5
2.2	Costrutti Matematici	6
2.2.1	Laws	7
2.2.2	Semigroup	7
2.2.3	Monoidi	7
2.2.4	Funtori	8
2.2.5	Apply	9
2.2.6	Applicative	10
2.2.7	Monadi	11
2.3	Typeclass	13
2.4	Caratteristiche e struttura	14
2.4.1	Perchè Cats	14
2.4.2	Caratteristiche	14
2.4.3	Struttura	15
3	Cats-Effect	16
3.1	Storia	16
3.2	Cos'è Cats-Effect	16
3.3	Side Effect	17
3.4	Elementi Principali	17
3.4.1	IO	17
3.4.2	Fibers	18
3.5	Stile monadico	19
3.6	TypeClasses	20
3.6.1	MonadCancel	22
3.6.2	Spawn	23
3.6.3	Unique	27
3.6.4	Clock	27
3.6.5	Concurrent	28
3.6.6	Temporal	28
3.6.7	Sync	28

3.6.8 Async	28
-----------------------	----

Elenco delle figure

3.1	Gerarchia type classes in Cats-effect 3.	21
-----	--	----

Capitolo 1

Introduzione

Il progetto che si intende sviluppare è un'indagine accurata e approfondita sulla libreria **Cats**, sia dal punto di vista teorico che pratico. Lo scopo principale è quello di evidenziare i motivi per cui la libreria che fornisce astrazioni per linguaggi funzionali nel linguaggio Scala viene utilizzata. Inoltre, si presta particolare attenzione ai meccanismi relativi alla concorrenza, all'I/O e alla gestione delle risorse, utilizzando il supporto di Cats-Effect, una libreria funzionale per la gestione dei side-effect e delle operazioni asincrone.

La libreria in questione offre numerosi vantaggi, come la capacità di gestire in modo efficiente il multithreading e l'asincronia, nonché di garantire la scalabilità delle applicazioni. Questo la rende una scelta ideale per la realizzazione di applicazioni distribuite e altamente concorrenti. Grazie all'utilizzo di Cats-Effect, la libreria offre una grande flessibilità nella gestione delle risorse, permettendo di ottimizzare le prestazioni e di evitare la comparsa di effetti collaterali indesiderati.

Per dimostrare l'utilità e la versatilità di questa libreria, il progetto prevede la presentazione di numerosi esempi di codice, illustrando le funzionalità principali della libreria e mostrando come queste possano essere utilizzate per risolvere problemi comuni nello sviluppo di applicazioni. Verranno condotti esperimenti più approfonditi, che consentiranno di esplorare le funzionalità avanzate della libreria e di comprendere meglio le modalità di utilizzo.

Infine, come parte del progetto, verranno realizzate delle RestAPI con Cats-Effect, dimostrando così come la libreria possa essere utilizzata in modo pratico per lo sviluppo di applicazioni web. Le RestAPI saranno una dimostrazione pratica delle capacità della libreria. In sintesi, il progetto si propone di approfondire la libreria in questione, mostrandone le funzionalità principali e dimostrando come possa essere utilizzata per risolvere problemi comuni e caratteristici nello sviluppo di applicazioni.

Capitolo 2

Cats

2.1 Storia

La libreria Cats è nata nel 2014, grazie all’iniziativa di un gruppo di sviluppatori di software funzionale, tra cui Michael Pilquist, Travis Brown, Lars Hupel e altri. Essi hanno avvertito la necessità di creare una libreria che potesse fornire un’implementazione consistente e componibile dei concetti fondamentali della programmazione funzionale.

Cats è stata ispirata dalla libreria Scalaz, una libreria di supporto per la programmazione funzionale in Scala, sviluppata da Tony Morris e dagli altri membri della comunità Scalaz. Tuttavia, rispetto a Scalaz, Cats è stata progettata con un’attenzione maggiore alla modularità e alla compatibilità con altre librerie di Scala.

Il nome "Cats" è un acronimo di "Category Theory Scala", in riferimento alla teoria delle categorie, una branca della matematica che fornisce un linguaggio formale per la descrizione di concetti astratti e relazioni tra di essi. La teoria delle categorie è stata una fonte di ispirazione per la progettazione di Cats, in quanto essa offre un’astrazione potente e componibile per i concetti fondamentali della programmazione funzionale.

Negli anni successivi alla sua nascita, Cats ha avuto un crescente successo all’interno della comunità di sviluppatori Scala, diventando una delle librerie più utilizzate per la programmazione funzionale. Grazie alla sua architettura modulare e alla compatibilità con altre librerie di Scala, essa ha consentito lo sviluppo di applicazioni altamente performanti, robuste e scalabili, permettendo di sfruttare al massimo le potenzialità della programmazione funzionale.

Ad oggi, Cats è una libreria molto utilizzata dalle grandi aziende di sviluppo software che adottano la programmazione funzionale in Scala. Ad esempio, Twitter utilizza Cats all’interno della propria infrastruttura di servizi, sfruttando le funzionalità di concorrenza e di gestione delle risorse per sviluppare applicazioni altamente performanti e scalabili. In particolare, Twitter ha sviluppato una libreria di supporto chiamata "Finagle", che si basa su Cats e su

altre librerie di Scala, per fornire un'architettura di servizi distribuiti altamente efficiente e affidabile.

Anche la società di consulenza tecnologica Netflix utilizza Cats all'interno della propria piattaforma di streaming video, sfruttando le funzionalità di gestione delle risorse e di concorrenza per garantire prestazioni elevate e stabili.

Oltre alle grandi aziende, anche molte startup e imprese di medie dimensioni utilizzano Cats per lo sviluppo di applicazioni web, servizi backend e strumenti di analisi dati. Grazie alla sua architettura modulare e alla flessibilità, Cats è in grado di soddisfare le esigenze di una vasta gamma di applicazioni e di ambienti di sviluppo.

Essa fornisce un'ampia gamma di funzionalità e costrutti, che consentono di scrivere codice più conciso, espressivo e robusto permettendo astrazioni per la programmazione funzionale fornendo supporti per la gestione dell'I/O e della concorrenza. Una delle funzionalità principali di Cats è la gestione degli side-effect e delle operazioni asincrone, che è ottenuta attraverso l'utilizzo di tipi di dati funzionali come i Functor, i Monoidi, le Applicative che approfondiremo in seguito. Questi tipi di dati consentono di gestire i side-effect e le operazioni asincrone in modo sicuro e componibile. Cats offre una serie di costrutti e funzionalità utili per la gestione delle collezioni di dati, tra cui mappe, insiemi, sequenze e stream. Questi costrutti consentono di manipolare le collezioni di dati in modo elegante e funzionale, fornendo numerosi metodi e funzioni per la trasformazione, l'ordinamento e l'aggregazione dei dati. Inoltre, fornisce anche una serie di funzionalità per la gestione delle eccezioni, compresa la gestione degli errori e la loro propagazione in modo sicuro e componibile. La libreria offre un supporto completo per la programmazione generica, consentendo di scrivere codice parametrico e riutilizzabile. Cats contiene un'ampia gamma di funzionalità per la programmazione asincrona, tra cui il supporto per la gestione degli eventi, la gestione delle risorse e la concorrenza. Queste funzionalità consentono di scrivere applicazioni altamente performanti e scalabili, sfruttando al massimo le capacità di Scala e della programmazione funzionale.

In sintesi, la libreria Cats offre una vasta gamma di funzionalità e costrutti, che consentono di scrivere codice più conciso, espressivo e robusto. Grazie alla sua architettura funzionale, essa è particolarmente adatta per lo sviluppo di applicazioni asincrone, distribuite e altamente concorrenti.

Le seguenti sezioni mostrano i costrutti matematici di programmazione funzionale forniti da Cats.

2.2 Costrutti Matematici

Prima di entrare nel dettaglio di Cats e successivamente Cats-effect è necessario definire brevemente i principali costrutti matematici che vengono utilizzati soprattutto da Cats: semigroup, monoidi, monadi e funtori. Tutti costrutti devono aderire a delle laws per essere definiti in modo opportuno.

2.2.1 Laws

Concettualmente, tutte le classi di tipo sono dotate di leggi. Queste leggi vincolano le implementazioni per un dato tipo e possono essere sfruttate e utilizzate per ragionare sul codice generico.

2.2.2 Semigroup

Si definisce come:

```
trait Semigroup[A] {  
  def combine(x: A, y: A): A  
}
```

Un semigruppato per un certo tipo A ha una singola operazione combine, che prende due valori di tipo A, e restituisce un valore di tipo A. Questa operazione deve essere garantita come associativa. Vale a dire che:

`((a combine b) combine c)`

Deve essere uguale a:

`(a combine (b combine c))`

Associatività significa che la seguente uguaglianza deve valere per qualsiasi scelta di x, y, e z.

`combine(x, combine(y, z)) = combine(combine(x, y), z)`

Infatti supponendo di usare una combine di Int avremmo che:

```
val x = 1  
val y = 2  
val z = 3  
combine(x, combine(y, z)) == combine(combine(x, y), z)  
=> true
```

2.2.3 Monoidi

Si definisce come:

```
trait Semigroup[A] {  
  def combine(x: A, y: A): A  
}  
  
trait Monoid[A] extends Semigroup[A] {  
  def empty: A  
}
```

Monoid estende la classe di tipo Semigroup, aggiungendo un metodo empty al combine del semigroup. Il metodo empty deve restituire un valore che se combinato con qualsiasi altra istanza di quel tipo restituisce l'altra istanza:


```
(combine(x, empty) == combine(empty, x) == x)
```

Infatti, dato che i monoidi estendono i semigroup hanno anche essi l'associativity, avendo però un valore empty hanno anche l'identity definita come: $\text{combine}(x, \text{empty}) = \text{combine}(\text{empty}, x) = x$. Ad esempio:

```
val empty = 0
combine(1, empty) == combine(empty, 1)
=> true
combine(1, empty) == 1
=> true
```

2.2.4 Funtori

Si definisce come:

```
trait Functor[F[_]] {
  def map[A, B](fa: F[A])(f: A => B): F[B]
}
```

Un Functor è una classe di tipo onnipresente che coinvolge tipi che hanno un "foro", cioè tipi che hanno la forma $F[*]$, come Option, List e Future. (Questo è in contrasto con un tipo come Int che non ha foro, o Tuple2 che ha due fori ($\text{Tuple2}[*,*]$)). Il Funtore prevede una singola operazione, denominata map. Per quanto riguarda i funtori sono presenti due laws: Composition e Identity.

Composition

La compositione si definisce come:

```
x.map(f).map(g) = x.map(f.andThen(g))
```

Ovvero mappare con una funzione f poi con una funzione g è l'equivalente di mappare per composizione con f e g. Il seguente codice mostra un esempio di questa equivalenza:

```
val v = List(1, 1)
val g: Int => Int = _ + 1
=> g: Int => Int = <function1>
val f: Int => Int = _ - 1
=> f: Int => Int = <function1>
val l0 = v.map(f).map(g)
=> List(1, 1)
val l1 = v.map(f.andThen(g))
=> List(1, 1)
l0 == l1
=> true
```

Identity

L'identità si definisce come:

```
v.map(x => x) = v
```

Questa equivalenza ci dice che la map applicata ad un oggetto con la sua identità restituisce l'oggetto stesso. Infatti:

```
val v0 = List(1, 1)
val v1 = v0.map(x => x)
=> List(1, 2)
v0 == v1
=> true
```

2.2.5 Apply

Apply estende la classe di tipo Functor (che presenta la funzione map) con una nuova funzione ap. La funzione ap è simile alla map in quanto stiamo trasformando un valore in un contesto; un contesto è F in F[A]; un contesto può essere Option, List or Future per esempio. Tuttavia, la differenza tra ap e map è che per ap la funzione che si occupa della trasformazione è di tipo F[A => B], mentre per la mappa è A => B:

```
trait Functor[F[_]] {
  def map[A, B](fa: F[A])(f: A => B): F[B]
}

trait Apply[F[_]] extends Functor[F]{
  def ap[A, B](ff: F[(A) => B])(fa: F[A]): F[B]
}
```

Ecco le implementazioni di Apply per i tipi Option e List:

```
import cats._

implicit val optionApply: Apply[Option] = new Apply[Option] {
  def ap[A, B](f: Option[A => B])(fa: Option[A]): Option[B] =
    fa.flatMap(a => f.map(ff => ff(a)))

  def map[A, B](fa: Option[A])(f: A => B): Option[B] = fa map f
}

implicit val listApply: Apply[List] = new Apply[List] {
  def ap[A, B](f: List[A => B])(fa: List[A]): List[B] =
    fa.flatMap(a => f.map(ff => ff(a)))

  def map[A, B](fa: List[A])(f: A => B): List[B] = fa map f
}
```

```
}
```

Infatti:

```
val intToString: Int => String = _.toString
intToString: Int => String = <function1>
val v = Apply[Option].map(Some(1))(intToString)
=> Some("1")
```

2.2.6 Applicative

Si definiscono come:

```
trait Applicative[F[_]] extends Apply[F]{
  def ap[A, B](ff: F[A => B])(fa: F[A]): F[B]
  def pure[A](a: A): F[A]
  def map[A, B](fa: F[A])(f: A => B): F[B] = ap(pure(f))(fa)
}
```

Le Applicative estendono Apply aggiungendo un singolo metodo chiamato pure, pure eleva qualsiasi valore nel Funtore Applicative in pratica questo metodo prende qualsiasi valore e restituisce il valore nel contesto del funtore. Ad esempio per Option potrebbe essere Some(-), per Future Future.successful e per List il singleton list.

Quando si parla di applicative la documentazione afferma che ap è un po' complicato da spiegare e motivare, quindi esamineremo una formulazione alternativa ma equivalente tramite product e definisce un Applicativa come:

```
trait Applicative[F[_]] extends Functor[F] {
  def product[A, B](fa: F[A], fb: F[B]): F[(A, B)]

  def pure[A](a: A): F[A]
}
```

Per quanto riguarda le applicative sono presenti tre laws: Associativity, Left Identity e Right Identity.

Associativity

L'associatività afferma che: indipendentemente dall'ordine in cui si sommano tre valori, il risultato è isomorfo. Infatti:

- $fa.product(fb).product(fc) \sim fa.product(fb.product(fc))$

Con map, questo può essere trasformato in un'uguaglianza con:

- $fa.product(fb).product(fc) = fa.product(fb.product(fc)).map \text{ case } (a, (b, c)) \Rightarrow ((a, b), c)$

Left Identity

Left Identity afferma che: comprimendo un valore a sinistra con unità si ottiene qualcosa di isomorfo al valore originale. Infatti:

- $\text{pure}(()).\text{product}(\text{fa}) \sim \text{fa}$

Come uguaglianza:

- $\text{pure}(()).\text{product}(\text{fa}).\text{map}(_..2) = \text{fa}$

Right Identity

Right Identity afferma che: comprimere un valore a destra con l'unità risulta in qualcosa di isomorfo al valore originale. Infatti:

- $\text{fa}.\text{product}(\text{pure}(())) \sim \text{fa}$

Come uguaglianza:

- $\text{fa}.\text{product}(\text{pure}(())).\text{map}(_..1) = \text{fa}$

2.2.7 Monadi

Si definisce come:

```
trait Monad[F[_]] extends FlatMap[F] with Applicative[F]{
  def flatten[A](ffa: F[F[A]]): F[A]
}
```

Monad estende la Applicative con una nuova funzione flatten. Flatten prende un valore in un contesto annidato (es. $F[F[A]]$ dove F è il contesto) e "unisce" i contesti insieme in modo da avere un unico contesto (es. $F[A]$). Ad esempio:

```
Option(Option(1)).flatten
// res0: Option[Int] = Some(value = 1)
Option(None).flatten
// res1: Option[Nothing] = None
List(List(1),List(2,3)).flatten
// res2: List[Int] = List(1, 2, 3)
```

La seguente è una definizione più completa dell'interfaccia:

```
trait Monad[F[_]] extends FlatMap[F] with Applicative[F]{
  def flatten[A](ffa: F[F[A]]): F[A]
  def flatMap[A, B](fa: F[A])(f: (A) => F[B]): F[B]
  def pure[A](x: A): F[A]
  def tailRecM[A, B](a: A)(f: (A) => F[Either[A, B]]): F[B]
  //Keeps calling f until a scala.util.Right[B] is returned.
}
```

Se `Applicative` è già definita e `flatten` si comporta bene, estendere la `Applicative` a `Monad` è banale. Per fornire la prova che un tipo appartiene alla `Monad` classe type, l'implementazione di `Cats` ci richiede di fornire un'implementazione di `pure` (che può essere riutilizzata da `Applicative`) e `flatMap`. Possiamo usare `flatten` per definire `flatMap`: `flatMap` è una `map` seguito da `flatten`. Al contrario, `flatten` si ottiene solo usando `flatMap` e la funzione di identità $x \Rightarrow x$. Ad esempio `flatMap(_)(x => x)`.

`flatMap` è spesso considerata la funzione principale delle Monadi in `Cats` che segue questa tradizione fornendo implementazioni `flatten` e `map` derivati da `flatMap` e `pure`. La ragione di questo è che il nome `flatMap` ha un significato speciale in scala, in quanto le `for-comprehension` (sequenza di chiamate di uno o più metodi `foreach`, `map`, `flatMap`, ecc..) si basano su questo metodo per concatenare insieme le operazioni in un contesto di monadi.

tailRecM

Oltre a richiedere `flatMap` e `pure`, le Monadi in `Cats` richiedono anche `tailRecM` che codifica la ricorsione monadica `stack safe`, come descritto in `Stack Safety for Free` di Phil Freeman. Poiché la ricorsione monadica è comune nella programmazione funzionale ma non è sicura nello stack sulla JVM, `Cats` ha scelto di richiedere questo metodo per tutte le implementazioni della monade invece che solo un sottoinsieme. Tutte le funzioni che richiedono la ricorsione monadica in `Cats` lo fanno tramite `tailRecM`.

Un esempio di implementazione di `Monad` per `Option` è mostrato qui sotto. Nota la coda ricorsiva e quindi l'implementazione sicura di `tailRecM`.

```
import cats.Monad
import scala.annotation.tailrec

implicit val optionMonad = new Monad[Option] {
  def flatMap[A, B](fa: Option[A])(f: A => Option[B]): Option[B] = fa.flatMap(f)
  def pure[A](a: A): Option[A] = Some(a)

  @tailrec
  def tailRecM[A, B](a: A)(f: A => Option[Either[A, B]]): Option[B] = f(a) match {
    case None          => None
    case Some(Left(nextA)) => tailRecM(nextA)(f) // continue the recursion
    case Some(Right(b))   => Some(b)           // recursion done
  }
}
```

FlatMap

`FlatMap` è una classe di tipo strettamente correlata è identica a `Monad`, meno il metodo `pure`. Infatti in `Cats` `Monad` c'è una sottoclasse di `FlatMap` (da cui ottiene `flatMap`) e `Applicative` (da cui ottiene `pure`).

```

trait FlatMap[F[_]] extends Apply[F] {
  def flatMap[A, B](fa: F[A])(f: A => F[B]): F[B]
}

trait Monad[F[_]] extends FlatMap[F] with Applicative[F]

```

Le law per FlatMap sono solo le leggi di Monad che non menzionano pure. Infatti anche essa è Associativa, Left Identity, Right Identity. Una delle motivazioni per l'esistenza di FlatMap è che alcuni tipi di istanze hanno FlatMap ma non Monad. Un esempio è Map[K, *]. Considera il comportamento di pure per Map[K, A]. Dato un valore di type A, abbiamo bisogno di associarvi qualche arbitrario K ma non abbiamo modo di farlo. Tuttavia, dato che esiste Map[K, A] e Map[K, B] (o Map[K, A => B]), è semplice accoppiare (o applicare funzioni a) valori con la stessa chiave. Quindi Map[K, *] ha un'istanza FlatMap.

2.3 Typeclass

Una Typeclass è un potente strumento utilizzato nella programmazione funzionale per abilitare il polimorfismo ad hoc, più comunemente noto come overloading. Laddove molti linguaggi orientati agli oggetti sfruttano l'ereditarietà per il codice polimorfo, la programmazione funzionale tende verso una combinazione di polimorfismo parametrico (pensa parametri di tipo, come i generici Java) e polimorfismo ad hoc.

Prendiamo come esempio quello di voler costruire un meccanismo di per il calcolo dell'area di alcune forme geometriche, avremo quindi le seguenti classi:

```

// definizione delle case class per le forme geometriche
case class Circle(radius: Double)
case class Square(side: Double)
case class Rectangle(width: Double, height: Double)

```

Ora si può definire la typeclass Area relativa al calcolo dell'area come un trait:

```

// definizione della typeclass Area
trait Area[A] {
  def getArea(a: A): Double
}

```

La typeclass sopra è parametricamente polimorfica perchè viene definita con un tipo **A**, il che significa che si può sostituire A con qualsiasi tipo. Un trait da solo o usato in altro modo non si qualifica come typeclass. Definiamo ora la funzione area che vogliamo rendere rendere poliformica ad-hoc:

```

// definizione della funzione per calcolare l'area polimorfica ad hoc
def area[A](a: A)(implicit area: Area[A]): Double = area.getArea(a)

```

Il primo parametro è di un tipo **A**, il secondo parametro richiede di definire la type variable per il tipo A che dovrebbe essere un sottotipo della typeclass Area definita precedentemente. Definiamo quindi i seguenti sottotipi:

```
// definizione delle istanze della typeclass Area per le forme geometriche

implicit val circleArea: Area[Circle] = new Area[Circle] {
  def getArea(c: Circle): Double = math.Pi * c.radius * c.radius
}

implicit val squareArea: Area[Square] = new Area[Square] {
  def getArea(s: Square): Double = s.side * s.side
}

implicit val rectangleArea: Area[Rectangle] = new Area[Rectangle] {
  def getArea(r: Rectangle): Double = r.width * r.height
}
```

In questo modo si aumenta il range di tipi che il metodo area può gestire, creando il polimorfismo ad-hoc. Ciò è molto importante in quanto il concetto di typeclass è alla base di Cats e Cats-Effect.

2.4 Caratteristiche e struttura

Cats è una libreria che fornisce astrazioni per la programmazione funzionale nel linguaggio di programmazione Scala.

2.4.1 Perché Cats

Scala è un linguaggio con un approccio ibrido che supporta sia la programmazione orientata agli oggetti che quella funzionale il che non lo rende un linguaggio puramente funzionale. La libreria Cats si sforza di fornire astrazioni di programmazione puramente funzionale che siano soprattutto efficienti ed efficaci. L'obiettivo di Cats è fornire una base per un'ecosistema di librerie pure e tipizzate per supportare la programmazione funzionale in applicazioni Scala.

2.4.2 Caratteristiche

In primo luogo, Cats è molto accessibile a nuovi sviluppatori grazie al lavoro svolto per renderla intuitiva e user-friendly. Inoltre, la libreria è caratterizzata da:

- **Accessibilità:** uno dei principi della libreria è quello legato alla trasmissione dei concetti della stessa, la raccolta di successi e fallimenti in questo processo ha portato Cats ad essere e voler continuare ad essere una libreria accessibile e di facile approccio per i nuovi sviluppatori.

- **Minimalità:** la libreria punta ad essere modulare. Per farlo punta su nucleo compatto che contiene solo le typeclasses, il minimo indispensabile di strutture dati necessarie per supportarle e istanze di typeclasses per tali strutture dati e tipi di libreria standard.
- **Documentazione:** il team ritiene che avere molta documentazione sia un obiettivo molto importante in quanto ritenuto un grande passo verso il loro obiettivo di accessibilità. C'è anche un grande sforzo nel documentare molto e in modo chiaro il codice con esempi.
- **Efficienza:** un punto chiave in Cats a cui il progetto tiene molto: mantenere la libreria il più efficiente possibile senza fare a meno di purezza e usabilità. Laddove è necessario trovare il compromesso tra questi due aspetti a volte in contrasto, l'obiettivo è renderlo evidente e ben documentato.

2.4.3 Struttura

La libreria Cats è molto consistente e mette a disposizione molti moduli ricchi di strutture dati e funzionalità, i due moduli di base richiesti sono i seguenti:

- **cats-kernel:** contiene un piccolo insieme di typeclasses
- **cats-core:** contiene la maggior parte delle typeclasses e delle funzionalità core.

Oltre a questi due moduli la libreria si compone di:

- **cats-laws:** Leggi per il test delle typeclass e delle istanze.
- **cats-free:** Strutture libere come la monade libera e supporto alle typeclass.
- **cats-testkit** Libreria per scrivere test sulle istanze typeclass e sulle laws.
- **algebra:** Typeclasses che rappresentano strutture algebriche.
- **alleycats-core:** istanze e classi di senza laws.

Esistono poi altri moduli separati da quelli contenuti nel repository principale di Cats, tra cui Cats-Effect su cui ci si soffermerà particolarmente nel progetto per la gestione della concorrenza, delle risorse e I/O.

Capitolo 3

Cats-Effect

3.1 Storia

Cats-effect è una libreria funzionale per la gestione degli side-effects in Scala, che si basa sui concetti della programmazione funzionale e della teoria delle categorie. Il progetto è stato sviluppato a partire dal 2017 e ha ricevuto una grande attenzione da parte della comunità Scala, diventando uno dei punti di riferimento per la gestione degli side-effects in modo sicuro e componibile. Cats-effect è stato influenzato dalle precedenti libreria come scalaz e monix, ma ha portato nuovi sviluppi in materia di side-effects, come la gestione asincrona e l'astrazione del contesto dell'effetto. Grazie alla sua ampia adozione e alla collaborazione di numerosi sviluppatori, cats-effect è diventato uno strumento fondamentale nella costruzione di applicazioni scalabili e robuste in Scala.

3.2 Cos'è Cats-Effect

Cats Effect è un framework asincrono per la creazione di applicazioni in uno stile puramente funzionale, fornisce uno strumento noto come Monade IO, per catturare e controllare le azioni, chiamate effects, da eseguire in un contesto tipizzato con supporto alla concorrenza e al coordinamento. Gli effects possono essere asincroni (callback-driven) o sincroni (restituiscono direttamente i valori). Cats Effect definisce un insieme di typeclass che definiscono un sistema puramente funzionale.

Ancora più importante è il fatto che: Cats Effect definisce un insieme di typeclasses che definiscono cosa significa essere un sistema di runtime puramente funzionale. Queste astrazioni alimentano un ecosistema fiorente costituito da framework di streaming, livelli di database JDBC, server e client HTTP, client asincroni per sistemi come Redis e MongoDB e molto altro ancora! Inoltre, è possibile sfruttare queste astrazioni all'interno della propria applicazione per sbloccare potenti funzionalità con poche o nessuna modifica del codice, ad esem-

pio risolvere problemi come l'iniezione di dipendenze, canali di errore multipli, stato condiviso tra moduli, tracciamento e altro ancora.

Cats-Effect è quello che viene chiamato un asynchronous framework, ovvero un framework che ti permette di scrivere applicazioni che possono/devono essere asincrone o che traggono un vantaggio dall'effettuare alcune operazioni concorrentemente. Di framework di programmazione asincrona ne esistono diversi, in diversi linguaggi, su JVM abbiamo RxJava, Vert.x, Netty e Akka, mentre in Rust abbiamo ad esempio Tokio . Alcuni di essi, ad esempio Akka e Netty sono implementati usando le ThreadPools, ovvero insiemi di Thread a cui posso "inviare" una computazione ed aspettarmi che uno di quei thread eventualmente esegua quel task e che me ne restituisca il risultato. Cats-effect è un runtime che nasce la gestione di Green Thread (thread che nasce nativamente sulla VM e non sul sistema operativo sottostante), che su JVM è stato di recente implementato grazie a progetto Loom (Loom vuol dire telaio, per correlazione con le fibre), concetto che in rust è stato implementato da tokio e da tokio è stato copiato in Cats-Effect. Entriamo più nel dettaglio del framework esplorandone i suoi costrutti.

3.3 Side Effect

Per definizione una funzione contiene un side-effect se non gode della trasparenza referenziale. Vale a dire una funzione che quando riceve lo stesso parametro in input, restituisce sempre lo stesso valore in output. Quindi una funziona ha un side-effect quando ad esempio modifica una variabile al di fuori del proprio livello di scoping, quando modifica uno dei suoi argomenti, quando scrive su file o quando invoca altre funzioni con side-effects.

3.4 Elementi Principali

Nelle seguenti sezioni definiamo quelli che sono i principali elementi che costituiscono la libreria.

3.4.1 IO

Un IO in Cats-Effect è una struttura dati che rappresenta una descrizione di una computazione sincrona o asincrona con side-effects. Un valore di tipo IO[A] è una computazione che, se valutata, può eseguire side effect prima di restituire un valore di tipo A. I valori IO sono puri e immutabili e quindi preservano la trasparenza funzionale.

```
val num: IO[Int] = IO.pure(1)  //caso in cui non ho side effect

val delayIO: IO[Int] = IO.delay({
  println("Hello World!")
})
10
```

```

}) //viene valuta quando viene chiamata

//può essere anche scritta come:

val v1DelayIO: IO[Int] = IO { //sfruttando apply
  println("Hello World!")
  10
}

```

Ma uno dei aspetti più importanti di IO è che consente lo stile monadico. Infatti IO è anche una Monade in dove ogni riga viene concatenata alla successiva usando l'operatore flatMap, il cui nome in haskell é bind e in typescript chain e spesso viene indicato con `==>`, ad esempio:

```

val p: Person = ???
def getName(person:Person): IO[String] = ???
def getSurname(person:Person): IO[String] = ???

//Possiamo definire la concatenazione di nome e cognome come:

val completeName: IO[String] = getName(p).flatMap(name => getSurname(p)
  .map(surname => s"$name $surname"))

```

Si noti che questo approccio può essere riscritto utilizzando la for-comprehension come segue:

```

val completeName: IO[String] =
  for {
    name    <- getName(p)
    surname <- getSurname(p)
  } yield s"$name $surname"

```

3.4.2 Fibers

Un fiber è l'astrazione di un Green Thread, che su JVM è stato di recente implementato grazie a progetto Loom (Loom vuol dire telaio, per correlazione con le fibre), concetto che in rust è stato implementato da tokio e da tokio è stato copiato in Cats-Effect. Le fibre non sono altro che una implementazione delle API di green thread. L'idea alla base è basata sul fatto che che sono dei thread che puoi istanziare in gran numero e che vengono gestiti da un sistema di schedulazione. Quindi si pongono come un livello di astrazione superiore a quello dei thread e gestiscono le così dette ThreadPools, possiamo paragonarli agli Executors in Java. Un'entità (nel caso di cats-effect il suo runtime) alloca una thread pool (la cui dimensione e tipologia sono scelte secondo una logica

ottimale presente nella libreria) che viene utilizzata come se ogni singolo thread fosse una cpu e su questi thread, lo scheduler presente nel runtime di cats-effect, schedula i "pezzi di programma" o azioni da eseguire. Che forma hanno questi pezzi di programma? Sono degli IO, infatti un fiber esegue un'azione F che è tipicamente un'istanza IO. I thread che necessita il runtime di cats-effect sono vari e si occupano principalmente di:

- gestire i comportamenti e elementi interni, come lo scheduler;
- gestire i IO compute intensive;
- gestire le operazioni bloccanti (come la scrittura su file e le comunicazioni di rete). Il numero di thread in questa thread pool è circa (numero di CPU -1), in modo da gestire al massimo n-1 task bloccanti su n-1 cpu e di riservarne una per lo scheduler.

Gran parte di questa complessità è mascherata dalla libreria e di fatto la libreria ti permette di usare il suo runtime in modo invisibile, è sufficiente creare degli IO e usare flatmap. I fibers sono molto leggeri rispetto ai thread quindi si possono generare milioni di fibers senza influire sulle prestazioni.

3.5 Stile monadico

Nel 1991 Eugenio Moggi, professore di Informatica all'Università degli Studi di Genova, pubblicò un saggio, nel quale considerava l'utilizzo della monade, attraverso la semantica del Lambda calcolo, per gestire gli effetti collaterali, gli input e gli output, le eccezioni ed altro. Le monadi sono un'entità matematica che rispetta determinate leggi, chiamate leggi monadiche, e nella programmazione funzionale le si utilizza molto. Questa pubblicazione ha influito sul lavoro di molti informatici, tra i quali Simon Peyton Jones, il quale, poi le implementerà nel linguaggio puramente funzionale Haskell (al posto di utilizzare delle lazy-list per gestire l'IO). Come abbiamo visto Nella programmazione funzionale, una monade è una struttura che esprime una classe di computazioni concatenabili. Con l'ausilio di questa struttura, è possibile compiere, anche nei linguaggi puramente funzionali, operazioni in sequenza, un po' come avviene nei linguaggi imperativi o procedurali. Infatti, possono essere espresse, con l'ausilio delle monadi, fenomeni come gli effetti collaterali, l'IO, gestione dell'eccezioni.

In Haskell, la classe Monad viene espressa come segue:

```
class Monad m where
  (>>=) :: m a    -> (a -> m b) -> m b
  (>>)  :: m a    -> m b -> m b          -- non strettamente necessaria
  return :: a      -> m a
  fail   :: String -> m a                -- non strettamente necessaria
```

Eugenio Moggi si accorse che una struttura della teoria delle categorie, la monade era molto efficace nel descrivere catene di programmi che potrebbero non terminare e con la caratteristica che il primo programma che si rompe

rompe anche la catena questo perchè le monadi sono un'entità matematica che rispetta determinate leggi, chiamate leggi monadiche, scrivere delle strutture dati monadiche che rispettano queste leggi permette di scrivere programmi in stile monadico, che utilizzando gli operatori che tutte le monadi hanno a disposizione per combinare diversi programmi tra di loro o per applicare funzioni ai valori contenuti al loro interno.

Una diretta conseguenza è l'importanza che assume la monade IO di cats-effect che consente di:

- Controllare l'esecuzione di programmi asincroni, che possono anche produrre side effects, utilizzando un'interfaccia pulita.
- Gestire applicazioni altamente simultanee concorrenti, Cats-effect non è formidabile nel gestire programmi compute intensive, ma eccelle nel gestire programmi che fanno molto I/O di rete o scrittura su più files.
- La concorrenza in IO è costruita con le fibers: un'implementazione dei green thread, come le coroutines sospendibili, gestite a runtime.
- Gestire i cicli di vita delle risorse e garantire che le risorse siano allocate e rilasciate in modo sicuro anche in presenza di eccezioni e interruzioni. La gestione delle risorse è più complessa in applicazioni concorrenti; un piccolo bug potrebbe causare una perdita di dati o persino un deadlock bloccando il sistema.
- scrivere programmi semplici che possono essere composti per formare programmi più complessi, pur mantenendo la capacità di ragionare sul comportamento e sulla complessità. Questo è possibile grazie al fatto che IO è stato costruito come una monade, e quindi puoi usare tutti gli operatori e le proprietà di una monade.

3.6 TypeClasses

La gerarchia delle classi di tipo all'interno di Cats Effect definisce, fondamentalmente, cosa significa essere un effetto funzionale. Questo si traduce nel dire, rispettiamo una serie di regole(laws) che ci dicono cosa significa essere un numero o cosa significa avere un metodo flatMap. Lo schema seguente mostra la gerarchia di type classes di Cats Effects.

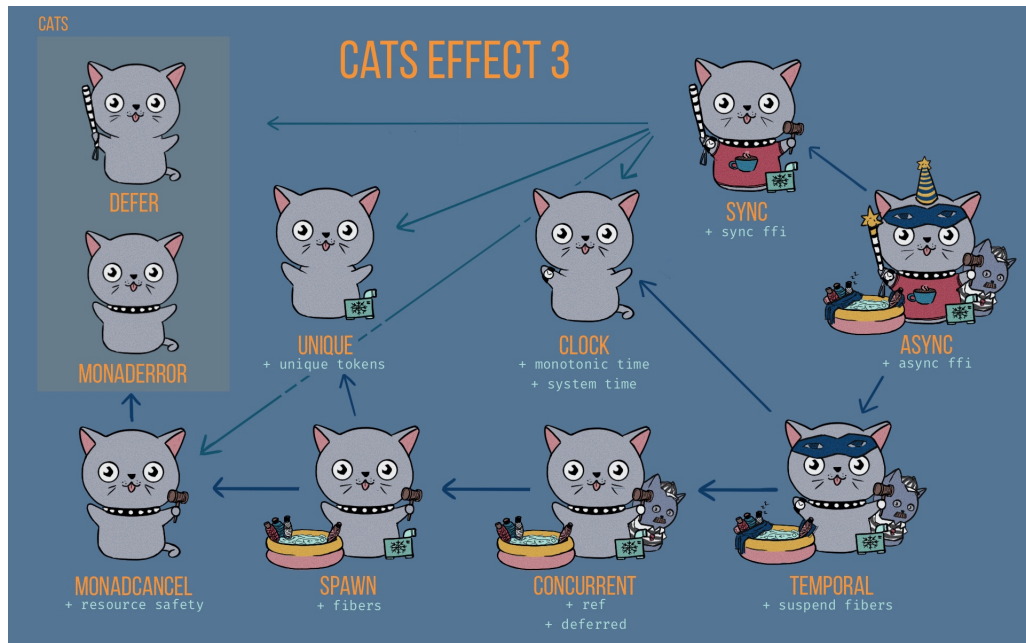


Figura 3.1: Gerarchia type classes in Cats-effect 3.

In generale, le regole per gli effetti funzionali possono essere suddivise nelle seguenti categorie elencate in ordine di potenza crescente :

- Sicurezza e interruzione/cancellazione nell'utilizzo delle risorse;
- Valutazione parallela di side-effects;
- Condivisione dello stato tra processi paralleli;
- Interazioni con il tempo;
- Acquisizione sicura dei side-effect che restituiscono valore;
- Acquisizione sicura dei side-effects che hanno una callback;

Alcune funzionalità sono assunte da Cats Effect ma definite all'interno di Cats e i suoi moduli. Tali capacità sono le seguenti:

- Trasformare il valore all'interno di un effetto mappandolo sopra di esso.
- Inserire un valore in un effetto.
- Comporre più calcoli efficaci insieme in sequenza, in modo tale che ognuno dipenda dal precedente.
- Generare e gestire gli errori.

Nel loro insieme, tutte queste capacità definiscono cosa significa essere un effetto. Ciò ti consente di comprendere e rifattorizzare il tuo codice in base a regole e astrazioni, piuttosto che dover pensare a ogni possibile dettaglio di implementazione e caso d'uso. Inoltre, consente a te e ad altri di scrivere codice molto generico che si compone insieme facendo ipotesi minime. Questa è la base dell'ecosistema Cats Effect. Di seguito vengono mostrate le typeclasses di Cats-effect con le relative API insieme ad esempi di utilizzo anche complessi.

3.6.1 MonadCancel

Tipicamente un fiber termina con tre stati sottotipi di Outcome che sono Succeeded, Errored e Canceled.

```
sealed trait Outcome[F[_], E, A]
final case class Succeeded[F[_], E, A](fa: F[A]) extends Outcome[F, E, A]
final case class Errored[F[_], E, A](e: E) extends Outcome[F, E, A]
final case class Canceled[F[_], E, A]() extends Outcome[F, E, A]
```

Ciò significa che quando si scrive codice sicuro per le risorse, dobbiamo preoccuparci dell'annullamento e delle eccezioni. La typeclass MonadCancel risolve questo problema estendendo MonadError (definito in Cats) per fornire la capacità di garantire il funzionamento dei finalizzatori quando una fibra viene cancellata. Usandolo, possiamo definire effetti che acquisiscono e rilasciano risorse in modo sicuro come ad esempio **bracket** che è l'equivalente di programmazione funzionale di try/finally:

```
openFile.bracket(fis => readFromFile(fis))(fis => closeFile(fis))
```

Bracket fa sì che se viene eseguito openFile verrà di certo eseguito closeFile. Ciò accade anche se readFromFile produce un errore o viene interrotto da qualche altro fiber. Inoltre openFile è atomico: o non viene valutato per niente o viene valutato completamente permettendo di fare calcoli complessi senza temere che qualcosa di esterno si intrometta. Oltre a bracket, MonadCancel fornisce anche un'operazione di livello inferiore, **uncancelable** che consente di eseguire azioni estremamente complesse e sensibili all'annullamento in modo sicuro e componibile. Si pensi ad un blocco di codice protetto da un Semaforo, a cui si deve garantire la mutua esclusione ci si troverebbe in un problema legato all'acquisizione del Semaforo, che è una risorsa, che può anche comportare il blocco del fiber, e quindi potrebbe essere necessario interromperlo dall'esterno. In generale, vorremmo che l'acquisizione delle risorse sia non interrompibile, ma in questo caso particolare si deve consentire l'interruzione, altrimenti potrebbe finire per bloccare la JVM e entrare in uno stato di deadlock del sistema. L'esempio seguente mostra come Uncancelable fornisce una soluzione per raggiungere questo obiettivo:

```
def guarded[F[_], R, A, E](
  s: Semaphore[F],
```

```

alloc: F[R])(
use: R => F[A])(
release: R => F[Unit])(
implicit F: MonadCancel[F, E])
: F[A] =
F uncancelable { poll =>
  for {
    r <- alloc //acquisizione della risorsa r
    // viene utilizzato il metodo poll per eseguire l'operazione di acquisizione
    // del semaforo s in modo cancellabile
    //nel caso in cui viene interrotta viene effettuata la releaseAll per il
    //rilascio della risorsa r
    _ <- poll(s.acquire).onCancel(release(r))
    releaseAll = s.release >> release(r)
    // guarantee fa sì che il rilascio sia sempre garantito, anche in caso
    //di eccezioni o interruzioni durante l'utilizzo della risorsa.
    a <- poll(use(r)).guarantee(releaseAll)
  } yield a
}

```

Abbiamo che l'esecuzione è avvolta in `uncancelable`, il che significa che non dobbiamo preoccuparci che altre fibre ci interrompano nel mezzo di ciascuna di queste azioni. La primissima azione che eseguiamo è `alloc`, che alloca un valore di tipo `R`. Una volta che questo è stato completato con successo, tentiamo di acquisire il `Semaphore`. Se un altro fiber ha già acquisito il semaforo, il fiber corrente potrebbe bloccarsi per un po'. Vogliamo che altre fibre siano in grado di interrompere questo blocco, quindi avvolgiamo l'acquisizione in `poll` che riabilita l'interruzione all'interno di `uncancelable` per tutto ciò che avvolge. Se l'acquisizione del semaforo viene interrotta, ci si vuole assicurare di rilasciare la risorsa `r` utilizzando `onCancel`. Infine si passa all'invocazione dell'azione `use(r)` che indipendentemente dal suo risultato (`successed`, `canceled`, `errored`) fa sì che venga eseguita la `releaseAll` che rilascia l'acquisizione del semaforo e della risorsa.

Un'altra particolarità di `MonadCancel` è la capacità di auto-annullarsi. Per esempio:

```
MonadCancel[F].canceled >> fa
```

Quanto sopra si tradurrà in un auto-annullamento e `fa` non verrà mai eseguita, a condizione che non sia racchiusa in un blocco `uncancelable`.

3.6.2 Spawn

Questa typeclass fornisce un'astrazione simile a `Thread`, che può essere implementata per computazioni parallele. Come già detto in precedenza i `fibers` sono `Green thread`, è infatti possibile averne anche milioni su un'unica macchina. Immaginiamo ad esempio, un'applicazione che implementa un microservizio probabilmente desidererebbe almeno un'azione simultanea per richiesta in un dato

momento, ma se il numero di azioni simultanee è limitato al numero di thread disponibili (che a sua volta è limitato al numero di processori disponibili!), è improbabile che il servizio si ridimensioni particolarmente bene; ad oggi le applicazioni risolvono questo problema attraverso l'uso di thread pool e ad e altre tecniche manuali che sebbene funzionino ragionevolmente bene, sono abbastanza facili da sbagliare e molto limitate in termini di funzionalità che si può costruire su di esse. È necessaria un'astrazione migliore, che consenta al framework e al codice utente di generare semplicemente azioni semantiche secondo necessità (ad esempio per gestire una richiesta in arrivo), mentre il runtime sottostante si occupa della mappatura di tali azioni a thread del kernel reali in un modo ottimale. Prendiamo ad esempio un server che accetta delle connessioni:

```
import cats.effect.{MonadCancel, Spawn}
import cats.effect.syntax.all._
import cats.syntax.all._

trait Server[F[_]] {
  def accept: F[Connection[F]]
}

trait Connection[F[_]] {
  def read: F[Array[Byte]]
  def write(bytes: Array[Byte]): F[Unit]
  def close: F[Unit]
}

def endpoint[F[_]: Spawn](
  server: Server[F])(
  body: Array[Byte] => F[Array[Byte]])
  : F[Unit] = {

  def handle(conn: Connection[F]): F[Unit] =
    for {
      request <- conn.read
      response <- body(request)
      _ <- conn.write(response)
    } yield ()

  val handler = MonadCancel[F] uncancelable { poll =>
    poll(server.accept) flatMap { conn =>
      handle(conn).guarantee(conn.close).start
    }
  }

  handler.foreverM // Gestisce le connessioni in maniera continua
}
```

Per l'handler si utilizza `uncancelable` per evitare perdite di risorse tra quando si ottiene la connessione a quando si imposta la gestione delle risorse. Per ogni connessione la si gestisce con la funzione **handle** e indipendentemente dall'esito la si chiude, successivamente si utilizza `start` per creare un nuovo fiber per ogni richiesta di connessione che arriva.

Cancelation

Il vantaggio di utilizzare i fibers oltre ad essere leggeri è che a differenza dei thread della JVM sono interrompibili. Ciò significa che è possibile utilizzare **cancel** su un fiber in esecuzione per avviare il processo di ripulitura delle risorse allocate e fermarsi. Possiamo verificare questa proprietà con una monade IO come segue:

```
for {  
  target <- IO.println("Catch me if you can!").foreverM.start  
  _ <- IO.sleep(1.second)  
  _ <- target.cancel  
} yield ()
```

Il comportamento di questo codice è il seguente:

- la fibra target stamperà un numero non deterministico di volte la frase "Catch me if you can!"
- quando la fibra principale smette di dormire per un secondo la fibra target viene annullata. Tecnicamente, l'annullamento potrebbe non riflettersi istantaneamente nella fibra target ma appena la fibra target viene cancellata/annullata, la stampa viene interrotta e il programma termina. Utilizzando Thread è impossibile replicare questo esempio senza costruire il proprio meccanismo per l'interruzione. Con fiber per'è già tutto gestito dalla typeclass `Spawn`.

Joining

Di solito quando si eseguono delle operazioni in parallelo si desidera attendere che finiscano, accettare i risultati e andare avanti. L'astrazione dei Thread in Java ha l'operatore `join`, nelle fibre abbiamo qualcosa di simile definito come segue:

```
def both[F[_]: Spawn, A, B](fa: F[A], fb: F[B]): F[(A, B)] =  
  for {  
    fiberA <- fa.start  
    fiberB <- fb.start  
  
    a <- fiberA.joinWithNever  
    b <- fiberB.joinWithNever  
  } yield (a, b)
```

Il metodo **joinWithNever** è un metodo semplificato basato su **join**, che è molto più generale. In particolare, il metodo **Fiber#join** restituisce **F[Outcome[F, E, A]]** (dove E è il tipo di errore per F). Outcome ha la seguente forma:

- Succeeded: contiene un valore di tipo F[A].
- Errored: contiene un valore di tipo E solitamente Throwable.
- Canceled: non contiene niente.

Questi rappresentano i tre possibili stati di terminazione per un fiber e c'è la possibilità di reagire a ciascuno in modo diverso. Ad esempio:

```
fiber.join flatMap {  
  /* In caso di successo */  
  case Outcome.Succeeded(fa) =>  
    fa  
  /* In caso di errore */  
  case Outcome.Errored(e) => ???  
  /* Quando il fiber viene interrotto */  
  case Outcome.Canceled() => ???  
}
```

Il seguente codice è un implementazione di quanto descritto sopra che stampa per 3 secondi Hello I am Fiber A e Hello I am Fiber B e in seguito racchiude un intero in IO:

```
for {  
  fiberA <- (IO.println("Hello I am Fiber A").foreverM.timeoutTo(3.seconds, IO.unit)  
    >> IO.pure(1)).start  
  fiberB <- (IO.println("Hello I am Fiber B").foreverM.timeoutTo(3.seconds, IO.unit)  
    >> IO.pure(1)).start  
  
  /* Attendo il completamento */  
  a <- fiberA.joinWithNever  
  b <- fiberB.join flatMap {  
    case Outcome.Succeeded(fb) => fb  
    case Outcome.Errored(e) => MonadError[IO, Throwable].raiseError(e)  
    /* Nel caso in cui il fiber figlio venga interrotto, si cerca di  
       interrompere l'attuale fiber, se non è possibile si cade in deadlock */  
    case Outcome.Canceled() => MonadCancel[IO].canceled >> Spawn[IO].never  
  }  
  
  _ <- IO.println(s"a: $a, b: $b")  
} yield (a, b)
```

3.6.3 Unique

Unique è una typeclass che genera token univoci. Il suo uso avviene principalmente a basso livello, perchè tipicamente è indatta ad identificare entità a livello di logica di applicazione come UUID. Si definisce come:

```
trait Unique[F[_]] {  
  def unique: F[Unique.Token]  
}
```

L'unicità è garantita dal confronto di uguaglianza tra istanze Unique.Token che non sono serializzabili o convertibili attualmente allocate. Se un token viene liberato dal Garbage Collector quel token può essere riallocato a seguito di una nuova chiamata a unique. La garanzia di unicità è presente solo all'interno di una singola JVM. Entrambe le typeclasses Sync[F] che Spawn[F] estendono Unique[F] poichè entrambe possono creare valori univoci tramite delay e start (i fibers sono sempre unici).

```
delay(new Unique.Token())  
start(new Unique.Token())
```

3.6.4 Clock

Clock è una typeclass che fornisce un sistema analogo a System.nanoTime() e System.currentTimeMillis() per la gestione del tempo. E' definito come:

```
trait Clock[F[_]] {  
  def monotonic: F[FiniteDuration]  
  def realTime: F[FiniteDuration]  
}
```

Il seguente codice mostra un uso di realTime di clock per calcolare il tempo trascorso da un dato momento ad un altro:

```
for {  
  start <- Clock[IO].realTime  
  _ <- IO.sleep(3.seconds)  
  end <- Clock[IO].realTime  
  _ <- IO.println(end - start) // Tempo trascorso in millisecondi => 3000  
} yield ()
```

3.6.5 Concurrent

3.6.6 Temporal

3.6.7 Sync

3.6.8 Async